



Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Ciencias Químico Biológicas

Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

Inactivación enzimática secuencial en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette empleando microondas

TESIS

Que presenta

MARÍA FELÍCITAS PACHECO PLATA

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIA

Y

TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Director de Tesis

DR. JOSÉ DE JESÚS CARO CORRALES

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Mediciones Termofísicas de la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos en la Facultad de Ciencias Químico Biológicas de la Universidad Autónoma de Sinaloa, bajo la dirección del Dr. José de Jesús Caro Corrales y la asesoría del Dr. Roberto Gutiérrez Dorado, el MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla y la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández. María Felicitas Pacheco Plata recibió una beca proveniente del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Culiacán el día 18 del mes Marzo del año 2020, el (la) que suscribe María Felicitas Pacheco Plata alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos con número de cuenta 0907670-0, de la Unidad Académica Facultad de Ciencias Químico Biológicas, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José de Jesús Caro Corrales y cede los derechos del trabajo titulado "Inactivación enzimática secuencial en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette 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.

Una firma manuscrita en tinta azul, que parece ser "F. Pacheco", sobre una línea horizontal.

María Felicitas Pacheco Plata

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Autónoma de Sinaloa, a la Facultad de Ciencias Químico Biológicas y en especial a la Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos por darme la oportunidad de continuar desarrollándome profesional y personalmente.

A mis padres, José Guadalupe y Felicitas, quienes me han apoyado en cada momento con amor y cariño, por sus tantos consejos, confiar en mí y motivarme constantemente a seguir con nuevos retos.

A mis hermanos Andrés, Johana y Guadalupe, por todos los momentos que hemos compartido y el apoyo constante que me ha hecho sentir querida.

A mi esposo José Adrián, por su gran amistad y amor incondicional, por creer en mí, brindarme su apoyo y motivarme a lo largo de todo este tiempo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado.

A mi director de tesis, Dr. José de Jesús Caro Corrales, por permitirme ser su alumna y compartir siempre sus conocimientos conmigo, por tener la mejor disposición para ayudarme en todo momento, aconsejarme y motivarme a seguir adelante. Por los buenos momentos de convivencia que me han permitido conocerlo como persona.

Al Dr. Roberto Gutiérrez Dorado, quien me brindó su gran apoyo y dedicación para aclarar mis dudas, por sus consejos que me permitieron mejorar bastante.

Al MC. Jorge Aurelio Zazueta Niebla, quien me otorgó su apoyo y aconsejó para mejorar constantemente, tanto en lo personal como en lo académico.

A la Dra. Irma Leticia Camacho Hernández, por brindarme su asesoría y compartir sus conocimientos conmigo, por los agradables momentos de convivencia y sus consejos.

A mis buenos amigos y compañeros de laboratorio: Olivia, Luis Carlos, Rogelio y Melissa. Por hacer que la convivencia fuera bastante agradable y cómoda, por sus palabras de aliento, consejos y disponibilidad para apoyarme en cualquier momento. A David, César, Rosalina, Yessica, Carlos y Julio por ayudarme a aclarar muchas dudas, enseñarme cosas nuevas, darme grandes consejos que me han servido para mejorar bastante, por su amistad y compañía.

A mis amigos y compañeros de generación Katya, Andrés, Magdalena, Milton y Lourdes, por compartir su tiempo conmigo y brindarme su apoyo incondicional, por todas las experiencias que vivimos juntos bastante divertidas.

Al laboratorio de Genética Molecular como al laboratorio de Bioprocesos y Alimentos Funcionales por compartir el equipo para el desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	ix
I RESUMEN	1
ABSTRACT	3
II INTRODUCCIÓN	5
III REVISIÓN DE LA LITERATURA	7
A TOMATE	7
1 Generalidades	7
2 Composición química	11
3 Importancia	14
4 Producción	14
a Mundial	14
b Nacional	16
5 Importación y exportación	16
6 Procesamiento industrial de tomate	16
a Productos derivados del tomate	16
b Enzimas de importancia en el procesamiento de tomate	19
B ESCALDADO	24
1 Generalidades	24
2 Importancia	25
a Inactivación enzimática	27

3 Efectos del escaldado sobre atributos de calidad	27
C MICROONDAS	29
1 Generalidades	29
2 Componentes de un horno de microondas	32
3 Aplicaciones	34
IV JUSTIFICACIÓN	39
V OBJETIVOS	41
A OBJETIVO GENERAL	41
B OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
VI MATERIALES Y MÉTODOS	42
A MATERIALES	42
1 Materia prima	42
2 Equipo de microondas	42
B MÉTODOS	44
1 Escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado tradicional	44
2 Escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado con microondas con inmersión	44
3 Escaldado tradicional	45
4 Escaldado con microondas con inmersión	46
5 Evaluación de parámetros fisicoquímicos	46
a Diferencia total de color (ΔE)	46
b Índice de consistencia (K)	47
6 Evaluación del parámetro nutrimental	48

a Retención de ácido ascórbico	48
7 Análisis enzimático	50
a Actividad remanente de poligalacturonasa	50
1) Extracción de la enzima	50
2) Ensayo enzimático	51
8 Métodos estadísticos	52
a Diseño experimental	52
b Optimización	52
c Análisis de datos	54
d Validación del modelo de predicción	55
e Contraste de los métodos de escaldado	55
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
A MODELOS DE REGRESIÓN EXPERIMENTALES DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO	56
1 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional	56
a Parámetros fisicoquímicos	56
1) Diferencia total de color (ΔE)	56
2) Índice de consistencia (K)	59
b Parámetro nutrimental	62
1) Retención de ácido ascórbico (RAA)	62
c Parámetros enzimáticos	65

1) Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (<i>AR PG1</i>)	65
2) Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (<i>AR PG2</i>)	67
2 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua	69
a Parámetros fisicoquímicos	69
1) Diferencia total de color (ΔE)	69
2) Índice de consistencia (<i>K</i>)	72
b Parámetro nutrimental	75
1) Retención de ácido ascórbico (<i>RAA</i>)	75
c Parámetros enzimáticos	78
1) Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (<i>AR PG1</i>)	78
2) Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (<i>AR PG2</i>)	81
B MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO	83
1 Optimización de los métodos de escaldado secuenciales	83
a Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional	84
b Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua	84
2 Validación de los modelos de predicción	87
a Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional	87
b Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado	87

con microondas con inmersión en agua	
C PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICOS	90
DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO CON LOS MÉTODOS CONTROL	
1 Escaldado tradicional	90
2 Escaldado con microondas con inmersión	92
D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL	
Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE OBTENIDO DE LOS	
MÉTODOS SECUENCIALES OPTIMIZADOS Y LOS MÉTODOS	94
CONTROL	
1 Parámetros fisicoquímicos	94
a Diferencia total de color (ΔE)	94
b Índice de consistencia (K)	96
2 Parámetro nutrimental	98
a Retención de ácido ascórbico (RAA)	98
3 Parámetros enzimáticos	100
a Actividad remanente de poligalacturonasa 1 ($PG1$)	100
b Actividad remanente de poligalacturonasa 2 ($PG2$)	102
VIII CONCLUSIONES	105
IX BIBLIOGRAFÍA	107
ABREVIATURAS	119
ANEXOS	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pág.
1	Partes del fruto de tomate.	8
2	Tipos de tomate más comercializados: a) cherry, b) saladette y c) bola o redondo.	10
3	Estructura del licopeno	15
4	Diagrama de flujo para la elaboración de productos de tomate.	20
5	Acción de la enzima poligalacturonasa.	22
6	Tipos de escaldado basado en los requerimientos de agua durante el proceso.	26
7	Espectro electromagnético.	30
8	Componentes de un horno de microondas.	33
9	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) variedad Saladette utilizado como materia prima en este trabajo.	43
10	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE) de jugo de tomate, sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por un escaldado tradicional.	57
11	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que indican el efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre el índice de consistencia (K) de jugo de tomate, sometido a un escaldado con	60

	microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.	
12	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que ilustran el efecto de la temperatura y el tiempo de tratamiento sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico (<i>RAA</i>) en jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por escaldado tradicional.	63
13	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestra el efecto de la temperatura y tiempo sobre la actividad remanente de PG1 (<i>AR PG1</i>) en jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado tradicional.	66
14	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que indican el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la actividad remanente de PG2 (<i>AR PG2</i>) en jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado tradicional.	68
15	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE) de jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	70
16	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que ilustran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre el índice de consistencia (<i>K</i>), después de un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	73
17	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que reflejan el	76

	efecto de la temperatura y el tiempo sobre la retención de ácido ascórbico (RAA) de jugo de tomate escaldado con microondas con inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	
18	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la actividad remanente de PG1 (AR PG1) de jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	79
19	Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de los factores temperatura y tiempo sobre la actividad remanente de PG2 (AR PG2) de jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	82
20	Gráfico de deseabilidades individuales (variables de proceso y respuestas) y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de escaldado de tomate por el método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.	85
21	Gráfico de deseabilidades individuales (variables de proceso y respuestas) y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de escaldado de tomate por el método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.	86

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Pág.
1	Escala de madurez en tomates.	12
2	Composición nutrimental de tomate rojo fresco por cada 100 g.	13
3	Principales países productores de tomate en 2018.	17
4	Principales estados mexicanos productores de tomate en 2018.	18
5	Principales procesadores de tomate 2014 – 2018.	21
6	Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de escaldado.	53
7	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por escaldado tradicional.	88
8	Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua obtenido por escaldado con microondas con inmersión en agua.	89
9	Variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate obtenido de los métodos control escaldado tradicional (ET).	91
10	Variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate obtenido de los métodos control escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI).	93
11	Diferencia total de color experimental de jugo de tomate obtenida de las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua	95

- seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).
- 12 Índice de consistencia experimental de jugo de tomate obtenido a las 97 mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).
- 13 Retención de ácido ascórbico experimental de tomate obtenido a las 99 mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).
- 14 Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (PG1) experimental de jugo 101 de tomate obtenido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

- 15 Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (PG2) experimental de jugo 103
- de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

I RESUMEN

El tomate se caracteriza por ser una fuente importante de β -caroteno, licopeno y vitamina C, presenta un alto contenido de humedad (90 a 97 %), es bajo en grasas (0.7 - 1.1 %), proteínas (0.2 - 0.7 %) y azúcares (1.2 - 2.5 %). A nivel mundial China, es el principal productor de tomate, mientras que México ocupa el primer lugar en exportación. La gran importancia de esta hortaliza radica en que la industria alimentaria la utiliza como materia prima para elaborar diversos productos que pueden almacenarse sin necesidad de refrigeración y presentan una larga vida útil. Sin embargo, presenta una gran variedad de enzimas que pueden afectar la calidad de sus productos, entre éstas la poligalacturonasa (PG), que tiene una alta resistencia térmica. El método de escaldado es utilizado para inactivar enzimas indeseables, éste consiste en la inmersión del tejido vegetal en agua a temperatura de ebullición durante un tiempo determinado, no obstante, las características sensoriales y nutricionales de los alimentos se ve comprometida. Una técnica de escaldado alternativa es el uso de microondas, debido a que algunas de sus ventajas son que reduce el tiempo de calentamiento y la pérdida de nutrimentos solubles que se lixivian en el agua. Es por ello que en el presente trabajo se buscó contrastar la inactivación de poligalacturonasa en tomate cv. Saladette, empleando escaldado con microondas y escaldado tradicional. Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un horno de microondas modificado para mantener constante la temperatura. Se realizaron los tratamientos: escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI+ ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI) y como controles escaldado tradicional (ET) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI). Posteriormente, se evaluaron los parámetros fisicoquímicos [diferencia total de color

(ΔE) mediante los parámetros de color CIELAB L^* , a^* y b^* ; e índice de consistencia (K) con el modelo de la Ley de la Potencia], nutrimentales (retención de ácido ascórbico (RAA) mediante una titulación con el indicador 2,6-diclorofenolindofenol), y enzimáticos [actividad remanente de PG1 ($AR\ PG1$) y actividad remanente de PG2 ($AR\ PG2$) determinadas espectrofotométricamente al medir la producción de azúcares reductores]. Se utilizó un diseño Central Compuesto Rotable con dos factores: temperatura (60 °C a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min). Se consideró deseable baja ΔE , alto K , alta RAA , baja $AR\ PG1$ y baja $AR\ PG2$. Se obtuvieron las condiciones óptimas de procesamiento con la metodología de superficie de respuesta. Las condiciones óptimas para los métodos secuenciales fueron: EMSI + ET = 90 °C, 2.2 min y EMSI + EMCI = 71.2 °C, 6 min. Se verificaron los modelos de predicción obtenidos. Posteriormente se realizó un contraste de los diferentes métodos de escaldado. Los resultados de ΔE , K , RAA , $AR\ PG1$ y $AR\ PG2$ obtenidos fueron 8.76 ± 0.24 , $0.86 \pm 0.03\ Pa \cdot s^n$, $82.3 \pm 0.46\ \%$, $89.01 \pm 0.95\ \%$ y $87.42 \pm 1.14\ \%$ para EMSI + ET, 10.38 ± 0.06 , $2.88 \pm 0.04\ Pa \cdot s^n$, $91.5 \pm 0.47\ \%$, $86.58 \pm 0.95\ \%$ y $84.49 \pm 0.38\ \%$ para EMSI + EMCI, 6.82 ± 1.01 , $1.06 \pm 0.08\ Pa \cdot s^n$, $85.8 \pm 4.64\ \%$, $96.11 \pm 1.25\ \%$ y $95.87 \pm 1.81\ \%$ para el control ET (90 °C, 2.2 min), 5.17 ± 0.33 , $0.98 \pm 0.17\ Pa \cdot s^n$, $88.6 \pm 3.52\ \%$, $97.26 \pm 1.82\ \%$ y 96.86 ± 0.94 para el control ET (71.2 °C, 6 min), 7.36 ± 3.39 , $3.96 \pm 0.96\ Pa \cdot s^n$, $95.6 \pm 2.61\ \%$, $96.92 \pm 2.31\ \%$ y $95.69 \pm 3.36\ \%$ para EMCI (90 °C, 2.2 min), 6.99 ± 2.79 , $2.95 \pm 0.46\ Pa \cdot s^n$, $97.1 \pm 2.92\ \%$, $97.44 \pm 1.21\ \%$ y $95.87 \pm 1.31\ \%$ para EMCI (71.2 °C, 6 min), respectivamente. El método EMSI + EMCI presentó un mejor índice de consistencia y mayor retención de ácido ascórbico, en comparación con el escaldado EMSI + ET. Por lo que se recomienda utilizar el método secuencial en el que se utiliza sólo microondas.

ABSTRACT

Tomato is characterized by being a source important of β -carotene, lycopene and vitamin C, has a high moisture content (90 to 97%), is low in fat (0.7 - 1.1%), protein (0.2 - 0.7%) and sugars (1.2 - 2.5%). Globally, China is the main tomato producer, while Mexico occupies the first place in export. The great importance of this vegetable is that the food industry uses it as a raw material to produce various products that can be stored without refrigeration and have a long shelf life. However, it has a wide variety of enzymes that can affect the quality of its products, including polygalacturonase (PG), which has a high thermal resistance. The blanching method is used to inactivate undesirable enzymes, this consists of immersing the vegetal tissue in boiling water for a certain time, however, the sensory and nutritional characteristics of the food is compromised. An alternative blanching technique is the use of microwaves, because some of its advantages are that it reduces the heating time and the loss of soluble nutrients that are leached into the water. That is why in this work it was searched to contrast the inactivation of polygalacturonase in tomato cv. Saladette, using microwave blanching and traditional blanching. For the development of this project, was used a commercial microwave oven modified to keep the temperature constant. Treatments were performed: microwave blanching without immersion in water followed by traditional blanching (MBWI + TB), microwave blanching without immersion followed by microwave blanching with immersion in water (MBWI + MBWIW) and as control traditional blanching (TB) and microwave blanching with water immersion (MBWIW). Subsequently, the physicochemical [total color difference (ΔE) were evaluated using the CIELAB L^* , a^* and b^* color parameters; and consistency index (K) with the model of the Law of Power], nutritional (ascorbic acid retention (AAR) through a titration with the indicator 2,6-

dichlorophenolindophenol), and enzymatic [remaining activity of PG1 (*AR PG1*) and remaining activity of PG2 (*AR PG2*) determined spectrophotometrically when measuring the production of reducing sugars] parameters. A Rotatable Composite Central design with two factors was used: temperature (60 °C to 90 °C) and time (2 to 6 min). Low ΔE , high K , high RAA , low *AR PG1* and low *AR PG2* were considered desirable. Optimum processing conditions were obtained with the response surface methodology. The optimal conditions for the sequential methods were: MBWI + TB = 90 °C, 2.2 min and MBWI + MBWIIW = 71.2 °C, 6 min. The prediction models obtained were verified. Subsequently, a contrast of the different blanching methods was performed. The results of ΔE , K , RAA , *AR PG1* and *AR PG2* obtained were: 8.76 ± 0.24 , $0.86 \pm 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $82.3 \pm 0.46 \%$, $89.01 \pm 0.95 \%$ and $87.42 \pm 1.14 \%$ for MBWI + TB, 10.38 ± 0.06 , $2.88 \pm 0.04 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $91.5 \pm 0.47 \%$, $86.58 \pm 0.95 \%$ and $84.49 \pm 0.38 \%$ for MBWI + MBWIIW, 6.82 ± 1.01 , $1.06 \pm 0.08 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $85.8 \pm 4.64 \%$, $96.11 \pm 1.25 \%$ and $95.87 \pm 1.81 \%$ for TB control (90 °C, 2.2 min), 5.17 ± 0.33 , $0.98 \pm 0.17 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $88.6 \pm 3.52 \%$, $97.26 \pm 1.82 \%$ and 96.86 ± 0.94 for TB control (71.2 °C, 6 min), 7.36 ± 3.39 , $3.96 \pm 0.96 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $95.6 \pm 2.61 \%$, $96.92 \pm 2.31 \%$ and $95.69 \pm 3.36 \%$ for MBWIIW (90 °C, 2.2 min), 6.99 ± 2.79 , $2.95 \pm 0.46 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, $97.1 \pm 2.92 \%$, $97.44 \pm 1.21 \%$ and $95.87 \pm 1.31 \%$ for MBWIIW (71.2 °C, 6 min), respectively. The MBWI + MBWIIW method had a better consistency index and greater retention of ascorbic acid, than the blanching MBWI + TB. Therefore it is recommended to use the sequential method in which only microwaves are used.

II INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las principales hortalizas más cultivadas a nivel mundial. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio (Escalona y col 2009). Esta hortaliza destaca por ser una fuente importante de β -caroteno, licopeno y vitamina C (Sosa-Morales 2012).

La gran popularidad del tomate radica en que es utilizado como materia prima en la industria alimentaria para la elaboración de diversos productos con una larga vida útil y que pueden almacenarse sin necesidad de refrigeración, entre éstos se encuentran puré, pasta, jugo, sopa, salsa, mermeladas, cátsup, deshidratado, entre otros (SAGARPA 2010; Cárdenas y col 2015). Sin embargo, el tomate contiene una gran variedad de enzimas que pueden alterar la calidad de sus productos; entre éstas se incluye la poligalacturonasa (PG) que presenta una alta resistencia térmica (Pellegrini 2017). Para el control de reacciones indeseables se aplica el escaldado, el cual es una operación unitaria cuyo objetivo principal es inactivar las enzimas y regularmente se aplica antes de congelar, enlatar o secar los alimentos. El escaldado ordinario o también conocido como escaldado tradicional es el más utilizado, consiste en la inmersión del material vegetal en agua a temperatura de ebullición, durante un tiempo breve (Aguilar y col 1999; Dorantes-Alvarez y col 2011; Ranjan y col 2016). Sin embargo, se asocia comúnmente con la pérdida del contenido nutrimental y de la calidad sensorial, provocando cambios de color, textura y sabor en los alimentos. Además, requiere más tiempo de procesamiento, una gran cantidad de energía y agua, generando efluentes con una alta demanda biológica de oxígeno (DBO) (Ranjan y col 2016).

El escaldado por microondas es una alternativa al escaldado tradicional, éste se basa en el uso de ondas electromagnéticas y las propiedades dieléctricas del alimento para inducir

calentamiento (Aguilar y col 1999). Cuando el alimento es expuesto a las microondas, las moléculas con carga dipolar, como el agua, giran para alinearse con el campo eléctrico que cambia de orientación rápidamente. La fricción resultante genera calor, el cual es transferido a las moléculas vecinas, debido a esto el calentamiento con microondas puede elevar la temperatura del agua presente en los alimentos con gran rapidez (Vázquez 2014). Algunas de sus ventajas son que reduce el tiempo de procesamiento y retiene una mayor cantidad de vitaminas, volátiles, pigmentos, carbohidratos y otros componentes solubles en agua (Ponne y col 1994; Ranjan y col 2016; Soltero 2019).

Se han realizado estudios comparando diferentes métodos como el escaldado tradicional, con microondas, combinando microondas con vapor, radiaciones infrarrojas, vapor y ondas de radiofrecuencia. Sin embargo, los resultados han indicado que el uso y la combinación de microondas permiten obtener productos con mejores características sensoriales y nutrimentales comparadas con los métodos que involucran sólo el uso de vapor o agua a temperaturas elevadas (Ponne y col 1994; Devecce y col 1999; Ranjan y col 2016).

En la actualidad no existen datos que informen acerca de la inactivación enzimática secuencial utilizando microondas. Es por ello que, en el presente trabajo se buscó contrastar la inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette, empleando escaldado con microondas y escaldado tradicional.

III REVISIÓN DE LA LITERATURA

A TOMATE

1 Generalidades

La palabra tomate deriva de los vocablos náhuatl *tomatl* que significa objeto gordo (Long 1995; Sosa-Morales 2012). Pertenece a la familia *Solanaceae*, género *Solanum* y especie *Lycopersicum*, cuyo nombre científico es *Solanum lycopersicum* L. (Sosa-Morales 2012). El tomate es una baya ovalada, redonda o periforme (SAGARPA 2010) Está constituido por el pericarpio, el tejido placentario y las semillas (**Figura 1**) (Escalona y col 2009). Generalmente presenta una coloración roja en la maduración, aunque también existen variedades con coloración amarilla, verde o violeta, ocasionada por la presencia de diversos pigmentos como licopeno y caroteno (Fernández-Ruíz 2007; SAGARPA 2017).

Es originario de América del Sur (región andina), particularmente de Perú, Ecuador, Bolivia y Chile (SAGARPA 2010). Se cree que fue domesticado en México alrededor del año 1523 y posteriormente distribuido a Europa después de la conquista española (Sosa-Morales 2012). Los españoles y portugueses se encargaron de distribuirlo a Oriente Medio, África y a otros países asiáticos, de Europa también se difundió a Estados Unidos y Canadá (Escalona y col 2009).

El tomate se cultiva en zonas templadas y cálidas (SAGARPA 2017). Para el desarrollo del tomate, la temperatura óptima se sitúa entre 18 y 25 °C (Escalona y col 2009; SAGARPA 2010) y requiere de una humedad relativa entre 60 % y 80 % (Escalona y col 2009). La planta de tomate puede cultivarse en cualquier tipo de suelo, pero se desarrolla mejor en suelos



Figura 1. Partes del fruto de tomate (Vásquez 2015).

profundos y bien drenados. Lo ideal es un suelo ligeramente ácido, con un pH entre 6.2 y 6.8 (SAGARPA 2010).

El tomate es una hortaliza con gran diversidad, debido a que existen variedades con distinto aspecto exterior (forma, tamaño, color) e interior (sabor, textura, dureza). Es por ello que, algunas variedades de tomate son destinadas para su consumo en fresco y otras para ser procesadas por la industria para la elaboración de diversos productos (Escalona y col 2009).

Entre los principales tipos de tomate comercializados se encuentran: la variedad Cherry (cereza) (**Figura 2a**), mismo que se produce en plantas de crecimiento indeterminado (SAGARPA 2010), se caracteriza por tener un alto contenido de azúcar y frutos con diámetros de entre 20 a 35 mm (INTAGRI 2017), éstos se agrupan en ramilletes de 15 a más de 50 frutos y existen de color rojo y amarillo; por otro lado se encuentra el tomate Saladette (roma) (**Figura 2b**), el cual es un fruto pequeño bi o trilocular (SAGARPA 2010) que se caracteriza por tener forma elongada y color rojo brillante (Sosa-Morales 2012), éste es el tomate más popular en México y se destina principalmente para su consumo interno en fresco; y por último, la variedad Bola (Beef o redondo) (**Figura 2c**), éste es un tomate redondo, grande y con mucha pulpa, el diámetro promedio de los frutos oscila entre 54 a 90 mm (INTAGRI 2017) y posee de 4 a 6 lóculos (Sosa-Morales 2012). Otras variedades importantes son: Marmande, Vemone, Moneymaker, Muchamiel, Pometa Tardío, San Marzano, Cocktail, Ramillete, Liso, etc (SAGARPA 2010).

Las características como el color, la madurez y la firmeza son factores importantes para determinar la comerciabilidad de los tomates, debido a que la madurez del tomate es un factor que determina la forma en que debe ser manipulado, transportado y comercializado, así como

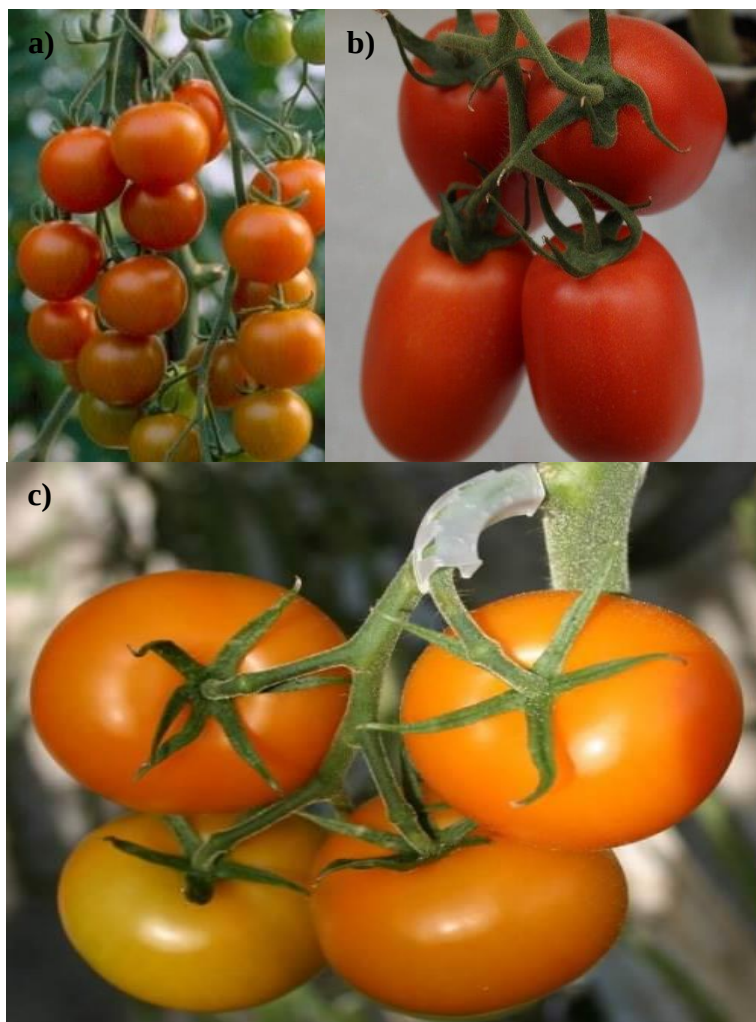


Figura 2. Tipos de tomate más comercializados: a) cherry, b) saladette y c) bola o redondo (INTAGRI 2017).

la calidad y vida de almacenamiento. Los tomates pasan por varias etapas de madurez, que se caracterizan por su color y firmeza (Escalona y col 2009).

Para tomates rojos maduros, los diferentes estados de madurez se pueden clasificar en: (1) “Verde”, es decir, la superficie del tomate es completamente de color verde (puede variar de claro a oscuro); (2) “Rompiente”, significa que hay una ruptura en el color de verde a canela, amarillo, rosa o rojo en no más del 10 por ciento de la superficie del fruto; (3) “Cambiante”, indica que más del 10 por ciento pero no más del 30 por ciento de la superficie muestra un cambio en el color del verde al bronceado, amarillo, rosa, rojo o una combinación de los mismos; (4) “Rosado”, es decir, más del 30 por ciento pero no más del 60 por ciento de la superficie del fruto presenta un color rosado o rojo; (5) “Rojo ligero”, significa que más del 60 por ciento de la superficie muestra un color rojo rosáceo o rojo: siempre que no sea de color rojo más del 90 por ciento de la superficie; y (6) “Rojo”, indica que más del 90 por ciento de la superficie del fruto muestra un color rojo (**Cuadro 1**) (USDA 2005).

2 Composición química

El tomate se caracteriza por poseer un alto contenido de humedad (entre 90 y 97 %), bajo contenido en grasas (0.7 - 1.1 %), proteínas (0.2 - 0.7 %) y azúcares (1.2 - 2.5 %). Nutritionalmente, los tomates son considerados como alimentos saludables por ser una buena fuente de carotenoides como licopeno (hasta el 90% de los pigmentos totales) y β -caroteno, vitamina C, vitamina E y flavonoides, sin embargo, su aporte nutricional depende de la variedad y de factores como la lluvia, las características del suelo y el riego (Sosa-Morales 2012; Vásquez 2015). En el **Cuadro 2** se reportan los principales componentes del fruto de tomate fresco maduro.

Cuadro 1. Escala de madurez en tomates.

Estado de madurez	Estado	Descripción
	1	Verde
	2	Rompiente
	3	Cambiante
	4	Rosado
	5	Rojo ligero
	6	Rojo

Fuente: (USDA 2005; García 2011).

Cuadro 2. Composición nutrimental de tomate rojo fresco por cada 100 g.

Contenido energético	75 kJ (18 kcal)
Componentes	Cantidad
Carbohidratos	3.89 g
Azúcares	2.63 g
Fibra dietaria	1.2 g
Grasas	0.2 g
Proteínas	0.88 g
Agua	94.52 g
Vitamina A	42 µg
Tiamina (Vitamina B1)	0.037 mg
Rivoflavina (Vitamina B2)	0.019 mg
Niacina (Vitamina B3)	0.594 mg
Vitamina B6	0.08 mg
Folato (Vitamina B9)	15 µg
Vitamina C	13.7 mg
Vitamina E	0.54 mg
Vitamina K	7.9 µg
Calcio	10 mg
Hierro	0.27 mg
Magnesio	11 mg
Fósforo	24 mg
Potasio	237 mg
Sodio	5 mg
Zinc	0.17 mg

Fuente: (USDA 2018).

3 Importancia

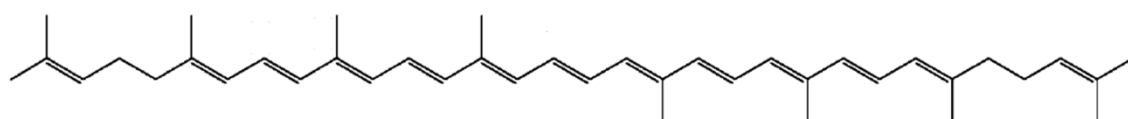
El consumo de tomate ha adquirido importancia en la dieta humana por ser un alimento muy versátil, con formas de consumo muy variadas. Altas ingestas de esta hortaliza se han relacionado con un impacto benéfico a la salud, debido a que reduce el riesgo de padecer enfermedades cardiovasculares y diferentes tipos de cáncer, atribuido principalmente a su importante contenido de antioxidantes (licopeno, ácido ascórbico y fenólicos) (Sosa-Morales 2012). Estos compuestos son importantes en la prevención de enfermedades, debido a que evitan el inicio o la propagación de reacciones oxidantes en cadena y con ello inhiben o retrasan la oxidación de biomoléculas. Uno de los principales compuestos con actividad antioxidante es el licopeno, el cual constituye del 60 al 74 % (hasta el 90 %) de los carotenoides presentes en tomates frescos y productos de tomate. Este componente puede encontrarse en diferentes formas conformacionales, pero el isómero predominante de licopeno es la conformación *trans* en tomates frescos y productos de tomates (alrededor de 95 %) (**Figura 3**) (Martínez-Valverde y col 2002).

4 Producción

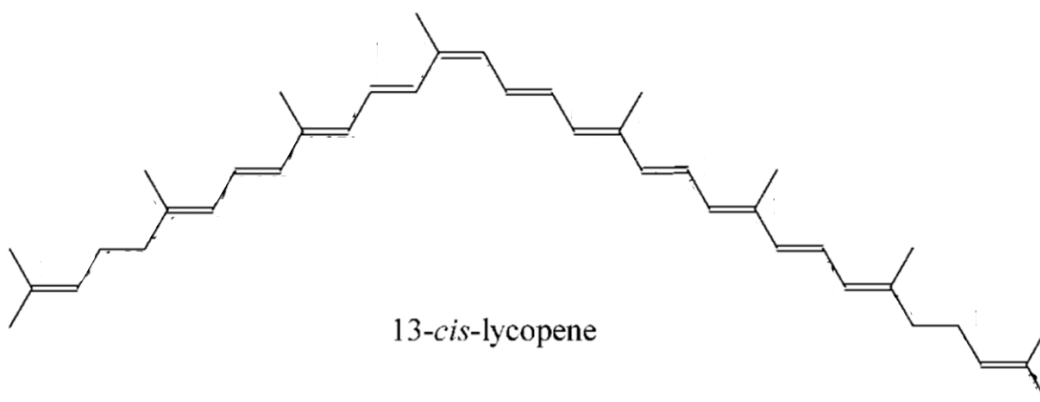
El tomate es la hortaliza más cultivada en todo el mundo y la de mayor valor económico. Su demanda aumenta continuamente y con ella su cultivo, producción y comercio. El incremento anual de la producción en los últimos años se debe principalmente al aumento en el rendimiento y en menor proporción al aumento de la superficie (Escalona y col 2009).

a Mundial

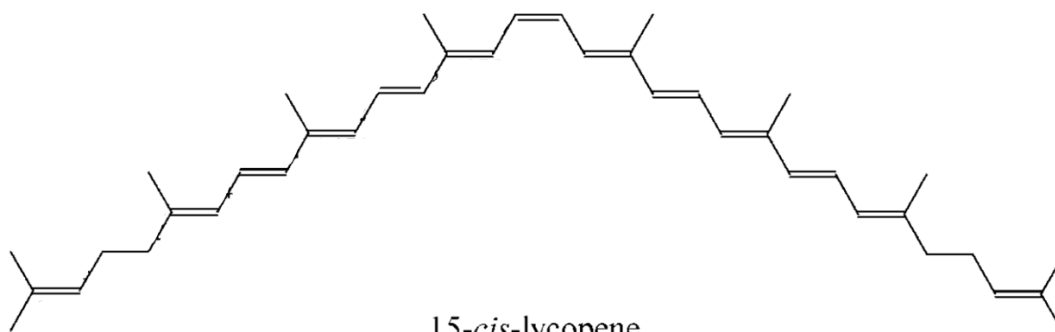
En el año 2018 se produjeron 182, 258, 016 toneladas de tomate a nivel mundial. Los



all-*trans*-lycopene



13-*cis*-lycopene



15-*cis*-lycopene

Figura 3. Estructura del licopeno (Wen-Hsin y col 2008).

países con mayor producción de tomate son China, India y Estados Unidos de América (**Cuadro 3**), siendo China el principal productor con 61, 631, 581 toneladas. México ocupó el noveno lugar con una producción de 4, 559, 375 toneladas (FAOSTAT 2018).

b Nacional

En el año 2018, los principales estados mexicanos productores de tomate fueron Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Zacatecas (**Cuadro 4**), aportando Sinaloa alrededor del 28.8 % de la producción nacional (SIAP 2018).

5 Importación y exportación

El tomate es una de las tres principales hortalizas cultivadas en el mundo, donde China es el principal productor con 61, 631, 581 toneladas (FAOSTAT 2018). Estados Unidos es el principal importador de tomate y México es el principal exportador de esta hortaliza, destinando 99.7 % de sus exportaciones al mercado estadounidense. El cultivo a campo abierto cada vez más abre paso al cultivo bajo cubierta, debido en gran parte a que la producción de tomate bajo agricultura protegida (malla sombra o invernadero) ha generado un incremento en el rendimiento por unidad de superficie (INTAGRI 2018).

6 Procesamiento industrial del tomate

a Productos derivados del tomate

La gran popularidad del tomate radica en que es utilizado en la industria alimentaria como materia prima para la elaboración de productos industrializados, que presentan una larga vida útil y pueden almacenarse sin necesidad de refrigeración (SAGARPA 2010; Cárdenas y col 2015). Entre éstos se incluyen productos como puré, pasta, jugo, sopa, salsa, mermeladas,

Cuadro 3. Principales países productores de tomate en 2018.

País	Producción (t)
China	61, 631, 581
India	19, 377, 000
Estados Unidos de América	12, 612, 139
Turquía	12, 150, 000
Egipto	6, 624, 733
Irán	6, 577, 109
Italia	5, 798, 103
España	4, 768, 595
México	4, 559, 375
Brasil	4, 110, 242

Fuente: (FAOSTAT 2018).

Cuadro 4. Principales estados mexicanos productores de tomate en 2018.

Estado	Producción (t)
Sinaloa	1,088,251.51
San Luis Potosí	393,581.64
Michoacán	281,847.89
Jalisco	189,847.96
Zacatecas	182,773.48
Baja California Sur	157,879.03
Puebla	149,456.10
Morelos	146,058.14
Baja California	139,311.57
Sonora	119,269.01

Fuente: (SIAP 2018).

cátsup, deshidratado, encurtido, enlatado de tomates enteros y pelados, entre otros (Escalona y col 2009; Cárdenas y col 2015). En la **Figura 4** se muestra un diagrama de procesamiento de frutos de tomate frescos para obtener productos derivados de tomate, donde se incluyen operaciones unitarias como pelado y triturado, que permiten reducir los frutos a partículas pequeñas para facilitar su posterior procesamiento.

Por otro lado, se ha reportado, que más de un tercio de la producción mundial de tomate se destina para la elaboración de alimentos procesados, en donde más de 35 millones de toneladas de tomates se procesan cada año en fábricas de las marcas más reconocidas de la industria alimentaria, no obstante, a pesar de que varios países tienen una industria para procesar tomates, se centra en los 10 mayores países productores con alrededor del 86% (Vásquez 2015), como se muestra en **Cuadro 5**.

b Enzimas de importancia en el procesamiento de tomate

El tomate presenta una gran variedad de enzimas, sin embargo, las de mayor importancia en la industria alimentaria son pectin metil esterasa (PME), poligalacturonasa (PG), β -galactosidasa (β -Gal), α -arabinofuranosidasa (α -Af), polifenol oxidasa (PPO) y peroxidasa (POD). Para fines prácticos de inactivación se propone como enzima objetivo aquella cuya resistencia térmica sea mayor, en el caso del fruto de tomate es la PG (Pellegrini 2017).

La enzima poligalacturonasa (EC 3.2.1.15) (**Figura 5**), se dice que se encuentra asociada a la pared celular en muchas frutas y hortalizas, como el tomate (Fachin y col 2004). Esta actúa hidrolizando el enlace glucosídico $\alpha(1-4)$ del ácido galacturónico de las pectinas, por una acción que se puede llevar a cabo tanto en el interior del polímero (endo) como a partir de los extremos (exo). Cuando la enzima actúa en el interior, la viscosidad se reduce rápidamente,

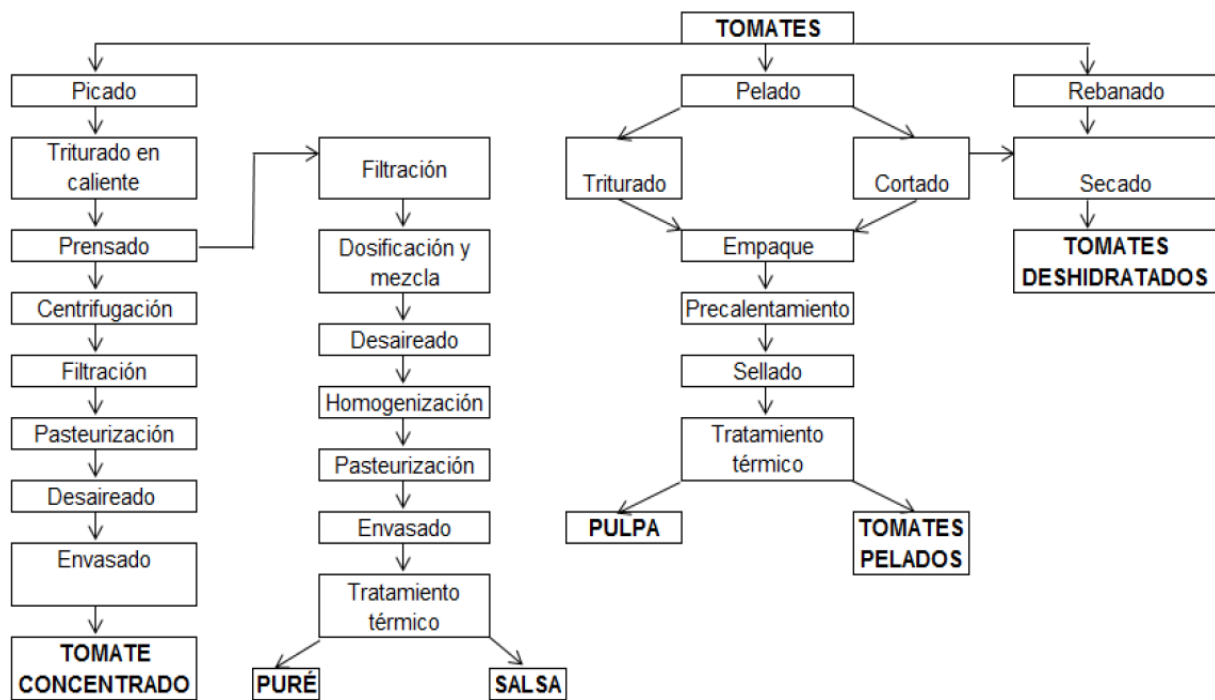


Figura 4. Diagrama de flujo para la elaboración de productos de tomate (Vásquez 2015).

Cuadro 5. Principales procesadores de tomate 2014 – 2018 (miles de toneladas).

País / Estado	Año				
	2014	2015	2016	2017	2018
EUA/California	12,707	13, 018	11, 470	9, 492	10, 795
China	6, 300	5, 600	5, 150	6, 200	3, 800
Italia	4, 914	5, 393	5, 180	5, 200	4, 900
España	2, 700	3, 028	2, 950	3, 350	2, 600
Brasil	1, 400	1, 300	1, 450	1, 450	1, 407
Irán	2, 200	1, 350	1, 150	980	1, 500
Portugal	1, 197	1, 660	1, 507	1, 554	1, 250
Turquía	1, 800	2, 700	2, 100	1, 900	1, 500
Chile	810	850	800	1, 080	1, 211
Túnez	720	920	650	643	730
Total	39, 896	41, 384	38, 072	37, 797	35, 869
Aportación global (%)	87.10	86.55	85.12	84.26	82.78

Fuente: (Valenzuela y col 2018).

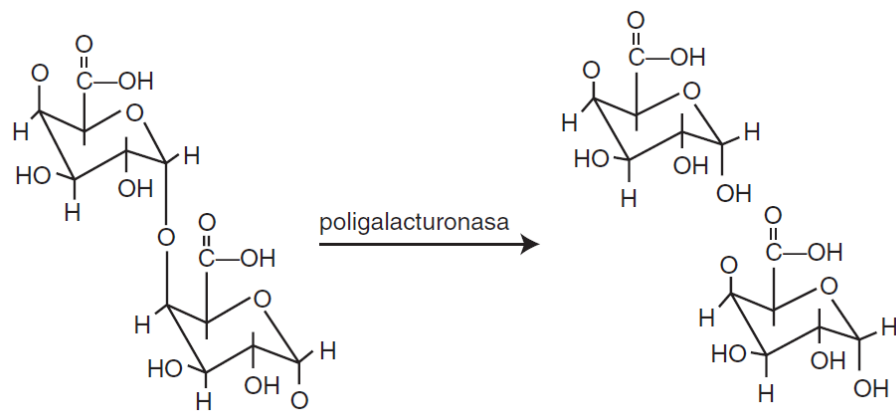


Figura 5. Acción de la enzima poligalacturonasa (Badui 2006).

pero cuando hidroliza a partir de los extremos, produce moléculas libres de ácido galacturónico y la viscosidad no se ve afectada rápidamente. Se dice que el mejor sustrato para PG es la pectina desesterificada, generada por la acción de la enzima pectin metil esterasa (PME). El resultado final de la actividad de PG es la pérdida de la integridad celular y el incremento de la concentración de polisacáridos solubles (Fachin y col 2002; Badui 2006; Rodríguez y col 2006).

Mediante diferentes etapas de purificación del extracto de tomate, se pueden obtener dos fracciones con actividad PG: una forma lábil al calor PG2 (totalmente inactivada a 65 °C durante 5 min) y una forma estable al calor PG1 (estable a 65 °C durante 5 min). Se ha reportado que en frutos maduros de tomate, la forma más abundante es PG2 (Fachin y col 2004; Rodríguez y col 2006; Castorena-García y col 2013). Por otro lado, se ha indicado que PG1 es un dímero formado a partir de una asociación de PG2 con una glicoproteína termoestable conocida como subunidad- β , la cual promueve la termoestabilidad de esta isoforma (Rabelo 2012; Pellicer y col 2019).

Por otra parte, la β -galactosidasa (E.C. 3.2.1.23) y la α -arabinofuranosidasa (E.C. 3.2.1.55) son enzimas que hidrolizan los residuos terminales de galactosilo y arabinosilo, respectivamente. La liberación de residuos terminales de galactosilo y arabinosilo puede producir cambios en la estructura de las cadenas laterales y la interacción de los polisacáridos vecinos, se considera que esto puede afectar la sensibilidad a la degradación enzimática y la accesibilidad a otras glucano hidrolasas (Houben y col 2013).

En cambio, la enzima polifenol oxidasa (EC 1.14.18.1) es responsable de la degradación de antocianinas y compuestos fenólicos, provocando un cambio de color y la disminución de la capacidad antioxidante en los alimentos (Chakraborty y col 2015). Esta reacción tiene lugar

cuando la enzima entra en contacto con el oxígeno y los compuestos fenólicos contenidos principalmente en la corteza (alrededor del 50%) y en los tejidos de los frutos (Mendoza y Herrera 2012).

Así mismo, la enzima peroxidasa debido a que es una oxidasa, está involucrada en los cambios de color (colores pardos) y el desarrollo de olores indeseables en los alimentos (Blach y col 2011). Además, esta enzima en presencia de peróxido de hidrógeno endógeno puede producir radicales libres que reaccionan con una amplia gama de componentes alimenticios, incluidos el ácido ascórbico, los carotenoides y los ácidos grasos (Hong-Wei y col 2017).

Por lo que, la inactivación de estas enzimas es deseable para una mayor vida útil de los productos alimenticios (Chakraborty y col 2015)

B ESCALDADO

1 Generalidades

El escaldado es un tratamiento térmico que involucra la exposición de los tejidos vegetales a alguna forma de calor por un determinado tiempo a una temperatura específica (Iribe 2014), la cual se establece de acuerdo a la estabilidad térmica de la enzima que se desea inactivar (Pellegrini 2017). El escaldado regularmente consiste en sumergir los materiales alimenticios en agua caliente, vapor o soluciones en ebullición que contienen ácidos o sales, con el propósito de generar un calentamiento homogéneo y una alta velocidad de transferencia de calor (Aguilar y col 1999; Chandrasekaran y col 2013). En estos tratamientos la transferencia de calor ocurre desde la superficie hacia el centro de la muestra, por lo que el tamaño y la forma del alimento son de gran importancia (Pellegrini 2017).

Existen diversos métodos de escaldado que pueden clasificarse según el requerimiento de agua en el proceso en: escaldado seco y escaldado húmedo (**Figura 6**).

Cuando se utiliza agua o vapor en el tratamiento de una muestra se denomina escaldado húmedo, a su vez éste puede clasificarse en: escaldado en agua caliente donde se utilizan temperaturas que varían de 70 a 100 °C; y escaldado por vapor, cuyo proceso tarda aproximadamente 1.5 veces más que el escaldado con agua caliente. Ambos métodos son satisfactorios, sin embargo, presentan muchas desventajas, algunas de ellas son que requieren mayor tiempo de procesamiento, una gran cantidad de energía y producen efluentes con gran demanda biológica de oxígeno (DBO), a su vez, en los alimentos ocurre una mayor lixiviación de minerales, nutrimentos, fitoquímicos, cambios de sabor y textura. Por otro lado, el escaldado húmedo genera gradientes de temperatura entre el centro y la superficie del alimento, lo que aumenta las posibilidades de un "sobre escaldado" o un "escaldado deficiente". Por otra parte, se encuentra el escaldado en seco, que incluye el uso de radiación infrarroja, microondas y altas presiones. Se ha indicado que el escaldado en seco tiene muchas ventajas sobre el escaldado convencional, debido a que se requiere menor tiempo de tratamiento y se retiene en mayor medida los nutrimentos de los alimentos (Ranjan y col 2016).

2 Importancia

El escaldado es un tratamiento térmico corto que se aplica típicamente a las hortalizas antes de su procesamiento con el objetivo de mejorar los atributos de seguridad y calidad.

Imparte beneficios tales como la destrucción de microorganismos, ayuda a conservar el color, la textura, al mismo tiempo que elimina el aire atrapado en tejidos. Además, este

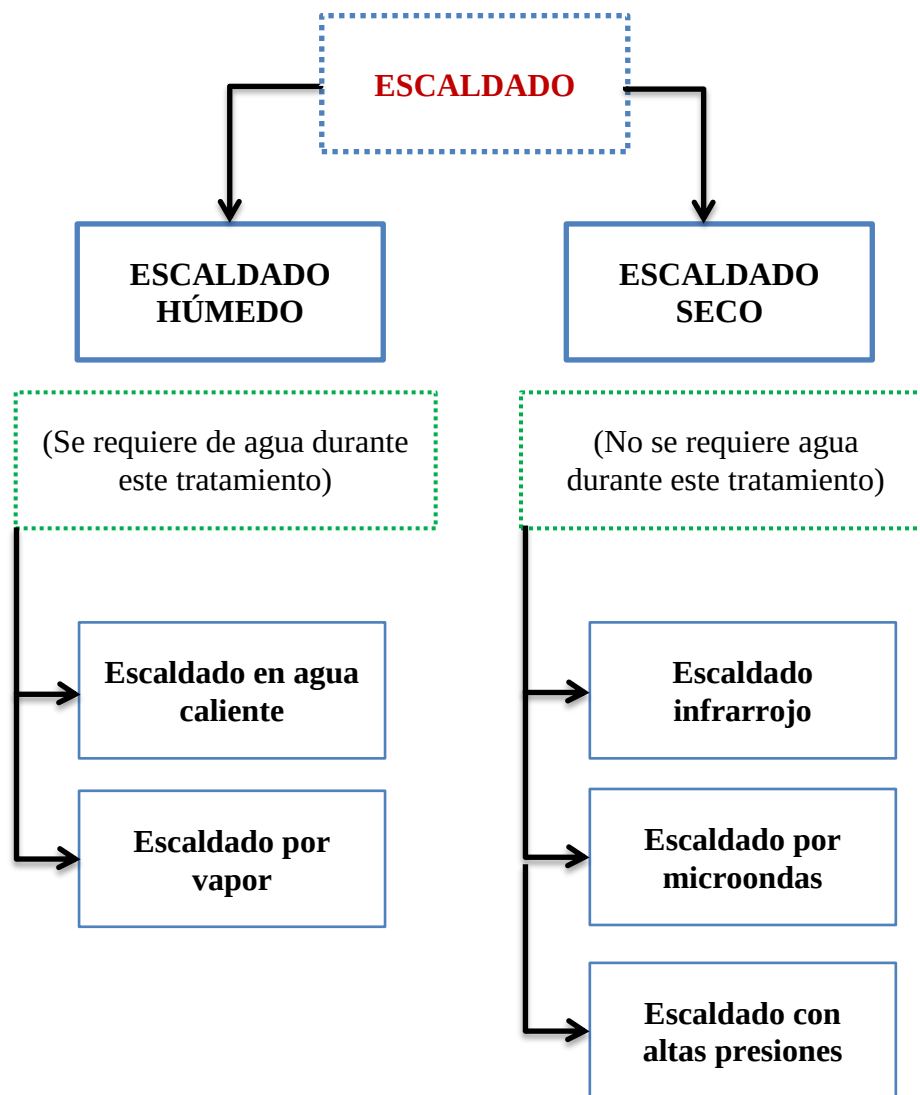


Figura 6. Tipos de escaldado basado en los requerimientos de agua durante el proceso (Ranjan 2016).

tratamiento es esencial en productos destinados a un almacenamiento y que serán sometidos a congelación o secado, para las inactivar enzimas que podrían provocar pérdidas de calidad y de las propiedades nutricionales de los productos (Aguilar y col 1999; Ranjan y col 2016).

a Inactivación enzimática

Varias enzimas se utilizan en la industria alimentaria para mejorar la calidad de los alimentos (por ejemplo, textura y sabor), para la recuperación de subproductos y para lograr velocidades más altas de extracción. Sin embargo, algunas enzimas también pueden tener efectos negativos en la calidad de los alimentos, como la producción de sabores y la alteración de las propiedades de textura. Por lo tanto, se requiere el control de la actividad enzimática en muchas etapas de procesamiento de alimentos para promover o inhibir la actividad enzimática durante el procesamiento (Castro y col 2004).

El escaldado se utiliza para inactivar enzimas y mantener las características sensoriales y nutritivas de los alimentos (Brewer y col 1994). La inactivación enzimática es causada por la reorganización y/o destrucción de enlaces no covalentes tales como enlaces de hidrógeno, interacciones hidrofóbicas y enlaces iónicos en la estructura terciaria de la proteína (Castro y col 2004).

3 Efectos del escaldado sobre los atributos de calidad

El proceso de escaldado puede afectar de manera indirecta las características sensoriales como la coloración, la textura y el sabor (Brewer y col 1994). Los carotenoides, por ejemplo, son el grupo principal de compuestos responsable de las tonalidades rojas, anaranjadas y amarillas en frutas y hortalizas. Cuando se procesan, a través de una exposición a temperaturas

elevadas, ocurre una isomerización, oxidación y fragmentación de estos compuestos, promoviendo la pérdida del color original (Khoo y col 2011).

Por otro lado, el ácido ascórbico generalmente se selecciona como el principal nutrimento para evaluar la pérdida de nutrimentos durante el proceso de escaldado. La preservación del ácido ascórbico después del escaldado es un buen indicador para la preservación de otros nutrimentos (Hong-Wei y col 2017). Algunos estudios indican que el ácido ascórbico se encuentra en una cantidad considerable de tomates y su descomposición durante el procesamiento se considera como un factor principal para oscurecer el color del jugo. Sin embargo, el oscurecimiento se puede minimizar al disminuir el pH y la temperatura durante el procesamiento. Otro efecto que tienen los tratamientos térmicos sobre los productos, es que provocan alteración en el aroma del tomate procesado respecto al fruto fresco, lo que se atribuye a la pérdida de compuestos volátiles por la temperatura alta empleada durante el procesamiento o a la formación de nuevos compuestos. El procesamiento del jugo de tomate a temperaturas altas (al aire libre) provoca la producción de terpenos ocasionada por la oxidación de carotenoides. Algunos compuestos sulfurosos y carbonílicos también pueden generarse durante el procesamiento como resultado de la reacción de Maillard. Por otro lado, los compuestos Cis-3-hexenal y hexenal dan el sabor típico de tomate perdido durante el procesamiento. La conversión de Cis-3-hexenal en trans-2-hexenal es uno de los principales factores a la que se le atribuye la pérdida del sabor del tomate. El olor característico a tomate cocido en el procesamiento puede ser aportado por compuestos formados a través de la descomposición de azúcares y carotenoides, como el sulfuro de dimetilo el cual es el principal contribuyente al aroma de los productos de tomate calentados (Umar y col 2015).

En cuanto a la textura, el procesamiento ejerce un efecto sobre la estructura de la pared celular, ocasionando ablandamiento de los tejidos, permitiendo que exista una filtración de micronutrientes por solubilización, remoción de aire y alteraciones en el color del producto terminado (Aguilar y col 1999).

C MICROONDAS

1 Generalidades

Las ondas electromagnéticas son ondas de energía eléctrica y magnética que se mueven a través del espacio. Éstas incluyen rayos gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja, microondas y ondas de radio menos energéticas (FEHD 2005) (**Figura 7**).

Las microondas son ondas electromagnéticas con longitudes de onda que varían de 1 mm a 1 m en el rango de frecuencia de 300 a 300,000 megahercios (MHz) (millones de ciclos por segundo) (FEHD 2005; Chandrasekaran y col 2013). Éstas tienen muchas aplicaciones en la actualidad como en la comunicación, radar, radioastronomía, navegación y procesamiento de alimentos (Hong-Wei y col 2017). Los microondas permitidos son los que funcionan generalmente a frecuencias de 915 MHz y 2.45 GHz para evitar que estos dispositivos interfieran con las señales de comunicación, es por ello que los microondas domésticos encontrados en el mercado funcionan a 2.45 GHz (Chandrasekaran y col 2013; Hong-Wei y col 2017). Las microondas pueden pasar a través de diversos materiales como vidrio, papel, plástico, cerámica y ser absorbidas por alimentos y agua, sin embargo, en los metales son reflejadas (FEHD 2005).

En el calentamiento por microondas los materiales absorben la energía de microondas y la

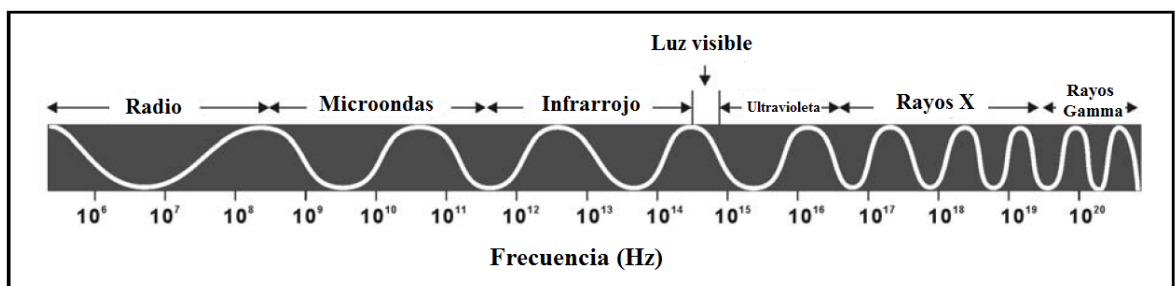


Figura 7. Espectro electromagnético (Pellegrini 2017).

convierten en calor por efecto del calentamiento dieléctrico. Esto se produce principalmente por mecanismos dipolares e iónicos. La presencia de humedad o agua en los materiales causa un calentamiento dieléctrico debido a la naturaleza dipolar del agua. Cuando un campo eléctrico oscilante incide en las moléculas dipolares permanentemente polarizadas (como el agua) intentan realinearse en la dirección del campo eléctrico. Debido a la alta frecuencia del campo eléctrico, esta realineación se produce un millón de veces por segundo y causa fricción interna de las moléculas, dando como resultado el calentamiento volumétrico del material (FEHD 2005; Chandrasekaran y col 2013). El calentamiento por microondas también puede ocasionarse por la migración oscilatoria de iones en los alimentos que genera calor en presencia de un campo eléctrico oscilante de alta frecuencia (FEHD 2005). El calentamiento de los alimentos utilizando microondas no solo tiene lugar en la superficie de los materiales, sino también dentro de ellos, a diferencia del procesamiento térmico convencional, en donde la energía se transfiere por conducción desde la superficie hacia el interior del producto (Hong-Wei y col 2017; Pellegrini 2017).

Un factor que influye en el calentamiento con microondas es la profundidad de penetración de las microondas, la cual en una muestra está en función de sus propiedades dieléctricas, debido a que determinan la distribución de temperatura dentro del material. Las propiedades dieléctricas de un producto dependen principalmente de la constante dieléctrica (ϵ'), que es una medida de la capacidad del material alimenticio para almacenar energía electromagnética, y el factor de pérdida dieléctrica (ϵ''), que determina la capacidad del material para disipar la energía electromagnética después de ser calentada. Por lo tanto, la profundidad de penetración (d_p) de las microondas en el material se puede determinar utilizando la siguiente ecuación (Hong-Wei y col 2017):

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

Donde d_p es la profundidad de penetración, λ es la longitud de onda de las microondas, ε' es la constante dieléctrica y ε'' es el factor de pérdida dieléctrica.

2 Componentes de un horno de microondas

El horno de microondas generalmente está constituido de los siguientes componentes (FEDH 2005) (**Figura 8**):

- Fuente de alimentación y control: éste se encarga de controlar la potencia que se debe alimentar al magnetrón, así como el tiempo de proceso;
- Magnetrón: este componente es un tubo de vacío en el que la energía eléctrica se logra convertir en un campo electromagnético oscilante. La frecuencia de 2450 MHz se ha empleado en el horno de microondas para uso doméstico;
- Guía de ondas: es un tubo de metal rectangular que se encarga de dirigir las microondas generadas desde el magnetrón hacia la cavidad de cocción en el horno. Ayuda a prevenir que cualquier alimento pueda interferir con la función del magnetrón, ya que lo protege de cualquier salpicadura;
- Agitador: se usa comúnmente para distribuir de manera adecuada las microondas desde la guía de ondas y permitir un calentamiento más homogéneo de los alimentos;
- Plataforma giratoria: gira los productos alimenticios a través de los puntos calientes y fríos fijos dentro de la cavidad de cocción del horno y permite que los productos alimenticios estén uniformemente expuestos a las microondas;

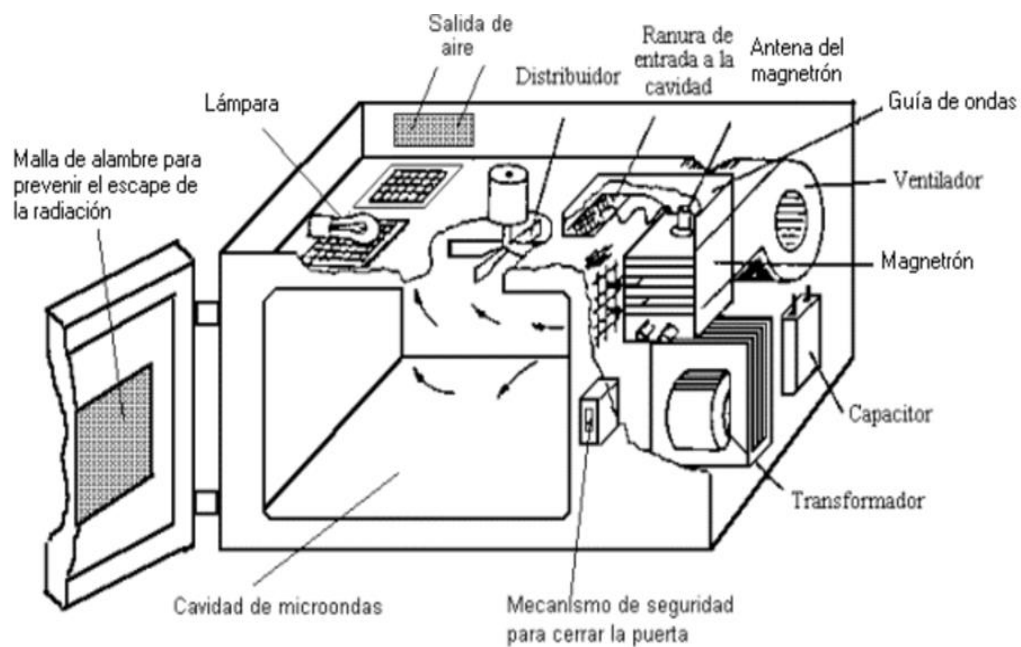


Figura 8. Componentes de un horno de microondas (Pellegrini 2017).

- Cavity de cocci3n: es el espacio dentro del cual los alimentos son colocados y se calientan cuando son expuestos a las microondas; y
- Puerta y estrangulador: permite el acceso de los alimentos a la cavity de cocci3n del horno. La puerta y el estrangulador est3n dise1ados de cierta manera para evitar que las microondas se filtren a trav3s del espacio entre la puerta y la cavity de cocci3n.

3 Aplicaciones

Las microondas se han utilizado con 3xito en muchos procesos alimentarios, como en secado, pasteurizaci3n, esterilizaci3n, descongelaci3n, atemperado y cocci3n de materiales alimenticios. Los productos cocinados en microondas tienen la ventaja de conservar las caracter3sticas sensoriales (como sabor, color) y las cualidades nutrimentales en comparaci3n con los alimentos cocinados con otros m3todos convencionales (FEHD 2005; Chandrasekaran y col 2013).

El uso de microondas ha ganado popularidad en el procesamiento de alimentos debido a su capacidad para alcanzar altas velocidades de calentamiento, reducci3n significativa del tiempo de cocci3n, manejo seguro, facilidad de operaci3n y bajo mantenimiento (Chandrasekaran y col 2013).

El uso de microondas ha sido aplicado en la descongelaci3n de los alimentos. En productos conservados por el m3todo de congelaci3n, la calidad final del alimento se puede ver afectada en gran medida si no se utiliza un m3todo adecuado para descongelarlo (Fennema 2000).

Por otro lado, se han utilizado las microondas en el escaldado de diversos alimentos. Una de las caracter3sticas m3s importantes del escaldado con microondas, es que involucra la

interacción directa entre el campo electromagnético y los materiales alimenticios para la generación de calor, por lo que en comparación con el escaldado convencional, la pérdida de nutrimentos por lixiviación se reduce significativamente. Además, el calentamiento por microondas es rápido, muy eficiente energéticamente, requiere un tiempo de arranque corto, fácil de instalar y limpiar, etc (Hong-Wei y col 2017).

Kidmose y Martens (1999) realizaron un escaldado en rodajas de zanahoria y compararon el efecto del escaldado con microondas, vapor y convencional (en agua caliente) sobre la pérdida de materia seca y los atributos de calidad de las rodajas de zanahoria (textura, azúcares y contenido de caroteno). El escaldado por microondas se realizó utilizando un horno de microondas continuo con 4 magnetrones (potencia de 1,25 kW para cada magnetrón) a 2450 MHz y una velocidad del transportador de 0,5 m / min. El escaldado con vapor fue realizado por un vaporizador a 90 ° C por 3 min y el escaldado en agua se realizó en un recipiente con chaqueta a 90 ° C durante 4 min. Los resultados mostraron que en cuanto la textura de las zanahorias no se encontró diferencia significativa después de los tres métodos de escaldado. Sin embargo, en lo que respecta a materia seca, sacarosa y caroteno de las muestras escaldadas por microondas fueron significativamente más altas que las de las muestras tratadas con vapor y agua caliente. Por lo que, a pesar de que el tratamiento por microondas no permitió obtener la mejor textura del producto en comparación con el método con vapor y con agua caliente, logró mantener la mejor calidad nutrimental.

Por su parte, Deveci y col (1999) indicaron que la vida útil de champiñones mínimamente procesados se limita a unos pocos días debido al pardeamiento enzimático durante el almacenamiento ocasionado por enzimas como polifenol oxidasa (PPO). La inactivación de enzimas es esencial para mantener los atributos de calidad de los champiñones. Para ello, se

realizaron tres diferentes métodos de escaldado: microondas, convencional (en agua caliente) y combinación de microondas con escaldado convencional. El tratamiento con microondas se realizó por exposición de los champiñones a microondas de 2.45 GHz por diferentes tiempos el escaldado convencional se realizó en un baño a 92 °C sumergiendo los champiñones enteros por diferentes tiempos y la combinación de microondas con escaldado convencional se llevó a cabo al calentar con microondas a diferentes tiempos y posteriormente sumergir la muestra en un baño de agua a 92 ° C por 20 s. Los resultados mostraron claramente que el método de escaldado combinado inactivó completamente la PPO en 2 min. Sin embargo, el escaldado convencional necesitó más de 6 min. Por otro lado, el pardeamiento del producto y la pérdida de contenido de antioxidantes fueron significativamente menores en las muestras escaldadas por el método combinado que el escaldado con microondas o con agua caliente.

Kidmose y Kaack (1999) compararon los efectos del escaldado con microondas, en agua caliente y con vapor sobre la textura, contenido de vitamina C y pérdida de peso en espárragos. Los resultados indicaron que la textura del espárrago escaldado con microondas fue significativamente mayor, que la obtenida por el método de escaldado con vapor y con agua. Sin embargo, el contenido de vitamina C se vio mayormente afectado por el escaldado con microondas que por vaporización y escaldado convencional. En cuanto a la pérdida de peso después del tratamiento, observaron que el escaldado con vapor causó la mayor pérdida que el escaldado con microondas y el convencional.

Sun y col (2007) estudiaron el efecto de diferentes métodos de esterilización, entre éstos un sistema de calentamiento combinado con agua circulada por microondas, agua caliente a presión y vapor en una retorta, sobre la actividad antioxidante, el color y la textura en espárragos. Observaron que la actividad antioxidante de los espárragos después del

tratamiento con microondas fue significativamente mayor que la obtenida por los otros métodos. Los espárragos procesados por el método con microondas mostraron un color más verde que el de los espárragos tratados con el método en agua caliente y vapor. En cambio, la textura se redujo significativamente ocho veces después de la esterilización, pero no hubo diferencia significativa entre los métodos. Por lo tanto, los espárragos esterilizados con microondas mostraron una mayor actividad antioxidante y un color más verde que los espárragos procesados por métodos convencionales.

Por su parte, Lin y Brewer (2005) evaluaron los efectos del escaldado con microondas antes de la congelación como un tratamiento previo alternativo para chícharos congelados. Los guisantes se escaldaron (vaporización, inmersión en agua hirviendo, microondas o microondas en una bolsa), se congelaron y evaluaron después de 0, 6 y 12 semanas para determinar el contenido ácido ascórbico, actividad peroxidasa, color, aroma, sabor y textura. En términos de contenido de ácido ascórbico en los chícharos, ambos tratamientos con microondas fueron equivalentes al tratamiento de inmersión en agua hirviendo. Sin embargo, los guisantes al vapor presentaron una mayor retención. Utilizando la peroxidasa como indicador, ambos tratamientos con microondas fueron capaces de inactivar eficientemente la enzima (97 %) a un nivel comparable al que ofrecen los métodos convencionales. Los chícharos escaldados en microondas eran iguales o más verdes que los escaldados por los otros métodos, y tendían a ser más oscuros que los escaldados convencionalmente. En cuanto a sabor y aroma, los chícharos tratados con microondas fueron generalmente comparables a los escaldados tradicionalmente. La textura obtenida por ambos métodos de escaldado por microondas fue similar a la de los tratados en agua hirviendo. Por lo que, el escaldado con microondas parece ser una opción viable como una alternativa a los métodos convencionales de escaldado.

Severini y col (2016) compararon tres métodos de escaldado (microondas, agua hirviendo y vapor) para determinar sus efectos sobre algunas propiedades funcionales y color de brócoli. La efectividad de cada proceso de escaldado se realizó midiendo la inactivación de peroxidasa. Se observó que el uso de microondas y el tratamiento con vapor (50 y 60 s respectivamente) son más eficaces que el tratamiento convencional (120 s), debido a que el tiempo necesario para la inactivación de la enzima fue mayor. Por otro lado, para el color no se apreció diferencia significativa entre tratamientos. Para la vitamina C, el incremento del tiempo de escaldado por el método convencional y vapor provocó una disminución en las muestras, esta tendencia no se observó en muestras tratadas con microondas. El contenido de fenoles no varió significativamente con el tiempo de tratamiento y el método utilizado. Se concluyó que el calentamiento por microondas no afectó negativamente las características nutricionales del brócoli. Por lo que esta tecnología, si se usa adecuadamente como método de escaldado, puede beneficiar a la industria alimentaria disminuyendo el uso de agua, costos de limpieza y energía, permitiendo obtener un producto más deseable en términos de retención de nutrimentos.

IV JUSTIFICACIÓN

El tomate es uno de los productos básicos de mayor valor y producción a nivel mundial, ya que éste es un alimento muy versátil, con formas de consumo muy variadas. Sin embargo éste es susceptible al ataque de microorganismos y enzimas que provocan su deterioración.

Existen diversas técnicas para prolongar la vida de anaquel del tomate en fresco y sus derivados, como ejemplo son la refrigeración, el secado y los tratamientos térmicos. En la industria se emplean comúnmente tratamientos térmicos como el escaldado en agua que consiste en sumergir el producto en agua caliente; sin embargo, a nivel industrial se emplean altas cantidades de agua y energía produciendo un gran volumen de efluentes y un mayor costo e impacto ambiental. A pesar de esto, se emplea debido a que es fácil de usar, rápido y da un tratamiento uniforme, sin embargo las características sensoriales y la calidad nutricional del producto se ven afectadas, por lo que se ha incrementado el interés de obtener productos procesados con características similares a las de los productos frescos y debido a ello se ha buscado mejorar las técnicas de procesamiento y utilizar la combinación de tecnologías que mantengan mayormente los atributos de los alimentos.

Una tecnología que conserva nutrimentos de los productos es el uso de microondas debido a que reduce la lixiviación de compuestos. Ésta consiste en inducir un campo magnético oscilante sobre el producto para elevar su temperatura debido a las interacciones de moléculas polares, las cuales generan calor por fricción cuando cambian de dirección de rotación por la presencia del campo electromagnético oscilante.

Con base en lo anterior, el presente trabajo se enfocó en optimizar el proceso de escaldado secuencial de tomate utilizando microondas tanto para el método sin inmersión del fruto en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), así como para sin inmersión del fruto en

agua seguido de escaldado con inmersión en agua (EMSI + EMCI) y se contrastaron con el método de escaldado tradicional (ET) y el método de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) para determinar cuál de ellos permite obtener un jugo de tomate escaldado con los mejores atributos fisicoquímicos y nutrimentales.

V OBJETIVOS

A OBJETIVO GENERAL

Contrastar la inactivación secuencial de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Saladette, empleando escaldado con microondas y escaldado tradicional.

B OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1.- Determinar las mejores condiciones del escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET) con base en la diferencia total de color, índice de consistencia, retención de ácido ascórbico y actividad remanente de poligalacturonasa.

2.- Determinar las condiciones óptimas de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), con base en la diferencia total de color, índice de consistencia, retención de ácido ascórbico y actividad remanente de poligalacturonasa.

3.- Realizar el escaldado tradicional (ET) y el escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) de jugo de tomate, a temperaturas y tiempos óptimos del escaldado secuencial y medir la diferencia total de color, índice de consistencia, retención de ácido ascórbico y actividad remanente de poligalacturonasa.

4.- Comparar los diferentes métodos de escaldado (EMSI + ET, EMSI + EMCI, ET y EMCI) con base en parámetros fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos.

VI MATERIALES Y MÉTODOS

A MATERIALES

1 Materia prima

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Saladette (**Figura 9**), el cual fue adquirido del mercado local de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. La selección se realizó con base en las siguientes características: estado de madurez número 5 (rojo ligero) (USDA 2005), libre de defectos físicos, con forma y tamaño uniforme.

Las muestras de tomate se lavaron con una solución al 0.1 % de hipoclorito de sodio, se les retiró el exceso de humedad y se mantuvieron en refrigeración a 10 °C. Se evitó utilizar tomates con más de dos días de almacenamiento debido a los cambios que pudieran presentar por la maduración.

2 Equipo de microondas

Para la investigación se utilizó un horno de microondas comercial (Frigidaire, Fmy141d1pgmm, México) modificado para mantener constante la temperatura de la superficie del fruto por medio de un controlador de tipo proporcional (P), integral (I) y derivativo (D) (Honeywell, DC1010, USA) (Pert y col 2001). Para ello, se realizaron pruebas preliminares de estos parámetros con la finalidad de que el proceso fuera estable y obtener una respuesta rápida para encender o apagar el magnetrón, mantenido así la temperatura deseada. La mejor combinación encontrada fue $P = 10$, $I = 10$ y $D = 0$ (Díaz 2000; Pellegrini 2017).

Además, se construyó como sensor de temperatura un termopar tipo T, recubierto con adhesivo epóxico (Devcon R2-42) de alta conductividad térmica con el propósito de evitar que las microondas



Figura 9. Tomate (*Solanum lycopersicum* L.) variedad Saladette utilizado como materia prima en este trabajo.

afectarán la medición de temperatura. Este termopar se conectó al controlador PID para accionar o interrumpir el funcionamiento del magnetrón del horno.

B MÉTODOS

1 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional

Para el escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET) se utilizó la metodología empleada por Soltero (2019) con algunas modificaciones. Una muestra de tomate (500 g) se colocó en un vaso de precipitado de 1 L, se instaló un termopar tipo T sobre la superficie de los frutos y se conectó al controlador de temperatura. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de escaldado con microondas sin inmersión en agua (EMSI), el cual consistió en calentar los tomates hasta la temperatura de 90 °C y a partir de ese momento se mantuvo constante por 1 min. Los tomates, después del proceso de EMSI, se trituraron en una licuadora por 20 s (Oster, Bpst-02, EUA) con el fin de obtener el jugo, rápidamente la pulpa se tamizó con una malla de 2 mm para obtener 400 mL de jugo de tomate, al cual se le realizó el escaldado tradicional (ET) en un baño María (Fisher Cientific, 9500, EUA) de inmediato, a las temperaturas y tiempos indicados por el diseño de experimentos. Se agitó manualmente durante el tratamiento. Enseguida, se enfrió la muestra con agua fría hasta alcanzar la temperatura de 25 °C. Posteriormente, se realizaron los análisis correspondientes sobre el jugo inactivado.

2 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua

El escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI) se realizó siguiendo la metodología descrita por

Pellegrini (2017) con algunas modificaciones. A una muestra de tomate (500 g) en un vaso de precipitado de 1 L, se le instaló un termopar tipo T para el control de temperatura.

Enseguida, se realizó el tratamiento EMSI que consistió en calentar los tomates hasta la temperatura de 90 °C y mantenerla constante por 1 minuto. Posteriormente, se sumergieron los tomates en un vaso de precipitado de 2 L con agua caliente. Inmediatamente el vaso se colocó en el horno de microondas, el sensor se instaló en el agua y se encendió de nuevo el microondas, cuando la temperatura deseada se alcanzó, se mantuvo durante los diferentes tiempos de cada tratamiento.

Terminado este proceso, los tomates inactivados enzimáticamente fueron enfriados con agua fría a temperatura ambiente (25 °C). Enseguida la muestra se trituró en una licuadora (Oster, Bpst-02, EUA). La pulpa se tamizó a través de una malla de 2 mm para obtener el jugo de tomate. Posteriormente se realizaron los análisis correspondientes.

3 Escaldado tradicional

Para llevar a cabo el escaldado tradicional (ET) se utilizó la metodología descrita por Iribe-Salazar y col (2015) con modificaciones. Una muestra de tomate de 500 g se trituró en una licuadora (Oster, Bpst-02, EUA) con el objetivo de obtener el jugo. La pulpa se tamizó a través de una malla de 2 mm para obtener 400 mL de jugo, mismo que fue colocado en un vaso de precipitado de 600 mL y calentado en baño María con agua a punto de ebullición. Se agitó manualmente hasta que alcanzó la temperatura deseada y se mantuvo durante los diferentes tiempos de tratamiento (condiciones óptimas de los escaldados secuenciales). Enseguida fue enfriado en agua fría con agitación constante hasta alcanzar la temperatura ambiente (25 °C). Posteriormente se realizaron los análisis correspondientes.

4 Escaldado con microondas con inmersión en agua

El escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) se realizó siguiendo la metodología descrita por Soltero (2019). En donde 500 g de tomate se sumergieron en un vaso de precipitado de 2 L con agua caliente. Inmediatamente el vaso se colocó en el horno de microondas, se instaló un sensor en el agua caliente, se encendió el microondas para realizar el escaldado y cuando se alcanzó la temperatura deseada se mantuvo durante los diferentes tiempos de cada tratamiento (condiciones óptimas de los escaldados secuenciales).

Enseguida, los tomates escaldados fueron enfriados con agua fría hasta alcanzar la temperatura ambiente (25 °C). Después la muestra fue triturada en una licuadora (Oster, Bpst-02, EUA) y tamizada a través de una malla de 2 mm para obtener el jugo de tomate (400 mL). Posteriormente se le realizaron los análisis correspondientes al jugo de tomate.

5 Evaluación de parámetros fisicoquímicos

a Diferencia total de color (ΔE)

El cálculo de la diferencia total de color se realizó con la metodología descrita por Iribes-Salazar (2015), utilizando un colorímetro triestímulo (Minolta, Chromameter CR-200, Japón). La calibración del equipo consistió en tres disparos sobre la carta de color blanco estándar con parámetros predefinidos de $Y = 93.50$, $x = 0.3139$ y $y = 0.3196$. El jugo recién obtenido de cada tratamiento se filtró a través de tela de organza y se depositaron 100 mL en un vaso de precipitado de 250 mL. La medición de los parámetros L^* , a^* y b^* se obtuvieron con cinco disparos sobre la superficie inferior del vaso con muestra, tanto en jugo fresco como en jugo escaldado.

Los cálculos se realizaron a partir de la siguiente ecuación:

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

Dónde:

ΔE = Diferencia total de color en el jugo escaldado.

L_f^* , a_f^* , y b_f^* = Parámetros de color de referencia del jugo de tomate sin escaldar.

L^* , a^* y b^* = Parámetros de color de las muestras de jugo de tomate escaldado.

b Índice de consistencia (K)

Para calcular el índice de consistencia (K) se empleó la metodología descrita por Andrade y col (2010). Se utilizó un viscosímetro de Brookfield digital modelo DV II (Brookfield Engineering, EUA). Primeramente, se determinó el número de eje del equipo que mejor funcionó con las muestras de jugo de tomate, para ello se consideró deseable que la lectura del equipo tuviera un rango de torque (α) de 10 - 100 (Mitschka 1982; Andrade y col 2010). Las muestras para las mediciones fueron de 350 mL a temperatura ambiente (25 °C). Éstas se situaron en el equipo para realizar las corridas, una de forma descendente y otra ascendente, variando las velocidades de rotación desde 100 a 0.5 rpm. Las lecturas α de la escala dadas por el equipo se tomaron cada 30 segundos.

Una vez obtenidos los datos, se procedió a calcular el esfuerzo de corte (τ) a partir de las lecturas de la escala α del equipo y del factor de conversión $k_{\alpha\tau}$ (específico para la geometría del eje). Posteriormente, se calculó la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) utilizando la velocidad de rotación (N) y un factor de conversión ($k_{N\dot{\gamma}}$) (dependiente del número de eje y el índice de comportamiento de flujo (n)). Para calcular el índice de consistencia (K), se utilizó el modelo de la Ley de la Potencia o también denominado modelo de Ostwald-de Waele (Ávila-Gaxiola y col 2015; Machado y col 2018):

$$\tau = K\dot{\gamma}^n$$

En donde:

τ = Esfuerzo de corte (Pa)

K = Índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de corte (s^{-1})

n = Índice de comportamiento de flujo (adimensional)

6 Evaluación del parámetro nutrimental

a Retención de ácido ascórbico

Mediante la técnica 967.21 de la A.O.A.C (2012) específica para preparaciones de vitaminas y jugos, se cuantificó el contenido de ácido ascórbico realizando un ensayo de titulación con el indicador 2,6 diclorofenolindofenol (DCPI). El principio de esta técnica consiste en que el ácido ascórbico reduce al indicador oxidado DCPI a una solución incolora, mientras que en el punto final un ligero exceso del indicador DCPI en solución ácida, presenta una coloración rosada.

Para realizar la cuantificación de ácido ascórbico, se utilizaron 30 mL de jugo fresco (*E*) de tomate filtrado a través de tela de organza, se le añadieron 30 mL de ácido metafosfórico con ácido acético [HPO_3 (30g/L) + CH_3COOH (80 mL/L)]. A la mezcla se denominó volumen total (*V*). La determinación de ácido ascórbico en la muestra se realizó titulando con DCPI tres alícuotas de 5 mL de la mezcla jugo + [HPO_3 + CH_3COOH] (*Y*), hasta la aparición de una coloración rosa pálido. Se consideró el volumen promedio (*X*) de DCPI para titular la mezcla jugo + [HPO_3 + CH_3COOH].

Por otro lado, se preparó un estándar de ácido ascórbico (1 mg/mL) diluido con la solución de $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$. A tres alícuotas de 2 mL de la solución estándar de ácido ascórbico se les agregaron 5 mL de $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$ y posteriormente se titularon con DCPI en una bureta de 50 mL, hasta que una coloración rosa ligera persistió más de 5 segundos. El promedio de las tres titulaciones se usaron en una corrección en las mediciones de la muestra, con éstas se calculó la concentración de DCPI y se expresó como mg de ácido ascórbico equivalente a 1 mL de indicador (F). La solución de DCPI se estandarizó diariamente.

Adicionalmente, se realizó por triplicado una mezcla de agua desionizada (mismo volumen que el DCPI gastado en la titulación del estándar de ácido ascórbico) con 7 mL de la solución de $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$ y se tituló nuevamente con DCPI. Se determinó el volumen promedio para la titulación del blanco (B).

El contenido de ácido ascórbico se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{Ác. Ascórbico} = (X - B) * \left(\frac{F}{E}\right) * \left(\frac{V}{Y}\right)$$

Dónde:

X = mL de DCPI gastados para titular la muestra (jugo + $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$).

B = Promedio de mL gastados para titular el blanco de $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$.

F = mg de ácido ascórbico equivalente a 1.0 mL de DCPI.

E = Volumen en mL de la muestra de jugo.

V = Volumen total en mL de la solución de prueba (jugo + $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$).

Y = Volumen en mL de la alícuota tomada para la titulación.

Los resultados se reportaron como porcentaje de retención de ácido ascórbico (*RAA*), mismo que se calculó al comparar el contenido de una muestra de jugo fresco contra las muestras de jugo procesado.

7 Análisis enzimático

a Actividad remanente de poligalacturonasa

La actividad enzimática de poligalacturonasa (PG) se determinó siguiendo la metodología descrita por Anthon y col (2002), la cual consiste en dos fases: la extracción de la isoenzima de interés (PG1 o PG2) y el ensayo enzimático en donde se mide la producción de azúcares reductores a partir del ácido poligalacturónico (μmol) por unidad de tiempo (min). Los resultados se expresaron en porcentaje de actividad remanente (*AR*).

1) Extracción de la enzima

Se colocaron 5 mL de jugo de tomate en un tubo de nalgono de 50 mL y se le añadieron 10 mL de agua desionizada. Enseguida, se ajustó el pH a 3.0 con una solución de HCl 0.1 N y se procedió a centrifugar la muestra a $10,000\times g$ por 15 min a 4 °C. Se retiró el sobrenadante con cuidado y el precipitado fue resuspendido en 15 mL de agua desionizada con ayuda de un vórtex, se centrifugó de nuevo a las condiciones descritas anteriormente. El precipitado fue homogenizado con 7.5 mL del buffer de fosfatos que contenía NaCl 1.2 M para la extracción de PG1 o NaCl 0.5 M para PG2. Posteriormente, la muestra se colocó en un baño de agua fría durante 30 min, para después ser centrifugada con las condiciones antes mencionadas. En esta etapa el sobrenadante fue recolectado para el ensayo enzimático.

2) Ensayo enzimático

Los extractos salinos fueron analizados determinando la actividad de PG midiendo los azúcares reductores producidos a partir del ácido poligalacturónico. En tubos de ensayo, se realizó la mezcla de 1.3 mL del extracto enzimático, 0.2 mL de NaCl 1 M y 0.5 mL de ácido poligalacturónico (1 %) en 50 mM buffer de citratos (pH 4.5). Enseguida, se incubó una alícuota de 0.2 mL de la mezcla en un baño María (Modelo 9500, Fischer Scientific, EUA) a 37 °C por 30 min. La reacción se detuvo por un cambio de pH al adicionar 5 mL de buffer de carbonatos (54.3 g/L Na₂CO₃ y 24.2 g/L NaHCO₃) pH 10.

Posteriormente, se realizó la coloración de los azúcares reductores, para ello se preparó un reactivo de coloración a partir de dos soluciones. Solución A: preparada al disolver 0.98 g de ácido bicineónico en 0.5 L de buffer de carbonatos (54.3 g/L Na₂CO₃ y 24.2 g/L NaHCO₃) pH 10. Solución B: que contenía 1.24 g/L de CuSO₄ y 1.26 g/L L-Serina. Ambas soluciones se mezclaron en proporciones iguales para su uso inmediato.

En tubo de ensayo de vidrio, se colocaron 0.6 mL de la reacción detenida, se añadieron 1.9 mL de agua desionizada y 1.6 mL del reactivo de coloración. Cada tubo de ensayo fue cubierto con papel aluminio en la parte superior, para evitar el cambio de volumen debido a evaporación de la mezcla o bien a la condensación de humedad en el ambiente.

A continuación, las muestras se colocaron en un baño María a 80 °C durante 30 minutos. Terminado este procedimiento, se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura ambiente. Simultáneamente, se preparó un blanco del extracto enzimático hervido a 90 °C por 15 min, que se sometió a las mismas condiciones que la muestra.

Se utilizaron 2 mL de la mezcla teñida para medir su absorbancia a 560 nm en un espectrofotómetro (Thermo Electron Corporation, Genesys 10uv, Madison, EUA). El ajuste a cero fue realizado con agua desionizada. La actividad remanente de la enzima se calculó con la ecuación mostrada a continuación (Aguiló-Aguayo y col 2009; Castorena-García y col 2013):

$$AR (\%) = \frac{A_{muestra}}{A_{blanco}} * 100$$

Dónde:

$A_{muestra}$ = actividad enzimática del extracto de la muestra tratada (μmol/min).

A_{blanco} = actividad enzimática del extracto utilizado como blanco (μmol/min).

8 Métodos estadísticos

a Diseño experimental

Para este proyecto se utilizó un diseño central compuesto rotatable con dos factores: temperatura (60 a 90 °C) y tiempo (2 a 6 min) con cinco niveles de variación para cada factor realizando un total de 13 tratamientos (**Cuadro 6**) (Myers y col 2016).

b Optimización

Para obtener las condiciones óptimas de proceso se empleó la metodología de superficie de respuesta (MSR), la cual es un conjunto de técnicas estadísticas y matemáticas que permite analizar la influencia de diversas variables sobre una respuesta y obtener modelos que describan los efectos de manera individual o combinada de las variables de proceso sobre cualquier respuesta. Esto ha permitido al experimentador realizar una exploración eficiente de

Cuadro 6. Combinaciones de temperatura y tiempo utilizadas en la optimización del proceso de escaldado.

x_1 codificada	x_2 codificada	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
-1	-1	64.4	2.6
1	-1	85.6	2.6
-1	1	64.4	5.4
1	1	85.6	5.4
1.41421	0	60	4
-1.41421	0	90	4
0	1.41421	75	2
0	-1.41421	75	6
0	0	75	4
0	0	75	4
0	0	75	4
0	0	75	4
0	0	75	4
0	0	75	4
Diseño Central Compuesto Rotable			

un proceso o sistema (Erbay e Icier 2009; Yaguas 2017). Por lo que con esta metodología se pueden ajustar las variables experimentales para generar modelos matemáticos de predicción (Caro 2019).

c Análisis de datos

Las condiciones óptimas de procesamiento se obtuvieron mediante el método numérico y la metodología descrita por Derringer y Suich (1980). Las variables de respuesta analizadas fueron: diferencia total de color (ΔE), índice de consistencia (K), retención de ácido ascórbico (R_{AA}), actividad remanente de PG1 (AR_{PG1}) y actividad remanente de PG2 (AR_{PG2}).

Se realizó un análisis de regresión a los datos experimentales obtenidos en cada una de las variables de respuesta antes mencionadas, donde los términos no significativos ($p > 0.1$) fueron descartados para determinar los modelos de predicción con un mejor ajuste. A través del software Desing Expert 7.0, se analizaron los datos y obtuvieron los gráficos de superficie de respuesta (Caro 2019).

Para que los modelos de predicción se consideraran reproducibles, fue necesario que los modelos cumplieran con cuatro criterios. Estos fueron una significancia del modelo $p \leq 0.05$, un coeficiente de determinación ajustado $R^2_{aj} \geq 0.8$, coeficiente de variación $C.V. \leq 10\%$ y que pase la prueba de falta de ajuste $p > 0.05$. Cuando estas condiciones se cumplen, el modelo se considera adecuado y reproducible (Milán y col 2002; Milán y col 2006).

Dentro de los criterios empleados en la optimización del proceso, se consideró deseable: baja de diferencia total de color (ΔE), alto índice de consistencia (K), mayor retención de ácido ascórbico (R_{AA}), menor actividad remanente de PG1 (AR_{PG1}) y baja actividad remanente de PG2 (AR_{PG2}).

d Validación del modelo de predicción

Se realizaron 5 réplicas de cada método de escaldado optimizado ($n = 5$). Se obtuvieron muestras de jugos a las cuales se les realizaron análisis fisicoquímicos, nutrimentales y enzimáticos. Las variables de respuesta fueron las siguientes: ΔE , K , RAA , $AR\ PG1$ y $AR\ PG2$. Se verificó que la media de cada variable estuviera dentro del intervalo de confianza para el óptimo predicho por el modelo.

e Contraste de los métodos de escaldado

Para la comparación de los diferentes métodos de escaldado, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) completamente al azar, utilizando como factor el método de escaldado con 6 niveles (EMSI+ET, EMSI+EMCI, ET y EMCI) (dos controles por cada método secuencial). Se consideraron 3 réplicas de cada método ($n = 3$) y se realizó la comparación de datos de las variables de respuesta utilizando la prueba de Fisher (LSD) y un $\alpha = 0.05$, con ayuda del software estadístico STATGRAPHICS 5.0 (Soltero 2019).

VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A MODELOS DE REGRESIÓN EXPERIMENTALES DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO

1 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional

a Parámetros fisicoquímicos

1) Diferencia total de color (ΔE)

En la **Figura 10** se muestra la ΔE para jugo de tomate, en función de la temperatura y el tiempo de escaldado secuencial EMSI + ET (escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional). Se aprecia un incremento lineal de ΔE a medida que la temperatura y el tiempo de escaldado aumentan. La diferencia total de color se encontró en el intervalo de 6.3 a 10.0. La temperatura presentó un mayor efecto que el tiempo sobre la ΔE , lo que puede ser apreciado al comparar las pendientes de la ΔE contra temperatura y de la ΔE contra tiempo.

El modelo de predicción con variables codificadas tanto para la temperatura como para el tiempo fue el siguiente:

$$\Delta E = 8.11 + 1.09 x_1 + 0.49 x_2$$

Donde x_1 representa la temperatura y x_2 el tiempo de escaldado. Este modelo al igual que los demás descritos en los resultados, se reportan con variables codificadas para facilitar las comparaciones entre factores. El modelo de predicción fue lineal con todos sus términos significativos. La significancia del modelo fue $p < 0.0001$, el coeficiente de determinación

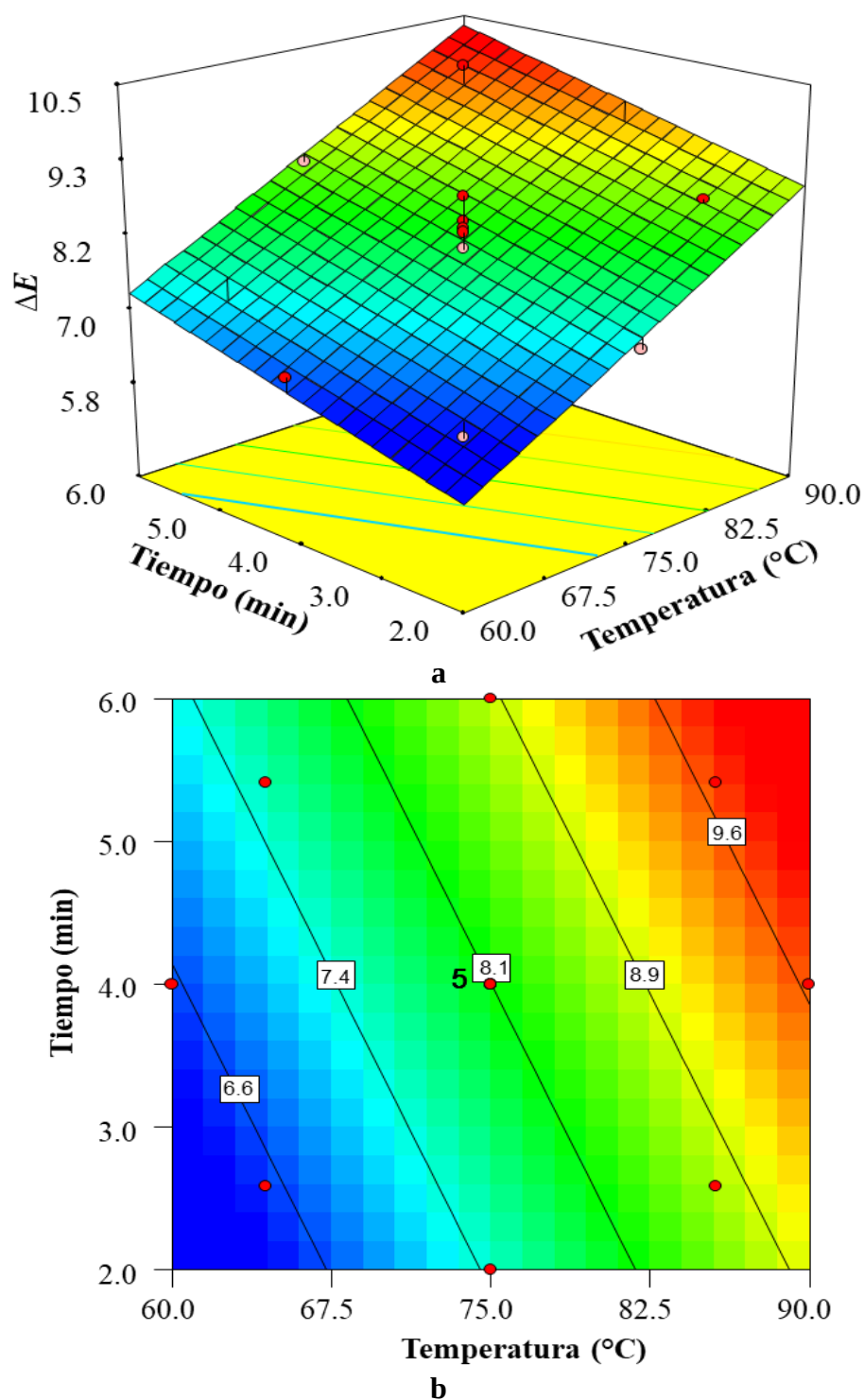


Figura 10. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE) de jugo de tomate, sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por un escaldado tradicional.

ajustado fue $R^2_{aj} = 0.86$, no presentó falta de ajuste ($p = 0.2343$) y el coeficiente de variación fue inferior al 10 % que es el límite máximo aceptable ($C.V. = 4.89 \%$), por lo que el modelo con coeficientes codificados se considera adecuado y reproducible. El valor absoluto de los coeficientes codificados indica que el mayor efecto sobre ΔE se debió a la temperatura (1.09) ya que fue superior al correspondiente para el tiempo (0.49) dentro de los intervalos de estudio. Esto concuerda con el resultado mencionado con anterioridad para el gráfico de superficie de respuesta.

El tomate y sus productos son fuentes importantes de licopeno, el cual es el responsable de la coloración roja, debido a que en su estructura presenta muchos dobles enlaces de carbono conjugados y es por ello que tiene una mayor absorbancia en comparación con otros carotenos (Khoo y col 2011). El licopeno, en tomates frescos se encuentra mayormente en la conformación *trans* (El-Raey y col 2005; Khoo y col 2011). Sin embargo, durante el procesamiento de los alimentos, los isómeros *cis* pueden aumentar como resultado de la isomerización de la conformación *trans* (Wen-Hsin y col 2008; Khoo y col 2011) y con ello modificar los parámetros de color L^* , a^* y b^* e incrementar la diferencia total de color. Khoo y col (2011) indicaron que un calentamiento a 60 y 80 °C favorece la isomerización del licopeno; temperaturas cercanas a las utilizadas en el presente estudio.

Además, la presencia de azúcares reductores y aminoácidos también afecta el color de los productos de tomate procesados, debido a que pueden dar lugar a la formación de 5-hidroximetilfurfural y otros compuestos de color marrón productos de la reacción de Maillard (Jayathunge y col 2017).

Por otro lado, Umar y col (2015) mencionan que el ácido ascórbico en tomates se

encuentra en una cantidad considerable y la degradación de este compuesto durante el procesamiento puede considerarse como uno de los principales factores del cambio de color.

Pellegrini (2017) reportó un comportamiento de ΔE similar al del presente estudio al utilizar un escaldado con microondas en tomate variedad *Uva* (60 a 90 °C, 1 a 6 min), encontrando las más altas ΔE (46.8) a temperaturas y tiempos prolongados, mientras que las más bajas (7.9) se encontraron a temperaturas bajas y tiempos cortos.

De manera similar, Soltero (2019) observó un incremento de ΔE en floretes de brócoli, al aplicar un escaldado con microondas de 60 a 95 °C por 1 a 6 min.

2) Índice de consistencia (K)

En la **Figura 11** se presenta el comportamiento del índice K de jugo de tomate en función de la temperatura y el tiempo de escaldado por el método secuencial EMSI+ET. Se obtuvo el índice de consistencia más bajo a temperaturas bajas y tiempos cortos, mientras que al exponerse a temperaturas altas y tiempos prolongados el índice K fue mayor. Los resultados para esta variable se encontraron entre 0.4 y 1.2 Pa·sⁿ. El mayor efecto sobre la consistencia lo presentó la temperatura, ya que en el gráfico de superficie la pendiente del índice K contra temperatura fue ligeramente mayor que la correspondiente a la de este índice contra tiempo.

El modelo de predicción obtenido fue el siguiente:

$$K = 0.81 + 0.20 x_1 + 0.17 x_2$$

La significancia del modelo fue $p < 0.0001$, presentó un $R^2_{aj} = 0.90$, la prueba de falta de ajuste fue no significativa ($p = 0.44$) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (C.V. = 8.69 %), por lo que se puede decir que es adecuado y reproducible. Al comparar el valor

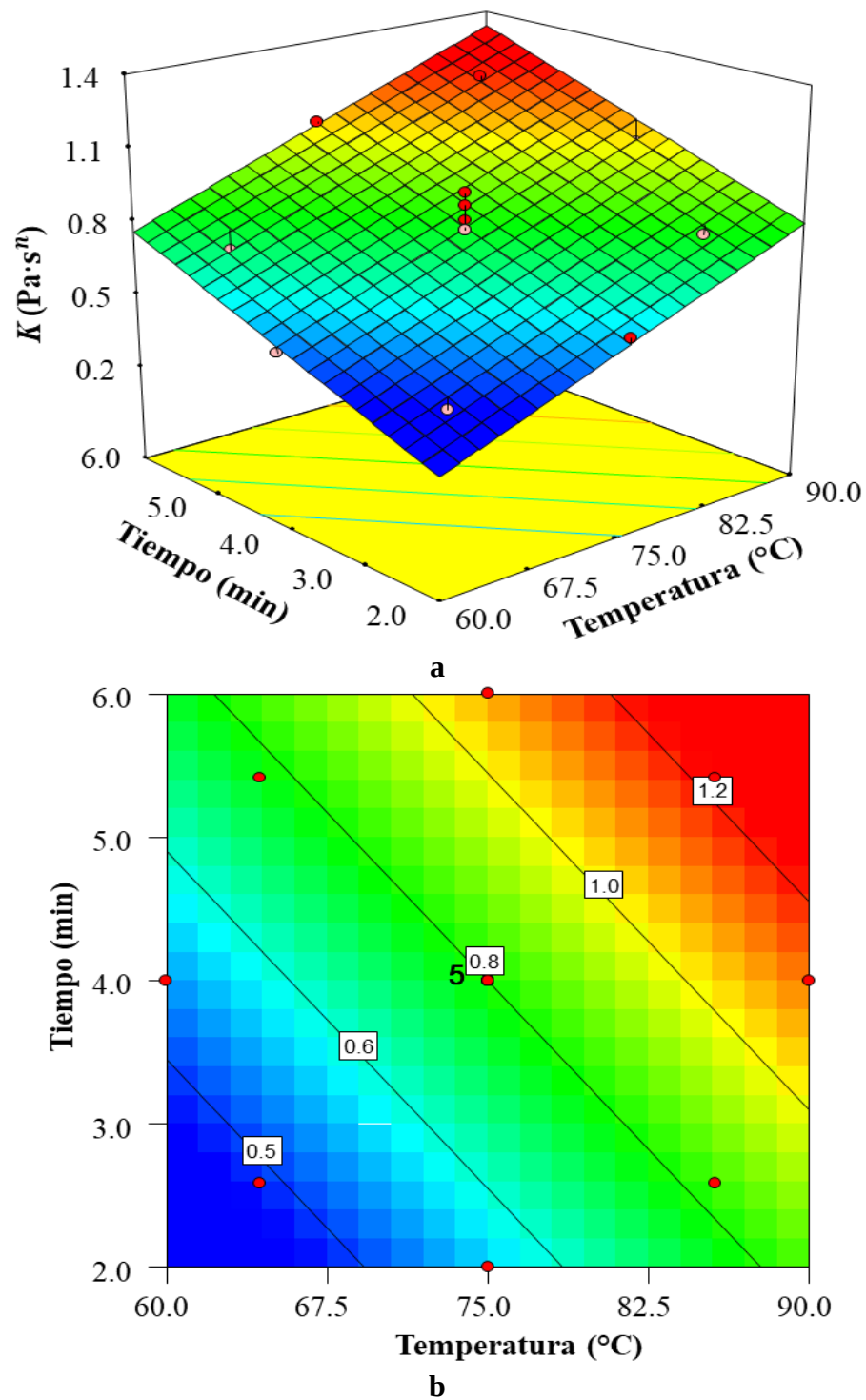


Figura 11. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que indican el efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado sobre el índice de consistencia (K) de jugo de tomate, sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.

absoluto de los coeficientes codificados, se deduce que la consistencia cambia ligeramente más rápido al aumentar la temperatura (0.20) que al aumentar el tiempo (0.17).

Durante el procesamiento del tomate es de gran importancia controlar la degradación de las pectinas, debido a que afectan la consistencia final del producto. Se han propuesto varias explicaciones para esta pérdida de consistencia, incluida la hidrólisis química de pectinas debido a las altas temperaturas en el proceso; la deshidratación irreversible del polímero por las altas concentraciones de soluto; el corte mecánico; y la presencia de enzimas degradadoras de pectina activas, como pectin metil esterasa (PME) y poligalacturonasa (PG). Debido a ello, la temperatura utilizada en el procesamiento de tomate afecta fuertemente el contenido de pectina y la consistencia del producto final. En el proceso de inactivación caliente (*hot break*), los tomates se calientan rápidamente a temperaturas $> 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ para inactivar térmicamente las enzimas, particularmente las enzimas degradantes de pectina (pectin metil esterasa (PME) y las poligalacturonasa (PG)), reduciendo la descomposición enzimática del polímero y generando un producto con alto contenido de pectina y alta consistencia. En cambio, en el proceso de inactivación en frío (*cold break*), los tomates se calientan a temperaturas cercanas a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estas condiciones dan como resultado un mejor color y sabor en el producto pero a expensas de la consistencia debido a que PME y PG son altamente activas a esas temperaturas, lo que resulta en un producto con un contenido de pectina sustancialmente más bajo y con ello una baja consistencia (Anthon y col 2008; Anthon y col 2002). En el presente trabajo, el incremento del índice de consistencia al aumentar las condiciones de escaldado, puede atribuirse a que las enzimas que degradan pectina logran inactivarse en un porcentaje favoreciendo la obtención de un producto con índice de consistencia más alto.

Regalado y Noriega 2008, realizaron mediciones del índice de consistencia en diferentes productos, incluida salsa cátsup y obtuvieron índices de $2.19 \pm 14 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, superiores a los obtenidos en el presente estudio.

Por otra parte, Pellegrini (2017) analizó muestras de jugo de tomate y observó un incremento del índice de consistencia de 0.34 a $0.42 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ al aumentar la temperatura de escaldado tradicional (60 a 90°C), mientras que al utilizar un escaldado con microondas sin inmersión la consistencia aumentó de 0.21 a $0.37 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, resultados ligeramente inferiores a los obtenidos en el presente trabajo, pero el comportamiento de K al aumentar la temperatura fue similar.

b Parámetro nutrimental

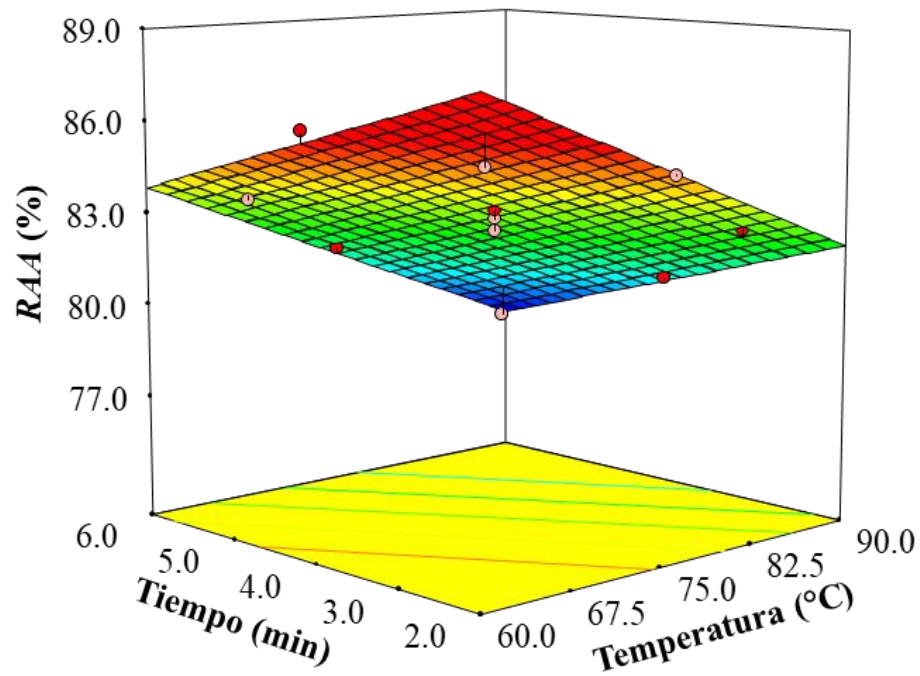
1) Retención de ácido ascórbico (RAA)

La **Figura 12** ilustra el efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado secuencial (EMSI + ET) sobre la retención de ácido ascórbico. En los gráficos se observa que a temperaturas bajas y tiempo cortos de tratamiento se obtienen mayores porcentajes de retención de ácido ascórbico, en cambio al someterse el jugo de tomate a temperaturas altas por tiempos prologados, el contenido de ácido ascórbico es menor. Los resultados para esta variable se encontraron entre 78.4 a 86.3 %. En la observación visual se aprecia que la temperatura tuvo un efecto ligeramente superior sobre la retención que el tiempo.

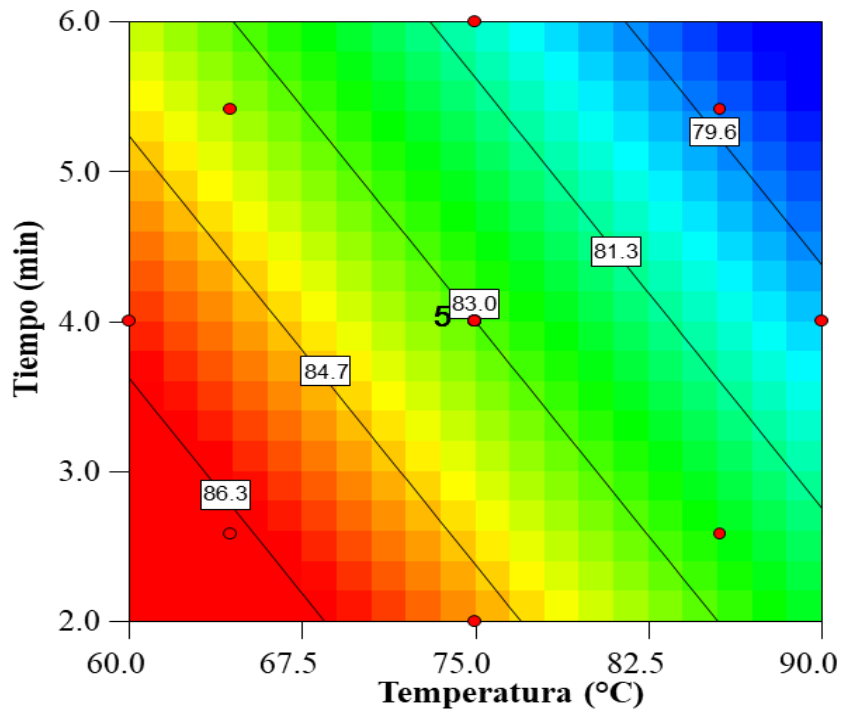
A continuación, se presenta el modelo de predicción obtenido experimentalmente:

$$\% \text{ RAA} = 82.98 - 2.10 x_1 - 1.46 x_2$$

Este modelo presentó un comportamiento lineal y todos sus términos fueron significativos



a



b

Figura 12. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que ilustran el efecto de la temperatura y el tiempo de tratamiento sobre el porcentaje de retención de ácido ascórbico (RAA) en jugo de tomate obtenido por escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por escaldado tradicional.

($p < 0.0001$). El coeficiente de determinación ajustado fue mayor a 0.8 ($R^2_{aj} = 0.91$), la significancia de la prueba de falta de ajuste fue mayor a 0.05 ($p = 0.43$) y el coeficiente de variación fue inferior al 10 % ($C.V. = 0.78$ %), por lo que se puede decir que el modelo es adecuado y repetible. De acuerdo al modelo el coeficiente para temperatura (2.10) fue mayor que para tiempo (1.46), por lo que la RAA se reduce más rápido al aumentar la temperatura.

El ácido ascórbico es considerado un nutrimento esencial para los humanos por ser un poderoso antioxidante que ayuda a prevenir enfermedades. Sin embargo, es un compuesto inestable y puede degradarse con facilidad por distintos factores, entre estos: el calor, la presencia de luz, y de oxígeno, dando lugar a la formación de sustancias con efecto no antioxidante (ácido deshidroascórbico, ácido 2,3 dicetogulónico, ácido oxálico y ácido treónico) (Klopotek y col 2005; Figueroa y col 2016).

Pellegrini (2017) reportó un 81.9 % de retención de ácido ascórbico en jugo de tomate después de un escaldado tradicional a 60 °C por 3.5 min, mientras que se retuvo el 58.5 % a 85.6 °C por 5.27 min. Lo que indica que a condiciones suaves de tratamiento se obtiene una mayor retención de este nutrimento, sin embargo, a condiciones drásticas de temperatura y tiempo de escaldado disminuye el porcentaje de retención, comportamiento similar al del presente trabajo. Por otro lado, este mismo autor indicó que al aplicarse un escaldado con microondas sin inmersión en agua se obtuvieron retenciones de 79.4 a 94.2 % de ácido ascórbico, destacando los porcentajes más altos a condiciones suaves de tratamiento y viceversa.

c Parámetros enzimáticos

1) Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (AR PG1)

Los resultados de la actividad remanente de poligalacturonasa (PG1) se pueden apreciar en la **Figura 13**. Se observa una disminución lineal de este parámetro al aumentar la temperatura y el tiempo de escaldado. Los porcentajes experimentales para esta variable estuvieron entre 86.2 y 98.9 %. En la observación visual se aprecia que la temperatura presentó un mayor efecto (mayor pendiente en el gráfico) sobre la AR PG1 que el tiempo.

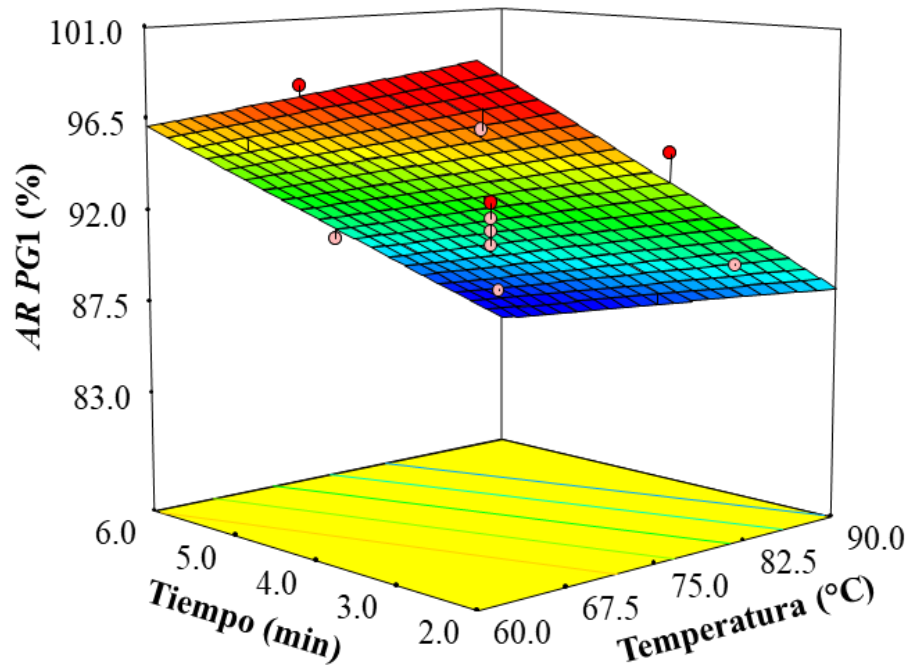
El modelo codificado de predicción fue el siguiente:

$$AR\ PG1 = 92.29 - 4.35\ x_1 - 1.61\ x_2$$

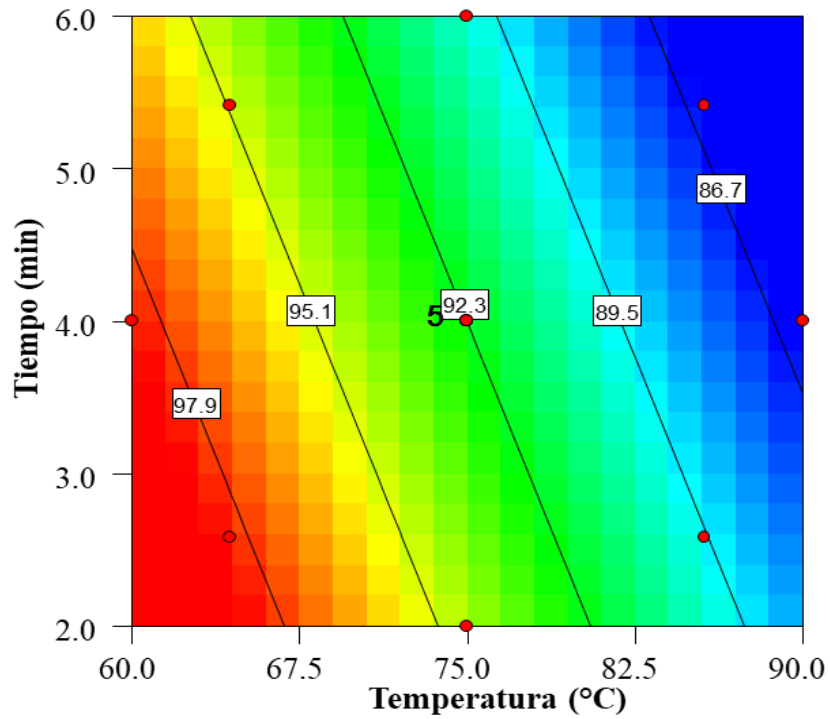
Se obtuvo una significancia del modelo $p < 0.0001$, un $R^2_{aj} = 0.91$, además pasó la prueba de falta de ajuste ($p = 0.31$) y el coeficiente de variación fue de 1.25 %, por lo que el modelo se considera adecuado y reproducible. De acuerdo con el modelo, el mayor efecto sobre la AR PG1 lo ejerció la temperatura (4.35) y en menor medida el tiempo (1.61), lo que confirma la apreciación visual.

La enzima poligalacturonasa al igual que otras enzimas puede ser inactivada por procesamiento térmico. Sin embargo, se ha reportado que la fracción 1 de esta enzima presenta una alta estabilidad térmica (Fachin y col 2004; Pellegrini 2017). Fachin y col 2004 al analizar muestras de tomate variedad *Flandria Prince*, indicaron que la fracción PG1 retiene su actividad después de someterse a un tratamiento a 65 °C por 5 min, incluso después de 90 °C por 5 min existe actividad residual de PG.

Por otra parte, Aguiló-Aguayo y col (2008) reportaron una actividad residual de PG1 de



a



b

Figura 13. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestra el efecto de la temperatura y tiempo sobre la actividad remanente de PG1 (*AR PG1*) en jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado tradicional.

78 y 56 %, al calentar las muestras a 90 °C por 30 s y 1 min, respectivamente. Estos porcentajes fueron inferiores a los obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, los autores indican que realizaron la extracción de la enzima del fruto y posteriormente aplicaron el tratamiento térmico a los extractos, proceso diferente a lo realizado en este trabajo. En cambio, Pellegrini (2017) menciona que al utilizar un escaldado tradicional de 1 a 6 min, se obtienen porcentajes de actividad remanente de 82.3 a 99.8 % y al aplicar un escaldado con microondas sin inmersión en agua se logra obtener porcentajes de 69.7 a 99.9 de actividad remanente, resultados cercanos a los de este trabajo.

2) Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (AR PG2)

En la **Figura 14** se observa el efecto de la temperatura y el tiempo de escaldado secuencial (EMSI + ET) sobre la actividad remanente de PG2. Esta variable presentó una tendencia lineal al disminuir conforme aumenta la temperatura y el tiempo de escaldado. Los resultados se encontraron entre 81.9 y 95.4 %. Se puede apreciar en el gráfico un efecto ligeramente superior de la temperatura sobre la AR PG2 que del tiempo.

El modelo que relaciona la influencia del tiempo y temperatura sobre la AR PG2 fue:

$$AR\ PG2 = 88.67 - 3.83\ x_1 - 3.24\ x_2$$

El modelo obtenido fue significativo ($p < 0.0001$), tuvo un coeficiente de determinación ajustado mayor a 0.8 ($R^2_{aj} = 0.89$), no presentó falta de ajuste ($p = 0.85$) y el C.V. = 1.58 %. Se consideró que el modelo es adecuado y reproducible debido a que cumplió con los criterios antes mencionados. De acuerdo al modelo el coeficiente para la temperatura (3.83) fue mayor que el del tiempo (3.24), por lo que el mayor efecto sobre AR PG2 lo ejerció la temperatura, esto concuerda con la inspección visual.

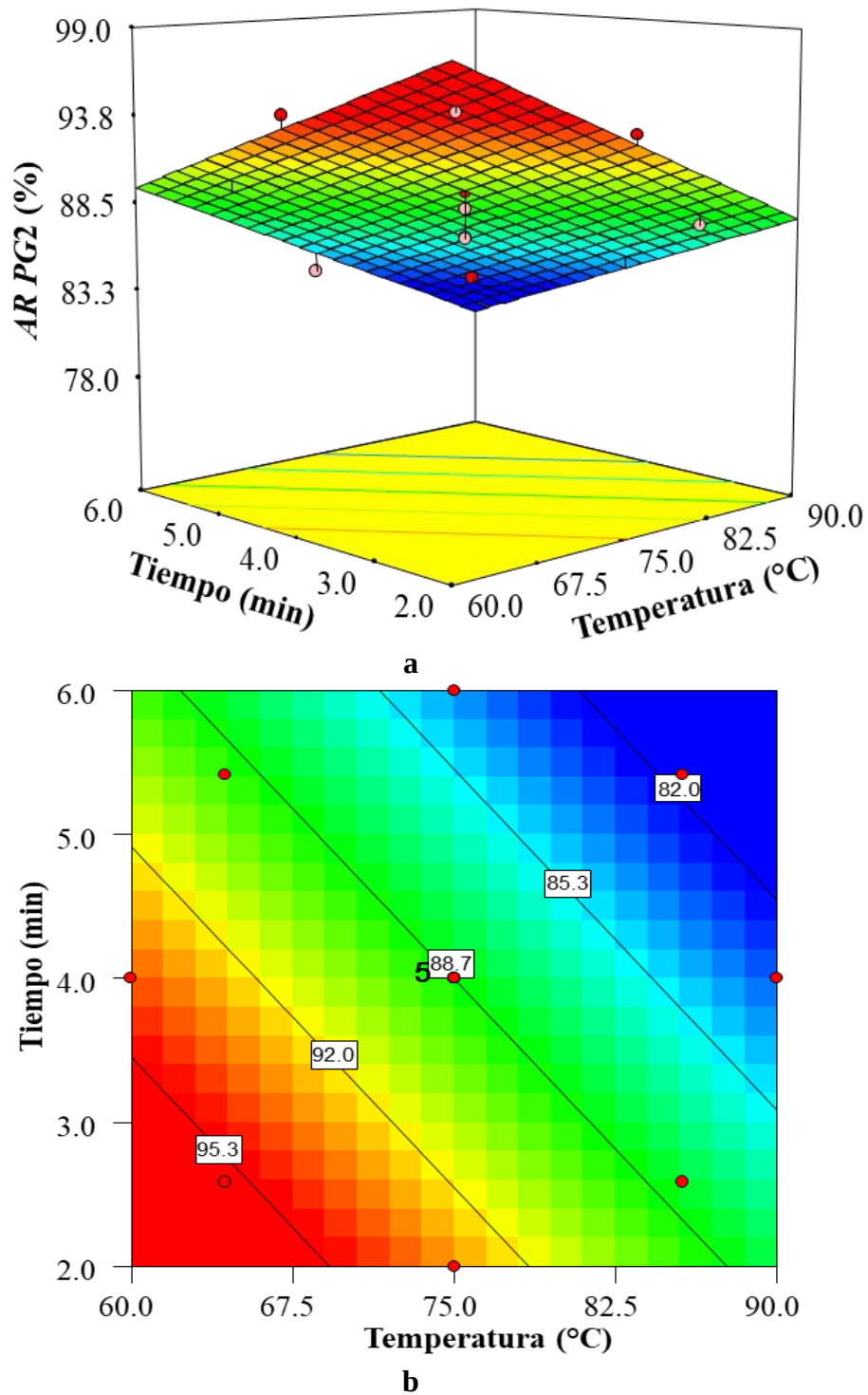


Figura 14. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que indican el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la actividad remanente de PG2 (*AR PG2*) en jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión seguido de escaldado tradicional.

Pellegrini (2017) indicó que al someter una muestra de jugo de tomate variedad *Uva* a un escaldado tradicional a 60 °C por 1 min, se obtiene 89.5 % de actividad remanente para PG2. Resultado cercano a los obtenidos en este trabajo.

Por otro lado, Anthon y col (2002) reportaron un actividad residual de 25.2 %, después de un tratamiento térmico a 64.9 °C por 5 min. Sin embargo, mencionan que las muestras fueron colocadas en tubos de vidrio de 1 mL al realizar la inactivación térmica, esto indica que el área de transferencia de calor fue muy grande, por lo que se favorece la desnaturalización de la enzima.

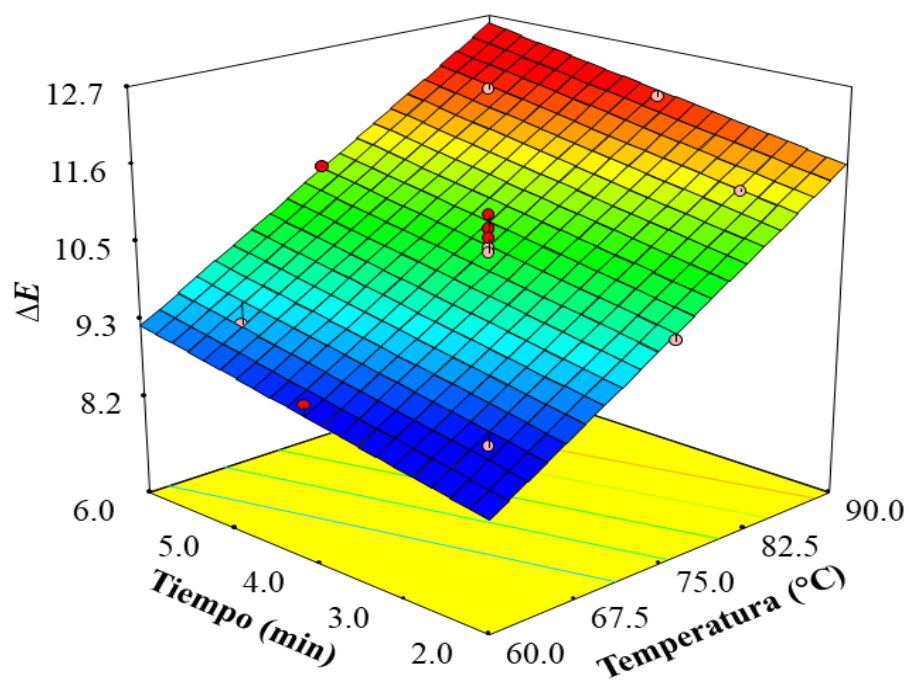
También Russell (1984) indicó que la enzima PG2 fue completamente inactivada a 65 °C por 5 min, cabe señalar que la metodología utilizada fue diferente a la de este proyecto, debido a que se realizó la extracción de la enzima y posteriormente se llevó a cabo la inactivación.

2 Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua

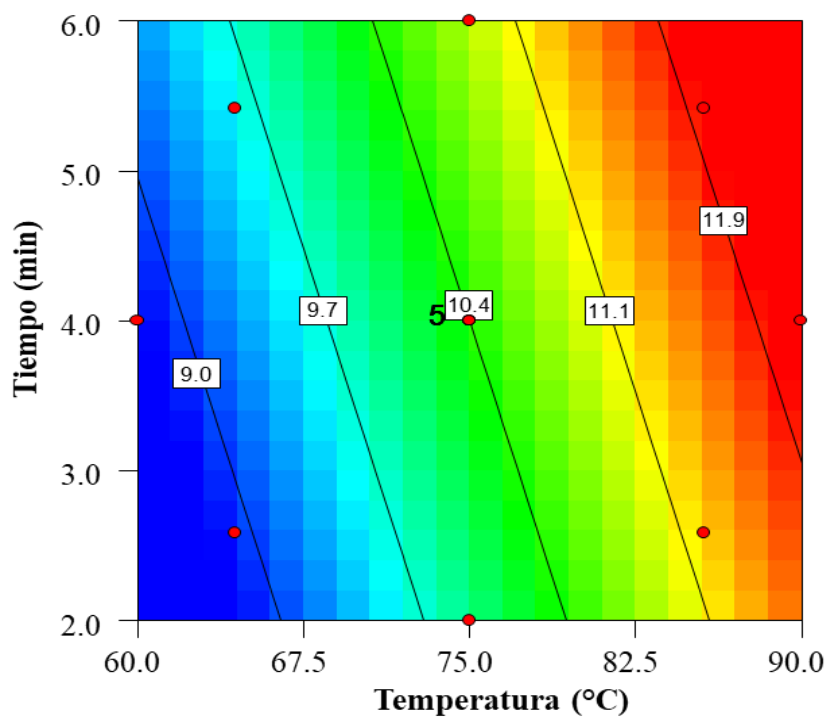
a Parámetros fisicoquímicos

1) Diferencia total de color (ΔE)

En la **Figura 15** se presenta el efecto de los factores temperatura y tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE) de jugo de tomate obtenido del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI). Se aprecia un incremento lineal de ΔE al aumentar la temperatura y el tiempo de tratamiento, encontrándose las mayores diferencias de color a condiciones drásticas de escaldado. El intervalo para ΔE fue de 8.7 a 12. La pendiente correspondiente a la



a



b

Figura 15. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la diferencia total de color (ΔE) de jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

temperatura fue mayor que la del tiempo, por lo que la temperatura ejerció mayor efecto sobre la ΔE .

El modelo codificado de predicción se muestra a continuación:

$$\Delta E = 10.43 + 1.17 x_1 + 0.34 x_2$$

Donde x_1 representa el factor temperatura y x_2 el factor tiempo. El modelo obtenido fue significativo ($p < 0.0001$) y la falta de ajuste fue no significativa ($p = 0.54$). Además, el coeficiente de determinación ajustado estuvo por encima de 0.8 ($R^2_{aj} = 0.95$) y el coeficiente de variación fue inferior al 10 % (C.V. = 2.10 %), por lo que el modelo se consideró adecuado y reproducible. En el modelo el coeficiente para la temperatura (1.17) fue mayor que el del tiempo (0.34), lo que indica que la temperatura ejerció mayor efecto sobre ΔE que el tiempo, confirmando lo anteriormente mencionado en la inspección visual.

Algunos autores indican que la pigmentación característica del tomate es debida a la presencia de carotenoides, principalmente licopeno que abarca del 80 al 90 % de la cantidad total de carotenoides presentes (Mayeaux y col 2006; García 2011). Además, durante el procesamiento térmico de los productos de tomate, se ha observado un incremento en la disponibilidad de este compuesto ocasionado por la rotura de las paredes celulares. Sin embargo, al igual que otros componentes, el licopeno es susceptible a la degradación, la cual puede ocurrir por dos vías: la isomerización y la autooxidación debido a que contiene dobles enlaces insaturados. Se ha reportado que la degradación de licopeno puede ocurrir a temperaturas tan bajas como a 25 °C por la oxidación de éste y que la isomerización de licopeno se ve favorecida a temperaturas superiores de 75 °C (Mayeaux y col 2006). Esto podría explicar el incremento de la diferencia total de color al aumentar las condiciones de escaldado en el presente trabajo.

Por otro lado, el pardeamiento enzimático, la caramelización, la reacción de Maillard y la oxidación de nutrientes (vitamina C) pueden generar polímeros marrones durante el procesamiento de las hortalizas, ocasionando una apariencia indeseable del producto (Morante y col 2014; Arrázola-Paternina y col 2016).

Pellegrini (2017) observó que al realizar un escaldado en tomate variedad *Uva* utilizando microondas sin inmersión en agua, aumenta la diferencia total de color de 6.97 a 69.5, mientras que al aplicar un escaldado con microondas con inmersión en agua incrementa de 7.8 a 46.8, a temperaturas de 60 a 90 °C y tiempos de 1 a 6 min. En ambos casos la ΔE fue más alta que la del presente trabajo, esto puede deberse a que se utilizó un tomate de menor tamaño, por lo que la penetración de calor fue mayor.

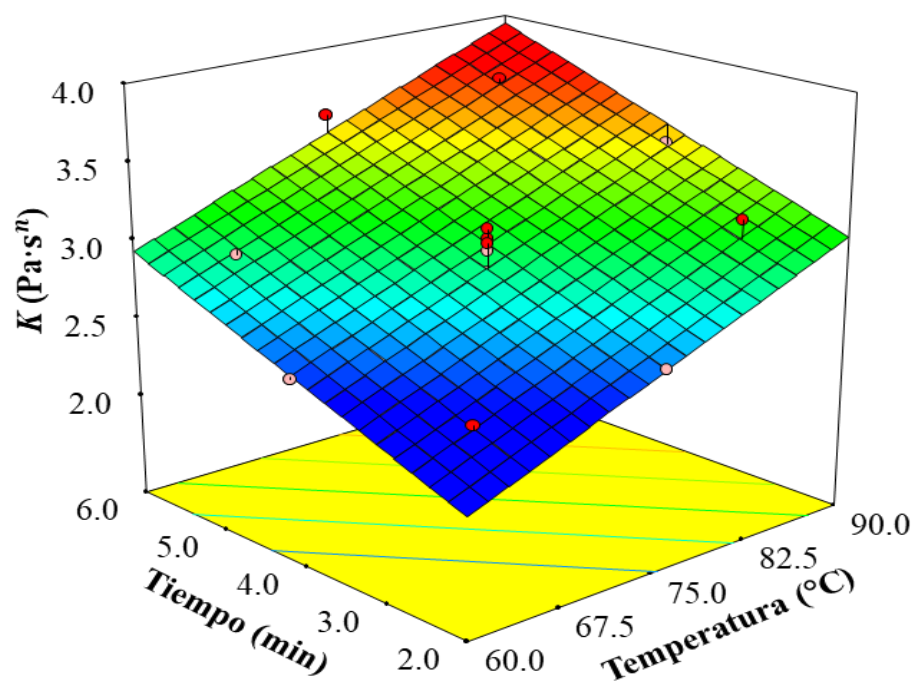
2) Índice de consistencia (K)

El índice de consistencia (K) de jugo de tomate escaldado por el método secuencial (EMSI +EMCI) se muestra en la **Figura 16**. Se puede apreciar un incremento lineal de esta variable al incrementar las condiciones de escaldado, los índices de consistencia más bajos se encontraron a temperaturas bajas y tiempos cortos, mientras que los más altos a condiciones drásticas de escaldado. El intervalo para K estuvo entre 2.4 y 3.7 Pa·sⁿ. La inspección visual sugiere que la temperatura tuvo mayor efecto sobre la consistencia que el tiempo.

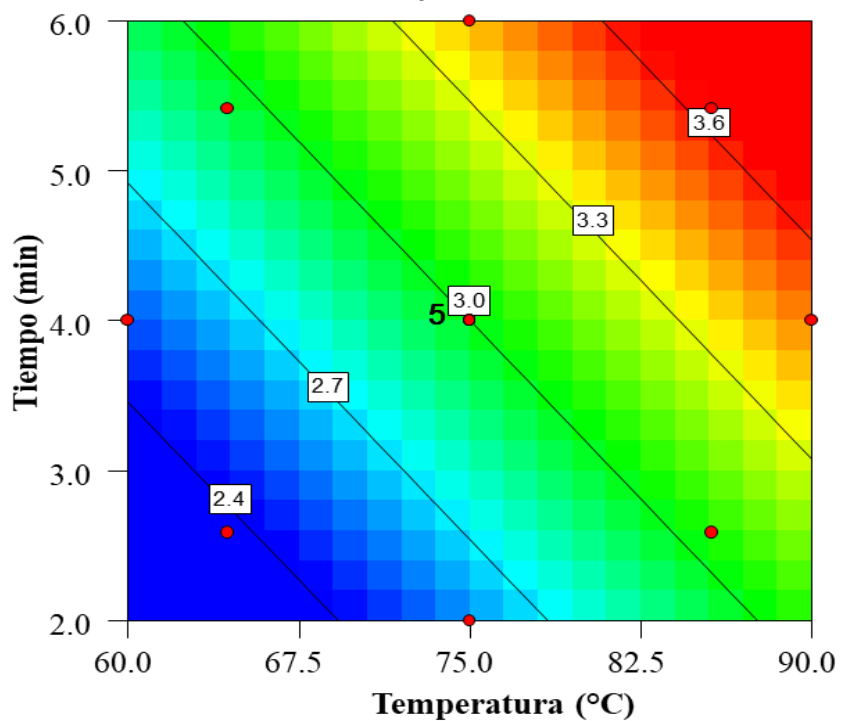
El modelo de predicción resultante fue el siguiente:

$$K = 3.03 + 0.36 x_1 + 0.30 x_2$$

Este modelo fue significativo ($p < 0.0001$), no presentó falta de ajuste ($p = 0.66$), tuvo un $R^2_{aj} = 0.94$ y un C.V. = 3.19 %. Con estos criterios se consideró el modelo como adecuado y



a



b

Figura 16. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que ilustran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre el índice de consistencia (K), después de un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

reproducibile. El modelo indica que la temperatura (0.36) ejerció mayor efecto sobre la consistencia del jugo de tomate que el tiempo (0.30).

La consistencia de los productos de tomate a menudo se refiere a su viscosidad y capacidad para mantener la porción sólida en suspensión, lo cual es importante para lograr un producto homogéneo. Las pectinas son polisacáridos que constituyen una parte importante del material estructural de los tejidos vegetales, son efectivas para unir el agua y formar geles, lo que las hace importantes en el procesamiento de frutas y hortalizas. Las pectinas con un alto grado de metoxilación (GM) forman geles a través de la reticulación de las cadenas de pectina en las zonas de unión a través de interacciones hidrófobas y enlaces de hidrógeno. Las pectinas de bajo GM forman geles a través de la formación y agregación de hélices en presencia de iones divalentes. El tratamiento térmico induce la formación de gel y la degradación de pectina. La degradación de pectina puede ser causada por β -eliminación, hidrólisis ácida o actividad enzimática, principalmente por pectin metil esterasa (PME) y poligalacturonasa (PG) (Tibäck y col 2009).

Verlent y col (2006) estudiaron el efecto del tratamiento térmico (30 a 90 °C, 15 min) en el homogeneizado de tomate. Reportaron una pérdida de consistencia de 4 a 10.5 cm (consistómetro de Bostwick) después de todos los tratamientos térmicos respecto al control (fresco), sin embargo, la mayor pérdida se encontró a 60 °C, por lo que sugirieron que se debió a la despolimerización de pectina por acción de PG, aunque también PME contribuye indirectamente a la pérdida de consistencia, ya que crea un buen sustrato para PG. Por otra parte, Verlent y col (2007) informaron que la temperatura óptima para la actividad de PME y PG del tomate (presión atmosférica y pH 4.4) fue de aproximadamente 50 a 60 °C, lo que podría explicar los resultados más bajos de consistencia a temperaturas cercanas a los 60 °C.

Anthon y col (2008) mencionaron que el contenido de pectina en muestras escaldadas en frío (*cold break*) fue más bajo que el de tomates no procesados o de muestras obtenidas del procesamiento en caliente (*hot break*) y señalan que eso era de esperarse, debido a que durante el escaldado en frío se encuentran presentes enzimas degradadoras de pectina activas.

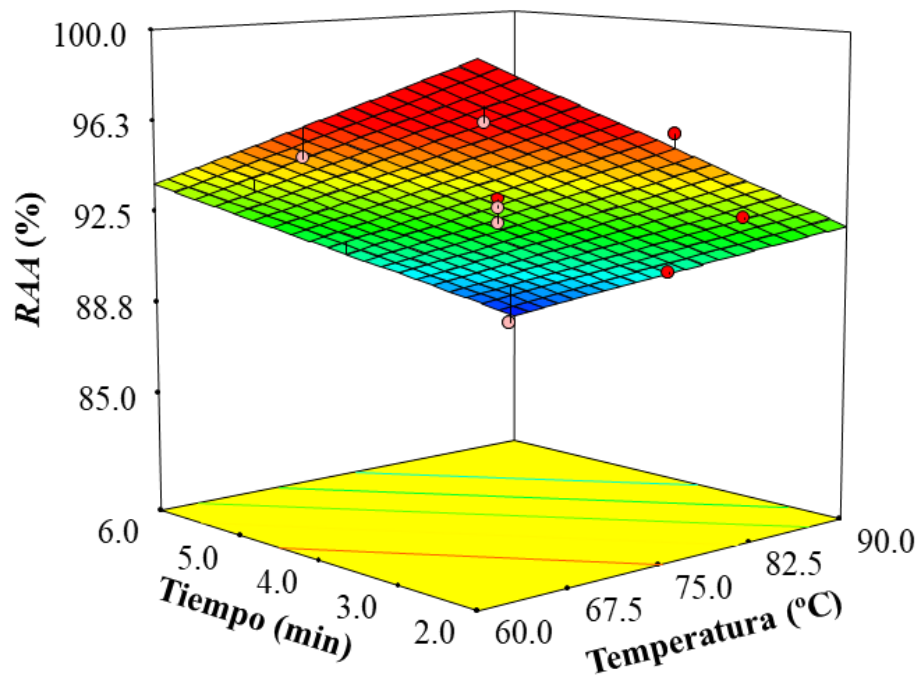
b Parámetro nutrimental

1) Retención de ácido ascórbico (RAA)

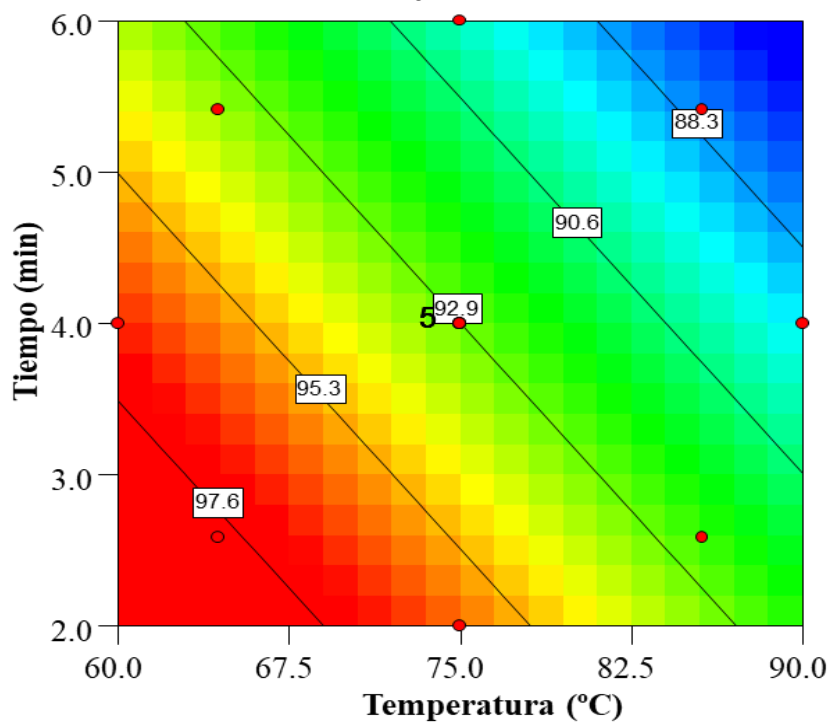
La retención de ácido ascórbico (RAA) en jugo de tomates escaldados con el método secuencial EMSI + EMCI se muestra en la **Figura 17**. Se aprecia una disminución lineal de esta variable conforme aumenta la temperatura y el tiempo de escaldado. El intervalo para la RAA estuvo entre 97.3 - 86.3 %, encontrándose la mayor retención a 64.4 °C por 2.6 min y la menor retención a 85.6 °C por 5.4 min. Cabe señalar que la menor RAA obtenida fue más del 85 %, por lo que después del tratamiento los tomates retienen una cantidad de ácido ascórbico bastante considerable. En la apreciación visual del gráfico se sugiere que el factor temperatura ocasionó un efecto ligeramente superior sobre la RAA que el factor tiempo. El modelo de predicción que relaciona el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la RAA se presenta a continuación:

$$RAA = 92.95 - 2.74 x_1 - 2.21 x_2$$

Dicho modelo resultó significativo ($p < 0.0001$), tuvo un coeficiente mayor a 0.8 ($R^2_{aj} = 0.90$), pasó la prueba de falta de ajuste ($p = 0.30$) y el coeficiente de variación fue menor al 10 % (C.V. = 1.03 %), por lo tanto, el modelo se consideró adecuado y reproducible. En el modelo se indica que el coeficiente de la temperatura (2.74) fue mayor que el del tiempo



a



b

Figura 17. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que reflejan el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la retención de ácido ascórbico (RAA) de jugo de tomate escaldado con microondas con inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

(2.21), por lo que la *RAA* disminuyó más rápido con el incremento de la temperatura, esto confirma lo mencionado anteriormente en la inspección visual.

La disminución de ácido ascórbico en frutas y hortalizas ocurre principalmente por degradación química, es decir, la oxidación de ácido ascórbico a ácido dihidroascórbico (DHAA), continuado por la hidrólisis de ácido 2,3-dicetogulónico y posteriormente la polimerización adicional para dar lugar a otros productos nutricionalmente inactivos. Se sabe que diversos factores como el calor aceleran el proceso de oxidación del ácido ascórbico, es por ello que el procesamiento térmico da como resultado la pérdida de este nutrimento (Dewanto y col 2002).

Dewanto y col (2002) reportaron una disminución de ácido ascórbico en tomate al incrementar el tiempo de tratamiento. Observaron que después de 2, 15 y 30 minutos de calentamiento a 88 °C, el contenido de ácido ascórbico disminuyó un 10.53, 15.79 y 28.95 % respectivamente, en comparación con tomate fresco. Porcentajes similares a los obtenidos en el presente estudio.

Por otra parte, Gutiérrez y col (2019) indicaron que la concentración de ácido ascórbico en tomates fue drásticamente afectada por los diferentes procesos de cocción. Reportaron una retención de este nutrimento de 58.1 %, 47.3 % y 0.0 % en tomates asados, hervidos y rehogados (molidos y fritos), respectivamente. Esto señala que el tratamiento térmico y sus condiciones influyen bastante en la retención de ácido ascórbico.

c Parámetros enzimáticos

1) Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (AR PG1)

En la **Figura 18** se puede apreciar la actividad remanente de PG1 con respecto a la temperatura y el tiempo de escaldado secuencial (EMSI + EMCI). Se observa que, una mayor exposición a temperaturas altas ocasiona una menor actividad remanente de la enzima, en cambio, una exposición a temperaturas bajas por tiempos cortos, genera que la actividad remanente sea más elevada. Los resultados para la actividad remanente de poligalacturonasa 1 (AR PG1) se encontraron entre 95.7 y 81.6 %. Se puede observar que las pendientes en el gráfico de superficie de respuesta sugieren que la actividad de PG1 disminuye más rápido con la temperatura que con el tiempo.

El modelo de predicción experimental obtenido para esta variable fue el siguiente:

$$AR\ PG1 = 89.39 - 3.23\ x_1 - 2.45\ x_2$$

El modelo se consideró adecuado y reproducible ya que fue significativo ($p < 0.05$) al igual que sus términos temperatura y tiempo. Tuvo un $R^2_{aj} = 0.88$, la prueba de falta de ajuste fue no significativa ($p = 0.30$) y el C.V. = 1.37 %. De acuerdo al modelo, la disminución de la actividad de PG1 es mayor cuando cambia la temperatura (3.23) que cuando cambia el tiempo (2.45), esto concuerda con lo indicado en la inspección visual.

En la literatura, se ha reportado que en el fruto de tomate existen dos fracciones con actividad de poligalacturonasa, una fracción sensible al calor (PG2) y una termorresistente (PG1). Además, se ha mencionado que la fracción PG1 tiene lugar por la unión de la enzima PG2 con una subunidad- β , transformándola así, a la forma más estable al calor (PG1). Lo que

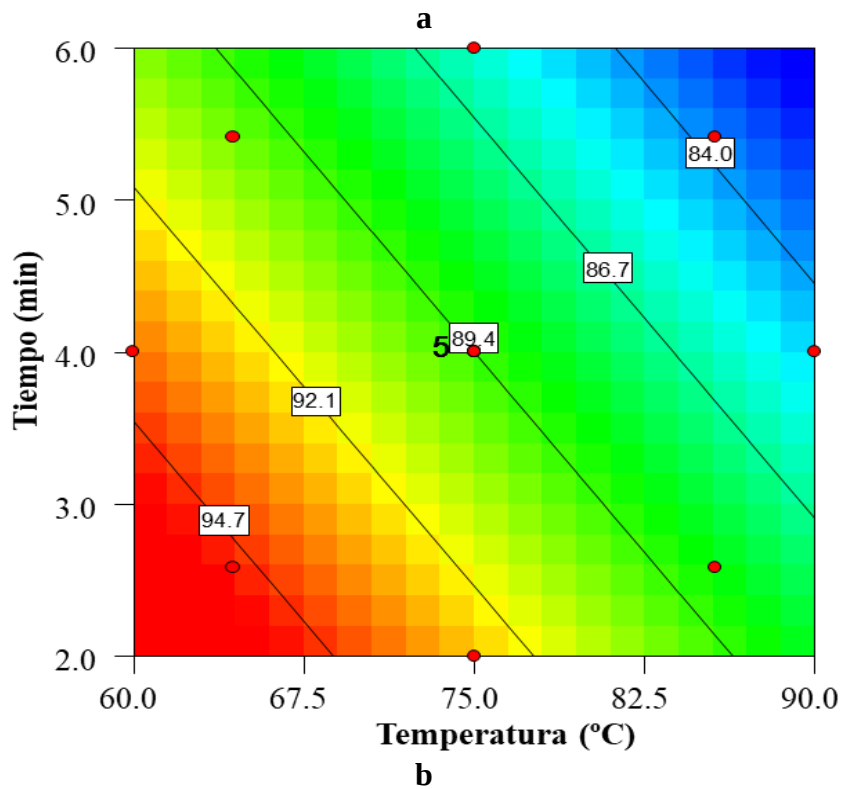
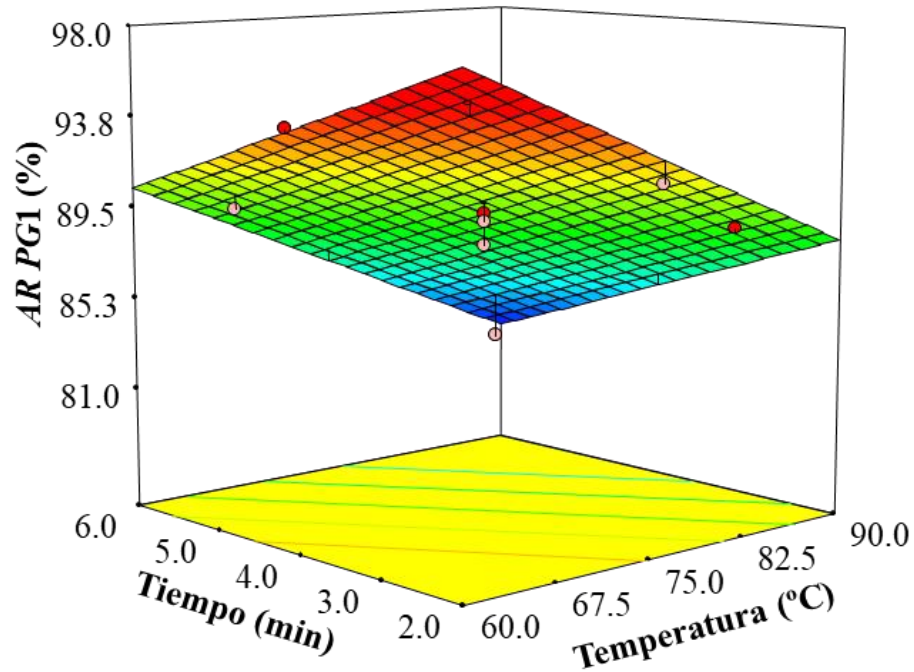


Figura 18. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de la temperatura y el tiempo sobre la actividad remanente de PG1 (*AR PG1*) de jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

ha originado una discusión entre si existe PG1 *in vivo* o si ésta es un artificio formado durante la extracción (Crelrier y col 2001; Fachin y col 2003).

Por otra parte, algunos autores señalan que la matriz o material coloidal (proteínas, pectinas, etc.) y otros solutos que rodean a las enzimas presentes en el medio, podrían causar un efecto protector sobre la estructura de las enzimas, evitando la desnaturalización de éstas (Crelrier y col 2001; Houben y col 2013).

Fachin y col (2003), observaron que al colocar en bolsas de polietileno 700 µL de jugo de tomate y aplicar un tratamiento térmico de 55 a 70 ° C, después de 120 min las curvas de inactivación térmica mostraron una fracción resistente que no fue inactivada, representando aproximadamente el 14 % de la actividad inicial, independientemente de la temperatura aplicada; por lo que sugieren que la actividad residual de la PG se debe a la isoenzima PG1 estable al calor. La actividad residual obtenida por estos autores fue mucho menor que las obtenidas en este trabajo, esto pueden atribuirse a las diferentes metodologías utilizadas.

Por otra parte, Pellegrini (2017) indicó que al aplicar un escaldado a frutos enteros de tomate variedad *Uva* con microondas sin inmersión en agua, durante un tiempo de 1 a 6 min a 60 a 90 °C, obtuvo porcentajes de actividad remanente entre 69.7 a 99.9 %. Mientras que, al emplear un escaldado con microondas con inmersión en agua obtuvo remanencias de 71.7 a 98.9 %; altos porcentajes de actividad remanente para PG1 similar a los obtenidos en este trabajo. Cabe señalar que, a pesar de obtener remanencias de actividad elevadas, a nivel industrial se inactiva un porcentaje mayor, debido a que el escaldado es sólo una etapa de los diversos tratamientos térmicos que se aplican a los productos (Elfesh y col 2011).

2) Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (AR PG2)

En la **Figura 19** se ilustran los resultados de la actividad remanente de poligalacturonasa 2 (AR PG2), se aprecia un comportamiento lineal de esta variable conforme cambian las condiciones de escaldado. Los porcentajes para la AR PG2 estuvieron entre 93 y 79.9 %. En el gráfico se observa que al parecer la temperatura resultó ser el factor que mayor efecto tuvo sobre esta actividad enzimática.

El modelo de predicción que relaciona el efecto de los factores temperatura y tiempo sobre la AR PG2 se muestra a continuación:

$$AR\ PG2 = 87.91 - 3.10\ x_1 - 2.72\ x_2$$

El modelo de predicción fue lineal, con todos sus términos significativos y una significancia menor a 0.05 ($p < 0.0001$). Este modelo tuvo un R^2_{aj} de 0.84, no presentó falta de ajuste ($p = 0.58$) y el coeficiente de variación fue inferior al 10 % (C.V. = 1.65 %), por lo que se consideró adecuado y reproducible. El modelo indica que el coeficiente para la temperatura (3.10) fue más elevado que para el tiempo (2.72), por lo que la actividad de PG2 presenta mayor dependencia de la temperatura que del tiempo, dentro de los intervalos estudiados para los factores, lo que concuerda con la inspección visual realizada.

Diversos investigadores señalan que la fracción 2 de la enzima poligalacturonasa presenta una mayor sensibilidad a los tratamientos térmicos que la fracción 1 (Anthon y col 2002; Fachin y col 2003; Houben y col 2013). Esto se confirmó con los porcentajes de remanencia obtenidos para PG2, debido a que fueron más bajos que los de PG1.

Por otra parte, Crelier y col. (2001) sin hacer distinción entre PG1 y PG2 reportaron una

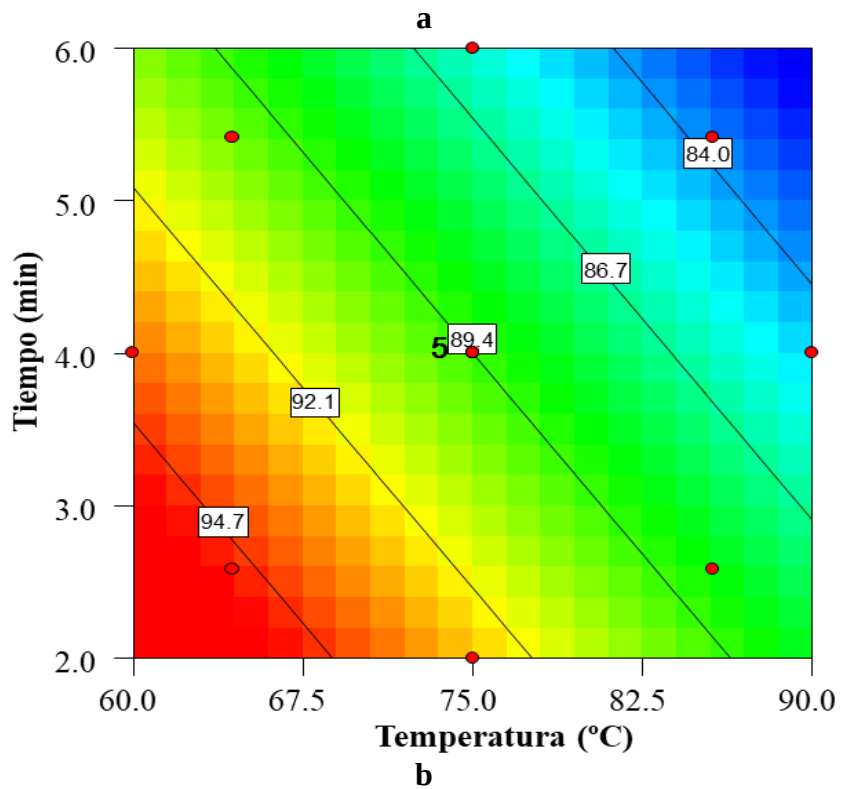
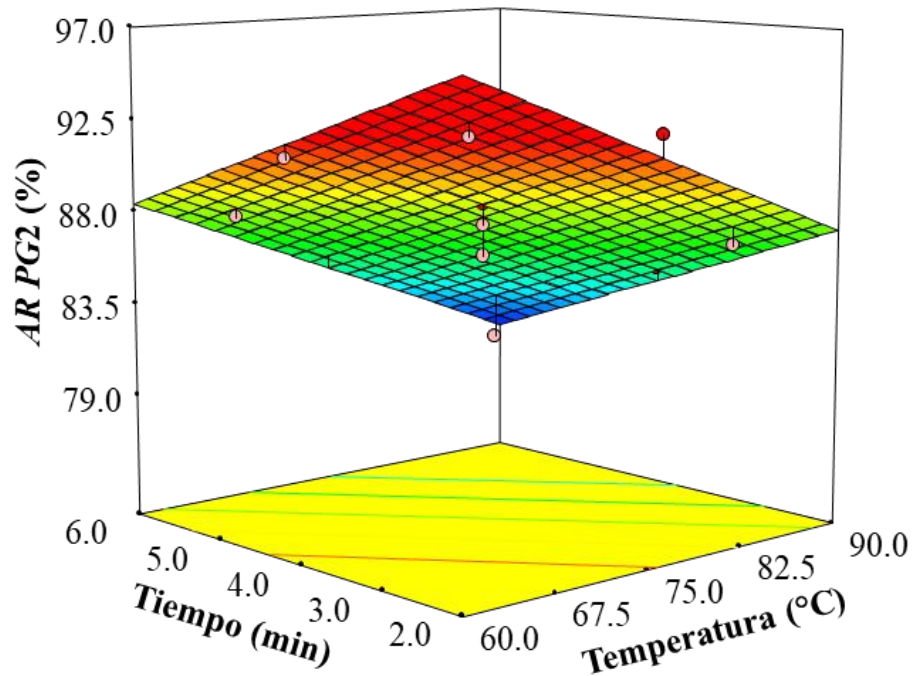


Figura 19. Gráficos de superficie de respuesta (a) y contornos (b) que muestran el efecto de los factores temperatura y tiempo sobre la actividad remanente de PG2 (*AR PG2*) de jugo de tomate escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

actividad enzimática residual del 80 % después de un tratamiento a 80 °C por 55 min, mientras que lograron inactivar el 100 % de la enzima a 105 °C por 5 minutos (para extractos de PG obtenidos del jugo de tomate). En cambio, Pellegrini (2017) reportó porcentajes de 89.53, 68.54 y 61.95 % de actividad remanente para PG2 al aplicar un escaldado tradicional, escaldado con microondas con inmersión y escaldado con microondas sin inmersión en agua, respectivamente, porcentajes elevados como los obtenidos en este trabajo, posiblemente debido al medio en que se encontraba la enzima, lo que dificultó la inactivación de ésta (Houben y col 2013).

B MEJORES CONDICIONES PARA LA OBTENCIÓN DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO

1 Optimización de los métodos de escaldado secuenciales

Para obtener las mejores condiciones de procesamiento de cada método de escaldado se les asignó a las variables de respuesta un valor subjetivo deseable en el producto final, es decir, una menor diferencia total de color (ΔE) y una baja actividad remanente de poligalacturonasa 1 (*AR PG1*) y 2 (*AR PG2*), por el contrario, se buscó maximizar el índice de consistencia (*K*) y la retención de ácido ascórbico (*RAA*). Para la optimización de los métodos de escaldado secuencial (EMSI + ET y EMSI + EMCI), el criterio de importancia fue de +++ para todas las variables de respuesta (ΔE , *K*, *RAA*, *AR PG1* y *AR PG2*), el intervalo para este criterio es de + y +++++. Respecto al criterio de ponderación, a la ΔE y al *K* se les asignó una ponderación de 0.1, en cambio para las otras variables de respuesta (*RAA*, *AR PG1* y *AR PG2*) se utilizó una ponderación de 1. Se les asignan ponderaciones a las variables de respuesta en la optimización para dar un mayor o menor énfasis al valor objetivo (mínimo o máximo). Al emplear una ponderación (peso) de 1, la deseabilidad individual de la respuesta oscilará entre

0 y 1. Al utilizar un peso superior a 1 (la ponderación máxima es 10) se da mayor énfasis al objetivo (mínimo o máximo), en cambio, al asignar una ponderación menor a 1 (peso mínimo es 0.1), se da menor énfasis al objetivo deseado (mínimo o máximo) (Caro 2019; Soltero 2019).

a Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional

En la **Figura 20** se presentan las deseabilidades individuales para cada variable de respuesta y la deseabilidad global en la optimización del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional. Se aprecia que, a pesar de que la deseabilidad individual de la retención de ácido ascórbico fue baja (0.440), la combinación de las variables de respuesta permitió obtener una deseabilidad global de 0.700, la cual se considera aceptable y buena de acuerdo a una escala subjetiva (Fabila 1998; Bacio 2007). Las mejores condiciones de temperatura y tiempo para el escaldado de tomate por este método fueron 90 °C y 2.2 min.

b Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua

La deseabilidad individual de las variables de respuesta y la deseabilidad global correspondiente a las condiciones óptimas del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua se indican en la **Figura 21**. Se observa que la retención de ácido ascórbico tuvo la menor deseabilidad individual (0.409), a pesar de ello, la combinación de las variables de respuesta dio como resultado una deseabilidad global de 0.658, ésta de acuerdo con la escala subjetiva de Fabila (1998) se considera adecuada y buena. Téllez-Mora y col (2012) indicaron que la función de

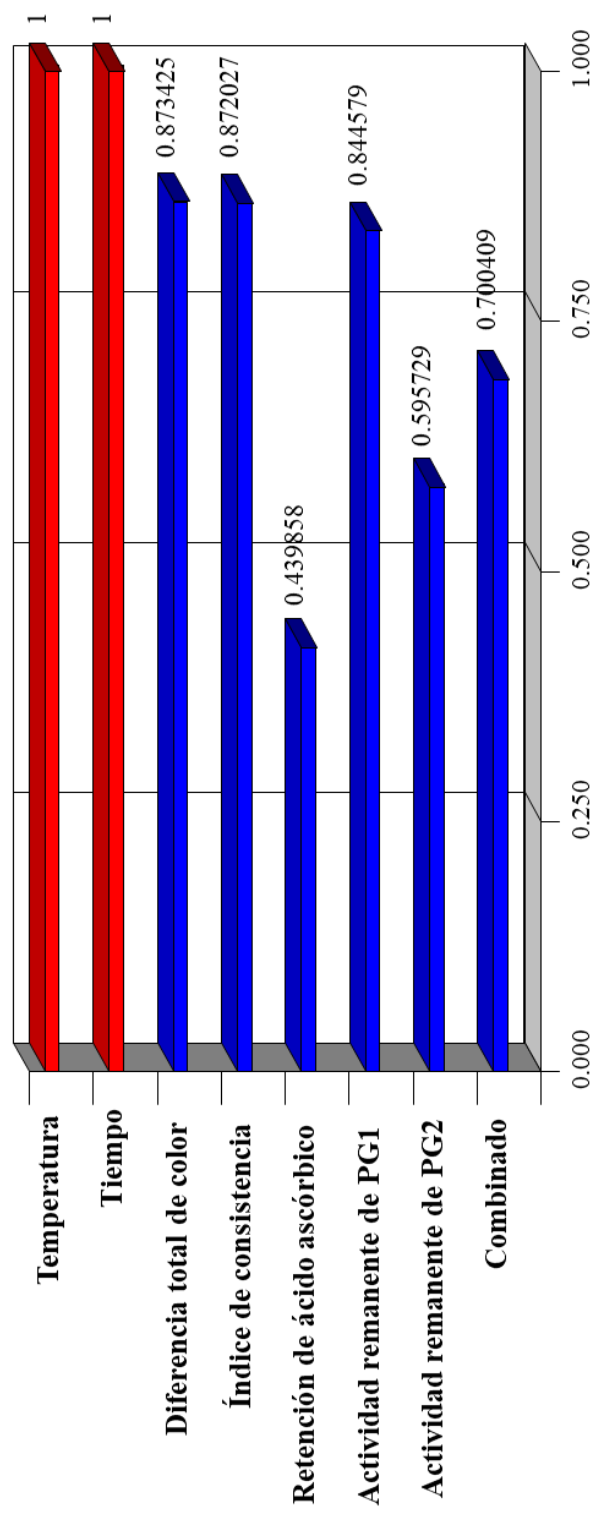


Figura 20. Gráfico de deseabilidades individuales (variables de proceso y respuestas) y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de escaldado de tomate por el método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.

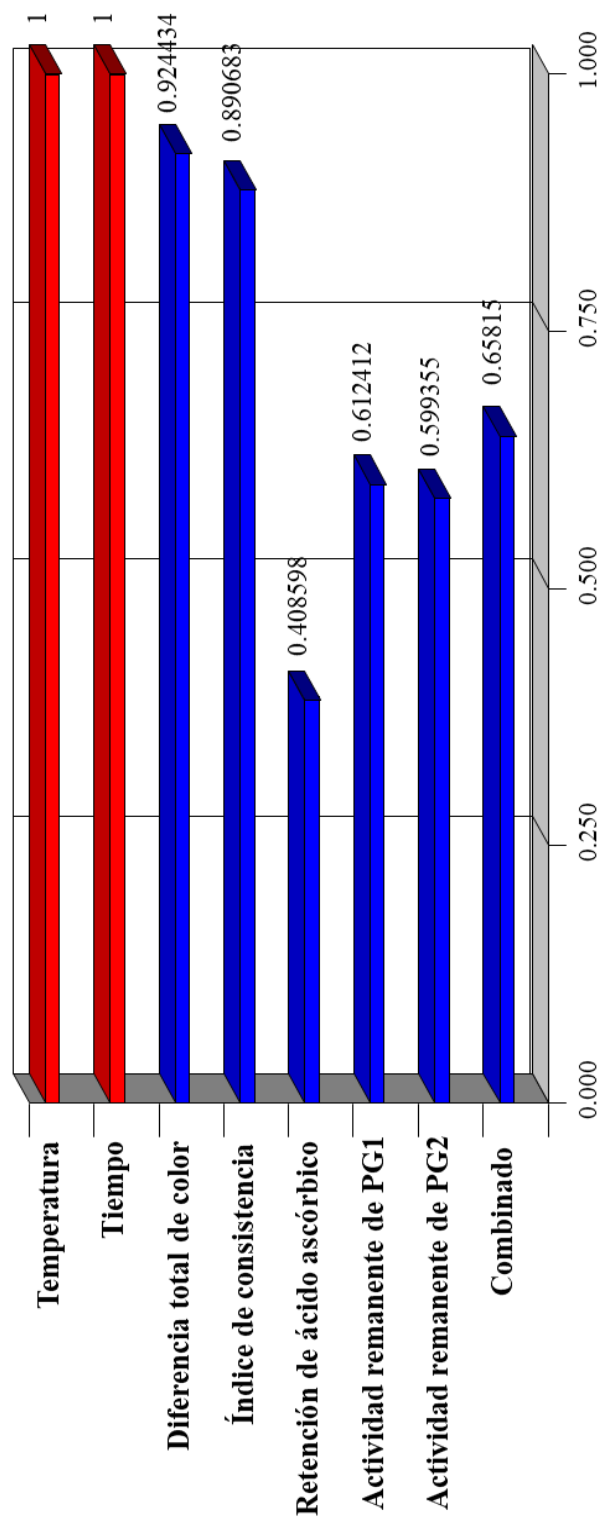


Figura 21. Gráfico de deseabilidades individuales (variables de proceso y respuestas) y deseabilidad global correspondientes a las condiciones óptimas de escaldado de tomate por el método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

deseabilidad cuando toma un valor cercano a 0.0 indica que no hay conformidad con el objetivo propuesto, en cambio cuando ésta es 1.0 se dice que tiene conformidad total en los factores optimizados. Las condiciones de escaldado óptimas fueron 71.2 °C y 6 min.

2 Validación de los modelos de predicción

a Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional

En el **Cuadro 7** se presentan las variables de respuesta experimentales y predichas para jugo de tomate obtenido del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional. Se aprecia que los resultados experimentales de las variables de respuesta se encontraron dentro del intervalo predicho por los modelos, esto indica que los modelos son adecuados y reproducibles.

b Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua

Los resultados predichos y experimentales para las variables de respuesta de jugo tomate obtenido por este método secuencial (escaldado con microondas sin inmersión + escaldado con microondas con inmersión) se muestran en el **Cuadro 8**. Se observa que los resultados experimentales se encontraron dentro del intervalo predicho por los modelos, lo que indica que los modelos son adecuados y reproducibles.

Cuadro 7. Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por escaldado tradicional.

Variable	Experimental	Predicción		
		Exacto	Mínimo	Máximo
ΔE	9.03 ± 0.44	9.0	8.4	9.7
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n)$	0.80 ± 0.12	0.8	0.6	0.9
$RAA \text{ (\%)}$	81.92 ± 0.62	81.9	80.8	82.9
$AR \text{ PG1 (\%)}$	89.33 ± 0.81	88.2	86.3	90.0
$AR \text{ PG2 (\%)}$	88.07 ± 1.23	87.4	85.1	89.6

Cuadro 8. Variables de respuesta predichas y experimentales evaluadas en jugo de tomate sometido a un escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido por escaldado con microondas con inmersión en agua.

Variable	Experimental	Predicción		
		Exacto	Mínimo	Máximo
ΔE	10.42 ± 0.07	10.5	10.2	10.8
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n)$	2.83 ± 0.08	2.9	2.7	3.0
$RAA \text{ (\%)}$	90.96 ± 0.77	90.8	89.6	92.0
$AR \text{ PG1 (\%)}$	87.22 ± 1.15	87.1	85.5	88.7
$AR \text{ PG2 (\%)}$	85.43 ± 1.53	85.2	83.3	87.0

C PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE ESCALDADO CON LOS MÉTODOS CONTROL

1 Escaldado tradicional

En el **Cuadro 9** se muestran los resultados de los parámetros fisicoquímicos (ΔE y K), nutrimental (RAA) y enzimáticos ($AR\ PG1$ y $AR\ PG2$) para jugo de tomate, obtenido de los métodos de escaldado tradicional a 90 °C por 2.2 min y escaldado tradicional a 71.2 °C por 6 min. Para el control ET a 90 °C por 2.2 min se obtuvo una ΔE de 6.82 ± 1.01 , un K de $1.06 \pm 0.08\ Pa \cdot s^n$, una RAA $85.8 \pm 4.64\ \%$, una $AR\ PG1$ de $96.11 \pm 1.25\ \%$ y una $AR\ PG2$ de $95.87 \pm 1.81\ \%$. En cambio, para el control ET a 71.2 °C por 6 min, se encontró una ΔE 5.17 ± 0.33 , un K de $0.98 \pm 0.17\ Pa \cdot s^n$, una RAA de $88.6 \pm 3.52\ \%$, una $AR\ PG1$ de $97.26 \pm 1.82\ \%$ y una $AR\ PG2$ de $96.86 \pm 0.94\ \%$.

Pellegrini (2017) al realizar un escaldado tradicional a jugo de tomate a 90 °C por 3.5 min, reportó una diferencia total de color mucho más elevada (54.1), un índice de consistencia más bajo ($0.31\ Pa \cdot s^n$), una menor retención de ácido ascórbico (61.5 %) y una actividad remanente de PG1 inferior (91.5 %), en comparación con los datos obtenidos para el escaldado tradicional a 90 °C por 2.2 min del presente trabajo. Por otro lado, este mismo autor al utilizar un escaldado tradicional a 75 °C por 6 min, obtuvo una alta ΔE (35.5), un bajo K ($0.38\ Pa \cdot s^n$), menor RAA (60.4 %) y una $AR\ PG1$ (82.3 %) inferior, que los resultados reportados para el escaldado tradicional a 71.2 °C por 6 min. Estas diferencias pueden atribuirse a las distintas variedades y tamaños de los frutos de tomate utilizados, así como a las ligeras variaciones en las condiciones de tratamiento.

Cuadro 9. Variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate obtenido de los métodos control escaldado tradicional (ET).

Variable	Método control	
	ET (90 °C, 2.2 min)	ET (71.2 °C, 6 min)
ΔE	6.82 ± 1.01	5.17 ± 0.33
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n)$	1.06 ± 0.08	0.98 ± 0.17
$RAA \text{ (\%)}$	85.8 ± 4.64	88.6 ± 3.52
$AR \text{ PG1 (\%)}$	96.11 ± 1.25	97.26 ± 1.82
$AR \text{ PG2 (\%)}$	95.87 ± 1.81	96.86 ± 0.94

2 Escaldado con microondas con inmersión

En el **Cuadro 10** se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos (ΔE y K), nutrimental (RAA) y enzimáticos ($AR\ PG1$ y $AR\ PG2$) para jugo de tomate, obtenido de los métodos de escaldado con microondas con inmersión en agua a 90 °C por 2.2 min y escaldado tradicional a 71.2 °C por 6 min. Para el método control de EMCI a 90 °C, 2.2 min se consiguió una $\Delta E = 7.36 \pm 3.39$, un $K = 3.96 \pm 0.96\ Pa \cdot s^n$, una $RAA = 95.6 \pm 2.61\ \%$, una $AR\ PG1 = 96.92 \pm 2.31\ \%$ y una $AR\ PG2 = 95.69 \pm 3.36\ \%$. Mientras que para el control EMCI a 71.2 °C por 6 min, se encontró una ΔE de 6.99 ± 2.79 , un K de $2.95 \pm 0.46\ Pa \cdot s^n$, una RAA de $97.1 \pm 2.92\ \%$, una $AR\ PG1$ de $97.44 \pm 1.21\ \%$ y una $AR\ PG2$ $95.87 \pm 1.31\ \%$.

Por su parte, Pellegrini (2017) al aplicar un escaldado con microondas con inmersión en agua a tomate *Uva* a 90 °C por 3.5 min, obtuvo una $\Delta E = 56.4$ mucho más elevada, un $K = 0.36\ Pa \cdot s^n$ bajo, una menor $RAA = 70.7\ \%$ y una $AR\ PG1 = 71.7\ \%$ inferior, comparado con los resultados obtenidos en el escaldado con microondas con inmersión en agua a 90 °C por 2.2 min de este proyecto. Por otro lado, este mismo autor indicó que al utilizar un escaldado con microondas con inmersión en agua a 75 °C por 6 min, obtuvo una $\Delta E = 52.8$, un $K = 0.29\ Pa \cdot s^n$, una $RAA = 74.1\ \%$ y una $AR\ PG1 = 89.7\ \%$, resultados que difieren de los obtenidos con el método de escaldado tradicional a 71.2 °C por 6 min. Estas diferencias pueden atribuirse a las distintas variedades y tamaños de los tomates utilizados, pero también a que la transferencia de calor en tomate *Uva* pudo haber sido más rápida y con ello, tener un efecto más alto sobre los parámetros.

Cuadro 10. Variables de respuesta evaluadas en jugo de tomate obtenido de los métodos control escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI).

Variable	Método control	
	EMCI (90 °C, 2.2 min)	EMCI (71.2 °C, 6 min)
ΔE	7.36 ± 3.39	6.99 ± 2.79
$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n)$	3.96 ± 0.96	2.95 ± 0.46
$RAA \text{ (\%)}$	95.6 ± 2.61	97.1 ± 2.92
$AR \text{ PG1 (\%)}$	96.92 ± 2.31	97.44 ± 1.21
$AR \text{ PG2 (\%)}$	95.69 ± 3.36	95.87 ± 1.31

D CONTRASTE DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS, NUTRIMENTAL Y ENZIMÁTICOS DE JUGO DE TOMATE OBTENIDO DE LOS MÉTODOS SECUENCIALES OPTIMIZADOS Y LOS MÉTODOS CONTROL

1 Parámetros fisicoquímicos

a Diferencia total de color (ΔE)

Se puede apreciar en el **Cuadro 11** la diferencia total de color (ΔE) para jugo de tomate obtenida por los diferentes métodos de escaldado (óptimos y controles). El criterio para la optimización de los métodos secuenciales (EMSI + ET y EMSI + EMCI) fue minimizar la ΔE , sin embargo, se observa que la menor diferencia 5.17 ± 0.33 se obtuvo con el método control ET (71.2 °C, 6 min), lo que indica un mayor efecto de los métodos secuenciales sobre ΔE , eso podría deberse a la combinación de dos técnicas de escaldado. Respecto a los métodos control no se observa diferencia significativa entre ellos. Por otro lado, para el EMSI + ET y EMSI + EMCI, se aprecia que no existe diferencia estadística significativa entre la ΔE , es decir, ambos métodos causaron un efecto similar sobre esta variable.

Los carotenoides como licopeno, caroteno y xantofilas son responsables de los colores rojo, naranja y amarillo del tomate, éstos se encuentran de manera natural en forma del isómero *E* o *trans* y se consideran estructuras estables al calor aplicado durante el procesamiento y la cocción, sin embargo, ciertos factores como el calor, la luz y el oxígeno tienen un efecto sobre la isomerización y autooxidación de estos compuestos (Luna-Guevara y Delgado-Alvarado 2014).

Cuadro 11. Diferencia total de color experimental de jugo de tomate obtenido de las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

Método	ΔE
EMSI + ET (90 °C, 2.2 min)	$8.76 \pm 0.24^{b, c}$
EMSI + EMCI (71.2 °C, 6 min)	10.38 ± 0.06^c
ET (90 °C, 2.2 min)	$6.82 \pm 1.01^{a, b}$
ET (71.2 °C, 6 min)	5.17 ± 0.33^a
EMCI (90 °C, 2.2 min)	$7.36 \pm 3.39^{a, b, c}$
EMCI (71.2 °C, 6 min)	$6.99 \pm 2.79^{a, b}$

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher LSD = 3.29, $\alpha = 0.05$).

b Índice de consistencia (*K*)

En el **Cuadro 12** se puede observar el índice de consistencia (*K*) para jugo de tomate obtenido de los métodos de escaldado EMSI + ET, EMSI + EMCI, ET y EMCI. En la optimización de los métodos secuenciales se buscó obtener altos índices de consistencia y se aprecia que con el método secuencial empleando sólo microondas (EMSI + EMCI) se obtiene un *K* de $2.88 \pm 0.04 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ que comparado con $0.86 \pm 0.03 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ del método EMSI + ET fue significativamente mayor. Por otro lado, al contrastar el índice *K* del método EMSI + ET con los controles ET (90 °C, 2.2 min) y EMCI (90 °C, 2.2 min), se visualiza que el control EMCI fue significativamente mayor, lo cual puede deberse a que en los tratamientos que involucra un escaldado tradicional se realiza una molienda de los frutos antes del escaldado y con ello, se rompen los tejidos celulares y las enzimas degradadoras se encuentran con mayor disponibilidad para romper las estructuras de pectina ocasionando *K* más bajos. En cambio, al comparar el *K* del escaldado secuencial (EMSI + EMCI) con sus respectivos controles ET (71.2 °C, 6 min) y EMCI (71.2 °C, 6 min) se observa que sólo fue significativamente diferente al obtenido por el ET, esto puede atribuirse a que en este control se realizó una molienda del fruto antes del tratamiento, mientras que los otros métodos se aplicaron en el fruto entero, permitiendo obtener índices de consistencia más elevados.

Algunos autores argumentan en contra de la idea de que el calor es la principal causa de la pérdida de consistencia, indicando que puede deberse a los efectos mecánicos, como los esfuerzos de corte (Beresovsky y col 1995; Anthon y col 2008). Debido a que han demostrado que en evaporadores a escala de laboratorio, cuando el jugo es concentrado a pasta bajo presión reducida a temperaturas que oscilan entre 25 y 65 °C, se produce la misma pérdida de

Cuadro 12. Índice de consistencia experimental de jugo de tomate obtenido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

Método	K (Pa·sⁿ)
EMSI + ET (90 °C, 2.2 min)	0.86 ± 0.03 ^a
EMSI + EMCI (71.2 °C, 6 min)	2.88 ± 0.04 ^b
ET (90 °C, 2.2 min)	1.06 ± 0.08 ^a
ET (71.2 °C, 6 min)	0.98 ± 0.17 ^a
EMCI (90 °C, 2.2 min)	3.96 ± 0.96 ^c
EMCI (71.2 °C, 6 min)	2.95 ± 0.46 ^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher LSD = 0.79 Pa·sⁿ, $\alpha = 0.05$).

consistencia que se observa durante el procesamiento a alta temperatura. Se esperaba que la descomposición térmica de pectina fuera insignificante a esas temperaturas más bajas, pero no fue así. Por su parte, Beresovsky y col (1995) mostraron que al colocar jugo de tomate en un evaporador pero sin aplicar vacío o calor, se observaba una pérdida de consistencia posiblemente ocasionada por el cizallamiento debido a que el jugo se encontró en agitación. Por otro lado, Tibäck y col (2009) evaluaron los efectos de los tratamientos mecánicos individualmente y combinados con tratamientos térmicos posteriores sobre la consistencia de tomates y concluyeron que la disminución de la consistencia puede deberse a un mayor contacto entre las enzimas pectinasas y la pectina, lo que posiblemente implica un aumento de la descomposición de la pectina.

Por otra parte, Crelier y col (2001), indicaron que la disminución de viscosidad en productos a base de tomate, es consecuencia de la degradación de pectina por las enzimas pectin metil esterasa (PME) y poligalacturonasa (PG).

2 Parámetro nutrimental

a Retención de ácido ascórbico (RAA)

En el **Cuadro 13** se muestran los porcentajes de retención de ácido ascórbico para jugo de tomate obtenido de los diferentes métodos de escaldado. Los escaldados secuenciales presentaron una diferencia significativa, debido a que en el EMSI + ET se obtuvo una menor retención (82.3 ± 0.46) que en el EMSI + EMCI (91.5 ± 0.47), esto puede deberse a las diferentes condiciones temperatura y tiempo de escaldado, pero también a que en el EMSI + ET la muestra es sometida a una molienda antes del tratamiento, lo que permite que este nutrimento se encuentre mayormente expuesto a condiciones de oxígeno, luz y calor. Por otro

Cuadro 13. Retención de ácido ascórbico experimental de tomate obtenido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

Método	RAA (%)
EMSI + ET (90 °C, 2.2 min)	82.3 ± 0.46 ^a
EMSI + EMCI (71.2 °C, 6 min)	91.5 ± 0.47 ^{c, d}
ET (90 °C, 2.2 min)	85.8 ± 4.64 ^{a, b}
ET (71.2 °C, 6 min)	88.6 ± 3.52 ^{b, c}
EMCI (90 °C, 2.2 min)	95.6 ± 2.61 ^{d, e}
EMCI (71.2 °C, 6 min)	97.1 ± 2.92 ^e

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher LSD = 5.12 %, $\alpha = 0.05$).

lado, al comparar los métodos control entre sí, se observa una menor retención de ácido ascórbico en los tratamientos que involucra un ET, lo que concuerda con lo antes mencionado.

Diversos autores concuerdan en que el ácido ascórbico es severamente afectado por el procesamiento térmico debido a su alta solubilidad en agua y baja estabilidad térmica. Además, mencionan que la pérdida de este nutrimento puede presentarse como consecuencia de la ruptura de tejidos (Gutiérrez y col 2019; Luna-Guevara y col 2014).

Gutiérrez y col (2019) indican que al aplicar un tratamiento de rehogado (molienda y freído) en tomates, la degradación total del ácido ascórbico puede atribuirse a que previamente el tomate sufrió una ruptura celular durante el molido, lo que facilitó la degradación de la molécula, la cual probablemente reaccionó con el oxígeno favoreciendo la actividad de la enzima ácido ascórbico oxidasa, desencadenando la oxidación a la forma ácido dehidroascórbico (DHAA) y posteriormente la hidrólisis del DHAA al ácido 2,3-dicetogulónico, perdiendo así su beneficio nutrimental, aunado también a la elevada temperatura del proceso.

Por otra parte, estudios informan que en etapas correspondientes al procesamiento de tomate donde se realizó una trituración y el calentamiento de éste (*hot break*) a 90 °C por 5-10 min, se produjo una pérdida del 38 % de ácido ascórbico (Abushita y col 2000; Luna-Guevara y col 2014).

3 Parámetros enzimáticos

a Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (PG1)

La actividad remanente de poligalacturonasa 1 se muestra en el **Cuadro 14**. Los métodos

Cuadro 14. Actividad remanente de poligalacturonasa 1 (PG1) experimental de jugo de tomate obtenido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

Método	AR PG1 (%)
EMSI + ET (90 °C, 2.2 min)	89.01 ± 0.95 ^a
EMSI + EMCI (71.2 °C, 6 min)	86.58 ± 0.95 ^a
ET (90 °C, 2.2 min)	96.11 ± 1.25 ^b
ET (71.2 °C, 6 min)	97.26 ± 1.82 ^b
EMCI (90 °C, 2.2 min)	96.92 ± 2.31 ^b
EMCI (71.2 °C, 6 min)	97.44 ± 1.21 ^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher LSD = 2.67 %, $\alpha = 0.05$).

de escaldado secuenciales no presentaron diferencia estadística significativa en la inactivación de PG1, denotando que ambos métodos fueron igual de efectivos, en cambio, al compararse con los métodos control se observa una diferencia significativa, confirmando que los métodos secuenciales tuvieron mayor efecto sobre la enzima, debido a la combinación de dos tratamientos. Houben y col (2013) reportaron que la enzima fue completamente inactivada con un tratamiento isotérmico a 95 °C durante 5 min, en pequeñas muestras de puré (10 mL) empacadas en bolsas de polietileno. En cambio, Fachin y col (2002) obtuvieron un 58 % de actividad para PG después de un tratamiento térmico a 90 °C por 5 min, en una muestra de jugo de tomate en tubo capilar. Sus resultados estuvieron por debajo de los obtenidos en este proyecto, sin embargo, las técnicas utilizadas, así como los tamaños de muestra fueron bastante diferentes.

Por su parte, Pellegrini (2017) reporta remanencias para PG1 de 80.89 ± 1.09 y 83.89 ± 1.86 %, al realizar escaldado con microondas sin inmersión en agua a (90 °C, 1 min) y escaldado con microondas con inmersión en agua (90 °C, 1.1 min) en muestras de tomate, respectivamente, datos cercanos a los obtenidos en este proyecto.

b Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (PG2)

Para el caso de poligalacturonasa 2, en el **Cuadro 15** se aprecia la actividad remanente de la enzima en jugo de tomate obtenido de los diferentes métodos de escaldado. Los tratamientos secuenciales (EMSI + ET y EMSI + EMCI) fueron estadísticamente diferentes de los métodos control pero similares entre sí, esto indica que la combinación de dos tratamientos favorece mayormente la inactivación de la enzima PG2 que la aplicación de un solo tratamiento. Se aprecia que después de aplicar los diferentes tratamientos al fruto entero y al

Cuadro 15. Actividad remanente de poligalacturonasa 2 (PG2) experimental de jugo de tomate conseguido a las mejores condiciones de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional (EMSI + ET), escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua (EMSI + EMCI), escaldado tradicional (ET) (control) y escaldado con microondas con inmersión en agua (EMCI) (control).

Método	AR PG2 (%)
EMSI + ET (90 °C, 2.2 min)	87.42 ± 1.14 ^a
EMSI + EMCI (71.2 °C, 6 min)	84.49 ± 0.38 ^a
ET (90 °C, 2.2 min)	95.87 ± 1.81 ^b
ET (71.2 °C, 6 min)	96.86 ± 0.94 ^b
EMCI (90 °C, 2.2 min)	95.69 ± 3.36 ^b
EMCI (71.2 °C, 6 min)	95.87 ± 1.31 ^b

Letras diferentes en una misma columna indican diferencia significativa (Fisher LSD = 3.13 %, $\alpha = 0.05$).

jugo de tomate, se retiene un alto porcentaje de la enzima PG2, sin embargo, esto concuerda con lo reportado por Rabelo (2012), debido a que indica que ninguno de los tratamientos aplicados en jugo de anacardo (nuez de la india) y jugo de guanábana fue capaz de inactivar completamente las enzimas (entre éstas PG). Este autor señaló que los jugos fueron sometidos a diferentes tratamientos térmicos (55, 65, 75, 85 y 95 ° C) por diferentes períodos de tiempo (1, 3, 5, 10, 15, 20 y 30 min) y que, solamente los tratamientos a condiciones de 85 ° C y 95 °C por 30 min condujeron a la mayor inactivación de PG, registrando un 40% de remanencia (para ambas temperaturas) en jugo de anacardo, mientras que en jugo de guanábana se retuvo 26 % (a 85 °C) y 18 % (a 95 °C) de actividad. Concluyendo con esto que, las enzimas del jugo de anacardo fueron más resistentes al calentamiento que las del jugo de guanábana, atribuyendo su termoestabilidad a las características particulares de cada fruto y los diferentes métodos de preparación. Por otra parte, este mismo autor reportó parámetros cinéticos de inactivación para PG, entre estos el tiempo de reducción decimal (D), es decir, el tiempo requerido para para inactivar el 90 % de la enzima PG a una temperatura de referencia (95 °C); para el jugo de anacardo $D = 46.1$ min y para el jugo de guanábana $D = 35.4$ min.

VIII CONCLUSIONES

La mejor combinación de temperatura y tiempo durante el escaldado secuencial EMSI + ET, que permite obtener jugo de tomate con buenos parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimáticos, fue 90 °C por 2.2 min. La temperatura de escaldado se encontró dentro del rango de la inactivación en caliente (*hot break*).

Por otro lado, para el método secuencial EMSI + EMCI la mejor combinación de temperatura y tiempo fue 71.2 °C por 6 min. Con esta condición se obtuvo jugo de tomate con los mejores atributos fisicoquímicos, nutrimental y enzimáticos. En este tratamiento, la temperatura cae en la categoría de inactivación en frío (*cold break*).

La validación de los modelos experimentales bajo condiciones optimizadas indicó que los modelos de predicción fueron adecuados y reproducibles, debido a que las variables de respuesta experimentales se encontraron dentro de los intervalos predichos por los modelos.

En el contraste de los parámetros fisicoquímicos, no hubo diferencia significativa para la ΔE entre los dos métodos secuenciales de escaldado, ni entre éstos y el control EMCI (90 °C, 2.2 min). Además, la ΔE para el método secuencial EMSI + ET (8.76) fue similar a la de los controles. Por otro lado, al comparar los dos métodos de escaldado secuenciales, el índice de consistencia fue mayor para el EMSI + EMCI (2.88 Pa·sⁿ); índice de consistencia similar al del control EMCI (71.2 °C, 6 min) y superior al del ET (71.2 °C, 6 min).

Respecto al parámetro nutrimental, entre los métodos secuenciales, la retención de ácido ascórbico fue más alta con el EMSI + EMCI (91.5 %). Esta retención fue similar a la del ET (71.2 °C, 6 min) e inferior a la del EMCI (71.2 °C, 6 min) (97.1 %).

Con referencia a los parámetros enzimáticos, los métodos secuenciales EMSI + ET y EMSI + EMCI lograron inactivar las isoenzimas PG1 y PG2 en mayor medida que los métodos control. Asimismo, entre ambos métodos secuenciales no hubo diferencia significativa en la inactivación de PG1 y PG2.

El método secuencial EMSI + EMCI generó un mejor índice de consistencia y mayor retención de ácido ascórbico, que el escaldado secuencial EMSI + ET, por lo que, se recomienda utilizar el método secuencial en el que se utiliza sólo microondas.

Se sugiere ampliar la investigación del escaldado secuencial EMSI + EMCI en otros frutos y hortalizas contrastando con los métodos ET, EMCI y EMSI.

IX BIBLIOGRAFÍA

- Abushita AA, Daood HG, Blacs PA. 2000. Change in Carotenoids and Antioxidant Vitamins in Tomato as a Function of Varietal and Technological Factors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48(6):2075-2081.
- 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(2):54-62.
- Aguiló-Aguayo I, Oms-Oliu G, Soliva-Fortuny R, Martín-Belloso O. 2009. Changes in quality attributes throughout storage of strawberry juice processed by high-intensity pulsed electric fields or heat treatments. *LWT - Food Science and Technology* 42:813-818.
- Aguiló-Aguayo I, Soliva-Fortuny R, Martín-Belloso O. 2008. Comparative study on color, viscosity and related enzymes of tomato juice treated by high-intensity pulsed electric fields or heat. *European Food Research and Technology* 227:599-606.
- Andrade RD, Torres R, Montes EJ, Pérez OA, Bustamante CE, Mora BB. 2010. Effect of temperature on the rheological behavior of zapote pulp (*Calocarpum sapota* Merr). *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia* 33(2):138-144.
- Anthon GE, Diaz JV, Barrett DM. 2008. Changes in Pectins and Product Consistency during the Concentration of Tomato Juice to Paste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 56(16):7100-7105.
- Anthon GE, Sekine Y, Watanabe N, Barrett DM. 2002. Thermal inactivation of pectin methylesterase, polygalacturonase, and peroxidase in tomato juice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50(21):6153-6159.

- [AOAC] Association of Official Analytical Chemists. 2012. AOAC Official Method Ascorbic Acid in Vitamin Preparations and Juices. Washington; Editorial AOAC International. 1500 p.
- Arrázola-Paternina G, Alvis-Bermúdez A, García-Mogollón C. 2016. Efecto del tratamiento de escaldado sobre la actividad enzimática de la polifenol oxidasa en dos variedades de batata (*Ipomoea batatas* Lam.). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 10(1):80-88.
- Ávila-Gaxiola E, Delgado-Vargas F, Zazueta-Niebla J, López-Angulo G, Vega-García M, Caro-Corrales J. 2015. Variable retort temperature profiles for canned papaya puree. Journal of Food Process Engineering 39(1):11-18.
- Bacio LV. 2007. Optimización multi-objetivo en el problema de metodología de superficie multi-respuesta [Tesis de maestría]. Guamajuato, Guanajuato: Centro de Investigación en Matemáticas, A. C. 149 p.
- Badui S. 2006. Química de los alimentos. 4ª Edición. México: Pearson Educación. 736 p.
- Beresovsky N, Kopelman IJ, Mizrahi S. 1995. The role of pulp interparticle interaction in determining tomato juice viscosity. Journal of Food Processing and Preservation 19:133-146.
- Blach D, Donado J, Pinzón M. 2011. Actividad de la peroxidasa y polifenol oxidasa en rodajas de carambolo (*Averrhoa carambola* L.) fresco cortado durante su almacenamiento en atmósfera modificada. Alimentos Hoy 19(20):34-42.
- 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(3):245-259.

- Cárdenas FI, Tamayo R, Ayón LE y col. 2015. Cambios fisiológicos y de actividad de enzimas del sistema antioxidante en tomate con tolerancia inducida al daño por frío. Sinaloa. Disponible de: <http://sistemanodalsinaloa.gob.mx>. Consultado en abril de 2018.
- Caro OC. 2019. Evaluación de parámetros de calidad e ingenieriles en la cocción de chayote (*Sechium edule* SW.) [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 122p.
- Castorena-García JH, Cano-Hernández M, Fajardo-Herrera E, Robles-de la Torre R. 2013. Inactivación de poligalacturonasa de tomate con campo eléctrico. Ingeniería Agrícola y Biosistemas 5(1):17-22.
- Castro I, Macedo B, Teixeira J, Vicente A. 2004. The Effect of Electric Field on Important Food-processing Enzymes: Comparison of Inactivation Kinetics under Conventional and Ohmic Heating. Journal of Food Science 69(9):C696-C701.
- Chakraborty S, Baier D, Knorr D, Mishra HN. 2015. High Pressure Inactivation of Polygalacturonase, Pectinmethylesterase and Polyphenoloxidase in Strawberry Puree mixed with Sugar. Food and Bioproducts Processing 95:281-291.
- Chandrasekaran S, Ramanathan S, Basak T. 2013. Microwave food processing-A review. Food Research International 52(1): 243-261.
- Crelier S, Robert MC, Claude J, Juillerat MA. 2001. Tomato (*Lycopersicon esculentum*) Pectin Methylesterase and Polygalacturonase Behaviors Regarding Heat- and Pressure-Induced Inactivation. Journal of Agricultural and Food Chemistry 49:5566-5575.
- Crisanto-Juárez AU, Vera-Guzmán AM, Chávez-Servia JL, Carrillo-Rodríguez JC. 2010. Calidad de frutos de tomates silvestres (*Lycopersicon esculentum* var. *Cerasiforme* Dunal) de Oaxaca, México. Revista Fitotecnia Mexicana 33(4):7-13.

- Derringer G, Suich R. 1980. Simultaneous optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology* 12(4):214-219.
- Devece C, Rodríguez-López JN, Fenoll LG, Tudela J, Catalá JM, de los Reyes E, García-Cánovas F. 1999. Enzyme Inactivation Analysis for Industrial Blanching Applications: Comparison of Microwave, Conventional, and Combination Heat Treatments on Mushroom Polyphenoloxidase Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47:4506-4511.
- Dewanto V, Wu X, Adom KK, Hai R. 2002. Thermal Processing Enhances the Nutritional Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50:3010-3014.
- Díaz R. 2000. Control difuso con capacidad de emulación PID [Tesis de maestría]. Monterrey, Nuevo León: Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. 49 p.
- Dorantes-Alvarez L, Jaramillo-Flores E, González K, Martínez R, Parada L. 2011. Blanching peppers using microwaves. *Procedia Food Science* 1:178-183.
- Elfneesh F, Tekalign T, Solomon W. 2011. Processing quality of improved potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars as influenced by growing environment and blanching. *African Journal of Food Science* 5(6):324-332.
- El-Raey M, Ibrahim G, Eldahshan O. 2013. Lycopene and Lutein; A review for their Chemistry and Medicinal Uses. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry* 2(1):245-254.
- Erbay Z, Icier F. 2009. Optimization of hot air drying of olive leaves using response surface methodology. *Journal of Food Engineering* 91:533-541.

- Escalona V, Alvarado P, Monardes H, Urbina C, Martin A. 2009. 2. Manual De Cultivo De Tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Chile: Universidad de Chile, Nodo Hortícola VI Región. Disponible de: <http://www.hortyfresco.uchile.cl>. Consultado en abril de 2018.
- Fabila G. 1998. Diseño y análisis de experimentos industriales. 2ª ed. México: Universidad Iberoamericana. 20 p.
- Fachin D, Smout C, Verlent I, Ly Nguyen B, Van Loey AM, Hendrickx ME. 2004. Inactivation kinetics of purified tomato polygalacturonase by thermal and high-pressure processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52(9):2697-2703.
- Fachin D, Van A, Indrawati, Ludikhuyze L, Hendrickx M. 2002. Thermal and High-Pressure Inactivation of Tomato Polygalacturonase: A Kinetic Study. *Journal of Food Science* 67(5):1610-1615.
- Fachin D, Van AM, Ly B, Verlent I, Indrawati, Hendrickx ME. 2003. Inactivation kinetics of polygalacturonase in tomato juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 4:135-142.
- [FAOSTAT] Base de datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2018. Disponible en <http://faostat.fao.org>. Consultado en: febrero de 2020.
- [FEHD] Food and Environmental Hygiene Department. 2005. Microwave cooking and food safety. Hong Kong: Food and Environmental Hygiene Department. Disponible de: <https://www.cfs.gov.hk>. Consultado en abril de 2018.
- Fernández-Ruíz V, Cámara M, Quintela JC. 2007. Ingredientes bioactivos de tomate: el licopeno. *Nutrición clínica y dietética hospitalaria* 27(3):36-40.
- Fennema O. 2000. Química de los alimentos. 3ª Edición. España: Acribia. 1166 p.

- Figuerola F, Sosa M, López A, Palou E. 2016. Retención de ácido ascórbico en jugo de manzana después de tratamientos térmicos o con luz ultravioleta. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* 1(2):285-289.
- García CV. 2011. Expresión de genes involucrados en la síntesis de carotenoides en el fruto de tomate por la aplicación de oligogalacturónidos y ethephon [Tesis de Maestría]. Hermosillo, Sonora: Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. 67 p.
- Gutiérrez J, Santiago YO, Hernández AD, Pinedo M, López G, López CU. 2019. Influencia de los métodos de cocción sobre la actividad antioxidante y compuestos bioactivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Nova Scientia Revista de Investigación de la Universidad De la Salle Bajío* 11(1):53-68.
- Hong-Wei X, Zhongli P, Li-Zhen D, Hamed M, Xu-Hai Y, Arun SM, Zhen-Jiang G, Qian Z. 2017. Recent developments and trends in thermal blanching – A comprehensive review. *Information Processing in Agriculture* 4:101-127.
- Houben K, Kermani ZJ, Van S, Jolie RP, Van AM, Hendrickx ME. 2013. Thermal and High-Pressure Stability of Pectinmethylesterase, Polygalacturonase, β -Galactosidase and α -Arabinofuranosidase in a Tomato Matrix: Towards the Creation of Specific Endogenous Enzyme Populations Through Processing. *Food and Bioprocess Technology* 6:3368-3380.
- 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(12):E2774-E2781.
- Iribe R. 2014. “Simulación De La Transferencia De Calor En El Proceso De Escaldado E Hidroenfriado En Floretes De Brócoli (*Brassica oleracea* L)” [Tesis de Maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 117p.

- INTAGRI. 2018. El Cultivo de Tomate. México. Disponible de: <https://www.intagri.com>. Consultado en abril de 2018.
- INTAGRI. 2017. Tipos y Especialidades de Tomate. México. Disponible de: <https://www.intagri.com>. Consultado en abril de 2018.
- Jayathunge K, Grant I, Koidis A. 2017. Integration of design of experiment, surface response methodology, and multilayer validation to predict the effect of blanching on color of tomato juice. *Journal of Food Processing and Preservation* 41(6):1-10.
- Khoo H-E, Prasad KN, Kong K-W, Jiang Y, Ismail A. 2011. Carotenoids and their isomers: color pigments in fruits and vegetables. *Molecules* 16(2):1710-1738.
- Kidmose U, Martens HJ. 1999. Changes in texture, microstructure and nutritional quality of carrot slices during blanching and freezing. *Journal of the Science Food and Agriculture* 79:1747–1753.
- Kidmose U, Kaack K. 1999. Changes in Texture and Nutritional Quality of Green Asparagus Spears (*Asparagus officinalis* L.) during Microwave Blanching and Cryogenic Freezing. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 49(2):110-116.
- Klopotek Y, Otto K, Böhm V. 2005. Processing Strawberries to Different Products Alters Contents of Vitamin C, Total Phenolics, Total Anthocyanins, and Antioxidant Capacity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53(14):5640-5646.
- Lin S, Brewer MS. 2005. Effects of blanching method on the quality characteristics of frozen peas. *Journal of Food Quality* 28:350-360.
- Long J. 1995. De tomates y jitomates en el siglo XVI. México: Instituto de investigaciones históricas. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://www.historicas.unam.mx>. Consultado en mayo de 2018.

- Luna-Guevara ML, Delgado-Alvarado A. 2014. Importancia, contribución y estabilidad de antioxidantes en frutos y productos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Avances en Investigación Agropecuaria 18(1):51-66.
- Machado MB, Leonardo LF, Reis G, Telis-Romero J. 2018. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. Food Research International 105:905-912.
- Martínez-Valverde I, Periago MJ, Provan G, Chesson Andrew. 2002. Phenolic compounds, lycopene and antioxidant activity in commercial varieties of tomato (*Lycopersicum esculentum*). Journal of the Science of Food and Agriculture 82:323-330.
- Mayeaux M, Xu Z, King JM, Prinyawiwatkul W. 2006. Effects of Cooking Conditions on the Lycopene Content in Tomatoes. Journal of Food Science 71(8):C461-C464.
- Mendoza y Herrera. 2012. Cinética de Inactivación de la Enzima Peroxidasa, Color y Textura en Papa Criolla (*Solanum tuberosum* Grupo phureja) sometida a tres Condiciones de Escaldado. Información Tecnológica 23(4):73-82.
- 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(7):727-736.
- Milán-Carrillo J, Reyes-Moreno C, Camacho-Hernández IL, Rouzaud-Sandez O. 2002. Optimisation of extrusion process to transform hardened chickpeas (*Cicer arietinum* L) into a useful product. Journal of the Science of Food and Agriculture 82(14):1718-1728.
- Mitschka P. 1982. Simple conversion of Brookfield R.V.T. readings into viscosity functions. Rheologica Acta 21:207-209.

- Morante J, Agnieszka A, Bru-Martínez R, Carranza M, Pico-Saltos R, Nieto E. 2014. Distribución, localización e inhibidores de las polifenol oxidasas en frutos usados como alimento. *Revista Ciencia y Tecnología. Universidad Técnica Estatal de Quevedo* 7(1):23-31.
- Myers R, Montgomery D, Anderson C. 2016. *Response Surface Methodology*. 4^a edición. Wiley & Sons Incorporation. 856 p.
- Pellegrini JD. 2017. Inactivación de poligalacturonasa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando microondas [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 118 p.
- Pellicer JA, Navarro P, Gómez-López VM. 2019. Pulsed light inactivation of polygalacturonase. *Food Chemistry* 271:109-113.
- 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.
- Ponne CT, Baysal T, Yuksel D. 1994. Blanching leafy vegetables with electromagnetic energy. *Journal of Food Science* 59(5):1037-1041.
- Rabelo M. 2012. Termoestabilidade de enzimas dos sucos de graviola e caju [Tesis de maestría]. Ceará, Brasil: Universidad Federal de Ceará. 55 p.
- Ranjan S, Dasgupta N, Walia N, Chand CT, Ramalingam C. 2016. Microwave Blanching: An Emerging Trend In Food Engineering And Its Effects On *Capsicum Annuum* L. *Journal of Food Process Engineering* 40:1-8.
- Regalado A, Noriega OA. 2008. Comportamiento reológico de un fluido. *Ciencia y Mar* XII(36):35-42.

- Rodríguez JP, Narváez CE, Restrepo LP. 2006. Estudio de la actividad enzimática de poligalacturonasa en la corteza de pitaya amarilla (*Acanthocereus pitajaya*). Acta biológica colombiana 11:65-74.
- Russell R. 1984. Purification and characterization of tomato polygalacturonase converter. European Journal of Biochemistry 144:217-221.
- [SAGARPA] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2010. Monografía del Jitomate. México. Disponible en www.sagarpa.com.mx. Consultado en abril de 2018.
- [SAGARPA] Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. 2017. Planeación agrícola nacional. México. Disponible en www.sagarpa.com.mx. Consultado en abril de 2018.
- 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 Science and Technology 53:501–510.
- [SIAP] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2018. México. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx>. Consultado en febrero de 2020.
- Soltero C. 2019. Inactivación de peroxidasa en brócoli (*Brassica oleracea* L.) empleando microondas [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 123 p.
- Sosa-Morales. N-M. 2012. El jitomate (*Solanum lycopersicum*): aporte nutricional, enfermedades, postcosecha y tecnologías para su almacenamiento en fresco. Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos 6(1):40-53.

- Sun T, Tang J, Powers JR. 2007. Antioxidant activity and quality of asparagus affected by microwave-circulated water combination and conventional sterilization. *Food Chemistry* 100:813-819.
- Téllez-Mora P, Peraza-Luna FA, Feria-Velasco A, y Andrade-González I. 2012. Optimización del proceso de fermentación para la producción de tequila, utilizando la metodología de superficie de respuesta (MSR). *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 11(1): 163-176
- Tibäck EA, Svelander CA, Colle IJ, AltskärAI, Alminger MA, Hendrickx ME, Ahrné LM, Langton MI. 2009. Mechanical and Thermal Pretreatments of Crushed Tomatoes: Effects on Consistency and In Vitro Accessibility of Lycopene. *Food Engineering & Physical Properties* 74(7):E386-E395.
- Umar M, Hussain S, Jabbar S. 2015. Tomato processing, lycopene and health benefits: A review. *Science Letters* 3(1):1-5.
- [USDA] United States Department of Agriculture. 2005. Shipping Point and Market Inspection Instructions. Disponible en www.usda.gov. Consultado en abril de 2018.
- [USDA] United States Department of Agriculture. 2018. National Nutrient Database for Standard Reference Legacy Release. Disponible en <https://ndb.nal.usda.gov>. Consultado en abril de 2018.
- Valenzuela MS, Shot MV, Melo O. 2018. Caracterización económica de la cadena agroalimentaria del tomate de uso industrial. Santiago, Chile: Sistema Integral de Información y Atención Ciudadana. Disponible de: www.odepa.gob.cl. Consultado en febrero de 2020.

- Vásquez AM. 2015. Estimación de las coordenadas CIEL*a*b* en concentrados de tomate utilizando imágenes digitales [Tesis de maestría]. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 153 p.
- Vázquez YV. 2014. Deshidratación de chile (*Capsicum annuum* L.) poblano entero por secado convectivo, microondas y combinado convectivo-microondas [Tesis de maestría]. Culiacán, Sinaloa: Universidad Autónoma de Sinaloa. 150 p.
- Verlent I, Hendrickx M, Rovere P, Moldenaers P, Van Loey A. 2006. Rheological properties of tomato based products after thermal and high-pressure treatment. *Journal of Food Science* 71(3):S243–S248.
- Verlent I, Hendrickx M, Verbeyst A, Van Loey A. 2007. Effect of temperature and pressure on the combined action of purified tomato pectinmethylesterase and polygalacturonase in presence of pectin. *Enzyme and Microbial Technology* 40:1141–1146.
- Wen-Hsin G, Cheng-Yi T, Ching-Han H. 2008. Cis-Trans Isomerizations of β -Carotene and Lycopene: A Theoretical Study. *The Journal of Physical Chemistry B* 112:12158-12167.
- Yaguas OJ. 2017. Metodología De Superficie De Respuesta Para La Optimización De Una Producción Agrícola. *Revista de la Ingeniería Industrial* 16(1):205-222.

ABREVIATURAS

α -Af	α -arabinofuranosidasa
AR	Actividad remanente (%)
Ác.	Ácido
DHAA	Ácido dihidroascórbico
AR PG1	Actividad remanente de poligalacturonasa 1
AR PG2	Actividad remanente de poligalacturonasa 2
β -Gal	β -galactosidasa
b^*	Coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul)
a^*	Coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde)
R^2_{aj}	Coeficiente de determinación ajustado
CV.	Coeficiente de variación
ϵ'	Constante dieléctrica
col.	Colaboradores
DBO	Demanda biológica de oxígeno
D	Derivativo
DCPI	2,6-Diclorofenolindofenol
ΔE	Diferencia total de color
EMCI	Escaldado con microondas con inmersión en agua

EMSI + EMCI Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua

EMSI + ET Escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional

ET Escaldado tradicional

τ Esfuerzo de corte (Pa)

$k_{\alpha\tau}$ Factor de conversión específico para el eje

$k_{N\dot{\gamma}}$ Factor de conversión dependiente del número de eje y el índice de comportamiento de flujo (n)

ε'' Factor de pérdida dieléctrica

x_1 Factor temperatura

x_2 Factor tiempo

GHz Gigahercios

°C Grados Celsius

g Gramos

×g Gravedad

n Índice de comportamiento de flujo (adimensional)

K Índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)

I Integral

kcal Kilocalorías

kJ	Kilojoule
kW	Kilowatt
L	Litro
λ	Longitud de onda
L^*	Luminosidad
MHz	Megahercios
MSR	Metodología de Superficie de Respuesta
M	Metro
F	mg de ácido ascórbico equivalente a 1.0 mL de DCPI
μg	Microgramos
μmol	Micromol
μL	Microlitro
mg	Miligramos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
min	Minutos
X	mL de DCPI gastados para titular la muestra (jugo + HPO_3 + CH_3COOH)
M	Molar
nm	Nanómetro

N	Normalidad
PME	Pectin metil esterasa
POD	Peroxidasa
PPO	Polifenol oxidasa
PG	Poligalacturonasa
PG1	Poligalacturonasa 1
PG2	Poligalacturonasa 2
%	Por ciento
pH	Potencial de hidrógeno
<i>p</i>	Probabilidad
<i>d_p</i>	Profundidad de penetración
<i>B</i>	Promedio de mL gastados para titular el blanco de $\text{HPO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$.
P	Proporcional
LSD	Prueba de Fisher
α	Rango de torque
RAA	Retención de ácido ascórbico
rpm	Revoluciones por minuto
s	Segundos
<i>D</i>	Tiempo de reducción decimal

t	Toneladas
$\dot{\gamma}$	Velocidad de corte (s^{-1})
N	Velocidad de rotación (rpm)
Y	Volumen en mL de la alícuota tomada para la titulación
E	Volumen en mL de la muestra de jugo
V	Volumen total en mL de la solución de prueba (jugo + HPO_3 + CH_3COOH)

ANEXOS

Anexo 1. Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos, nutrimental y enzimáticos para jugo de tomate obtenido del escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional a diferentes temperaturas y tiempos.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	ΔE	$K \text{ (Pa}\cdot\text{s}^n)$	RAA (%)	AR PG1 (%)	AR PG2 (%)
64.4	2.6	6.3	0.39	85.5	97.3	95.4
85.6	2.6	8.8	0.80	82.6	89.5	87.4
64.4	5.4	6.9	0.70	83.5	96.8	90.4
85.6	5.4	10.0	1.20	78.4	86.2	81.9
60.0	4.0	6.8	0.50	86.3	98.9	94.8
90.0	4.0	9.1	1.00	80.1	87.3	84.8
75.0	2.0	7.2	0.59	85.0	95.9	93.8
75.0	6.0	8.7	1.06	81.1	89.5	82.9
75.0	4.0	8.4	0.80	84.0	92.7	89.3
75.0	4.0	8.8	0.84	83.7	92.5	88.3
75.0	4.0	8.3	0.95	82.5	91.1	90.6
75.0	4.0	8.2	0.90	82.9	90.4	86.6
75.0	4.0	8.0	0.80	83.2	91.7	86.5

Diseño Central Compuesto Rotable

Anexo 2. Modelos en términos de los factores reales para ΔE , K , RAA , $AR PG1$ y $AR PG2$ obtenidos del escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.

$$\Delta E = -1.01 + 0.10 T + 0.35 t$$

$$K = -1.11 + 0.02 T + 0.12 t$$

$$RAA = 101.95 - 0.20 T - 1.04 t$$

$$AR PG1 = 127.60 - 0.41 T - 1.14 t$$

$$AR PG2 = 124.92 - 0.36 T - 2.29 t$$

Donde T es el factor temperatura y t el factor tiempo.

Anexo 3. Resultados experimentales de parámetros fisicoquímicos, nutricional y enzimáticos para jugo de tomate obtenido del escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua a diferentes temperaturas y tiempos.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	ΔE	K (Pa·sⁿ)	RAA (%)	AR PG1 (%)	AR PG2 (%)
64.4	2.6	8.73	2.40	97.3	95.7	93.0
85.6	2.6	11.22	3.20	92.5	88.8	86.6
64.4	5.4	9.28	2.93	94.2	89.5	87.8
85.6	5.4	11.87	3.71	86.3	81.6	79.9
60.0	4.0	8.94	2.50	95.6	94.1	91.6
90.0	4.0	11.99	3.40	89.1	86.3	84.2
75.0	2.0	9.85	2.60	96.6	91.8	92.8
75.0	6.0	10.94	3.56	90.7	87.4	85.8
75.0	4.0	10.4	2.98	94.3	87.9	86.0
75.0	4.0	10.68	3.06	93.5	90.1	89.5
75.0	4.0	10.88	3.12	92.2	89.4	88.5
75.0	4.0	10.54	3.03	93.2	89.0	89.6
75.0	4.0	10.33	2.84	92.8	90.5	87.5

Diseño Central Compuesto Rotable

Anexo 4. Modelos en términos de los factores reales para ΔE , K , RAA , $AR PG1$ y $AR PG2$ obtenidos del escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

$$\Delta E = 1.16 + 0.11 T + 0.24 t$$

$$K = -0.34 + 0.03 T + 0.21 t$$

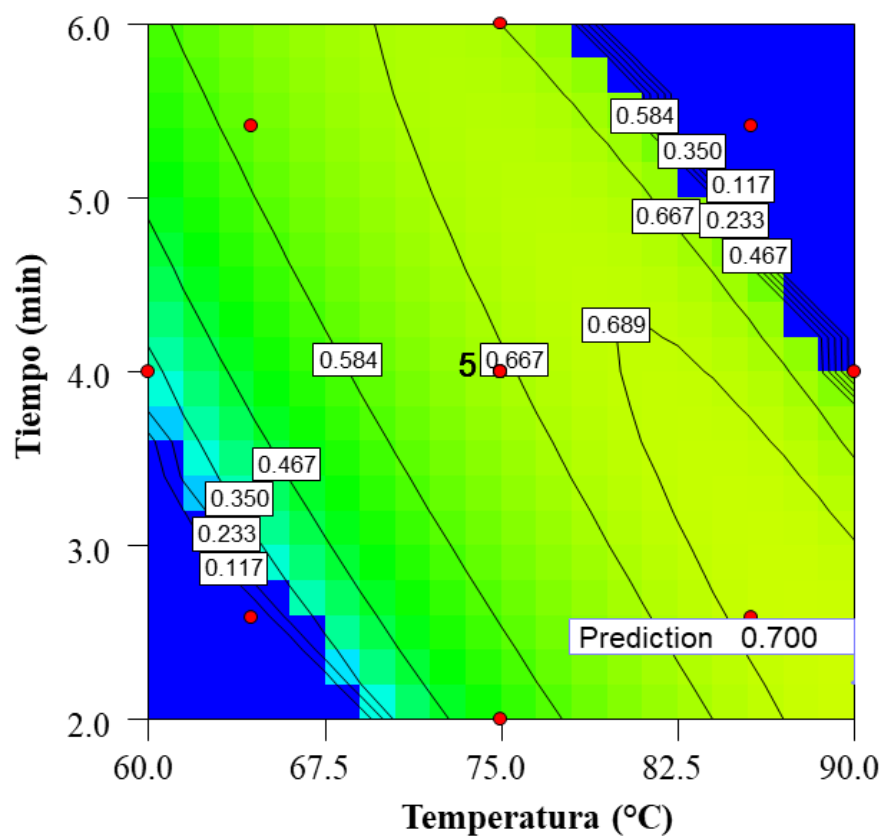
$$RAA = 118.53 - 0.26 T - 1.56 t$$

$$AR PG1 = 119.16 - 0.30 T - 1.73 t$$

$$AR PG2 = 117.50 - 0.29 T - 1.93 t$$

Donde T es el factor temperatura y t el factor tiempo.

Anexo 5. Gráfico de contornos de deseabilidad global para optimización del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado tradicional.



Anexo 6. Gráfico de contornos de deseabilidad global para optimización del método de escaldado con microondas sin inmersión en agua seguido de escaldado con microondas con inmersión en agua.

