



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

**"Efecto del tratamiento con irradiación UV-C
sobre la degradación de ácido ascórbico
en una bebida modelo"**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

ESQUIVEL ORTEGA DAFNE

Asesores:

**Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza
I.A. Alfredo Álvarez Cárdenas**

CUAUTILÁN IZCALLI , ESTADO DE MÉXICO

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



VNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo Profesional

Efecto del tratamiento con irradiación UV-C sobre la degradación de ácido ascórbico en una bebida modelo.

Que presenta la pasante: Dafne Esquivel Ortega

Con número de cuenta: 311137798 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Agosto de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>Dra. María de la Luz Zambrano Zaragoza</u>	
VOCAL	<u>I.A. Edgar Francisco Arechavaleta Vázquez</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Miriam Alvarez Velasco</u>	
1er. SUPLENTE	<u>M.N.H. Juana Gutiérrez Bautista</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Arturo Munguía Sánchez</u>	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

AGRADECIMIENTOS

- Al proyecto PAPIIT IT201617, “Efecto de recubrimientos nanoparticulados y tratamiento con luz UV-C sobre la actividad antioxidante, enzimática e integridad de frutas y hortalizas cortadas” de la Dirección General de Asuntos de Personal Académico de la Universidad Nacional Autónoma de México (DGAPA-UNAM), por el financiamiento para la realización de este trabajo
- Al proyecto PIAPI1801 “Evaluación y diseño de sistemas nanoparticulados para la conservación refrigerada y/o congelada de productos de origen vegetal. Proyecto interno de FES-Cuautitlán-UNAM, por el apoyo en la adquisición de reactivos para el desarrollo de este trabajo.
- Dafne Esquivel Ortega, agradece el apoyo técnico para la realización de pruebas colorimétricas y texturales de la Dra. María de los Ángeles Cornejo Villegas, en el Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos de la UIM.

LUGAR DE REALIZACIÓN

Este trabajo se realizó en la Unidad de Investigación Multidisciplinaria, Laboratorio de Transformación y Tecnologías Emergentes de Alimentos L-16, Campo IV FES-Cuautitlán-UNAM.

DEDICATORIAS

A mis padres **Ramiro** y **Blanca** por su apoyo incondicional no solo en esta etapa sino a lo largo de mi vida que me han dado la mejor educación y valores para realizar las cosas bien y cerrar los ciclos como se debe, su motivación, paciencia, comprensión, amor y siempre dar lo mejor de ellos para que a mí y mi hermano no nos falte nada, este logro es de ustedes que siempre han estado ahí, quiero hacerlos sentir orgullosos, gracias por todo, los amo mucho.

A mi hermano, **Ramiro** que madrugó cuando no debía, me acompañó a muchas aventuras en CU y en cada actividad que tenía y sobre todo su gran apoyo toda la vida, a pesar de las diferencias nos apoyamos el uno al otro y siempre estaré para él, espero que este logro lo motive a cumplir más objetivos y nunca se de por vencido, estamos juntos, te quiero mucho.

A Alexa, Diego, Michelle, Nico por siempre sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba y creer en mí para todo, disfruto el tiempo que pasamos juntos y espero que siga siendo así hasta que todos logremos nuestras metas y seamos tan unidos como ahora, los quiero.

A mi familia, Esquivel y Ortega, tíos, tía, primos, primas (losers), abuelas, abuelos que, aunque ya no estén algunos sé que me desean lo mejor, y cada uno de ellos me hizo crecer como persona.

A mis asesores de tesis: Dra. Luz Zambrano Zaragoza, me ha apoyado hasta ahora y enseñado a dar el 100% de mí, sé que no siempre fui ejemplar, pero siempre me dio una razón para seguir con este proyecto y no dejarlo, al Ing. Alfredo Álvarez Cárdenas, por aceptarme en el taller y siempre insistir en cada detalle, a pesar de

no ser la mejor alumna agradezco su aportación en mí como persona y en todo lo que hago, admiro a ambos por su pasión a su trabajo, gracias.

A mis sinodales: Dra. Luz Zambrano Zaragoza, Ing. Edgar Arechavaleta Vásquez, Ing. Miriam Álvarez Velazco, Ing. Juana Gutiérrez Bautista, Ing. Arturo Munguía Sánchez por sus aportaciones a este trabajo, paciencia y tiempo, gracias.

A mis profesores de la carrera por todas sus enseñanzas: Antonio Trejo, Yolanda López, Saturnino, Edith Fuentes, Laura Cortázar, Francisco López, Elsa Gutiérrez, Virginia Delgado, Verónica Romero, Clara Inés Álvarez, Juanita Gutiérrez, Jonathan Coria, Víctor Ávalos, Manuel Alarcón, Cristian Alí y Ricardo González que a pesar de no ser mi profesor me apoyo en una parte de este proyecto.

A Mary que es como una hermana de otra madre para mí, que desde que estuve en mi primer semestre fue una gran amiga para apoyarnos y motivarnos durante toda la carrera en las buenas y en las malas estaré para ti amiga y que esto sea un gran inicio para ambas, te quiero mucho.

A Samuel, a pesar de ser coincidencia nuestro encuentro, me ha apoyado, dado todo el cariño y creído en mí estos dos últimos años, agradezco a Dios por haberte puesto en mi camino y ser una motivación y admiración más para mí, te quiero muchísimo.

A mis amigos y compañeros: Alma, Ana, David, Laura, Victoria, Elizabeth por brindarme su amistad y compartir tantas aventuras conmigo sé que todos lograremos nuestras metas como siempre, también a Cristina, Diego's, Ingrid, Tania por ser de las primeras amistades que forme y me enseñaron mucho como persona, mucho éxito, a Paula y Yakciri por sus locuras conmigo, gracias por los momentos juntos a todos.

A Eliana porque desde los 8 años que nos conocemos hemos estado ahí, el tiempo y los caminos que hemos tomado nos han separado, pero ha sido una persona muy importante para mí.

A Dani, Luis Ángel y Fer porque fueron mis cómplices todo CCH gracias por ser tan buenas personas, espero que sigan siendo parte de mi vida.

- A Dios por brindarme la salud, techo donde vivir, comida, familia y amor para lograr mis sueños.
- A la Universidad de Tennessee por ser un segundo hogar y enseñarme cultura, valor y ganas de querer más.
- A mi amada y querida **Universidad Nacional Autónoma de México** mi máxima casa de estudios que siempre me brindo educación, amistades, responsabilidades y orgullo al escuchar cada goya desde que pise sus instalaciones, sobre todo a la **Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán** mi alma máter, que ayudo a formarme como ingeniera en alimentos.

No hay errores, solo enseñanzas.

ÍNDICE

Página

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1.	Tecnologías emergentes	1
1.2.	Rayos ultravioletas	2
1.3.	Equipos UV-C	4
1.3.1.	Equipos para alimentos sólidos	5
1.3.2.	Equipos para alimentos líquidos	6
1.4.	Comportamiento al flujo	6
1.5.	Tiempos de residencia	10
1.5.1.	Ecuaciones de tiempos de residencia	10
1.5.2.	Distribución de edades	11
1.5.3.	Técnica estímulo-respuesta	11
1.6.	Cinética de degradación	14
1.7.	Ácido ascórbico	15

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.	Problema	17
2.2.	Objetivo general y particulares	17
2.3.	Selección de variables	18
2.4.	Caracterización de equipo y fluido modelo	19
2.5.	Distribución de tiempos de residencia	21
2.6.	Dosis aplicada	23
2.7.	Cinética de degradación de ácido ascórbico	24
2.8.	Turbidez	24

CAPÍTULO III. TRATAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.	Caracterización de equipo UV-C	25
3.2.	Distribución de tiempos de residencia	25
3.3.	Dosis aplicada	27
3.4.	Análisis factorial general	29
3.5.	Cinética de degradación del ácido ascórbico	33
3.6.	Turbidez	40

CONCLUSIONES

43

REFERENCIAS

45

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
1	Clasificación del espectro electromagnético.	2
2	Esquema de un reactor de flujo laminar (<i>CiderSure</i>).	7
3	Reactor UV laminar Taylor-Coutte.	7
4	Tipo de flujo y estimación experimental de la curva DTR por la técnica estímulo-respuesta. A Patrón de flujo laminar y turbulento. B E(t) curvas de un reactor de flujo laminar a diferentes tasas de flujos ($Q_1 < Q_2 < Q_3$) y un comportamiento de flujo ideal.	8
5	Equipo UVC desarrollado y adaptado por <i>Cidersure</i> .	9
6	Tiempos de residencia por pulso.	13
7	Tiempos de residencia por escalón.	13
8	Estructura del L-ácido ascórbico.	15
9	Parte frontal del equipo UV-C.	18
10	Parte trasera del equipo UV-C.	19
11	Diseño del reactor VT-01.	21
12	Colorimetría directa.	23
13	Turbidímetro marca RATIO, Modelo WGZ-20.	24
14	Distribución de tiempos de residencia en $Q = 2.2 \text{ cm}^3/\text{s}$.	26
15	Distribución de tiempos de residencia en $Q = 4.7 \text{ cm}^3/\text{s}$.	27
16	Términos significativos de la concentración de ácido ascórbico.	31
17	Cambios de concentración del ácido ascórbico en función de ciclos, flujo volumétrico y temperatura del fluido.	33
18	Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 26 s y 25°C.	34

19	Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 69 s y 4°C.	35
20	Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 26 s y 4°C.	37
21	Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 69 s y 25°C.	38
22	Estructura interna de reactor UV-C.	41

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	TÍTULO	PÁGINA
1	Rendimiento de equipos de lámparas UV en distintos regímenes y dosis, adaptada por Koutchma et al., 2009.	4
2	Factores y niveles de variación en el diseño experimental.	17
3	Componentes de la solución modelo.	20
4	Flujos volumétricos a 90° y 45° de apertura en equipo UV-C.	25
5	Dosis aplicadas en función de los tiempos de residencia y flujo volumétrico en reactor UV-C.	28
6	Análisis de varianza en factores seleccionados.	30
7	Parámetros cinéticos de ácido ascórbico en fluido modelo.	40
8	Turbidez en tiempos de residencia y temperatura.	41

NOMENCLATURA

D	<i>Dosis aplicada</i> $\left(\frac{J}{cm^2}\right)$.
t_R	<i>Tiempo de residencia</i> (s)
I	<i>Irradiación</i> $\left(\frac{W}{cm^2}\right)$.
A	<i>Área</i> (cm^2)
V	<i>Volumen</i> (cm^3)
L	<i>Longitud</i> (cm)
V_{azul}	<i>Volumen del colorante azul</i> (cm^3)
ρ_{agua}	<i>Densidad del agua</i>
t_{medio}	<i>Tiempo medio</i> (s)
E	<i>Edades</i>
C_T	<i>Concentración total</i>
C_0	<i>Concentración inicial</i>
k	<i>Constante de velocidad</i>
t	<i>tiempo</i> (s)

RESUMEN

El tratamiento con irradiación UV-C es una tecnología emergente en procesos alimenticios, es utilizada en agua, jugos, frutas y verduras frescas como un método de desinfección, siendo reportado también su uso en la industria vitivinícola y cervecera. En este trabajo se estudió el efecto del tratamiento con irradiación ultravioleta UV-C a 254 nm sobre la cinética de degradación de ácido ascórbico presente en una solución modelo compuesta por ácido tartárico, glucosa y carboximetil celulosa a 4°C y 25°C a dos flujos volumétricos (2.2 y 4.7 mL/s), caracterizados en función a su flujo volumétrico y tiempo de residencia y siete dosis para cada flujo, para analizar el comportamiento de las muestras en relación a su efecto sobre la degradación de ácido ascórbico se realizó un análisis estadístico general donde un análisis de varianza presenta las interacciones entre las variables, mostrando que tanto el ciclo y el flujo mostraron diferencia estadísticamente significativa ($p \leq 0.05$), la variable que más influye es el flujo, además la interacción entre el flujo y los ciclos afectaron el cambio de ácido ascórbico, los parámetros cinéticos obtenidos después de ajustar la gráfica al mejor comportamiento considerando un flujo de 4.7 mL/s y 25°C, constante de velocidad de 222.5 s⁻¹ y dosis de entre 6 a 10.5 J/cm² es donde se presenta la mayor pérdida de ácido ascórbico en contraste con la menor pérdida para el flujo de 2.2 mL/s a 25°C con una constante de 52.05 s⁻¹.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento UV-C es un método de desinfección aplicado a la inactivación de microorganismos; este tratamiento por lo general se lleva a cabo a bajas temperaturas, es considerada una de la tecnología en la rama de pasteurización fría ya que ha sido aplicado en alimentos mínimamente procesados, atribuyendo a las propiedades del alimento o bebida lo que resulta atractivo al consumidor (Koutchma, 2009).

La dosis de irradiación UV-C, es uno de los parámetros más importantes que influyen en el procesamiento de alimentos con esta tecnología. En alimentos líquidos, los sólidos suspendidos pueden afectar la manera en que se distribuye la irradiación durante el proceso de pasteurización en un equipo UV-C (Antonio-Gutiérrez et al., 2015), debido a su gran importancia en el diseño y caracterización de equipos es fundamental determinar las condiciones de operación en función a las variables de proceso.

La penetración de dicha dosis se ve afectada en líquidos que no son transparentes, ya que el agua es un fluido con pocos sólidos suspendidos se considera un fluido con la menor transmitancia. Aunque la turbidez es un parámetro simple y fácil, es insuficiente para explicar el efecto de las partículas en suspensión sobre la efectividad de los tratamientos con irradiación UV. En 2004 Koutchma et al., determinaron la influencia de la adición de sólidos suspendidos en jugos, mostrando que con ello aumento considerablemente el coeficiente de absorción del producto lo que dificultó la penetración de la luz UV-C.

El ácido ascórbico está presente de manera natural en algunas frutas o es añadido para resaltar sus características sensoriales y nutrimentales (Rohan et al., 2011). La degradación del ácido ascórbico en alimentos líquidos es un proceso complejo

que se ve influenciado por las condiciones de proceso e incluye múltiples reacciones de radicales libres (Gregory, 2008). Durante el procesamiento térmico, este importante compuesto bioactivo se altera fácilmente por el efecto de la temperatura, exposición a la luz incluida la UV, pH y los iones metálicos (Ordoñez-Santos et al., 2013). Cuando se aplica la luz UV-C la presión molecular es inducida llevando a cabo reacciones fotoquímicas de degradación (Kagan, 1993). Se han realizado algunos estudios de pérdida de ácido ascórbico en jugos por UV-C. En 2011, Rohan et al., estudiaron la pérdida de ácido ascórbico en un fluido modelo de jugo de manzana considerando efectos de composición como el ácido málico, concentración de glucosa, fructuosa y sacarosa y la influencia de distintos ácidos, pH y temperaturas de almacenamiento, mostrando que durante el proceso la degradación del ácido mostro una cinética de orden cero.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los parámetros cinéticos de la degradación del ácido ascórbico en función a los tiempos de residencia y temperatura estableciendo su efecto en la pasteurización fría, considerando que el ácido ascórbico es un componente fotosensible y permite la caracterización del reactor a nivel micro molecular y la obtención de los tiempos de residencia es una caracterización a nivel macro molecular de acuerdo a la configuración del reactor (diámetro y longitud) determinando la salida de las moléculas dentro del reactor.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

1.1. Tecnologías emergentes

La conservación de alimentos es de suma importancia en la industria alimentaria, y constantemente se buscan alternativas que permitan disminuir el empleo de fuentes generadoras de calor y CO₂, por lo que las tecnologías emergentes son consideradas como alternativas en los procesos alimenticios.

Aunque la temperatura puede ser utilizada con alguna de estas nuevas tecnologías para mejorar la eficacia, la mayor parte de la investigación ha sido realizada a temperatura ambiente, y debido a los tiempos de procesamiento extremadamente cortos, los alimentos son similares al fresco (Bermúdez-Ramírez y Barbosa-Carnosa, 2011).

Recientemente, se ha comenzado a investigar de manera sistemática y desde un punto de vista científico, tecnológico y práctico, las llamadas “tecnologías no térmicas” (Bermúdez-Ramírez y Barbosa-Cánovas, 2011).

Los consumidores se están volviendo gradualmente conscientes de las nuevas tecnologías para el procesamiento de alimentos, y en ocasiones se refieren a los métodos no térmicos como “pasteurización en frío” (Cardello et al., 2007).

En el 2010, Barbosa-Cánovas y Bermúdez-Ramírez incluyen una lista más detallada de los procesos no térmicos considerados como: alta presión hidrostática, ultrasonido, campos eléctricos pulsados, campos magnéticos oscilantes, radiación, luz ultravioleta, plasma frío y algunos productos químicos (por ejemplo, ozono, dióxido de carbono en fase densa, entre otros).

Unluturk et al. en 2008 demostraron la eficacia de la radiación ultravioleta como pasteurización fría para productos de huevo líquidos usando una cepa de *E. coli*

(ATCC 8739) como el microorganismo modelo. Para este propósito, los efectos de la profundidad del medio de alimento líquido, la intensidad UV aplicada (incidente) y el tiempo de exposición sobre la inactivación de *E. coli* (ATCC 8739), se expusieron en tres productos de huevo líquidos: yema de huevo líquida, clara de huevo líquida y huevo entero líquido. La irradiación UV de las muestras se realizó usando un aparato con un haz directo al alimento.

1.2. Rayos UV-C

La radiación ultravioleta es un tipo de radiación empleada en tecnologías emergentes, el espectro de luz se encuentra entre los rayos X y la luz visible (FDA, 2013), en la Figura 1 se muestra el espectro electromagnético de tal manera que sea posible ubicar las longitudes de onda a la que pertenece los rayos UV.

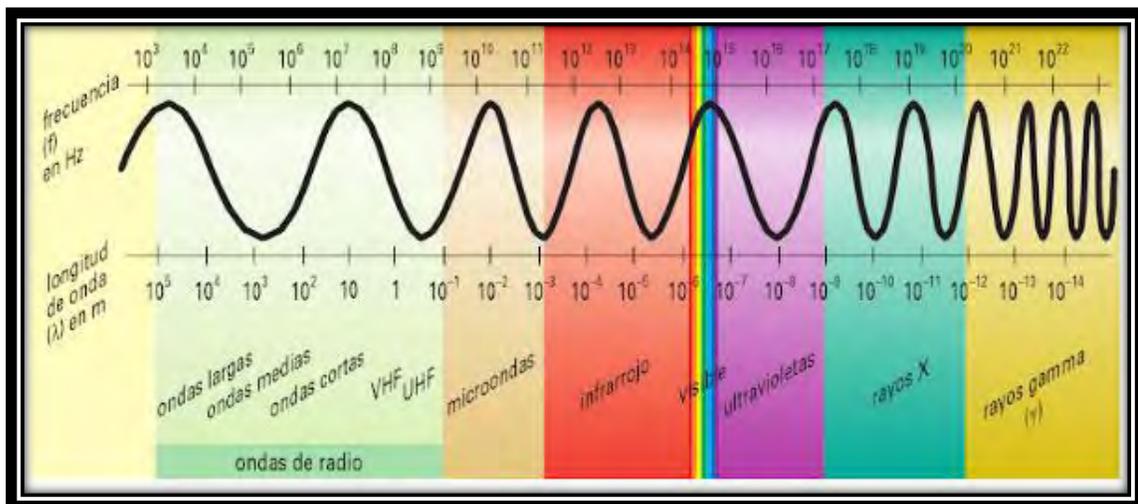


Figura 1. Clasificación del espectro electromagnético (Cabrerizo et al., 2008).

La longitud de onda de un proceso ultravioleta va de rangos desde 100-400 nm. Éste rango es dividido en tres partes: UV-A (315-400 nm), es la responsable por los daños en la piel por la exposición a rayos solares, UV-B (280-315 nm), que puede causar quemaduras en la piel, asociadas con el cáncer de piel, UV-C (200-280 nm)

llamado el rango germicida, efectiva para la inactivación de bacterias y virus y el rango vacío (100-200 nm) (Koutchma, 2009).

La longitud de onda de 254 nm es usada para la desinfección de superficies, agua y algunas bebidas en la industria alimentaria como jugos (Haro-Maza y Guerrero-Beltrán, 2013).

Estudios comprueban que la inactivación de microorganismos ocurre en la penetración de UV-C en el exterior de las membranas de las células conllevando a un gran daño del ADN debido a la formación de timina, que previene el microorganismo de la transcripción y replicación, eventualmente provocando la muerte de las células en el proceso de desinfección por UV-C (Koutchma, 2009).

La dosis-respuesta UV de los microorganismos está determinada por medir la concentración de microorganismos capaces de replicar después de la exposición a una dosis UV medida (Koutchma, 2009).

Existen diferentes métodos para la determinación de dosis aplicada a alimentos líquidos, siendo el método de biodosimetría el más usado. Los diferentes métodos cuentan con principios bien fundamentados y se abordan los más empleados en alimentos líquidos (Antonio-Gutiérrez et al., 2015).

La aplicación de UV-C se ha propuesto como una manera simple de eliminar patógenos y microorganismos para algunos alimentos, jugos, bebidas y vinos. La acción bactericida del tratamiento depende de la dosis aplicada a través de cierto tiempo, pero ciertas características que aportan las bebidas o jugos afectan la absorbancia de la luz causando diferentes eficiencias de radiación sobre el producto. La Tabla 1 presenta las dosis requeridas por diversos autores en cada jugo diferente y las características del equipo.

Tabla 1. Rendimiento de equipos de lámparas UV en distintos regímenes y dosis, adaptada por Koutchma et al., 2009.

Jugo	Autor	Régimen	Tipo de lámpara UV	Dosis UV (mJ/cm²)
<i>Jugo de manzana</i>	Worobo (1999)	Turbulento	8/LMPL/39W	n.d
<i>Cidra de manzana</i>	Wright et al. (2000)	Laminar	10/LMPL/39W	9-61
<i>Jugo clarificado de manzana</i>	Koutchma et al. (2004)	Turbulento	8/LMPL/39W	14-5
<i>Jugo de manzana</i>	Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas (2005)	Laminar	12/LMPL/42W	0.65
<i>Jugo de uva</i>		Laminar	4/LMPL/0.684W	2
<i>Cidra de manzana</i>	Hanes et al. (2002)	Turbulento	8/LMPL/39W	14.32
<i>Jugo de naranja</i>	Tran and Farid (2004)	Laminar	1/LMPL/30W	120
<i>Néctar de mango</i>	Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas (2005)	Laminar	2/LMPL/25W	5135

En comparación a la pasteurización térmica, los jugos tratados con luz ultravioleta no tuvieron cambios en su perfil de sabor y color, la radiación UV-C fue exitosamente aplicada para reducir la carga microbiana en diferentes jugos y néctares mínimamente tratados (Koutchma, 2009).

1.3. Equipos UV-C

Los equipos UVC disponibles en el mercado tienen poca aplicación en alimentos; sin embargo, han tenido éxito a nivel de investigación, las lámparas de mercurio de

baja y mediana presión son las más comunes; sin embargo, han surgido algunas alternativas como las lámparas UV de microondas las cuales son más eficientes (Antonio-Gutiérrez, 2012). Aunque hay disponibles varias fuentes de luz ultravioleta, las más utilizadas son las lámparas de vapor de mercurio (Gayán et al., 2014). A continuación, se presentan las más comunes y sus características.

a) Lámpara de mercurio de baja presión

Este tipo de lámparas, para la generación de radiación UV, son operadas de 10^3 - 10^2 Pa (Antonio-Gutiérrez et al., 2012). Esta presión corresponde a la del vapor de mercurio líquido a una temperatura de pared óptima de 40°C , y genera en la lámpara un arco eléctrico de energía cerca de 0.2 a 0.3 W/cm (Phillips, 1983). El espectro se limita a un número bien definido de líneas espectrales y la fuente es denominada monocromática (Antonio-Gutiérrez et al., 2012). Hay lámparas de baja presión (LP) que irradian aproximadamente el 95% de su energía en un pico casi monocromático a 253.7 nm, es decir, cerradas al rango de letalidad microbiana más alta de 260-265 nm (Gayán et al., 2014).

b) Lámpara de mercurio de mediana presión

Estas lámparas son operadas aproximadamente de 104-106 Pa, las temperaturas que alcanza son elevadas entre 600°C a 800°C (Antonio-Gutiérrez et al., 2012). Por lo que es absolutamente necesario usar envolturas de cuarzo ventilado, es importante evitar el contacto directo de la superficie de la lámpara con el fluido a tratar (Antonio-Gutiérrez et al., 2012).

1.3.1. Equipos para alimentos sólidos

Para la desinfección de superficie de alimentos como frutas, verduras y carnes, un ejemplo de un equipo comercial de radiación UVC para la desinfección de superficie de alimentos es diseñada y producido por *Reyco System Inc.*, se ocupa para la papa seca y congelada y es manufacturado para la elaboración de sopas, botanas entre otros (Antonio-Gutiérrez et al., 2012).

1.3.2. Equipos para alimentos líquidos

La agencia de Medicamentos y Alimentos de los Estados Unidos de América (FDA) considera el uso de radiación ultravioleta para el procesamiento de jugos, un método seguro para la reducción de patógenos y otros microorganismos, mientras sea un flujo turbulento a través de los tubos de los equipos con un número de Reynolds mínimo de 2,200 (FDA, 2012). El flujo turbulento es necesario en el procesamiento de jugos con radiación UVC, para lograr que todo el producto reciba la misma dosis (Haro-Maza y Guerrero-Beltrán, 2013).

En el tratamiento UV continuo de líquidos, el producto se bombea a un reactor que consiste en varias lámparas UV-C alrededor de las cuales el producto fluye a través de un tubo de luz ultravioleta de alta permitividad (Gayán et al., 2014)

Los equipos de flujo turbulento generalmente tienen la misma configuración de los de flujo laminar, es decir, son cilindros concéntricos con la lámpara UV-C en el centro (Antonio-Gutiérrez et al., 2012).

1.4. Comportamiento al flujo

La trayectoria de una partícula o de un microorganismo a través de la zona irradiada en un reactor depende de las características del flujo (Gayán et al., 2014). Sin embargo, se pueden definir dos tipos de patrones de comportamiento al flujo: laminar y turbulento.

a) Flujo laminar

Las películas se caracterizan por ser un flujo laminar con un perfil de velocidad parabólico (Koutchma et al., 2004). Estos equipos están diseñados para generar una película muy delgada del líquido que circula a través del equipo UVC, que contribuyen a eliminar los problemas debido a la falta de penetración de la radiación UV (Antonio-Gutiérrez et al., 2012).

Un sistema UVC fue diseñado con tubo de cuarzo de diámetro muy pequeño con geometría helicoidal, la cual rodea a una lámpara UVC localizada en un centro del

sistema, en la Figuras 2 y 3 se presentan esquemas donde se colocó sidra de manzana en el reactor *CiderSure* proporcionando un modelo de diseño de película delgada (Koutchma, 2009).

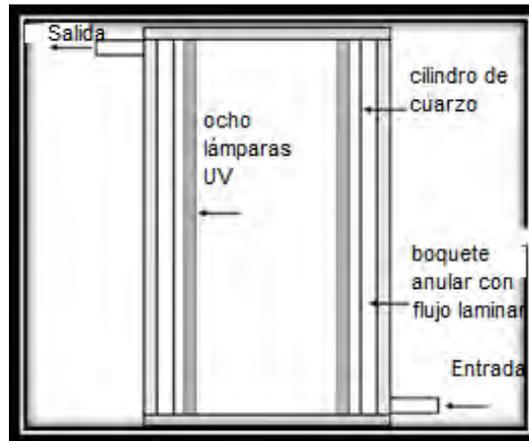


Figura 2. Esquema de un reactor de flujo laminar (*CiderSure*) (Koutchma, 2009).

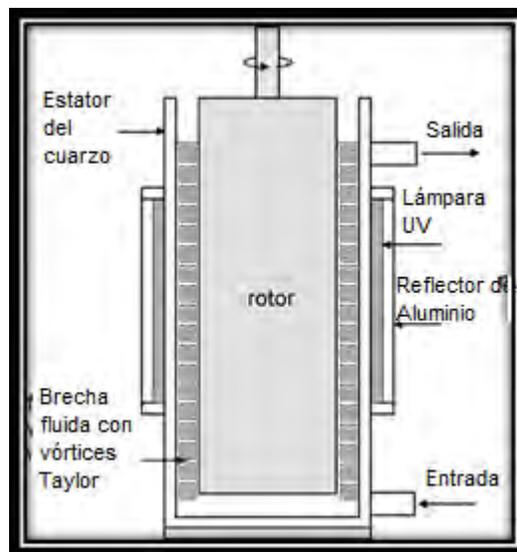


Figura 3. Reactor UV laminar Taylor-Coutte (Koutchma, 2009).

b) Flujo turbulento

Como se indica en la Figura 4 a una velocidad mayor, el flujo se vuelve turbulento y las diferentes corrientes se mezclan a lo largo del radio. Estos equipos se conectan en serie para incrementar la turbulencia, las velocidades de flujo también aumentan, lo que reduce el tiempo de residencia del líquido en el equipo (Antonio-Gutiérrez et al., 2012). Para lograr una desinfección adecuada de alimentos líquidos se recomienda usar lámparas largas, conectar equipos en serie y/o modificar el equipo (Bermúdez-Aguirre y Barbosa-Cánovas, 2011).

En la Figura 5 se presenta un equipo UVC el cual fue adaptado para la desinfección de sidra de manzana desarrollado por *CiderSure*.

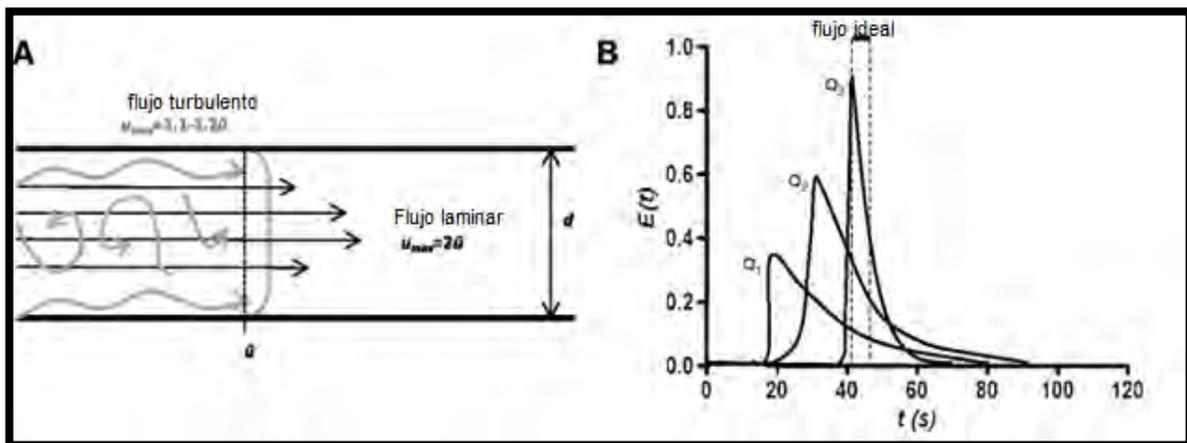


Figura 4. Tipo de flujo y estimación experimental de la curva DTR por la técnica estímulo-respuesta. **A** Patrón de flujo laminar y turbulento. **B** $E(t)$ curvas de un reactor de flujo laminar a diferentes tasas de flujos ($Q_1 < Q_2 < Q_3$) y un comportamiento de flujo ideal (Gayan et al., 2014).

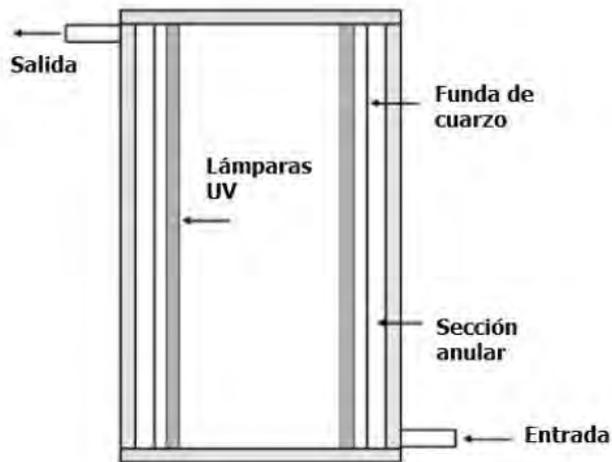


Figura 5. Equipo UVC desarrollado y adaptado por *Cidersure* (Koutchma, 2009).

1.5. Tiempos de residencia

El tiempo de residencia de un elemento de fluido es el tiempo que transcurre desde que el instante en el que elemento entra en el recipiente hasta que lo abandona. (Himmelblau y Bischoff, 2004).

En la mayoría de los procesos térmicos no solo depende de la temperatura a la que el producto es llevado, sino también del tiempo de residencia en la operación unitaria. El conocimiento de la distribución de los tiempos de residencia en el sistema es esencial para una estimación de la degradación llevada en el proceso. Los procesos asépticos son optimizados (maximizando calidad del producto y evitando el sobre procesamiento), mientras que asegura que las reacciones de deterioro del lado importante, relacionadas con la calidad del producto, así como la dispersión puede ser minimizada (Pinheiro et al., 1998).

1.5.1. Ecuaciones de tiempos de residencia

Las curvas de tiempos de residencia se estandarizan considerando la siguiente ecuación:

$$E(t) = \frac{C_c(t)}{\int_0^{\infty} C_c(t) dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Los tiempos de residencia media se calculan como la relación del volumen de la correspondiente sección de prueba y el flujo (Q):

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad \text{Ecuación 2}$$

Los tiempos de residencia promedio también se estiman por análisis estadístico de la curva RDT, resultados experimentales donde el tiempo medio de retención infería significativamente del tiempo medio de residencia obtenido a partir de la curva RDT (por encima del 10%). Esto indica que se ha producido una canalización en el círculo de fluidos (Pinheiro et al., 1998).

1.5.2. Distribución de edades

La edad de un elemento de fluido es el tiempo que transcurre desde el instante en el que el elemento entra al recipiente y el instante considerado, y por supuesto es menor o igual que el tiempo de residencia. La edad es igual al tiempo de residencia para las moléculas que en ese momento están abandonando el recipiente (Himmelblau y Bischoff, 2004).

Su nota funcional de una distribución interna de un tanque cerrado $I(t)$ se utilizará para la frecuencia interna de distribución de edad de los elementos de fluido contenidos en el tanque; $I(t)$ tiene dimensiones: fracción de edades por unidad de tiempo. La fracción de elementos de fluido comprendidos entre las edades t y $t+\Delta t$ viene dada por $I(t) \Delta t$, de acuerdo con la teoría de probabilidades. Puesto que $I(t)$

es una función continua, se normaliza tomando la suma de todas fracciones igual a la unidad,

$$\int_0^{\infty} I(t)dt = 1 \quad \text{Ecuación 3}$$

El tiempo $t=0$ se refiere a un tiempo inicial arbitrario y no al comienzo del flujo de fluido hacia el interior del tanque. En términos físicos, la ecuación 3 establece que todo fluido tiene en alguna parte una edad comprendida entre 0 y ∞ .

De acuerdo con lo anterior, la fracción del contenido del tanque que es más joven que una edad especificada t , que está dada por:

$$\int_0^t T(t')dt' \quad \text{Ecuación 4}$$

Mientras que la fracción más vieja que t es,

$$\int_0^{\infty} I(t')dt' = 1 - \int_0^t I(t')dt' \quad \text{Ecuación 5}$$

1.5.3. Técnica estímulo-respuesta

El método más simple y directo de encontrar los tiempos de residencia utiliza un rastreador: físico o que no reacciona. Sin embargo, para propósitos especiales se podría querer utilizar un rastreador activo. Debido a que los experimentos en impulso y los experimentos en escalón son más fáciles de interpretar, en tanto que los periódicos y los aleatorios son más difíciles, considerando únicamente los dos primeros (Levenspiel, 2004).

- a) En la Figura 6 se presenta señal por pulso: se inyecta una cantidad de trazador a la entrada del reactor en el menor tiempo posible, y después se mide su concentración en la salida.

La técnica anterior ha sido utilizada por varios investigadores para medir el tiempo de residencia de las plantas de ultra pasteurización. Edgerton y Jones en 1970 inyectaron un impulso de NaCl en la alimentación del agua y midió la conductividad térmica resultante, Heppel en 1985 utilizó un trazador de tinta para medir los DTR de una planta de UHT que opera en agua y leche (Janssen, 1994).

- b) La Figura 7 muestra la señal por escalón: a partir de un instante $t=0$ se comienza a inyectar un flujo molar constante del trazador, a la entrada del reactor, y a la salida se medirá su concentración hasta que sea igual a la de la entrada.

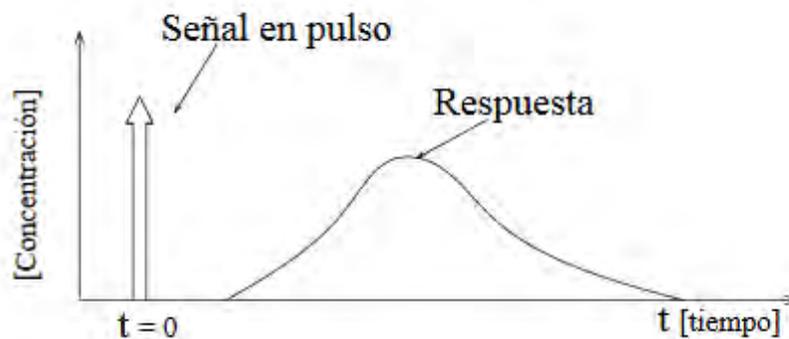


Figura 6. Tiempos de residencia por pulso (Pinheiro et al., 1998).

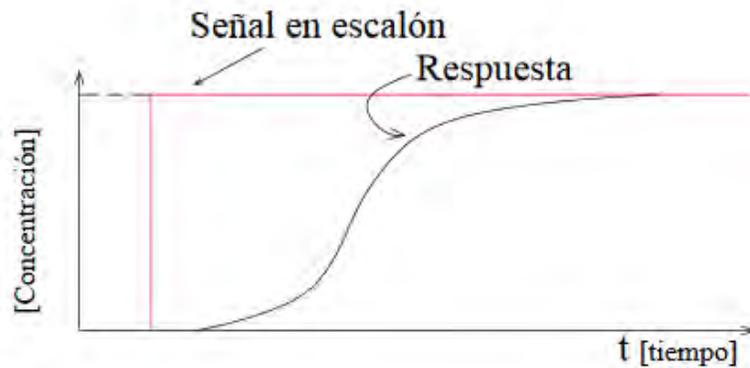


Figura 7. Tiempos de residencia por escalón (Pinheiro et al., 1998).

La respuesta dinámica que un reactor representa que un componente que no es parte, o no está involucrada en la reacción, es aplicable a las sustancias trazadoras; permite obtener de una manera clara e inmediata una comprensión del efecto del cortocircuito en el reactor.

Compara el comportamiento de las condiciones teóricas y las experimentales y determinar si hay o no una mezcla perfecta, con su entrada, a través de la concentración se determina el tiempo que permanece en el reactor, se debe de considerar que el trazador no debe de adherirse a las paredes del equipo, tener un efecto en la luz, no cambie la viscosidad o densidad del fluido para poder realizar la curva de distribución de edades (Ramírez et al., 1987).

1.6. Cinética de degradación

Distintos modelos han sido propuestos para predecir y describir la cinética de degradación por UV, por ejemplo, Peleg en 2017 estudió la cinética de degradación del ácido ascórbico durante su comercialización, proceso térmico y almacenamiento.

A continuación, se presentan las ecuaciones que sigue una cinética de orden cero de acuerdo con lo propuesto por Rohan y colaboradores en 2011.

$$C_t = C_0 - k_0(t) \quad \text{Ecuación 6}$$

La degradación de este antioxidante durante el procesamiento de los alimentos ha sido registrada previamente en diferentes investigaciones (Fernández et al., 2011), estudios reportan que la degradación térmica de los alimentos responde a una cinética de primer orden (Nisha et al., 2004; Bosschaart et al., 2012).

La siguiente ecuación presenta una cinética de primer orden,

$$\frac{C_t}{C_0} = e^{-kt} \quad \text{Ecuación 7}$$

1.7. Ácido Ascórbico

El ácido ascórbico o vitamina C es un agente antioxidante necesario para la formación y mantenimiento adecuado del material intercelular; puede reducir la acción perjudicial de los radicales libres y coadyuva al mejoramiento de la absorción del hierro no hemínico. La carencia de esta vitamina, en los seres humanos, puede provocar hemorragias acompañada de una pobre cicatrización y lento proceso de curación de las heridas, así como anemia; su poder vitamínico radica en la prevención del escorbuto.

L- ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) es trivialmente conocido como Vitamina C y es también el nombre de la nomenclatura bioquímica aceptada por la Unión Internacional de Puros y la Unión Internacional Aplicada a Química de Bioquímica y Biología Molecular. Su diseño sistemático químico es 2-3 enediol-L-gluónico ácido- γ -láctico que fue formalmente conocido como ácido hexurónico como se muestra en la figura 6. La Vitamina C es el nombre genérico para todos los compuestos que exhiben cualitativamente la actividad biológica del ácido ascórbico. Estos incluyen ésteres de ácido ascórbico (ej., palmitato de L-Ascorbilo) y formas sintéticas (ej., 6-deoxi-L-AA, 33% su actividad relativa) y la forma ordinaria de oxidación de L-AA, ácido L-dehidroascórbico (L-DHAA) (Chang et al., 2016).

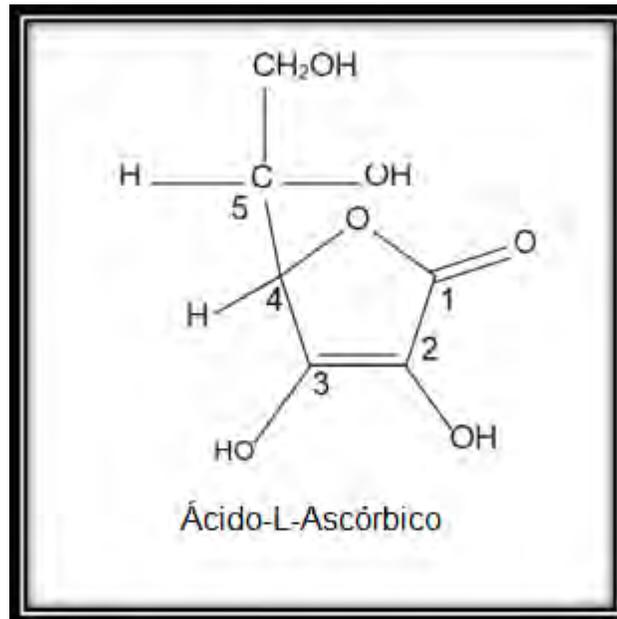


Figura 8. Estructura del ácido-L-ascórbico (Chang et al., 2016).

Se encuentra casi exclusivamente en vegetales y frutas frescas, como es soluble en agua apenas se acumula en el organismo por lo que es importante un aporte diario. Es muy sensible a la luz, temperatura y oxígeno degradándose fácilmente durante el procesamiento y almacenamiento de los alimentos. Por lo tanto, una de las soluciones para garantizar su funcionalidad sería la fortificación de alimentos y cubrir así las necesidades biológicas en ciertas etapas. En la actualidad, la comercialización de productos fortificados ha ido en ascenso, pero en la literatura científica son escasos los estudios relacionados sobre la estabilización y/o recuperación de esta vitamina C como resultado de la fortificación y sus efectos beneficiosos no han sido precisamente demostrados (Bastías y Cepedo, 2016).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

2.1. Problema

La radiación UV-C es una tecnología emergente que permite la desinfección germicida a una longitud de onda de 254 nm, ésta es utilizada en frutas y algunos vegetales, recientemente se ha llegado a utilizar en agua y algunas bebidas, su caracterización es limitada ya que requiere de la configuración del reactor (longitud y diámetro) y funciones como la distribución de tiempos de residencia y la cinética de estudio. Se busca estudiar la cinética de degradación mediante sus cambios químicos al ser expuesto a la luz UV-C en diferentes dosis, involucran parámetros como la velocidad de reacción, la dosis aplicada en función al tiempo y los sólidos suspendidos del líquido a tratar, al usar ácido ascórbico.

2.2. Objetivo general y particulares

a) Objetivo general

Evaluar los cambios cinéticos de degradación de ácido ascórbico en relación con el tiempo de residencia y temperatura durante la irradiación UV-C, que permitan su efecto durante el proceso de pasteurización fría.

b) Objetivos Particulares

- 1) Determinar el tiempo de residencia en función del flujo volumétrico de entrada del reactor mediante el método estímulo-respuesta que permitan la obtención**

de dosis de irradiación aplicadas durante la pasteurización fría de una bebida modelo.

- 2) Obtener las constantes cinéticas de degradación del ácido ascórbico en función a los tiempos de residencia y temperatura (4°C y 25°C) evaluando su efecto sobre la turbidez y pérdida de ácido ascórbico.
- 3) Analizar los cambios de turbidez en un fluido modelo después del tratamiento con irradiación UV-C, determinando la influencia del tiempo de residencia y la temperatura sobre el cambio de sólidos suspendidos.

2.3. Selección de variables

En la Tabla 2 se muestran las variables consideradas en el estudio de caracterización de un reactor tubular para la irradiación de alimentos líquidos con bajo contenido e sólidos en suspensión por UV-C empleando como un sistema modelo y evaluando la efectividad del tratamiento utilizando ácido ascórbico como trazador, considerando la influencia del tiempo de residencia y temperatura del fluido (4C y 25°C).

Tabla 2. Factores y niveles de variación en el diseño experimental.

Factor de variación	Nivel de variación	Número de replicas	Variable dependiente	Variable de respuesta	Técnica o instrumento de medición
Tiempo de residencia	26 s	3	Dosis aplicada	---	---
	69 s		Conc. De ácido ascórbico	Velocidad de degradación	Colorimetría directa (espectro UV-VIS)
Temperatura	4°C		Turbidez	---	Turbidímetro
	25°C				

La comparación se realizó mediante un análisis de varianza de dos vías con la ayuda de MiniTab® 2017, diagrama de Pareto para cambios del ácido ascórbico cada corrida se realizó por triplicado a excepción de la concentración del ácido ascórbico que se realizaron 9 repeticiones para mayor exactitud.

2.4. Caracterización de equipo UV-C y fluido modelo

a) Caracterización de equipo UV-C

Para la caracterización del equipo de UVC (Figura 9) se determinaron los flujos volumétricos a partir de la apertura total de la válvula (90°) y a la mitad de la válvula (45°) en la Figura 10 se presenta un diagrama de flujo de la parte frontal del equipo con cada una de sus partes que lo conforman; al momento que el líquido llega a la entrada del reactor por la parte trasera (Figura 11), para la obtención de los flujos, cada 200 mL se tomó el tiempo en las dos aperturas.



Figura 9. Parte frontal del equipo UV-C.

- 1) Tanque de alimentación
- 2) Válvula de 90°
- 3) Bomba centrífuga
- 4) Contenedor de agua fría
- 5) Refrigerante
- 6) Tanque receptor

La Figura 9 presenta los componentes como el tanque de alimentación, donde se colocaba la solución preparada, y a través de la válvula de 90° dependiendo el flujo seleccionado, era mandado a la bomba centrífuga la cual transportaba la solución al reactor UV-C que presenta la Figura 10, de esta manera regresaba al tanque receptor.



Figura 10. Parte trasera del reactor UV-C: 7) Reactor UV-C 8) Filtros de carbón activado 9) Fuente de luz 10) Conexión a reactor y bomba.

c) Preparación de fluido modelo

Un fluido modelo se caracteriza por tener componentes relevantes de un alimento siendo los que influyen en la degradación de sus componentes expuestos a un tipo de tratamiento (Rohan et al., 2011), como fluido modelo se realizó una dispersión de CMC al 0.16%, 0.045 g/100 mL de ácido tartárico y 14.6 g/100 mL de glucosa en un agitador de propela a 500 RPM hasta que los componentes lograran disolverse completamente.

Tabla 3. Componentes en la solución modelo.

Característica	Cantidad
Ácido tartárico	45 mg/100 mL
pH	3.08 (±0.04)
Grados Brix	16.6 (±0.2)
Viscosidad (Pa*s)	---
Turbidez (NTU)	3.81 (±0.05)

2.5. Distribución de tiempos de residencia

Los tiempos de residencia para un proceso de luz UVC se realizaron en un reactor VIQUA modelo VT1 con una longitud de 0.203 m y un diámetro de 0.065 m, el cual su lámpara emite 9 Watts. Se aplicó la técnica estímulo-respuesta inyectando en la entrada del reactor un trazador un colorante azul del No. 5 (Figura 12), para conocer la cantidad de trazador que debe agregar al reactor de acuerdo con sus dimensiones del reactor y el volumen muerto, es necesario considerar el área y volumen del reactor de acuerdo con la Ecuación 8 y 9.

$$A = \pi r^2 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$V = A * L \quad \text{Ecuación 9}$$

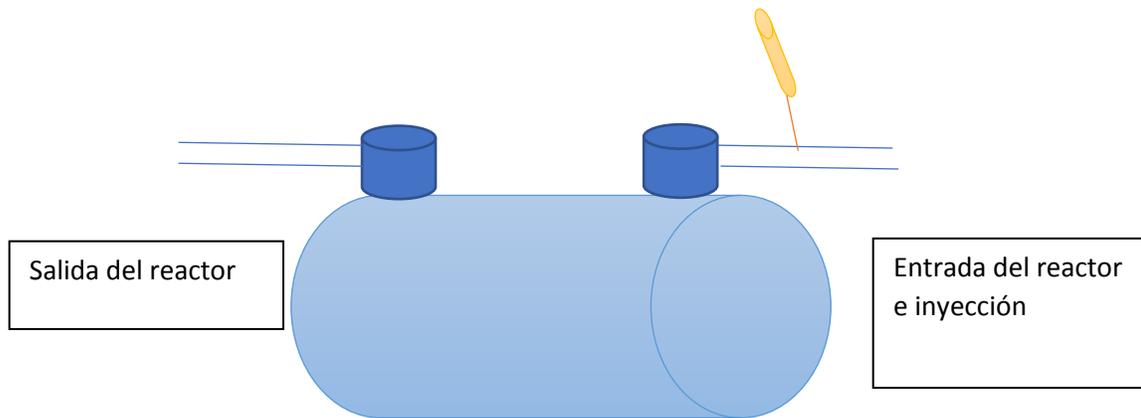


Figura 11. Diseño del reactor VT-01.

La *Ecuación 10* representa a V que es el volumen, igual al área (A) por la longitud L del reactor, sin embargo, se considera que un 10% del volumen es volumen muerto dentro del reactor, por lo tanto, es la cantidad de volumen de colorante que se debe añadir al reactor, tomando en cuenta la densidad del agua con la que se va a disolver,

$$V_{\text{azul}} = V * 0.1 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1 \text{ g/cm}^3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Se introdujo el volumen obtenido de la *Ecuación 11* a una concentración de 0.03 g por cada 100 mL en dos flujos volumétricos diferentes. Mediante la técnica de impulso midiendo la concentración hasta que el trazador salga del reactor, se obtuvo una curva concentración tiempo a partir del balance de materia para el recipiente se encuentra:

$$A = \int_0^{\infty} C \, dt = \sum_i C_i \Delta t_i = \frac{M}{V} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$t_{medio} = \frac{\int_0^{\infty} tCdt}{\int_0^{\infty} Cdt} = \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} = \frac{V}{v} \quad \text{Ecuación 13}$$

Para encontrar la curva E a partir de la curva de concentración-tiempo se debe de cambiar la escala de concentraciones, de manera que el área bajo la curva simplemente dividir las lecturas de M/V en la *Ecuación 13*.

$$E = \frac{C_{impulso}}{\frac{M}{V}} \quad \text{Ecuación 14}$$

2.6. Dosis aplicada

La dosis de UV-C por área (J/cm^2) del líquido a tratar a través del reactor fue calculada después de obtener los tiempos de residencia, sin embargo, se consideraron 7 ciclos durante el proceso, obteniendo la dosis correspondiente a cada ciclo multiplicado por la irradiación, en relación con las dimensiones del reactor, en la *Ecuación 15* se presenta la obtención de dosis a partir de los parámetros mencionados.

$$D = t_R * I \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde;

$$D = \text{dosis aplicada} \left(\frac{J}{cm^2} \right)$$

$$t_R = \text{tiempo de residencia (s)}$$

$$I = \text{intensidad} \left(\frac{W}{\text{cm}^2} \right)$$

Para la obtención de cada ciclo, se duplicaron los dos tiempos de residencia (26 y 69 s) 7 veces, para la obtención de siete ciclos sometidos a UV-C.

La intensidad se calculó de acuerdo con la luz emitida por la lámpara la cual emite 9 W y a la configuración del reactor en su total área= 414.5 cm² lo que da por resultado una intensidad de 0.022 W/cm².

2.7. Cinética de degradación del ácido ascórbico

La absorbancia de ácido ascórbico se determinó por la técnica de colorimetría directa (Ranganna, 1977) en un espectrofotómetro marca Genesys, 10S UV-Vis con una exactitud de ±0.01nm, mostrado en la Figura 13; a una longitud de onda de 520 nm. Al obtener la absorbancia de cada ciclo, se obtendrá la concentración de ácido ascórbico por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{a.a} = \frac{0.7529 - \text{absorbancia}}{0.0024} \quad \text{Ecuación 16}$$

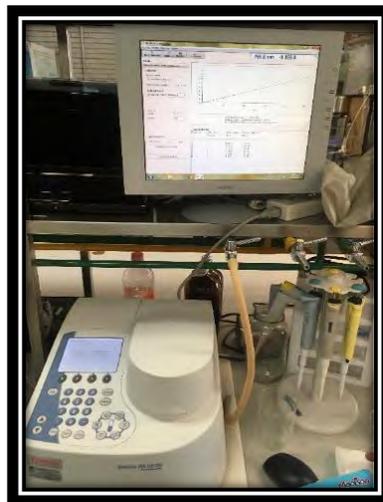


Figura 12. Colorimetría directa (Ranganna, 1977).

2.8. Turbidez

Para la determinación de turbidez se utilizó un turbidímetro marca RATIO como el de la Figura 13, modelo WGZ-20 al final de cada corrida por tiempo y temperatura, primeramente, calibrando el equipo con una solución de 2 NTU seguida de una de 20 NTU y finalmente una solución de 200 NTU para poder determinar el valor de la solución modelo.



Figura 13. Turbidímetro marca RATIO, Modelo WGZ-20 (2-200 NTU, ± 0.1 NTU).

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización del equipo UV-C.

Los parámetros de operación en cualquier equipo son de suma importancia para controlar las variables en el equipo, uno de ellos es el flujo volumétrico. En la Tabla 4 se presentan los flujos obtenidos de cada abertura de las válvulas (90° y 45°), presentando la apertura total el flujo menor y el mayor flujo a 45° de la válvula, para que, posteriormente se determine la distribución de tiempos de residencia a estos dos flujos volumétricos.

Tabla 4. Flujos volumétricos a 90° y 45° de apertura en equipo UV-C.

Apertura 90°	Apertura 45°
2.2 mL/s	4.7 mL/s

3.2. Distribución de tiempos de residencia

La caracterización de un reactor se realiza mediante la determinación de la distribución de los tiempos de residencia, conociendo varios parámetros de los DTR que permiten su diagnóstico para permitir la cualquier operación hidrodinámica dentro del reactor y detectare alguna anomalía dentro del reactor (Benhabiles et al., 2012).

El comportamiento del fluido dentro del reactor es de suma importancia ya que define la cinética del reactor. El agua es el fluido más usado en este tipo de estudio, y la sal es el trazador más común (Pinheiro Torres et al., 1998).

En la Figura 14 se presenta la distribución de edades a un flujo volumétrico de 2.2 mL/s, presentando el área bajo la curva de $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, uno de los valores interrelacionados que configuran el contacto o el valor del flujo es la distribución de tiempos de residencia o RTD (por sus siglas en inglés) de la corriente que fluye a través del reactor. Encontrar la curva E para un recipiente de cierto volumen en el que fluye determinado flujo del fluido. Introduciendo un rastreador a la entrada del reactor para conocer su concentración y a partir de un balance de materia se obtiene el área bajo la curva de dicha función de impulso (Levenspiel, 2004). Por lo tanto, para encontrar la frecuencia (edad) de cada molécula dentro del reactor, la base es el área bajo la curva ya que indica el tiempo que permanece el trazador dentro del reactor en determinado momento.

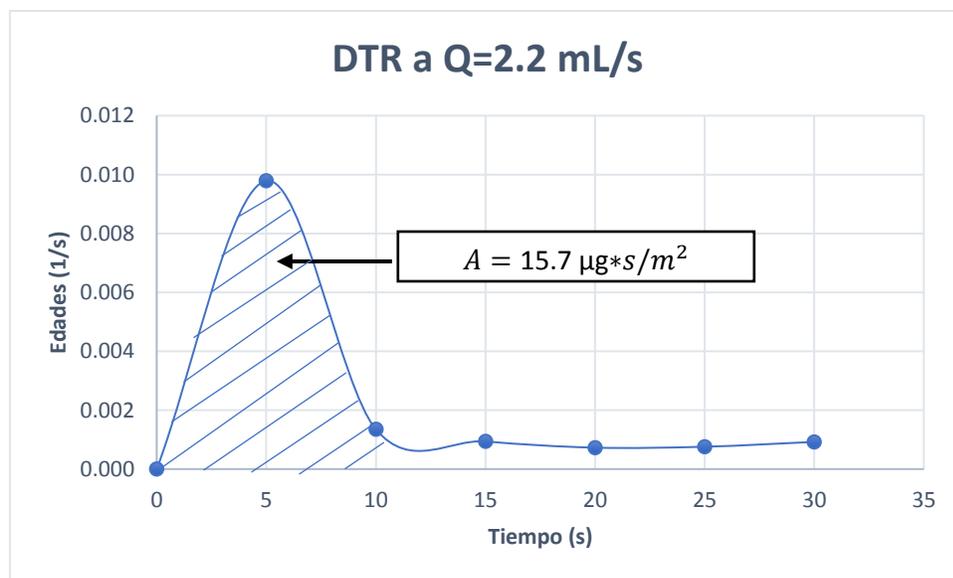


Figura 14. Distribución de tiempos de residencia en $Q = 2.2 \text{ mL/s}$.

En la Figura 14 se presenta la distribución de tiempo de residencia en el reactor a 2.2 mL/s y un área bajo la curva de $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, donde la curva indica la señal

de entrada del trazador muestra un ascenso poco vertical en un tiempo mínimo de residencia y una pendiente decreciente a menor a un flujo más bajo. La fuerte influencia de distribución convectiva donde el perfil de flujo laminar es evidente (Boskovic y Loebecke, 2008).

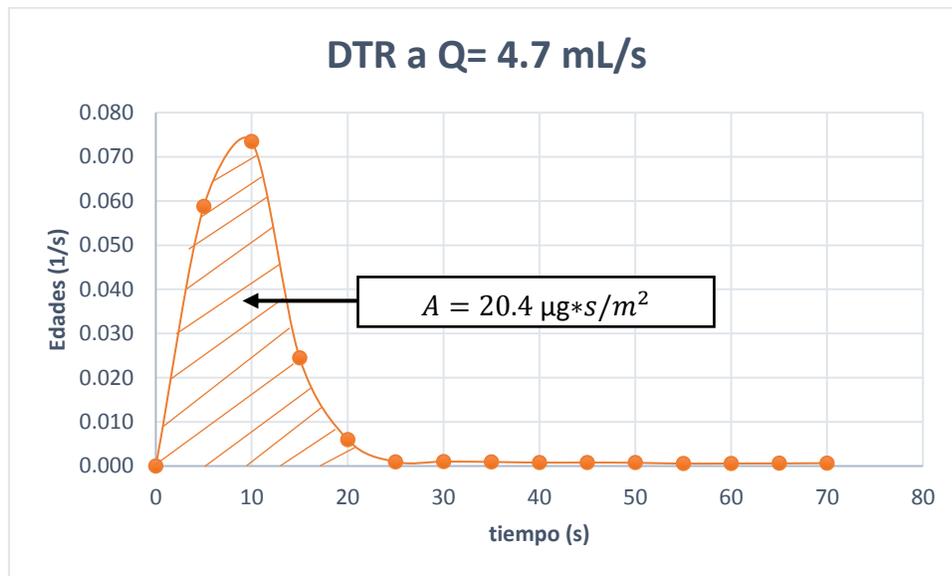


Figura 15. Distribución de tiempos de residencia a Q= 4.7 mL /s

La Figura 15 presenta la curva de distribución de tiempo a un flujo volumétrico de 4.7 mL/s por lo que tiempo que reside el flujo dentro del reactor es mayor que el que presenta la Figura 14, y cualquier cambio de la geometría dentro del reactor afecta en la distribución interna del fluido y su frecuencia interna (Sahle-Demessie et al., 2003), por lo tanto, el área bajo la curva aumenta mientras las partículas tardan más en salir.

3.3. Dosis aplicada

En la tabla 5 se presenta las dosis obtenidas de acuerdo con el número de ciclos durante el proceso de irradiación ultravioleta en función a los tiempos de residencia y los dos flujos volumétricos, aparentemente, la dosis aplicada en cada ciclo está en función del flujo volumétrico y del tiempo de exposición, anteriormente, se presentaron dos tiempos de residencia, a los dos flujos, sin embargo, para cada

ciclo del flujo volumétrico se duplicaron los tiempos de residencia dentro del reactor hasta llegar a 7 ciclos por cada flujo volumétrico, conforme el tiempo de residencia aumentaba, la dosis de UV-C también, debido a que la radiación UV depende de la duración en que se expone y la longitud de onda del tratamiento (Pontin et al., 2010).

Uno de los mayores desafíos en estudios de post cosecha es encontrar la dosis efectiva para llegar en su caso, a la inactivación de un microorganismo o patógeno que resulte peligroso para las plantas, según estudios reportados por Vásquez et al. (2017). Por lo cual se obtuvieron diferentes dosis para encontrar el rango en el que se presentara un mejor comportamiento del decrecimiento o aumento de la concentración de ácido ascórbico y obtener los parámetros cinéticos.

Tabla 5. Dosis aplicadas en función de los tiempos de residencia y flujo volumétrico en reactor UV-C.

Flujo volumétrico	Tiempo	Dosis
2.2 mL/s	26 s	0.56 J/cm ²
	52 s	1.13 J/cm ²
	78 s	1.69 J/cm ²
	104 s	2.26 J/cm ²
	130 s	2.82 J/cm ²
	156 s	3.39 J/cm ²
	182 s	3.95 J/cm ²
4.7 mL/s	69 s	1.5 J/cm ²
	138 s	3.0 J/cm ²
	207 s	4.49 J/cm ²
	276 s	5.99 J/cm ²
	245 s	7.49 J/cm ²
	414 s	8.99 J/cm ²
	483 s	10.49 J/cm ²

3.4. Análisis factorial general

En la Tabla 6, se muestran los resultados del análisis de varianza para los factores seleccionados, los valores de $p \leq 0.05$ en la Figura 17, representan los términos significativos del modelo, se observa que durante la pasteurización en frío y de acuerdo con los factores seleccionados para el análisis; donde el diagrama de Pareto presenta a la variable de flujo como la que mayor influencia tiene del tratamiento de luz ultravioleta sobre el ácido ascórbico y datos reportados por Gopisetty et al. (2018) realizando un estudio sobre las propiedades en una bebida de arándano carbonatada, al aplicar el tratamiento UV-C y ver el efecto del ácido ascórbico encontraron que en el reactor de flujo la dosis UV fue directamente proporcional al tiempo medio de residencia indicando una dosis uniforme sobre el rango aplicado, y estas dos variables están directamente relacionadas con los ciclos por los que pasa la solución modelo con ácido ascórbico.

La tabla 6 comprueba la influencia de las diferentes variables que implica el tratamiento UV-C, sin embargo, toda variable está interactuando con los ciclos o el flujo lo que involucran los tiempos de residencia y al combinar con la temperatura o ciclo con flujo volumétrico hay una influencia significativa ($p \leq 0.05$) sobre la degradación del ácido ascórbico lo cual implica cambios a nivel micro molecular del mismo al ser expuesto a la luz UV-C en los diferentes tiempos y dosis aplicadas.

Tabla 6. Análisis de varianza de factores seleccionados.

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	15	39330.1	2622.0	28.45	0.000
Lineal	5	30468.5	6093.7	66.13	0.000
Flujo	1	19690.4	19690.4	213.67	0.000
Temperatura	1	2610.6	2610.6	28.33	0.000
Ciclo	3	8167.5	2722.5	29.54	0.000
Interacciones de 2 términos	7	3133.8	447.7	4.86	0.000
Flujo*Temperatura	1	601.1	601.1	6.52	0.012
Flujo*Ciclo	3	1481.1	493.7	5.36	0.002
Temperatura*Ciclo	3	1051.6	350.5	3.80	0.012
Interacciones de 3 términos	3	5727.8	1909.3	20.72	0.000
Flujo*Temperatura*Ciclo	3	5727.8	1909.3	20.72	0.000
Error	128	11795.7	92.2		
Total	143	51125.9			

La dosis UV es descrita como el número de fotones absorbidos por un objeto de radiación por área de superficie, como resultados se obtendrá una distribución de dosis en función del flujo volumétrico y del tiempo como lo demuestra la Figura 16; sin embargo, la relación entre un análisis de varianza y una barra de términos significativos es que indican si hay influencia de las variables sobre el tratamiento, siendo la barra de términos la que determina cual es la variable de mayor influencia, como lo es el flujo volumétrico, y el numero de ciclos que atraviesa el fluido, al conjuntar los flujos, la temperatura del fluido y ciclos crean el mismo efecto teniendo un impacto en la degradación del ácido ascórbico durante el tratamiento.

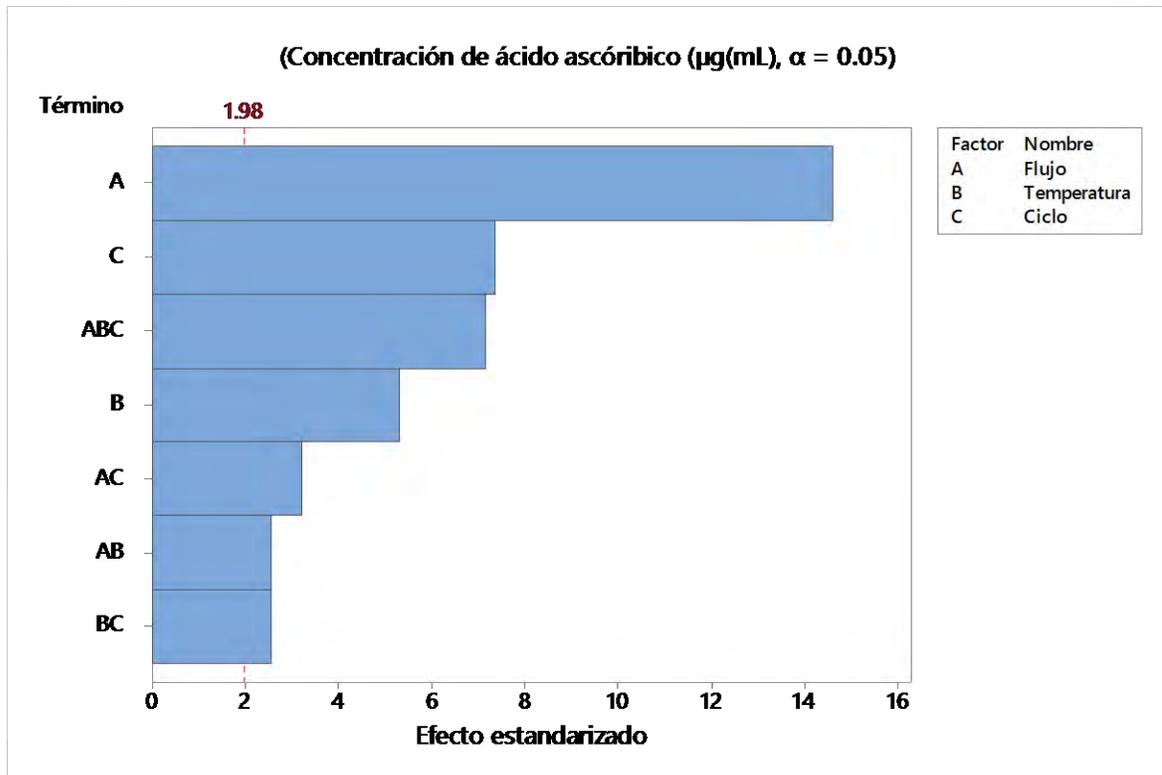


Figura 16. Términos significativos de la concentración del ácido ascórbico.

La Figura 16 indica los cambios de concentración de ácido ascórbico en $\mu\text{g/mL}$ en función de los ciclos, el flujo volumétrico y la temperatura del fluido modelo al ser sometidos a una irradiación UV-C, donde a partir de ciclo 5 a 2.2 mL/s a 4°C y 4.7 mL/s a 25°C la concentración del ácido ascórbico disminuye, éste negativo efecto del UV-C en el ácido ascórbico es probablemente a la oxidación de la vitamina C, la cual es estimulada en presencia de luz, oxígeno y enzimas; como ascorbato oxidasa y peroxidasa. Asimismo, durante la extendida exposición al UV-C, el ligero calor que produce la luz encendida conduce a la degradación de vitamina C en la bebida (Alothman et al., 2009), lo cual explica que la degradación sea hasta el ciclo 5 a 7 que la luz UV-C ya permaneció durante más tiempo encendida y provoque una elevación en la temperatura del fluido que atraviese el reactor.

En el flujo de 4.7 mL/s a 4°C y 2.2 a 25°C a partir del ciclo 3 empieza a disminuir el ácido ascórbico considerablemente, pero en el ciclo 7 aumenta la concentración sin rebasar la concentración inicial, la degradación química y bioquímica del ácido

ascórbico ocurre durante el camino de ácido ascórbico a DHA a ácido dicetogulónico, debido a la oxidación en la primera fase y la lactona es menos estable que la del ascorbato que corresponde al dehidroascorbato así se hidroliza más rápido y produce dicetogulónico; la primera reacción puede ser reversible y la segunda irreversible (Margolis et al., 1990), lo que provoca que en éstos flujos ocurra una reacción reversible porque el comportamiento del ácido ascórbico a partir del ciclo 3 disminuye y al final aumenta.

El comportamiento que se muestra en la Figura 17 se observa que hubo cambio significativo ($p > 0.05$) en el flujo volumétrico específicamente en el cambio de concentración de 2.2 mL/s a 4°C donde la pérdida de ácido ascórbico ocurre de manera consecutiva, el cambio puede ser que se deba que al manejar velocidades diferentes en función del volumen dentro del reactor el perfil de velocidades cambie dentro él y la distribución de cada molécula cambie entorno a la configuración del reactor.

Con los resultados obtenidos, se demuestra que a mayor dosis hay una mayor inactivación del componente expuesto a la luz ultravioleta, mismas dosis dependen del tiempo de residencia y el flujo volumétrico que al pasar con menor velocidad por el reactor es mayor la exposición directa de la luz con la bebida.

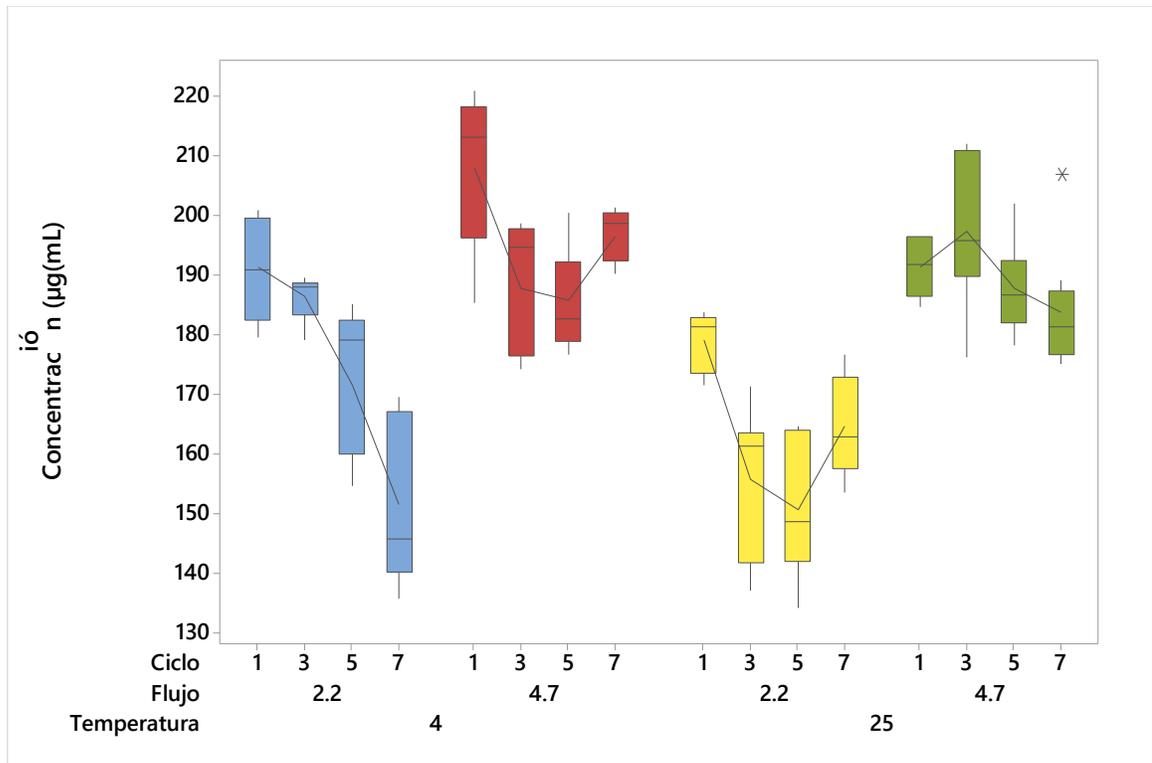


Figura 17. Cambios de concentración del ácido ascórbico en función a ciclos, flujo volumétrico y temperatura del fluido.

3.5. Cinética de degradación del ácido ascórbico

La luz ultravioleta es conocida por generar radicales libres mediante la una amplia variedad de reacciones fotoquímicas, que puede afectar a las vitaminas (Koutchma, 2009). Gayan et al., (2012), presentaron un estudio de la combinación de temperaturas medias y luz ultravioleta en el jugo de naranja donde al combinar ambos procesos las pérdidas por luz ultravioleta del ácido ascórbico son de $16.45 \pm 0.77 \%$, sin reportar la destrucción del ácido ascórbico durante el tratamiento. Los datos que presenta la gráfica 18, a $t=26$ s en 25°C lo cual demuestra un comportamiento estable en el primer y segundo ciclo hasta el tercer ciclo en donde comienza un aumento de concentración del ácido ascórbico con una pendiente de 56.05, los parámetros son a partir de un aumento en la concentración esto se debe a que en un sistema vitro, la relación entre el ácido ascórbico y la longitud de onda (UV-C), en concentraciones encontradas dentro de las células previene la

desaminación, puesto que los enlaces del ácido ascórbico, al exponer la luz ultravioleta absorbe cantidades de ácido p-amino benzoico lo que proporciona protección al ácido ascórbico. Dichos resultados, son biológicamente favorables, porque a diferencia del efecto antioxidante donde la protección se produce a bajas concentraciones de ácido ascórbico y luego la meseta, el amortiguamiento ultravioleta aumenta linealmente con el aumento de la concentración del ácido ascórbico (Deutsch y Kolhouse, 1993).

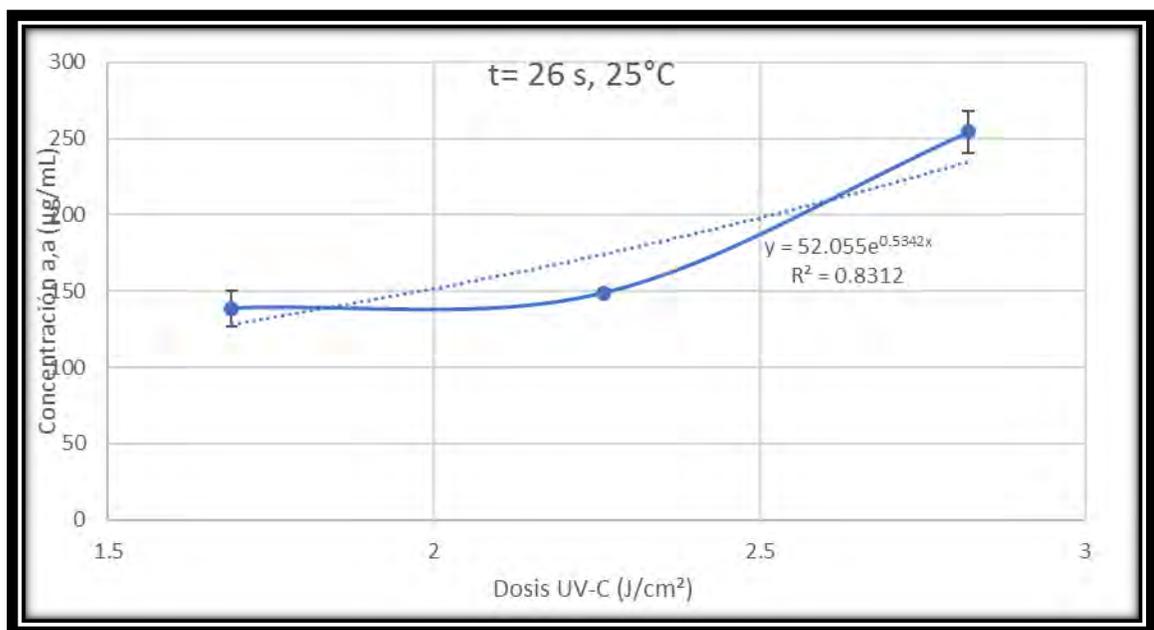


Figura 18. Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 26 s y 25°C.

La Figura 18 presenta el comportamiento en un tiempo de residencia de 26 s a 25°C del fluido modelo con ácido ascórbico, mostrando un aumento de concentración del ácido ascórbico de 50 a 250 µg/mL dentro del reactor UV-C, aunque no se presenta una degradación del ácido ascórbico, de acuerdo a Usaga et al., 2017, el efecto de la irradiación UV-C no tiene un efecto significativo ($p > 0.05$) en la concentración total de ácido ascórbico; sin embargo, el aumento del ácido ascórbico es un decrecimiento en la inactivación del *E. Coli* en su estudio con jugo de manzana, este

tipo de aditivos como lo es el ácido ascórbico pueden ser adversamente influenciados por la irradiación UV-C o puede existir una degradación, donde se recomienda ser añadido después de la exposición al tratamiento.

La Figura 19 presenta un comportamiento de manera ascendente pero a partir de una dosis 6 J/cm² a 9 J/cm², dosis que representan los últimos ciclos con pendiente de 158.9 de manera ascendente, al menor flujo volumétrico en 25°C lo que atribuye que durante más tiempo permanezca en el reactor, mayores cambios químicos presenta el ácido ascórbico, a diferencia de estudios reportados que al combinar antocianinas con el ácido ascórbico lo que provoca la antocianina es evitar la oxidación del ácido ascórbico justo después de su adición a un jugo modelo (Hernández-Herrero y Frutos, 2013).

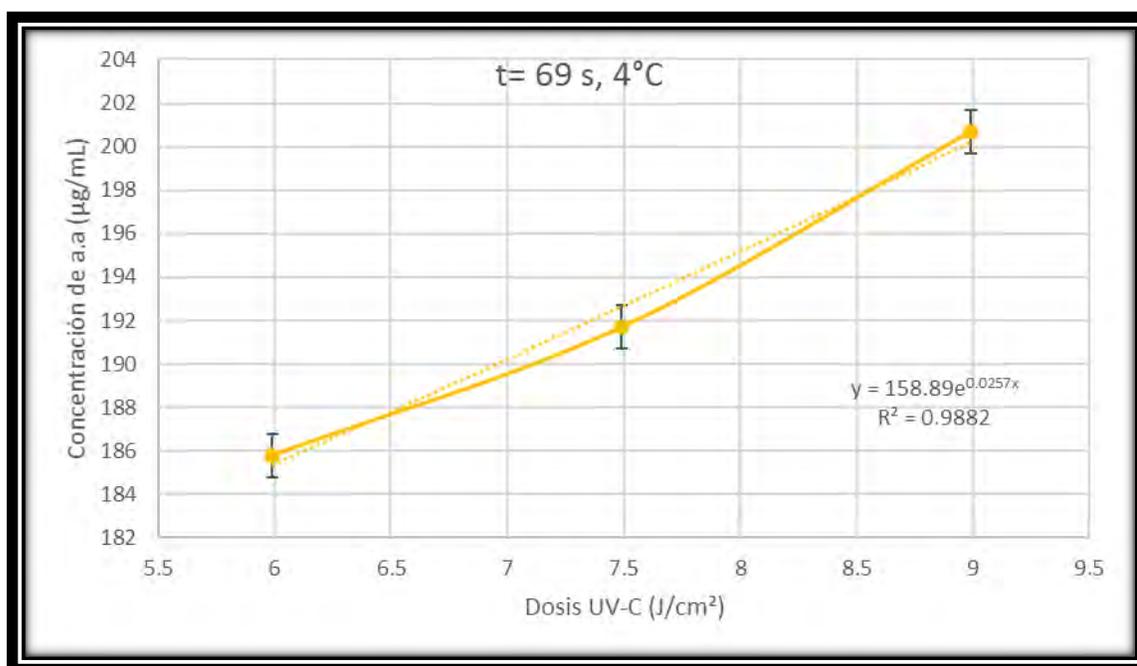


Figura 19. Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 69 s y 4°C.

El ácido ascórbico es un componente que se encuentra en el 80% de los alimentos, sin embargo sufre daños en presencia de calor, luz y algunos metales; en la Figura 19 se presenta los cambios del ácido ascórbico sometido al mayor tiempo de residencia y el fluido modelo a una temperatura de 4°C con un aumento de 186 a 200 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ con una R^2 de 0.98, siendo el modelo que mejor se acopla al comportamiento del ácido ascórbico, Barril et al., 2012, estudiaron la cinética de degradación del ácido ascórbico y dióxido de sulfuro en el vino blanco, para esto se preparó una solución modelo de ácido tartárico, hidróxido de potasio y etanol, mostrando resultados que al combinar el ácido ascórbico y dióxido de sulfuro la degradación es significativa ($p < 0.05$) porque al presentarse un metal, el ácido ascórbico tiende a degradarse de mayor manera ya que los iones de metal aceleran éste proceso.

El aumento de del ácido ascórbico en 150 a 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$ se presenta en la Figura 20 en una dosis de 1.7 a 2.8 J/cm^2 que abarca el tercer y quinto ciclo con una pendiente de 137.2, aunque sea el estudio de una degradación para parámetros cinéticos el aumento de ácido ascórbico se debe según estudios reportados por Ramos-Aguilar et al. en 2017, en productos líquidos realizados con frutas como la manzana, uvas y peras por el poco contenido de materia, aunque no se maneja ningún jugo se añadieron componentes del jugo de uva siendo una cantidad de materia y solidos poco significativos.

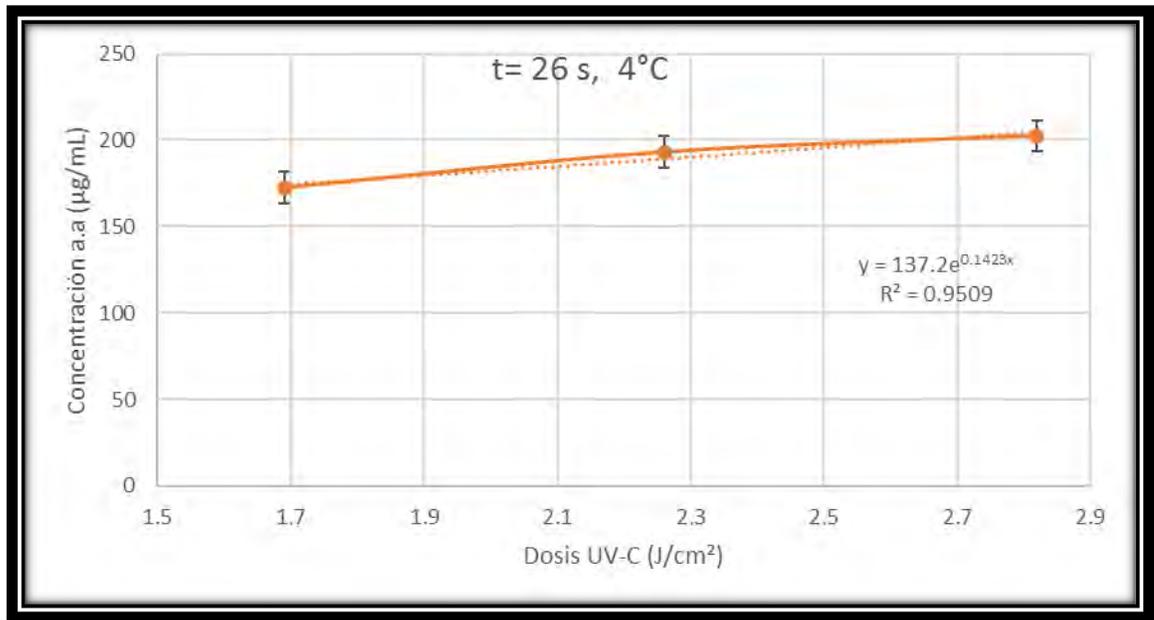


Figura 20. Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 26 s y 4°C.

En la Figura 20 se presenta el comportamiento del ácido ascórbico sometido a la irradiación UV-C en el menor tiempo de exposición a 4°C del fluido modelo, como se muestra la R^2 es de 0.95, por lo tanto, no existe realmente una degradación, sino un aumento de concentración (150 a 200 µg/mL) a una dosis de 2.8 J/cm² una de las razones por la que esto ocurre es que la solución modelo está constituida por componentes como la glucosa tal como Islam et al. en 2016 que al tratar jugo de manzana y considerar al ácido ascórbico un indicador de su capacidad antioxidante; considerando que contiene fructosa y glucosa y al llevar una irradiación UV-C de 0 a 40 mJ/cm² presenta el ácido ascórbico una mejor degradación ya que el azúcar inhibe la degradación del componente.

En la Figura 21, se presenta el comportamiento al flujo de 4.7 mL/s a una temperatura de 25°C con una pendiente de 22.2 en los últimos 4 ciclos que son equivalentes de 6 a 10 J/cm² para la disminución de ácido ascórbico en el fluido modelo expuesto a UV-C lo cual puede que se deba a la oxidación del ácido ascórbico a DHA que proviene de dos átomos de hidrogeno que pueden usarse en la reducción de componentes biológicamente significativos; Enzo et al. (2015)

reportan pérdida del ácido ascórbico en jugo de uva a las dosis más altas que es de 2.84 J/cm^2 , la bebida modelo está compuesta por ácidos y azúcar presentes en un jugo de uva, sin algún tipo de materia, por lo tanto, la degradación de ácido ascórbico se presenta de igual manera a las dosis más altas; solo que aquí es a partir de 6 J/cm^2 .

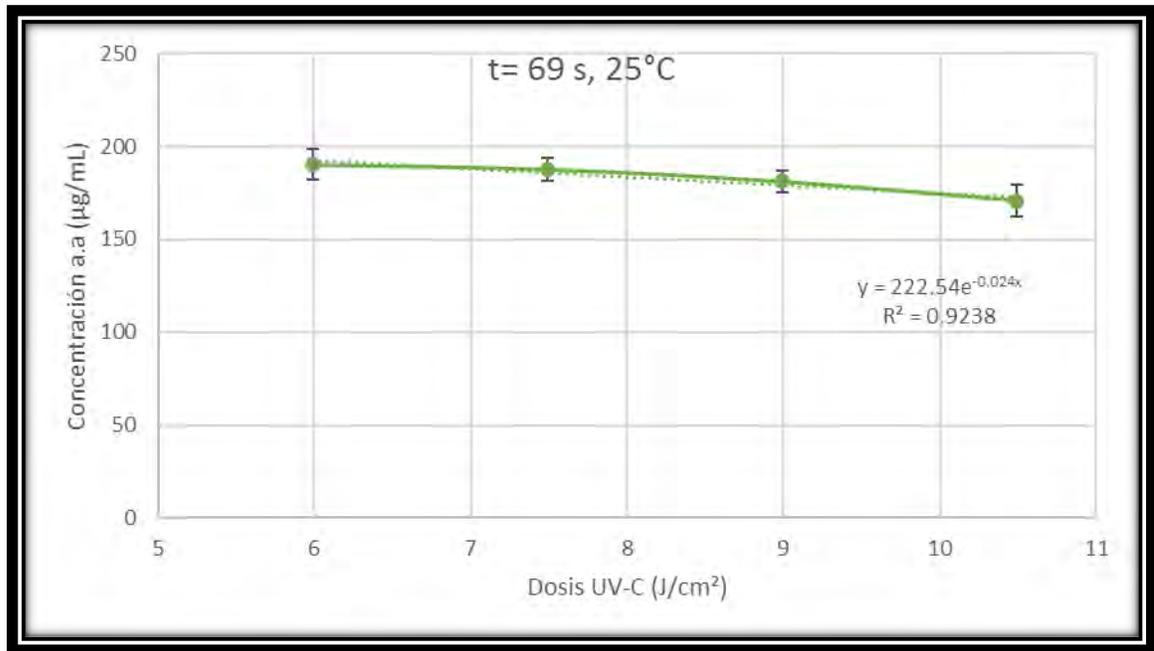


Figura 21. Degradación de ácido ascórbico en función de la dosis UV-C a 69 s y 25°C .

La degradación del ácido ascórbico presentada en la Figura 21 es apta para seguir una reacción de primer orden ya que la ecuación representa las constantes de dicho orden con un R^2 mayor a 0.9, indicando que la degradación del ácido ascórbico depende de la concentración en función a la dosis que es expuesta, sin embargo, al seguir una reacción de orden cero o segundo orden, la R^2 era menor a 0.8, Remini et al., en 2015 estudiaron la cinética de degradación del ácido ascórbico en un jugo de naranja en su conservación, después de una pasteurización, manteniéndolo a 4°C y 37°C , siguiendo una reacción de primer orden, distintos estudios en jugos

siguen una cinética de primer orden durante su conservación (Odrizola-Serrano et al., 2009; Polydera et al., 2003; Torres et al., 2011; Zheng & Lu, 2012). El incremento de temperatura en el fluido tiene influencia en las pérdidas de ácido ascórbico (Wallington et al., 2013), al igual que al permanecer a un mayor tiempo exponiéndose a la luz UV-C favorece a la degradación; sin embargo, las altas dosis de UV-C influyen de la misma manera como lo presenta la Figura 21 de 6 J/cm² a 11 J/cm² el ácido ascórbico se reduce de 195 a 140 µg/mL.

Una cinética indica como el ambiente, el estado de las variables y la influencia en la tasa de transformación en el proceso (Gujer, 2008), en este caso una degradación correspondiente a una simple reacción química.

Los parámetros cinéticos del ácido ascórbico en una bebida modelo sometida a la irradiación UV-C se presentan en la Tabla 7. En 2009, Koutchma, estudió la cinética de la inactivación microbiana del tratamiento UV-C, presentando una cinética de primer orden, siendo la más simple debido a la dependencia de la inactivación en función de la concentración, aunque en este trabajo no se presenta una inactivación microbiana, el trazador utilizado gracias a su capacidad fotosensible, presenta un modelo cinético, de acuerdo con su degradación puede estudiarse la cinética dentro del reactor UV-C. La velocidad depende de la degradación del componente a estudiar, el comportamiento que sigue cada condición en el tratamiento con luz UV-C, asimismo, la concentración tiene influencia significativa en los parámetros cinéticos ($p < 0.05$) como se muestran, esto puede ser ya que al ser sometido a luz UV existe una presión molecular en el componente y llega a causar la degradación química; sin embargo, existen radicales libres que permiten la donación de electrones lo que permite evitar la oxidación (Rohan et al., 2011). La relación inversa de la pendiente y la intensidad de la luz lo cual indica que la luz incrementa el rango de oxidación del ácido ascórbico por lo cual la velocidad de degradación aumenta (Glickman et al., 1993).

Una de las propiedades fisicoquímicas que contribuyen el fluido modelo, es el pH el cual siempre se mantuvo en 3.1 ± 0.3 , y estudios recientes realizados por Rohan et

al. en 2011, demostraron que un pH menor a 5 la degradación del ácido ascórbico sometida a Luz UV-C, es menor en comparación a pH más elevados.

Para la obtención de los parámetros cinéticos se debe tomar en cuenta la Ecuación 7 la cuál corresponde a una cinética de degradación, al ajustar cada gráfica el modelo que mejor se ajustó fue de primer orden, y como resultado se tiene que la pendiente de cada gráfica es la velocidad de degradación del ácido ascórbico al ser expuesta a la luz UV-C.

Tabla 7. Parámetros cinéticos del ácido ascórbico en fluido modelo.

Temperatura	Tiempo de residencia	k	Orden de reacción	R ²
4°C	26 s	137.2	Primer	0.95
	69 s	158.9	Primer	0.98
25°C	26 s	52.05	Primer	0.83
	69 s	222.5	Primer	0.92

3.6. Turbidez

La eficiencia de un tratamiento con irradiación ultravioleta se ve afectada por la penetración de la luz por la presencia de sólidos solubles y partículas (Wright et al., 2000). Los sólidos suspendidos causados por la glucosa y los ácidos tanto tartárico como ascórbico en una solución interfieren en la penetración de la luz ultravioleta ya que las partículas, conforme se distribuye dentro del reactor es menor la velocidad que alcanzan y no todas las partículas suspendidas llegan al mismo tiempo en la salida, lo que contribuye su relación con la distribución de tiempos de residencia, sin embargo, la glucosa y ácido málico presentes en la solución son factores indispensables para conocer la turbidez del fluido, en la Tabla 8 se presentan los valores obtenidos de turbidez en las diferentes condiciones. Fredericks et al., 2011, realizaron un estudio en jugos de uva y vino, en el cual

parámetros como el color y la turbidez influyen en el tratamiento UV-C como germicida ($\rho < 0.05$) en dosis de 0 a 3672 J/L, lo cual es aceptable como un tratamiento para inactivar la población microbiana en dicha bebida. Los valores presentados en este estudio fueron tomados únicamente al final de cada ciclo 7 en los dos tiempos de residencia (26 s y 69 s) por lo tanto, después de cada tratamiento no hubo influencia significativa ($\rho > 0.05$) de la turbidez en el tiempo y temperaturas porque contribuye a un fluido con menor absortividad (Koutchma, 2009).

Tabla 8. Turbidez en tiempos de residencia y temperaturas.

Temperatura	Tiempo de residencia	Turbidez
4°C	26 s	2.12±0.67
	69 s	2.47±0.26
25°C	26 s	3.02±0.99
	69 s	2.68±0.31

La absortividad es la capacidad que tiene el líquido de ser penetrado por la luz ultravioleta, en la Figura 22 se presenta un diagrama donde indica cómo es que el cuarzo que emite la luz ultravioleta logra atravesar en el fluido, y esa distancia entre la luz y fluido es la absorbancia medida representada por x , Fan y Geveke (2007) descubrieron que azúcares como fructosa, glucosa y sacarosa, seguida de ácidos como el ácido málico y tartárico absorbían poca luz ultravioleta en el rango de 240-360 nm, aunque la fructosa tiene una mayor absorbancia de 260-280 nm, sin embargo el ácido ascórbico tiene una fuerte absorbancia incluso a concentraciones muy bajas.



Figura 22. Estructura interna de reactor UV-C.

CONCLUSIONES

Actualmente la industria alimentaria es cada vez más demandada por los consumidores, exigiendo la mayor calidad en los productos que consumen y en las mejores condiciones tanto visuales como organolépticas y este punto comienza desde los equipos a utilizar para que un alimento o en su caso, bebida pueda ser tratado.

- Las distribuciones de tiempos de residencia permiten no solamente la caracterización del reactor, sino la distribución del líquido a través del reactor y el tiempo que reside cada partícula del líquido dentro de él, dado que a un tiempo de residencia de 69 segundos en un flujo volumétrico de 4.7 mL/s hay una mayor influencia en la degradación del ácido ascórbico y en sus constantes.
- AL utilizar la luz ultravioleta se ve su efecto en la degradación del ácido ascórbico, sin embargo, aunque sigue una cinética de primer orden, lo hace a favor de un incremento del ácido ascórbico en dos tiempos de residencia (26 s y 69 s) a 4°C y 25°C del fluido modelo, a excepción de 69 s y 25°C, con una constante de velocidad de 222.5, lo que atribuye la degradación al mayor tiempo dentro del reactor y que el aumento de temperatura incrementa la degradación del ácido ascórbico.
- Los sólidos suspendidos no tuvieron una influencia en la penetración de la luz ultravioleta lo cual permite que el contacto de la luz ultravioleta y el ácido ascórbico sea más directo, permitiendo el efecto de la luz ultravioleta sobre la degradación del ácido ascórbico.

Finalmente se logró realizar una caracterización macromolecular (DTR) y micro molecular mediante las cinéticas, aunque no se obtuvo una degradación en todas condiciones propuestas, se logró la relación que tiene el ácido ascórbico al ser expuesto en luz ultravioleta diluido en otros componentes como ácido tartárico y glucosa, componentes característicos en un jugo de uva.

La luz ultravioleta funciona diferente a las demás tecnologías, cuenta con la manipulación de las dosis en función del tiempo y los flujos que uno desee, el estudio realizado permitió conocer la cinética del ácido ascórbico, controlando los parámetros anteriores, de ésta manera se logró determinar que a un tiempo de residencia de 69 segundos y un flujo de 4.7 mL/s es cuando se comienza a observar gráficamente un deterioro del ácido ascórbico con una cinética de primer orden, lo cual indica que bebidas que contengan éste tipo de ácido tiene mayor resistencia a las dosis aplicadas y sin modificar la temperatura de la bebida y propiedades como el sabor y color.

REFERENCIAS

- Alothman, M., Bath, R., Karim, A.A. (2009). Antioxidant capacity and phenolic content of selected tropical fruits from Malaysia, extracted with different solvents. *Food Chemistry*. 115: 785-788.
- Antonio-Gutiérrez, O.T., Palou, E., López-Malo, A. (2012). Equipos para tratamientos con radiación UVC. *Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos*. 6: 149-159.
- Antonio-Gutiérrez, O.T., López-Malo, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N. (2015). Métodos para la determinación de la dosis de radiación ultravioleta de onda corta (UVC) en alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos*. 9: 34-40.
- Bastía J.M., Cepedo, B. (2016). La vitamina C como un eficaz micronutriente en la fortificación de alimentos. *Rev. Chil. Nutrio*. 43.
- Barril, C., Clark, A.C., Scollary, G.R. (2012). Chemistry of acid ascorbic and sulfure dioxide as an antioxidant system relevant to White wine. *Analytica Chemical Acta*. 732: 186-193.
- Benhabiles, o., Chekir, N., Taane, W. (2012). Determining of the residence time distribution in CPC reactor type. *SciVerse ScienceDirect*. 18: 368-372.
- Bermúdez-Aguirre D., Barbosa-Cánovas G.V. (2011). Introduction to: nonthermal processing technologies for food. Zhang, HQ, Barbosa-Canovas, GV, Balasubramaniam, VM, Dunne, CP, Farkas, DF and Yuan, JTC, Eds. John Wiley and Sons, Inc. Ames, IA.
- Boskovic, D., Loebbecke, S. (2008). Modelling of the residence time distribution in micromixes. *Chemical Engineering Journal*. 135S: S138-S146.

- Cabrerizo, D.M., Antón, L.J., Barrio, J. (2008). Física y Química. 4ª ed. México: EDITEX.
- Cardello, A.V., Schutz, H.G., Leshner, L.L. (2007) Consumer perceptions of foods processed by innovative and emerging technologies: A conjoint analytic study. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8: 73-83.
- Chang, S.K., Ismail, A., Daud, Z. (2016). Ascorbic Acid: Properties, determination and uses. 1ª ed. Maylasia: University Putra Maylasia.
- Deustch, J.C., Kolhouse, J.F. (1993). A mechanism of inhibition of short-wavelength ultraviolet light-induced deamination of pyrimidine bases by ascorbic acid. *Mutation Research*. 302: 183-190.
- Domínguez, L., Parzaneze, M. (2011). Luz ultravioleta en la conservación de alimentos. *Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca*. 70-76.
- Enzo, L.M., Cava, L., Sgroppo, S.C. (2015). Evolution during refrigerated storage of bioactive compounds and quality characteristics of grapefruit [*Citrus paradise* (Macf)] juice treated with UV-C light. *LWT-Food Science and Technology*. 63: 1325-1333.
- Fan, X., Geveke, D. (2007). Furan Formation in sugar solution and apple cider upon ultraviolet treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 55: 7816-7821.
- FDA Food and Drug Administration. (2013). CFR Tittle 21. Chapter 1. Part 179. Vol. 3. Irradation in the production, processing, and handling book.
- Fernández, A., Dos Santos, M., Da Silva, D., De Sousa, P., Maia, G. & De Figueiredo, R. (2011). Chemical and physicochemical characteristics changes during passion fruit juice processing. *Ciencia e Tecnologia de Alimentos*. 31: 747-751.

- Frederiks, I.N., Du Toit, M., Krügel, M. (2011). Efficacy of ultraviolet radiation as an alternative technology to inactivate microorganisms in grape juices and wine. *Food Microbiology*. 28: 510-515.
- Gang, L., Chaolin, L., Peng L. (2011). UV inactivation of milk-related microorganisms with a novel electrodeless lamp apparatus. *Eur Food Res Technol*. 233:79-87
- Gayán. E., Serrano, M.J., Monfort, S., Álvarez, I., Condón, S. (2012). Combining ultraviolet light and mild temperatures for the inactivation of *Escherichia Coli* in orange juice. *Journal of Food Engineering*. 113: 598-605.
- Gayán, E., Condón, S., Álvarez, I. (2014). Continuous-flow UV liquid food pasteurization: Engineering aspects. 7: 2813-2827.
- Glickman, R.D., Sowell, R., Law, K.M. (1993). Kinetic properties of light-dependent ascorbic acid oxidation by melanin. *Free Radical Biology & Medicine*. 15: 453-457.
- Gopisetty, V., Patras, A., Kilonzo-Nthengue, A., Yannam, S., Bansode, R.R., Sasges, M., Burns, M., Vergne, M.J., Pan, C., Xiao, H. (2018). Impact of UV irradiation on the quality, safety, and cytotoxicity on the cranberry-flavored water using a novel continuous flow UV system, LWT. *Food Science and Technology*. 10: 1016-1042.
- Gregory, J. (2008). Vitamins. In: Damoran S, Parkin K, Fennema O, editors. *Food Chemistry*, 4th edition. Boca ratón: Fla.: CRC pres. Pag: 439-521.
- Gujer, W. (2008). *System analysis for Water technology*. España: Springer.
- Haro-Maza, J.F., Guerrero-Beltrán, J.A. (2013). *Efecto de la radiación UV-C en frutas y verduras. Temas Selectos de Ingeniería en Alimentos*. 7:68-77.
- Heldman, D.R. (2013). *Food preservation process design*. Springer. US. Pp: 489-497.

- Heppel, N.J. (1985). Comparison of residence time distributions of water and milk in an experimental UHT sterilizer. *J. Food Eng.*, 4: 71-80.
- Hernández-Herrero, J.A., Frutos, M.J. (2015). Influence of rutin and ascorbic acid in colour, plum anthocyanins and antioxidant capacity stability in model juices. *Food Chemistry*. 173: 495-500.
- Himmelblau D., Bischoff, K. (2004). Análisis y simulación de procesos. Sexta edición. Reverté, S.A. España.
- Igual, M., García-Matínez, E., Camacho, M.M., Martínez-Naverrete, N. (2009). Effect of thermal treatment and storage on stability of organic acid and the functional value of grapefruit juice.
- Islam, Md.S., Patras, A., Pokharel, B., Wu, Y., Vergne M.J., Shade, L., Xiao, H., Sasges M. (2016). UV-C irradiation as an alternative disinfection technique: Study of its effect on polyphenols and antioxidant activity in apple juice. *Innovate Food Science and Emerging Technologies*.34: 344-351.
- Karhan, M., Aksu, M., Tetik, N. & Turthan, I. (2004). Kinetics modeling of anaerobic thermal degradation of ascorbic acid in rose hip (*Rosa canina* L.) pulp. *Journal of Food Quality*. 20: 311-319.
- Koutchma, T. (2009). Advances in Ultraviolet Light Technology for Non-Thermal Processing of Liquid Foods. *Food Bioprocess Technology*.2: 138-155.
- Koutchma, T. N., Forney, L. J., & Moraru, C. I. (2004). Ultraviolet Light in Food Technology: Principles and Applications. USA: CRC Press.
- Koutchma, T, y Parisi, B. (2004). Biodosimetry of E.Coli UV inactivation in model juices with regard to dose and RTD distribution in annular UV reactor. *Journal of Food Science*. 69: 14-22.
- Levenspiel, O. (2004). Ingeniería de las reacciones químicas. 3ª ed. México: Limusa Wiley.

- Janssen, P.W.M. (1994). Measurement of residence time distribution of processing plant using a cross correlation technique. *Journal of Food Engineering*. 21: 215-223.
- Mai Thu Thi Traan., Mohammed Farid. (2004). Ultraviolet treatment of orange juices. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 5: 495-502.
- Margolis, S.A., Paule, R.C., Ziegler, R.G. (1990). Ascorbic acid and dehydroascorbic acids measured in plasma preserved with dithiothreitol or metaphosphoric acid. *Clinical Chemistry*. 36: 1750-1755.
- Nauman, E.B. (2008). Chemical Reactor Design, Optimization and Scaleup. 2nd edition. United States of America. Wiley.
- Nisha, O., Singhal, S. & Pandit, A. (2004). A study on degradation kinetics of ascorbic acid in amla (*Phyllanthus emblica* L.) during cooking. *International Journal of Food Science and Nutrition*. 60: 280-284.
- Odrilazo-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O. (2009). Influence of Storage Temperature of the Kinetics of the Changes of Anthocyanins, Vitamin C and Antioxidant Capacity in Fresh-cut Strawberries Stored under High-oxygen Atmospheres. *Journal of Food Science*. 74: 184-191.
- Ordoñez-Santos, L.E., Yoshioka-Tamayo, L.S. (2012). Cinética de degradación térmica de vitamina C en pulpa de mango (*mangifera indica*). *Vitae*. 1: 80-83.
- Peleg, M. (2017). Theoretical study of aerobic vitamin C loss kinetics during commercial heat preservation and storage. *Food Research International*. 102: 246-255.
- Pinheiro Torres, A., Oliveira, F A R., Fortuna, S.P. (1998). Residence Time Distribution of Liquids in a Continuous Tubular Thermal Processing System Part I: Relating RTD to Processing Conditions. *Journal of Food Engineering*. 35: 143-165.

- Polydera, A., Stoforos, N., Taoukis, P. (2003). Comparative shelf life study and vitamin C loss kinetics in pasteurised and high-pressure processed reconstituted orange juice. *Journal of Food Engineering*. 60: 21-29.
- Pontin, M.A., Piccoli, P.N., Francisco, R., Bottini, R., Martínez-Zapater, J.M., Lijavetzky, D. (2010). Transcriptome changes in grapevine (*Vitis vinifera L.*) cv. Malbec leaves induced by ultraviolet B radiation. *BMC Plant Biol.* 224: 224-237.
- Ramos-Agular, A.L., Victoria-Campos, C.I., Ochoa-Reyes, E., Ornelas-Paz, J.J., Zamudio-Flores P.B., Rio-Velazco, C., Reyes-Hernández, J., Pérez-Martínez, J.D., Ibarra-Junquera, V. (2017). Physicochemical properties apple juice during sequential steps of the industrial processing and functional properties of pectin fractions from the generated pomace. *LWT-Food Science and Technology*. 86: 465-472.
- Remeni, H., Mertz, C., Belbahi, A., Achir, N., Dornier, M., Madani, K. (2015). Degradation kinetic modelling of ascorbic acid and colour intensity in pasteurised blood orange juice during storage. *Food Chemistry*. 173: 665-673.
- Rohan, V.T., Ramaswamy C., Anantheswaran and Luke F. LaBorde. (2011). Ascorbic Acid Degradation in a Model Apple Juice and in Apple Juice during Ultraviolet Processing and Storage. *Journal of Food Science*. 76: 62-71.
- Sahle-Demessie, E., Bekele, S., Pillai, U.R. (2003). Residence time distribution of fluids in stirred annular photoreactor. *Science Direct*. 88: 71-82.
- Santhirasegaram, V., Razali, Z., George, D.S., Somasundram, Ch. (2015). Comparison of UV-C and thermal pasteurization on quality of Chokanan mango (*Mangifera indica L.*) juice. *Food and Bioproducts Processing*. 94: 313-321.
- Thompson, F. (2003). Ultraviolet light. In Trugo L., Finglas, P.M. (Eds). *Encyclopedia of Food Science and Nutrition*. London. 5885-5889.

- Torres, B., Tiwari, B.K., Patras, A., Cullen, P.J., Brunton, N., O'Donnell, C.P. (2011). Stability of Anthocyanins and ascorbic acid of high-pressure processed blood orange juice during storage. *Innovate Food Science and Emerging Technologies*. 12: 93-97.
- Unlukturk, S., Koutchma T. & Arastoopour H. (2004). Modeling of UV dose distribution in a thin film UV reactor processing of apple cider. *Journal of Food Processing*. 65: 125-136.
- Usaga, J., Manns, C.D., Moraru, C.I., Worobo, R.W., Padilla-Sakour, O.I. (2017). Ascorbic acid and selected preservatives influence effectiveness of UV treatment of apple juice. *Food Science and Technology*. 75: 9-16.
- Vásquez, H., Ouhibi, C., Lizzi, Y., Azzouz, N., Forges, M., Bardin, M., Nicot, P., Urban, L., Aarouf, J. (2017). Pre-harvest hermetic doses of UV-C radiation can decrease susceptibility of lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.) to *Botrytis cinerea* L. *Scientia Horticulturae*. 222: 32-39.
- Wallington, N., Clarck, A.C., Prenzler, P.D., Barril, C., Scollary, G.R. (2013). The decay of ascorbic acid in a model wine system at low oxygen concentration. *Food Chemistry*. 141: 3139-3146.
- Wright, J.R., Summer, S.S., Hackney, C.R., Pierson, M.D., Zoecklein, B.W. (2000) Efficacy of ultraviolet light for reducing *Escherichia Coli* O157:H7 in unpasteurized apple cider. *Journal of Food Protection*. 63: 563-567.
- Zheng. H., Lu. H. (2011). Use of kinetic, Weibull and PLSR models to predict the retention of acid ascorbic, total phenols and antioxidant activity during storage of pasteurised pineapple juice. *Food Science and Technology*. 44: 1273-1281.