



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICO-BIOLÓGICAS**  
**MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Inactivación de peroxidasa en brócoli (*Brassica oleracea* L.)  
empleando microondas

**TESIS**

Que presenta  
IBQ. CARLOS ANDRÉS SOLTERO SÁNCHEZ

Para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIA**

**Y**

**TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS**

Directores de Tesis

**DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES**  
**M.C. JORGE AURELIO ZAZUETA NIEBLA**

El presente trabajo fue realizado en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. José de Jesús Caro Corrales y el MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla y la asesoría del Dr. Roberto Gutiérrez Dorado. Carlos Andrés Soltero Sánchez recibió beca por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).



## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

### CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacan, Sinaloa el día 28 del mes enero del año 2019, el (la) que suscribe Carlos Andrés Soltero Sánchez alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 11673117, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de José de Jesús Caro Corrales y cede los derechos del trabajo titulado “Inactivación de peroxidasa en brócoli (*Brassica Oleracea* L.) empleando microondas”, a la Universidad Autónoma de Sinaloa para su difusión, con fines académicos y de investigación por medios impresos y digitales.

La Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México) protege el contenido de la presente tesis. Los usuarios de la información contenida en ella deberán citar obligatoriamente la tesis como fuente, dónde la obtuvo y mencionar al autor intelectual. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'CS', is written above a horizontal line.

M.C. Carlos Andrés Soltero Sánchez

## AGRADECIMIENTOS

En memoria de esos amigos que no están aquí pero que me siguen dando el empuje y las ganas de seguir cumpliendo cada objetivo.

Darle las gracias primero a mis padres: **Juan Soltero** y **Lourdes Sánchez**, por darme valores desde casa, por su infinito cariño y porque durante toda su vida han atravesado muy difíciles momentos para sacar adelante a la familia y jamás me han negado su total apoyo para todas las decisiones que he tomado.

A mis hermanos: **Juan** y **Luis Omar**, con quienes desde casa supimos cómo ayudarnos a ser mejores y hasta el día de hoy siempre han estado al pendiente para sacar adelante todos los objetivos que me he planteado.

A mi novia **Xitlalic**, que desde que empecé la licenciatura ha sabido darme su apoyo, amor y cariño incondicional, aun a distancia.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa**, a la **Facultad de Ciencias Químico-Biológicas** en donde cursé mi licenciatura, y en especial, al programa de posgrado: Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos, por permitirme continuar con mi formación académica y crecer tanto personal como profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por el apoyo económico brindado durante dos años.

A todo el **equipo Posco: Martha, Lidia, Fernanda, Blanca, Claudia, Eslim**, en donde se me dio la oportunidad de realizar una tesis y en donde adquirí gusto por la investigación y donde pasé gratos momentos con quienes ahora considero amigos, un especial agradecimiento

al **Dr. Misael Vega** por haberme aceptado en su equipo y siempre brindarme su apoyo y a **Lidia** quien estuvo muy pendiente de mí en durante toda mi estancia.

A todo el equipo del **Laboratorio de Mediciones Termofísicas: Rosalina, Yessica y Cesar**, quienes me impartieron clases, me brindaron su apoyo en todo momento para la realización de este proyecto y su sincera amistad y con quienes, además, compartí muy gratos momentos. Un especial agradecimiento a **César** porque hasta para la más mínima duda siempre tenía la respuesta. Agradezco, a mis compañeros de laboratorio: **Agustín, Julio, Luis Carlos, Rogelio, Felicitas, Olivia, Guillermo y Benjamín**, quienes estuvieron brindando su apoyo, con quienes me llevo muy buenos recuerdos y una bonita amistad.

Al **Dr. José de Jesús Caro Corrales** quien a través de su gran conocimiento y sencillez brinda a todo el equipo del laboratorio de mediciones termofísicas un enorme soporte para sacar adelante todos los proyectos propuestos en el laboratorio. Como director de tesis, siempre estuvo pendiente tanto en lo técnico como en lo teórico, no dejando que algún problema presentado fuera un obstáculo para concluir el trabajo, sin duda, fue un honor haber estado bajo su dirección. Gracias por dejarme ser parte del equipo y por su sincera amistad.

Al **MC. Jorge Zazueta Niebla** gracias por la orientación, el apoyo y la dirección dada al trabajo. Gracias por todo ese conocimiento transmitido en pocas palabras pero que, con certeza, siempre corregían y mejoraban cada aspecto del proyecto.

Al **Dr. Roberto Gutiérrez Dorado** que siempre hallaba un espacio de su tiempo para atender todas las dudas que tuve de forma clara y precisa, y quien me orientó bastante en materia estadística.

A todos mis compañeros y amigos de la **generación 2016**, con quienes desde un inicio hicimos equipo para mejorar y aprender uno del otro. Gracias por todas las convivencias, todas esas pláticas y todo el apoyo brindado.

## ÍNDICE

<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>XII</b>
<b>I RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>II INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>III REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>7</b>
<b>A BRÓCOLI.....</b>	<b>7</b>
1. Generalidades .....	7
2. Valor nutricional.....	9
3. Poscosecha.....	11
4. Importancia.....	14
5. Producción .....	14
a Mundial.....	14
a Nacional.....	16
<b>B CONGELADO.....</b>	<b>16</b>
1. Generalidades .....	16
<b>C ESCALDADO.....</b>	<b>18</b>
1. Generalidades .....	18
2. Importancia.....	19
a Inactivación de Peroxidasa (POD) .....	21
b Retención de Vitamina C.....	24

3.	Escaldado tradicional.....	25
4.	Efecto sobre atributos de calidad.....	27
5.	Tendencias y desarrollo del escaldado térmico .....	28
D	MICROONDAS .....	29
1.	Generalidades .....	29
2.	Fundamento .....	31
a	Interacciones dipolares .....	31
b	Interacciones iónicas.....	32
c	Composición de alimentos.....	32
d	Propiedades dieléctricas .....	32
3.	Secciones de un microondas.....	33
4.	Aplicaciones .....	35
5.	Escaldado por microondas.....	36
<b>IV</b>	<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>38</b>
<b>V</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>40</b>
A	OBJETIVO GENERAL.....	40
B	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	40
<b>VI</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
A	MATERIALES.....	41
1.	Materia prima .....	41
a	Baño María .....	41
b	Microondas .....	41

c	Termopares .....	42
<b>B</b>	<b>MÉTODOS</b> .....	<b>42</b>
1.	Escaldado Tradicional .....	42
2.	Escaldado con microondas .....	42
3.	Escaldado con microondas sin inmersión.....	43
4.	Evaluación de los parámetros físicos de calidad .....	43
a	Diferencia total de color ( $\Delta E$ ) .....	43
b	Firmeza .....	44
5.	Evaluación del parámetro nutrimental.....	45
a	Contenido de Vitamina C.....	45
6.	Análisis enzimático.....	46
a	Actividad de la enzima peroxidasa (POD).....	46
7.	Métodos estadísticos.....	47
a	Diseño experimental.....	47
b	Optimización.....	49
c	Análisis de datos .....	49
d	Validación del modelo de predicción.....	50
e	Contraste de los métodos de escaldado .....	50
<b>VII</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN PARA PARÁMETROS</b>	
	<b>FÍSICOS DE CALIDAD, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE BRÓCOLI</b>	
	<b>ESCALDADO</b> .....	<b>51</b>
1.	Escaldado Tradicional (ET).....	51

a	Parámetros físicos de calidad .....	51
b	Parámetro nutrimental .....	55
c	Parámetro enzimático.....	58
2.	Escaldado con Microondas (EM) .....	60
a	Parámetros físicos de calidad .....	60
b	Parámetro nutrimental .....	64
c	Parámetro enzimático .....	66
3.	Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI) .....	68
a	Parámetros físicos de calidad .....	68
b	Parámetro nutrimental .....	72
c	Parámetro enzimático .....	74
B	MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCION DE FLORETES DE BRÓCOLI ESCALDADO.....	77
1.	Optimización de los procesos de escaldado. ....	77
a	Escaldado Tradicional (ET).....	77
b	Escaldado con Microondas (EM) .....	79
c	Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI) .....	81
2.	Validación de los modelos de predicción.....	83
a	Escaldado Tradicional (ET).....	83
b	Escaldado con Microondas (EM) .....	85
c	Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI) .....	87
C	CONTRASTE DE PARÁMETROS FÍSICOS DE CALIDAD, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE FLORETES DE BRÓCOLI OBTENIDOS CON LAS MEJORES CONDICIONES DE ESCALDADO TRADICIONAL,	

ESCALDADO CON MICROONDAS Y ESCALDADO CON MICROONDAS SIN INMERSIÓN.....	89
1.    Parámetros físicos de calidad .....	89
a    Diferencia total de color ( $\Delta E$ ).....	89
b    Firmeza.....	92
2.    Parámetro nutrimental .....	95
a    Contenido de Vitamina C .....	95
3.    Parámetro enzimático .....	99
a    Actividad de la enzima peroxidasa.....	99
<b>VIII    CONCLUSIONES .....</b>	<b>102</b>
<b>IX    BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>104</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>120</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>121</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Inflorescencias y floretes de brócoli.	8
2	Etapas de maduración del brócoli	12
3	Principales estados productores de brócoli	17
4	Ciclo catalítico de las peroxidasas	21
5	Reacción óxido-reducción de grupos fenol	23
6	Estructura del L ácido ascórbico	26
7	Espectro electromagnético	30
8	Secciones de un microondas	34
9	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.	52
10	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de firmeza (% RF) de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.	54
11	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico (% RAA) de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.	56
12	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el porcentaje de actividad residual (% AR) de POD de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.	59
13	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el $\Delta E$ de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.	62

14	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RF de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.	64
15	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RAA de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.	66
16	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % AR de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.	68
17	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el $\Delta E$ de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.	70
18	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RF de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.	72
19	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % RAA de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.	74
20	Gráficos de superficie de respuesta y contorno mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % AR de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.	76
21	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli por el método tradicional.	78
22	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli con microondas.	80
23	Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli con microondas sin inmersión	82

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1	Composición nutrimental de brócoli fresco por cada 100 g de porción comestible	10
2	Velocidad de respiración de cabezas florales de brócoli	13
3	Producción mundial de brócoli y coliflor en el año 2016	15
4	Combinaciones de temperatura y tiempo propuestas para utilizar en la optimización del proceso de escaldado	48
5	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado tradicional.	84
6	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado con microondas.	86
7	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado con microondas sin inmersión.	88
8	Comparación de la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) entre los diferentes métodos de escaldado	90
9	Comparación del porcentaje de retención de firmeza (% RF) entre los diferentes métodos de escaldado	93
10	Comparación del porcentaje de retención de ácido ascórbico (% RAA) entre los diferentes métodos de escaldado	96
11	Comparación del porcentaje de actividad de actividad residual (% AR) de POD entre los diferentes métodos de escaldado	99

## I RESUMEN

El escaldado tradicional, convencional o por inmersión, es hoy en día la operación de escaldado más utilizado para reducir la actividad de la enzima peroxidasa antes de la congelación, enlatado o secado de floretes de brócoli (*Brassica oleracea* L.) cv. Itálica. Ésta es una hortaliza con un alto contenido nutrimental; sin embargo, la calidad del brócoli se ve comprometida. El escaldado por microondas ha sido reportado como un proceso que reduce el tiempo al cual se inactivan las enzimas como la peroxidasa (POD), las cuales son las más termo resistentes en todos los tejidos vegetales como el brócoli, principalmente porque se genera calor dentro de los floretes de brócoli. El objetivo del presente trabajo fue comparar el escaldado tradicional (ET), escaldado con microondas (EM) y escaldado con microondas sin inmersión (EMSI) de floretes de brócoli con base en parámetros físicos de calidad, nutrimentales y enzimáticos. La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) se usó para optimizar las operaciones de escaldado. Se utilizó un diseño central compuesto rotable, y los factores fueron el tiempo (1-6 min) y la temperatura (60-95 °C) con cinco niveles de variación. Las respuestas físicas de calidad fueron porcentaje de retención de firmeza (% *RF*) evaluada como la fuerza de compresión máxima (técnica de punción) y la diferencia de color total ( $\Delta E$ ) usando un colorímetro Minolta. Los parámetros nutrimentales y enzimáticos fueron el porcentaje de retención de ácido ascórbico (% *RAA*) y el porcentaje de actividad enzimática residual (% *AR*), ambas obtenidas mediante técnicas espectrofotométricas (520 y 470 nm, respectivamente). Se obtuvieron muestras de floretes de brócoli con las condiciones óptimas de proceso para cada método y se contrastaron con base en parámetros físicos de calidad, nutrimentales y enzimáticos. Las respuestas deseables fueron menores  $\Delta E$  y % *AR*, y mayor % *RF* y % *RAA*. Las condiciones óptimas fueron 94.7 ° C, 1 min, para ET, 94.5 ° C, 1 min, para EM y 92 °C, 4.6 min para EMSI.

Se generaron modelos de predicción y se validaron para cada método de escaldado. Las respuestas óptimas para ET fueron  $\Delta E = 13.6$ , %  $RF = 72.7$ , %  $RAA = 44.9$  y %  $AR = 0$ . Para EM, fueron  $\Delta E = 10.4$ , %  $RF = 76.1$ , %  $RAA = 67.6$  y %  $AR = 1$  y para EMSI fueron  $\Delta E = 7.6$ , %  $RF = 67.8$ , %  $RAA = 67.8$  y %  $AR = 5.2$ . La aceptabilidad global fue 0.602, 0.864 y 0.639 para ET, EM y EMSI, respectivamente. Al hacer la comparación de las variables de respuesta entre los métodos, para el  $\Delta E$  se encontró que el EMSI retuvo significativamente mejor el color (7.5), es decir, el  $\Delta E$  obtenido fue menor al del EM y al del ET, los cuales no fueron significativamente diferentes entre ellos; esto nos indica que este tratamiento puede mantener un color más parecido al brócoli fresco. En el caso del %  $RF$  no hubo diferencias significativas entre los métodos; por otra parte, el EM y el EMSI proporcionaron una retención de ácido ascórbico muy similar (66 % y 67.5 %, respectivamente), no obstante, fue estadísticamente superior a la de ET (45.9 %). En los tres métodos de escaldado, se alcanzó menos del 10% de la actividad de la peroxidasa, que se recomienda como la adecuada para los floretes de brócoli procesados. Estos resultados muestran que el EMSI es un método adecuado para inactivar la POD, mantener un color similar al del brócoli fresco y mantener un alto contenido de vitamina C, además, estos resultados son de utilidad para la estimación teórica del efecto de las variables de proceso [tiempo (1-6 min) y temperatura (60-95 °C)], individual o de manera combinada en las variables de respuesta elegidas.

## ABSTRACT

Traditional, conventional, or by immersion blanching is today the most used scalding operation to reduce the activity of peroxidase enzyme before freezing, canning, or drying of broccoli florets (*Brassica oleracea* L.) cv. Italic. This is a vegetable with a high nutrimental content; however, the quality of broccoli is compromised. Microwave blanching has been reported as a process that reduces the time at which enzymes such as POD are inactivated, which are the most thermo-resistant in all plant tissues such as broccoli, mainly because heat is generated inside the broccoli florets. The objective of this work was to compare conventional blanching (CB), microwave blanching (MWB), and microwave blanching without immersion (MWBWI) of broccoli florets based on physical quality, nutrimental, and enzymatic parameters. Response Surface Methodology (RSM) was used to optimize blanching operations. A rotatable central composite design was used, and the factors were time (1-6 min) and temperature (60-95 ° C) with five levels of variation. The physical quality responses were percentage of firmness retention (% *FR*) evaluated as the maximum compression force (puncture technique) and the total color difference ( $\Delta E$ ) using a Minolta colorimeter. The nutrimental and enzymatic parameters were the percentage of ascorbic acid retention (% *AAR*) and the percentage of residual enzymatic activity (% *REA*), both obtained by spectrophotometric techniques (520 and 470 nm, respectively). Broccoli florets samples were obtained using the optimal process conditions for each method and were contrasted based on physical quality, nutrimental and enzymatic parameters. The desirable responses were lower  $\Delta E$  and % *REA*, and higher % *FR* and % *AAR*. The optimal conditions were 94.7 °C, 1 min, for CB, 94.5 °C 1 min, for MWB and 92 °C, 4.6 min for MWBWI. Prediction models were generated and validated for each blanching method. The optimal responses for CB were  $\Delta E = 13.6$ , % *FR* = 72.7, % *AAR* = 44.9, and %

$REA = 0$ . For MWB, they were  $\Delta E = 10.4$ , %  $FR = 76.1$ , %  $AAR = 67.6$ , and %  $REA = 1$ , and for MWBWI were  $\Delta E = 7.6$ , %  $FR = 67.8$ , %  $AAR = 67.6$ , and %  $REA = 5.2$ . The combined desirability was 0.602, 0.864, and 0.639 for CB, MWB and MWBWI, respectively. When comparing the response variables among the methods, for  $\Delta E$  it was found that MWBWI retained significantly better the color (7.5), that is, the obtained  $\Delta E$  was lower than that for MWB and for CB, which were not significantly different among them; this indicates that this treatment can maintain a color more similar to fresh broccoli. In the case of  $FR$ , there were no significant differences among the methods; on the other hand, MWB and MWBWI provided a very similar ascorbic acid retention (66 % and 67.5 %, respectively), however, it was statistically higher than that for CB (45.9 %). In the three blanching methods, less than 10 % of peroxidase activity was achieved, which is recommended as adequate for processed broccoli florets. These results show that MWBWI is a suitable method to inactivate POD, maintain a color similar to that of fresh broccoli, and maintain a high vitamin C content, in addition, they are useful for the theoretical estimation of the effect of the process variables [time (1-6 min) and temperature (60-95 °C)], individually or combined, on the chosen response variables.

## II INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria siempre busca implementar nuevas estrategias que le permitan disminuir tiempos de proceso y que, a su vez, ayuden a conservar todas las propiedades que en el alimento son importantes. La naturaleza de los productos hortofrutícolas es muy perecedera, este comportamiento se debe a que estos productos una vez tomados del campo continúan con sus procesos metabólicos. Aunado a este comportamiento natural, el manejo que se les da puede acelerar o disminuir su vida de anaquel, dependiente de factores como temperatura de almacenamiento, humedad relativa, estado de madurez y si se les ha aplicado un tratamiento (Xiao y col 2017).

El brócoli es una hortaliza con aspectos nutritivos favorables, como la presencia de vitaminas, particularmente las que actúan como antioxidantes (ácido ascórbico y  $\beta$ -caroteno) y fibra dietaria. Además, es un potente inductor de las enzimas que ejercen un efecto protector frente a los agentes químicos carcinogénicos (Thongsook y Barrett 2005).

El escaldado de hortalizas como el brócoli para inactivar enzimas endógenas es un paso crítico antes de la congelación, operación usual aplicada a la venta del brócoli. Sin embargo, la intensidad del proceso debe ser controlada para mantener el color, la textura, el sabor y la calidad nutricional (Barrett y col., 2000). Esta hortaliza es un producto muy perecedero y el almacenamiento prolongado no es conveniente porque se deteriora el producto y se afecta la comercialización (Mansour y col 2015).

El principal objetivo del escaldado es la inactivación de las enzimas que tienen un efecto adverso sobre la calidad de los alimentos, lo cual proporciona una sustancial vida útil prolongada en condiciones de almacenamiento refrigeradas. Sin embargo, se basa principalmente en la transferencia de calor convectiva y conductora y tiende a ser excesivamente conservador para

garantizar la seguridad microbiana, lo que a menudo compromete la calidad del producto (Hyun-Lee y col 2016). Es debido a esto que se buscan estrategias para ayudar a disminuir la pérdida de calidad del producto, al garantizar la seguridad microbiana y la disminución de la actividad enzimática del vegetal (Liu y col 2015).

El creciente interés en el logro de productos procesados con características similares a las de los productos frescos ha sido la razón de mejorar las técnicas de procesamiento. El uso del microondas se ha investigado y aplicado en vegetales para procesos tales como pasteurización, secado y escaldado, con diferentes objetivos: reducción de la actividad enzimática de la peroxidasa (POD), induciendo cambios en propiedades físicas y químicas e incluso en compuestos fitoquímicos y vitaminas, principalmente en el contenido de Vitamina C (Chen y col 2016; Jiménez y col 2001; Peng y col 2017).

En el calentamiento por microondas, los materiales calentados reciben la energía de microondas y la convierten en energía térmica por efecto del calentamiento dieléctrico causado por la rotación del dipolo molecular y la agitación de iones cargados dentro de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia (Nguyen y col 2013). El calor generado desde el interior de los alimentos provoca un calentamiento más rápido y uniforme, a diferencia del calentamiento convencional que se rige por conducción desde la superficie hacia el centro.

Se han encontrado reportes en los que se han hecho estudios sobre la inactivación de la enzima peroxidasa (la más termoestable en brócoli) y la retención de vitamina C en escaldado con microondas con y sin inmersión (Yuan y col 2009; Severini y col 2016), sin embargo, se carece de información de condiciones optimizadas, que detecten inactivar completamente la POD, conservando la más alta retención de Vitamina C.

### III REVISIÓN DE LITERATURA

#### A Brócoli

##### 1. Generalidades

El brócoli tiene su origen entre las regiones templadas del Mediterráneo y Asia menor. Durante la época de dominio del Imperio Romano, esta hortaliza llegaría hasta la península itálica donde fue cultivada llegando a ser muy popular. No fue sino hasta mediados del siglo XX cuando su producción se desarrollaría en Europa y posteriormente en Estados Unidos y América (FAO 2012).

Esta hortaliza pertenece a la familia *Brassicaceae*, género *Brassica* y especie *oleracea*, y su nombre científico es *Brassica oleracea* L. variedad itálica (Buck 1954). Los tallos florales del brócoli son gruesos y carnosos, éstos salen de las axilas foliares y forman una inflorescencia central de mayor tamaño y otras secundarias (**Figura 1a**). La parte comestible está formada por yemas, flores, tallo y cierta parte de las hojas; a esta parte comestible de la hortaliza se le conoce comúnmente como floretes (**Figura 1b**) (Maldonado y Pacheco 2003).

Diversas investigaciones indican que una dieta rica en hortalizas de la familia crucíferas ayuda a disminuir el riesgo de desarrollar diversos tipos de cáncer. En esta familia, el brócoli se distingue por la presencia de numerosas sustancias bioactivas con propiedades que promueven la salud. Entre estos compuestos bioactivos, fenólicos, carotenoides, vitaminas C, B<sub>1</sub>, E, glucosinolatos y selenio merecen especial atención (Thongsook y Barrett, 2005).

Las sustancias bioactivas del brócoli pueden neutralizar los carcinógenos antes de que causen un daño al DNA y produzcan una transformación de las células. El mecanismo por el



**Figura 1.** Inflorescencias y floretes de brócoli. Fuente: SAGARPA 2011.

cual el brócoli inhibe el cáncer no es entendido completamente todavía y es actualmente objeto de estudio en diferentes trabajos de investigación (Borowski y col 2008).

El cultivo tolera ligeramente las heladas, éstas pueden causar el apareamiento de manchas de color marrón en las inflorescencias. La fase de inducción floral necesita temperaturas promedio de 15 °C, cuando las temperaturas son mayores a 20 °C se produce un retraso en la maduración, los floretes producidos son dispares (Monosalvas-Arias 2012).

Cambios físicos de calidad y bioquímicos indeseables durante el manejo, procesamiento y almacenamiento de los productos de frutos y hortalizas como el brócoli son resultado del oscurecimiento enzimático y las reacciones no enzimáticas. El desarrollo del oscurecimiento, malos olores y daño nutricional pueden ser atribuidos a la acción de diferentes enzimas, como la polifenol oxidasa (PPO) y peroxidasa (POD) (Ancos y col 1999).

## **2. Valor nutricional**

Contiene altos niveles de vitaminas, antioxidantes y compuestos anticarcinógenos y ha sido descrito como un vegetal con alto valor nutricional, es una buena fuente vegetal de Ca y Mg, dos minerales críticos en la nutrición humana, buena fuente de los elementos macro minerales; como Na, K, Ca, Cl, P y S y elementos traza, tales como Fe, Zn, Mn y Cu que son esenciales para el ser humano (Mansour y col 2015). El **Cuadro 1** muestra los datos de la composición nutrimental.

Se sabe que los compuestos anticarcinógenos contenidos en todas las verduras del género *Brassica* incluyendo el brócoli son derivados de los glucosinolatos, una clase diversa de metabolitos secundarios que contienen azufre y nitrógeno (Yuan y col 2009).

**Cuadro 1.** Composición nutrimental de brócoli fresco por cada 100 g de porción comestible

<b>COMPOSICIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>
<b>Energía</b>	141 kJ (34 kcal)
<b>Carbohidratos</b>	6.64 g
<b>Azúcares</b>	1.7 g
<b>Fibra</b>	2.6 g
<b>Grasa</b>	0.37 g
<b>Proteína</b>	2.82 g
<b>Agua</b>	89.30 g
<b>Vitamina A</b>	31 µg
<b>Beta-caroteno</b>	361 µg
<b>Luteína y zeaxantina</b>	1121 µg
<b>Tiamina (Vitamina B<sub>1</sub>)</b>	0.071 mg
<b>Riboflavina (Vitamina B<sub>2</sub>)</b>	0.117 mg
<b>Niacina (Vitamina B<sub>3</sub>)</b>	0.639 mg
<b>Ácido pantoténico (B<sub>5</sub>)</b>	0.573 mg
<b>Vitamina B<sub>6</sub></b>	0.175 mg
<b>Folato (Vitamina B<sub>9</sub>)</b>	63 µg
<b>Vitamina C</b>	89.2 mg
<b>Vitamina E</b>	0.78 mg
<b>Vitamina K</b>	101.6 µg
<b>Calcio</b>	47 mg
<b>Hierro</b>	0.73 mg
<b>Magnesio</b>	21 mg
<b>Fósforo</b>	66 mg
<b>Potasio</b>	316 mg
<b>Zinc</b>	0.41 mg

Fuente: USDA 2016.

### 3. Poscosecha

El momento adecuado para llevar a cabo el corte de las cabezas de brócoli es cuando éstas alcanzan un tamaño máximo y los floretes de su cabeza floral están bien compactos (firmes al presionar con la mano), como se aprecia en la **Figura 2**, que corresponde a la etapa 1. Un brócoli de buena calidad debe tener un color verde-oscuro brillante, además no deben existir floretes con coloraciones amarillas y no debe haber decoloración en las brácteas.

Debido a la alta velocidad de respiración de las cabezas florales del brócoli (**Cuadro 2**), las temperaturas bajas son extremadamente importantes para prolongar su vida útil. Las condiciones para optimizar el almacenamiento (21-28 días) son temperaturas de 0 °C y HR > 95 %. Sin embargo, debe tenerse mucho cuidado de no reducir la temperatura más allá de -1.0 °C, que es la temperatura en la que esta hortaliza puede presentar un daño por frío.

El brócoli presenta una baja velocidad de producción de etileno (<0.1 µL/kg·h a 20 °C), no obstante, es sumamente sensible a la exposición de este gas. Razón por la cual, debe ser apartado de otras hortalizas para su almacenamiento. Además, el brócoli puede ser beneficiado con atmósferas controladas que contengan bajos niveles de oxígeno (1-2 % O<sub>2</sub>) y concentraciones moderadas de dióxido de carbono (5-10 % CO<sub>2</sub>) en un rango de temperatura de 0-5 °C, como se describe anteriormente.

Los principales desórdenes fisiológicos del brócoli que se presentan durante su Poscosecha son: Pérdida de firmeza, amarillamiento de floretes, vástagos huecos y tonos color marrón en las brácteas; las razones de aparición de dichos desórdenes son una combinación entre el manejo Poscosecha y las buenas prácticas agrícolas por las que hayan pasado durante su crecimiento las hortalizas (Canwell y Suslow 1997).



---

**Inmaduro**  
Floretes bien compactos, cabeza floral muy firme.

**Maduro**  
Floretes compactos y bien desarrollados, cabeza floral firme.

**Sobre maduro**  
Floretes abiertos, cabeza floral poco firme.

---

**Figura 2.** Etapas de maduración del brócoli. Fuente: Cantwell y Suslow (2007)

**Cuadro 2.** Velocidad de respiración de cabezas florales de brócoli.

<b>Temperatura</b>	<b>0 °C</b> <b>(32 °F)</b>	<b>5 °C</b> <b>(41 °F)</b>	<b>10 °C</b> <b>(50 °F)</b>	<b>15 °C</b> <b>(59 °F)</b>	<b>20 °C</b> <b>(68 °F)</b>
<b>mLCO<sub>2</sub>/kg·h</b>	10-11	16-18	38-43	80-90	140-160

Fuente: Cantwell y Suslow (2007)

#### **4. Importancia**

El brócoli ha sido calificado como la hortaliza de mayor valor nutritivo por unidad de peso de brócoli comestible, pues brinda un gran aporte de vitaminas, principalmente Vitamina C (Ácido Ascórbico), B2 (Riboflavina) y Vitamina A, además suministra cantidades significativas de minerales como calcio (Ca), hierro (Fe), Sodio (Na) y especialmente potasio (K) (Parra-Vergara 2013).

Además, el brócoli, al igual que todos los vegetales del género *Brassica* tiene un potencial efecto protector en gran medida atribuido al complemento de fitoquímicos, que incluyen las Vitaminas C y E, flavonoides (quercetina), beta-caroteno, luteína y glucosinolatos (Podsdek, 2007).

Una porción de 100 gramos de brócoli cubre con el 149 % de Vitamina C de la cantidad diaria recomendada para adultos, con el 97 % para Vitamina K, y con importantes porcentajes de las vitaminas del complejo B, además contiene un bajo contenido de grasa (0.37 g), carece de colesterol y aporta el 13 % de la fibra alimentaria (USDA 2016).

Debido a las tendencias por una vida más saludable, y a las extraordinarias características nutritivas del brócoli, este vegetal tiene una gran importancia, y es por ello que se deben buscar métodos para que pueda ser llevado desde el campo hasta el consumidor manteniendo todas sus propiedades.

#### **5. Producción**

##### **a Mundial**

La producción mundial y los principales 10 países productores de hortalizas de brócoli y coliflor en el año 2016 se muestran en el **Cuadro 3**. Los principales países productores fueron: China, India y EUA, ubicándose México en el quinto lugar con una

**Cuadro 3.** Producción mundial de brócoli y coliflor en el año 2016

<b>POSICIÓN</b>	<b>PAÍS</b>	<b>PRODUCCIÓN (ton)</b>	<b>% DE PRODUCCIÓN</b>
	<b>Mundial</b>	24,175,040	100
<b>1</b>	<b>China</b>	9,365,707	38.74
<b>2</b>	<b>India</b>	8,573,280	35.46
<b>3</b>	<b>EUA</b>	1,222,930	5.05
<b>4</b>	<b>España</b>	696,969	2.88
<b>5</b>	<b>México</b>	503,972	2.08
<b>6</b>	<b>Italia</b>	405,063	1.67
<b>7</b>	<b>Francia</b>	326,355	1.34
<b>8</b>	<b>Polonia</b>	320,563	1.32
<b>9</b>	<b>Pakistán</b>	220,637	0.91
<b>10</b>	<b>Inglaterra</b>	160,900	0.66

Fuente: FAOSTAT (2018).

producción de 503,972 ton aportando aproximadamente el 2.08 % de la producción mundial total para ese año (FAOSTAT, 2018).

#### **a Nacional**

Según datos de la FAO, del año 2006 al 2016, México pasó de producir 355,508 a 503,972 toneladas, lo que representa un considerable incremento, de aproximadamente 41.76 %, esto pudiera atribuirse al incremento de la población, a mejores prácticas de agricultura y a un mayor conocimiento de los beneficios que conlleva la ingesta de brócoli.

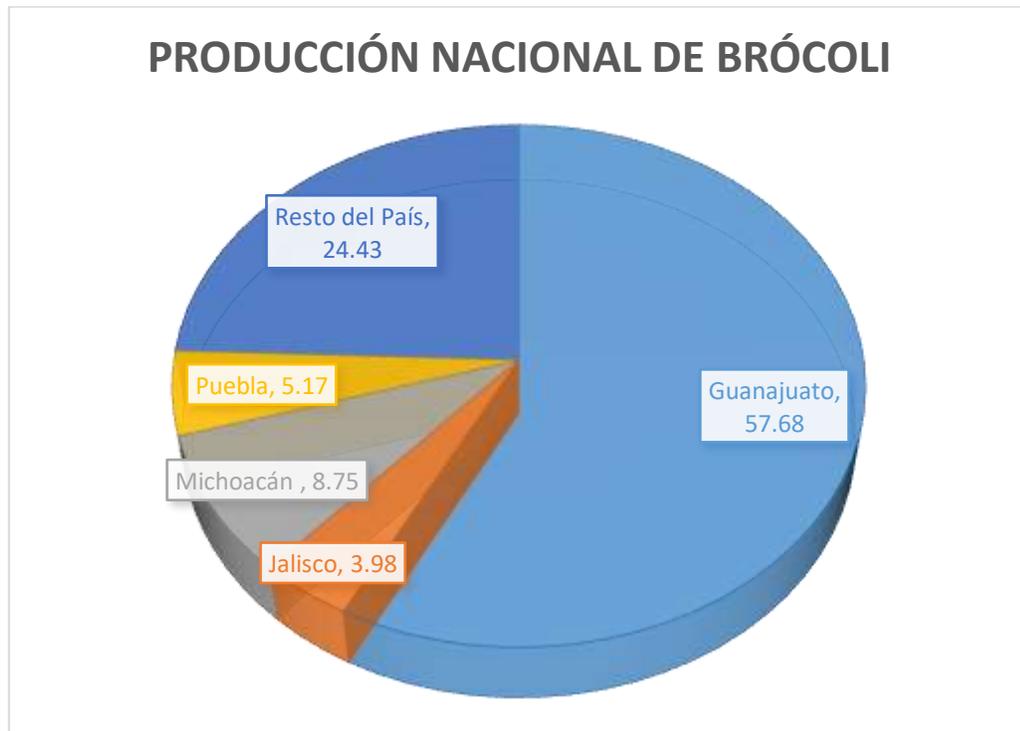
Los principales estados productores de brócoli para el año 2016 fueron Guanajuato, con una producción de 290,708 toneladas, aportando el 57.68 % de la producción nacional ese año. Le siguen los estados de Michoacán, Puebla y Jalisco, como se muestra en la **Figura 3**, la producción de este vegetal se concentra en los estados de la región centro-oeste del país.

### **B Congelado**

#### **1. Generalidades**

Frutas y hortalizas son de alto contenido nutrimental, incluyendo vitaminas, minerales, fibra dietaria, ácidos orgánicos y antioxidantes. Además, contiene menor valor energético lo cual es bueno para la salud. Como sea, frutas y hortalizas son cosechadas en diferentes temporadas y a menudo su cosecha se ubica en zonas geográficas con acceso restringido o lejos de la zona de comercialización. Esto demanda una mayor disponibilidad de técnicas efectivas de conservación (Gallardo-Castro 2004).

Las bajas temperaturas reducen efectivamente la actividad enzimática y microbiológica además de la oxidación y velocidad de respiración de frutas y hortalizas cosechadas. Debido a una creciente urbanización, el consumo de frutas y hortalizas congeladas y listas para consumo



**Figura 3.** Principales estados productores de brócoli y su producción en porcentaje en el año 2016. Fuente: SIAP SAGARPA (2018).

ha aumentado considerablemente, principalmente por su facilidad de uso, ahorro de tiempo y otras razones prácticas (Resende y col 2013).

Los principales factores que afectan la calidad de frutas y hortalizas congeladas son: características de la fruta u hortaliza cruda, tecnología empleada, velocidad de congelamiento y el proceso de congelación posterior (transporte, distribución y descongelamiento) (Xin y col 2015).

## **C Escaldado**

### **1. Generalidades**

El escaldado de hortalizas es un paso crítico antes de someterlas a otras operaciones unitarias como el congelado y el enlatado. Sin embargo, la intensidad del proceso debe ser limitada para mantener el color, la textura, el sabor y la calidad nutricional (Barrett y col 2000).

El procesamiento térmico es la tecnología de procesamiento de alimentos más utilizada y está destinado principalmente a inactivar las enzimas y destruir los microorganismos (Ganjloo y col 2011). La operación unitaria del escaldado consiste en someter frutos u hortalizas a calentamiento con el propósito principal de inactivar enzimas. El escaldado puede tener un efecto negativo en nutrimentos tales como vitaminas y compuestos fenólicos que son relativamente inestables cuando se someten a tratamiento térmico. Aparte del procesamiento, las condiciones de almacenamiento y la cocción y preparación doméstica tienen un efecto significativo sobre los fitoquímicos tales como el ácido ascórbico y los fenoles (Patras y col 2011).

## **2. Importancia**

El principal objetivo del escaldado es la inactivación de las enzimas que tienen un efecto adverso sobre la calidad de los alimentos, lo cual proporciona una sustancial vida útil prolongada en condiciones de almacenamiento refrigeradas (Iribe-Salazar y col 2015).

El diseño de tratamientos de escaldado eficientes requiere el conocimiento de factores críticos tales como la distribución enzimática dentro del tejido, parámetros cinéticos de inactivación y proporciones relativas de fracciones resistentes al calor. Este tipo de información por lo general no está disponible en la literatura y es único para cada vegetal, especie, cultivar y condición ambiental, entre otros factores (Morales-Blancas y col 2002).

Durante este proceso térmico se logran objetivos tales como: 1) Inhibir las reacciones enzimáticas indeseables, por inactivación térmica de las enzimas presentes en los vegetales responsables de ocasionar aromas, sabores o coloraciones extrañas, los cuales causarían la pérdida de vitamina C, provocando un efecto adverso en la calidad y valor nutritivo del producto (Barrett y Theerakulrait 1995); 2) Expulsar los gases (aire) ocluidos en los espacios intercelulares de las hortalizas (Ganthavorn y Powers 1988); 3) Mejorar el sabor y estabilizar el color verde de los vegetales por activación de las clorofilas; 4) Reducir la carga microbiana viable; 5) Incrementar textura en algunos vegetales, atribuido a la activación de la pectinmetilesterasa, que cataliza la conversión de la pectina en ácidos pécticos de naturaleza iónica y facilita su interacción con iones divalentes como el calcio, al aumentar la rigidez de las estructuras (Fennema, 1993).

Otros efectos del escaldado considerados positivos son la reducción de posibles residuos químicos, lixiviación de sustancias naturales indeseables de algunas hortalizas, como nitratos,

nitritos y oxalatos solubles de zanahoria y espinacas, rutina coloreada del espárrago, compuestos indeseables de las *Brassicas* entre otras (Gallardo-Castro 2004).

Muchas hortalizas congeladas, así como las deshidratadas y enlatadas, requieren un previo escaldado debido a que al ser almacenadas por periodos de tiempo prolongados, con el tiempo, gradualmente llegan a ser más fibrosas, menos dulces e insípidas y sin sabor ni aroma atractivos; cualidades que siguen deteriorándose, perdiendo, en muchos casos, la frescura después de 1 mes. Después de un año o más, el sabor y el aroma llegan a ser desagradables al cocerlos, con una pronunciada cualidad similar al heno. Por otra parte, el sobre escaldado produce una excesiva lixiviación de minerales, pigmentos, vitaminas, pérdida de sabor y valor nutricional (Woodroof 1988).

La eficacia del proceso de escaldado es determinada experimentalmente por la desactivación parcial o total de las enzimas peroxidasa, catalasa, lipoxigenasa y/o polifenoloxidasas. La cinética de desactivación enzimática está en función directa de la cinética de transferencia de calor que ocurre entre el medio de calentamiento y la superficie del producto, y luego dentro del propio producto. La cinética del proceso de escaldado se traduce entonces en un tiempo de proceso necesario para que el calor requerido para desactivar las enzimas se transfiera desde el medio a la superficie del producto, y luego, de la superficie al centro de éste (Amin y Lee 2005).

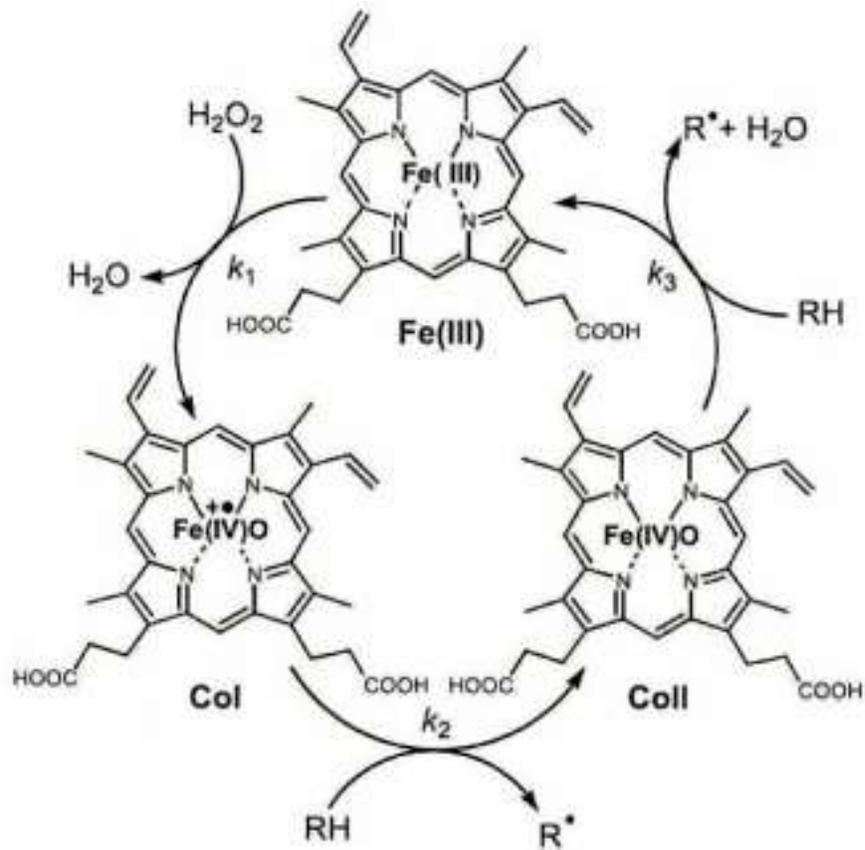
La peroxidasa (POD) es la enzima más resistente térmicamente en las hortalizas como el brócoli, y, por lo tanto, se utiliza generalmente como un indicador biológico de la eficiencia del proceso de escaldado (Pérez y col 2015).

### **a Inactivación de Peroxidasa (POD)**

Las peroxididasas (POD) son enzimas distribuidas ampliamente en las plantas. Todas ellas se caracterizan por tener un grupo prostético, un grupo hemo tipo b (protoporfirina IX), con Fe (III) pentacoordinado, que constituye el centro activo de la enzima (**Figura 4**). La POD es una oxidorreductasa que cataliza la reacción en la que el peróxido de hidrógeno actúa como aceptor y otro compuesto actúa como donante de átomos de hidrógeno (**Figura 5**) (Thongsook y Barrett, 2005). En presencia de peróxido, las POD de los tejidos vegetales son capaces de oxidar una amplia gama de compuestos fenólicos, como guayacol, pirogalol, ácido clorogénico, catequina y catecol (Adams 1978). La oxidación de una amplia gama de compuestos orgánicos ha llevado a la especulación de que la enzima puede estar asociada con pérdidas de color, sabor y valor nutricional de los vegetales (Onsa y col 2004).

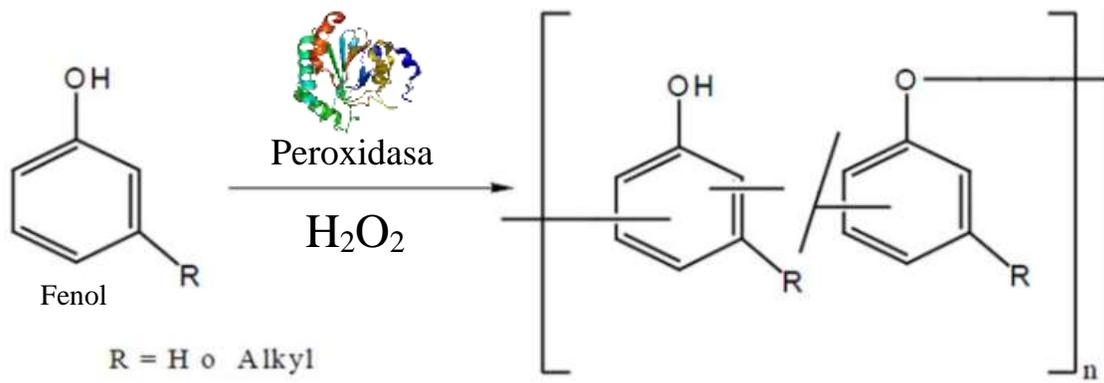
El brócoli es una de las hortalizas con mayor actividad de POD, el tratamiento de escaldado se utiliza comúnmente para inactivar las enzimas, con el fin de alargar su vida de anaquel. Sin embargo, es bien sabido que la POD puede recuperar su actividad después del tratamiento térmico (Thongsook y Barrett, 2005). El fenómeno de regeneración consiste en la recuperación de actividad transcurrido un tiempo después del tratamiento térmico. Esto se explica asumiendo que la fracción proteínica de la proteína sufre una desnaturalización parcial, con pérdida de estructura terciaria, produciendo luego una reversión a su estado normal por la recombinación de grupos hidrógenos o sulfhidrúlicos. Se sabe que el proceso de regeneración enzimática después del tratamiento térmico se deriva de la regeneración de la estructura terciaria de la parte proteínica de la enzima, cuando ésta no ha sido inactivada o desnaturalizada en forma total por el tratamiento térmico (Ganjloo y col 2011).

Si el tratamiento térmico es incompleto la peroxidasa tiende a regenerarse, al menos parcialmente, después del tratamiento. Las temperaturas muy altas por tiempos cortos de



**Figura 4.** Ciclo catalítico de las peroxidases. Se observa el centro activo de la enzima férrica nativa y de sus formas modificadas, el compuesto I (CoI) y el compuesto II (CoII). Fuente:

Hidalgo-Cuadrado (2011).



**Figura 5.** Reacción óxido-reducción de grupos fenol de compuestos orgánicos en presencia de peróxido de hidrogeno catalizada por la peroxidasa. Fuente: Chen y col (2016).

inactivación tienden a producir mayor regeneración que procesos equivalentes a menor temperatura y tiempos más largos. La regeneración de la actividad residual depende del almacenamiento, habiéndose encontrado que, a menor temperatura de almacenamiento, más largo es el tiempo para la regeneración. Guayacol es un sustrato orgánico común de donante de hidrógeno utilizado tradicionalmente para comprobar la adecuación de este tratamiento (Ramírez-Becerra 2009).

En la práctica industrial se ha encontrado que las hortalizas congeladas retienen entre 1 y 10% de actividad residual de peroxidasa. Goncalves y col (2011) indican que cierto grado de actividad residual de peroxidasa es permisible en floretes de brócoli congelados y que ello afecta menos la calidad que procesos de escaldado más severos por tiempos largos a menor temperatura.

#### **b Retención de Vitamina C**

La Vitamina C es el enantiómero L del ácido ascórbico, es un componente importante de la nutrición humana y debe ser introducida en el cuerpo porque los seres humanos no tienen la capacidad de sintetizarla. Es bien conocida no sólo por su papel insustituible en la prevención del escorbuto sino también puede ser útil en la prevención de enfermedades cardiovasculares y algunos tipos de cáncer (Wambui-Munyaka y col 2010). Esto se debe a su papel insustituible en la síntesis del colágeno, también interviene en la síntesis de lípidos, proteínas, norepinefrina, serotonina, L-carnitina y en el metabolismo de tirosina, histamina y fenilalanina. En el escorbuto el problema se produce en la síntesis del colágeno, ya que el Ácido L- Ascórbico (L-AA) es un cofactor esencial en este proceso (Zhang y Hamauzu 2004). Su función más difundida está relacionada con su poder antioxidante, que le permite desactivar una gran variedad de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno en sistemas acuosos. Además, actúa como cofactor de enzimas que participan en la síntesis de carnitina y neurotransmisores. También, se ha demostrado que estimula al sistema inmune, tiene efectos beneficiosos en pacientes con determinados tipos de

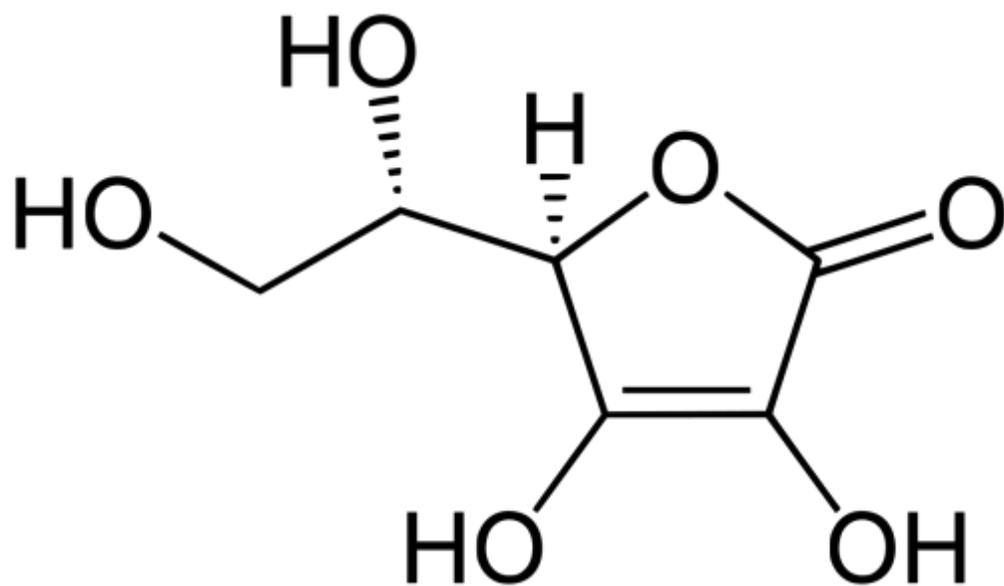
lesiones precancerosas y facilita la absorción intestinal de hierro no hemínico de los alimentos. En los vegetales es parte del sistema de defensas contra el estrés fotooxidativo, entre otras funciones (Koh y col 2009).

La Vitamina C es conocida por ser una vitamina termolábil y su reacción de degradación está afectada, además de la temperatura, por el contenido de humedad, contenido de oxígeno, pH e incluso la luz. Se supone que si la Vitamina C está bien retenida en los alimentos, la retención de los otros nutrientes es igual o más alta tales como pigmentos naturales y sustancias aromáticas. Por lo tanto, la pérdida de Vitamina C se utiliza con frecuencia como un indicador de intensidad del tratamiento térmico aplicado (Bai y col 2013).

Durante el escaldado en agua, se sabe que la Vitamina C se lixivia del producto debido a su alta solubilidad en agua y se degrada como consecuencia de su susceptibilidad al calor (Guiamba y col 2015). Esto se debe principalmente a la cantidad de grupos hidroxilo que tiene su estructura, lo que facilita su interacción (**Figura 6**).

### **3. Escaldado tradicional**

El escaldado tradicional se basa en sumergir un vegetal fresco en agua a temperatura cercana a ebullición, durante un tiempo corto, con el fin de lograr inactivar a las enzimas. Este procedimiento incrementa la estabilidad de las hortalizas durante largos periodos de almacenamiento cuando se congelan, o se someten a otros procesos de conservación (Nambi y col 2016). El calor aplicado, sobre todo en temperaturas elevadas, ocasiona un ablandamiento de los tejidos, además, ocurre una lixiviación de nutrimentos por solubilización al medio de calentamiento, así como una pérdida de compuestos termosensibles, remoción de aire y alteraciones en el color del producto terminado (Aguilar y col 1999)



**Figura 6.** Estructura del L ácido ascórbico (Vitamina C). Fuente: Koh y col (2009)

Es por eso que se especifica el atributo a modificar teniendo en cuenta los efectos adversos que pudiera tener sobre otras características. Típicamente, el escaldado se lleva a cabo tratando las hortalizas con vapor o agua caliente durante 1 a 10 min a temperaturas de 75 a 95 °C, dependiendo el tipo de vegetal (Patras y col 2011).

Durante esta operación se lleva a cabo la transferencia de calor por conducción, que va desde la superficie hasta el centro del vegetal, también conocido como punto frío. Para ello deben considerarse características, tales como forma de la hortaliza y su tamaño. En caso de tamaños grandes puede producirse un sobreescaldado en la superficie o en casos contrarios un subescaldado en los puntos céntricos o punto frío, debido principalmente a la heterogeneidad del alimento que ocasiona diferencias de temperatura entre los diversos puntos del alimento (De Corcuera y col 2004). Cuando en un inicio el alimento es sometido al escaldado, las condiciones normales de operación suelen ser inestables, por ello es necesario precisar tiempos exactos de operación en los que eviten lo descrito anteriormente en la hortaliza.

#### **4. Efecto sobre atributos de calidad**

Aunque el proceso de maduración origina cambios en el contenido de carbohidratos, como la desintegración de pectinas y otros polisacáridos, que dan como resultado el ablandamiento de los productos y consecuentemente aumentan la susceptibilidad a daños mecánicos, los nutrimentos generalmente se pierden durante el escaldado tradicional (Nambi y col 2016). Esto es provocado en gran medida por la lixiviación o difusión. Todos los nutrimentos solubles en agua, tales como minerales, vitaminas, proteínas y azúcares, pueden ser lixiviados desde los tejidos vegetales hasta el agua de escaldado. Además, el escaldado tradicional puede conducir a que se pierdan algunas sustancias termosensibles tales como ácido ascórbico o compuestos que dan sabor y aroma (Xiao y col 2017).

Por su parte, la estructura de la hortaliza se ve comprometida (principalmente la turgencia celular, que conduce a una disminución de firmeza) debido a que la actividad enzimática residual puede ser alta; la cual debe ser menor a 10 % para asegurar un máximo periodo de vida útil de las hortalizas procesadas (Goncalves y col 2011).

## **5. Tendencias y desarrollo del escaldado térmico**

El escaldado tradicional a frutas y hortalizas es aún considerado el método más simple y eficaz para evitar que las hortalizas se deterioren. Sin embargo, se basa principalmente en la transferencia de calor convectiva y conductora y tiende a ser excesivamente conservador para garantizar que los procesos metabólicos de la hortaliza se desaceleren (Hyun-Lee y col 2016). El tratamiento térmico excesivo de los productos alimenticios con frecuencia conduce a un grave deterioro en los aspectos de calidad de los alimentos tales como la textura, el color, el sabor y la destrucción de compuestos bioactivos (Patras y col 2011).

Otro aspecto importante cuando se habla del escaldado tradicional son las aguas residuales descargadas, las cuales contienen altas concentraciones de sólidos solubles y bioquímicos, induciendo un incremento en la demanda química de oxígeno debido a la lixiviación y disolución de azúcares, proteínas, carbohidratos y minerales hidrosolubles (Xiao y col 2017). Estas aguas residuales pueden causar contaminación ambiental como el enriquecimiento de nutrientes en un ecosistema tras llegar a los ríos o al mar donde terminan estas aguas, lo que pudiera llevar a provocar eutrofización (Soria y col 1987). El escaldado tradicional en la industria utiliza grandes volúmenes de agua, para evitar esto, durante los últimos años se han desarrollado e implementado nuevas tecnologías de escaldado, energéticamente más eficientes y amigables con el medio ambiente (Yuan y col 2009). Como alternativas a los métodos

convencionales, se han introducido y aplicado en la industria alimentaria nuevas prácticas de procesamiento de alimentos, utilizando tecnologías emergentes tales como microondas (Hidalgo-Cuadrado 2011), calentamiento óhmico (Hyun Lee y col 2005), y radiofrecuencias (Lagunas-Solar y col 2005).

Las industrias de alimentos han siempre buscado métodos innovadores del procesamiento de alimentos utilizando nuevas tecnologías. El objetivo principal de éstas es asegurar la inocuidad y alargar su vida útil conservando a su vez las propiedades físicas de calidad y nutricionales para obtener una calidad similar a la de frutas y hortalizas frescas (Ranjan y col 2016).

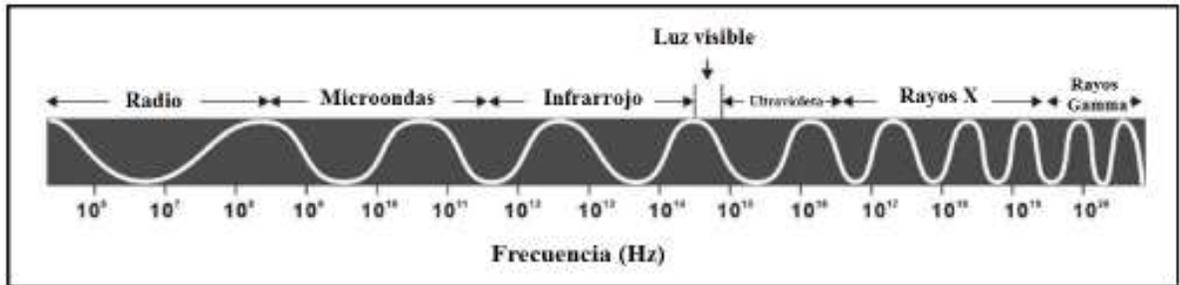
Las nuevas tecnologías en el procesamiento de diversos productos alimenticios pueden obtener una calidad de los alimentos comparable en un menor tiempo de procesamiento y con menor energía de entrada. Además, pudieran proporcionar mayor velocidad de calentamiento, mejor uniformidad de calentamiento e inactivación más eficiente de contaminantes microbianos y enzimas.

Dado que el escaldado por microondas se considera una técnica en seco, el volumen de aguas residuales generadas podría verse disminuido y, por lo tanto, las pérdidas de nutrientes solubles en agua podrían reducirse al mínimo (Ruíz-Ojeda y Peñas 2013).

## **D Microondas**

### **1. Generalidades**

Las microondas son ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre 1 mm y 1 m que tienen frecuencias correspondientes entre 300 MHz y 300 GHz (Zhang y col 2006) en la **Figura 7** se muestra el espectro electromagnético. Las microondas tienen muchos usos en la sociedad moderna incluyendo comunicación, radar, radioastronomía, navegación y



**Figura 7.** Espectro electromagnético. Fuente: FEHD (2005).

procesamiento de alimentos. Para aplicaciones de calefacción, industrial, científica y médica (Industrial, Scientific and Medical, ISM band), sólo se permiten microondas de 915 MHz y 2450 MHz (32.8 y 12.2 cm, respectivamente) porque la Comisión Federal de comunicaciones (FCC) de Estados Unidos quiere evitar que dichos dispositivos interfieran con las señales de comunicación (Xiao y col 2017).

## **2. Fundamento**

En el calentamiento por microondas, los materiales calentados absorben la energía de microondas y la convierten en energía térmica por efecto de calentamiento dieléctrico causado por la rotación del dipolo molecular y la agitación de iones cargados dentro de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia (Nguyen y col 2013). Específicamente, cuando el campo eléctrico oscilante interactúa con materiales de alto contenido de agua, las moléculas dipolares polarizadas permanentemente, en particular las moléculas de agua, se alinearán en la dirección del campo electromagnético alternando a 915 o 2450 MHz (Zhang y col 2006).

En términos generales, el campo electromagnético alterno generado dentro del horno de microondas conduce a la excitación, rotación/colisión de moléculas polares y iones dentro del alimento. Estas fricciones moleculares generan calor y, posteriormente, conducen a un aumento de la temperatura. Los dos mecanismos principales, interacciones dipolares e iónicas, explican cómo se genera el calor dentro de los alimentos (Chandrasekaran y col 2013).

### **a Interacciones dipolares**

Una vez que se absorbe la energía de microondas, las moléculas polares como las moléculas de agua dentro de los alimentos girarán de acuerdo con el campo electromagnético alterno. La molécula de agua es un "dipolo" con un extremo con carga positiva y un extremo con carga negativa. De forma similar a la acción del imán, estos "dipolos" se orientarán cuando estén

sujetos al campo electromagnético. La rotación de las moléculas de agua generará calor (Chandrasekaran y col 2013).

#### **b Interacciones iónicas**

Además de las moléculas de agua dipolares, los compuestos iónicos (es decir, sales disueltas) en los alimentos también pueden acelerarse por el campo electromagnético y colisionar con otras moléculas para producir calor (Gamage y col 2015).

#### **c Composición de alimentos**

Por lo anteriormente descrito, la composición de un alimento afectará la forma en que se calentará dentro del horno de microondas. Los alimentos con mayor contenido de humedad se calentarán más rápido debido a la interacción dipolar. A medida que aumenta la concentración de iones, por ejemplo, sales disueltas, la velocidad de calentamiento también aumenta debido a la interacción iónica con microondas (Sing y Heldman 1993). Aunque las moléculas de aceite son mucho menos polares que las moléculas de agua y no son iónicas, los productos alimenticios con alto contenido de aceite tienen una velocidad de calentamiento rápido porque el calor específico del aceite es aproximadamente menos de la mitad que el del agua. Además de la composición de los alimentos, en el calentamiento por microondas impactan también el tamaño, la forma y las propiedades dieléctricas (Buffler 1993).

#### **d Propiedades dieléctricas**

Las propiedades dieléctricas desempeñan un papel clave en la comprensión de la interacción entre los campos electromagnéticos y los componentes de los alimentos. Las propiedades dieléctricas se denotan por la siguiente ecuación ( $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ ) donde  $\epsilon^*$  es la permitividad relativa compleja que consiste en dos términos (constante dieléctrica  $\epsilon'$  también conocida como permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) y factor de pérdida dieléctrica  $\epsilon''$ ) y  $j = \sqrt{-1}$ . La

constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) indica la capacidad de almacenar energía electromagnética en los alimentos y el factor de pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ) está estrechamente asociado con la disipación de esta energía (Mudgett, 1986).

Las propiedades dieléctricas de los alimentos también pueden utilizarse para determinar la absorción de potencia de microondas (también conocida como la conversión de potencia,  $P_v$ ) y la profundidad de penetración de potencia ( $d_p$ ), que puede estimarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_v = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2$$

$$d_p = \frac{c}{2\sqrt{2\pi f} \left\{ \epsilon' \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right\}^{1/2}}$$

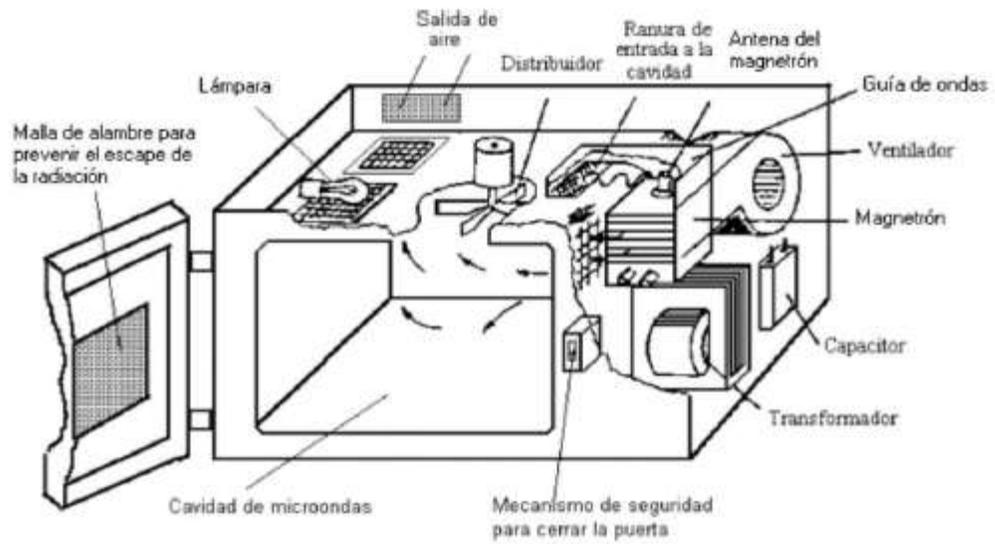
Donde  $f$  es la frecuencia (Hz),  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío ( $8.85 \times 10^{-12}$  F/m),  $\epsilon''$  es el factor de pérdida dieléctrica,  $E$  es el campo eléctrico (V/m) y  $c$  es la velocidad de la luz ( $2.998 \times 10^8$  m/s) (Venkatesh y Raghavan, 2004; Wang y col 2009).

Las propiedades dieléctricas de los productos alimenticios se ven afectadas principalmente por la frecuencia, la temperatura y el contenido de humedad (Sakiyan y col 2007).

### 3. Secciones de un microondas

En la **Figura 8** se muestran las secciones fundamentales que conforman a un microondas y a continuación se describe la función de cada componente.

- **Magnetron.** Es un tubo de vacío en el cual la energía eléctrica es convertida a un campo electromagnético oscilante. Las frecuencias más comunes son 915 MHz y 2450 MHz para microondas comerciales.



**Figura 8.** -Secciones de un microondas. Fuente: CROCETEX (2015).

- Una alimentación de energía (capacitor y transformador). Controla la energía que se alimenta al magnetrón, así como el tiempo de operación.
- Guía de ondas. Es un tubo de metal rectangular que dirige las ondas generadas por el magnetrón a la cavidad de microondas. Ayuda a prevenir una exposición directa del magnetrón a cualquiera salpicadura de alimentos que pudieran interferir con su función.
- Distribuidor. Se utiliza para distribuir las ondas de la guía de ondas y permitir un calentamiento más uniforme en el alimento.
- Placa giratoria. Gira los alimentos a través de los puntos calientes y fríos dentro de la cavidad de microondas y permite que los alimentos sean expuestos, eventualmente, a las microondas.
- Puerta o ranura de entrada de alimentos. Permite colocar los alimentos y debe estar diseñada para prevenir que ocurran fugas entre la puerta y la cavidad de microondas (Vollmer 2004; FEHD 2005).

#### **4. Aplicaciones**

En el proceso térmico convencional, la energía se transfiere por conducción desde la superficie del producto hasta la parte interior. Esto depende principalmente del gradiente de temperatura y de la conductividad térmica del producto (Liu y col 2015). Comparado con los métodos de calentamiento convencionales aplicados en la industria alimentaria, el calentamiento por microondas tiene varias ventajas tales como calentamiento volumétrico, altas velocidades de calentamiento y tiempos de procesamiento cortos (Zhang y col 2006).

El uso de las microondas es amplio, se ha investigado y aplicado en vegetales para procesos tales como pasteurización, esterilización, secado y escaldado, con diferentes objetivos, reducción de la actividad enzimática POD, induciendo cambios en propiedades físicas y químicas e incluso en compuestos fitoquímicos y vitaminas, principalmente en el contenido de Vitamina C (Chen y col 2016; Jiménez y col 2001; Peng y col 2017).

## **5. Escaldado por microondas**

Como se ha mencionado anteriormente hay muchas desventajas del escaldado húmedo. Requiere largos tiempos de procesamiento y altos consumos de energía, aunado a ello, se crean altos gradientes de temperatura entre el centro y la superficie del alimento, incrementando la posibilidad de obtener un “sobre-escaldado” o un “sub-escaldado”. Además, induce cambios indeseables en la textura del producto y genera efluentes con una alta demanda biológica de oxígeno (Ranjan y col 2016).

El escaldado por microondas (EM) se presenta como una potencial operación unitaria, las propiedades físicas de calidad del brócoli tratadas con escaldado con microondas son de alta aceptabilidad, no habiendo cambiado significativamente los parámetros de color y textura, en brócoli y coliflor (Mansour y col 2015). Esto es más efectivo en productos con alto contenido de agua como el brócoli (De Corcuera y col 2004).

En estudios realizados utilizando este tipo de escaldado, Chen y col (2016) reportan una comparación entre diferentes métodos de escaldado: Método tradicional, microondas, escaldado con agua hirviendo y escaldado con vapor en frutos de *Capsicum frutescens* L., con el fin de obtener las condiciones óptimas del escaldado por microondas, para inactivar la enzima POD, encontrándose que a una potencia de 525 W por 54.5 segundos, se aseguraba la inactivación de la enzima.

En otro estudio llevado a cabo por Ramesh y col (2002) se realizó escaldado por microondas (EM), comparándolo con el escaldado tradicional (ET) en pimientos, zanahorias y espinacas, con el fin de evaluar la potencial retención de vitamina C y la desactivación de POD; las cinéticas obtenidas en este trabajo indicaron que el EM fue comparable al ET. La temperatura y el calor absorbido durante el EM fue afectado por el tipo de vegetal, volumen, forma, ubicación dentro del microondas y potencia aplicada en el microondas.

Palma Orozco y col (2012) realizaron un estudio en frutos de mamey utilizando EM, estos autores reportaron una inactivación de la enzima PPO en el EM a temperaturas inferiores al ET, alcanzando temperaturas de 79 °C, comparado con una temperatura de 92 °C del ET, por lo tanto, se propuso el EM como un efectivo método para inactivar completamente la PPO sin causar un daño significativo en la forma y tejidos del fruto, además la conservación de color, olor y sabor fue favorecida.

Por su parte Pellegrini-Zurita (2017) al aplicar un ET, EM y EMSI en frutos de tomate para obtener un jugo de tomate con la menor actividad de las enzimas PG1 y PG2 reporta que a excepción del color, EMSI presentó los valores más deseables de los parámetros (físicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos), instancia que lo coloca como el mejor de los tres métodos analizados en esa investigación. Se recomienda el EMSI para realizar la inactivación enzimática.

#### IV JUSTIFICACIÓN

El brócoli es un vegetal muy perecedero el cual es altamente susceptible a daños microbiológicos y disminución de su calidad si no es debidamente tratado desde que es cortado del campo hasta su etapa de consumo. Debido a su naturaleza, el brócoli generalmente recibe tratamientos que le permiten alargar su vida de anaquel, en especial tratamientos térmicos como el escaldado, que permiten desactivar enzimas y retardar los procesos metabólicos propios de esta hortaliza, especialmente cuando ésta será sometida a congelación, pues incluso cuando el brócoli está a temperaturas muy bajas ( $-18^{\circ}\text{C}$ ) algunas de estas enzimas muestran actividad suficiente para provocar cambios indeseables que conducen a disminuir su calidad.

El escaldado tradicional, el cual consiste en sumergir a los frutos en agua caliente, con temperaturas de leves a moderadas ( $60-90^{\circ}\text{C}$ ) por tiempos cortos (1 a 5 min) es, generalmente, el método de escaldado más utilizado para este fin. Sin embargo, aunque se logran desactivar las enzimas responsables del deterioro durante el almacenamiento, se compromete la calidad del vegetal, produciéndose modificaciones en la estructura celular y su composición, además de componentes nutrimentales y fitoquímicos, estos últimos de gran interés por sus variados efectos positivos sobre la salud. Por otra parte, al entrar en contacto con el agua, los componentes hidrosolubles suelen salir de la matriz del vegetal por lixiviación y difusión.

El uso del microondas se presenta como una tecnología alternativa en el procesamiento de alimentos. Consiste en emitir a los alimentos radiaciones electromagnéticas las cuales absorben la energía de microondas y la convierten en calor por efecto de calentamiento dieléctrico del agua, causado por la rotación del dipolo molecular y la agitación de iones cargados dentro de un campo eléctrico alterno de alta frecuencia. Comparado con los métodos de calentamiento convencionales aplicados en la industria alimentaria, el calentamiento por

microondas tiene varias ventajas tales como calentamiento volumétrico, altas velocidades de calentamiento y tiempos de procesamiento cortos. Estas características permiten inactivar la enzima de interés más rápidamente y a su vez disminuir la pérdida de contenido nutrimental y de calidad.

La peroxidasa es la principal enzima de interés en el brócoli, responsable del oscurecimiento del brócoli, ya que es la más termoresistente, mientras que el contenido de Vitamina C representa el componente nutrimental más termosensible.

El reciente interés de disminuir el impacto ambiental que genera el escaldado tradicional por la alta cantidad de agua requerida y su eventual enriquecimiento de nutrientes, aunado a disminuir los tiempos necesarios para inactivar POD y obtener un nivel óptimo de parámetros de calidad y parámetros nutrimentales, han llevado al estudio constante por conseguir obtener el más alto valor de esta relación.

Por ello, el presente trabajo se enfoca en contrastar los procesos de escaldado de brócoli utilizando microondas tanto sin inmersión del vegetal en agua (EMSI), como con inmersión en agua (EM), así como el método tradicional de escaldado (ET) optimizados, con el fin de obtener los valores más altos de Vitamina C y firmeza, los más bajos en diferencia total de color  $\Delta E$  e inactivando completamente la POD.

## V OBJETIVOS

### A Objetivo general

Comparar la inactivación de peroxidasa en brócoli (*Brassica oleracea* L) cv. Itálica empleando condiciones optimizadas de escaldado tradicional, escaldado con microondas y escaldado con microondas sin inmersión en agua.

### B Objetivos específicos

1.- Optimizar las condiciones del proceso de escaldado tradicional (ET), con base en una menor actividad de POD, mayor retención de los parámetros nutrimentales (Vitamina C) y de calidad física (color y firmeza).

2.- Encontrar las condiciones óptimas del proceso de escaldado con microondas (EM) con base en una menor actividad de POD, mayor retención de los parámetros nutrimentales (Vitamina C) y de calidad física (color y firmeza).

3.- Obtener las condiciones del proceso de escaldado óptimas para microondas sin inmersión (EMSI) con base en una menor actividad de POD y mayor retención de los parámetros nutrimentales (Vitamina C) y de calidad física (color y firmeza).

4.- Comparar con base en los parámetros de calidad, nutrimentales y enzimáticos los métodos de escaldado tradicional (ET), escaldado con microondas (EM) y escaldado con microondas sin inmersión (EMSI) optimados.

## VI MATERIALES Y MÉTODOS

### A MATERIALES

#### 1. Materia prima

Se utilizó brócoli (*Brassica oleracea* L.) variedad itálica el cual se adquirió de un supermercado de Culiacán, Sinaloa. La selección se realizó con base en criterios de homogeneidad, libre de defectos físicos y en estado de madurez comercial.

##### a Baño María

Para llevar a cabo el escaldado tradicional se utilizó un baño María Modelo 9500, Fisher Scientific, el cual tiene integrado un termopar en el medio de calentamiento. Al fijar la temperatura deseada (set point), ésta se mantuvo durante el proceso a los diferentes tiempos descritos en el diseño experimental.

##### b Microondas

Para esta investigación se utilizó un horno de microondas comercial (Frigidaire, FMY141D1PGMM, Chihuahua, México) con dos modificaciones: un controlador de retroalimentación de bucle cerrado y un ventilador para la extracción de la humedad de la cámara (Pert y col 2001).

El controlador es de tipo proporcional, integral y derivativo (PID, Honeywell DC1010, Florida, USA), cuya función radica en corregir eficazmente, y en el mínimo tiempo, los efectos de las perturbaciones entre la señal de referencia y la señal del sensor instalado. Para ello, el parámetro de acción integral (I) se ajusta con la finalidad de que el error disminuya hasta cero, de manera asintótica con el tiempo. Además, a través de la función derivativa (D) se predicen valores sobre la respuesta de salida del proceso. Si los parámetros son los adecuados, el proceso es estable (Moreno 2001).

### **c Termopares**

Se utilizaron termopares tipo 'T', el cual está constituido por 2 alambres (cobre y constatan) los cuales al ser unidos provocan una diferencia de potencial que es proporcional a la temperatura del objeto. Son adecuados para medir temperatura en medios húmedos y tienen un funcionamiento adecuado en un amplio intervalo de temperatura (-200 a 350 °C) (Ganjloo y col 2011).

Para llevar a cabo la medición de temperatura durante los procesos de escaldado con microondas (EM) y escaldado con microondas sin inmersión en agua (EMSI) los termopares fueron recubiertos con adhesivo epóxico de alta conductividad térmica (LOCTITE EA 9497™), con el fin de evitar interferencias entre las microondas y los alambres del termopar, y controlar la temperatura del proceso de manera adecuada (Jaturonglumlert y Kiatsiriroat 2010).

## **B MÉTODOS**

Antes de usar las hortalizas se dividieron en floretes con una masa entre 10 y 15 g, posteriormente, fueron lavados y desinfectados con una solución al 0.1 % de hipoclorito de sodio. Se mezclaron y se tomaron al azar para aplicar los tratamientos (Mansour y col 2015).

### **1. Escaldado Tradicional**

Los floretes de brócoli se sumergieron en agua caliente a diferentes temperaturas (60 a 95 °C) y tiempos (1 a 5 min), una vez aplicado el tratamiento, los floretes fueron enfriados en baño de agua con hielo con agitación constante hasta alcanzar la temperatura ambiente. Los análisis se realizaron inmediatamente después (Iribe-Salazar y col., 2015).

### **2. Escaldado con microondas**

Los floretes de brócoli se sumergieron en un vaso de precipitados de 2 L con agua caliente a diferentes temperaturas (60 a 95 °C). Inmediatamente el vaso se colocó en el horno de

microondas. El termopar se instaló en el agua caliente. Se activó el microondas y cuando la temperatura deseada se alcanzó, se mantuvo durante los diferentes tiempos de cada tratamiento (1 a 5 min). Una vez aplicado el tratamiento, los floretes fueron enfriados en baño de agua con hielo con agitación constante hasta alcanzar la temperatura ambiente. Los análisis se realizaron inmediatamente después (Pellegrini-Zurita 2017).

### **3. Escaldado con microondas sin inmersión**

Cuatro floretes por tratamiento se depositaron sobre una rejilla de plástico colocada en un vaso de precipitados de 2 L y se calentaron en el horno de microondas a 2450 MHz-900W. El vaso de precipitados se cubrió con una placa de Pyrex para evitar la pérdida de agua. Las muestras se escaldaron a diferentes temperaturas (60 a 95 °C) y tiempos (1 a 5 min). Una vez aplicado el tratamiento, los floretes fueron enfriados en baño de hielo con agitación constante hasta alcanzar la temperatura ambiente. Los análisis se realizaron inmediatamente después (Severini y col 2016).

### **4. Evaluación de los parámetros físicos de calidad**

#### **a Diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

Los parámetros de color  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  se midieron usando un colorímetro triestímulo Minolta CR-300 (Osaka, Japón). La calibración del colorímetro se realizó lanzando tres disparos sobre el mosaico de color blanco, donde el equipo registró los valores predefinidos de  $Y=93.50$ ,  $x=0.3139$  y  $y=0.3196$ . La diferencia total de color indica la distancia entre la muestra tratada y el control (muestra no tratada) en la esfera de color (Patras y col., 2011). El color se expresó en coordenadas Hunterlab  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . En la medición se determinaron los parámetros  $L_f^*$ ,  $a_f^*$  y  $b_f^*$  de color en diferentes zonas de la superficie del florete de brócoli de las muestras frescas (control); así como,  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de los diferentes tratamientos: Escaldado tradicional (ET),

escaldado en microondas (EM) y escaldado en microondas sin inmersión (EMSI), respectivamente.

La diferencia total de color ( $\Delta E$ ) se obtuvo mediante la siguiente ecuación (Peng y col 2017):

$$\Delta E = [(L^* - L_f^*)^2 + (a^* - a_f^*)^2 + (b^* - b_f^*)^2]^{1/2}$$

Donde:

$\Delta E$  = Diferencia total de color de las muestras para cada tratamiento.

$L_f^*$ ,  $a_f^*$  y  $b_f^*$  = Valores para las muestras en fresco (control).

$L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  = Valores en las muestras después del tratamiento.

### **b Firmeza**

La firmeza se midió de acuerdo con la metodología reportada por Marangoni y col (1995). Floretes de brócoli se colocaron en la base de un penetrómetro (Chatillon Ametek E-DFE 100, North California, EUA), equipado con una punta plana de 1.1 mm de diámetro, la cual penetró la superficie longitudinal de la parte inferior de cada tallo. Los floretes se situaron perpendicularmente con respecto a la punta, se empleó una distancia de penetración de 5 mm a una velocidad de penetración constante (50 mm/min). Las pruebas se realizaron por triplicado ( $n = 3$ ). Los resultados se reportaron como la fuerza de compresión máxima para penetrar el tejido de la hortaliza expresada en Newton.

## **5. Evaluación del parámetro nutrimental**

### **a Contenido de Vitamina C**

El contenido de Vitamina C se determinó espectrofotométricamente siguiendo la metodología descrita por Iribe-Salazar y col (2015), cuyo principio se basa en la reacción del ácido ascórbico con el 2,6 diclorofenolindofenol (DCPI), en donde la vitamina C reduce al DCPI el cual absorbe a 520 nm. El extracto se obtuvo al mezclar 0.5 g de muestra en 15 mL de ácido oxálico (0.4 % p/v) en un homogeneizador (Ultra-Turrax IKA, T18 basic S1, Alemania) durante 1 min, posteriormente se filtró a través de 4 capas de tela de organza. Para la determinación se utilizó un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA) que primero se ajustó a cero con agua desionizada.

Se elaboró una curva de calibración al graficar la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con ácido ascórbico contra diferentes concentraciones de solución estándar de ácido ascórbico (1-50 ppm). La absorbancia debida a la reacción se calcula con la diferencia entre la absorbancia (L1) para el DCPI total y la absorbancia (L2) para el DCPI residual después de la reacción con el ácido ascórbico. La diferencia L1-L2 representa la absorbancia correspondiente a la reacción. La absorbancia L1 para el DCPI total se obtiene de la mezcla de solución de ácido oxálico (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + solución DCPI (8 mL). El equipo se ajusta de nuevo a cero con la mezcla de solución estándar (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + agua desionizada (8 mL). La absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene de la mezcla de solución estándar (1 mL) + solución buffer de acetato de sodio (1 mL) + DCPI (8 mL). Se evalúa una sola absorbancia L1 para el DCPI total, mientras la absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene para cada estándar.

Para medir el contenido de vitamina C presente en los extractos, el espectrofotómetro se ajusta a cero al mezclar solución del extracto de brócoli (1 mL) + solución buffer de acetato de

sodio (1 mL) + agua desionizada (8 mL). La absorbancia L2 para el DCPI residual se obtiene de la mezcla de solución del extracto de brócoli (1 mL) + buffer de acetato de sodio (1 mL) + DCPI (8 mL). La diferencia L1–L2 representa la absorbancia que resulta de la reacción de reducción del DCPI con ácido ascórbico; al sustituir esta diferencia de absorbancia en la ecuación de la recta correspondiente a la curva de calibración (gráfico L1–L2 contra concentración de ácido ascórbico) se obtiene la concentración de ácido ascórbico presente en la muestra. Se realizaron 3 réplicas.

## **6. Análisis enzimático**

### **a Actividad de la enzima peroxidasa (POD)**

La actividad de la enzima peroxidasa (POD) se determinó según el método descrito por Zhang y col (2005), basado en la reacción de oxidación del guayacol en presencia de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) para formar el compuesto coloreado tetraguayacol. La preparación del extracto consistió en obtener 10 g de muestra, adicionar 2 g de PVPP [Poly(vinylpolypyrrolidone)] y homogeneizar a 4 °C usando 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH=7). El extracto se mantuvo durante 2 horas en oscuridad a 4 °C en un mezclador serológico de vaivén (Unico, TTR-200, EUA), posteriormente se filtró y centrifugó a 11000×g por 25 min a 4 °C y enseguida se tomaron 10 mL del sobrenadante. La precipitación de la proteína se realizó al saturar el sobrenadante al 70 % con sulfato de amonio  $[(NH_4)_2SO_4]$ , se mantuvo de nuevo durante 15 min en oscuridad a 4 °C en el mezclador serológico de vaivén, posteriormente se centrifugó a 11000×g por 25 min a 4 °C, se tomó el precipitado, al cual se le adicionaron 20 mL de buffer de fosfato de sodio (0.05 M, pH=7), previamente mantenido a 4 °C, y finalmente se obtuvo el extracto enzimático.

La mezcla del ensayo consistió en 2.7 mL de buffer de fosfato de sodio (0.2 M, pH =6.5), 0.1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (0.1 % v/v en agua), 0.15 mL de guayacol (4 % v/v en agua) y 0.15 mL de extracto enzimático (López-López y col 2013). Se determinaron los cambios de absorbancia a 470 nm y 25 °C durante 3 min en lapsos de 10 s en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation Genesys 10uv, Madison, EUA). Las mediciones de la actividad de la enzima se llevaron a cabo por triplicado.

La actividad volumétrica ( $a_V$ ) de la enzima peroxidasa se calculó al considerar la pendiente de la porción lineal de la curva de la cinética de absorbancia ( $A$ ) contra tiempo de reacción ( $t$ ).

$$a_V = \frac{\left(\frac{\Delta A}{t}\right) V_T}{\epsilon l V_{Extr.}}$$

Donde:

$\frac{\Delta A}{t}$  = pendiente (min<sup>-1</sup>) del gráfico absorbancia ( $A$ ) contra tiempo ( $t$ ).

$\epsilon$  = coeficiente de extinción (25.5 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>, reportado por Thongsook y Barrett 2005).

$V_T$  = volumen total (3.1 mL).

$V_{Extr.}$  = volumen del extracto enzimático (0.15 mL).

$l$  = espesor de la celda, 1 cm.

## 7. Métodos estadísticos

### a Diseño experimental

Se utilizó un diseño central rotatable con dos factores: temperatura (60 a 95 °C) y tiempo (1 a 5 min) con cinco niveles de variación para cada factor haciendo un total de 13 tratamientos (**Cuadro 4**) (Myers y Montgomery 1971; Montgomery y Jaime 1991).

**Cuadro 4.** Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización de los procesos de escaldado.

<b>Orden Estándar</b>	<b>Orden Propuesto</b>	<b>Tiempo (min)</b> <b>X1</b>	<b>Temperatura (°C)</b> <b>X2</b>
<i>1</i>	7	1.73	65.1
<i>2</i>	8	5.3	65.1
<i>3</i>	13	1.7	89.9
<i>4</i>	3	5.3	89.9
<i>5</i>	4	1	77.5
<i>6</i>	1	6	77.5
<i>7</i>	10	3.5	60
<i>8</i>	5	3.5	95
<i>9</i>	2	3.5	77.5
<i>10</i>	6	3.5	77.5
<i>11</i>	9	3.5	77.5
<i>12</i>	11	3.5	77.5
<i>13</i>	12	3.5	77.5

## **b Optimización**

Para llevar a cabo la optimización del proceso se utilizó la metodología de superficie de respuesta (MSR) que es un grupo de técnicas estadísticas y matemáticas útiles en el modelado y el análisis de problemas en los que el objetivo es optimizar simultáneamente varias respuestas. La MSR define el efecto de las variables de proceso, individual o de manera combinada, así se puede modelar y analizar problemas en los que la variable de interés es afectada por otra. Esta metodología permitió ajustar los valores experimentales para generar modelos matemáticos de predicción (Baş y Boyacı 2007).

## **c Análisis de datos**

El análisis de datos se llevó a cabo con el software Design Expert® 7.0 utilizando los resultados experimentales obtenidos en cada una de las variables de respuesta, donde los términos no significativos ( $p > 0.05$ ) fueron descartados para determinar los modelos de predicción de cada una de las variables de respuesta y así fue posible obtener modelos con mejor ajuste. Una vez analizados los datos éstos fueron graficados (Pellegrini-Zurita 2017).

Para que un modelo de predicción se ajuste correctamente, es necesario cumplir con cuatro condiciones: valor  $p$  del modelo ( $p < 0.05$ ), un coeficiente de determinación ajustado ( $R_{ajust}^2 > 0.8$ ), coeficiente de variación (C.V.  $< 10\%$ ) y que pase la prueba de falta de ajuste. Cuando estas condiciones se cumplen, el modelo se considera adecuado (Milán-Carrillo y col 2006).

Para la optimización se utilizó el método numérico. Los criterios empleados para la optimización del proceso se seleccionaron para mantener la calidad del brócoli lo más parecida al estado fresco, éstos fueron: menor actividad enzimática, mayor contenido de vitamina C, menor diferencia total de color ( $\Delta E$ ) y mayor firmeza.

#### **d Validación del modelo de predicción**

La validación del modelo se concentra en la determinación de si el modelo funcionará bien en su ambiente pretendido de operación. El método más eficaz para validar un modelo de regresión con respecto a su eficiencia de predicción es reunir nuevos datos y comparar en forma directa las predicciones del modelo con esos datos, a esta técnica se le conoce como de recolección de nuevos datos o corridas de confirmación (Sezer y Demirdoven 2015).

Se realizaron experimentos para validar el modelo matemático predicho por el software. Se utilizaron 5 réplicas para cada proceso de escaldado optimizado ( $n=5$ ). Las variables de respuesta fueron: actividad enzimática, contenido de Vitamina C, diferencia total de color ( $\Delta E$ ) y firmeza.

#### **e Contraste de los métodos de escaldado**

Para la comparación de los tres métodos de escaldado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) unifactorial completamente al azar con 3 niveles (ET, EM y EMSI). Se llevaron a cabo 5 réplicas ( $n=5$ ) de cada método y para la comparación de datos de las variables de respuesta se usó la prueba de Fisher (LSD) con un  $\alpha=0.05$  en el software estadístico STATGRAPHICS 5.0 (Pellegrini-Zurita 2017).

## VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A MODELOS EXPERIMENTALES DE REGRESIÓN PARA PARÁMETROS FÍSICOS DE CALIDAD, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE BRÓCOLI ESCALDADO.

#### 1. Escaldado Tradicional (ET)

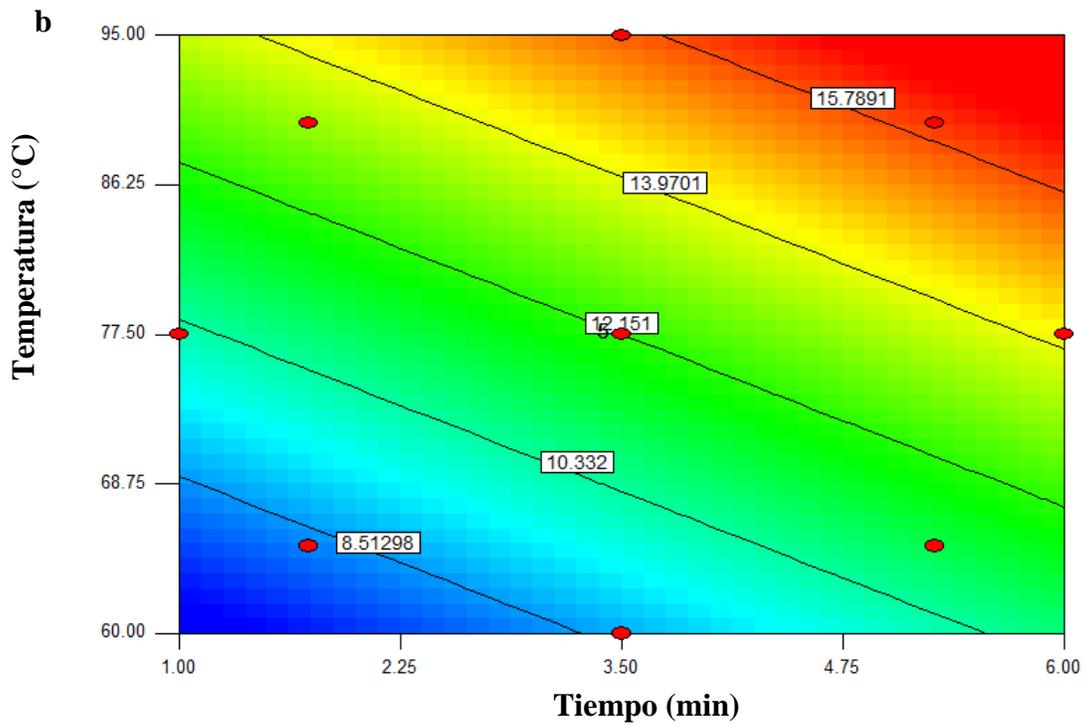
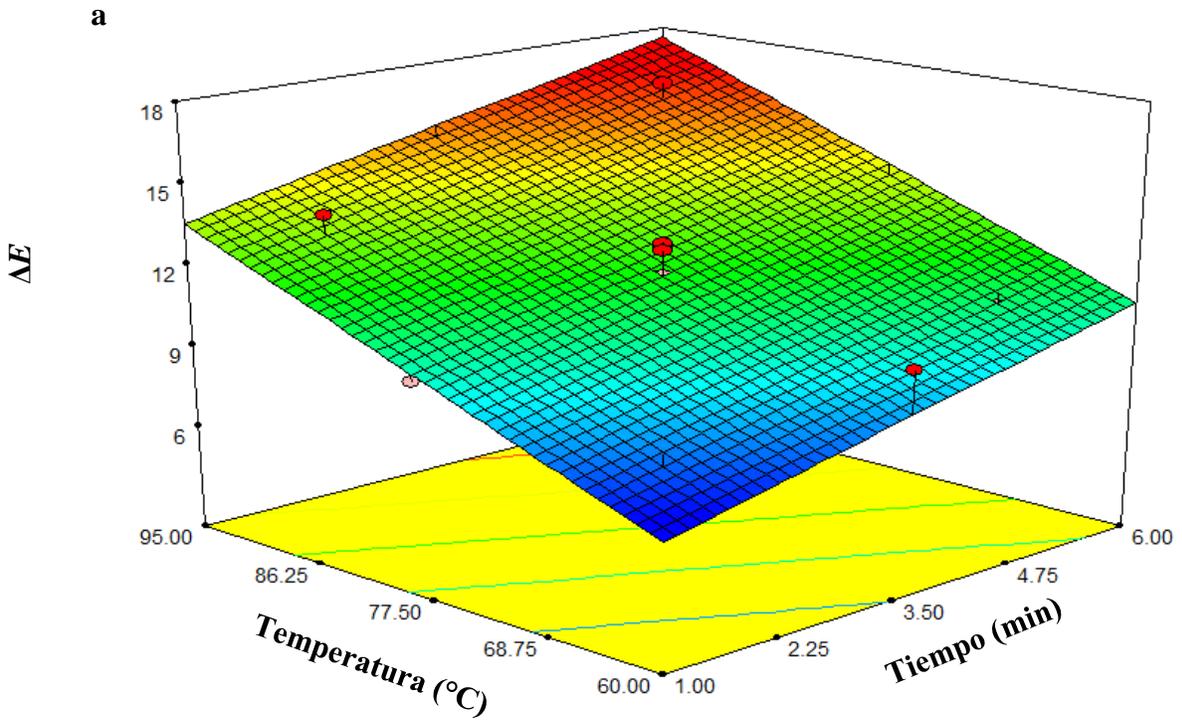
##### a Parámetros físicos de calidad

##### 1) Diferencia total de color ( $\Delta E$ )

En la **Figura 9** se muestra el comportamiento de  $\Delta E$  de floretes de brócoli escaldados utilizando el ET, a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología. Se aprecia un incremento lineal de  $\Delta E$  a medida que la temperatura incrementa y el tiempo de proceso se prolonga. La diferencia total de color experimental más alta (16.6) se ubicó en la combinación de 5.3 min y 89.9 °C, la diferencia de color estuvo en el rango de 7 a 16.6. El modelo de predicción con variables codificadas tanto para el tiempo como para la temperatura fue el siguiente:

$$\Delta E = 12.15 + 1.41X_1 + 2.45X_2$$

Donde  $t$  representa el tiempo y  $T$  la temperatura. Para todos los modelos descritos a lo largo de los resultados se reportan variables codificadas, con el fin de hacer comparaciones directas entre factores. El modelo obtenido fue lineal. El valor F del modelo de 38.43 implica que el modelo es significativo. Solo hay un 0.01% de probabilidad de que un Valor F del modelo de este tamaño pueda ocurrir debido al ruido. Los términos significativos para dicho modelo fueron tiempo y temperatura. Además, no presentó falta de ajuste ( $p=0.2015$ ), se obtuvo un coeficiente de variación de 7.50 %, que es menor al límite máximo aceptable (10 %), y explicó el 88.49 % de la variabilidad experimental. Con estas condiciones se puede decir que el modelo es aceptable



**Figura 9.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el  $\Delta E$  de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.

y reproducible.

La pérdida de color es un factor primario limitante de la vida útil del brócoli fresco y es a menudo el primer parámetro que los consumidores juzgan antes de realizar la compra de un alimento. Mediante el color es posible dar un primer juicio de calidad, madurez y edad después de la cosecha de muchos vegetales (Barrett y col 2000). El escaldado puede tener efectos directos o indirectos. Estos cambios son ejemplificados por la destrucción de pigmentos, como la clorofila, por el calor (De Corcuera y col 2004).

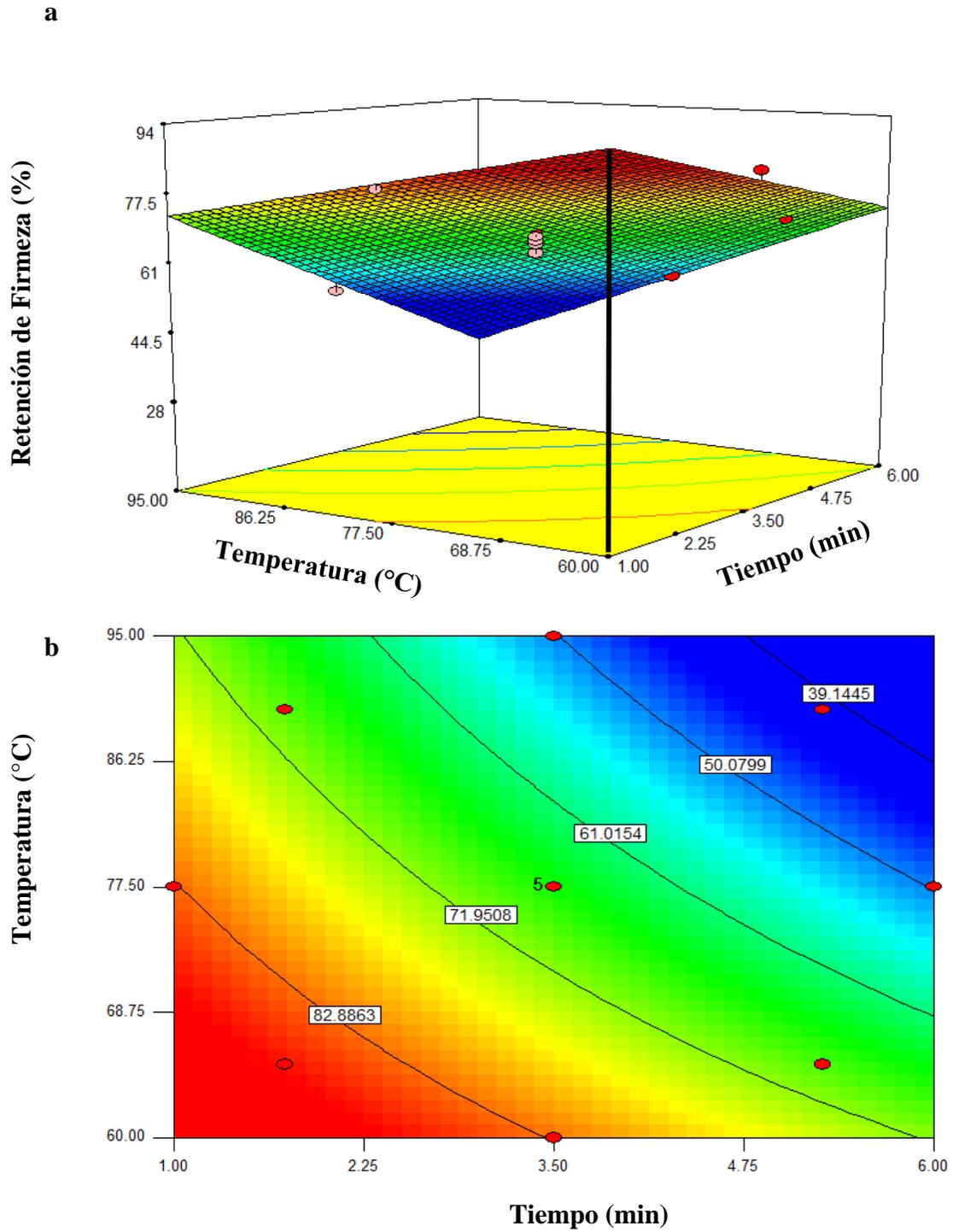
Patras y col (2011) realizaron un estudio para examinar el efecto de la congelación y escaldado, en conjunto, de brócoli, zanahorias y ejotes, evaluando el color. Indican un incremento significativo de color ( $\Delta E$ ) para todos sus tratamientos luego de aplicar un ET de 95 °C por 3 min. Además, reportan un intervalo de 6-12 para  $\Delta E$ , lo que concuerda con los resultados de este estudio.

Por su parte, Goncalves y col (2011) que estudiaron el efecto del congelamiento con un ET a 70 °C por 6.5 min como etapa previa sobre algunas características de calidad del brócoli; Estos autores reportaron parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  correspondientes a un  $\Delta E$  de 16. Dicho valor está en el límite superior de nuestro rango, que correspondió a una temperatura de 89.9 °C y 5.3 min.

## 2) Firmeza

El comportamiento de la retención de firmeza (%  $RF$ ) en función de la temperatura y tiempo de proceso para el ET se muestra en la **Figura 10**. La firmeza disminuyó al aumentar la temperatura y el tiempo. El intervalo de retención de firmeza experimental correspondió a 48-88 %. La máxima retención de firmeza se encontró en  $T=65$  °C y  $t=1.7$  min y la mínima en  $T=95$  °C y  $t=3.5$  min. A continuación, se muestra el modelo de predicción:

$$\% \mathbf{RF} = 66.52 - 11.78X1 - 11.42X2 - 2.75X1X2$$



**Figura 10.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % *RF* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.

El valor F del modelo de 86.53 implica que el modelo es significativo. El modelo de predicción para esta variable de respuesta se ajustó con términos significativos para tiempo, temperatura y la interacción. Dicho modelo no presentó falta de ajuste ( $p=0.2067$ ), tuvo un coeficiente de variación menor al 10 % (4.36 %) y explicó el 96.6 % de la variación experimental, bajo estos criterios se puede considerar al modelo como adecuado y repetible.

Barrett y col (2000) quienes estudiaron el efecto de diferentes tiempos de escaldado requeridos para la inactivación de enzimas críticas como la peroxidasa, lipoxigenasa y catalasa reportan que el tiempo de exposición fue el factor que más impactó la firmeza, observaron un incremento en dicho parámetro hasta los 90 s para luego disminuir significativamente.

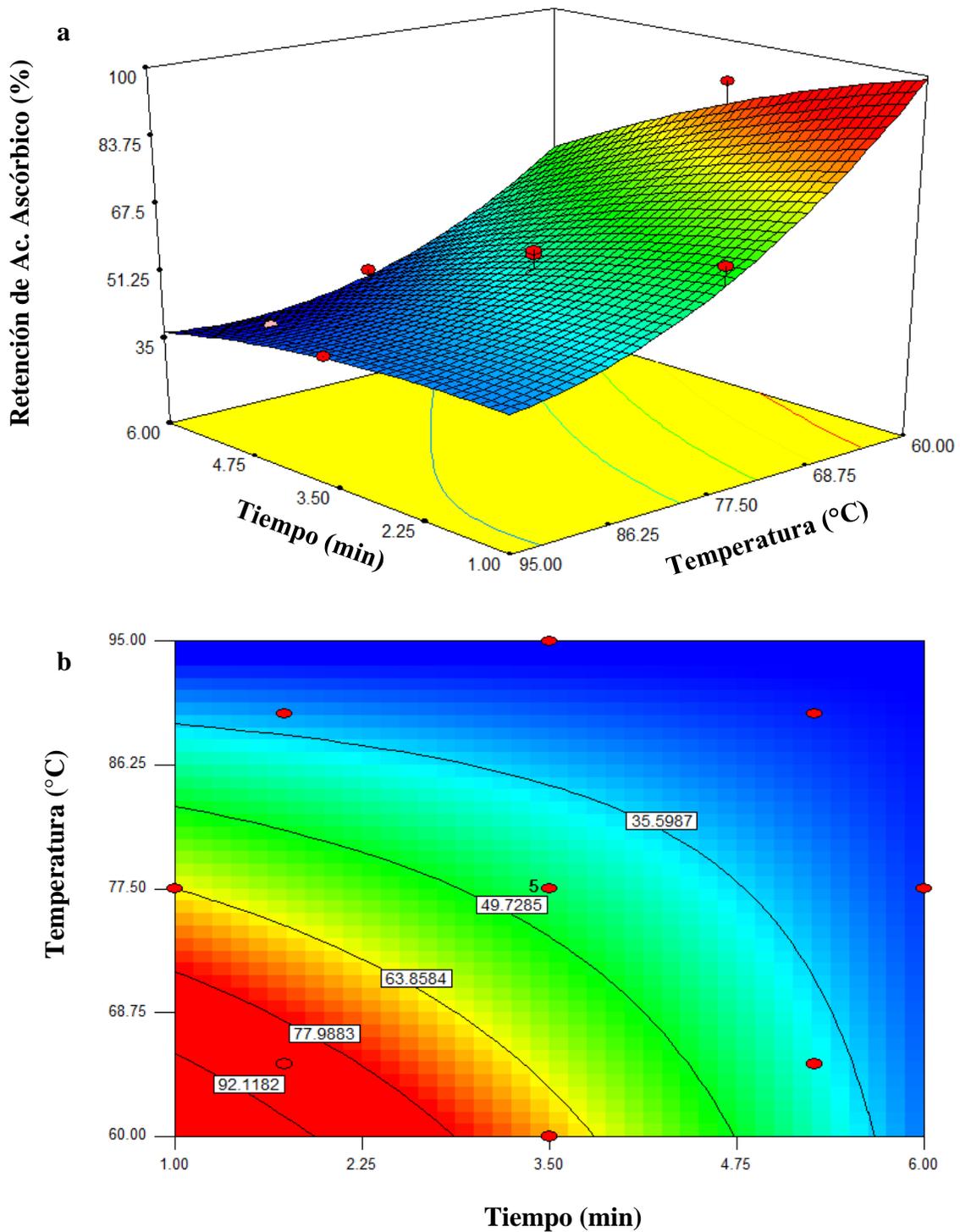
Atribuyen dicho comportamiento a que en un inicio se activan enzimas como la pectin metil esterasa que mejora la firmeza mediante hidrólisis de grupos metilo de cadenas de pectinas aumentando la disponibilidad de grupos carboxilo, sin embargo, una vez alcanzado dicho tiempo se perjudica la calidad de la hortaliza por la disrupción de las paredes celulares.

Por su parte, Sanjuán y col (2001) reportan que la mejor manera de mantener la textura del brócoli después del procesamiento consiste en escaldar escalonadamente a 60-65 °C. Este efecto lo atribuyen al hecho de que para una temperatura de escaldado alrededor de 61-65 °C, la actividad de PME aumenta, favoreciendo la desmetoxilación de las sustancias pécticas dando

## **b Parámetro nutrimental**

### **1) Contenido de Vitamina C**

En la **Figura 11** se presentan los gráficos para el parámetro nutricional de retención de ácido ascórbico (% RAA) de floretes de brócoli escaldados mediante ET. La retención de este parámetro nutrimental se encontró en el intervalo de 23.6-78.0 %. Se aprecia una notable dismi-



**Figura 11.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % **RAA** de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.

nución al incrementarse la temperatura y el tiempo de proceso. Se muestra en seguida el modelo de predicción.

$$\% RAA = 45.28 - 13.14X1 - 16.36X2 + 9.63X1X2$$

El valor F del modelo de 68.56 implica que el modelo es significativo. El modelo de predicción tuvo como términos significativos la temperatura, el tiempo y la interacción entre ellos. Además, no presentó falta de ajuste ( $p=0.1350$ ), tuvo un coeficiente de variación menor al 10 % (9.61 %) y explicó el 95.8 % de la dispersión experimental.

La vitamina C (ácido ascórbico (AA)) es, con mucho, el nutrimento más comúnmente analizado en el escaldado, probablemente porque su alta solubilidad y susceptibilidad al calor, lo convierte en un indicador adecuado de la retención de nutrimentos (De Corcuera y col 2004).

Contenidos de vitamina C similares a los obtenidos en el presente estudio para brócoli fresco fueron reportados por Wambui-Munyaka y col (2010), de 129 mg/100 g de fruto fresco (gff). Estos investigadores aplicaron 2 tratamientos: 90 °C por 4 min y 60 °C por 40 min. Para el primero reportan pérdidas de 46 % y para el segundo hasta del 58 %. Estos autores argumentan que es posible que dichas pérdidas se produzcan por cierta oxidación enzimática de AA a ácido dehidroascórbico antes de que los floretes de brócoli alcancen la temperatura del agua hirviendo durante el choque térmico. Esto ocurre debido a la activación de las enzimas L-ascorbato oxidasa y ascorbato peroxidasa que se asocian principalmente con la oxidación de AA en el tejido de la planta. Las condiciones de estrés tales como enfriamiento, alta temperatura y alta intensidad de luz pueden ocasionar la liberación de especies de oxígeno reactivo (ROS) como superóxido ( $O_2^-$ ), oxígeno singulete, ozono ( $O_3$ ) y peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ). El ácido ascórbico reacciona con estas ERO como antioxidante para proteger al tejido vegetal del daño.

### c Parámetro enzimático

#### 1) Actividad de la enzima peroxidasa

La variable de respuesta POD (% AR) se presenta en la **Figura 12**. La observación visual permite inferir que existe un comportamiento cuadrático, se aprecia una disminución gradual conforme se aumenta la temperatura y el tiempo, sin embargo, a temperaturas mayores a 77.5 °C se observa una caída más repentina.

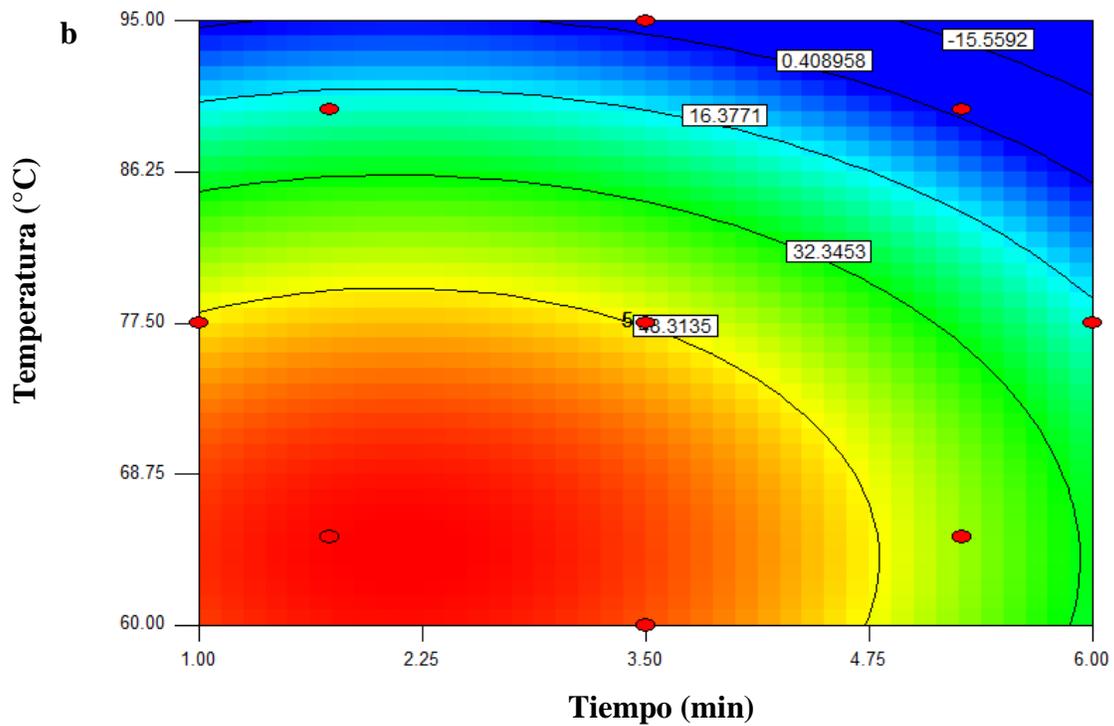
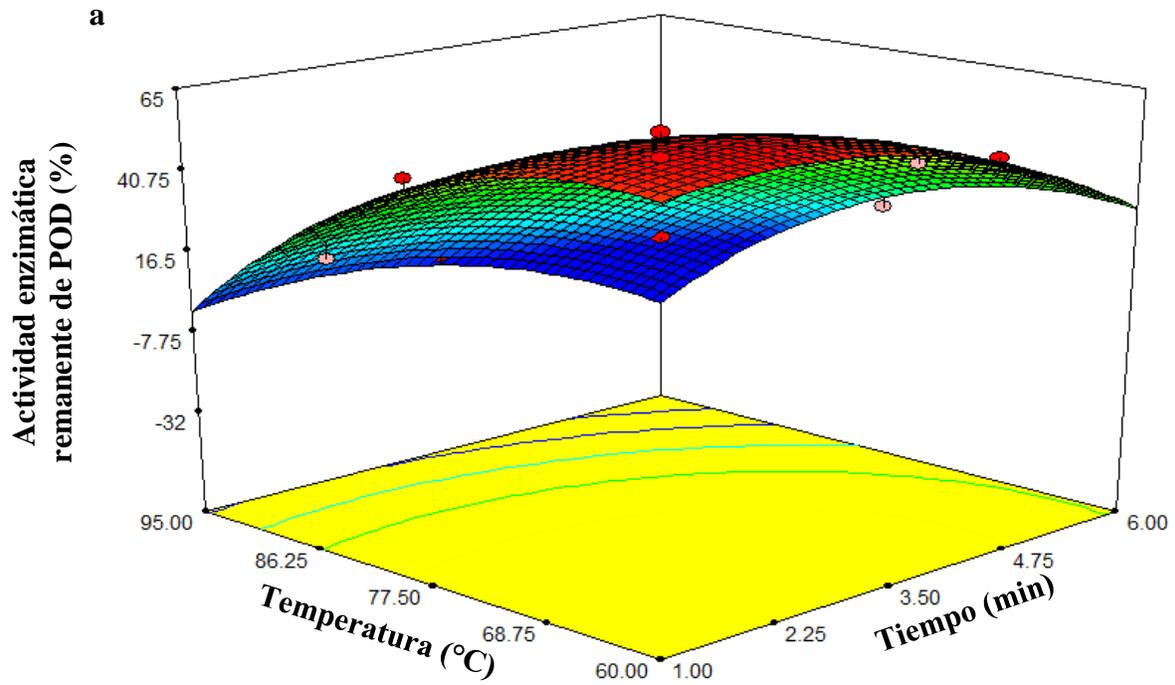
De manera parecida, a tiempos mayores a 3.5 min se aprecia que la disminución de actividad residual de la enzima (% AR) es más rápida, hasta alcanzar valores de 0 % de actividad. La actividad enzimática de POD se situó en el intervalo de 64-0 %. El modelo de predicción obtenido fue el siguiente:

$$\% AR = 47.9 - 10.79X_2 - 21.83X_1 - 6.83X_1^2 - 9.82X_2^2$$

El valor F del modelo de 103.7 implica que el modelo es significativo. Se encontró que el modelo matemático sigue un orden cuadrático, sin significancia en la interacción de los factores, no presentó falta de ajuste ( $p=0.3032$ ), además de tener un coeficiente de variación menor al 10 % (9.78 %) y explicar el 98.1 % de la variabilidad experimental.

Barrett y col (2000) reportan una tendencia similar a la del presente estudio, encontrando una disminución de la actividad enzimática al prolongarse el tiempo de escaldado. Durante los primeros 45 s hubo una disminución significativa, llegando a inactivar totalmente las enzimas peroxidasa, cisteína liasa y lipooxigenasa a los 90 s.

En otro estudio realizado por Sanjuán y col (2001) al evaluar un ET como pretratamiento para el secado de floretes de brócoli, observaron que la actividad de la peroxidasa persistía a una temperatura de escaldado entre 50-70 °C. De manera similar, se aprecia en el gráfico de superficie de respuesta de la **Figura 12** que la actividad remanente de la enzima disminuyó más



**Figura 12.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % **AR** de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado tradicional.

drásticamente al superar los 70 °C.

Tendencias similares a las de este estudio fueron las reportadas por Pérez y col (2015) quienes sumergieron sus extractos enzimáticos en un baño termostático para el ensayo de inactivación térmica. Las temperaturas de ensayo fueron 75, 80 y 90°C, y los tiempos totales de extracción variaron entre 0 y 400 s con extracciones cada 10-20 s. Sus resultados muestran claramente que el porcentaje de enzima inactivada se incrementa al aumentar la temperatura de inactivación y el tiempo de tratamiento. Se midieron las curvas de inactivación enzimática y se detectó un comportamiento bifásico con presencia de dos fracciones, una termolábil y otra termoresistente, cuya tendencia, discuten, ha sido previamente reportada en la literatura.

## **2. Escaldado con Microondas (EM)**

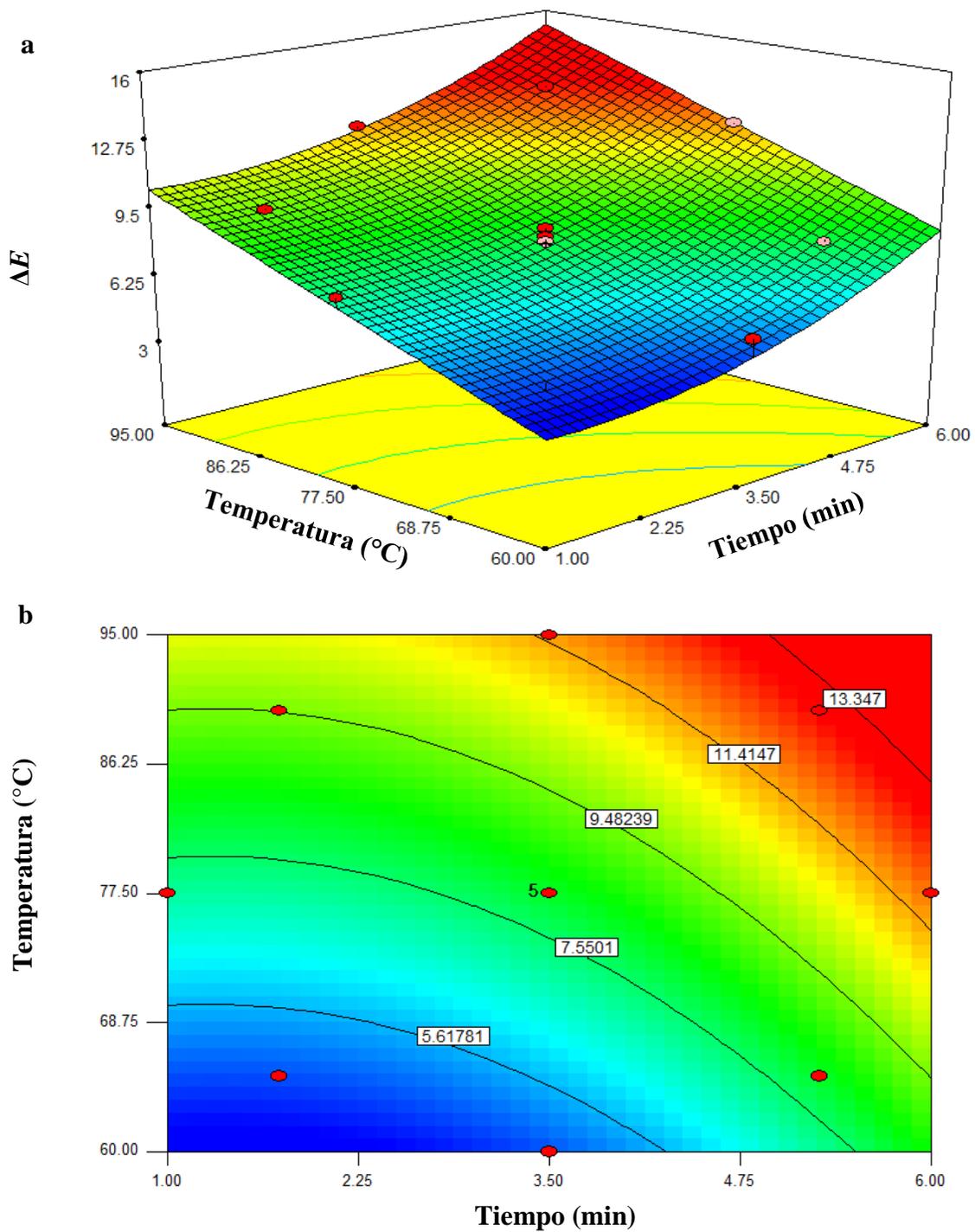
### **a Parámetros físicos de calidad**

#### **1) Diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

En la **Figura 13** se muestra la diferencia total de color  $\Delta E$  durante el proceso de escaldado con microondas. El  $\Delta E$  estuvo en el intervalo de 3.94 hasta 12.98. Se aprecia en el gráfico, un incremento en relación con el aumento de la temperatura y el tiempo, es decir al aumentar uno u otro factor, la diferencia total de color aumenta. Asimismo, la exposición por tiempos cortos y temperaturas bajas ocasionó los menores  $\Delta E$ .

Los términos significativos fueron tiempo, temperatura y tiempo al cuadrado. Se muestra a continuación la ecuación para el modelo de predicción de la diferencia total de color:

$$\Delta E = 8.13 + 1.7X1 + 2.39X2 + 0.68X1^2$$



**Figura 13.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el  $\Delta E$  de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.

El valor F del modelo de 89.31 implica que el modelo es significativo. La falta de ajuste no fue significativa ( $p = 0.1371$ ).

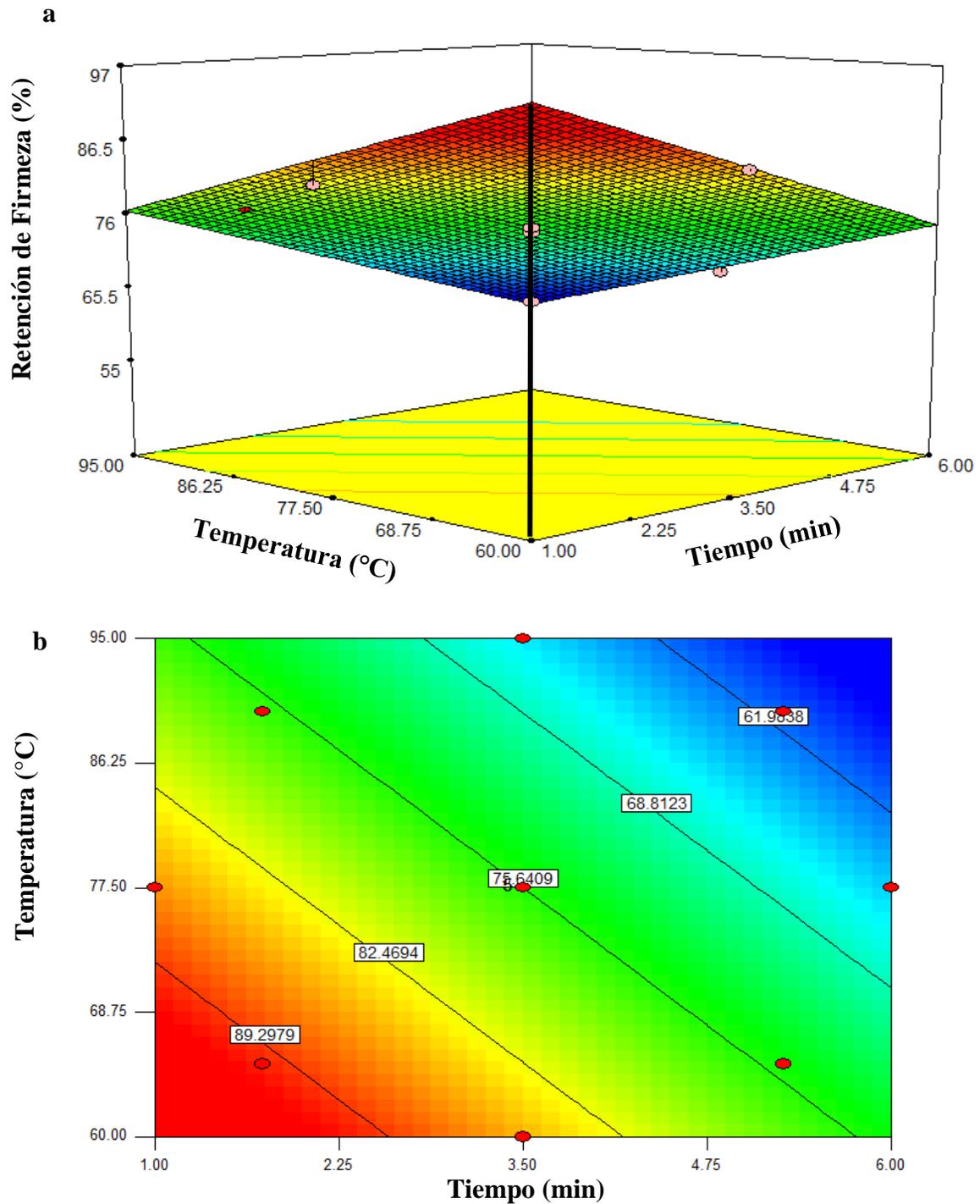
El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es un estadístico que nos indica la calidad del modelo para replicar los resultados (proporción de los resultados que puede explicarse por el modelo) (Steel y Torrie 1960). Para nuestro modelo, el coeficiente  $R^2$  ajustada fue de 0.92, el cual es aceptable, ya que es superior al 0.8 recomendado, además el coeficiente de variación fue de 6.07 %, menor al límite máximo recomendado (10 %); El modelo para la diferencia total de color cumple con los parámetros estadísticos anteriormente descritos, por lo que se puede decir que es adecuado y reproducible.

El escaldado con microondas representa un ahorro energético, ya que la temperatura del medio (agua) se mantiene mediante las radiaciones electromagnéticas del magnetrón. Una vez alcanzada la temperatura varía muy poco debido a la alta capacidad calorífica del agua (Palma-Orozco y col 2012).

Este aumento en la diferencia total de color puede ser debido a que los tratamientos térmicos son conocidos por degradar la clorofila en feofitinas que poseen un color verde-grisáceo, provocando una disminución de luminosidad (Richter Reis 2017).

## 2) Firmeza

El comportamiento de firmeza con el EM, se presenta en la **Figura 14**, esta variable de respuesta se reportó como porcentaje de retención de firmeza. En el gráfico de superficie de respuesta se aprecia que en la zona de temperatura de 95 °C se presenta la firmeza mínima. Por otro lado, en la zona que corresponde a un tiempo de 1 min y temperatura de 60 °C se muestra un porcentaje más alto de firmeza. La retención de firmeza estuvo en el rango de 57 al 91 %.



**Figura 14.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % *RF* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.

El modelo de predicción para el porcentaje de retención de firmeza fue lineal:

$$\% \mathbf{RF} = 75.64 - 7.6X1 - 6.89X2$$

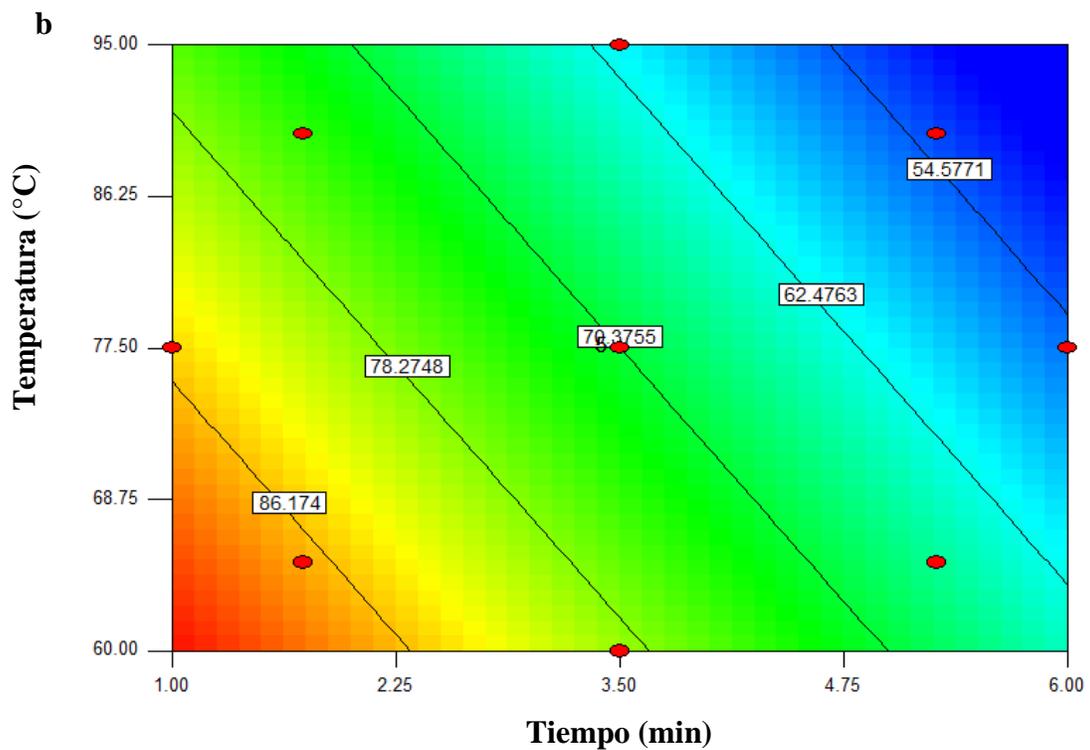
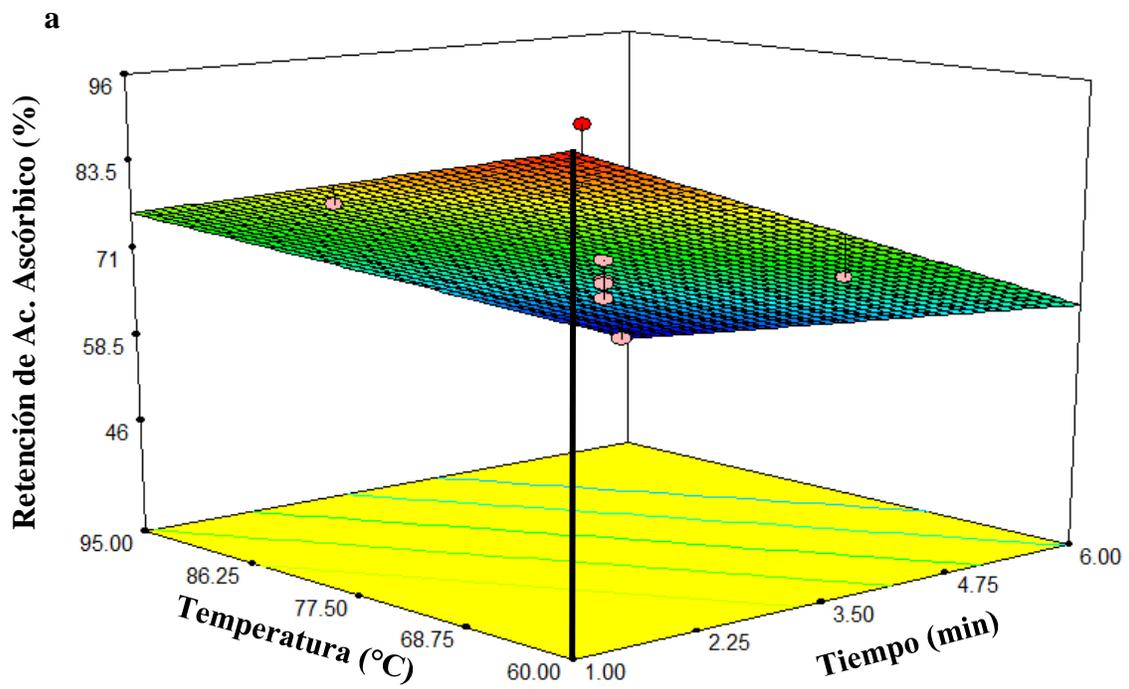
El valor F del modelo de 57.02 implica que el modelo es significativo. El modelo de predicción explicó el 91 % de la variación total de los datos ( $p > 0.0001$ ), no presentó falta de ajuste ( $p = 0.5390$ ) y el coeficiente de variación fue de 3.59 %, muy por debajo del límite máximo recomendado (10 %), por lo que se puede decir que el modelo es aceptable y reproducible.

La firmeza es una propiedad de calidad física de suma importancia, por ello siempre se busca un producto con la mayor retención de dicho parámetro. Al aplicar un tratamiento térmico se degradan muchos pigmentos como la clorofila, se activan enzimas como la pectin metil esterasa, que puede incrementar la firmeza de los tejidos vegetales mediante la liberación de grupos carboxilo entre las estructuras monoméricas, como se detalló anteriormente, sin embargo, a temperaturas muy elevadas tiene un efecto adverso y termina por perjudicar la firmeza en acción con otras enzimas como celulasas y hemicelulasas que degradan la pared celular, así mismo, disminuyen las proteínas solubles y azúcares, todo ello produce una deformación estructural de los tejidos vegetales, promoviendo una gradual disminución de la textura (Mansour y col 2015). En este sentido, es más relevante obtener una adecuada inactivación de la enzima objetivo sin comprometer la calidad del producto (Gallardo-Castro 2004). Esto es de suma importancia pues el brócoli obtenido es congelado, transportado y almacenado hasta su consumo, lo que disminuye su calidad.

## **b Parámetro nutrimental**

### **1) Contenido de Vitamina C**

El modelo para la retención de ácido ascórbico (RAA) de floretes de brócoli escaldados mediante microondas se aprecia en la **Figura 15**, en donde el color rojo representa una mayor RAA y el color azul una menor retención. Se observa que a medida que la temperatura se



**Figura 15.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % **RAA** de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.

incrementa, la RAA disminuye, de manera similar a lo que ocurre al incrementar el tiempo del proceso. La RAA se encontró en el intervalo del 50-95 %. El modelo de predicción para dicha variable de respuesta en variables codificados se muestra enseguida:

$$\% RAA = 70.38 - 10.48X1 - 6.27X2$$

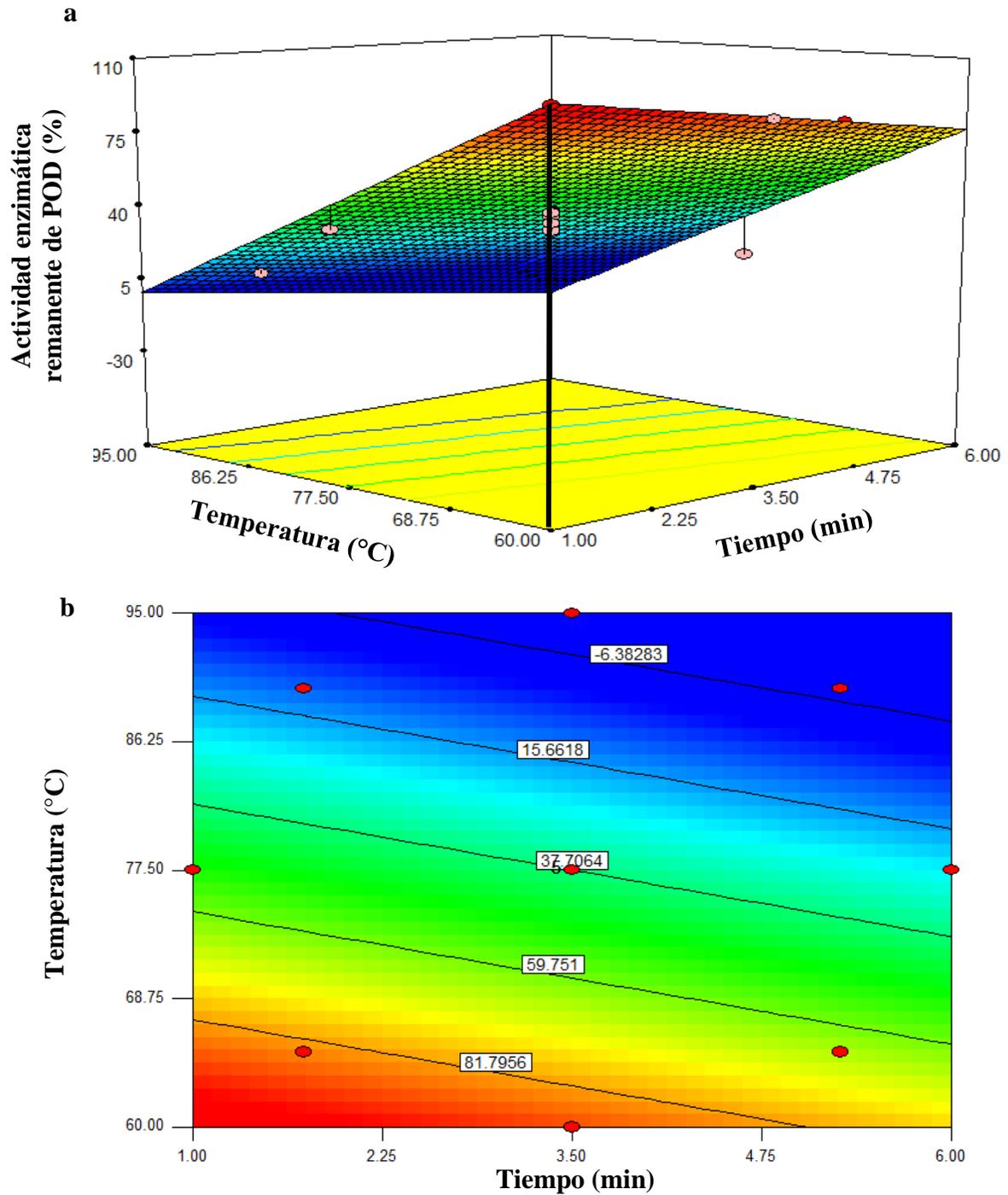
El valor F del modelo de 25.1 implica que el modelo es significativo. El modelo de predicción tuvo como términos significativos la temperatura y el tiempo. Además, no presentó falta de ajuste ( $p=0.1371$ ), tuvo un coeficiente de variación de 6.93 % y explico el 83 % de la variabilidad experimental.

La vitamina C es de los nutrientes más importantes en el brócoli, así como en muchos otros productos hortofrutícolas, debido a que tiene muchas funciones biológicas en el cuerpo humano (Zhang y col 2004). El comportamiento de esta vitamina ha sido reportado por diversos autores (Yuan y col 2009, Begum y Brewer 2001, Ruiz-Ojeda y Peñas 2013) que sugieren en sus investigaciones, que la temperatura, así como otros factores como el pH, presencia de oxígeno y daño físico, afectan el contenido. Además, el contenido inicial de vitamina C en los vegetales es muy variado debido a factores relacionados con el proceso agrícola (genética, tipo de fertilizante, aislamiento, tipo de suelo, riego, etc.) y el manejo poscosecha (Chaparro y col 2011).

### **c Parámetro enzimático**

#### **1) Actividad de la enzima peroxidasa**

La variable de respuesta de actividad enzimática residual de peroxidasa (% AR) se presenta en la **Figura 16**. El gráfico de superficie de respuesta muestra una mayor inhibición de la enzima a temperaturas altas y tiempos prolongados. La zona azul representa los porcentajes remanentes de actividad enzimática más bajos y la zona roja los más altos. La actividad residual



**Figura 16.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la temperatura y tiempo de escaldado sobre el % *AR* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas.

experimental estuvo en el rango de 98.4 al 0%. El modelo de predicción obtenido fue el siguiente

$$\% AR = 37.71 - 9.58X1 - 37.19X2$$

El valor F del modelo de 43.62 implica que el modelo es significativo. El modelo de predicción presentó valores significativos de tiempo y temperatura. Además, no presentó falta de ajuste ( $p=0.065$ ), tuvo un coeficiente de variación de 9.98 % y explicó el 89.7 % de la variación experimental. Bajo estas condiciones se puede decir que el modelo es adecuado y reproducible.

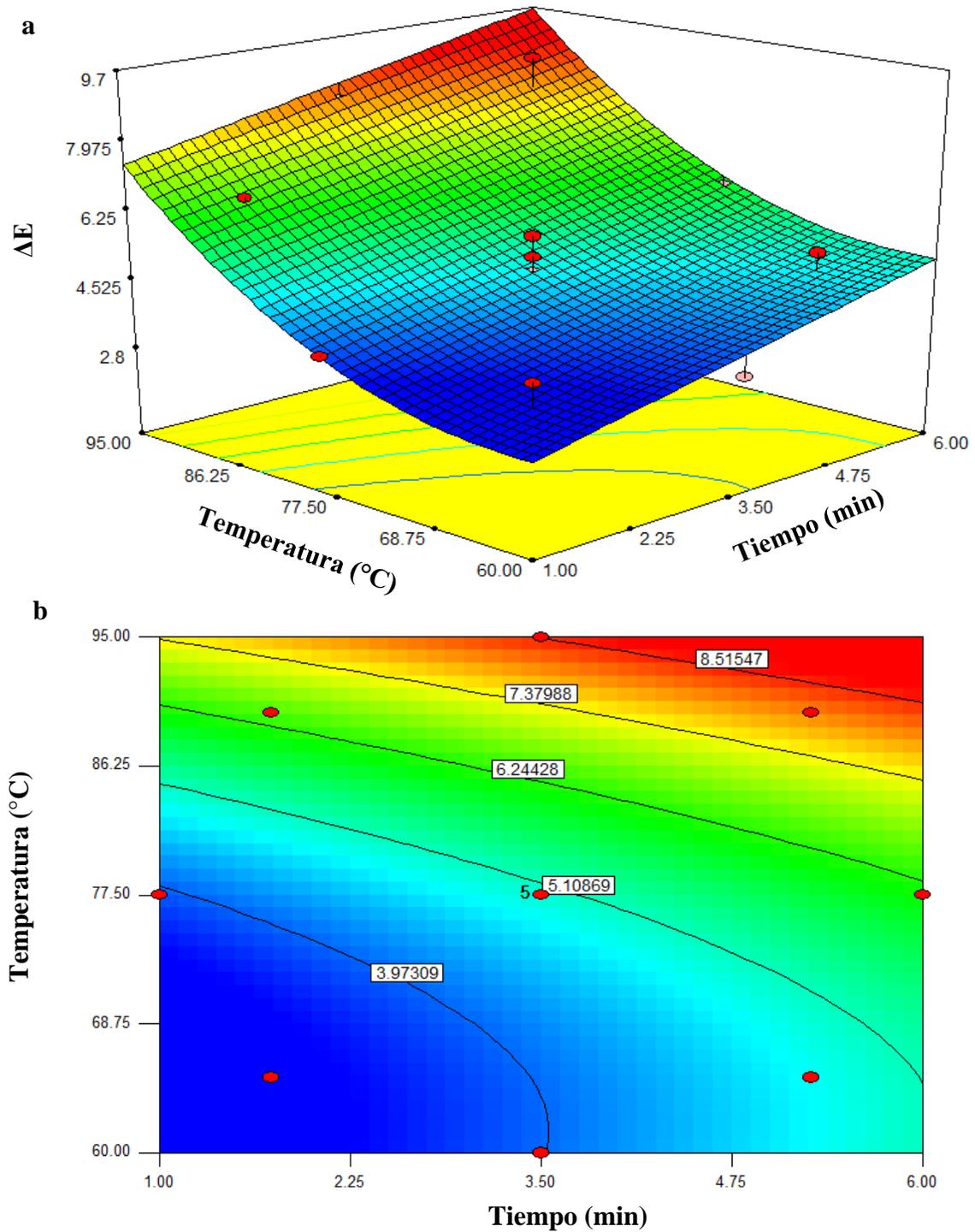
Mediante los tratamientos térmicos las enzimas pierden su actividad catalítica debido a su desnaturalización. La peroxidasa con su estructura terciaria es desplegada, lo que lleva a la pérdida de su sitio activo y a no llevar a cabo la reacción en el medio celular (Ganjloo y col 2011). El tiempo y temperatura prolongados para llegar a inactivar totalmente la enzima peroxidasa se debe a que en las hortalizas existen diferentes isoenzimas, las cuales una fracción de ellas es más termoresistente que otras (Pérez y col 2015).

### **3. Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI)**

#### **a Parámetros físicos de calidad**

##### **1) Diferencia Total de Color ( $\Delta E$ )**

Se observa en la **Figura 17** los datos experimentales para el escaldado con microondas sin inmersión. Los más altos  $\Delta E$  se presentaron cuando se elevó la temperatura y el tiempo de procesamiento se alargaba. En el gráfico de superficie de respuesta se observa que las tonalidades azules corresponden a menores  $\Delta E$ , a su vez, en el gráfico de contorno se verifica tal afirmación y se observa, además, que en las tonalidades rojas se encuentran los  $\Delta E$  más altos. La diferencia total de color estuvo en el intervalo de 3.4 a 8.8.



**Figura 17.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el  $\Delta E$  de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.

El modelo tuvo como términos significativos el tiempo, la temperatura y la temperatura al cuadrado. El modelo de predicción fue el siguiente:

$$\Delta E = 5.0 + 0.79X1 + 1.62X2 + 0.62X2^2$$

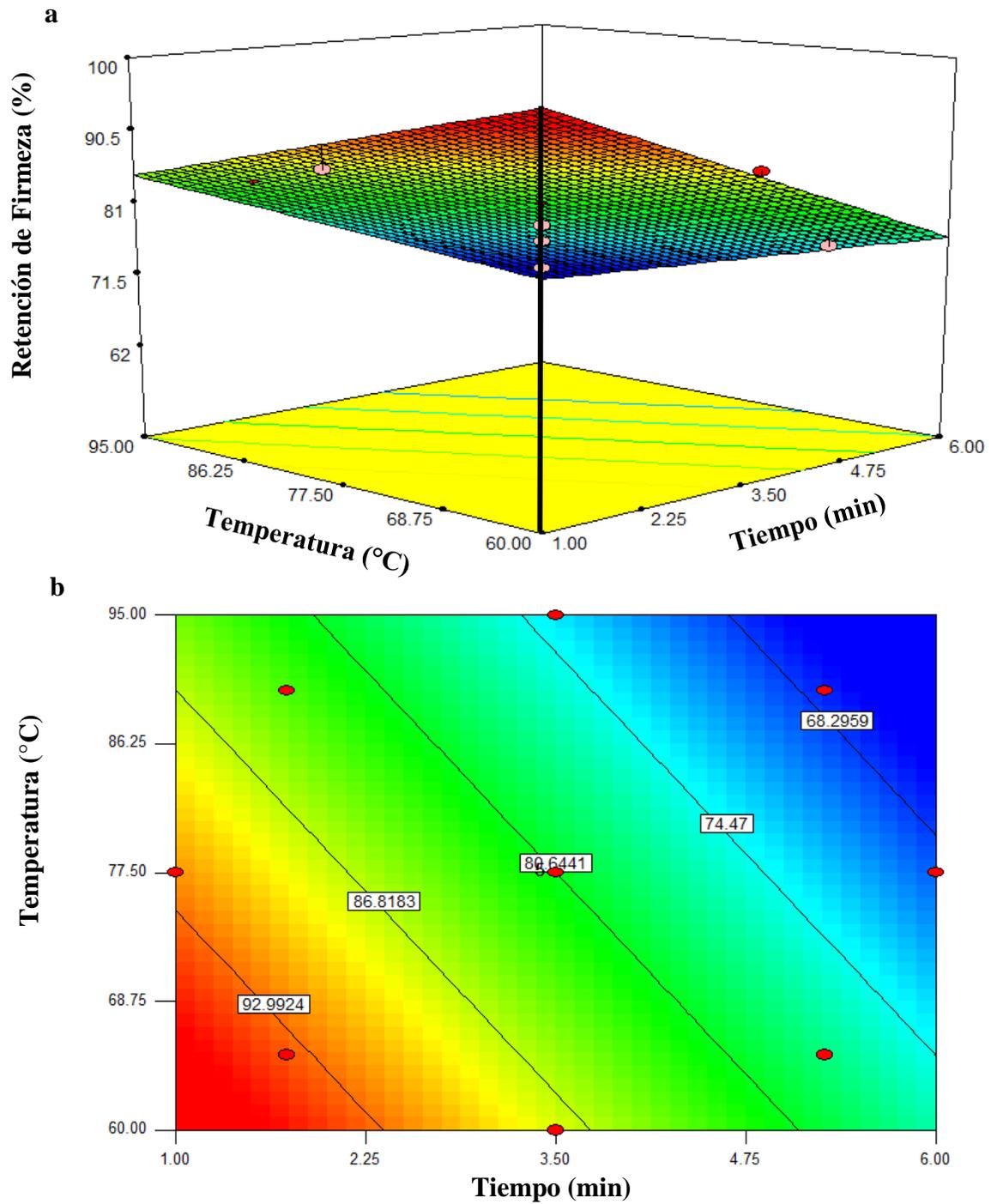
El valor F del modelo de 27.89 implica que el modelo es significativo. El modelo para esta variable de respuesta no presentó falta de ajuste, además, explicó el 90.2 % de la dispersión experimental y el coeficiente de variación fue de 9.8 %, menor al máximo recomendado (10 %), con base a ello se puede decir que el modelo es adecuado y reproducible.

Este comportamiento coincide con el reportado por Sezer y Demirdoven (2015) para rebanadas de zanahoria, donde al incrementarse el tiempo de proceso (170 s – 300 s) se incrementaron los parámetros L\*, a\* y b\*, dando un incremento en la diferencia total de color con respecto a la zanahoria fresca.

Además, Brewer y col (1994) utilizaron la tecnología de microondas para analizar el efecto sobre el color y otras características de frijoles, encontrando que este método mantenía daño mínimo a las características físicas de calidad si el tiempo de exposición era corto (menos de 5 min) al observar menores  $\Delta E$  empleando tiempos de exposición cortos.

## 2) Firmeza

En la **Figura 18** se muestra el porcentaje de retención de firmeza obtenido en función del tiempo y la temperatura. En la superficie de respuesta se aprecia que al incrementar el tiempo de proceso se obtienen menores porcentajes de retención de firmeza, de manera similar, al aumentar la temperatura la variable de respuesta se vio afectada de manera negativa. En la zona de tonalidad roja se ubica la firmeza experimental más alta, por otra parte, la firmeza más baja se ubicó en la zona de tonalidad azul; El rango de firmeza experimental fue de 67.7 a 92.3.



**Figura 18.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % *RF* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.

El análisis estadístico de los datos indicó que los términos lineales del tiempo y la temperatura tuvieron un efecto significativo en el proceso, para el cual se obtuvo un modelo de predicción con tendencia lineal en ambas variables independientes. Dependencia que se corrobora con el modelo de predicción obtenido:

$$\% \mathbf{RF} = 8128.4 - 4.52X_1 - 0.41X_2$$

El valor F del modelo de 42.26 implica que el modelo es significativo. El cual no presentó falta de ajuste ( $p=0.8105$ ), explicó el 90 % de la variación total de los datos y el coeficiente de variación (CV) fue menor al 10 % recomendado, por lo que se puede decir que el modelo para el porcentaje de retención de firmeza es adecuado y reproducible.

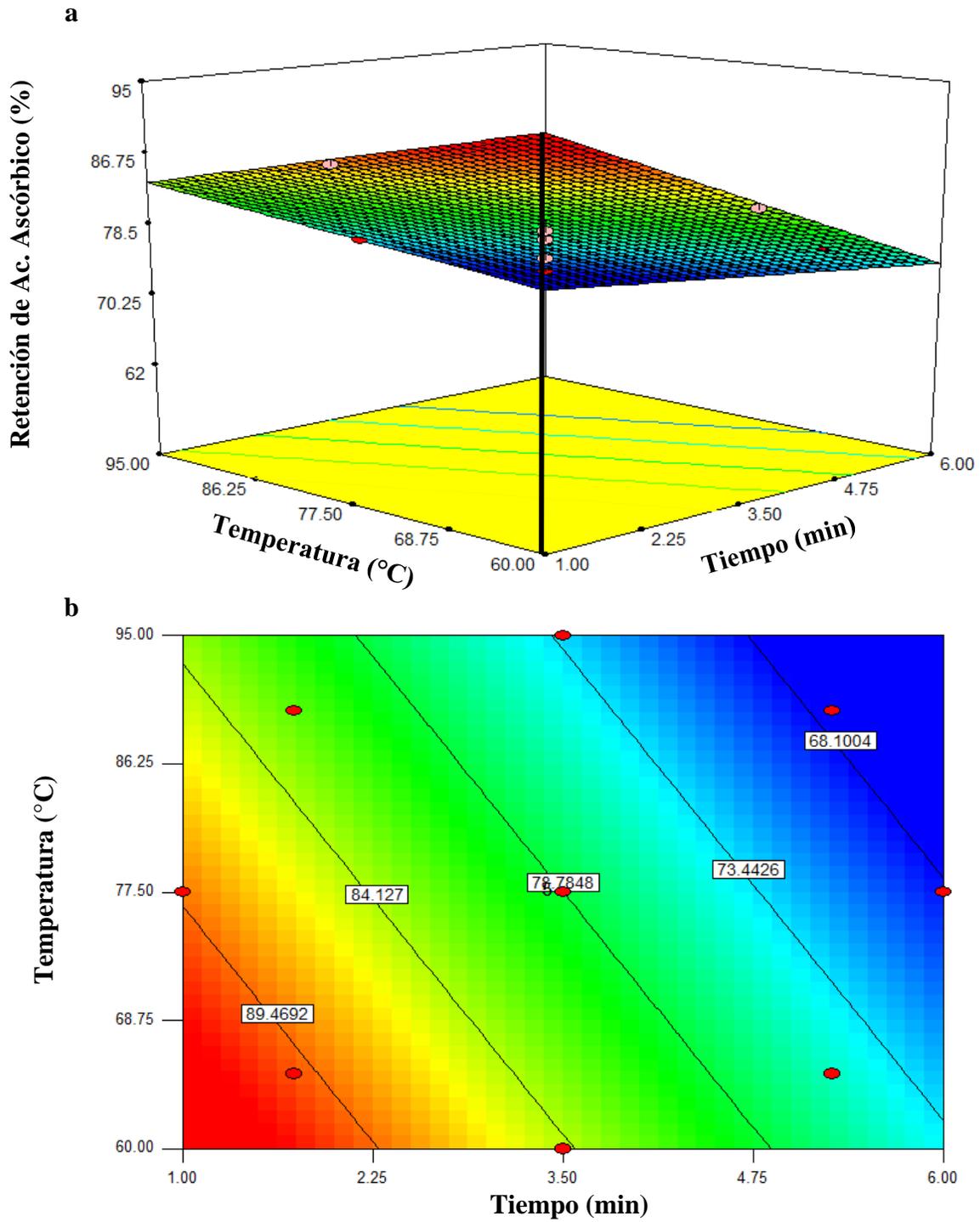
Los datos presentados en la gráfica y su tendencia son similares a lo que reporta Chaparro y col (2011) para coliflor, en donde al incrementar la potencia del microondas (50-100 %) y el tiempo de proceso hasta lograr inactivar completamente la enzima POD, el porcentaje de firmeza disminuyó hasta 50 % respecto al fresco.

Este comportamiento de acuerdo con Vázquez-López (2014) puede ser debido al incremento de la temperatura que se da durante el proceso de microondas que conduce a una rápida eliminación del agua, el cual es un agente plastificante de los polisacáridos estructurales que conforman la fibra soluble e insoluble presente en los floretes, además, la temperatura tiene un efecto significativo sobre las muestras, ya que a temperaturas altas la muestra sufre mayores cambios en la integridad en su estructura, por lo tanto, la fuerza necesaria para penetrar el alimento es menor.

## **b Parámetro nutrimental**

### **1) Contenido de Vitamina C**

Los porcentajes de retención de ácido ascórbico de floretes de brócoli escaldados con microondas sin inmersión se encontraron en el rango de 92.3 a 67.7 %. En la **Figura 19** se



**Figura 19.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % *RAA* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.

observa la superficie de respuesta para la retención de ácido ascórbico en función del tiempo del proceso y la temperatura.

El análisis estadístico indicó que el término lineal de la temperatura y el tiempo tuvieron efecto significativo en el proceso, para el cual se obtuvo un modelo de predicción con tendencia lineal, el modelo para esta variable de respuesta se muestra a continuación:

$$\% \mathbf{RAA} = 78.8 - 7.33X1 - 4.0X2$$

El valor F del modelo de 76.11 implica que el modelo es significativo. El cual no presentó falta de ajuste ( $p=0.8471$ ), explicó el 93.8 % de la variación total de los datos, además, el coeficiente de variación fue de 2.43 %, menor al recomendado (10 %).

La retención de esta vitamina tiene la misma tendencia que la reportada por Pellegrini-Zurita (2017), quien al aplicar un EMSI en frutos de tomate encontró una disminución en el porcentaje de retención de ácido ascórbico, atribuye tal comportamiento a la sensibilidad de este compuesto a la temperatura.

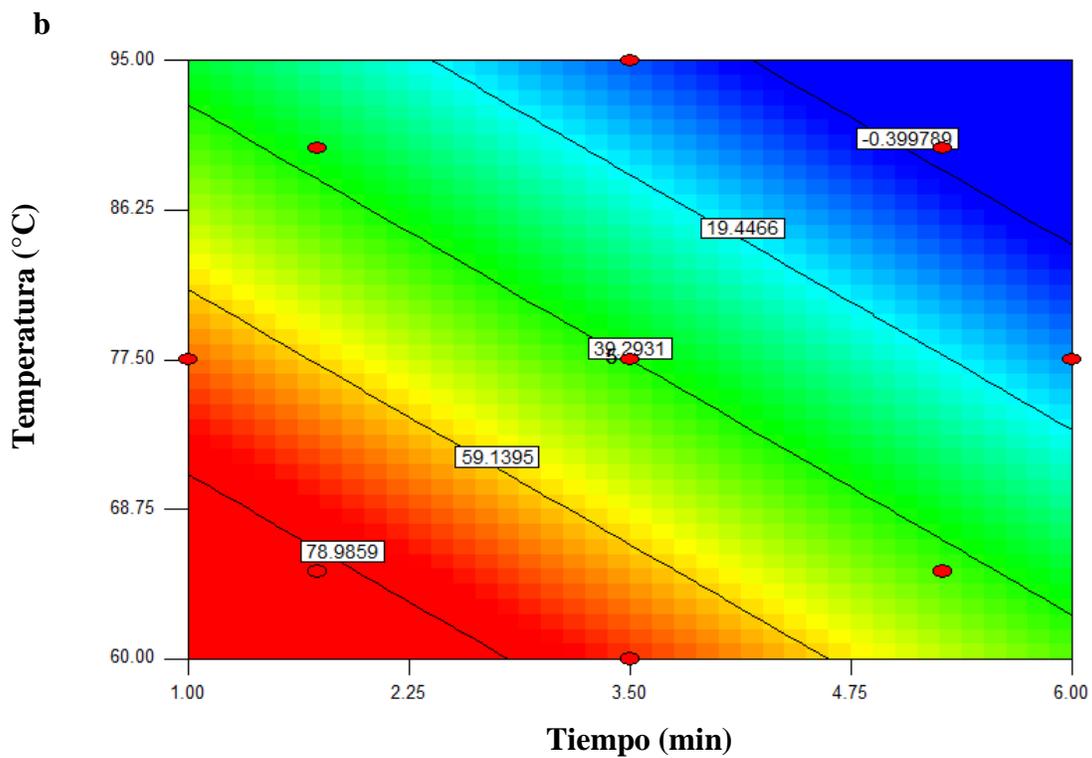
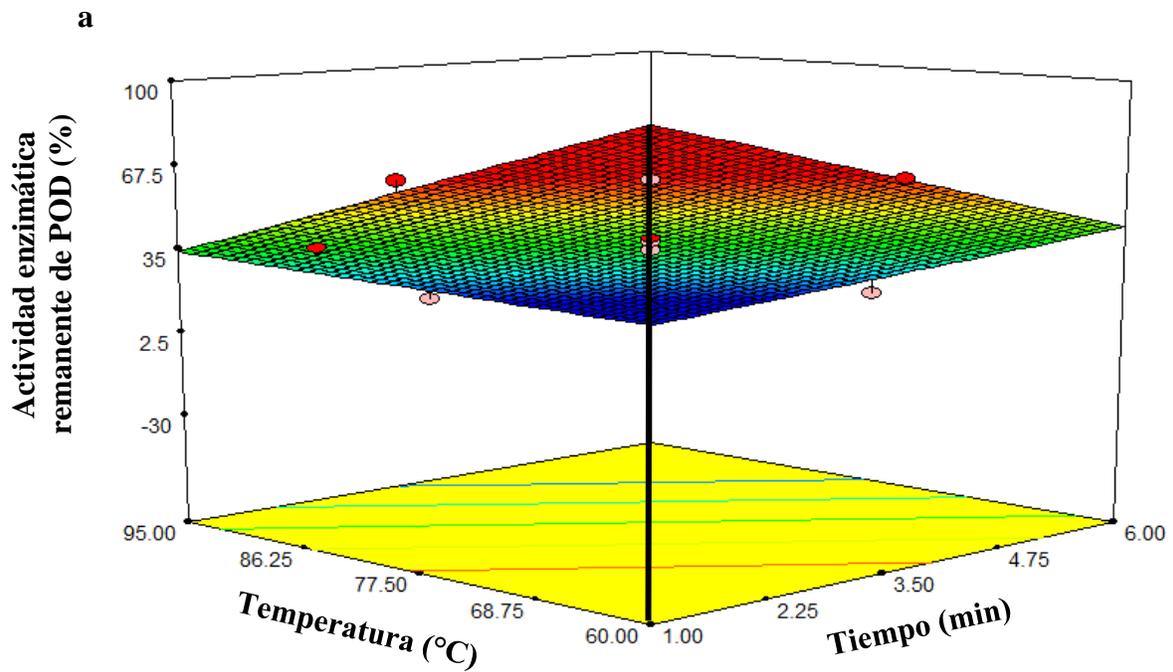
Este comportamiento también fue descrito por Ramesh y col (2002) en pimientos, zanahorias y espinacas procesadas a través de microondas. En donde ocurre una reducción en el contenido de este nutrimento conforme se eleva la potencia del microondas y el tiempo de procesamiento y cuando las condiciones térmicas del proceso se elevan.

### **c Parámetro enzimático**

#### **1) Actividad de la enzima peroxidasa**

El porcentaje de actividad residual de POD a diferentes tiempos y temperaturas de floretes de brócoli escaldado con microondas sin inmersión se observan en la **Figura 20**. El porcentaje de actividad residual obtenido se encuentra en un orden de 75 % a 0.48 %. El modelo de predicción fue lineal con términos significativos de tiempo y temperatura.

$$\% \mathbf{AR} = 37.71 - 9.58X1 - 37.19X2$$



**Figura 20.** Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) mostrando el efecto de la tiempo y temperatura de escaldado sobre el % *AR* de floretes de brócoli obtenidos mediante el escaldado con microondas sin inmersión.

El valor F del modelo de 202.8 implica que el modelo es significativo. Mismo modelo que presentó un coeficiente de variación menor al 10 % (9.88 %), no registró falta de ajuste ( $p=0.2571$ ), además de poder explicar el 97.5 % de la variabilidad experimental, con lo que el modelo se consideró adecuado y repetible.

Tendencias similares fueron las reportadas por Ruiz-Ojeda y Peñas (2013) al aplicar un EMSI con una atmósfera saturada al llevar a cabo el escaldado en ejotes, al variar la potencia del microondas y el tiempo de exposición sobre las muestras disminuyó la actividad de la enzima POD al incrementar cualquiera de dichos factores. Ellos concluyen que las propiedades físicas de calidad por sí solas no son indicadores confiables del escaldado con microondas de ejotes.

Los parámetros más efectivos para monitorear la eficiencia del tratamiento de escaldado por microondas debe ser el tiempo para lograr la inactivación completa del POD o para dar valores de firmeza similares a los del proceso tradicional. Sin embargo, la inactivación de POD se propone como un mejor criterio debido a las altas desviaciones estándar encontradas en sus mediciones de firmeza.

En otro estudio llevado a cabo por Chen y col (2016) en frutos de chile tabasco, donde variaron la potencia y el tiempo para lograr inactivar la POD, se muestra una rápida disminución de la actividad de la enzima al incrementar cualquiera de los factores.

Severini y col (2016) en floretes de brócoli utilizando un EMSI, obtuvieron hasta un 90 % de inactivación al utilizar la máxima potencia del microondas doméstico (900 W) a los 50 s, tendencia que es parecida a la que se observa en el gráfico de superficie de respuesta. Sin embargo, como los autores lo afirman, estos tiempos tan prolongados de procesamiento pueden provocar un efecto de cocimiento innecesario del brócoli.

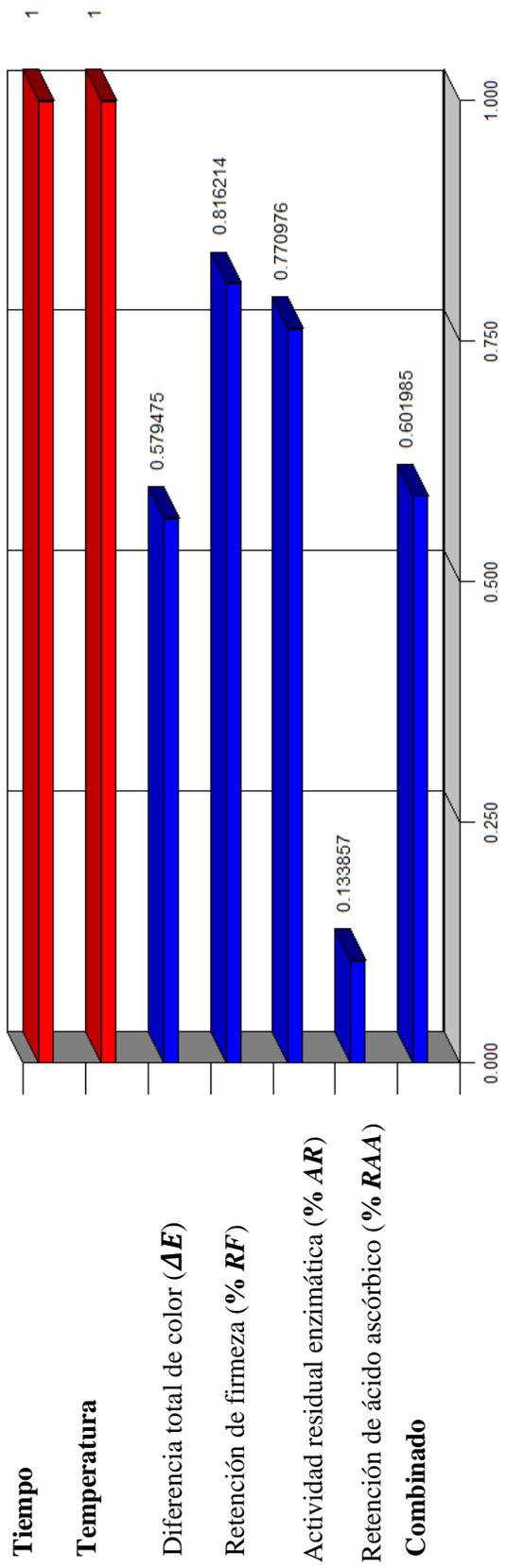
## **B MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCION DE FLORETES DE BRÓCOLI ESCALDADO**

### **1. Optimización de los procesos de escaldado.**

Para identificar las mejores condiciones de procesamiento, cada una de las variables de respuesta recibió un valor subjetivo deseable en el producto terminado, esto incluye menor  $\Delta E$  y actividad remanente de POD, asimismo, se estableció una mayor firmeza y retención de ácido ascórbico. Para la optimización de los tres procesos de escaldado (ET, EM y EMSI) estudiados se realizaron las siguientes consideraciones: a la actividad remanente de POD se le dio mayor importancia (+++++) que a las otras variables de respuesta (+ para  $\Delta E$ , % *RF* y % *RAA*). También, a la actividad remanente de la enzima se le dio un mayor peso (4) que a las otras variables de respuesta (a las otras tres respuestas se le dio un valor de 0.1 al peso). Se les asignan pesos a las variables de respuesta durante la optimización para dar mayor o menor énfasis al valor objetivo (mínimo o máximo). Con un peso de 1, la deseabilidad individual ( $d_i$ ) de la respuesta variará de 0 a 1 de forma lineal. Los pesos mayores a 1 (el peso máximo es 10), dan más énfasis al objetivo (mínimo o máximo). Los pesos menores a 1 (el peso mínimo es 0.1), dan menos énfasis al objetivo (mínimo o máximo).

#### **a Escaldado Tradicional (ET)**

Para la optimización del escaldado tradicional, las deseabilidades individuales de cada una de las variables de respuesta y deseabilidad global se presentan en la **Figura 21**. A pesar de que la deseabilidad individual del porcentaje de retención de ácido ascórbico (% *RAA*) fue bajo (0.134), la deseabilidad global fue de 0.602, el cual acorde con Carrera (1998), proporciona un producto aceptable dentro de la escala subjetiva reportada.



**Figura 21.** Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli por el método tradicional.

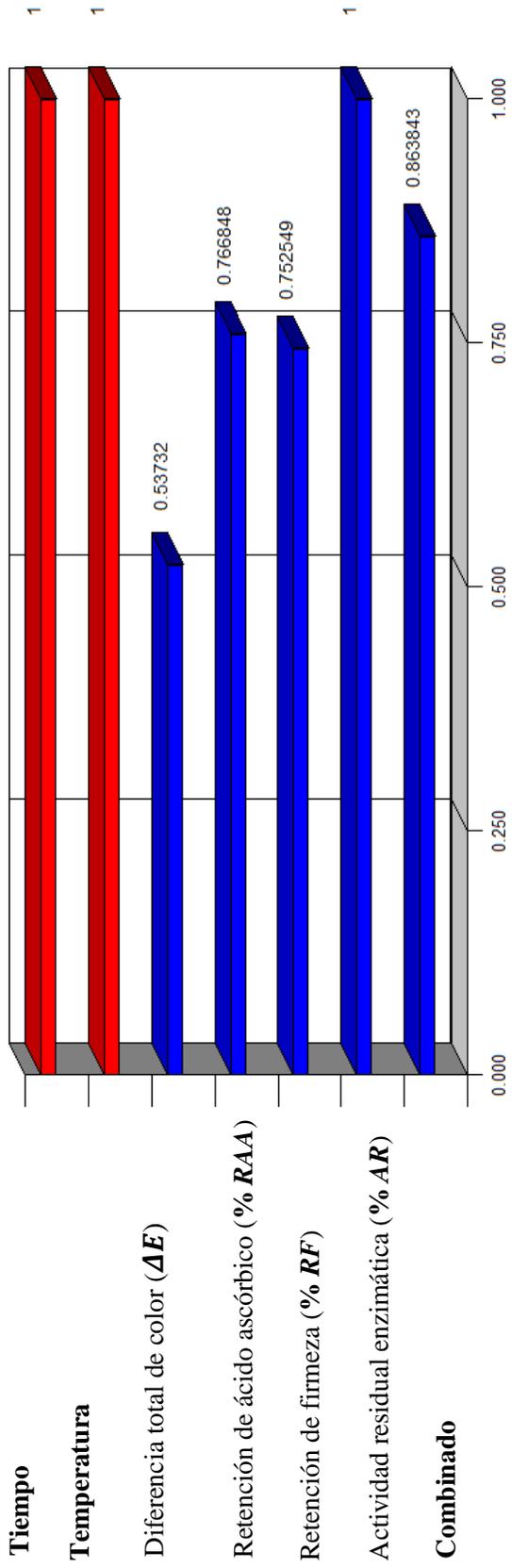
Diferentes autores (Anthon y col 2002; Schoeninger y col 2014) consideran que debido a que los alimentos son estructuras complejas, una deseabilidad entre 0.6 y 0.8, es aún aceptable.

Las condiciones de procesamiento óptimas de temperatura y tiempo para el escaldado tradicional de floretes de brócoli fueron de 93.7 °C y 1 min

#### **b Escaldado con Microondas (EM)**

En la **Figura 22** se muestran los resultados de deseabilidad global y deseabilidad individual de cada una de las cuatro variables de respuesta. A través del programa Design-Expert 7.0, se asociaron las variables con la combinación de tiempo y temperatura que maximiza las consideraciones descritas anteriormente. Las condiciones óptimas correspondieron a una temperatura de 94.5 °C y 1 min de proceso.

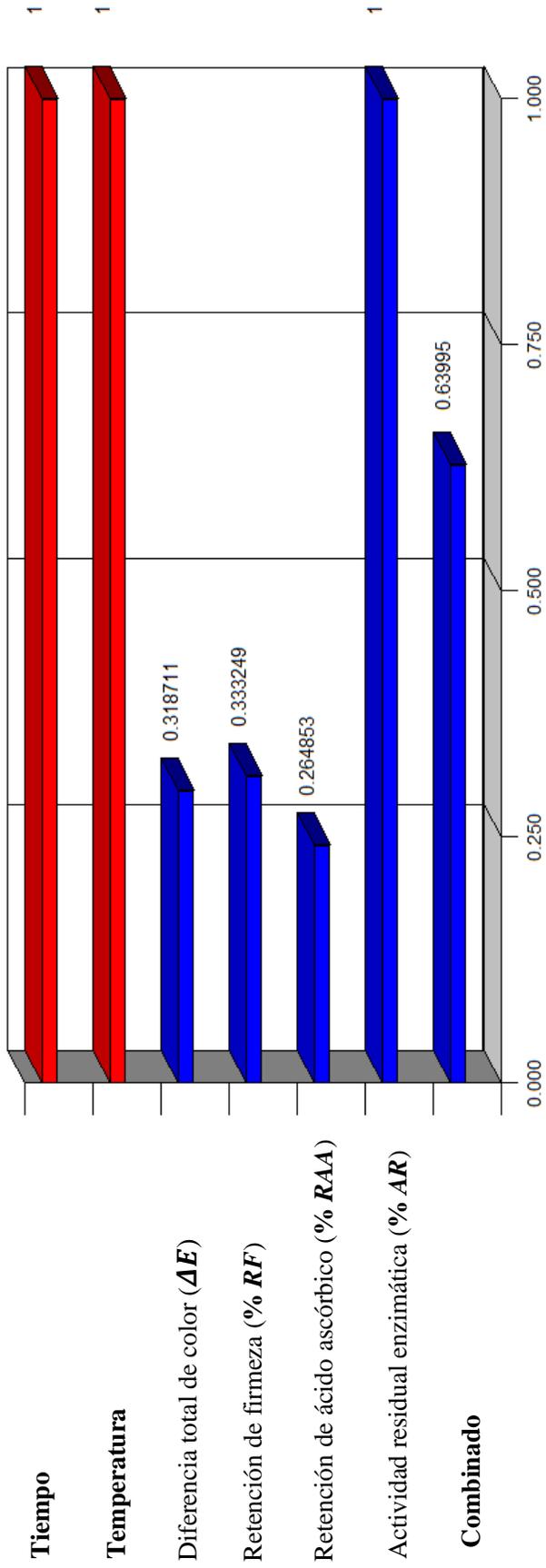
Para este método de escaldado la deseabilidad individual de la actividad remanente de la enzima alcanzó el máximo (1) debido a la mayor importancia y peso que se le dio a ésta variable de respuesta. La deseabilidad global fue de 0.864. Carrera (1998) reporta una escala subjetiva para deseabilidad global que indica que deseabilidades cercanas o superiores a 0.8 son bastante aceptables.



**Figura 22.** Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli con microondas.

### **c Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI)**

Para el escaldado con microondas sin inmersión al realizar la optimización, la deseabilidad individual de cada una de las variables de respuesta obtenidas se presentan en la **Figura 23**, se aprecia que la deseabilidad individual de la actividad residual de la enzima tuvo su máximo (1), es decir, las condiciones obtenidas de los factores configurados en esta optimización pueden alcanzar la actividad residual que se fijó. La deseabilidad global fue de 0.639, la cual de acuerdo con Carrera (1998), provee un producto aceptable dentro del intervalo reportado. Las condiciones óptimas de temperatura y tiempo para el escaldado con microondas sin inmersión de floretes de brócoli fueron de 4.6 min y 92 °C.



**Figura 23.** Gráfico de deseabilidades individuales de las variables de proceso y respuesta y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de proceso de escaldado de floretes de brócoli con microondas sin inmersión

## 2. Validación de los modelos de predicción

### a Escaldado Tradicional (ET)

En el **Cuadro 5** se presentan los datos experimentales de validación obtenidos utilizando las condiciones óptimas de los factores, mediante el software Design-Expert® 7.0. Se observa que cada variable de respuesta se halla dentro del rango predicho por el modelo, sin embargo, para el caso específico de  $\Delta E$ , con los experimentos se obtuvo un promedio de 12.1, que, aunque se ubica dentro del intervalo predicho por el modelo (límite inferior de 12) tales  $\Delta E$  experimentales presentaron una desviación estándar de 3, en consecuencia, no todos los  $\Delta E$  obtenidos experimentalmente estuvieron dentro del rango. Dicho lo anterior se puede considerar que el modelo es bueno y repetible.

Un modelo matemático adecuado permite realizar predicciones de variables de respuesta de manera teórica en las diferentes combinaciones de tiempo y temperatura deseadas, es decir, se estima un intervalo para la variable, en el cual, si el método de escaldado se realizara con las condiciones de los factores optimizados, la variable experimental se hallaría en dicho intervalo con cierto grado de confianza.

Las variables experimentales presentadas en el cuadro representan la media de 9 mediciones para cada variable de respuesta, además, junto a la media se reporta la desviación estándar.

**Cuadro 5.** Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado tradicional.

Variable	Experimental	Exacto	Predicción	
			Mínimo	Máximo
$\Delta E$	12.1 $\pm$ 3.00	13.3	11.8	14.86
% <i>RF</i>	70.4 $\pm$ 3.63	73.3	65.6	81.1
% <i>RAA</i>	46.0 $\pm$ 1.96	24.6	12.9	36.2
% <i>AR</i>	4.92 $\pm$ 3.24	3.77	0	12.7

### **b Escaldado con Microondas (EM)**

Para la validación del modelo matemático del EM de floretes de brócoli las variables de respuesta predichas y experimentales se muestran en el **Cuadro 6**.

Los valores experimentales para el % *RAA* tuvieron un promedio de 68.4 con una desviación estándar de 2.91, dichos promedios se encuentran muy cercanos al límite inferior del intervalo de confianza para la predicción del modelo, y de hecho, tomando en cuenta la desviación estándar, la mayoría de los valores del % *RAA* y el % *RF* experimentales no están dentro del rango predicho, esto podría deberse a que aun a pesar de que los modelos matemáticos permiten realizar predicciones de las variables, cuando se trata de variables de respuesta que son afectadas multifactorialmente, como la vitamina C y la firmeza, pueden variar aún un poco más de lo esperado.

**Cuadro 6.** Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado con microondas.

Variable	Experimental	Exacto	Predicción	
			Mínimo	Máximo
$\Delta E$	10.9 ± 1.40	10.4	9.3	11.5
% <i>RF</i>	72.1 ± 3.74	76.9	72.1	81.4
% <i>RAA</i>	68.4 ± 2.91	76.5	68.4	84.7
% <i>AR</i>	1.00 ± 0.90	0	0	19.46

### c Escaldado con Microondas Sin Inmersión (EMSI)

Se muestra en el **Cuadro 7** las variables obtenidas al realizar los experimentos de las diferentes respuestas, para este método de escaldado, los experimentos para las variable de respuesta de % *RAA* dieron un promedio de 67.9 con una desviación estándar de 1.75, muy cercano al límite inferior predicho por el modelo y, por tanto, los %*RRA* experimentales en su mayoría se ubican fuera del intervalo, lo cual puede deberse a lo explicado anteriormente, además, los experimentos para el % *AR* dieron un promedio de 4.9 con una desviación estándar de 1.55, éste se ubicó cercano al límite superior predicho por el modelo, esto podría atribuirse al hecho de que este método de escaldado se lleva a cabo en ausencia de agua como principal medio de transferencia de calor, sustancia que mantiene la temperatura gracias a su alta capacidad calorífica, lo que provoca que exista una mayor variación de temperatura en el brócoli, haciendo que sea menos estable la inactivación deseada de la enzima y por tanto, provocando una mayor variación.

Siempre que se tomen en cuenta las causas que pueden provocar que exista una desviación estándar alta se puede considerar que éste es un modelo de predicción adecuado, es decir, se puede tener teóricamente, una certeza del 95 % de que a diferentes combinaciones de los factores de proceso los valores de las variables de respuesta van a estar en el intervalo que reporta el modelo, sin necesidad de hacer pruebas previas.

**Cuadro 7.** Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en floretes de brócoli sometidos a escaldado con microondas sin inmersión.

Variable	Experimental	Exacto	Predicción	
			Mínimo	Máximo
$\Delta E$	$7.4 \pm 0.82$	8.26	7.44	9.07
% <i>RF</i>	$69.9 \pm 2.57$	69.6	66.2	73
% <i>RAA</i>	$67.9 \pm 1.75$	69.5	67.2	71.8
% <i>AR</i>	$4.90 \pm 1.55$	1	0	5.58

## **C CONTRASTE DE PARÁMETROS FÍSICOS DE CALIDAD, NUTRIMENTALES Y ENZIMÁTICOS DE FLORETES DE BRÓCOLI OBTENIDOS CON LAS MEJORES CONDICIONES DE ESCALDADO TRADICIONAL, ESCALDADO CON MICROONDAS Y ESCALDADO CON MICROONDAS SIN INMERSIÓN.**

### **1. Parámetros físicos de calidad**

#### **a Diferencia total de color ( $\Delta E$ )**

En el **Cuadro 8** se pueden observar los  $\Delta E$  experimentales para floretes de brócoli en las condiciones óptimas de los diferentes métodos de escaldado. Al hacer una comparación entre ellos, se observa que el  $\Delta E$  para el EMSI es significativamente menor que para el ET y el EM (Fisher,  $p \leq 0.05$ ), por lo que se puede decir que el EMSI ayuda a conservar mejor el color. Esta diferencia entre el EMSI y el resto de los métodos puede atribuirse a que en este método no hubo lixiviación de compuestos insolubles, los cuales, en combinación con el calor ocasionado por el magnetrón, provocaron cambios en las paredes celulares, lo que mantuvo más intactos los compuestos orgánicos que dan color como la clorofila y la coloración verde de los floretes. Esto, a pesar de que el tiempo es más prolongado para el EMSI (4.6 min) que para el ET y EM (1 min y 1 min) a condiciones óptimas.

Teóricamente hablando, un  $\Delta E$  de 1 representa una diferencia de color apenas perceptible para el ojo humano bajo condiciones ideales de visión; mientras que los  $\Delta E$  entre 2 y 3 podrían ser considerados equivalentes por algunos espectadores en iluminación ideal (Peng y col 2017). Está claro que todos los  $\Delta E$  fueron superiores a 3, lo que sugiere que las diferencias de color entre todos los floretes de brócoli procesados y los no tratados son perceptibles por el ojo humano en condiciones normales de iluminación.

**Cuadro 8.** Comparación de la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) entre los diferentes métodos de escaldado.

<b>Método</b>	<b><math>\Delta E</math></b>
Escaldado tradicional	<b>12.1 ± 0.57<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas	<b>11.1 ± 1.85<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas sin inmersión	<b>7.51 ± 1.20<sup>b</sup></b>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, LSD = 1.93 (Fisher,  $p \leq 0.05$ ).

El color de las hortalizas frescas como el brócoli fresco y hortalizas procesadas como el brócoli congelado puede asociarse con otros atributos de calidad, como defectos de frescura, físicos (principalmente firmeza), nutricionales, visuales y no visuales. También tiene una buena correlación con las capacidades antioxidantes, la oxidación y las reacciones de Maillard (De Corcuera y col 2004). Razones por las cuales es primordial conservar su color lo más parecido al estado fresco.

Acorde a los resultados obtenidos, en un estudio llevado a cabo por Begum y Brewer (2001) quienes escaldaron tomates enteros, compararon: inmersión en agua hirviendo (ET) y calentados en microondas en recipientes Pyrex cubiertos de 1 L de agua (EM). Los tomates escaldados con ambos tratamientos tuvieron un  $\Delta E$  más alto, estos autores atribuyen dichos cambios a que el escaldado en tomates interrumpe las células, solubiliza las sustancias pécticas, permite la pérdida de agua y expulsa el aire, lo que aumenta la penetración de la luz y, en última instancia, la reflexión, aumentando el color general. Dependiendo de los pigmentos y del estado del pigmento, esto puede alterar significativamente todas las medidas de color o las medidas de color seleccionada.

Severini y col (2016) al evaluar el EMSI y el ET en floretes de brócoli para inactivar la enzima POD, reportan diferente tendencia para el EMSI, las muestras calentadas en microondas mostraron un color verde menos brillante que las de las muestras escaldadas tradicionalmente, es decir, un mayor  $\Delta E$ . Esto lo atribuyen a una mayor pérdida de agua que sufrieron las muestras calentadas en el microondas, a la degradación térmica de la clorofila y en menor proporción a reacciones de oscurecimiento no enzimático como la reacción de Maillard.

## **b Firmeza**

El porcentaje de retención de firmeza para los valores medios de los procesos de escaldado para floretes de brócoli se muestran en el **Cuadro 9**. Las diferencias entre los tres métodos no fueron significativas, por lo que se puede decir que, al utilizar uno u otro método, la firmeza de los floretes no se vio afectada mayormente.

Kidmose y Martens (1999) compararon la influencia del escaldado con microondas (EM) con el escaldado de vapor y agua caliente sobre los atributos de calidad de las rodajas de zanahoria en términos de textura, microestructura, azúcares y contenido de caroteno y pérdidas por goteo. Al igual que en el presente estudio, no se encontraron diferencias significativas en la textura de las zanahorias después de la aplicación de los tres métodos de escaldado, concluyeron que, aunque el escaldado con microondas no mejoró la textura del producto en comparación con el método de escaldado de vapor y agua caliente, mejoró la calidad nutricional.

En otro estudio, llevado a cabo por Chaparro y col (2011), escaldaron inflorescencias de coliflor aplicando un ET y un EMSI, hasta inactivar completamente la enzima POD, determinaron que la retención de firmeza entre las inflorescencias de coliflor escaldado disminuye en el proceso de ET debido a que se producen y se reforman las estructuras, porque la pared celular se rompe con una temperatura alta (92 °C), lo que afecta la permeabilidad y la flexibilidad.

**Cuadro 9.** Comparación del porcentaje de retención de firmeza (**% RF**) entre los diferentes métodos de escaldado.

<b>Método</b>	<b>% RF</b>
Escaldado tradicional	<b>70.4 ± 2.47<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas	<b>73.6 ± 6.84<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas sin inmersión	<b>67.8 ± 5.02<sup>a</sup></b>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los valores, LSD = 3.75 % (Fisher,  $p \leq 0.05$ ).

Rodríguez-López (1999) sugiere que para el escaldado industrial de hongos, la aplicación directa de energía de microondas a todo un hongo resulta inadecuada debido que a los altos gradientes de temperatura generados dentro de las muestras durante el calentamiento pueden provocar la vaporización interna del agua, lo que está asociado con el daño en la textura de los champiñones, por lo que sugieren un tamaño más pequeño de producto para un calentamiento más uniforme. Aunque dicho autor reporta el uso del microondas para hongos, la explicación que da para su estudio sustenta en parte lo aquí expuesto, es decir, cuando se aplica un tratamiento con microondas sin inmersión se debe tomar en cuenta qué tamaño de muestra es el que se va a utilizar para ser procesado y que dichos tamaños sean uniformes para lograr inactivar la enzima objetivo en el mismo tiempo promedio.

Cabe recalcar que la textura de una hortaliza es un indicador primario de la calidad del producto para los consumidores. La textura de las hortalizas determina las características fisicoquímicas de la pared celular e indica cómo cambian durante el procesamiento. En general, el escaldado térmico reduce significativamente las propiedades texturales finales de la estructura celular de hortalizas. Como se ha mencionado a lo largo de este estudio, el ablandamiento de las propiedades texturales finales del producto se debe tanto a la pérdida de turgencia causada por la disrupción de la membrana celular como a los cambios en los polímeros de la pared celular, especialmente en las sustancias pécticas (Greve y col 1994)

## **2. Parámetro nutrimental**

### **a Contenido de Vitamina C**

En el **Cuadro 10** se muestran la retención de ácido ascórbico para los diferentes métodos de escaldado. Se aprecia que el EM (67.6 %) y EMSI (67.8 %) presentaron retenciones muy similares y sin diferencia estadística entre ellas, no obstante, fueron significativamente mucho más altas que el contenido de ácido ascórbico retenido mediante el ET (45.9 %); al contrastar los contenidos de vitamina C obtenidos mediante los escaldados empleando microondas (EM y EMSI) respecto al escaldado tradicional (ET) hay una gran diferencia que corresponde aproximadamente al 22 %.

Si bien los principales mecanismos de pérdida de ácido ascórbico durante el escaldado por agua caliente o microondas pueden ser la oxidación enzimática y la degradación térmica, el principal mecanismo de pérdidas de ácido ascórbico durante el escaldado con agua caliente es la lixiviación o difusión de la hortaliza al agua para escaldado (Xiao y col 2017).

Resultados similares a las del presente estudio fueron reportados por Ramesh y col (2002) quienes evaluaron la aplicación de un EMSI y ET sobre la vitamina C en espinaca, zanahoria y pimientos, encontrando que las pérdidas de vitamina C en los productos escaldados con microondas se redujeron en un 18 % para las espinacas, 8.5 %, para los pimientos, y 33.5 % para las zanahorias; mientras que, para el ET las pérdidas fueron de 48.96, 23.85 y 50.89 % respectivamente. Las diferencias en la retención de vitamina entre el microondas y las hortalizas escaldadas con agua, explican, fueron significativas. Atribuyen mejor retención de la calidad nutricional debido a que se evita las pérdidas por lixiviación durante el procesamiento y la generación interna de calor por microondas.

**Cuadro 10.** Comparación del porcentaje de retención de ácido ascórbico (% *RAA*) entre los diferentes métodos de escaldado.

<b>Método</b>	<b>% <i>RAA</i></b>
Escaldado tradicional	<b>45.9 ± 1.03<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas	<b>67.5 ± 3.05<sup>b</sup></b>
Escaldado con microondas sin inmersión	<b>67.6 ± 2.91<sup>b</sup></b>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los valores, LSD = 2.96 % (Fisher,  $p \leq 0.05$ ).

Por su parte, Ihl y col (1998) evaluaron el efecto del escaldado con microondas, vapor y agua hirviendo sobre la pérdida de ácido ascórbico en alcachofas. El escaldado con microondas no causó una pérdida significativa de ácido ascórbico respecto al fresco, a diferencia del ET que causó la disminución del 16.7% de ácido ascórbico. De manera similar, Begum y Brewer (2001) reportaron, al evaluar el EM y el ET en tomates cv Bell Roma, que el contenido de ácido ascórbico (*RAA*) disminuyó después del escaldado en agua hirviendo (ET) en comparación con los tomates frescos, sin embargo, en el EM no difirió.

Estas diferencias en % *RAA* entre brócoli y tomate podrían deberse a las diferencias en las superficies expuestas al calor al utilizar uno u otro método de escaldado.

Al comparar entre el ET y el EMSI, Severini y col (2016) reportaron que el ET en floretes de brócoli disminuye significativamente el contenido de ácido ascórbico. Encontraron que, aumentando el tiempo de proceso, había mayor pérdida de ácido ascórbico (17 % de pérdida a los 30 s, 47 % de pérdida a los 90 s). El bajo % *RAA* en el brócoli durante el ET lo atribuyen a la rápida pérdida de nutrientes mediante lixiviación. Contrario al ET, el EMSI indujo un incremento en el contenido de ácido ascórbico, es decir, había mayor contenido comparado el brócoli fresco (11.7 % a 40 s, y 7.25 % a 80 s, adicional al contenido de brócoli sin procesar). De acuerdo con estos autores, esto ha sido reportado previamente por otros autores (Verkerl y Dekker 2004; Oerlamans y col 2006) empleando microondas en tejidos vegetales y explican que este fenómeno se debe a un aumento en la extractabilidad química del tejido de la hortaliza después del calentamiento. Sin embargo, estos resultados son contrarios a los encontrados en este estudio ya que al aplicar cualquiera de los 3 métodos de escaldado el % *RAA* no se mantuvo en 100 %.

La retención de vitaminas varía con el tamaño y forma del alimento, el tiempo de proceso y la temperatura interna. En general los alimentos calentados mediante microondas tienen una retención de vitaminas igual o mejor que los alimentos calentados por métodos convencionales, debido principalmente al menor tiempo de calentamiento con las microondas (Decareau 1992).

### **3. Parámetro enzimático**

#### **a Actividad de la enzima peroxidasa**

La actividad residual de la enzima peroxidasa se presentan en el **Cuadro 11**. Al llevar a cabo la comparación de medias de los diferentes métodos de escaldado optimizados para esta variable de respuesta el escaldado con microondas mostró la menor actividad residual (1.00 %), siendo estadísticamente inferior respecto al escaldado tradicional y el escaldado con microondas sin inmersión (LSD = 1.26 %), por otra parte, el ET y el EMSI no presentaron diferencias significativas entre ellos (4.28 % y 4.89 %, respectivamente).

En el estudio realizado por Lin y Brewer (2005) evaluaron los efectos del escaldado directo (EM) e indirecto (es decir, el producto en bolsas) con microondas, vapor y agua hirviendo en chícharos desgranados manualmente sobre la actividad de peroxidasa. El escaldado directo por microondas se realizó sumergiendo los chícharos en agua durante 4 min; el escaldado indirecto con microondas se realizó sumergiendo chícharos empacados en bolsas de plástico en agua durante 4 min; el escaldado con vapor y agua hirviendo se llevó a cabo durante 4 min. Los métodos de escaldado estudiados no mostraron diferencia significativa en la reducción de la actividad de la peroxidasa que, se determinó, era del 97 %. Los autores indicaron que, aunque los mejores atributos químicos y físicos (color, aroma y sabor) que se obtienen con microondas son mejores que con los métodos convencionales de escaldado, el escaldado con microondas produce pérdida de integridad física y con ello una apariencia visual deficiente.

Por su parte Severini y col (2016) reportaron tendencias similares a los resultados obtenidos, donde el grado de inactivación aumentó al incrementar el tiempo de tratamiento. Estos autores indican que el 90 % de la actividad de POD se perdió en los primeros 90 s en el

**Cuadro 11.** Comparación del porcentaje de actividad de actividad residual de POD (% *AR*) entre los diferentes métodos de escaldado.

<b>Método</b>	<b>% <i>AR</i></b>
Escaldado tradicional	<b>4.28 ± 0.53<sup>a</sup></b>
Escaldado con microondas	<b>1.00 ± 0.89<sup>b</sup></b>
Escaldado con microondas sin inmersión	<b>4.89 ± 0.94<sup>a</sup></b>

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre los valores LSD = 1.26 % (Fisher,  $p \leq 0.05$ ).

escaldado con agua caliente y a los 50 s en el escaldado con microondas sin inmersión. La inactivación total de peroxidasa la obtuvieron en 80 s utilizando el tratamiento con microondas, mientras que al menos 120 s fueron necesarios para el ET. Sin embargo, estos tiempos de procesamiento prolongados, indican los autores, pudieron causar un efecto de cocción innecesario de brócoli. A diferencia de los resultados obtenidos por estos autores, en este estudio se realizó la optimización como se mencionó anteriormente, tomando en cuenta la calidad física (color y firmeza) y nutrimental (Vitamina C) del brócoli, además como se aprecia en el **Cuadro 11** los porcentajes de AR para los 3 métodos de escaldado optimizados fueron notablemente inferiores con %AR de 4.28, 1.0 y 4.89 para ET, EM y EMSI, respectivamente.

Por lo anteriormente descrito, es esencial correlacionar la inactivación enzimática adecuada mediante el escaldado térmico y la pérdida de nutrientes, los cambios de color indeseables y la degradación de la textura de los productos (Santos y Silva 2008).

En cuanto al costo energético por el uso de esta tecnología (EMSI), se encontró un reporte en la literatura (Chaparro y col 2011) donde reportan que en términos generales el escaldado para inflorescencias de coliflor es mejor por microondas que por el escaldado tradicional porque el costo de consumo y energía de producción es sólo la mitad en comparación con el convencional.

## VIII CONCLUSIONES

Las condiciones óptimas para obtener floretes de brócoli escaldados con buenas propiedades de calidad física y nutrimentales, con actividad de peroxidasa menor al 10 %, recomendado para brócoli congelado, mediante los métodos de escaldado tradicional (ET), escaldado con microondas (EM) y escaldado con microondas sin inmersión (EMSI) fueron 94.7 °C y 1 min, 94.5 °C y 1 min, 92.0 °C y 4.6 min, respectivamente; típicas de un proceso de inactivación en caliente (*hot break*).

La actividad enzimática residual en brócoli escaldado en las condiciones optimizadas fue 4.28, 1.00 y 4.89 % para ET, EM y EMSI, respectivamente.

En relación con los parámetros físicos de calidad, para la diferencia total de color el EMSI produjo una  $\Delta E$  más deseable (7.5), significativamente menor con respecto al ET (12.1) y el EM (11.1), además, no hubo diferencia estadística en la  $\Delta E$  originada por estos últimos dos métodos. Por otro lado, no se encontró diferencia estadística para la retención de firmeza inducida por los tres métodos, cuyas magnitudes fueron 70.4, 73.6 y 67.8 % para ET, EM y EMSI, respectivamente.

Con respecto al parámetro nutrimental, se encontró que los métodos de escaldado con microondas (EM y EMSI) generaron una mayor retención de ácido ascórbico (67.5 y 67.6 %, respectivamente, sin diferencia estadística entre ellos) que con el ET (45.9 %).

El escaldado con microondas sin inmersión en agua generó en los floretes de brócoli el color más deseable, una retención de firmeza similar a la obtenida con los otros dos métodos, una alta retención de ácido ascórbico y logró inactivar más del 95 % de la peroxidasa, todos estos parámetros lo posicionan como un buen método para escaldar floretes de brócoli con alta calidad para procesos subsecuentes y con alto sentido ecológico y energético.

Se recomienda el escaldado con microondas sin inmersión en agua para llevar a cabo la inactivación en caliente.

## IX BIBLIOGRAFÍA

- Adams, JB. 1978. The inactivation and regeneration of peroxidase in relation to the high temperature-short time processing of vegetables. *Journal of Food Technology* 13: 281-297.
- Aguilar CN, Reyes M, Garza H, Contreras J. 1999. Aspectos bioquímicos de la relación entre el escaldado TB-TL y la textura de vegetales procesados. *Revista de la Sociedad Química de México* 43:54-62.
- Amin I, Lee WY 2005. Effect of different blanching times on antioxidant properties in selected cruciferous vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 85: 2314-2320.
- Ancos B, Cano PM, Hernández A, Monreal M. 1999. Effects of microwave heating on pigment composition and color of fruit purees. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 79: 663-670.
- Anthon GE, Sekine, Y, Watanabe N, Barrett DM., 2002. Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 50: 6153-6159.
- Bai J, Zhen-Jiang G, Hong-Wei X, Xiao-Tuo W, Zhang Q. 2013. Polyphenol oxidase inactivation and vitamin C degradation kinetics of Fuji apple quarters by high humidity

- air impingement blanching. *International Journal of Food and Science Technology*. 48: 1135-1141.
- Barrett DM, García EL, Russell GF, Ramírez E, Shirazi A. 2000. Blanch time and cultivar effects on quality of frozen and stored corn and broccoli. *Journal of Food Science*. 3: 534-541.
- Barrett DM y Theerakulrait C. 1995. Quality indicators in blanched, frozen, stored vegetables. *Food Technology* 49 (1): 62-65.
- Bas D y Boyacı İH. 2007. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. *Journal of Food Engineering*. 78:836-845.
- Begum S y Brewer MS. 2001. Chemical, nutritive and sensory characteristics of tomatoes before and after conventional and microwave blanching and during frozen storage. *Journal of Food Quality*. 24: 1-15.
- Borowski J, Szajdek A, Borowska EU, Ciska E, Zielinski H. 2008. Content of selected bioactive components and antioxidant properties of broccoli (*Brassica oleracea* L.). *European Food Research and Technology*. 226: 459-465.
- Brewer MS, Klein BP, Rastogi BK, Perry AK. 1994. Microwave blanching effects on chemical, sensory and color characteristics of frozen green beans. *Journal of Food Quality*. 17: 245-259.

- Buck 1954. Origin and Taxonomy of Broccoli. (Tesis de Licenciatura). Departamento de tecnología de alimentos. Universidad de California. Berkeley California.
- Buffler, CR. Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist. New York: Van Nostrand Reinhold; 1993.
- Cantwell M. y Suslow T. 2007. Indicadores básicos del manejo postcosecha de Brócoli. Postharvest Technology. Universidad de California, Davis. EUA. p. 1-8.
- Carrera GF. 1998. Diseño y análisis de experimentos industriales. Universidad Iberoamericana.
- Chandrasekaran S, Ramanatham S, Basak T. 2013. Microwave food processing-a review. Food Research International. 52: 243-261.
- Chaparro MP, Díaz YB, Paredes MJ. 2011. Evaluation of microwave technology in blanching of broccoli (*Brassica oleracea* L. var *Botrytis*) as a substitute for conventional blanching. Procedia Food Science. 1: 426-432.
- Chen G, Yang Y, Zhang Y, Luo Y, 2016. Effects of microwave blanching treatment on POD activity and crispness in *Capsicum frutescens* L. Agricultural Science and Technology. 17: 228-233.
- CROCETEX. 2017. ¿Cómo funciona el microondas? Disponible en <http://www.crocetex.com>. Consultado en marzo del 2017.

Decareau, R.V. Capítulo siete: Nutrición. En: Microwave foods: new product development.

Trumbull: Food & Nutrition Press, Inc.; 1992. p.165-187.

De Corcuera JIR, Cavalieri RP, Powers JR. 2004. Blanching of foods. Encyclopedia of agricultural, food, and biological engineering. Marcel Dekker, Inc New York. p. 1-5.

[FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2018,

Disponible de <http://www.fao.org>. Consultado en junio del 2018.

[FAOSTAT] Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la

Agricultura y la Alimentación. 2018. Disponible de <http://www.fao.org> consultado en junio 2018.

FEHD. 2005. Microwave cooking and food safety. Risk Assessment Studies N° 19. Food and Environmental Hygiene Department.

Fennema O.1993. Química de los alimentos. España: Editorial Acribia S.A. Zaragoza. p. 1258-1281.

Gallardo-Castro 2004. Validación experimental de un software para describir el proceso combinado Escaldado-Hidrogenofriado en floretes de brócoli. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Austral de Chile.

Gamage T, Sanguansri P, Swiergon P, Eelkema M, Wyatt P, Leach P, Alexander DL, Knoerzer K. 2015. Continuous combined microwave and hot air treatment of apples for fruit fly (*Bactrocera tryoni* and *B. jarvisi*) disinfestation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 29: 261-270.

Ganjloo A, Rahman RA, Osman A, Bakar J, Bimakr M. 2011. Kinetics of crude peroxidase inactivation and color changes of thermally treated seedless guava (*Psidium guajava* L.). *Food Bioprocess Technology*. 4: 1442-1449.

Ganthavorn C y Powers JR. 1988. Changes in peroxidase activity, hexanal, ascorbic acid and free sulfhydryl in blanched asparagus during frozen storage. *Journal of Food Science* 53: 1403-1405.

Greve LC, Shackel KA, Ahmadi H, McArdle RN, Gohlke JR, Labavitch JM 1994. Impact of heating on carrot firmness: contribution of cellular turgor. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 3: 204-211.

Goncalves EM, Abreu M, Brandao TR, Silva CL, 2011. Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Itálica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*. 34: 2136-2144.

- Guiamba I, Svanberg U, Ahrn L. 2015 Effect of Infrared Blanching on Enzyme Activity and Retention of  $\beta$ -Carotene and Vitamin C in Dried Mango. *Journal of Food Science*. 80: 1235-1242.
- Hidalgo-Cuadrado 2011. Caracterización Química-Física de la peroxidasa de palma *Chamaerops excelsa*. (Tesis de doctorado). Facultad de Ciencias Químicas. Universidad de Salamanca.
- Hyun-Lee S, Choi W, Jun S 2016. Conventional and Emerging Combination Technologies for Food Processing. *Food Engineering Reviews*. 8: 414-434.
- Ihl M, Monsalves M, Bifani V. Chlorophyllase inactivation as a measure of blanching efficacy and colour retention of artichokes (*Cynarascolymus L.*). 1998. *LWT-Food Science and Technology*. 31: 50-56.
- Iribe-Salazar R, Caro-Corrales J, Hernández-Calderón O, Zazueta-Niebla J, Gutiérrez-Dorado R, Carrasco-Escalante M, Vázquez-López Y. 2015. Heat Transfer during Blanching and Hydrocooling of Broccoli Florets. *Journal of Food Science*. 80: 2774-2781.
- Jiménez ME, Aguilar MR, Zambrano ML y Kolar E. 2001. Propiedades físicas y químicas del aceite de aguacate obtenido de puré deshidratado por microondas. *Revista de la Sociedad Química de México*. 45: 89-92.

Jaturonglumlert S, Kiatsiriroat T. 2010. Heat and mass transfer in combined convective and far-infrared drying of fruit leather. *Journal of Food Engineering*. 100: 254-260.

Kidmose U, Martens HJ. Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing 1999. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 79: 1747–1753.

Koh E, Wimalasiri KM, Chassy AW, Mitchel AE. 2009. Content of ascorbic acid, quercetin, kaempferol and total phenolics in commercial broccoli. *Journal of Food Composition and Analysis*. 22: 637-643.

Lagunas-Solar MC, Cullor JS, Zeng NX, Truong TD, Essert TK, Smith WL, Pina C. 2005. Disinfection of dairy and animal farm wastewater with radiofrequency power. *Journal Dairy Science* 88:4120–4131.

Lin S, Brewer MS. 2005. Effects of blanching method on the quality characteristics of frozen peas. *Journal of Food Quality*. 28: 350-360.

Liu, P., Mujumdar, A. S., Zhang, M., Jiang, H. 2015. Comparison of three blanching treatments on the color and anthocyanin level of the microwave-assisted spouted bed drying of purple flesh sweet potato. *Drying Technology* 33: 66-71.

López-López M, Vega-Espinoza A, Ayón-Reyna L, López-Valenzuela J, Vega-García M. 2013. Combined effect of hot water dipping treatment, N-acetylcysteine and calcium on quality

- retention and enzymatic activity of fresh-cut apple. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 11: 243-248.
- Lozano JE, Ibarz A. Colour changes in concentrated fruit pulp during heating at high temperatures. *Journal of Food Engineering* 1997; 31: 365–373.
- Maldonado RJ y Pacheco-Delahaye E. 2003. Curvas de deshidratación del brócoli (*Brassica oleraceae* L var. Italica Plenck) y coliflor (*Brassica oleraceae* L var. Botrytis L). *Revista de la Facultad de Agronomía LUZ*. 20:306-319.
- Mansour AA, Elshimy N, Shekib L, Sharara M. 2015 Effect of Domestic Processing Methods on the Chemical Composition and Organoleptic Properties of Broccoli and Cauliflower. *American Journal of Food and Nutrition*- 3: 125-130.
- Marangoni AG, Jackman RL, Stanley DW. 1995. Chilling associated softening of tomato fruits is related to increased PME activity. *Journal of Food Science* 60:1277-1281.
- Milán-Carrillo J, Gutiérrez-Dorado R, Perales-Sánchez JXK, Cuevas-Rodríguez EO, Ramírez-Wong B, Reyes-Moreno C. 2006. The optimization of the extrusion process when using maize flour with a modified amino acid profile for making tortillas. *International Journal of Food Science & Technology* 41:727-736.
- Monosalvas-Arias 2012. Determinación de la efectividad de "Biol Biogest Potencializado", como fuente nutricional complementaria en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea*) en

la provincia de cotopaxi. (Tesis de licenciatura). Escuela Politécnica Nacional. Quito Ecuador.

Montgomery DC, Jaime DS. 1991. Diseño y análisis de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica.

Morales-Blancas EF, Chandia VE, Cisneros-Zevallos L. 2002. Thermal Inactivation Kinetics of Peroxidase and Lipoxygenase from Broccoli, Green Asparagus and Carrots. Food Chemistry and Toxicology Journal. 67: 146-154.

Moreno MA. 2001. Control PID. En: Andrés, UMdS, editor. La Paz, Bolivia.

Mudgett RE 1986. Electrical properties of foods. en: Rao MA, SSH (editorial) Engineering properties of foods. Marcel Dekker, New York, pág. 329–390.

Myers R, Montgomery DC. 1971. Response surface methods. Allyn-Bacon: Boston, MA, USA.

Nambi E, Gupta RK, Kumar S, Sharma PC 2016. Degradation kinetics of bioactive compounds, antioxidant activity, color and textural properties of selected vegetables during blanching. Journal of Food and Science Technology. 53: 3073-3082.

Nguyen LT, Choi W, Lee SH, Jun S. 2013. Exploring the heating patterns of multiphase foods in a continuous flow, simultaneous microwave and ohmic combination heater. Journal of Food Engineering. 116:65–71.

- Oerlemans K, Barrett DM, Suades CB, Verkerk R, Dekker M. 2006. Thermal degradation of glucosinolates in red cabbage. *Journal of Food Chemistry*. 95:19–29.
- Onsa, GH, Saari B, Selamat, J.; Bakar, J. 2004. Purification and characterization of membrane-bound peroxidases from Metroxylon sagu. *Journal of Food Chemistry* 85: 365-376.
- Palma-Orozco G, Sampedro JG, Ortiz-Moreno A, Nájera H. 2012. In situ Inactivation of Polyphenol Oxidase in Mamey Fruit (*Pouteria sapota*) by Microwave Treatment. *Journal of Food Science*. 77: 359-365
- Parra-Vergara JC. 2013 Determinación de la cinética de liofilización en floretes de brócoli (*Brassica oleracea L, var. legacy*) y evaluación del contenido de ácido L - ascórbico (l-aa) y actividad peroxidasa (POD). (Tesis de licenciatura) Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Duitama, Moyaca.
- Patras A, Tiwari BK, Brunton NP. 2011. Influence of blanching and low temperature preservation strategies on antioxidant activity and phytochemical content of carrots, green beans and broccoli. *Journal of Food Science and Technology*. 44: 299-306.
- Pellegrini-Zurita 2017. Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum L.*) empleando microondas. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa, México.

- Peng J, Tang J, Luan D, Liu F, Tang Z, Li F, Zhang W. 2017. Microwave pasteurization of pre-packaged carrots. *Journal of Food Engineering*. 202: 56-64l.
- Pérez J, Santos MV, Califanol A, Zaritzky NE. 2015. Obtención de la cinética de inactivación térmica de peroxidasa en crucíferas para la optimización del proceso industrial de vegetales precocidos congelados. (Investigación presentada en 3ra Jornada ITE) Facultad de Ingeniería UNLP.
- Pert E, Carmel Y, Birnboim A, Olorunyolemi T, Gershon D, Calame J, Lloyd IK, Wilson OC. 2001. Temperature measurements during microwave processing: the significance of thermocouple effects. *Journal of the American Ceramic Society* 84: 1981-1986.
- Podsdek A. 2007. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review *LWT-Food Science and Technology* 40:1–11.
- Ramesh MN, Wolf W, Tevini D, A. Bognár A. 2002. Microwave Blanching of Vegetables. *Journal of Food Science*. 67: 390-399.
- Ramírez-Becerra C. 2009. Estudio experimental de la desactivación de la enzima peroxidasa durante el proceso de escaldado de papas (*Solanum tuberosum*) y el almacenamiento a -18 °C. (Tesis de licenciatura). Escuela de Ingeniería de Alimentos. Universidad Austral de Chile.

- Ranjan S, Dasgupta N, Walia N, Chand T, Ramalingam C. 2015. Microwave blanching: An emerging trend in food engineering and its effects on *Capsicum Annuum* L. *Journal of Food Process Engineering*. 40: 1-8.
- Resende JV, Prado MT, Silveira V, 2013. Non-uniform Heat Transfer During Air-Blast Freezing of a Fruit Pulp Model in Multilayer Boxes. *Journal of Food and Bioprocess Technology*. 6: 146-153.
- Richter Reis F 2017. Capítulo dos. Effect of Blanching on Food Physical, Chemical, and Sensory Quality. Food Technician Course, Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho, Jacarezinho, Paraná, Brazil.
- Rodríguez-López JN, Fenoll LG, Tudela J, Devecé C, Sanchez-Hernandez D, de los Reyes E, García-Cánovas F. 1999. Thermal inactivation of mushroom polyphenoloxidase employing 2450 MHz microwave radiation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 47: 3029-3035.
- Ruiz-Ojeda LM, Peñas FJ. 2013. Comparison of conventional hot-water and microwave blanching on quality of green beans. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 20: 191-197.
- [SAGARPA 2011] Monografía de cultivos – Brócoli. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios. 1: 1-9.

- Sakiyan O, Sumnu G, Sahin S, Meda V. 2007. The effect of different formulations on physical properties of cakes baked with microwave and near infrared-microwave combinations. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 41(1):20–26.
- Sanjuán N, Clemente G, Mulet JA. 2001. The effect of blanching on the quality of dehydrated broccoli florets. *European Food Research and Technology*. 213: 474-479.
- Santos PHS y Silva MA 2008. Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetables-a review. *Journal of Drying Technology*. 26: 1421-1437.
- [SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2018. México. Disponible de: <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado en junio 2018.
- Schoeninger V, Coelho SRM, Christ D, Sampaio SC. 2014. Processing parameter optimization for obtaining dry beans with reduced cooking time. *LWT-Food Science and Technology*. 56: 49-57.
- Severini C, Giuliani R, De Filippis A, Derossi A, De Pilli T. 2016. Influence of different blanching methods on colour, ascorbic acid and phenolics content of broccoli. *Journal of Food and Science Technology*. 53: 501-510.
- Sezer DB y Demirdoven A. 2015. The effects of microwave blanching conditions on carrot slices: optimization and comparison. *Journal of Food Processing and Preservation*. 39: 2188-2196

Singh, RP y Heldman, DR. Introduction to Food Engineering. San Diego: Academic Press, Inc.; 1993.

Soria JM, Miracle MR, Vicente E. 1987. Aporte de nutrientes y eutrofización de la albufera de Valencia. *Limnetica*. 3: 227-242.

Steel, RGD, y Torrie, JH. Principles and Procedures of Statistics with Special Reference to the Biological Sciences., McGraw Hill, 1960, p. 187, 287.

Thongsook T y Barret DM. 2005. Purification and partial characterization of broccoli (*Brassica oleracea* Var. *Italica*) peroxidases. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 53: 3206-3214.

[USDA] U.S. Department of Agriculture. 2011. Disponible de: <http://www.ams.usda.gov>. Consultado en junio del 2018.

Vázquez-López 2014. Deshidratación de chile (*Capsicum annuum* L.) poblano entero por secado convectivo, microondas y combinado convectivo-microondas. (Tesis de maestría). Facultad de Ciencias Químico-Biológicas. Universidad Autónoma de Sinaloa.

Venkatesh MS y Raghavan GS 2004. An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering* 88:1–18.

- Verkerk R, Dekker M. 2004. Glucosinolates and myrosinase activity in red cabbage (*Brassica oleracea* L., var. *capitata* f. *rubra* DC) after various microwave treatments. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 52:7318–7323.
- Vollmer M. 2004. Physics of the microwave oven. *Physics Education* 39(1):74.
- Wambui-Munyaka A, Oey I, Van-Loey A, Hendrickx M. 2010 Application of thermal inactivation of enzymes during vitamin C analysis to study the influence of acidification, crushing and blanching on vitamin C stability in Broccoli (*Brassica oleracea* L var. *italica*). *Journal of Food Chemistry*. 120: 591-598.
- Wang J, Tang J, Wang Y, Swanson B, 2009. Dielectric properties of egg whites and whole eggs as influenced by thermal treatments. *Journal of Food Science and Technology* 42: 1204–1212.
- Woodroof, J.G. 1988. Preparing vegetables for processing. In: *Commercial vegetables processing*. AVI Book, Van Nostrand Reinhold. New York. pp: 175-192.
- Xiao H, ZhongliPan L, Deng, H, El-Mashad, X, Yang A, Mujumdar ZJ, Zhang G. 2017. Recent developments and trends in thermal blanching-a comprehensive review, *Information Processing in Agriculture*.

- Xin Y, Zhang M, Xu B, Adhikari B, Sun J. 2015. Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *International Journal of Refrigeration*. 57: 11-25.
- Yuan GF, Sun B, Yuan J, Wang Q. 2009. Effects of different cooking methods on health-promoting compounds of broccoli. *Journal of Zhejiang University Science B*. 10: 508-588.
- Zhang D y Hamauzu Y. 2004 Phenolics, ascorbic acid, carotenoids and antioxidant activity of broccoli and their changes during conventional and microwave cooking. *Journal of Food Chemistry*. 88: 503-509.
- Zhang Z, Pang X, Xuewu D, Ji Z, Jiang Y. 2005. Role of peroxidase in anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp. *Food Chemistry* 90: 47-52.
- Zhang M, Tang J, Mujumdar AS, Wang S. 2006. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food and Technology*. 17: 524-534.

## ABREVIATURAS

cm	Centímetros
Col	Colaboradores
R	Constante de los gases ideales, (8.314 J/mol K)
LSD	Diferencia mínima significativa
$\Delta E$	Diferencia total de color
Ea	Energía de activación, (kJ/mol)
L	Longitud, (m)
mL	Mililitros
min	Minutos
POD	Peroxidasa
%	Por ciento
s	Segundos
T	Temperatura, (°C)
t	Tiempo, (min)
Ton	Toneladas
V	Volumen, (m <sup>3</sup> )

## ANEXOS

**ANEXO 1.** Resultados experimentales de parámetros, físicos de calidad, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado tradicional de floretes de brócoli a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>\Delta E</math></b>	<b>% <i>RF</i></b>	<b>% <i>RAA</i></b>	<b>% <i>AR</i></b>
1.7	65.1	6.96	88.0	77.1	64.0
5.3	65.1	10.6	69.0	57.0	45.0
1.7	89.9	13.9	74.7	45.0	15.0
5.3	89.9	16.6	44.1	38.4	0.0
1.0	77.5	9.90	82.0	66.0	53.0
6.0	77.5	13.4	49.8	41.3	16.0
3.5	60.0	10.3	84.9	90.0	57.0
3.5	95.0	15.0	48.0	44.1	0.0
3.5	77.5	11.4	67.8	57.0	49.5
3.5	77.5	12.7	62.0	49.9	44.5
3.5	77.5	11.7	64.0	52.6	46.0
3.5	77.5	12.9	64.9	58.0	52.5
3.5	77.5	12.6	66.0	51.0	47.0

**ANEXO 2.** Resultados experimentales de parámetros, físicos de calidad, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado con microondas de floretes de brócoli a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>\Delta E</math></b>	<b>% <i>RF</i></b>	<b>% <i>RAA</i></b>	<b>% <i>AR</i></b>
1.7	65.1	3.94	91.5	95.0	93.1
5.3	65.1	7.98	76.9	69.3	78.2
1.7	89.9	9.52	77.1	78.2	45.7
5.3	89.9	13.0	57.8	50.1	1.67
1.0	77.5	7.54	83.1	82.6	60.5
6.0	77.5	11.9	64.1	61.4	8.82
3.5	60.0	5.64	85.0	73.5	90.5
3.5	95.0	11.7	69.7	63.5	0.0
3.5	77.5	8.60	79.3	67.2	25.7
3.5	77.5	8.23	73.4	66.7	29.4
3.5	77.5	7.96	73.5	64.5	32.3
3.5	77.5	7.66	74.1	72.7	31.9
3.5	77.5	7.59	77.8	70.0	39.9

**ANEXO 3.** Resultados experimentales de parámetros, físicos de calidad, nutrimentales y enzimáticos en el escaldado con microondas sin inmersión de floretes de brócoli a los diferentes tiempos y temperaturas descritos en la metodología.

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b><math>\Delta E</math></b>	<b>% <i>RF</i></b>	<b>% <i>RAA</i></b>	<b>% <i>AR</i></b>
1.7	65.1	3.85	92.3	96.6	75.0
5.3	65.1	5.23	76.1	75.3	47.0
1.7	89.9	6.61	83.5	84.0	36.0
5.3	89.9	8.80	67.8	66.3	0.48
1.0	77.5	3.92	88.6	88.8	71.0
6.0	77.5	5.85	69.7	71.4	6.34
3.5	60.0	3.41	83.8	88.6	72.0
3.5	95.0	8.09	73.3	74.9	3.89
3.5	77.5	4.72	74.6	81.3	43.4
3.5	77.5	4.48	79.6	78.0	42.2
3.5	77.5	5.64	80.7	84.4	35.0
3.5	77.5	4.27	76.7	75.9	38.5
3.5	77.5	5.12	77.8	82.5	40.0