



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Modelamiento matemático del secado de manzana Golden
Delicious por radiación infrarroja**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

SAÚL SÁNCHEZ URBÁN

ASESOR: Dra. María Elena Vargas Ugalde

**COASESOR: M. en C. Julieta González
Sánchez**

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
ÁFFRMA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
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 de Tesis

Modelamiento matemático del secado de manzana Golden Delicious por radiación infrarroja.

Que presenta el pasante: Saúl Sánchez Urbán

Con número de cuenta: 414098736 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, otórgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de mayo de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>Dra. María Elena Vargas Ugalde</u>	
VOCAL	<u>I.A. Francisco Javier López Martínez</u>	
SECRETARIO	<u>I.A. Edgar Francisco Arechavaleta Vázquez</u>	
1er. SUPLENTE	<u>M. en C. Araceli Ulloa Saavedra</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.Q.I. Ada Josefa Meza Meza</u>	

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

Trabajo realizado con el apoyo del programa UNAM DGAPA PAPIME PE208917.

Asimismo, se agradece el apoyo financiero del proyecto FESC UNAM PIAPI 1850.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y a mi alma mater, la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por todos los conocimientos y la formación académica que me han brindado, así como el orgullo de ser un puma con piel azul y oro.

A mi madre Blanca Urbán y a mi padre Mario Sánchez, ya que ellos son la base de la persona que soy y la que seré, agradezco todo su apoyo incondicional; todos sus consejos, llamadas de atención, todas las charlas que hemos tenido y sobre todo la comprensión y confianza que me han depositado para ser mejor día a día.

A mis queridas hermanitas menores Berenice y Miriam quienes siempre me han dado ánimos para seguir adelante y no rendirme, por todo el cariño y por toda la fe que me han tenido como su hermano mayor.

A mis inseparables y entrañables amigos Carlos Villa y Carlos Zárate con quienes recorrí de la mano esta increíble etapa de mi vida, sin ustedes no hubiese disfrutado tanto esta experiencia, mis mejores amigos, mi mejor equipo de trabajo, gracias por tanto.

A la Dra. María Elena, a la Maestra Julieta y a mi profe Paco por todos los conocimientos que me han transmitido, así como su apertura y seguimiento para poder concluir este trabajo.

Agradecimiento especial al profesor Víctor Avalos, por la pasión que denotaba hacia la docencia y por la extraordinaria visión que tenía sobre la vida cada que se presentaba en el aula, donde quiera que se encuentre, reciba mi infinito agradecimiento.

A todas las personas que han formado parte de mi vida, aunque ya no se encuentren más en mi camino.

ÍNDICE

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	6
1.1 Generalidades de la manzana	6
1.1.1 Composición química y aporte nutritivo.	6
1.1.2 Variedades de manzana.	8
1.1.3 Producción de manzana en México.	9
1.1.4 Manzana deshidratada	10
1.2 Secado	12
1.2.1 Secado de alimentos	14
1.2.2 Secado por infrarrojo	15
1.3 Modelamiento de secado en capa fina.	20
1.3.1 Mecanismos del proceso de secado.	20
1.3.2 Modelamiento matemático del secado de alimentos.	21
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
2.1 Objetivo general:	24
2.2 Objetivos particulares:	24
2.3 Materiales y métodos.	25
2.3.1 Materia prima.	25
2.3.3 Curvas de secado.	26
2.3.4 Modelamiento matemático	26
2.3.5 Color	31
2.3.6 Polifenoles totales	32
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	33

3.1 Curvas de secado.	33
3.2 Ajuste de los modelos matemáticos de secado.	34
3.3 Constantes cinéticas de los modelos matemáticos.	36
3.4 Coeficiente de difusión efectiva.	37
3.5 Energía de activación.	38
3.5.1 Consumo energético.	39
3.6 Coeficientes globales de transferencia de calor (h_c) y masa (h_m).	40
3.7 Color	41
3.8 Polifenoles totales.	43
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	47
REFERENCIAS	48
ANEXOS	53
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	53
ANEXO 1. AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS.	53
ANEXO 2. COLOR	62
ANEXO 3. POLIFENOLES TOTALES	79
ANEXO 4. Curva patrón de ácido gálico para la determinación de polifenoles totales.	82

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Composición Química de la manzana variedad Golden Delicious (Eroskiconsumer, 2011)	7
Cuadro 2. Composición Química de manzana deshidratada por 100 gramos de muestra (Webbery & Zimmerman, 2014)	11
Cuadro 3 Diseño estadístico para datos experimentales	26
Cuadro 4. Modelos matemáticos utilizados para la determinación de la cinética de secado de la manzana (Corrêa et al., 2012)	27
Cuadro 5. Ajuste de modelos matemáticos al secado por infrarrojo de manzana	34
Cuadro 6. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Aprox. de la difusión, Henderson-Pabis y logarítmico	36
Cuadro 7. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Verma, Page y Midilli	36
Cuadro 8. Difusividad efectiva a cada temperatura de secado	37
Cuadro 9. Coeficientes de difusión efectiva de diferentes productos agroalimentarios (Correa et al. 2012)	39
Cuadro 10. Coeficientes globales de transferencia de calor y masa para manzana deshidratada a diferentes temperaturas	40
Cuadro 11. Resultados de color para muestras frescas y deshidratadas de manzana	41
Cuadro 12. Variación de L, a y b entre muestras frescas y deshidratadas y de color (ΔE)	42
Cuadro 13. Contenido de polifenoles de Manzana Golden Delicious fresca y deshidratada a diferentes temperaturas	43

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Transferencia de agua y gradientes de actividad de agua (Fito et al., 2001)	14
Figura 2. Espectro de ondas electromagnéticas (Krishnamurthy et al., 2008)	16
Figura 3. Termobalanza OHAUS MB23	25
Figura 4. Espectrofotómetro VELAB VE-5000Y	32
Figura 5. Relación de humedad vs tiempo de secado de manzana Golden Delicious a 60, 65 y 70 °C	33
Figura 6. Variación de la difusividad efectiva con respecto de la temperatura para manzana deshidratada a temperaturas de 60, 65 y 70°C	39
Figura 7. Láminas de manzana fresca y con tratamiento a diferentes temperaturas	42

RESUMEN

Aunque existen numerosas investigaciones sobre distintas variedades de manzana, la mayoría de estas son realizadas con secado convencional por aire caliente, es por ello que en este trabajo se llevó a cabo el estudio del proceso de secado por radiación infrarroja como una alternativa que permite consumir menos cantidad de energía y menor tiempo de proceso, se utilizó manzana Golden Delicious ya que esta es una de las principales variedades que se cultivan dentro de nuestro país.

El proceso de secado se realizó utilizando un analizador de temperatura con lámpara infrarroja marca OHAUS y se trabajó con distintas temperaturas, siendo estas 60, 65 y 70 °C. La humedad final de la manzana se estableció a 20% (base húmeda). Al comparar los resultados obtenidos con los del secado de manzana por aire caliente, estos mostraron que al aumentar la temperatura los tiempos de secado disminuyen (hasta un 80%).

En el modelamiento matemático del proceso de secado se utilizaron siete modelos de cinética de secado; aproximación de la difusión, polinomial de dos términos, Henderson-Pabis, Midilli, Logarítmico, Verma y Page. Se consideraron tres criterios estadísticos para determinar qué modelo se ajusta más a los datos experimentales; desviación estándar (SE), coeficiente de correlación (R^2) y número de iteraciones mediante análisis de la varianza. A pesar de que todos los modelos obtuvieron valores de R^2 altos y de SE bajos, fue el modelo de Henderson Pabis el que mejor se ajustó a los datos experimentales de deshidratación de manzana Golden Delicious, ya que es el que presentó el valor más alto de R^2 (0.9959) y a su vez, el menor número de iteraciones (8), este último, es un factor determinante en el momento de la selección de un modelo de cinética de secado ya que representan las correcciones realizadas por cada modelo matemático para ajustarse a datos experimentales.

Se demostró la hipótesis de que el valor del coeficiente de difusión efectiva de manzana es mayor cuando se utiliza el método de secado por radiación infrarroja comparado con el secado convencional por aire caliente debido a que, con esta tecnología, la energía la absorbe el cuerpo sometido a la fuente de calor, evaporando el agua desde su interior, a diferencia del

secado con aire caliente, que empieza a evaporar desde la superficie, el uso de radiación infrarroja como fuente de calor disminuye el gradiente de temperatura entre el cuerpo y su entorno en un menor lapso de tiempo, lo cual consecuentemente se resume a obtener valores de difusión de vapor de agua hacia el ambiente más altos (Hebbar y Rastogi, 2001). Para la tecnología de radiación infrarroja se obtuvieron valores de entre 4.79×10^{-7} y $6.18 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}$, mientras que para la tecnología de aire caliente Kaya et al. (2007) obtuvieron valores de entre 0.483×10^{-10} y 2.019×10^{-10} , corroborando lo anunciado por ; por otra parte, los consumos de energía son relativamente bajos ya que la energía de activación para el proceso fue de 24.1 kJ/mol.

Mediante el análisis de la varianza con tablas ANOVA se determinó que existieron diferencias significativas en el cambio de color (ΔE) conforme aumentaba la temperatura, sin embargo, el mayor cambio de color se presentó a una temperatura de secado de 65°C y no a 70°C, que fue la temperatura más alta con la que se trabajó. En cuanto al contenido de polifenoles totales se observaron diferencias significativas con un nivel de confianza del 95% mediante análisis de la varianza, encontrándose la mayor conservación de estos compuestos a una temperatura de 65°C. Con base en estas diferencias en cuanto a calidad de producto terminado se refiere, se recomienda el tratamiento a 65 °C, ya que a pesar de que a esta temperatura se observó el mayor cambio de color, este cambio es característico de un producto deshidratado y se observó un secado más uniforme en comparación con el tratamiento a 70 °C, adicionando que es cuando se conservan más los compuestos fenólicos y se obtienen las mejores características sensoriales.

INTRODUCCIÓN

El secado es uno de los métodos más importantes para la preservación de alimentos perecederos como las frutas y vegetales, y tiene como objetivo la disminución del contenido de humedad mediante una fuente de calor a niveles que pueden prevenir el crecimiento de mohos y minimizar el crecimiento microbiano, para aumentar la vida útil y mantener la calidad, sin embargo, en el caso de las frutas, las tecnologías convencionales como el secado por aire caliente (convección forzada) implican un impacto negativo en la calidad y valor nutritivo del producto final, siendo la pérdida de compuestos fenólicos la más importante, además que requieren un alto consumo energético, debido a que para evaporar el agua del alimento es necesario calentarlo hasta 100-105 °C y el proceso de secado dura hasta 20-30 horas (Aboltins y Palabinskis, 2016). Es por esto, por lo que surge la necesidad de la aplicación de tecnologías alternas como el uso de radiación infrarroja que requiere de menor tiempo y temperatura debido a que la energía la absorbe el cuerpo sometido a la fuente de calor, evaporando el agua desde su interior, a diferencia del aire caliente que empieza a evaporar desde la superficie. Además, utilizando esta tecnología para la deshidratación de frutos se pueden preservar vitaminas y otras sustancias biológicamente activas como los compuestos antioxidantes hasta un 80-90% brindando así un producto con alto valor nutricional, además de una mayor calidad, puesto que, comparado con el secado convencional, el secado por infrarrojo permite obtener una deshidratación más uniforme ofreciendo mejores características sensoriales (Hebbar y Rastogi, 2001).

El secado es un proceso complicado en el cual se involucran la transferencia de calor y masa de manera simultánea. En alimentos, el secado se vuelve más complejo debido a la diferencia estructural que existe entre ellos (Ebray e Icier, 2010). Por lo tanto, es fundamental conocer la distribución de temperatura y humedad en el sistema cuando se requiere diseñar procesos y equipos, así como también para controlar la calidad y la selección de las operaciones de manejo y almacenamiento de estos productos (Chiné-Polito, 2015). La radiación infrarroja es un método de secado más conveniente que el secado convectivo a condiciones similares, dado que hay una rápida respuesta de calentamiento y pérdida de humedad disminuyendo los tiempos de secado, protección del producto contra contaminaciones (comparado con secado

solar) así como disminución en cambio de color y compuestos antioxidantes además de su versatilidad de uso. (Correa et al., 2012).

Con el fin de estudiar a fondo el proceso de secado por radiación infrarroja es importante llevar a cabo el modelamiento matemático del mismo y uno de los métodos más ampliamente utilizado con aplicación a frutos y vegetales es el “modelamiento de secado en capa fina”. A causa de los problemas que existen a nivel industrial en términos de consumo energético y calidad de producto terminado existe una necesidad de explorar este método como una alternativa en la estimación de la cinética de secado a partir de datos experimentales, describiendo el comportamiento de secado, mejorando el proceso, minimizando el consumo total de energía requerida y, en consecuencia, obtener un producto de buena calidad (Onwude et al., 2016).

El proceso de secado puede predecirse mediante la utilización de distintos modelos matemáticos aplicables al proceso de secado en capa fina. La aplicación de modelos de secado en capa fina involucra el contenido de humedad del material, sin embargo no se puede generalizar el uso de un modelo para todos los frutos y vegetales, a causa del número de factores; incluyendo el método de secado, las condiciones del proceso y de cada producto en particular que se va a someter al proceso de secado (Anaya & Pedroza, 2008).

La manzana es una materia prima importante para el desarrollo de varios productos agroindustriales y existen plantaciones de manzana en varios países alrededor del mundo. La determinación de condiciones óptimas de conservación y almacenamiento de manzana fresca es un gran beneficio desde que el uso de métodos incorrectos causaron pérdidas que iban desde el 10 hasta el 30% de la producción mundial (Yaldiz & Ertekyn, 2001). Existen diversos trabajos experimentales donde se modela matemáticamente el proceso de secado de varios tipos de manzana, sin embargo la mayoría utilizan el método convencional de secado por aire caliente o en combinación con microondas (Kaya et al., 2007). Esto representa una gran oportunidad para estudiar el secado por radiación infrarroja, puesto que constituye un mejor método para la conservación de manzana.

Es por ello por lo que el objetivo de esta investigación fue estudiar el proceso de secado por infrarrojo de Manzana Golden Delicious mediante la determinación de tiempos de secado, difusión efectiva, energía de activación y coeficientes globales de transferencia de calor y masa.

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1 Generalidades de la manzana

El manzano es un árbol caducifolio, que se cultiva en zonas con climas fríos, en la actualidad se han ampliado en áreas de clima templado o tropical. La manzana (*Malus domestica*), es un fruto carnosos (pomo); según su forma puede ser achatada y/o redondeada. El manzano ha sido un cultivo de gran importancia y es simbólico a lo largo de la historia. Fue introducido en España por los pueblos del norte de África y durante el proceso de romanización de la península. En el siglo XVI, los conquistadores españoles extendieron el cultivo de la manzana al nuevo mundo y cien años después, desde Iberoamérica, el manzano emigró a América del Norte y posteriormente a África septentrional y Australia (Gil, 2015).

En México, Chihuahua ocupa el primer lugar en producción en el cultivo de manzana a nivel nacional, con aproximadamente 26,882 hectáreas de superficie plantadas, principalmente de las variedades: Golden Delicious, Red Delicious, Romw Beauty y Gala, con una producción de 684,669 toneladas y un valor de la producción de 3.238.48 millones de pesos (Rocha, 2015).

1.1.1 Composición química y aporte nutritivo.

Desde el punto de vista nutritivo la manzana es una de las frutas más completas y enriquecedoras en la dieta. Un 85% de su composición es agua y el 12% de su composición está compuesta por azúcares, la mayor parte fructosa (azúcar de la fruta) y en menor proporción, glucosa y sacarosa de rápida asimilación en el organismo, son los nutrimentos más abundantes después del agua. Es fuente discreta de vitamina C y aporta en menor cantidad vitamina E o tocoferol. Es rica en fibra, mejora el tránsito intestinal y entre su contenido mineral sobresale el potasio (Salazar, 2013).

En el Cuadro 1 se presenta la composición química de la manzana:

Cuadro 1. Composición Química de la manzana variedad Golden Delicious (Eroskiconsumer, 2011)

COMPUESTO	CONTENIDO POR CADA PORCIÓN DE 100 GRAMOS
Hidratos de carbono	12.5 %
Fibra	2.3 %
Potasio	10 %
Magnesio	5.6 %
Vitamina C	1.24 mg
Vitamina E	0.4 mg
Vitamina A	0.4 mg
Flavan-3-oles	13 mg
Flavanoles	6 mg

La vitamina E posee acción antioxidante, interviene en la estabilidad de las células sanguíneas como los glóbulos rojos y en la fertilidad. El potasio es un mineral necesario para la transmisión y generación del impulso nervioso y para la actividad muscular normal, interviene en el equilibrio de agua dentro y fuera de la célula (Raya et al., 2014). Las propiedades dietéticas que se le atribuyen a esta fruta se deben en gran medida a los elementos fitoquímicos que contiene, entre ellos, compuestos fenólicos como los flavonoides (flavan-3-oles y flavanoles) los cuales han sido de gran interés de estudio debido a las propiedades antioxidantes que poseen, así como su participación en procesos sensoriales de los alimentos naturales y procesados, además de sus posibles aplicaciones benéficas para la salud humana (Porrás y López, 2009). El consumo de manzana y productos derivados se ha relacionado con la reducción del riesgo de cáncer, enfermedades cardiovasculares, asma y diabetes. (Sepúlveda et al., 2011).

1.1.2 Variedades de manzana.

Existen más de mil variedades de manzanas en todo el mundo, sin embargo, la gama que se ofrece en el mercado es limitada, de manera que solo podemos elegir poco más de media docena de variedades, entre las cuales destacan las siguientes:

Golden Delicious:

Es de origen americano, posee una piel amarilla verdosa con pequeños puntos oscuros que se llaman “lenticelas” y que son los órganos respiratorios de la fruta.

El fruto es grande, de forma redondeada y de color amarillo, es más largo que ancho, con la carne blanca amarillenta, fija y jugosa. El pedúnculo es largo, de piel delgada pero resistente, cubierta con lenticelas grisáceas. Es una excelente polinizadora para la mayoría de las variedades comerciales. Se trata de una variedad muy productiva cuya recolección se da entre los meses de septiembre y octubre. (El cultivo de la manzana, 2015)

Red Delicious:

Es una variedad estadounidense que proporciona frutos grandes y alargados, de piel color rojo brillante. Su pulpa es Jugosa, muy blanda, de sabor dulce, no ácido y aromático (El cultivo de la manzana, 2015)

Manzana Granny Smith:

Variedad de origen australiano, que compite en el mercado con la Golden Delicious. Su piel es de color verde intenso, con numerosas lenticelas de color blanquecino. El fruto es de forma casi esférica, de carne blanca, jugosa, ligeramente ácida y poco aromática (Gil, 2015).

Royal Gala:

Manzana que presenta rayas de coloración rojo carmín sobre un fondo naranja uniforme, su carne es blanca, crujiente, jugosa y muy aromática (Gil, 2015).

1.1.3 Producción de manzana en México.

La producción nacional de manzana alcanza cerca de 3 mil millones de pesos anuales y la superficie destinada a este cultivo es de 62 mil hectáreas, principalmente en el norte del país. Hasta 2011, el volumen de producción fue cerca de 600 mil toneladas, sin embargo, en 2012 se observó una caída de 40% respecto al año anterior, llegando apenas a las 375 mil toneladas, debido a la sequía que predominó en la zona norte y que se reflejó en una caída del rendimiento desde 10 ton/ha en los último 10 años a 6 ton/ha.

Chihuahua es el mayor productor de manzana del país participando con un volumen de valor generado que oscila entre 66.5% y 67.4%. Durango, Coahuila y Puebla son también entidades importantes en el cultivo de esta fruta y en conjunto generaron un volumen que del valor que varía entre 25.4% y 26.5% (Rocha, 2015).

En 2012, las importaciones se incrementaron un 19% respecto a 2011, pasando de 198 a 236 mil toneladas, como efecto del desabasto generado por sequías, lo que se tradujo en un incremento de precios. Para 2013, dada la producción récord se supondría un mejoramiento del abasto nacional, sin embargo, las importaciones no disminuyeron, aumentaron un 17% respecto a 2012, alcanzándose 275 mil toneladas, lo cual ocasionó que en 2014 el mercado se encuentre saturado y los precios descieran de forma importante. Los productores se han visto imposibilitados para colocar el volumen adicional de producción en vista de la mayor importación y de la baja capacidad para refrigerar la fruta y evitar inundar el mercado (Financiera Nacional de Desarrollo, 2014).

1.1.4 Manzana deshidratada

La deshidratación a través de la historia es una de las técnicas más ampliamente utilizadas para la conservación de los alimentos. Ya en la era paleolítica, hace unos 400.000 años, se secaban al sol alimentos como frutas, granos, vegetales, carnes y pescados, aprendiendo mediante ensayos y errores, para conseguir una posibilidad de subsistencia en épocas de escasez de alimentos, no solo necesarios, sino que también nutritivos. Esta técnica de conservación trata de preservar la calidad de los alimentos bajando la actividad de agua (aw) mediante la disminución del contenido de humedad, evitando así el deterioro y contaminación microbiológica de los mismos durante el almacenamiento (Marín et al., 2008).

Hoy en día, muchos alimentos deshidratados sirven de base para el desarrollo y formulación de nuevos productos, ya que estos al ser fuentes de proteínas, vitaminas, minerales, fibra dietética y antioxidantes, son considerados como componentes o ingredientes de alimentos funcionales, debido a su fácil incorporación en productos lácteos (leches, postres, yogurt, helados), galletas, pasteles, sopas instantáneas y en platos preparados (Sepúlveda et al., 2011).

Por medio de la deshidratación se pueden obtener snack de frutas o frutos secos, que son alimentos que tienen una larga vida de anaquel, tienen baja actividad de agua lo cual disminuye el crecimiento de microorganismos como bacterias y mohos, además que son de sabor y textura agradables. La ventaja de los snacks es que incluyen otros aspectos valorados por los consumidores como la facilidad para almacenarlos y la disminución de deshechos (Sepúlveda et al., 2011).

La manzana es uno de los frutos más populares y disponible durante todo el año. Tradicionalmente se le conocía como "la fruta de la salud". En inglés se dice: An apple a day keeps the doctor away (una manzana al día aleja al médico de tu puerta). Las personas que consumen productos a base de manzana deshidratada tienen un 27% menos de probabilidades de desarrollar síndrome metabólico ya que la pectina ayuda a mantener estables los niveles de azúcar en la sangre y un 36% menos de padecer hipertensión ya que contiene grandes

cantidades de potasio, mineral que ayuda a controlar la presión arterial, y puede reducir el riesgo de un ataque cardíaco. Además, es una buena fuente de fibra, que al fermentarse en el colon produce químicos que ayudan a evitar la formación de células cancerígenas. (Webbery y Zimmerman, 2014).

En el cuadro 2 se presenta la composición química de manzana deshidratada, se puede observar que el contenido de carbohidratos y proteínas aumenta hasta tres veces en comparación con una manzana fresca.

Cuadro 2. Composición Química de manzana deshidratada por 100 gramos de muestra (Webbery & Zimmerman, 2014)

KCalorías	243
Composición	Cantidad (g)
Carbohidratos	65.9
Proteínas	0.9
Fibra	8.7
Grasas	0.3
Minerales	Cantidad (mg)
Potasio	450
Fosforo	38
Sodio	87
Calcio	14
Vitaminas	Cantidad (mg)
C	6.448
E	2.08
A	2.08
Polifenoles	Cantidad (mg)
Flavan-3-oles	67.6
Flavanoles	31.2

1.2 Secado

El secado es una operación unitaria en la que se da el transporte simultáneo de calor y masa, es un proceso de remoción térmica mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene hasta obtener un producto seco. Esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases y tal como está expresada puede servir para describir operaciones unitarias como la evaporación y la adsorción. Sin embargo, su tratamiento teórico y la tecnología empleada las diferencian completamente (Mujumdar, 1995).

En el secado, la remoción de agua en forma de vapor desde la superficie del sólido depende de condiciones externas de temperatura, flujo y humedad del aire, área de la superficie del material expuesta y presión, mientras que el movimiento del agua a través del sólido depende de su composición física, la temperatura y su porcentaje de humedad. El método más común para transferir calor a frutas y verduras es la utilización de una corriente de aire caliente, donde la convección es el principal fenómeno de transferencia. Una vez que el calor se suministra a la superficie del alimento en el proceso de deshidratación, éste se distribuye a través del alimento por conducción (Ceballos y Jimenez, 2012).

La transferencia de energía en forma de calor proveniente del exterior hacia un sólido con alto contenido de humedad puede ocurrir como resultado de la convección, conducción, radiación y en algunos casos como resultado de la combinación de los tres mecanismos los cuales se explican a continuación:

Convección:

El calor se transfiere al sólido que se está secando mediante una corriente de aire caliente (u otro fluido) que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina del sólido. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

Se le llama convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, la convección natural ocurre si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura de este fluido (Cengel y Boles, 2012).

Conducción:

El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua. Es la transferencia de energía de las partículas, más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, como resultado de la interacción entre partículas (Cengel y Boles, 2012).

Radiación:

Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas como resultado de cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio. Se basa en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. La energía es absorbida selectivamente por las moléculas de agua, por ende, mientras el producto se seca, se requiere menos energía. Incluye varias fuentes de radiación electromagnética con longitudes de onda desde el espectro solar hasta microondas (0,2 m –0,2 mm). Dentro de esta categoría se incluye el infrarrojo (Holdman, 1998). Aunque estos tres mecanismos se pueden utilizar durante la deshidratación, normalmente, dependiendo del producto, uno de éstos es el que domina (Costa y Ferreira, 2007).

1.2.1 Secado de alimentos

Hoy en día la industria de alimentos deshidratados constituye un sector muy importante dentro de la industria alimentaria extendido por todo el mundo. En el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos deshidratados o formulados a partir de ingredientes deshidratados como es el caso de las salsas y sopas en polvo. La mayoría de los productos agroalimentarios son sólidos por lo que se define mejor la deshidratación como la operación básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución (concentrada) se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases como se muestra en la Figura 1 (Fito et al., 2001).

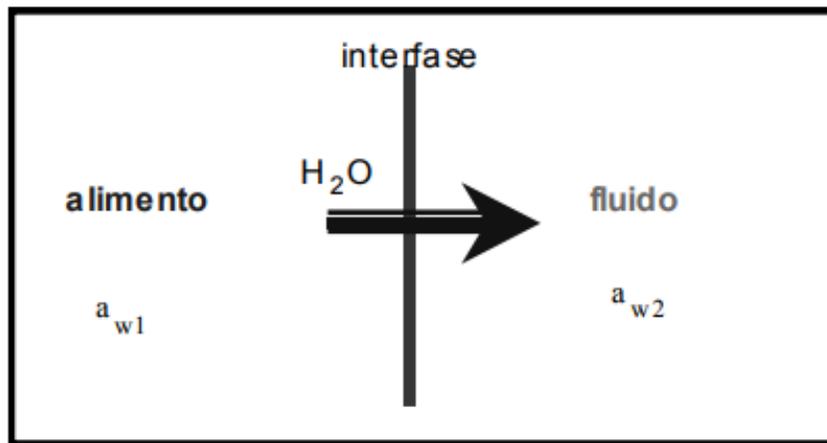


Figura 1. Transferencia de agua y gradientes de actividad de agua (Fito et al., 2001).

Objetivos en el secado de alimentos:

- 1- Disminución de la actividad de agua a_w ya que es considerada como una medida indirecta del agua que está disponible en un producto para participar en las reacciones de deterioro.
- 2- Transformación de alimentos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos, como es el caso de las sopas deshidratadas, frutas y cereales para desayuno.

- 3- Reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción en los costes de transporte y almacenamiento de estos productos.
- 4- Disminuir los cambios de sabor y aroma debido a las pérdidas de componentes volátiles.
- 5- Minimizar el cambio de textura debido al encogimiento celular provocado por la pérdida del agua para no limitar la capacidad de los productos secos para absorber agua durante la rehidratación (Fito et al., 2001).

1.2.2 Secado por infrarrojo

El calentamiento por infrarrojos (IR) durante el secado de productos, no es un método muy común, pero su aplicación se ha incrementado en los últimos años. Aunque este tipo de transmisión de calor se utilizó de forma accidental en el pasado, acompañando otros tipos de transferencia de calor durante el secado, los secadores por infrarrojos se diseñan en la actualidad para utilizar calor radiante como fuente primaria de energía. Tiene ventajas sobre el calentamiento convencional, incluyendo la reducción de tiempos de secado, calentamiento uniforme, bajas pérdidas en la calidad, es versátil, simple, el equipo requerido es compacto y hay un significativo ahorro energético. El calentamiento por infrarrojo puede ser aplicado a varias operaciones de procesamiento de alimentos tales como el secado, horneado, asado, pasteurización y esterilización (Krishnamurthy et al., 2008).

1.2.2.1 Principios del calentamiento por Infrarrojo (IR)

Todos los objetos con una temperatura que esté por encima del cero absoluto emiten radiación térmica, la cual pasa a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. El rango de longitud de onda para la radiación térmica es de 0.4-1000 μm , el cual incluye la luz visible (0.4-0.7 μm) y la radiación infrarroja (0.7-1000 μm) como se muestra en la Figura 2. Dependiendo del espectro de interés la radiación infrarroja puede dividirse en tres subdivisiones (Pan et al., 2014).

- 1- Radiación cercana (0.7-1.4 μm).
- 2- Radiación media (1.4-3 μm).
- 3- Radiación lejana (3-1000 μm).

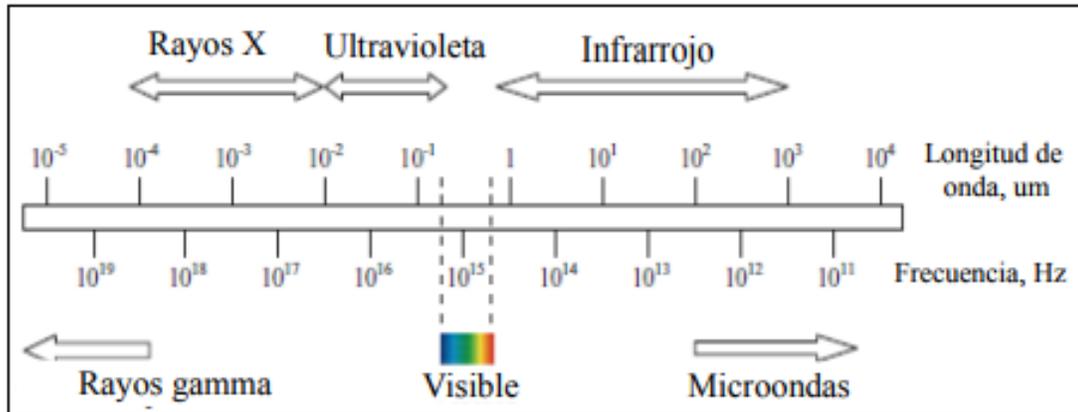


Figura 2. Espectro de ondas electromagnéticas (Krishnamurthy et al., 2008).

Debido a que el infrarrojo es un tipo de radiación electromagnética, tiene una dependencia tanto espectral como direccional. La dependencia espectral del infrarrojo necesita ser considerada debido a que la energía que sale de un emisor está compuesta por diferentes longitudes de onda, y la fracción de la radiación en cada banda depende de un número de factores como la temperatura del emisor y la emisividad de la lámpara infrarroja. La longitud de onda a la cual la máxima radiación ocurre, está determinada por la temperatura del emisor (Siegel y Howell, 2002).

La transmisión de la radiación electromagnética no necesita un medio para su propagación. El espectro de longitud de onda depende de la naturaleza y de la temperatura de la fuente de calor. La radiación térmica que incide en un cuerpo puede ser absorbida, y su energía ser convertida en calor, reflejada desde la superficie o transmitida a través del material (Ratti y Mujumdar, 2006). La suma de estos mecanismos se conoce como pérdida o extinción de la radiación y se representa por el siguiente balance

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1)$$

Dónde ρ es la reflexión, α es la absorción y τ es la transmisión.

Un cuerpo negro es un cuerpo ideal que absorbe toda la radiación incidente y emite la máxima energía radiante. Como cuerpo ideal, es comparado con un cuerpo real para describir la capacidad real de emitir y absorber radiación térmica. La emisividad de un cuerpo gris es la relación del flujo de energía emitido por un cuerpo real entre el flujo emitido por un cuerpo negro a la misma temperatura (Ratti y Mujumdar, 2006).

La energía emitida por una fuente de calor es proporcional a la temperatura de la superficie y la emisividad del material. Esto está descrito por la ley de Stephan-Boltzmann, la cual enuncia que la energía emitida q'' (W/m^2) es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del emisor (K) (Pan et al. ,2014).

$$q'' = \alpha T^4 \quad (2)$$

La constante de Boltzmann $\alpha = 56.7 \times 10^{-12} \frac{W}{m^2 K^4}$ es una constante de proporcionalidad y T es la temperatura absoluta de la fuente emisora de calor.

La suma de la energía que es absorbida, reflejada o transmitida varía con la longitud de onda de la energía IR y con los diferentes materiales y condiciones superficiales. La distribución espectral de la energía emitida por un cuerpo negro es dada por la ley de Planck.

$$E_{\lambda,b} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (3)$$

Donde λ es la longitud de onda (μm), C1 y C2 son las constantes de radiación que tienen valores de $3.742 \times 10^8 W \mu m^4/m^2$ y $1.439 \times 10^4 \mu m K$, respectivamente y T es la temperatura del cuerpo emisor de energía (K). La ley de Planck muestra que la distribución espectral y la intensidad radiante están en función de la longitud de onda y de la temperatura del emisor (Siegel y Howell, 2002). A medida que la temperatura del objeto emisor se incrementa, la distribución espectral se mueve hacia las longitudes de onda más cortas, y la energía total en cada longitud de onda se incrementa. Este fenómeno produce la curva de desplazamiento de Wien, el cual es un dato importante en la selección de equipos. El punto

máximo de distribución espectral a una longitud de onda determinada está definido por la ley de Wien.

$$\lambda_{\max} = \frac{C_3}{T} \quad (4)$$

Donde el punto máximo de longitud de onda λ_{\max} (μm) es inversamente proporcional a la temperatura del cuerpo emisor (k) donde $C_3 = 2897.8 \mu\text{mK}$. La energía infrarroja no depende del aire para ser transmitida y se convierte en calor cuando es absorbida por el material que se está calentando. Esto se debe a que el aire, y los gases en general, absorben cantidades muy pequeñas de energía infrarroja, el calentamiento por infrarrojo provee una transferencia de calor eficiente sin que haya contacto entre el material que está siendo calentado y la fuente emisora de calor (Pan et al., 2014).

1.2.2.2 Aplicaciones del calentamiento por infrarrojo en alimentos

Deshidratación.

La aplicación del secado con infrarrojo lejano (3-1000 μm ,) en la industria alimentaria representa una nueva forma de procesamiento para la producción de alimentos deshidratados de alta calidad a un bajo costo. El uso de suministro de calor por infrarrojo para alimentos tiene numerosas ventajas entre las que se incluyen la reducción del tiempo de secado, el de una fuente de energía alterna, se incrementa la eficiencia energética, se tiene una temperatura uniforme cuando se está secando al alimento, se reduce la necesidad de una corriente de aire caliente, se obtienen productos de mejor calidad, entre otras (Fito et al., 2001).

Tecnologías de secado integradas: Infrarrojo y secado convectivo.

El uso de ambas tecnologías (radiación y convección) es considerado a ser más eficiente que la radiación o el calentamiento convectivo por separado, de manera que existe una sinergia cuando se combinan ambos métodos. El desarrollo de secadores continuos equipados con

infrarrojos lejanos (3-1000 μm), cercanos (0.7-1.4 μm) y con un soplador de aire caliente se puede reducir costos en tiempo de secado y temperatura de operación (Jangam et al. 2011).

Inactivación enzimática.

El uso de infrarrojo lejano ha sido exitoso para inactivar enzimas responsables del desarrollo de sabores “rancios” si se realiza previo al proceso de congelamiento, así como otras enzimas y bacterias que se encuentran en solución como el polifenol oxidasa que se encarga de producir oscurecimiento o “pardeamiento enzimático” (Kudra y Mujumdar, 2009).

Inactivación de patógenos. El calentamiento por infrarrojo puede ser utilizado para la inactivación de bacterias, esporas, levaduras, y mohos en alimentos líquidos y sólidos. La eficacia de la inactivación microbiana haciendo uso del calentamiento por infrarrojo depende de diversos parámetros: nivel de poder del infrarrojo, temperatura de la muestra, pico de emisión y ancho de banda de la fuente de calentamiento, la profundidad de la muestra, tipos de microorganismos, contenido de humedad, fase fisiológica de los microorganismos y el tipo de alimento (Krishnamurthy et al., 2008).

1.2.2.3 Secadores por radiación infrarroja y aplicación en alimentos.

Los secadores industriales difieren del tipo y diseño dependiendo del principal método de transferencia empleado. En la mayoría de los casos el calor es transferido de la superficie al interior del cuerpo sólido. Sin embargo, en secado por radiofrecuencias o microondas, se suministra energía para generar calor en el interior del cuerpo para que vaya hacia la superficie (Chiné-Polito, 2015).

Los secadores por infrarrojo se basan en la transferencia de energía radiante para evaporar la humedad del producto. Esta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados por gas. La radiación infrarroja es un método de calentamiento indirecto por el que la energía calorífica se transmite por medio de radiación electromagnética. El uso de emisores de rayos infrarrojos posibilita la transmisión de grandes

cantidades de energía en tiempos relativamente cortos. Las diversas longitudes de onda hacen que parte de la radiación llegue a diferentes profundidades de la pieza. Este tipo de secadores son ideales para trabajar con láminas delgadas de alimentos, pues necesitan trabajar en capa fina, ya que la radiación térmica se transfiere en línea recta. Además, es preciso establecer una tenue corriente en el interior del secador para que arrastre el vapor de agua generado (Castells, 2012).

1.3 Modelamiento de secado en capa fina.

El secado en capa fina es un método ampliamente utilizado para la determinación de parámetros cinéticos de frutas y vegetales, generalmente se refiere al secado de una lámina de muestra. Incluye las operaciones de transferencia de masa y energía simultáneamente (Onwude et al., 2016). Durante estas operaciones, el material está completamente expuesto a las condiciones de temperatura y aire caliente (en secado convectivo), de tal forma que mejore el proceso de secado. Los aspectos más importantes de la tecnología del secado en capa fina son la modelación matemática del proceso de secado y el diseño del equipo el cual puede permitir la selección de las mejores condiciones de operación. La aplicación de modelos de secado en capa fina para predecir el comportamiento del secado de frutas y vegetales frecuentemente incluyen el contenido de humedad del material (Kadam et al., 2011).

1.3.1 Mecanismos del proceso de secado.

Los principales mecanismos del secado son la difusión en la superficie o la difusión líquida en superficies porosas, difusión de líquido o vapor debido a las diferentes concentraciones de humedad, y acción capilar en alimentos granulares y porosos debido a las fuerzas superficiales. Además, la difusión térmica que se define como una corriente de agua causada por la secuencia vaporización-condensación, y una corriente hidrodinámica, definida como una corriente de agua causada por el encogimiento y el gradiente de presión se pueden observar en el secado (Anaya & Pedroza, 2008).

Para productos higroscópicos, generalmente el producto se seca a una velocidad constante y posteriormente hay una caída en la velocidad de secado hasta que se para el proceso cuando un equilibrio se establece. En el periodo de velocidad constante del secado, las condiciones externas como la temperatura, velocidad del aire de secado, dirección de la corriente de aire, humedad relativa del medio, forma física del producto, y el método de apoyo (charolas) del producto dentro del equipo son esenciales y el principal mecanismo de difusión es el mecanismo de la difusión superficial (Ebray & Icier, 2010).

1.3.2 Modelamiento matemático del secado de alimentos.

Los dos modelos principales en el proceso de secado son:

- 1- **Modelos distribuidos.** Consideran la transferencia de calor y masa de forma simultánea. Toman en consideración la transferencia externa (de calor y masa), y predicen la temperatura y el gradiente de humedad. Generalmente, estos modelos dependen de las ecuaciones de Luikov que vienen de la segunda ley de Fick de la difusión como se muestra en la ecuación 5 o sus formas modificadas.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} T + \nabla^2 K_{13} P \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T + \nabla^2 K_{23} P \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 K_{31} M + \nabla^2 K_{32} T + \nabla^2 K_{33} P \quad (7)$$

Donde K_{11}, K_{22}, K_{33} son los coeficientes fenomenológicos, mientras $K_{12}, K_{13}, K_{21}, K_{23}, K_{31}, K_{32}$ son los coeficientes de acoplamiento, M es humedad, T es temperatura y P es presión (Onwude et al., 2016).

Para la mayoría de los procesos, el efecto de la presión puede ser despreciado comparado con el efecto de la temperatura y humedad, de tal forma que las ecuaciones se convierten en:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 K_{11} M + \nabla^2 K_{12} T \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 K_{21} M + \nabla^2 K_{22} T \quad (9)$$

Sin embargo, la forma simplificada de las ecuaciones de Luikov (ecuación 5) no puede ser resuelta con métodos analíticos, eso es debido a las dificultades y complejidades de los mecanismos reales de secado (Ebray & Icier, 2010).

2- **Modelos agrupados.** Estos no prestan atención al gradiente de temperatura en el producto, por lo que se supone que la distribución de temperatura es uniforme a la misma temperatura que el aire de secado. Con esta asunción, las ecuaciones de Luikov se transforman en:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = K_{11} \nabla^2 M \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_{22} \nabla^2 T \quad (11)$$

El coeficiente fenomenológico K_{11} es conocido como el coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}) y K_{22} es conocido como difusividad térmica (α). Para valores constantes de D_{eff} y α , las ecuaciones 10 y 11 se convierten en:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{eff} \left[\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\alpha_1}{x} \frac{\partial M}{\partial x} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha_1}{x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] \quad (13)$$

Donde $\alpha_1 = 0$ para geometrías planas, $\alpha_1 = 1$ para formas cilíndricas y $\alpha_1 = 2$ para formas esféricas.

Suponer que la distribución de la temperatura es uniforme, y que el ambiente y el producto están a la misma temperatura puede causar errores. Este error solo sucede al inicio del proceso y puede reducirse a valores aceptables si se reduce el grosor del producto. Con esta necesidad, el secado en capa fina gana importancia y se derivan las ecuaciones de capa fina (Kadam et al., 2011).

Debido a la estructura delgada de la muestra, se puede suponer fácilmente que la distribución de la temperatura es uniforme y el secado en capa fina es adecuado para los modelos de parámetros agrupados. Recientemente se han encontrado muchas aplicaciones de las ecuaciones de secado en capa fina debido a su facilidad de uso y al requerimiento de menos datos experimentales a diferencia de los modelos distribuidos. Las ecuaciones de capa fina pueden ser teóricas, semi-teóricas o modelos empíricos. Se toma en cuenta sólo la resistencia interna de la transferencia de humedad o bien, se consideran} sólo la resistencia a la transferencia de humedad entre el producto y el aire (Anaya & Pedroza, 2008).

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Objetivo general:

Evaluar los parámetros de diferentes modelos matemáticos a través de la cinética de secado por infrarrojo de láminas de manzana Golden Delicious con apoyo de un software de análisis de gráficos y obtener los coeficientes de transferencia de calor y masa, para realizar un modelamiento del proceso.

2.2 Objetivos particulares:

2.2.1 Determinar el grado de ajuste de cada modelo a la cinética de secado de láminas de manzana por infrarrojo con parámetros de regresión no lineal R^2 , SE (error estándar) y número de iteraciones para seleccionar el que mejor se ajuste al comportamiento experimental de secado por infrarrojo de manzana Golden Delicious.

2.2.2 Determinar el valor la difusión efectiva mediante la solución gráfica de la segunda Ley de Fick y comparar con datos bibliográficos reportados de otros productos agroalimentarios para evaluar el efecto de la temperatura en la velocidad de difusión del agua en láminas de Manzana Golden Delicious.

2.2.3 Evaluar la influencia de la temperatura en la cinética de secado mediante balances de transferencia en el periodo de velocidad constante para obtener los coeficientes globales de transferencia de calor y masa.

2.2.4 Determinar el contenido de polifenoles totales y color de láminas de manzana antes y después del proceso de secado por infrarrojo mediante la técnica Folin-Ciocalteou y colorimetría respectivamente para conocer el grado de afectación del producto bajo las distintas condiciones de operación.

2.3 Materiales y métodos.

2.3.1 Materia prima.

Se utilizó manzana variedad Golden marca Delisana producidas por Agropecuaria la Norteña lote 3J19A17 las cuales se cortaron las láminas finas con dimensiones de 1.5 x 2 cm con un espesor de 2.8 mm, la manzana se almacenó en refrigeración a 4.5 °C hasta su secado.

2.3.2 Humedad

La determinación de la humedad se realizó con una termobalanza marca Ohaus modelo MB23 equipada con una lámpara infrarroja de 250 watts y una fuente de potencia tipo 120, C.A (Figura 3).



Figura 3. Termobalanza OHAUS MB23.

La humedad es tomada como la pérdida de peso al secado a través de la evaporación del agua en el alimento, el cual emplea una balanza de torsión simple para pesar la muestra y una lámpara infrarroja para secar. Este método se basa en evaporar de manera continua la humedad de la muestra y el registro continuo de la pérdida de peso, hasta que la muestra se sitúe a peso constante. El error de pesada en este método se minimiza cuando la muestra no se expone constantemente al ambiente (Nollet, 1996).

2.3.3 Curvas de secado.

Para determinar los tiempos de secado se estableció una humedad final del 20% como humedad de equilibrio, y los datos experimentales se plasmaron cada 5 minutos utilizando el siguiente cuadro de diseño estadístico.

Cuadro 3 Diseño estadístico para datos experimentales

TIEMPO (min)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	Peso (kg)	Peso (g)	% Sólidos	% Humedad	MR
5	300						
10	600						

A partir de los datos de humedad en función del tiempo para cada temperatura (60, 65 y 70 °C) se realizaron las curvas de secado para cada experimento, estas curvas relacionan el factor de humedad adimensional “MR” (moisture ratio, por sus siglas en inglés) del fruto en función del tiempo de secado (t). El valor de MR se calcula con la ecuación 14;

$$MR = \frac{U_t - U_e}{U_i - U_e} \quad (14)$$

Donde MR es el contenido de humedad del producto (adimensional); U_t es el contenido de humedad del producto a un tiempo determinado; U_i es el contenido inicial de humedad del producto; y U_e es el contenido de equilibrio establecida para el producto. (Correa et al., 2012).

2.3.4 Modelamiento matemático

Los datos experimentales y las curvas de secado se ajustaron a siete modelos matemáticos de cinéticas de secado, estos se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Modelos matemáticos utilizados para la determinación de la cinética de secado de la manzana (Corrêa et al., 2012).

Modelo	Ecuación
--------	----------

Aproximación de la difusión	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$
Dos términos	$MR = a \exp(-kt) + b \exp(-gt)$
Henderson-Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Midilli	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + b$
Verma	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$

Donde t es tiempo (s), k y g son las constantes de secado (s^{-1}) y las letras a , b y n son constantes empíricas adimensionales.

Para definir el grado de ajuste de cada modelo se analizó con una regresión no lineal. El grado de ajuste de cada modelo se realizó con base en el coeficiente de determinación (R^2), número de iteraciones y error estándar (SE) el cual se calculó con la ecuación 15.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{DF}} \quad (15)$$

Donde **SE** es la desviación estándar; y es el valor experimental de MR (adimensional); \hat{y} es el valor estimado por el modelo (adimensional); n es el número de valores observados y **DF** son los grados de libertad del modelo (número de datos observados menos el número de parámetros del modelo). (Corrêa et al., 2012)

2.3.4.1 Determinación de la difusión efectiva.

El coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}) se obtuvo ajustando el modelo matemático de la difusión de líquidos (ecuación 16) a los datos experimentales de periodo de velocidad decreciente. Esta ecuación es la solución analítica de la segunda ley de Fick para una placa infinita.

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{eff}}{4L^2} \right] \quad (16)$$

Para periodos largos de deshidratación ($MR < 0.6$), La ecuación de la difusión puede simplificarse a un solo término de acuerdo con Senadeera (2003). Por lo tanto, suponiendo que D_{eff} es independiente del contenido de humedad, la ecuación 16 puede reescribirse como se muestra continuación.

$$\ln MR = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} \quad (17)$$

La difusión efectiva se calcula reemplazando los valores experimentales en el modelo matemático que haya tenido mayor grado de ajuste. El coeficiente de difusión efectiva es determinado mediante la gráfica $\ln MR$ vs. tiempo de secado, en donde la pendiente es igual a $\frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2}$ (Vega et al., 2012).

2.3.4.2 Determinación de la energía de activación.

En general, la influencia de la temperatura de secado sobre el coeficiente de difusión efectiva del agua en los alimentos sigue una tendencia tipo Arrhenius, la relación descrita por la ecuación (18) y al representar el $\ln D_{eff}$ vs $1/T$ se obtiene una línea recta de cuya pendiente se obtiene la E_a y de la ordenada al origen se obtiene el factor de Arrhenius (D_0).

$$D_{eff} = D_0 \frac{E_a}{RT} \quad (18)$$

Dónde: D_0 es el factor de Arrhenius, R es la constante universal de los gases ($8.3144 \frac{J}{mol K}$) y T es la temperatura absoluta. (Puente et al., 2013)

2.3.4.3 Consumo energético.

Para el secador por infrarrojos, el consumo de energía está dado por la lámpara infrarrojos dentro de la cámara. Para el cálculo se tomó en cuenta la ley de Stefan-Boltzmann, la energía proporcionada por la irradiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del material, tal como se muestra en la ecuación 19 (Puente et al. 2013).

$$E = \sigma * T^4 \quad (19)$$

E es la energía expresada en W/m^2 , T la temperatura del material refractante (K) y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($56.7 \times 10^{-12} \frac{W}{m^2 K^4}$). Para expresar la energía en unidades de W/m^2 , se necesita el tiempo total de secado (h) y la superficie a secar (m^2) (Motevalli et al., 2011).

2.3.4.4 Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y energía.

Las teorías que rigen el periodo de velocidad constante en el secado de productos agrícolas pueden ser aproximadas a los balances de transferencia de calor y masa estudiados para la temperatura de bulbo húmedo. Por lo tanto, el periodo de velocidad constante puede ser representado por la ecuación 20:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_c A}{L} (T_\infty - T_{bh}) = \frac{h_m A}{R_v} \left(\frac{P_{vbh}}{T_{bh}} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right) \quad (20)$$

Donde h_c es el coeficiente global de transferencia de calor ($\frac{W}{m^2 K}$); h_m es el coeficiente global de transferencia de masa ($m s^{-1}$); L es el calor latente de vaporización ($J kg^{-1}$); R_v es la constante universal del vapor de agua ($461.91 J kg^{-1} K^{-1}$); A es el área superficial de las láminas de manzana (m^2); P_{vbh} es la presión de vapor a la temperatura de bulbo húmedo (Pa); P_∞ es la presión de vapor a la temperatura de deshidratación (Pa); T_{bh} es la temperatura de bulbo húmedo (K); T_∞ es la temperatura de deshidratación (K); y $\frac{dM}{dt}$ es la constante de velocidad de deshidratación (kg/s) (Brooker et al., 1992).

Todos los coeficientes se calcularon tomando en cuenta las siguientes suposiciones y condiciones de frontera;

$$t = 0, -L \leq x \leq L, M = M_i \quad (21)$$

$$t > 0, x = 0, dM/dx = 0 \quad (22)$$

$$t > 0, x = L, M = M_e \quad (23)$$

$$t > 0, -L \leq x \leq L, T = T_a \quad (24)$$

- El material es homogéneo e isotrópico.
- Se consideran a la láminas de manzana como un cuerpo negro, por lo cual se asume que el valor de la emisividad es 1.
- Las características del material son constantes y el encogimiento es despreciable.
- Las variaciones de presión son despreciables.
- La evaporación solo ocurre en la superficie.
- Inicialmente la distribución de la humedad es uniforme (ecuación 21) y simétrica durante el proceso (ecuación 22).
- Cuando termina la difusión, la humedad de equilibrio surge en la superficie (ecuación 23)
- La distribución de la temperatura es uniforme e igual a la temperatura de secado (ecuación 24).
- La transferencia de calor está dada por conducción dentro del producto y por convección fuera del producto.
- El coeficiente de difusión efectiva es constante con respecto al contenido de humedad durante el secado (Brooker et al., 1992).

2.3.5 Color

Se determinó el color de la manzana antes y después del proceso de secado, estimando los parámetros L, a y b. El valor de L representa la luminosidad y varía entre 0 y 100, mientras que a y b son dos componentes cromáticos cuyos valores varían entre -120 y 120 (Rettig & Hen, 2014).

Para la determinación de los parámetros L, a y b se utilizó el software Adobe Photoshop CS6 a partir de fotografías que fueron capturadas con una cámara digital Canon EOS REBEL T6, la muestra se introdujo en una caja negra la cual en su interior cuenta con dos luces que están ubicadas en la parte inferior y posterior con el objetivo de tener una iluminación constante y poder apreciar los cambios de color.

Para el cálculo de diferencia total de color es necesario estandarizar los valores de luminosidad y componentes cromáticos que fueron entregados por Photoshop, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones (Calvo y Durán, 1997):

$$L^* = \left(\frac{L}{255} \right) \times 100 \quad (25)$$

$$a^* = \left(\frac{240 * a}{255} \right) - 100 \quad (26)$$

$$b^* = \left(\frac{240 * b}{255} \right) - 120 \quad (27)$$

Se determinó la variación de cada parámetro de color entre las muestras frescas y las deshidratadas con las ecuaciones:

$$\Delta L = L' - L_0 \quad (28)$$

$$\Delta a = a' - a_0 \quad (29)$$

$$\Delta b = b' - b_0 \quad (30)$$

Donde L_0 , a_0 y b_0 son los valores de color para las muestras de manzana en estado fresco y L' , a' y b' son los valores de color para las muestras deshidratadas. Finalmente, la determinación de la diferencia total de color se calculó utilizando la ecuación 31:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (31)$$

La **a** define la desviación del punto acromático correspondiente a la luminosidad hacia el rojo si **a** es positiva, y hacia el verde si **a** es negativa. Análogamente la coordenada **b** define la desviación hacia el amarillo si **b** es positiva, y hacia el azul si **b** es negativa. El conjunto **a b** recibe el nombre de cromaticidad y junto con **L** definen el color del estímulo (en coordenadas cartesianas o rectangulares); esto corresponde al término de cromaticidad que no indica explícitamente ni el tono ni la saturación (Rettig & Hen, 2014). Se utilizó el software MiniTab 18 para realizar análisis de la varianza con una tabla ANOVA de un solo factor en donde se determinó si la diferencia de color fué significativa.

2.3.6 Polifenoles totales

La cantidad de Polifenoles totales presentes en la manzana se determinaron antes y después del proceso de secado, se realizó utilizando el método de Folin-Ciocalteou utilizando un espectrofotómetro de laboratorio marca Velab VE-5000Y. Este método se utiliza como medida del contenido en compuestos fenólicos totales en productos vegetales. Se basa en que los compuestos fenólicos reaccionan con el reactivo de Folin-Ciocalteou, a pH básico, dando lugar a una coloración azul susceptible de ser determinada espectrofotométricamente a 765 nm (Huang et al. 2005). Este reactivo contiene una mezcla de wolframato sódico y molibdato sódico en ácido fosfórico y reacciona con los compuestos fenólicos presentes en la muestra. El ácido fosfomolibdotúngstico (formado por las dos sales en el medio ácido), de color amarillo, al ser reducido por los grupos fenólicos da lugar a un complejo de color azul intenso, cuya intensidad es la que se mide para evaluar el contenido en polifenoles con base a una recta patrón de ácido gálico (García et al. 2012).



Figura 4. Espectrofotómetro VELAB VE-5000Y

CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

3.1 Curvas de secado.

La humedad inicial de la manzana Golden Delicious previo al secado fue de 82.86% esto es similar al valor obtenido por Kaya y colaboradores (2007) quienes reportaron una humedad del 81% para la manzana variedad Red Delicious. Los experimentos de secado se realizaron a tres temperaturas diferentes las cuales fueron: 60°C, 65°C y 70°C. Para cada temperatura se realizaron tres tratamientos, con el valor promedio de MR con respecto al tiempo se obtuvieron las curvas de secado hasta obtener un producto con el 20% de humedad. Los tiempos de secado fueron de 75, 65 y 55 minutos para las temperaturas 60, 65 y 70 grados centígrados respectivamente (Figura 5). Con base en estos resultados se observa que, a mayor temperatura, disminuye el tiempo necesario para deshidratar la manzana, esta deducción concuerda con lo que reportaron Senevirathne et al. (2010) y Ruíz et al. (2008), quienes en sus trabajos demostraron la reducción del tiempo de secado cuando se aumenta la temperatura utilizando una fuente de energía infrarroja. En comparación con el secado convectivo por aire caliente se observa una disminución drástica del tiempo de proceso (80%) ya que con este método Kaya et al. (2007) obtuvieron un tiempo de secado de aproximadamente 5 horas para llegar a 20% de contenido de humedad en el secado de manzana Red Delicious con una temperatura de 60°C.

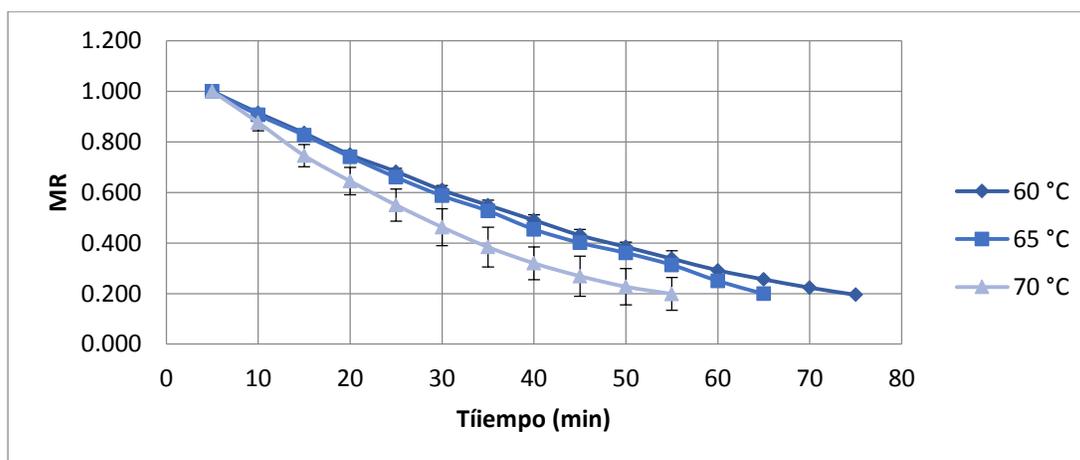


Figura 5. Relación de humedad vs tiempo de secado de manzana Golden Delicious a 60, 65 y 70 °C

3.2 Ajuste de los modelos matemáticos de secado.

Para determinar el grado de ajuste de los datos experimentales del secado por infrarrojo de manzana a los modelos de: aproximación de la difusión, polinómico de dos términos, Henderson-Pabis, Midilli, Logarítmico, Verma y Page, se determinaron los valores de coeficiente de determinación R^2 (el cual tiene que ser más cercano a 1), número de iteraciones y error estándar SE (los cuales deben tener un valor más cercano a 0) para cada temperatura. Posteriormente se realizó el promedio de cada parámetro y las diferencias significativas se determinaron mediante una prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95%. Estos valores se muestran en el cuadro 5

Cuadro 5. Ajuste de modelos matemáticos al secado por infrarrojo de manzana.

Modelo	SE	R^2	Iteraciones
Dos términos	0.0077 ^B	0.9994 ^A	23 ^{BC}
Apr. difusión	0.0670 ^A	0.9570 ^B	7 ^C
Henderson-Pabis	0.0169 ^B	0.9959 ^A	8 ^C
Logarítmico	0.0330 ^{AB}	0.9841 ^{AB}	68 ^{AB}
Verma	0.0387 ^A	0.9828 ^{AB}	98 ^A
Page	0.0200 ^A	0.9960 ^A	12 ^{BC}
Midilli	0.0263 ^{AB}	0.9877 ^{AB}	28 ^{BC}

Notas:

- Los valores que no comparten una letra en la misma columna son significativamente diferentes.
- Los valores que poseen un superíndice con la letra A significan que son los valores más altos, así como los que poseen un superíndice con la C indican los valores más bajos.

En los valores que tiene el cuadro anterior se observa que el modelo que obtuvo el mayor coeficiente de determinación (R^2) fue el modelo polinomial de dos términos ya que es el valor más cercano a 1. Sin embargo, Correa et al. (2012), afirmaron que el coeficiente de determinación por sí solo no es una buena herramienta para la toma de decisiones por lo que es importante analizar los valores de desviación estándar y el número de iteraciones.

Los valores de R^2 más cercano a uno son los que tienen los modelos de dos términos, Henderson-Pabis y Page, entre ellos no existe diferencia significativa, pero si son significativamente más altos que el coeficiente de determinación del modelo de Aproximación de la difusión, que es el que presenta el coeficiente de determinación más bajo. Los valores más bajos de desviación estándar sin que exista diferencia significativa entre ellos se presentan en los modelos de Henderson-Pabis y el modelo polinomial de dos términos, aunque el modelo de Page presenta un valor de coeficiente alto al igual que los dos anteriores modelos, éste, presenta una desviación estándar significativamente más alta en comparación con los mismos. El número de iteraciones indica las correcciones realizadas por cada modelo para ajustarse a los datos experimentales, los modelos que presentaron menor número de iteraciones fueron el de Aproximación de la difusión y el de Henderson-Pabis, a pesar de que el modelo de dos términos tuvo el más alto coeficiente de determinación y el valor de desviación estándar más bajo, el número de iteraciones que obtuvo fue significativamente mayor que los dos modelos antes mencionados. Estas observaciones permiten visualizar que el modelo que mejor se ajusta al proceso de secado por infrarrojo de manzana Golden Delicious es el modelo de Henderson-Pabis, ya que no presenta diferencias significativas en valores de desviación estándar y R^2 con respecto del modelo polinomial de dos términos, presenta un número de iteraciones bajo sin tener diferencias significativas en comparación con el modelo de Aproximación de la difusión y a su vez, tiene un número de iteraciones significativamente menor al que tiene el modelo polinomial de dos términos. Este modelo también ha sido el que mayor grado de ajuste se obtuvo en secado convectivo de manzana Red Delicious (Kaya et al. 2007).

Otros investigadores que han trabajado con la modelación matemática del secado por infrarrojo, han reportado que modelos de cinética de secado se ajustan a diferentes productos agroalimentarios. Sadín et al. (2017) reportaron que para el secado combinado infrarrojo-convectivo de tomate el modelo que tuvo mayor grado de ajuste a datos experimentales fue el de Midilli. Aidani et al. (2016) para el secado combinado infrarrojo de obtuvo que el modelo que mejor se ajustó fue el cuadrático también para el tomate (no utilizado en este trabajo). Puente et al. (2013) reportaron que para el secado infrarrojo de cascara de limón tuvo mayor ajuste al modelo logarítmico. Correa et al. (2012) obtuvieron el secado por infrarrojo de tomate se ajusta al modelo polinomial de dos términos y Jing et al. (2017)

reportaron que para el secado infrarrojo de láminas de carne de cerdo el modelo que tuvo el mayor grado de ajuste a las curvas de secado fue el modelo de Henderson-Pabis. Con estos antecedentes se infiere que el grado de ajuste de cada modelo matemático a los datos experimentales depende del producto que sea sometido al proceso de secado, de las condiciones en las que se someta (entero, en láminas, rodajas) y de las condiciones a las que se trabaje el secador (temperatura, potencia del infrarrojo) así como el método de deshidratación que sea utilizado (radiación, convección o ambos de manera simultánea).

3.3 Constantes cinéticas de los modelos matemáticos.

En los cuadros 6 y 7 se muestran los valores de las constantes cinéticas de secado para los modelos de; dos términos, aproximación de la difusión, Henderson-Pabis, logarítmico, Verma, Page y Midilli para las temperaturas de 60, 65 y 70 °C.

Cuadro 6. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Aprox. de la difusión, Henderson-Pabis y logarítmico.

	Dos términos				Aprox. de la difusión			Henderson Pabis		Logarítmico		
	a	k	b	g	a	k	b	a	k	a	k	b
60 °C	-0,003	-3,92	1,11	1,5	1,00	1,40	1,00	1,15	1,96	-5,4	0,1	5,5
65 °C	-5203	1,01	5204,70	1,0	1,00	1,39	1,00	1,14	1,97	1,3	0,1	-0,2
70 °C	4797	1,00	-4796,4	1,0	1,00	2,26	1,00	1,20	2,10	-0,6	0,9	0,6

Cuadro 7. Constantes cinéticas obtenidas para los modelos de Verma, Page y Midilli.

	Verma			Page		Midilli			
	a	k	g	k	n	a	k	n	b
60° C	8,20	0,44	0,07	0,45	1,41	1,11	0,04	0,91	0,00
65 °C	8,52	0,54	0,24	0,49	1,38	1,07	0,05	1,23	0,00
70 °C	9,09	0,77	0,55	0,50	1,41	1,00	0,73	-0,83	-0,02

Con base en los resultados obtenidos se puede observar que el valor de la constante “k” (min/s), que representa la velocidad de secado en el periodo de velocidad decreciente presente en los modelos de Aproximación de la difusión, Logarítmico, Page y Verma tiende a aumentar en cuanto aumenta la temperatura. La constante “n” del modelo Page, las constantes “a” de los modelos de Verma, Henderson-Pabis y Page, y la constante “g” del modelo de Verma también tienden a aumentar con la temperatura. Dichas observaciones respaldan lo que han afirmado otros autores como Puente et al. (2010) quienes comprueban que la velocidad de secado depende de la temperatura. Este comportamiento también lo reportaron Ruíz et al. (2008) para el secado infrarrojo de productos de uva.

3.4 Coeficiente de difusión efectiva.

En el Cuadro 8 se muestran los valores del coeficiente de difusión efectiva obtenidos para cada temperatura de secado, se puede observar que cuando la temperatura aumenta, el valor del coeficiente de difusión efectiva también aumenta, sin embargo, el mayor coeficiente de difusión efectiva se obtuvo a la temperatura de 65 °C y no a 70 °C, esto se debe a que la evaporación del agua dentro del alimento se realiza en menos tiempo, esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Sadin et al. (2017) en el proceso de secado por infrarrojo de tomate y Kaya et al. (2007) en el proceso de secado convectivo de manzana quienes también mencionan que el valor de este coeficiente depende de factores como la humedad inicial del producto, la geometría así como sus dimensiones (diámetro, espesor), y condiciones de proceso de secado.

Cuadro 8. Difusividad efectiva a cada temperatura de secado.

Temperatura (°C)	Coeficiente de difusión (m ² /s) (D _{eff})
60	4,7986E-07
65	6,2729E-07
70	6,1838E-07

Estos valores de D_{eff} están en el intervalo de 10^{-12} y 10^{-7} correspondientes a alimentos o sistemas alimentarios (Puente et al. 2013) y puede ser comparado con los valores de diferentes productos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Coeficientes de difusión efectiva de diferentes productos agroalimentarios (Correa et al. 2012).

Producto	Difusión efectiva (m^2/s) (D_{eff})
Tomate	0.1147 – 7.078 E-9
Uva	0.5 – 1 E-9
Cebolla	1.0 – 10 E-9
Tomate (cv. Santa Cruz)	1 – 10 E-7

La influencia de condiciones de las condiciones de proceso y el método de secado en el valor del coeficiente de difusión efectiva, se observa si se comparan los resultados experimentales de este trabajo con los obtenidos por Kaya et al. (2007) para el secado convectivo de manzana Red Delicious, quienes obtuvieron valores de D_{eff} entre 0.483×10^{-10} y 2.019×10^{-10} m^2/s . Con los anteriores resultados se puede inferir que cuando se deshidratan alimentos con secado por infrarrojo existe mayor transferencia de masa en comparación con el secado convectivo, y por lo tanto es más eficiente ya que también se disminuye el tiempo de secado.

3.5 Energía de activación.

Se obtuvo una energía de activación de 24.1 kJ/mol para la manzana Golden Delicious, este valor es comparable con el de la manzana Red Delicious reportado por Kaya et al., quienes obtuvieron un valor de 22.624 kJ/mol, además concuerda con los valores obtenidos por Sadín et al. (2017) quienes reportaron energías de activación en un intervalo de entre 22.12 y 35.31 kJ/mol en el secado infrarrojo de tomate, esto indica que el secado por infrarrojo de manzana puede llevarse a cabo satisfactoriamente con requerimientos energéticos relativamente bajos. Para el secado por infrarrojo de subproductos de uva, Ruíz et al. (2008) obtuvieron una energía de activación de 19.27 kJ/mol.

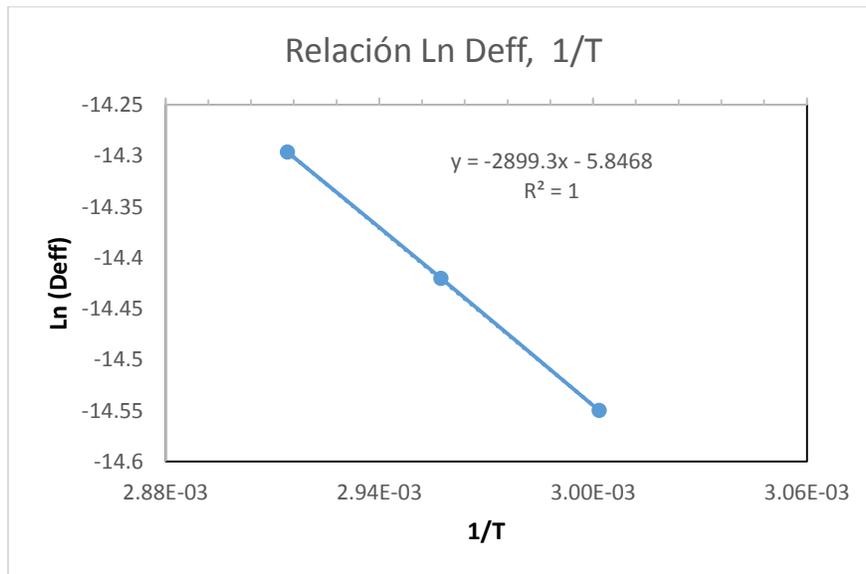


Figura 6. Variación de la difusividad efectiva con respecto de la temperatura para manzana deshidratada a temperaturas de 60, 65 y 70°C.

3.5.1 Consumo energético.

El consumo de energía para llevar a cabo el secado de Manzana Golden Delicious fue de 0.00019, 0.00022 y 0.00026 kW/h para 60, 65 y 70°C respectivamente, se puede observar que a la temperatura de 60 °C se obtuvo el menor consumo energético. Al aumentar la temperatura de secado se observa una disminución del tiempo de secado, sin embargo, el consumo energético no tuvo la misma tendencia ya que este aumentó al aumentar la temperatura. Puente et al. (2013) quien no encontraron una tendencia definida entre la temperatura, el tiempo de operación y el consumo energético.

3.6 Coeficientes globales de transferencia de calor (h_c) y masa (h_m).

En el cuadro 10 se muestran los valores de coeficientes globales de transferencia de calor y masa, donde se observa que estos aumentan con la temperatura, esto se debe a que estos valores tienen una dependencia directa con la constante cinética de secado (k), la cual aumenta con la temperatura y esta se obtiene de la pendiente de la recta de secado en el periodo de velocidad constante, teniendo los valores más altos a la condición de temperatura de secado de 70°C , mientras es mayor el coeficiente de calor y masa, más disminuye el tiempo de secado.

Cuadro 10. Coeficientes globales de transferencia de calor y masa para manzana deshidratada a diferentes temperaturas.

Tratamiento	$h_c \left(\frac{W}{m^2K}\right)$	$h_m \left(\frac{m}{s}\right)$
60 °C	12.2553	0.0028
65 °C	20.7504	0.0033
70 °C	25.2839	0.0035

Los valores obtenidos de los coeficientes de transferencia de calor y masa se asemejan a los resultados obtenidos por Correa et al. quienes para el secado por infrarrojo de tomate obtuvieron un valor de h_c de $12.45 \frac{W}{m^2K}$ y un h_m de 0.0105 m/s , además, reportaron valores de h_m de 0.00475 m/s para el secado de raíces de cassava y 0.00974 m/s para la deshidratación de mango. Los coeficientes globales de transferencia de calor h_c obtenidos en este trabajo entran en el intervalo de valores reportados por Bird et al. (2004) quienes indican que los valores de transferencia de calor para convección natural son de 3 a $20 \frac{W}{m^2K}$.

3.7 Color

En el Cuadro 11 se muestran los resultados obtenidos para color, indican que existe un aumento en los parámetros L* (aumenta la luminosidad), a* (la muestra se vuelve más roja) y b* (la muestra disminuye su tonalidad azul) cuando las muestras son deshidratadas. Los análisis estadísticos realizados indican que no existen diferencias significativas en los parámetros L* y a* al comparar las muestras frescas con las muestras deshidratadas. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Boudhrioua et al. (2008) para el secado de hojas de oliva. Para el parámetro b* si existieron diferencias significativas en todos los casos, al comparar las muestras frescas con las deshidratadas; de los tres tratamientos es a la temperatura de 65°C donde se obtuvo el valor de b* significativamente más alto (disminuya más la tonalidad azul). Aunque exista un aumento de los parámetros L* y a* se puede apreciar que no existen diferencias significativas al comparar los tratamientos de secado entre sí, por lo que es posible inferir que la temperatura de secado no cambia de manera significativa a la luminosidad y tonalidad roja del producto.

Cuadro 11. Resultados de color para muestras frescas y deshidratadas de manzana.

Muestra	L*	a*	b*
Manzana fresca	31.4 ^A	-102.2 ^A	-100.5 ^C
60 °C	32 ^A	-101 ^A	-87.4 ^B
65 °C	31.8 ^A	-99.6 ^A	-78.3 ^A
70 °C	32.6 ^A	-100.4 ^A	-80.9 ^{AB}

Con los valores que se muestran en el cuadro 12 es posible apreciar que a la temperatura en donde se observa menor cambio de color es la de 60 °C, mientras que a 65 °C es donde se observó la mayor diferencia de color; el mismo comportamiento ocurre con la variación del parámetro b (tonalidad azul).

Cuadro 12. Variación de L, a y b entre muestras frescas y deshidratadas y de color (ΔE).

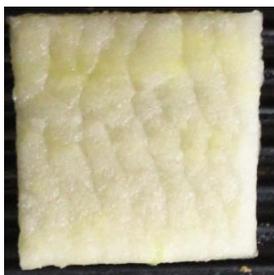
Temperatura	ΔL	Δa	Δb	ΔE
60 °C	0,6 ^A	1,16 ^A	13,03 ^B	13,1 ^B
65 °C	0,42 ^A	2,53 ^A	22,15 ^A	22,3 ^A
70 °C	1,24 ^A	1,81 ^A	19,55 ^{AB}	19,67 ^{AB}

Nota: Los valores que no comparten una letra en la misma columna son significativamente diferentes.

Los parámetros L^* y b^* no presentan diferencias significativas entre los tratamientos aplicados. Estos resultados respaldan la tendencia obtenida por Kumar et al. (2005), quienes obtienen mayor variación de color a una baja temperatura (30 °C), esto es debido a que se requirieron tiempos más largos de secado en comparación a temperaturas más altas (50 °C) en donde se obtuvo menor cambio de color, también concluyen que el uso de un secado asistido por infrarrojo permite conservar mejor el color de las muestras deshidratadas en rodajas de cebolla en comparación a las obtenidas con secado convectivo. Las muestras de manzana fresca y deshidratada se pueden observar en la figura 7

Figura 7. Láminas de manzana fresca y con tratamiento a diferentes temperaturas:

- a) *Manzana fresca*
- b) *Manzana deshidratada a 60 °C*
- c) *Manzana deshidratada a 65 °C*
- d) *Manzana deshidratada a 70 °C*



a)

b)

c)

d)

En la anterior figura puede apreciarse que el mayor cambio de color se aprecia en la muestra que fue tratada a 65 ° C sin embargo,este cambio de color es mas uniforme comparado con el cambio de color de las muestras tratadas a 60 y 70 °C, Así mismo se puede observar que la muestra tratada a 70°C es la que presento mayor deformación y un cambio de color no uniforme.

3.8 Polifenoles totales.

Para evaluar el efecto de la temperatura en el contenido de polifenoles totales a un mismo tiempo, se secaron las muestras a cada temperatura (60y 65 y 70 °C) por media hora. En el cuadro 13 se muestran los contenidos de polifenoles de la manzana fresca y deshidratada a las tres temperaturas de secado, el contenido inicial de manzana es de 66.48 mg AG/100 gramos de muestra, similar a los resultados obtenidos por Li et al. (2011) quienes reportaron un contenido de 68.29 mg AG/100 g para manzana Green Delicious y 73.96 mg AG/100 g para manzana Red Delicious.

Cuadro 13. Contenido de polifenoles de Manzana Golden Delicious fresca y deshidratada a diferentes temperaturas.

Muestra	mg AG/100 g muestra
Fresca	66.48 ^C
60°C	119,14 ^B
65°C	176.77 ^A
70°C	166.13 ^A

Nota: Los valores que no comparten una letra en la misma columna son significativamente diferentes.

De acuerdo con la información del cuadro 12 se puede observar que cuando aumenta la temperatura, también aumenta significativamente el contenido de polifenoles totales, el mayor contenido de compuestos fenólicos se presenta a la temperatura de 65 °C y no a la más alta temperatura de secado (70 °C) sin embargo entre estas dos condiciones no existe diferencia significativa en comparación de la temperatura de 60°C que es significativamente menor a cualquiera de estas dos temperaturas, esta tendencia permite inferir que este parámetro tiene una influencia de la temperatura y que el contenido de polifenoles aumenta cuando disminuye el contenido de humedad de la manzana. Lee et al. (2006) indicaron que el contenido de polifenoles es mayor para subproductos de cacahuete sometidos a radiación infrarroja en comparación a un secado tradicional por aire, por lo cual puede decirse que este método de secado permite la mejor conservación de estos compuestos antioxidantes.

CONCLUSIONES

- Para la manzana Golden Delicious hubo una disminución del tiempo de secado del 80% para llegar a un mismo valor de humedad en comparación del secado convectivo de manzana Red Delicious.
- El modelo matemático que mejor describe la cinética de secado de manzana Golden Delicious fue el modelo Henderson-Pabis con un valor de R^2 de 0.9959, una desviación estándar de 0.016 y un número de 8 iteraciones. Aunque el modelo polinomial de dos términos fue el que tuvo mayor coeficiente de determinación (0.9994) y una desviación estándar de 0.0077, éste no se eligió ya que, para ajustarse, tuvo un número de 23 iteraciones las cuales son significativamente mayor que las obtenidas en el modelo Henderson-Pabis.
- Con la solución gráfica de la segunda ley de Fick es posible determinar el coeficiente de difusión efectiva del agua en la Manzana Golden Delicious considerando láminas delgadas. Este valor aumenta 23% a medida que se incrementa la temperatura de secado 5°C.
- La energía de activación fue de 24.1 kJ/mol, en contraste con otros resultados observados en diferentes proyectos se observa que este valor depende tanto de las temperaturas como del producto utilizado.
- El valor de las constantes cinéticas del modelo Henderson-Pabis “a” y “k” tienden a aumentar cuando aumenta la temperatura, por lo que se deduce que son dependientes de este factor.
- A la temperatura de 65°C se observó el mayor cambio de color ya que a esta temperatura, las láminas de manzana distribuyen el calor de manera más uniforme a que los tiempos de secado fueron mayores que a 70 °C, aunque entre estos dos tratamientos no existe una diferencia significativa de color. Misma tendencia que ocurre con el contenido de polifenoles ya que estos aumentan conforme a la

temperatura. Se puede inferir que no hubo cambios significativos en estos dos parámetros a las temperaturas de 65 y 70 °C.

- Se logró llevar a cabo la deshidratación de Manzana Golden Delicious mediante al secado por infrarrojo, lo cual constituye una buena alternativa para el secado de frutas, vegetales y otros productos alimenticios que requieran extender su vida de anaquel mediante la reducción del contenido de humedad.
- Al disminuir los tiempos de secado se disminuye el consumo energético hasta un 80% siendo este, un impacto positivo a la reducción de costos de proyecto.

RECOMENDACIONES

- Este proyecto puede dar pauta a realizar la revisión del proceso de secado de manzana Golden Delicious utilizando el secado convectivo por aire caliente, así como también hacer uso de los métodos radiación infrarroja y convección de manera simultánea para poder llevar a cabo una comparación directa con el secado por radiación infrarroja.
- Los resultados de los parámetros cinéticos obtenidos en este proyecto pueden ser utilizados para realizar el escalamiento de similitud cinética del secado de manzana Golden Delicious por radiación infrarroja.

REFERENCIAS

- Aboltins, A., & Palabinskis, J. (2016). Fruit drying process investigation in infrared film dryer. *Agronomy Research*.
- Anaya-Durand, A., & Pedroza-Flores, H. (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, ciencia, educación*, 23(1), 31-39.
- Bird, R., Stewart, W., & Lightfoot, E. (2004). *Fenómenos de transporte*. Río de Janeiro: LTC.
- Boudhrioua, N., Kouhila, M., & Kechaou, N. (2008). Experimental and mathematical investigations of convective solar drying of four varieties of olive leaves. *AATS Journals*, 176-184.
- Brooker, D., Bakker, A., & Hall, C. (1992). *Drying and storage of grains and oilseeds*. USA: Wesport Connecticut.
- Calvo, C., & Durán, L. (1997). *Propiedades Físicas II: Ópticas y color. Temas en Tecnología de Alimentos*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y valoración energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Ceballos, E., & Jiménez, M. (2012). Cambios en las propiedades de frutas y verduras durante la deshidratación con aire caliente y su susceptibilidad al deterioro microbiano. *Temas selectos de ingeniería en alimentos*, 98-110.
- Cengel, A., & Boles, A. (2012). *Termodinámica (7a ed.)*. México: Mc Graw Hill.
- Chinè-Polito, B. (2015). Modelación del proceso de secado de productos agroindustriales. *Tecnología en marcha*, 62-73.
- Corrêa, P. C., Horta de Oliveira, G. H., Machado Baptestini, F., Silva Diniz, M. D., & Almeida da Paixão, A. (2012). Tomato infrared drying: modeling and some coefficients. Chilean journal of agricultural research. *Chilean journal of*

- agricultural research*, 262-267. Obtenido de <http://www.bioline.org.br/pdf?cj12041>
- Costa, A., & Ferreira, S. (2007). Sistema de secado solar para frutos tropicales. *Información tecnológica.*, 49-58.
- El cultivo de la manzana.* (2015). Obtenido de http://www.infografo.com/frutas/frutas_tradicionales/manzana.html
- Ebray, Z., & Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Food science and nutrition.*, 441-464.
- Eroskiconsumer. (2011). *Manzana.* Obtenido de <http://frutas.consumer.es/documentos/frescas/manzanas/intro.php>.
- Financiera Nacional de Desarrollo. (2014). *Panorama de la manzana.* México: Secretaria de hacienda y crédito público.
- Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., & Albors Soralla, A. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente.* Valencia, España: Universidad Politécnica de València.
- García Martínez, E., Fernández Segovia, I., & Fuentes López, A. (s.f.). *Determinación de polifenoles por el método Folin-Ciocalteu.* Valencia: Universidad Politécnica de València.
- Gil, A. (2015). *Tratado de Nutrición. Tomo II: Composición y calidad nutritiva de los alimentos.* España: Médica Panamericana.
- Hebbbar, H., & Rastogi, N. (2010). Mass transfer during infrared drying of cashew kernel. *Journal of Food Engineering*, 254-260.
- Holdman, J. (1998). *Transferencia de calor.* España: Mc Graw Hill.
- Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *Journal of agricultural and food chemistry*, 1841-1856.
- Jangam, S. V., Law, C. L., & Mujumdar, A. S. (2011). *Drying of food, vegetables and fruits.* (Vol. 2). E- book, ISBN 978-981-08-7985-3.
- Jing, L., Zhaosheng, T., Haijun, L., & He, W. (2013). Infrared drying kinetics and moisture diffusivity modeling of pork. *Int J Agric & Biol Eng*, 302-311.
- Kadam, D., Goyal, R., & Gupta, M. (2011). Mathematical Modeling of convective thin-layer drying of basil leaves. *J Med Plants Res*, 721-730.

- Kaya, A., Aydin, O., & Demirtas, C. (2007). Drying Kinetics of Red Delicious Apple. *Biosystems Engineering*, 517-524.
- Krishnamurthy, K., Khurana, H. K., Soojin, J., Irundayaraj, J., & Demirci, A. (2008). Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive Reviews in food science and food safety.*, 93-104.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. S. (2009). *Advanced Drying Technologies* (segunda ed.). Boca Ratón: CRC Press.
- Kumar, D., Hebbar, U., Sukumar, D., & Ramesh, M. (2005). Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 132-150.
- Lee, S., Jeong, S., Kim, S., Park, H., Nam, K., & Ahn, D. (2006). Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. *Food Chemistry*, 489-493.
- Marín, G., Ramírez, H., Hernández, A., Rodríguez, R., Benavides, A., Jasso, D., & Munguia, J. (2008). ENCALADO DEL FRUTO EN LA PRODUCCIÓN ORGÁNICA DE MANZANA: IMPACTO SOBRE EL PAÑO DEL FRUTO. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 171-179.
- Motevalli, A., Minaei, S., & Khoshtagaza, M. (2011). Evaluation of energy consumption in differen drying methods. *Energy conversion and management.*, 1192-1199.
- Mujumdar, A. (1995). *Principles, Classification, and Selection of Dryers. Handbook of Industrial Drying*. Montreal: Marcel Dekker.
- Nollet, L. M. (1996). *Handbook of food analysis*. New York: M. Dekker.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Mat Nawi, N., & Abdan, K. (2016). Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Food Science and Food Safety.*, 599-618.
- Pan, Z., Atungulu, G. G., & Li, X. (2014). Infrared Heating. *Emerging technologies for food processing.*, 461-474.
- Porras, A. P., & López, A. (2009). Importancia de los grupos fenólicos en los alimentos. *Temas selectos de ingeniería de alimentos*, 121-134.
- Puente Díaz, L., Echegaray Pacheco, E., Castro Montero, E., & Scala, K. (27 de Agosto de 2013). APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELS TO

- INFRARED ASSISTED DRYING PROCESS OF LEMON WASTE (Citrus limon (L.) Burm. F. Cv. Genova). *Dyna*, 91-97.
- Ratti , C., & Mujumdar, A. (2006). *Infrared drying. Handbook of Industrial Drying*.
- Raya Castro, F., Parra Martínez, G., Cuellar Mina, M., Miranda Carballo, M., Araujo Marín, G., Espada Soto, I., . . . Peñaranda Iporre, E. (2014). *Texto guía del principiante: Producción de manzana*. Sucre: Educación para el desarrollo FAUTAPO.
- Rettig, M., & Hen, A. (2014). Color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 39-48.
- Rocha, E. (2015). *Plan Rector del sistema producto manzana*. México: SAGARPA.
- Ruiz Celma, A., Cuadros, F., & López-Rodríguez , F. (2009). Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. *Elsevier; food and bioproducts processing*, 282-291.
- Ruiz Celma, A., López Rodríguez, F., & Cuadros Blázquez, F. (2008). Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by products. *Food and Bioproducts Processing*, 248-253.
- Sadin, R., Chegini, G., & Khodadadi, M. (2017). Drying characteristics and modeling of tomato thin layer drying in combined infrared-hot air dryer. *AgricEngInt*, 150-157.
- Salazar, L. (2013). *Aplicación de atmósferas modificadas en manzana "Red Delicious" y "Golden Delicious" mínimamente procesada para el control de padiamiento enzimático*. México: UNAM.
- Sandu, C. (1986). Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, 109-119.
- Senadeera, W., Bhandari, B. R., Young, G., & Wijesinghe, B. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of food engineering*, 277-283.
- Senevirathne, M., Kim, S.-H., Kim, Y.-D., Oh, C.-K., Oh, M.-C., Ahn , C.-B., . . . Jeon, Y.-J. (2010). Effect of far-infrared radiation drying of citrus press-cakes on free radical scavenging and antioxidant. *Journal of Food Engineering*, 168-176.

- Sepúlveda , M., Quitral, V., Schwartz, M., Vio, F., Zacarías, I., & Werther, K. (2011). Propiedades saludables y calidad sensorial de snack de manzanas destinadas a alimentación escolar. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 423-428.
- Siegel, R., & Howell, J. (2002). *Thermal radiation heat transfer*. Taylor and Francis Group.
- Suárez Castañeda, J. L., Amell Arrieta, A. A., & Cadavid Sierra, F. J. (2012). Radiación Infrarroja como mecanismo de transferencia de calor de alta calidad en procesos de calentamiento. *Ingeniería y ciencia.*, 97-127.
- Vega, A., Miranda, M., Puente, L., López, L., Uribe, E., Rdodríguez, K., & Di., K. (2012). Effective Moisture diffusivity determination and mathematical modelling of the drying curves of the olive-waste cake. *Bioresource Technology*, 7265-7270.
- Webbery, J., & Zimmerman, M. (2014). *El gran libro de la nutrición*. Barcelona: Profit Editorial.
- Wijitha Senadeera, B. R. (2003). Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *Journal of Food Engineering*, 277-283.
- Yaldiz, O., & Ertekyn, C. (2001). Thin layer solar of some foods and vegetables. *Drying technologies*, 583-597.

ANEXOS

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

ANEXO 1. AJUSTE DE MODELOS MATEMÁTICOS.

ANOVA de un solo factor: DE vs. Modelos

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Modelos	7	Aprox. de la difusión; Dos términos; Henderson-Pabis; Logarítmico; Midilli; Page; Verma

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelos	6	0,006699	0,001117	3,55	0,024

Error	14	0,004401	0,000314		
Total	20	0,011100			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0177292	60,35%	43,36%	10,80%

Medias:

Modelos	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Aprox. de la difusión	3	0,06702	0,00829	(0,04507; 0,08898)
Dos terminos	3	0,007787	0,001180	(-0,014167; 0,029741)
Henderson-Pabis	3	0,01693	0,00542	(-0,00502; 0,03889)
Logarítmico	3	0,0330	0,0275	(0,0110; 0,0549)
Midilli	3	0,0263	0,0348	(0,0043; 0,0482)
Page	3	0,02003	0,00500	(-0,00192; 0,04198)
Verma	3	0,03873	0,01064	(0,01677; 0,06068)

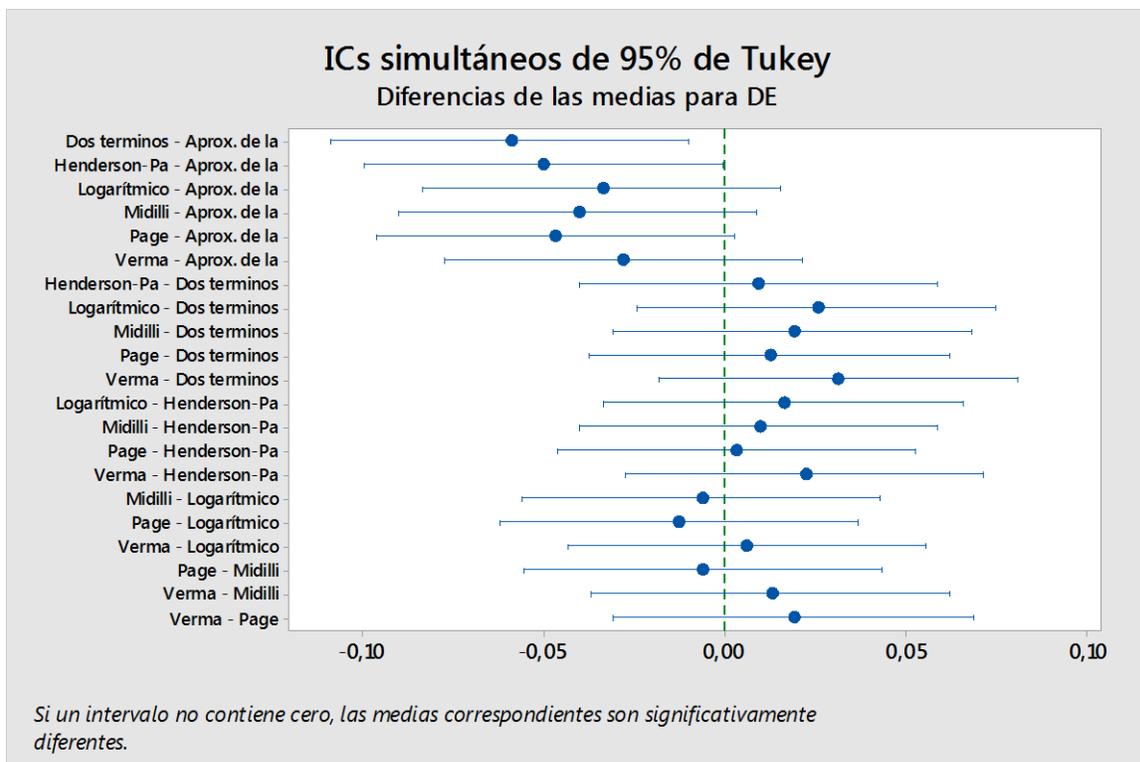
Desv.Est. agrupada = 0,0177292

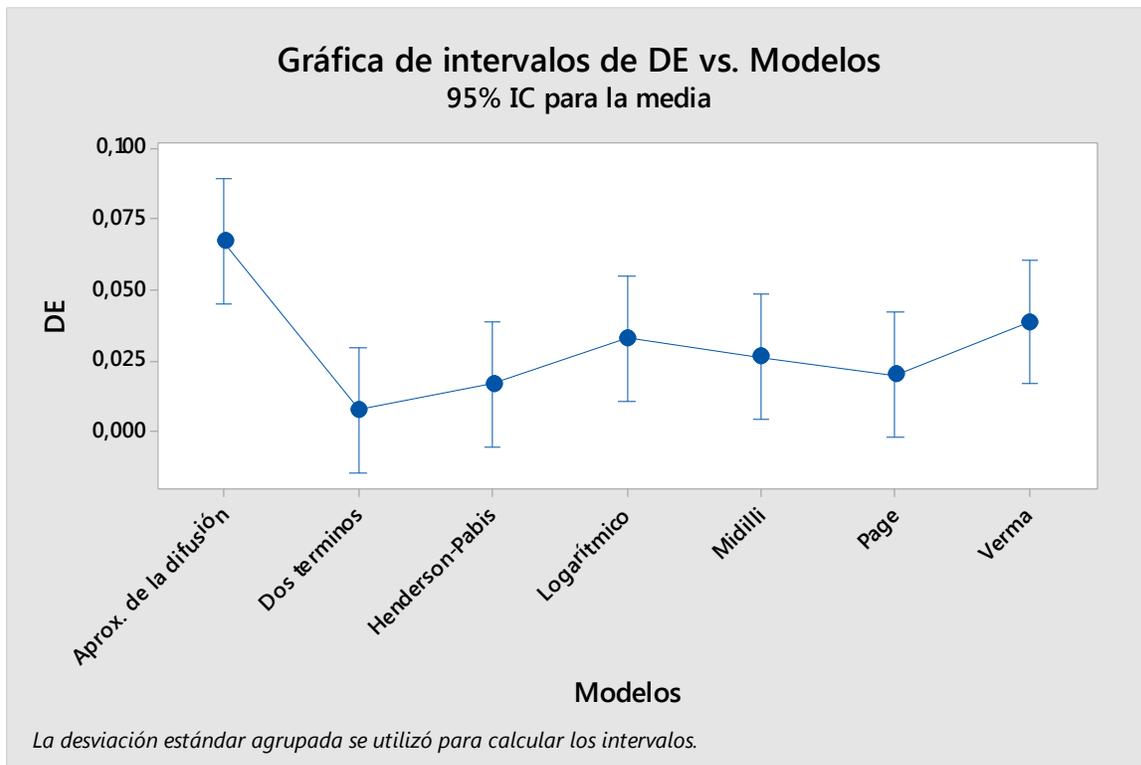
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Modelos	N	Media	Agrupación	
Aprox. de la difusión	3	0,06702	A	
Verma	3	0,03873	A	B
Logarítmico	3	0,0330	A	B
Midilli	3	0,0263	A	B
Page	3	0,02003	A	B
Henderson-Pabis	3	0,01693		B
Dos terminos	3	0,007787		B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.





ANOVA de un solo factor: R2 vs. Modelos

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Modelos	7	Aprox. de la difusión; Dos terminos; Henderson-Pabis; Logarítmico; Midilli; Page; Verma

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelos	6	0,003704	0,000617	3,94	0,016
Error	14	0,002194	0,000157		
Total	20	0,005899			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0125197	62,80%	46,86%	16,30%

Medias:

Modelos	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Aprox. de la difusión	3	0,95700	0,01694	(0,94150; 0,97250)
Dos terminos	3	0,999367	0,000115	(0,983864; 1,014870)
Henderson-Pabis	3	0,99590	0,00288	(0,98040; 1,01140)
Logarítmico	3	0,9841	0,0185	(0,9686; 0,9996)

Midilli	3	0,9877	0,0204	(0,9722; 1,0032)
Page	3	0,996033	0,000551	(0,980530; 1,011536)
Verma	3	0,98287	0,00667	(0,96736; 0,99837)

Desv.Est. agrupada = 0,0125197

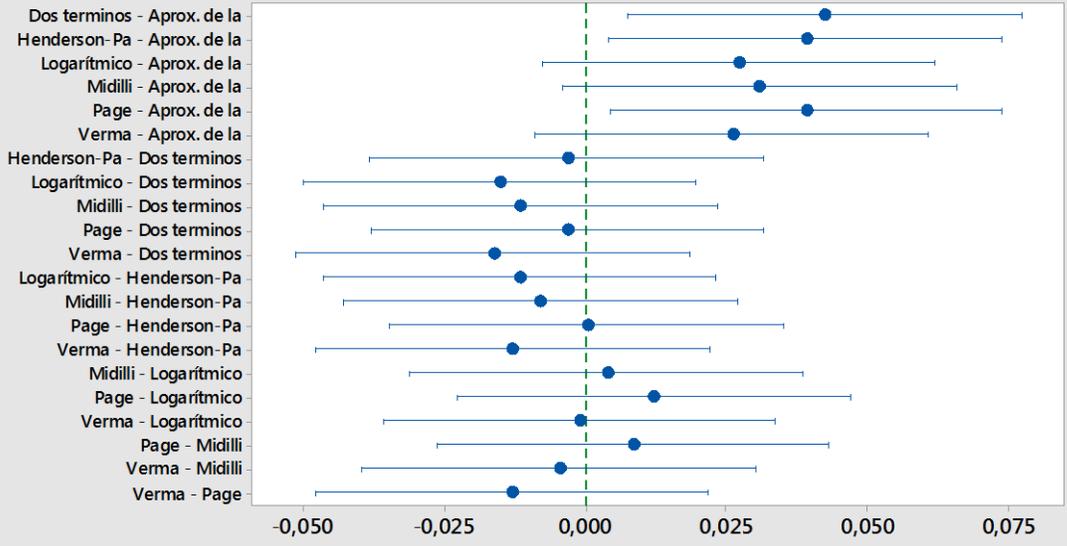
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Modelos	N	Media	Agrupación	
Dos terminos	3	0,999367	A	
Page	3	0,996033	A	
Henderson-Pabis	3	0,99590	A	
Midilli	3	0,9877	A	B
Logarítmico	3	0,9841	A	B
Verma	3	0,98287	A	B
Aprox. de la difusión	3	0,95700		B

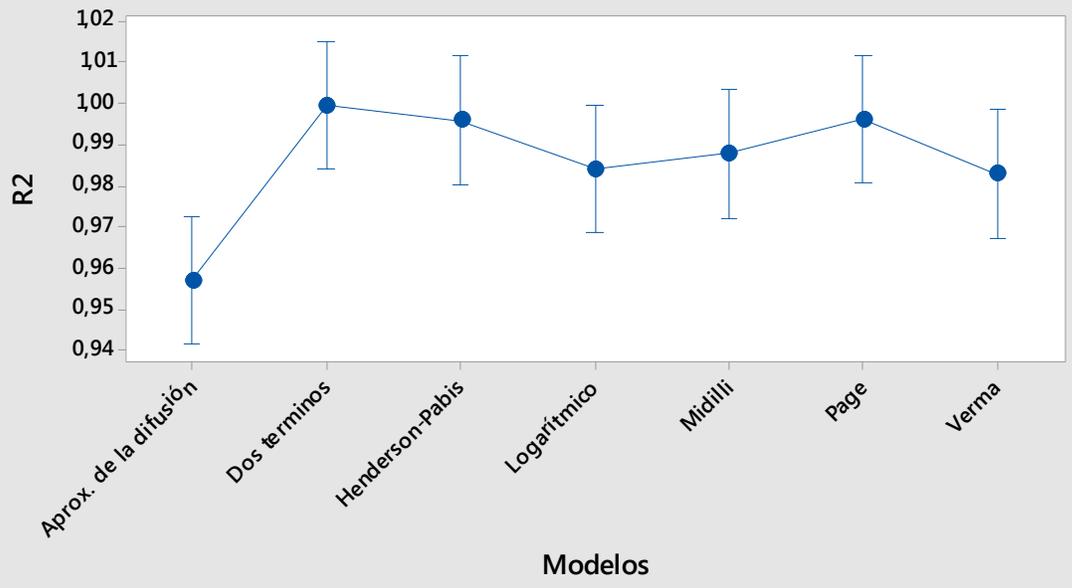
Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

ICs simultáneos de 95% de Tukey Diferencias de las medias para R2



Si un intervalo no contiene cero, las medias correspondientes son significativamente diferentes.

Gráfica de intervalos de R2 vs. Modelos 95% IC para la media



La desviación estándar agrupada se utilizó para calcular los intervalos.

ANOVA de un solo factor: ITERACIONES vs. Modelos

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Modelos	7	Aprox. de la difusión; Dos términos; Henderson-Pabis; Logarítmico; Midilli; Page; Verma

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelos	6	21589	3598,2	7,91	0,001
Error	14	6372	455,1		
Total	20	27961			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
21,3341	77,21%	67,44%	48,72%

Medias:

Modelos	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
Aprox. de la difusión	3	7,000	1,000	(-19,418; 33,418)
Dos términos	3	23,0	18,2	(-3,4; 49,4)
Henderson-Pabis	3	8,000	0,000	(-18,418; 34,418)
Logarítmico	3	67,7	49,1	(41,2; 94,1)
Midilli	3	27,3	21,0	(0,9; 53,8)
Page	3	12,000	1,000	(-14,418; 38,418)
Verma	3	97,333	1,528	(70,915; 123,751)

Desv.Est. agrupada = 21,3341

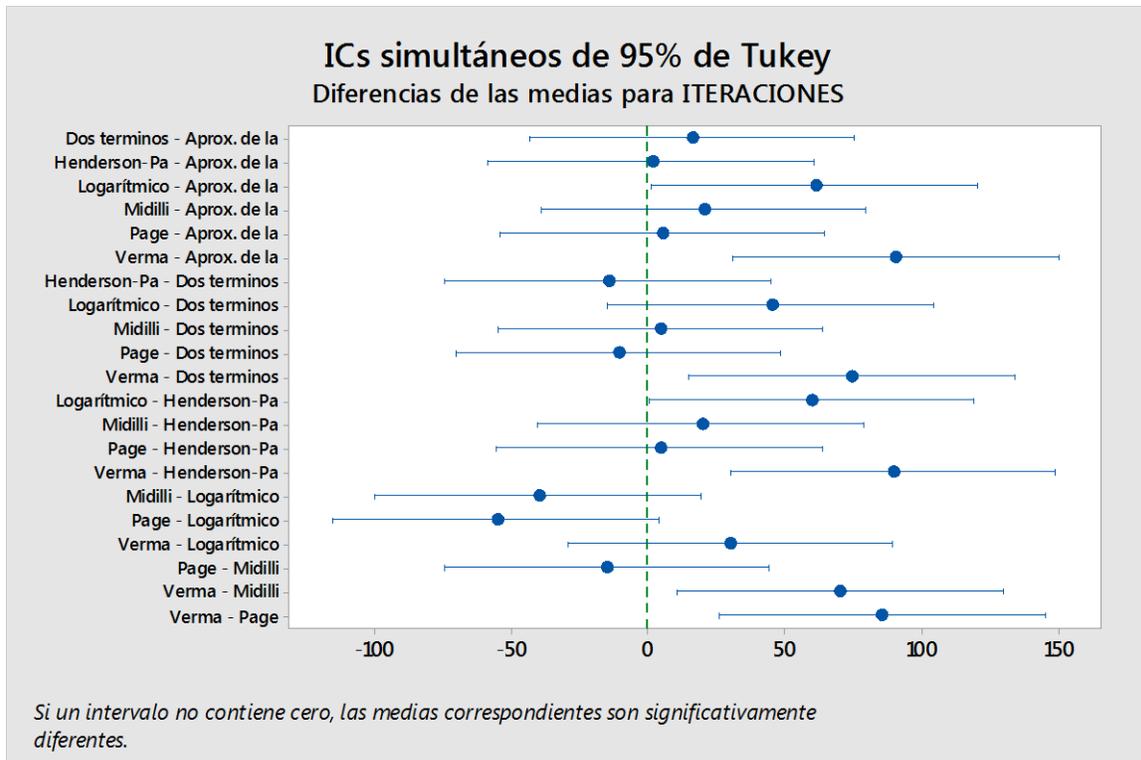
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Modelos	N	Media	Agrupación		
Verma	3	97,333	A		
Logarítmico	3	67,7	A	B	
Midilli	3	27,3		B	C
Dos términos	3	23,0		B	C

Page	3	12,000		B	C
Henderson-Pabis	3	8,000			C
Aprox. de la difusión	3	7,000			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANEXO 2. COLOR

ANOVA de un solo factor: L* vs. Muestra

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
----------------	------------------------------

Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Muestra	4	60 °C; 65 °C; 70 °C; fresca

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra	3	10,30	3,434	0,77	0,516
Error	48	213,76	4,453		
Total	51	224,06			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,11031	4,60%	0,00%	0,00%

Medias:

Muestra	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	32,006	1,523	(30,829; 33,183)
65 °C	13	31,825	1,394	(30,648; 33,002)

70 °C	13	32,640	1,537	(31,463; 33,816)
fresca	13	31,403	3,345	(30,226; 32,580)

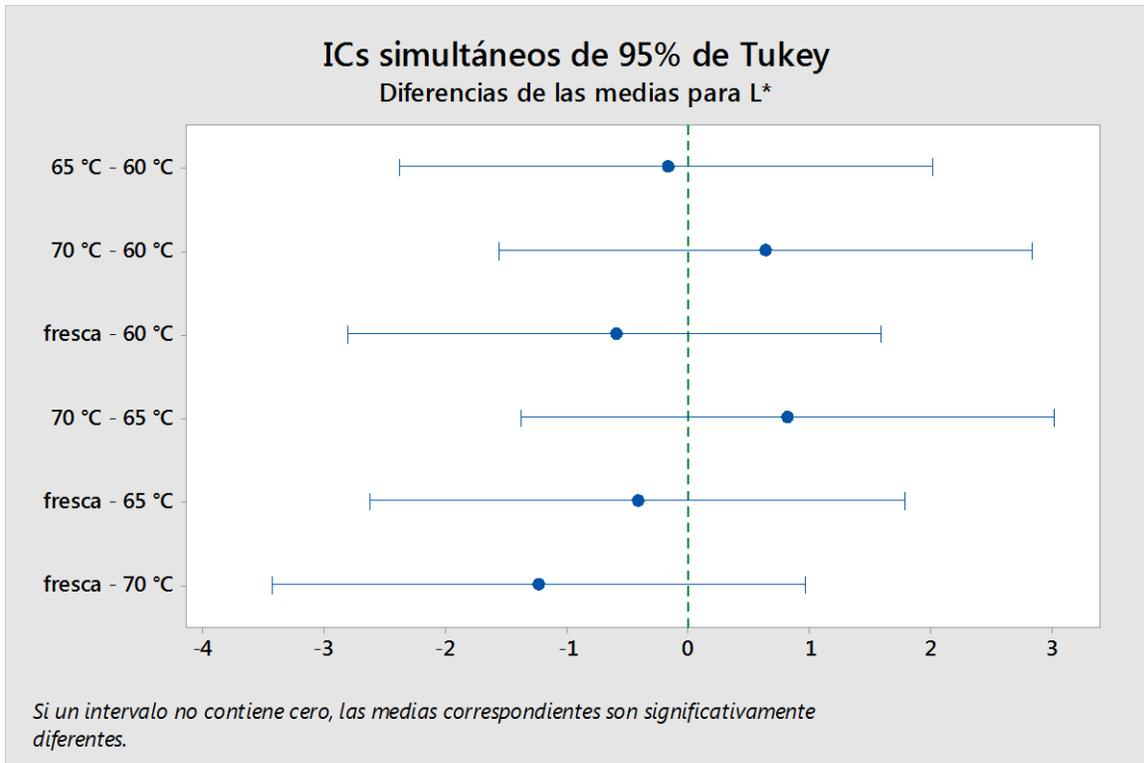
Desv.Est. agrupada = 2,11031

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% :

Muestra	N	Media	Agrupación
70 °C	13	32,640	A
60 °C	13	32,006	A
65 °C	13	31,825	A
fresca	13	31,403	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: a* vs. Muestra

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Muestra	4	60 °C; 65 °C; 70 °C; fresca

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra	3	45,11	15,036	2,43	0,077
Error	48	297,50	6,198		
Total	51	342,61			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,48955	13,17%	7,74%	0,00%

Medias:

Muestra	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	-101,01	3,63	(-102,40; -99,63)
65 °C	13	-99,638	2,158	(-101,026; -98,250)
70 °C	13	-100,362	2,385	(-101,750; -98,974)
fresca	13	-102,172	1,113	(-103,560; -100,784)

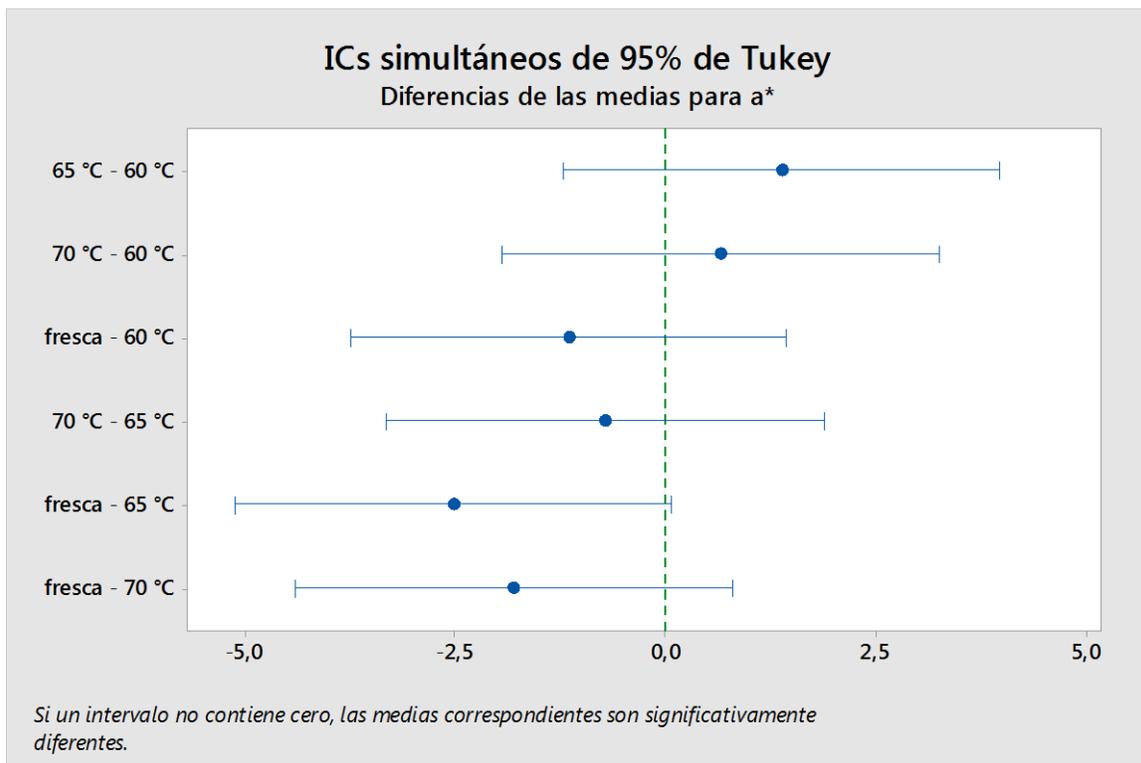
Desv.Est. agrupada = 2,48955

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Muestra	N	Media	Agrupación
65 °C	13	-99,638	A
70 °C	13	-100,362	A
60 °C	13	-101,01	A
fresca	13	-102,172	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: b* vs. Muestra

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Muestra	4	60 °C; 65 °C; 70 °C; fresca

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra	3	3819	1273,12	22,92	0,000
Error	48	2666	55,54		
Total	51	6485			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,45228	58,89%	56,33%	51,76%

Medias:

Muestra	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	-87,42	7,64	(-91,58; -83,27)
65 °C	13	-78,30	5,97	(-82,45; -74,14)
70 °C	13	-80,90	10,18	(-85,06; -76,75)
fresca	13	-100,45	4,95	(-104,61; -96,30)

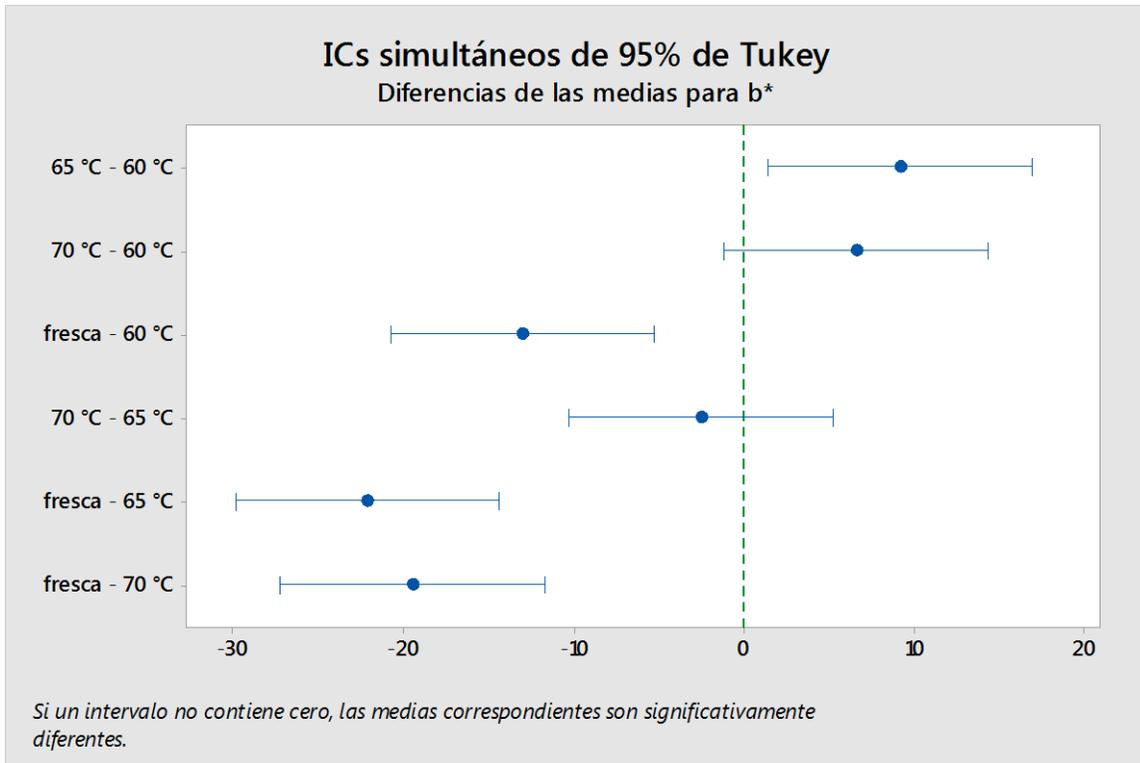
Desv.Est. agrupada = 7,45228

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% :

Muestra	N	Media	Agrupación		
65 °C	13	-78,30	A		
70 °C	13	-80,90	A	B	
60 °C	13	-87,42		B	
fresca	13	-100,45			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: ΔL vs. Temperatura

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Temperatura	3	60 °C; 65 °C; 70 °C

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	2	4,756	2,378	0,16	0,849
Error	36	519,469	14,430		
Total	38	524,224			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,79864	0,91%	0,00%	0,00%

Medias:

Temperatura	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	0,60	4,18	(-1,53; 2,74)
65 °C	13	0,42	3,62	(-1,71; 2,56)
70 °C	13	1,237	3,558	(-0,900; 3,374)

Desv.Est. agrupada = 3,79864

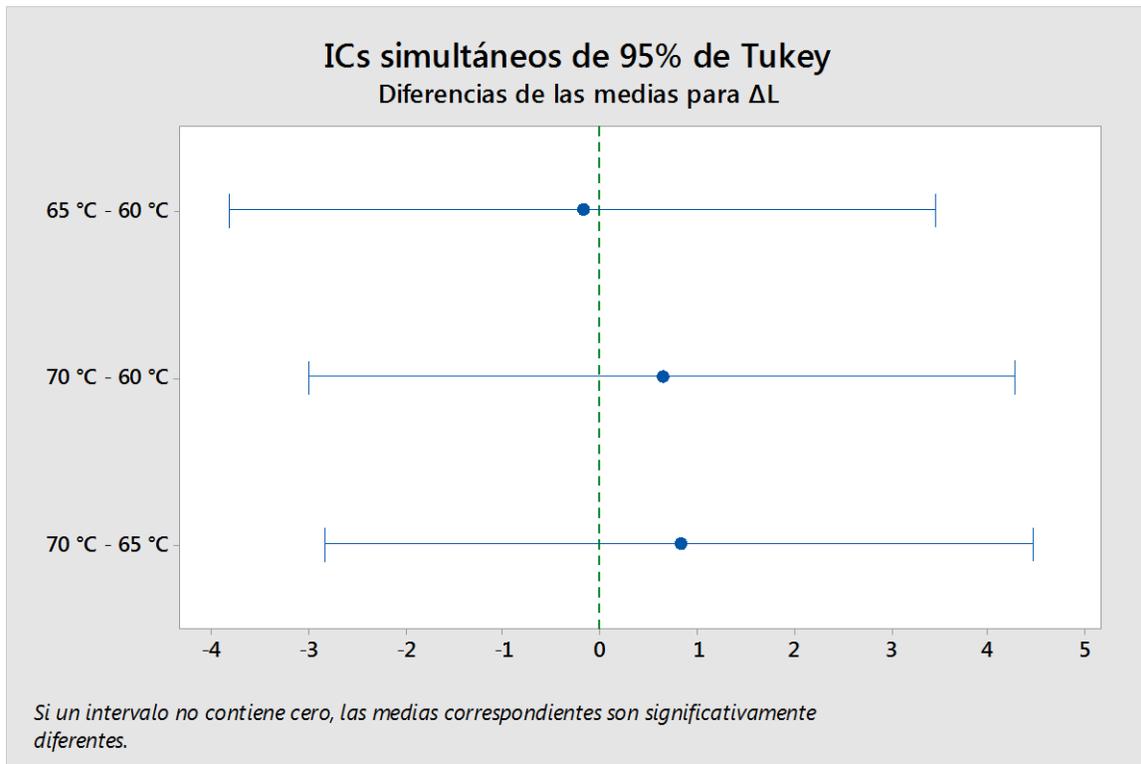
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Temperatura	N	Media	Agrupación
70 °C	13	1,237	A

60 °C	13	0,60	A
65 °C	13	0,42	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: Δa vs. Temperatura

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Temperatura	3	60 °C; 65 °C; 70 °C

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	2	12,31	6,155	0,71	0,498
Error	36	311,81	8,661		
Total	38	324,12			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
2,94301	3,80%	0,00%	0,00%

Medias:

Temperatura	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	1,158	3,566	(-0,497; 2,814)
65 °C	13	2,534	2,118	(0,879; 4,189)
70 °C	13	1,810	2,963	(0,155; 3,465)

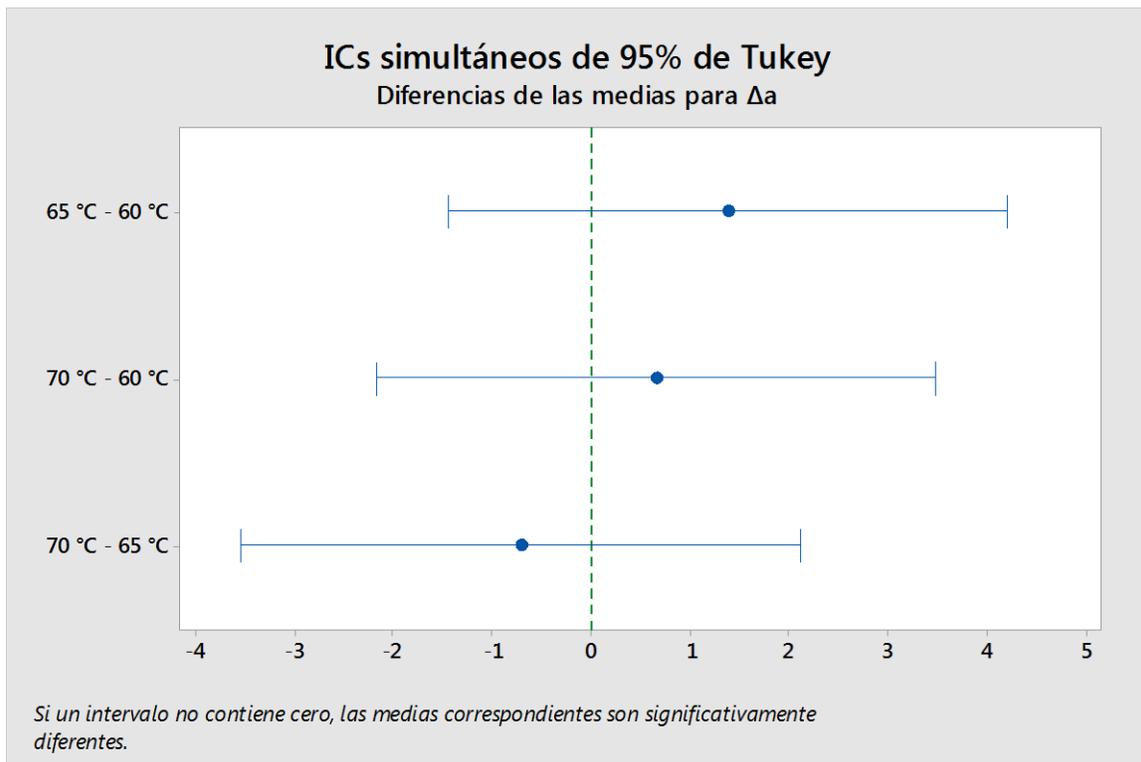
Desv.Est. agrupada = 2,94301

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Temperatura	N	Media	Agrupación
65 °C	13	2,534	A
70 °C	13	1,810	A
60 °C	13	1,158	A

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: Δb vs. Temperatura

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Temperatura	3	60 °C; 65 °C; 70 °C

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	2	574,0	287,00	4,79	0,014
Error	36	2158,9	59,97		
Total	38	2732,9			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,74405	21,00%	16,61%	7,29%

Medias:

Temperatura	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	13,03	9,07	(8,68; 17,39)

65 °C	13	22,15	5,63	(17,80; 26,51)
70 °C	13	19,55	8,13	(15,19; 23,90)

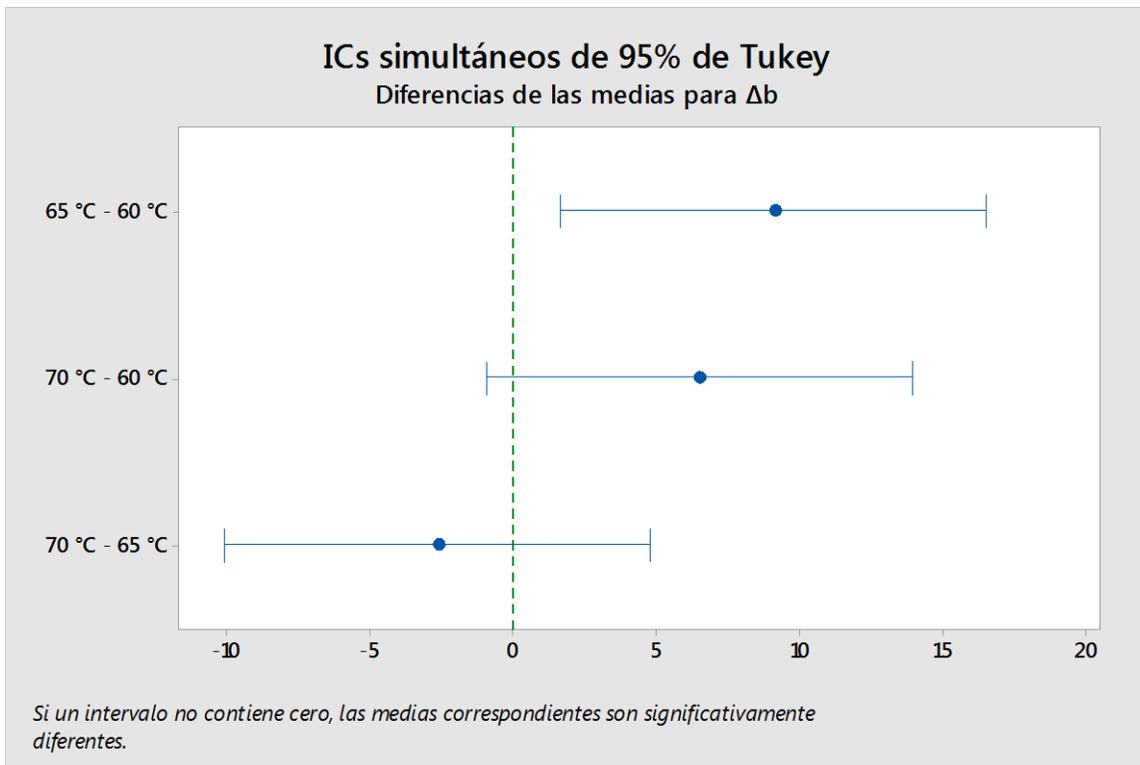
Desv.Est. agrupada = 7,74405

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95% :

Temperatura	N	Media	Agrupación	
65 °C	13	22,15	A	
70 °C	13	19,55	A	B
60 °C	13	13,03		B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANOVA de un solo factor: ΔE vs. Temperatura

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales
Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Temperatura	3	60 °C; 65 °C; 70 °C

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura	2	440,2	220,09	4,24	0,022
Error	36	1869,3	51,93		
Total	38	2309,5			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
7,20595	19,06%	14,56%	5,01%

Medias:

Temperatura	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60 °C	13	14,66	8,10	(10,60; 18,71)
65 °C	13	22,64	5,71	(18,59; 26,70)
70 °C	13	20,36	7,59	(16,31; 24,41)

Desv.Est. agrupada = 7,20595

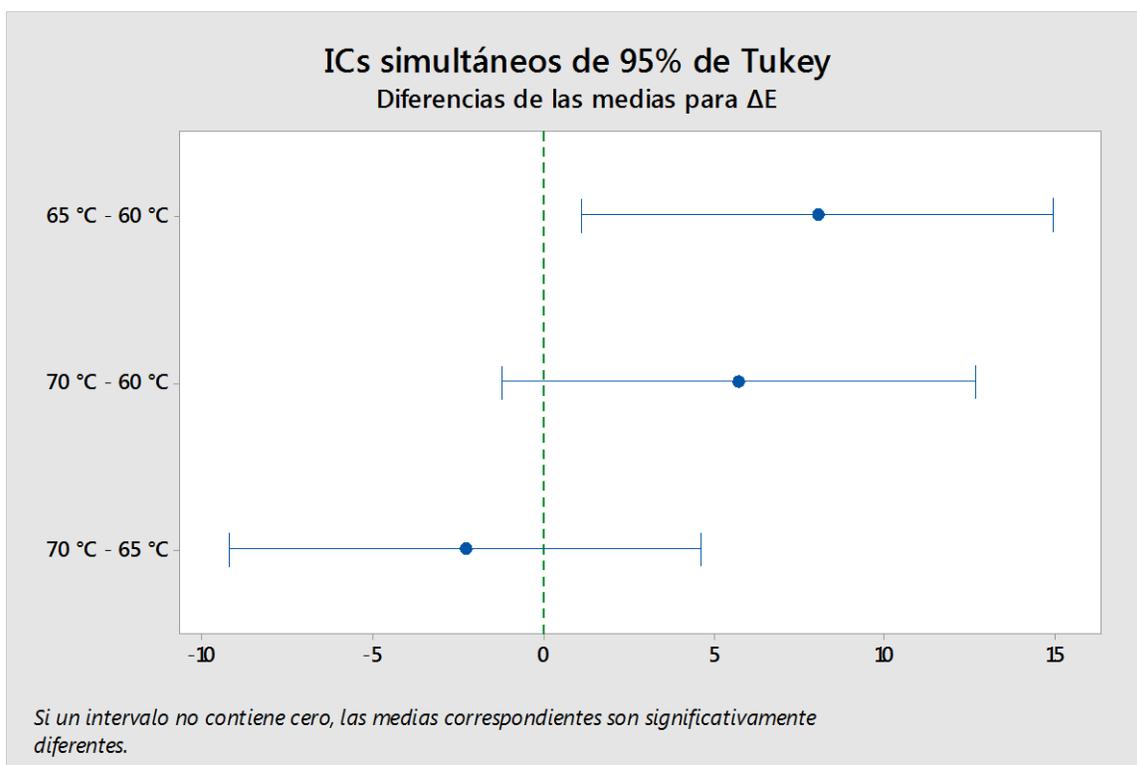
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Temperatura	N	Media	Agrupación
65 °C	13	22,64	A

70 °C	13	20,36	A	B
60 °C	13	14,66		B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANEXO 3. POLIFENOLES TOTALES

ANOVA de un solo factor: mg AG/100 g muestra vs. Muestra

Método:

Hipótesis nula	Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna	No todas las medias son iguales

Nivel de significancia	$\alpha = 0,05$
------------------------	-----------------

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor:

Factor	Niveles	Valores
Muestra	4	60°C; 65°C; 70°C; fresca

Análisis de Varianza:

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Muestra	3	22881,8	7627,28	77,80	0,000
Error	8	784,3	98,04		
Total	11	23666,2			

Resumen del modelo:

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
9,90142	96,69%	95,44%	92,54%

Medias:

Muestra	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
60°C	3	119,14	4,87	(105,96; 132,32)
65°C	3	176,77	16,62	(163,59; 189,95)
70°C	3	166,13	7,69	(152,95; 179,31)

fresca	3	66,48	5,74	(53,30; 79,66)
--------	---	-------	------	----------------

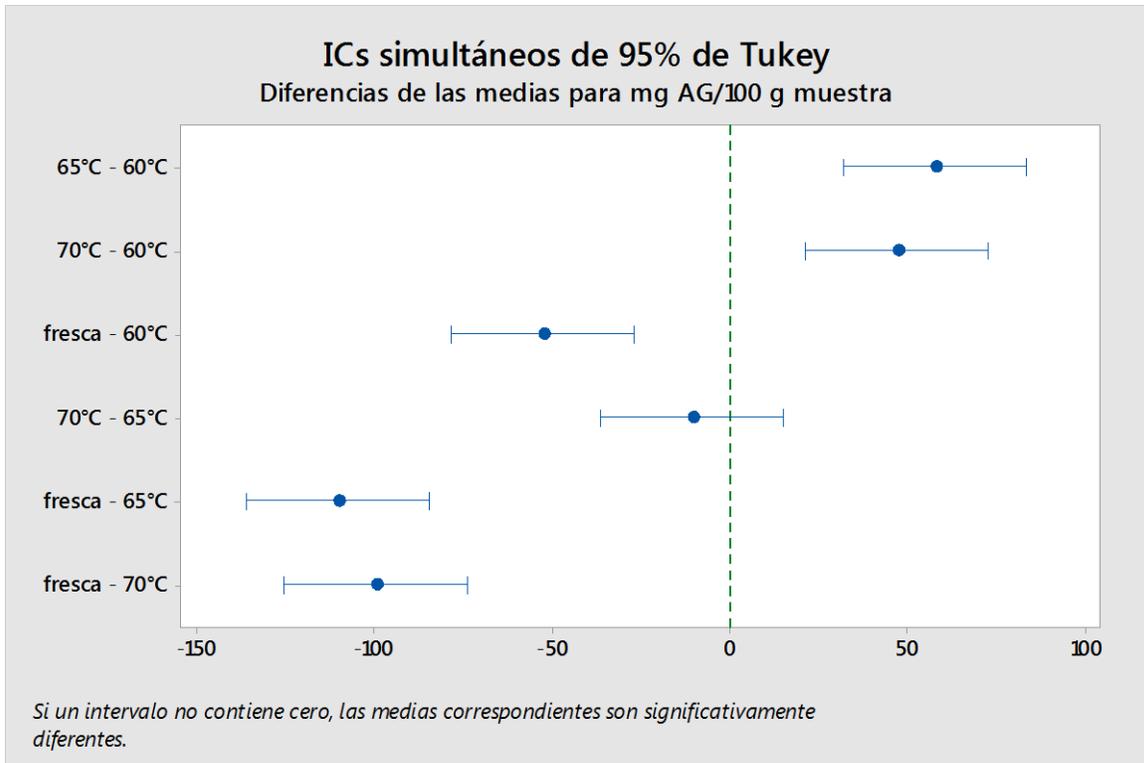
Desv.Est. agrupada = 9,90142

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%:

Muestra	N	Media	Agrupación		
65°C	3	176,77	A		
70°C	3	166,13	A		
60°C	3	119,14		B	
fresca	3	66,48			C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



ANEXO 4. Curva patrón de ácido gálico para la determinación de polifenoles totales.

