



Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas  
Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

**Profesor Patrocinante**

Luis Puente Díaz  
Ingeniero en Alimentos  
Doctor en Tecnología de Alimentos

**Directores de Memoria**

Eduardo Castro Montero  
Ingeniero Civil Químico  
Magíster en Ciencias de los Alimentos

Jaime Ortiz Viedma  
Ingeniero en Alimentos  
Magíster en Ciencias de los Alimentos

**APLICACION DE UN PROCESO DE SECADO ASISTIDO  
INFRARROJO PARA LA DESHIDRATACION DEL  
FRUTO DE MURTILLA (*Ugni molinae* Turcz.)  
MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO EN ALIMENTOS**

**JOSE LUIS ESPINOZA SAAVEDRA  
SANTIAGO, CHILE  
2011**

*Nunca consideres el estudio como una obligación,  
sino como una oportunidad para penetrar en el  
bello y maravilloso mundo del saber.*

***Albert Einstein***

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco enormemente a todos quienes estuvieron junto a mí durante este importante período de mi vida y me ayudaron a alcanzar mis metas y objetivos.

A los profesores Eduardo Castro, Luis Puente y Jaime Ortiz quienes me ayudaron y guiaron durante el desarrollo de esta memoria con excelente disposición.

A los señores Carlos Zamora, Manuel Fonseca y Eduardo Ibáñez por su cordialidad y compromiso diario con los estudiantes.

A todos los docentes que me entregaron sus conocimientos y consejos para desarrollarme como profesional y como persona.

A toda la comunidad universitaria de esta gran casa de estudios.

A mis compañeros y amigos quienes me apoyaron y estuvieron siempre conmigo.

Finalmente agradezco a mi familia y seres queridos por su incondicional apoyo, amor y compañía.

## INDICE DE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	ii
INDICE GENERAL.....	iii
INDICE DE TABLAS .....	v
INDICE DE FIGURAS.....	vi
INDICE DE ANEXOS .....	vii
NOMENCLATURA.....	viii
RESUMEN.....	ix
SUMMARY.....	x
<b>1. INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>3</b>
2.1 Definición de secado.....	3
2.2 Secado de alimentos.....	5
2.3 Infrarrojo (IR).....	6
2.3.1 Aplicaciones del infrarrojo.....	10
2.3.2. Secado asistido infrarrojo.....	11
2.4 Murtilla .....	13
<b>3. HIPOTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
3.1 Hipótesis.....	15
3.2 Objetivos.....	15
3.2.1 Objetivo General.....	15
3.2.2 Objetivos Específicos.....	15

<b>4. MATERIALES Y METODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1 Materia Prima.....	16
4.1.1 Murtilla.....	16
4.2 Métodos.....	16
4.2.1 Humedad.....	16
4.2.2 Color.....	16
4.2.3 Polifenoles totales.....	18
4.2.4 Plan de trabajo.....	19
4.2.5 Curvas de secado y modelamiento matemático.....	23
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>27</b>
5.1 Humedad inicial del fruto.....	27
5.2 Curvas y tiempos de secado.....	27
5.3 Ajuste de modelos teóricos de secado.....	28
5.4 Constantes cinéticas de modelos.....	30
5.5 Difusividad Efectiva y Energía de Activación.....	31
5.6 Color.....	33
5.7 Polifenoles totales.....	37
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>7. REFERENCIAS.....</b>	<b>42</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>50</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Tratamientos de secado aplicados en la deshidratación del fruto de murtilla.....	22
Tabla 4.2: Modelos matemáticos de secado utilizados para estimar la cinética de deshidratación del fruto de murtilla.....	24
Tabla 5.1: Ajuste de modelos matemáticos para el secado asistido infrarrojo de murtilla.....	29
Tabla 5.2: Constantes cinéticas obtenidas para cada modelo matemático y tratamiento de secado.....	31
Tabla 5.3: Difusividad efectiva obtenida para cada tratamiento de secado.....	32
Tabla 5.4: Resultados de color para muestras frescas y deshidratadas del fruto de murtilla.....	34
Tabla 5.5: Variación de $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ entre muestras frescas y deshidratadas y variación total de color ( $\Delta E$ ) .....	36
Tabla 5.6 : Contenido de polifenoles totales expresado en gramos de ácido gálico en 100 g de producto seco.....	38
Tabla 8.1: Constantes obtenidas para el modelo de Newton y parámetros estadísticos.....	53
Tabla 8.2: Constantes obtenidas para el modelo de Henderson-Pabis y parámetros estadísticos.....	53
Tabla 8.3: Constantes obtenidas para el modelo logarítmico y parámetros estadísticos.....	54
Tabla 8.4: Constantes obtenidas para el modelo de Wang and Singh y parámetros estadísticos.....	55
Tabla 8.5: Constantes obtenidas para el modelo de Thompson y parámetros estadísticos.....	55
Tabla 8.6: Constantes obtenidas para el modelo de Page Modificado y parámetros estadísticos.....	56

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor.....	4
Figura 2.2: Espectro de ondas electromagnéticas.....	6
Figura 2.3: Representación conceptual de la extinción de la radiación.....	8
Figura 2.4: Representación conceptual del secado asistido infrarrojo convectivo.....	12
Figura 2.5: Planta y fruto de murtilla .....	14
Figura 4.1: Diagrama de bloques para el secado asistido del fruto de murtilla.....	20
Figura 4.2: Esquema del secador infrarrojo utilizado en la deshidratación del fruto de murtilla.....	22
Figura 4.3: Fotografía del secador infrarrojo ubicado en el Laboratorio de Procesos de Alimentos Universidad de Chile.....	23
Figura 5.1: MR promedios v/s tiempo para cada tratamiento de secado.....	28
Figura 5.2: Variación de la Difusividad efectiva con la temperatura.....	33
Figura 5.3: Gráfico de barras para parámetros $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ de cada tratamiento de secado.....	35
Figura 5.4: Variación total de color $\Delta E$ de cada tratamiento de secado.....	35
Figura 8.1: Pérdida de humedad de murtilla a 40 ° C y 0 W IR.....	50
Figura 8.2: Pérdida de humedad de murtilla a 40 ° C y 400 W IR.....	50
Figura 8.3: Pérdida de humedad de murtilla a 40 ° C y 800 W IR.....	50
Figura 8.4: Pérdida de humedad de murtilla a 50 ° C y 0 W IR.....	51
Figura 8.5: Pérdida de humedad de murtilla a 50 ° C y 400 W IR.....	51
Figura 8.6: Pérdida de humedad de murtilla a 50 ° C y 800 W IR.....	51
Figura 8.7: Pérdida de humedad de murtilla a 60 ° C y 0 W de IR.....	52
Figura 8.8: Pérdida de humedad de murtilla a 60 ° C y 400 W IR.....	52
Figura 8.9: Pérdida de humedad de murtilla a 60 ° C y 800 W IR.....	52

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Curvas de secado obtenidas para cada tratamiento de secado del fruto de murtila.....	50
<b>Anexo 2:</b> Estadísticos y constantes cinéticas para modelos matemáticos.....	52
<b>Anexo 3:</b> Resultados del análisis ANOVA para parámetros $R^2$ , $X^2$ , RMSE y SSE.....	57
<b>Anexo 4:</b> Resultados del Análisis ANOVA para parámetros de color $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ .....	65
<b>Anexo 5:</b> Resultados del Análisis ANOVA para la variación de los parámetros $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ y para el cambio total de color $\Delta E$ .....	71
<b>Anexo 6:</b> Resultados del Análisis ANOVA para polifenoles totales .....	79
<b>Anexo 7:</b> Curva de calibración polifenoles totales expresados en equivalentes a ácido gálico.....	81
<b>Anexo 8:</b> Colorímetro utilizado para determinar parámetros $L^*$ , $a^*$ y $b^*$ e imágenes obtenidas para el fruto de murtila estado fresco y deshidratado.....	82



## NOMENCLATURA

<b>IR:</b> Infrarrojo	<b>L'</b> : Luminosidad muestra deshidratada
<b>MR:</b> Moisture Ratio (-)	<b>L<sub>0</sub></b> : Luminosidad muestra fresca
<b>M<sub>t</sub></b> : Humedad al tiempo t (g agua/ g sólido seco)	<b>a'</b> : Parámetro de color verde-rojo muestra deshidratada
<b>M<sub>0</sub></b> : Humedad inicial (g agua/ g sólido seco)	<b>a<sub>0</sub></b> : Parámetro de color verde-rojo muestra fresca
<b>M<sub>e</sub></b> : Humedad de equilibrio (g agua/ g sólido seco)	<b>b'</b> : Parámetro de color azul- amarillo muestra deshidratada
<b>m</b> : Contenido de humedad	<b>b<sub>0</sub></b> : Parámetro de color azul- amarillo muestra fresca
<b>t</b> : Tiempo (min, seg.)	<b>ΔL</b> : Variación de L*
<b>T</b> : Temperatura (°C, K)	<b>Δa</b> : Variación de a*
<b>P</b> : Potencia (W)	<b>Δb</b> : Variación de b*
<b>E<sub>a</sub></b> : Energía de activación (kJ/mol)	<b>ΔE</b> : Variación total de color
<b>D<sub>eff</sub></b> : Difusividad efectiva (m/s <sup>2</sup> )	<b>ρ</b> : Reflexión
<b>D<sub>0</sub></b> : Factor pre exponencial de Arrhenius.	<b>α</b> : Absorción
<b>r</b> : Radio (m)	<b>τ</b> : Transmisión
<b>R</b> : Constante de los gases (8,314 kJ/mol·K <sup>-1</sup> )	<b>ε</b> : Emisividad
<b>k</b> : Constante cinética (min <sup>-1</sup> )	<b>RMSE</b> : Raíz media de los errores cuadrados
<b>a,b,c</b> : Parámetros cinéticos modelos	<b>SSE</b> : Suma de los errores cuadrados
<b>N</b> : Número de observaciones	<b>X<sup>2</sup></b> : Coeficiente Chi cuadrado
<b>z</b> : Número de constantes cinéticas	<b>R<sup>2</sup></b> : Coeficiente de determinación múltiple
<b>L*</b> : Luminosidad	<b>x, y, z</b> : Coordenadas espaciales
<b>a*</b> : Parámetro de color verde-rojo	
<b>b*</b> : Parámetro de color azul- amarillo	

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue estudiar el proceso de secado asistido infrarrojo del fruto de la murtila (*Ugni Molinae* Turcz.) mediante la determinación de los tiempos de secado, constantes cinéticas, modelos matemáticos de secado, difusividad efectiva y energía de activación. Se utilizó el secador infrarrojo-convectivo del Laboratorio de Procesos de Alimentos y se trabajó con una velocidad de aire igual a 1 m/s, con tres temperaturas de secado (40, 50 y 60 °C) y tres potencias de infrarrojo (0, 400 y 800 W), generándose nueve tratamientos de secado diferentes. Mediante el registro de la pérdida de peso del fruto de murtila en el tiempo, se construyeron las curvas de secado para cada experiencia. La humedad final del producto se estableció en un 10 % (base húmeda). Se midió el color y la presencia de polifenoles totales en las muestras frescas y en las muestras deshidratadas del fruto de la murtila y se determinó si el tratamiento aplicado en cada caso afectaba en forma significativa a estos parámetros.

Los resultados obtenidos indican que al aumentar las temperaturas y potencias de infrarrojo, disminuyen los tiempos de secado (hasta en un 85%), aumenta el valor de las constantes cinéticas de los modelos y aumenta la difusividad efectiva. La energía de activación del proceso fue de 12,56 kJ/mol. El modelo logarítmico fue el modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales de deshidratación del fruto de murtila.

Por otra parte, no existieron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre los tratamientos de secado aplicados para los parámetros de color  $\Delta L$  y  $\Delta b$ , pero sí para  $\Delta a$  y el cambio total de color ( $\Delta E$ ). La cantidad de polifenoles totales disminuyó en forma significativa ( $p < 0,05$ ) al aplicar los tratamientos de secado en el fruto de murtila. Sin embargo la utilización de infrarrojo durante el proceso de secado permitió mantener mayor cantidad de estos compuestos.

## SUMMARY

### ***“Application of infrared-assisted drying for murtilla fruit dehydration”***

The aim of this research was to study the process of infrared-assisted drying of murtilla fruit (*Ugni Molinae* Turcz.) by determining the drying times, kinetic constants, mathematical models, effective diffusivity and activation energy. The infrared-convective dryer of the Food Process Laboratory was used, which worked with an air velocity equal to 1 m/s, with three drying temperatures (40, 50 and 60 °C) and three infrared powers (0, 400 and 800 W), generating nine different drying treatments. By recording the weight loss of murtilla fruit in time, curves were constructed for each drying experience. The final moisture of the product was set at 10% (wet basis). The color and the presence of polyphenols in fresh and dried samples were measured, and it was determined whether treatment applied in each case significantly affects these parameters.

The results indicate that increasing temperatures and infrared power, a reduction in drying times (up to 85%), an increase in the values of the kinetic constants of the models and an increase in the effective diffusivity are observed. The activation energy of the process was of 12,56 kJ/mol. The logarithmic model was the model that best fitted the experimental data of dehydration of murtilla fruit.

Moreover, the results indicate no significant differences ( $p > 0,05$ ) between treatments applied for drying parameters  $\Delta L$  and  $\Delta b$  color, but significant differences for  $\Delta a$  and total color change ( $\Delta E$ ) was obtained. The amount of total polyphenols decreased significantly ( $p < 0,05$ ) by applying the drying treatments on the fruit of murtilla. However, the use of infrared for drying allowed to keep more of these compounds

Keywords: *Ugni Molinae* Turcz., murtilla, drying, infrared, color, polyphenols.

## 1. INTRODUCCION

El secado es una operación que se encuentra en casi todos los sectores industriales, desde los agrícolas a los farmacéuticos. Es seguramente la operación unitaria más antigua, común, diversa e intensiva energéticamente (Kudra y Mujumdar, 2009). Sin embargo, no todas las tecnologías de secado son necesariamente óptimas en términos de consumo de energía, calidad del producto deshidratado, seguridad de operación, capacidad de controlar el secador durante posibles fallas en el proceso, o impacto medio ambiental (Kudra y Mujumdar, 2009). Debido a lo anterior, es que se han desarrollado tecnologías avanzadas de secado, tales como el suministro de calor a través de infrarrojo, que permiten, por ejemplo, disminuir los tiempos de secado (Jangam et al., 2011).

Se ha demostrado que un sistema que combine las tecnología de secado infrarrojo con la de secado convectivo, es más rápido y eficiente que el uso de infrarrojo y aire caliente por separado (Kocabiyik, 2011). La transferencia de calor y materia se lleva a cabo más eficientemente y consecuentemente los tiempos de secado disminuyen significativamente, se incrementa la eficiencia energética y el consumo de energía específica disminuye. Además, el costo energético y operativo de los sistemas de secado es menor que el del sistema de secado convectivo y se ha comprobado que existen mejoras en la calidad de los productos alimenticios y agrícolas (Kocabiyik, 2011).

En la actualidad existen trabajos que utilizan secado asistido infrarrojo para una amplia gama de alimentos. Debido a esto es que surge la necesidad de aplicar este tipo de proceso a alimentos y productos no convencionales y que sean de interés para la población. Un ejemplo de lo anterior es la murtila o murta (*Ugni molinae* Turcz.), especie arbustiva endémica de Chile

perteneciente a la familia de las Mirtáceas. (Águila y Nahuelhual, 2008) cuyo fruto presenta un color rosáceo (Muñoz, 2002), y es reconocido por su alto contenido de antioxidantes (Arancibia-Ávila et al., 2010). Aplicar el proceso de secado asistido infrarrojo a este producto constituye una alternativa para su comercialización en forma de fruto deshidratado, ya que se podría aumentar su vida útil manteniendo su calidad.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 Definición de secado

El secado usualmente se define como el proceso de remoción térmica de sustancias volátiles (humedad) hasta obtener un producto seco (Mujumdar, 2006). Es una operación unitaria en la que se da el transporte simultáneo de calor y masa (Fito et al., 2001): La transferencia de energía (principalmente como energía calórica) desde el medio circundante para evaporar la humedad de la superficie y la transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido y su evaporación posterior (Mujumdar, 2006).

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 (Mujumdar, 2006).

La transferencia de energía puede ocurrir por convección, conducción o radiación, o en algunos casos por una combinación de ellos (Mujumdar, 2006). A continuación se explica brevemente cada mecanismo:

**-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 (Fito et al., 2001) (Figura 2.1 A).

**-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 (Fito et al., 2001) (Figura 2.1 B).

**-Radiación:** Es la denominación que se da a la transmisión de la energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. 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 (Mujumdar, 2006) (Figura 2.1 C).

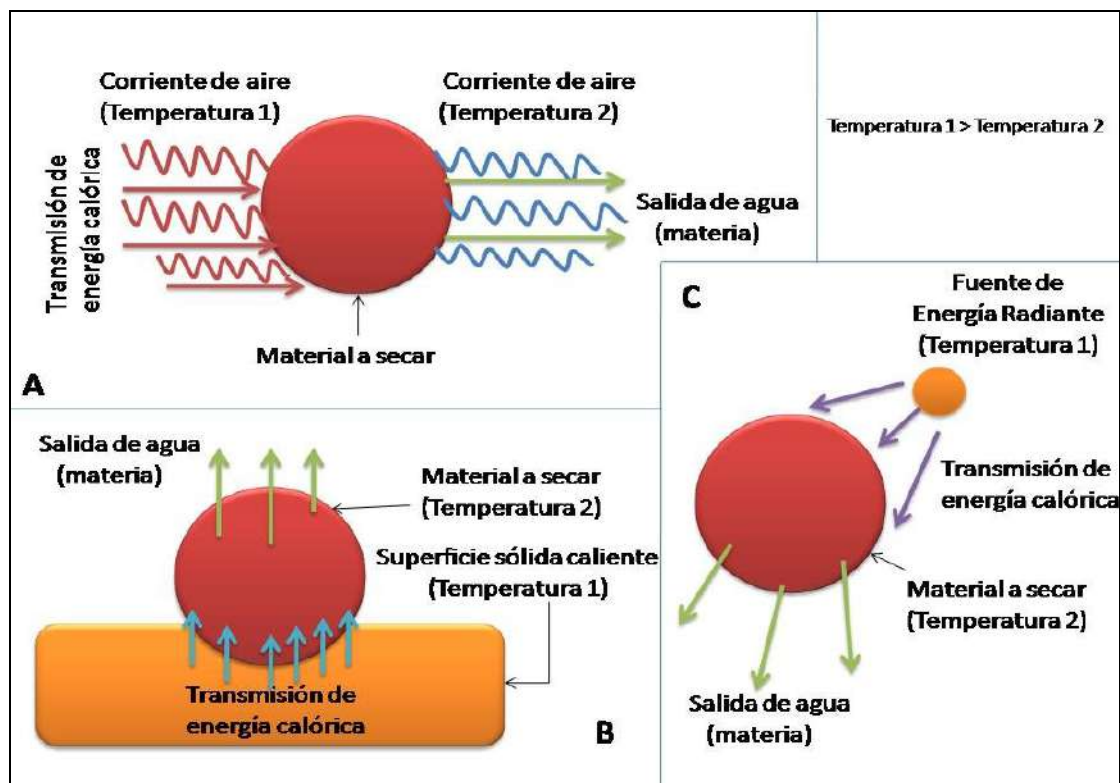


Figura 2.1: Representación conceptual de los mecanismos de transferencia de calor: **A.** Convección; **B.** Conducción; **C.** Radiación.

## 2.2 Secado de alimentos

Todas las variedades de alimentos necesitan, de alguna forma, ser conservadas principalmente para reducir o detener deterioros, para mantenerlos disponibles durante un período determinado de tiempo, para mantener propiedades nutricionales por el mayor tiempo posible o para obtener productos con valor agregado. Entre estas causas, el deterioro es la razón principal para el empleo de técnicas de preservación o conservación (Jangam et al., 2010).

El secado es una de las técnicas más antiguamente utilizada para la conservación de alimentos. El secado al sol de frutas, granos, vegetales, carnes y pescados ha sido ampliamente utilizado desde los albores de la humanidad proporcionando al hombre una posibilidad de subsistencia en épocas de carencia (Fito et al., 2001). Es uno de los procesos más rentables para conservar productos alimenticios, el cual se basa en la remoción de agua mediante la aplicación de calor (Jangam et al., 2010). La operación de secado además conlleva una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costes de transportes y almacenamiento de estos productos (Fito et al., 2001).

La operación de secado involucra una serie de cambios físicos, químicos y sensoriales en el alimento que dependen de la composición de éste así como de la severidad del método de secado. Ejemplos de estos cambios son encogimiento, cristalización, despolimerización, variación de color, sabor, textura, viscosidad, velocidad de reconstitución, valor nutritivo y estabilidad en el almacenamiento.



Estos factores relacionados con la calidad del producto deben ser analizados cuando se va a diseñar una operación de deshidratación de alimentos, para así provocar un mínimo daño al alimento, sin olvidarse de otros aspectos más tecnológicos relacionados con la eficacia y el coste del proceso (Contreras, 2006).

En el sector alimenticio es necesario mantener la calidad del producto durante el secado además de reducir el costo del proceso. Debido a esto es necesario desarrollar técnicas de secado innovadoras y rentables en este rubro (Jangam et al., 2010).

### 2.3 Infrarrojo (IR)

El infrarrojo es un tipo de radiación electromagnética cuya longitud de onda es más larga que la de la luz visible pero más corta que la de las microondas (Jun et al., 2011) (Figura 2.2). La radiación infrarroja puede ser clasificada en tres regiones llamadas cercana o near (NIR), media o mid (MIR) y lejana o far (FIR), cuyas longitudes de ondas se encuentran entre 0,75 a 1,4; 1,4 a 3 y 3 a 1000  $\mu\text{m}$  respectivamente (Krishnamurthy et al., 2008).

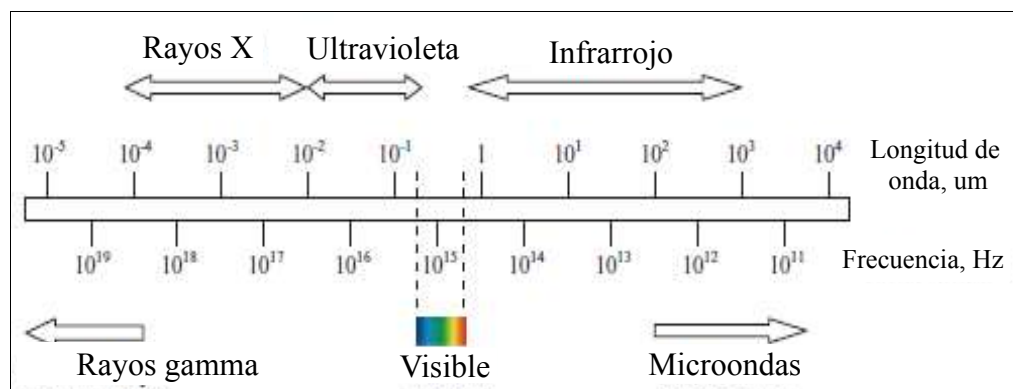


Figura 2.2: Espectro de ondas electromagnéticas.

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 es dependiente de un número de factores como la temperatura del emisor y la emisividad de la lámpara. El fenómeno de la radiación se vuelve más complejo debido a que la radiación que incide en una superficie, no sólo tiene una dependencia espectral, sino que también una dependencia direccional. La longitud de onda a la cual la máxima radiación ocurre es determinada por la temperatura del emisor (Jun et al., 2011).

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. Todos los cuerpos emiten radiación debido a su nivel de temperatura, lo cual se conoce como “radiación térmica” debido a que se genera 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) (Figura 2.3). La suma de estos mecanismos se conoce como pérdida o extinción de la radiación (Sandu, 1986) y se representa por el siguiente balance:

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

Dónde  $\rho$  es la reflexión,  $\alpha$  es la absorción y  $\tau$  es la transmisión

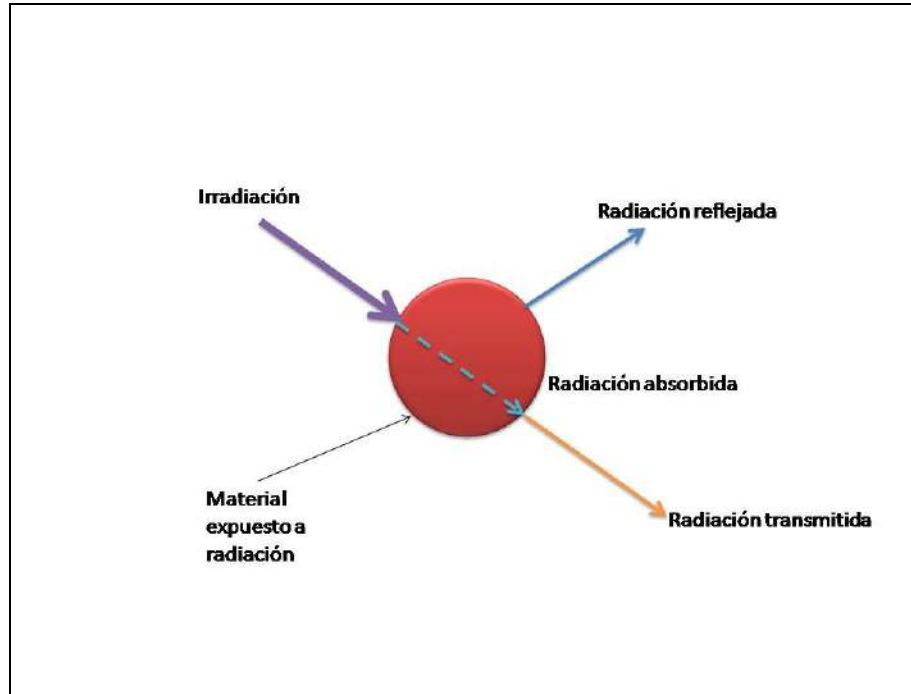


Figura 2.3: Representación conceptual de la extinción de la radiación (absorción, transmisión y reflexión)

Los materiales pueden ser clasificados en base a su transmisión, dependiendo del estado físico del cuerpo donde la radiación incide. Un cuerpo que no permite que la radiación se transmita a través de él se llama “opaco” y su transmisión ( $\tau$ ) es igual a cero. Ejemplos de esto son la mayoría de los sólidos. Por otra parte, líquidos y algunos sólidos como rocas de sal o vidrio se consideran como “transparentes” a la radiación. Generalmente los sólidos absorben toda la radiación en una capa muy delgada cercana a la superficie. Esta es una consideración muy importante en el modelamiento de la transferencia de calor. Un cuerpo ideal que absorbe toda la energía incidente sin reflejarla o transmitirla, se llama “cuerpo negro” en dónde  $\alpha = 1$  (Ratti y Mujumdar, 2006).

Si se considera que la transmisión es infinitesimal, entonces el material reflejará o absorberá la radiación infrarroja dependiendo de la naturaleza de la

radiación y de las características de la superficie del material. Esto se conoce como emisividad ( $\epsilon$ ) y varía entre 1 y 0. Los cuerpos negros absorben toda la radiación que incide sobre ellos y por lo tanto su emisividad es igual a uno, en contraposición a las superficies completamente reflectivas ( $\epsilon = 0$ ) (Jun et al., 2011).

Con respecto a los alimentos, se sabe que éstos son complejas mezclas de diferentes macromoléculas bioquímicas, polímeros biológicos, sales inorgánicas y agua. Cuando la radiación electromagnética incide en la superficie de un alimento, puede provocar cambios en los estados electrónicos, vibracionales y rotacionales de átomos y moléculas. El nivel de absorción a diferentes longitudes de onda varía dependiendo de los componentes del alimento (Pan y Atungulu, 2011). El tipo de mecanismo de absorción de energía determinado por el rango de longitudes de onda de la energía radiante, puede ser categorizada en:

1. Cambios en el estado electrónico, cuando la longitud de onda varía de 0,2 a 0,7  $\mu\text{m}$  (ultravioleta y rango visible)
2. Cambios en el estado vibracional, cuando la longitud de onda varía de 2,5 a 1000  $\mu\text{m}$  (radiación infrarroja lejana o FIR)
3. Cambios en el estado rotacional, cuando la longitud de onda es mayor a 1000  $\mu\text{m}$  (Pan y Atungulu, 2011).

En general, los alimentos absorben radiación infrarroja lejana (FIR) más eficientemente a través de los mecanismos de cambio en el estado vibracional de las moléculas, lo que puede llevar a calentamiento por radiación. El agua y los compuestos orgánicos como proteínas y almidones, (principales componentes de los alimentos) absorben la energía FIR a longitudes de onda

mayores a 2,5  $\mu\text{m}$ . Dentro de estos componentes, el agua tiene un rol predominante en la absorción de la energía radiante en todas las longitudes de onda. (Krishnamurthy et al., 2008). Los enlaces O-H en el agua absorben la energía infrarroja y comienzan a rotar con la misma frecuencia que la radiación incidente. La transformación de la radiación infrarroja en energía rotacional causa la evaporación del agua (Pan y Atungulu, 2011).

### **2.3.1 Aplicaciones del infrarrojo (IR)**

La energía infrarroja (IR) es la fuente de energía más antigua utilizada para el secado, al considerar la energía radiante del sol utilizada con este fin (Erdođdu, et al., 2011). El secado por radiación artificial involucra el uso de generadores de radiación IR, como lámpara eléctricas o paneles de metal o cerámica calentados por electricidad o gas. La principal característica que distingue al secado IR por sobre el resto de los procesos de secado, es que no necesita un medio para la transmisión de la energía desde la fuente emisora al producto a secar; ya que es el propio producto el que absorbe la radiación IR (Nindo y Mwithiga, 2011).

Actualmente la radiación infrarroja es ampliamente usada en la industria para el secado de superficies o deshidratación de láminas delgadas como textiles, papel, films, pinturas y esmaltes (Ratti y Mujumdar, 2006). A pesar de que el secado infrarrojo de materiales porosos de gran espesor no ha sido desarrollado totalmente, numerosos estudios indican que esta tecnología puede ser aplicada en la deshidratación de alimentos (Ratti y Mujumdar, 2006).

Se espera que la aplicación de infrarrojo en la industria alimentaria, represente un nuevo proceso para la elaboración de productos deshidratados de alta calidad a bajos precios (Krishnamurthy et al., 2008). Algunas de las ventajas que tiene esta tecnología son la reducción del tiempo de secado,

aumento de la eficiencia energética, temperatura homogénea en el producto mientras se seca, productos terminados de mejor calidad, alto control del proceso, ahorro en espacio y menor impacto medio ambiental (Krishnamurthy et al., 2008).

Otras aplicaciones de la radiación IR en la industria alimentaria son la inactivación de enzimas tales como las lipooxigenasas, lipasas y  $\alpha$ -amilasas (Krishnamurthy et al., 2008); la inactivación de patógenos, ya que se altera componentes esenciales de microorganismos tales como su ADN y su ARN (Erdoğdu, et al., 2011); pausterización de productos envasados; cocción y horneado de pan; tostado de café, descongelación de productos tales como sushi y tunas; pelado tomates y papas y blanqueado de frutillas, zanahorias, entre otras (Erdoğdu, et al., 2011).

### **2.3.2 Secado asistido infrarrojo**

La aplicación combinada de radiación electromagnética y calentamiento convencional convectivo, es considerada más eficiente que la aplicación de ambas técnicas por separado (Pan y Atungulu, 2011). Autores como Azfal et al., (1999) demostraron que se pueden lograr importantes ahorros de energía aplicando un secado asistido infrarrojo. Este aspecto es de suma importancia para la industria alimentaria ya que se pueden reducir costos, tiempos de secado y temperaturas de operación (Krishnamurthy et al., 2008).

La Figura 2.4 muestra la representación conceptual del mecanismo del secado asistido infrarrojo:

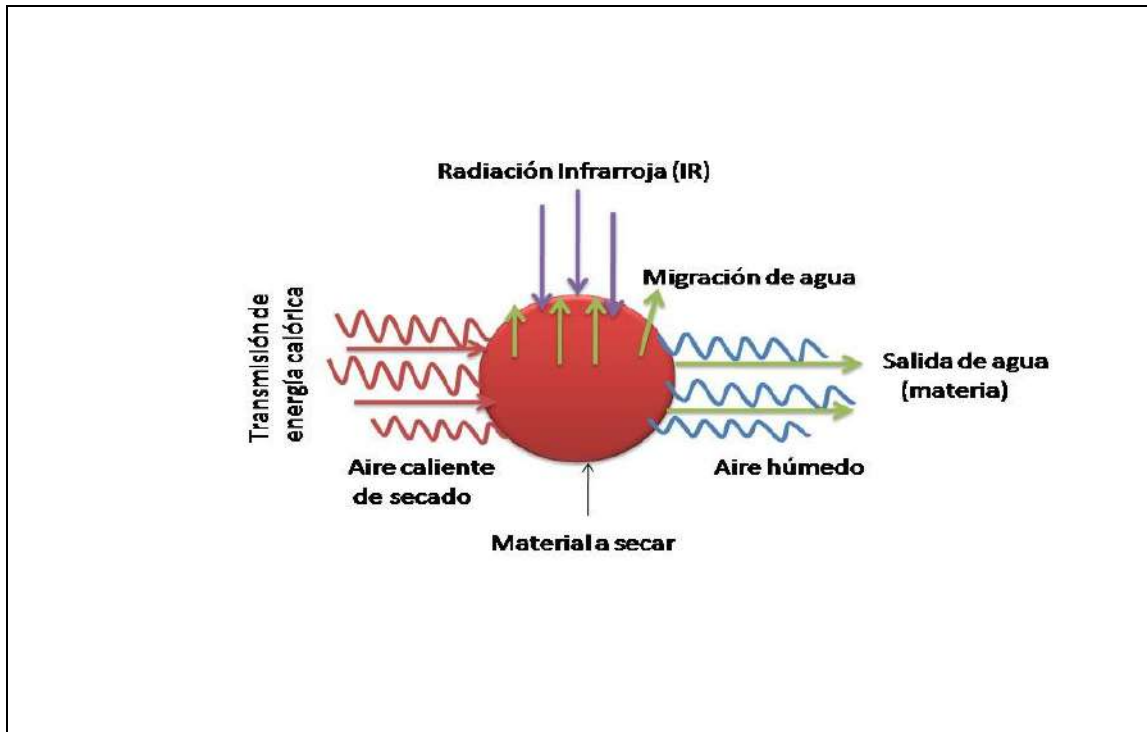


Figura 2.4: Representación conceptual del secado asistido infrarrojo

Cuando el material es expuesto a radiación infrarroja, se afecta la superficie del material y la radiación penetra. El aumento en la vibración molecular debida a la absorción de radiación genera calor en el material tanto en la superficie como en las capas internas en forma simultánea. El rápido calentamiento del material, aumenta la tasa de movimiento de humedad hacia la superficie. El flujo de aire convectivo remueve la humedad de la superficie y disminuye su temperatura, lo que resulta en una transferencia de calor mayor (Hebbar et al., 2004).

Respecto a la calidad final de los productos obtenidos, existen evidencias que demuestran que parámetros como color, textura y composición química en alimentos no sufren modificaciones significativas durante el secado asistido infrarrojo. Tuncel et al. (2010) demostraron que la radiación infrarroja aplicada en el secado asistido de maíz, no tuvo ningún impacto negativo en el contenido

total de carotenoides, color o presencia de ácido fenólicos. Por otra parte Boudhrioua et al. (2008) obtuvieron resultados que indican una conservación y/o mejora en el color verde de hojas de oliva deshidratadas con esta técnica, además de la preservación y/o aumento de compuestos antioxidantes. Shi et al. (2008) concluyeron que aplicando un secado infrarrojo se obtenían arándanos mucho más firmes en comparación a los obtenidos con un secado convencional por aire.

Autores como Hebbar (2004), demuestran que aplicando un secado asistido infrarrojo se obtienen mayores tasas de transferencia de materia, reducción de los tiempos de secado en forma drástica (48%) y menor consumo de energía (63%) en comparación al secado convencional. Kumar et al. (2005) aplicaron el secado asistido en rodajas de cebollas, y demuestran que si bien, existe una variación considerable en el color y porcentaje de ácido pirúvico en el producto deshidratado, estas variaciones son aún mayores en el secado convencional por aire caliente.

## **2.4 Murtilla**

La murta o murtilla (*Ugni molinae* Turcz.) es una especie arbustiva endémica de Chile, perteneciente a la familia de las Mirtáceas. (Figura 2.5 A) Posee hojas persistentes adaptadas a climas templados con inviernos moderados a fríos y no presenta un crecimiento visible durante el período invernal. Una vez que pasa el invierno las plantas reasumen el crecimiento generando brotación de yemas y crecimiento de nuevos brotes (San Martín et al., 2009).

El fruto de la murtilla (Figura 2.5 B) es una baya de color rojizo, de sabor dulce y aromático. Presenta un diámetro polar promedio de entre 8 - 9 mm y un diámetro ecuatorial promedio de 10 mm (Muñoz, 2002).



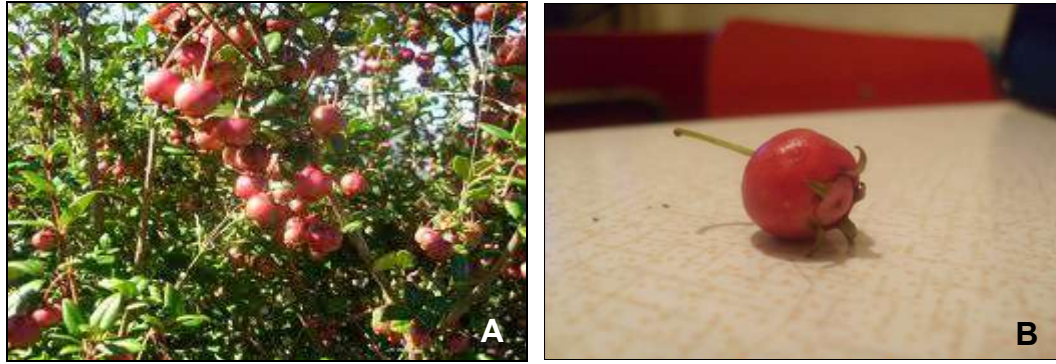


Figura 2.5: A. Planta de murtillo. B. Fruto de murtillo

Es utilizado en la fabricación casera de mermeladas, jarabes, compotas para postres y licores; siendo en la actualidad comercializada en pequeña escala, para el consumo local, efectuándose las cosechas entre los meses de marzo y mayo, la época de madurez (Muñoz, 2002).

En la actualidad, la recolección silvestre de esta especie sigue siendo fundamental para sustentar mercados locales, sin embargo, la consolidación del mercado nacional y sobretodo internacional, requiere cambiar la visión de la murtillo como un producto forestal no maderable a una alternativa de cultivo frutícola (Águila y Nahuelhual, 2008).

Estudios actuales demuestran que la murtillo es una especie que ha sido utilizada para tratar diversas enfermedades, debido a sus propiedades anti-inflamatorias, analgésicas, anti-microbianas, contra el daño oxidativo, entre otras (Rubilar et al., 2011). Junto con otros berries originarios de América del Sur, se caracteriza por tener una rica y variada composición de compuestos bioactivos, con propiedades saludables para el organismo humano (Arancibia-Ávila, et al., 2011). La presencia de compuestos polifenólicos presentes en estos tipo de productos, hacen que puedan ser considerados como una nueva fuente de antioxidantes (Arancibia-Ávila, et al., 2011).

### **3. HIPOTESIS Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Hipótesis**

Es posible utilizar el secado asistido infrarrojo en la deshidratación de alimentos como la murtilla, y conocer las cinéticas de secado y las características finales del producto obtenido.

#### **3.2 Objetivos**

##### **3.2.1 Objetivo General**

- Conocer el comportamiento del fruto de la murtilla durante la aplicación de secado asistido infrarrojo

##### **3.2.2 Objetivos Específicos**

- Obtener las curvas, cinéticas y constantes de secado para el proceso de deshidratación del fruto de murtilla, utilizando 3 temperaturas de secado y 3 potencias de infrarrojo.
- Determinar el modelo matemático que mejor describa la cinética de deshidratación del fruto de murtilla.
- Determinar si existe variación en el contenido de polifenoles totales y color del fruto antes y después del proceso de secado.

## **4. MATERIALES Y METODOS**

### **4.1 Materia Prima**

#### **4.1.1 Murtilla.**

Para el desarrollo de esta memoria se trabajó con el fruto de la murtilla (*Ugni molinae* Turcz.) proveniente de la ciudad de Valdivia. Una vez recepcionada, se procedió a registrar el peso total de la materia prima y se conservó refrigerada a 4 ° C, para su posterior utilización.

### **4.2 Métodos.**

#### **4.2.1 Humedad**

Para la determinación de la humedad del fruto fresco de la murtilla, se utilizó el método termogravimétrico descrito por la A.O.A.C (1995). Este método se basa en el secado de la muestra a 105 ° C y presión atmosférica hasta obtener un peso constante. Para el secado de la muestra se utilizó una estufa de laboratorio (TU 6200, Heraeus D 63450 Hanau, Germany), mientras que la pérdida de peso se determinó utilizando una balanza analítica de laboratorio. (ADAM AFA-120LC). La determinación de humedad se realizó por triplicado, y se determinó antes de cada tratamiento de secado.

#### **4.2.2 Color**

Se determinó el color del fruto de la murtilla en estado fresco y una vez terminado cada tratamiento 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.

Para determinar el valor de estos parámetros se utilizó un colorímetro de laboratorio construido para muestras de alimentos (Anexo 9). Este equipo consta de 2 luces fluorescentes ubicadas a 45 ° del lente de la cámara presente en el equipo para la captura de imágenes; una cámara digital Canon Powershot A75, conectada a un ordenador con un software de captura remota de fotografías (Zoom Browser EX). Mediante el software Adobe Photoshop 8.01 se determinaron los componentes cromáticos y la luminosidad.

El método propuesto por Yam y Papadakis (2004) se basa en la utilización de la ventana histograma del software Adobe Photoshop para determinar la distribución del color a través de los ejes x e y. Los valores entregados para la luminosidad y los componentes cromáticos no se encuentran estandarizados, por lo que se aplican las siguientes fórmulas propuestas por los autores para estandarizarlos:

$$L^* = \left( \frac{L}{255} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$a^* = \left( \frac{240 \cdot a}{255} \right) - 120 \quad (3)$$

$$b^* = \left( \frac{240 \cdot b}{255} \right) - 120 \quad (4)$$

Además se determinó la variación de cada parámetro de color entre las muestras frescas y deshidratadas con las siguientes fórmulas:

$$\Delta L = L' - L_0 \quad (5)$$

$$\Delta b = b' - b_0 \quad (6)$$

$$\Delta a = a' - a_0 \quad (7)$$

En dónde  $L_0$ ,  $a_0$  y  $b_0$  son los valores de color para las muestras del fruto de murtila en estado fresco, mientras que  $L'$ ,  $a'$  y  $b'$  son los valores de color para las muestras deshidratadas (Shi et al., 2008). Finalmente se calculó la variación total de color ( $\Delta E$ ) entre las muestras frescas y deshidratadas a través de la siguiente fórmula (Shi et al., 2008):

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad (8)$$

Utilizando el programa StatGraphics Plus 5.1 se estimó si la variación de color fue estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) mediante análisis ANOVA. (Anexos 4 y 5).

#### **4.2.3 Polifenoles totales.**

La cantidad de polifenoles totales presentes en el fruto de la murtila fresca y de las muestras sometidas al proceso de secado, se determinó utilizando el método del reactivo Folin-Cicoalteau (Huang et al., 2005) utilizando un espectrofotómetro de laboratorio (Unicam UV/ Vis, modelo UV3) y una curva de calibración previamente obtenida (Anexo 8).

Para la preparación de las muestras se prepararon extractos con agua y alcohol metílico en matraces de vidrio, los que se agitaron por 30 minutos para luego realizar una filtración a vacío para eliminar el sobrenadante.

Etapas del método Folin-Cicoalteau.

1. Adicionar 0,1 ml de muestra y 4,9 ml de agua en un matraz aforado de 10 ml.
2. Añadir 0,5 ml del reactivo Folin Cicoalteau y dejar reposar por 3 minutos.
3. Agregar 1,7 ml de carbonato de sodio al 20 %, mezclar y aforar la muestra a 10 ml de agua
4. Esperar 30 minutos y leer en espectrofotómetro a 765 nm contra un blanco previamente preparado. Registrar el valor de Absorbancia entregado por el equipo.
5. Determinar el contenido de polifenoles totales expresados como equivalentes de ácido gálico utilizando la curva de calibración.

Los resultados obtenidos corresponden a mg. equivalentes de ácido gálico por gramo. Con estos valores se determinó la cantidad presente de polifenoles en 100 gramos de producto seco.

Utilizando el programa StatGraphics Plus 5.1 se determinó si la variación en el contenido total de polifenoles en las muestras deshidratadas del fruto de murtila fue estadísticamente significativa ( $p < 0,05$ ) en comparación al fruto en estado fresco, realizando un análisis ANOVA (Anexo 6).

#### **4.2.4 Plan de trabajo**

El secado del fruto de la murtila (*Ugni molinae* Turcz) hasta obtener una humedad del 10% en base húmeda, se llevó a cabo utilizando un secador infrarrojo construido a escala de laboratorio.

El siguiente esquema resume los pasos que se siguieron para lograr este objetivo.

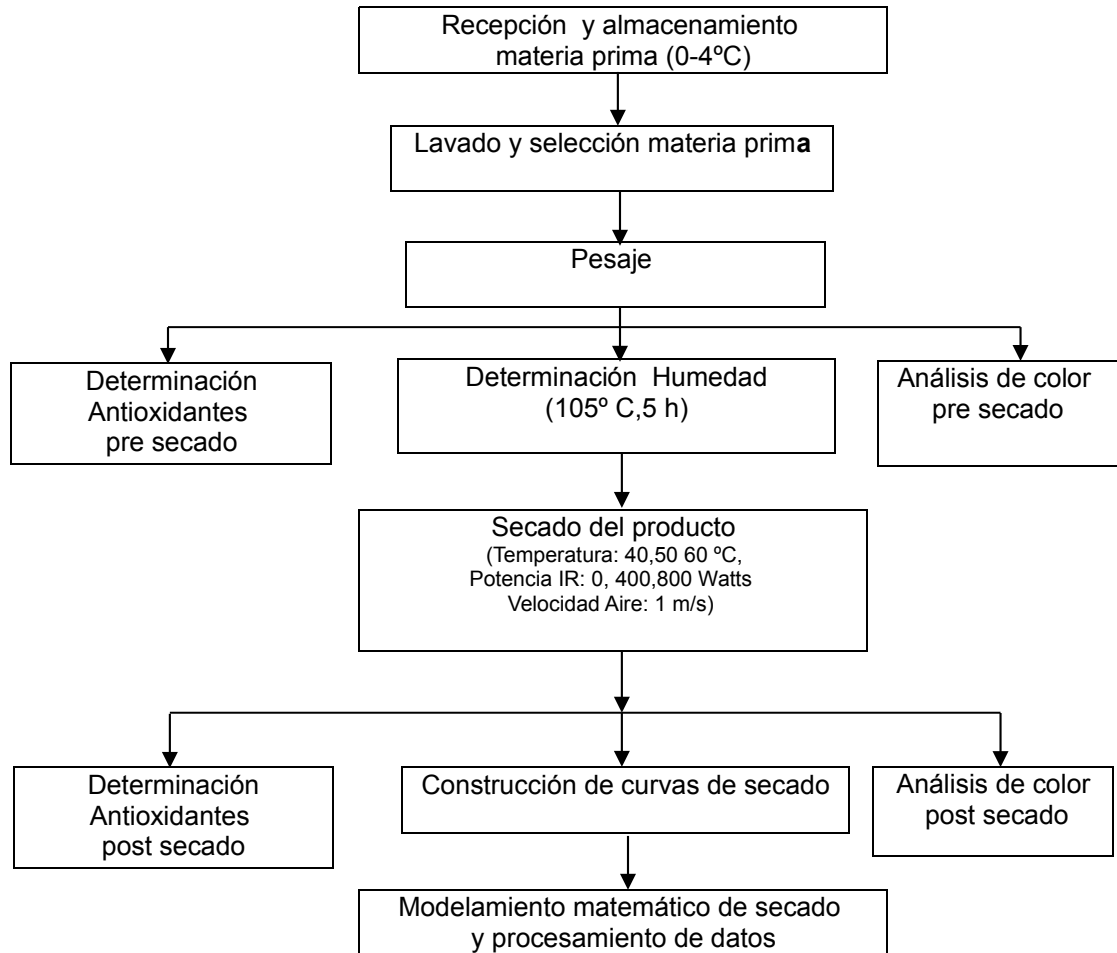


Figura 4.1: Diagrama de bloques para el secado asistido del fruto de murtila.

A continuación se describen las etapas del proceso:

**-Recepción y Almacenamiento de materia prima:** La murtila proveniente de la ciudad de Valdivia, se recibió en el Laboratorio de Procesos de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas de la Universidad de Chile y se almacenó refrigerada a 4 °C para su conservación.

**-Lavado y selección de materia prima:** Con el fin de trabajar con el producto a deshidratar en condiciones óptimas e higiénicas, se procedió a lavar la materia prima y luego a descartar los frutos que presentasen imperfecciones, cortes o daños visibles en su superficie.

**-Pesaje:** Durante la etapa de pesaje, se registró el peso total de la materia prima lavada y secada utilizando balanza de laboratorio y además se determinó el peso promedio del fruto.

**-Determinación de Humedad, Color y Polifenoles Totales.** Previo al proceso de secado se determinó la humedad, el color y los polifenoles totales de las muestras frescas, con los métodos explicados anteriormente. Además se determinó el color y los polifenoles totales de las muestras deshidratadas.

**-Secado del producto.** El proceso de secado del fruto de la murtila se realizó en un secador infrarrojo asistido construido con latón galvanizado y aislado con poliestireno. (Figuras 4.2 y 4.3). La velocidad del aire se mantuvo constante a 1 m/s y se controló utilizando un anemómetro digital modelo CTW JJ 816. Las resistencias eléctricas presentes en el equipo calentaron el aire que circula a través del secador impulsado por un ventilador. La temperatura de salida del aire se midió a través de un termómetro ubicado a la salida del secador. Durante esta experiencia se trabajó con tres temperaturas (T) de secado 40, 50 y 60 °C y con potencias (P) de infrarrojo de 400 y 800 Watts otorgadas por las lámparas infrarrojas presentes en el secador. Con estas condiciones se realizaron 9 tratamientos de secado (Tabla 4.1). Para cada tratamiento se trabajó con tres muestras del fruto de murtila, las cuales fueron dispuestas en canastillos numerados y previamente pesados. Los canastillos con las muestras fueron introducidos dentro del secador y se registró la pérdida de peso en el tiempo utilizando una balanza analítica.



Con esto fue posible estimar el tiempo de secado necesario para obtener un producto con 10 % de humedad (base húmeda), para cada experiencia.

Tabla 4.1: Tratamientos de secado aplicados en la deshidratación del fruto de murtilla.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Potencia infrarrojo (W)
1	40	0
2	40	400
3	40	800
4	50	0
5	50	400
6	50	800
7	60	0
8	60	400
9	60	800

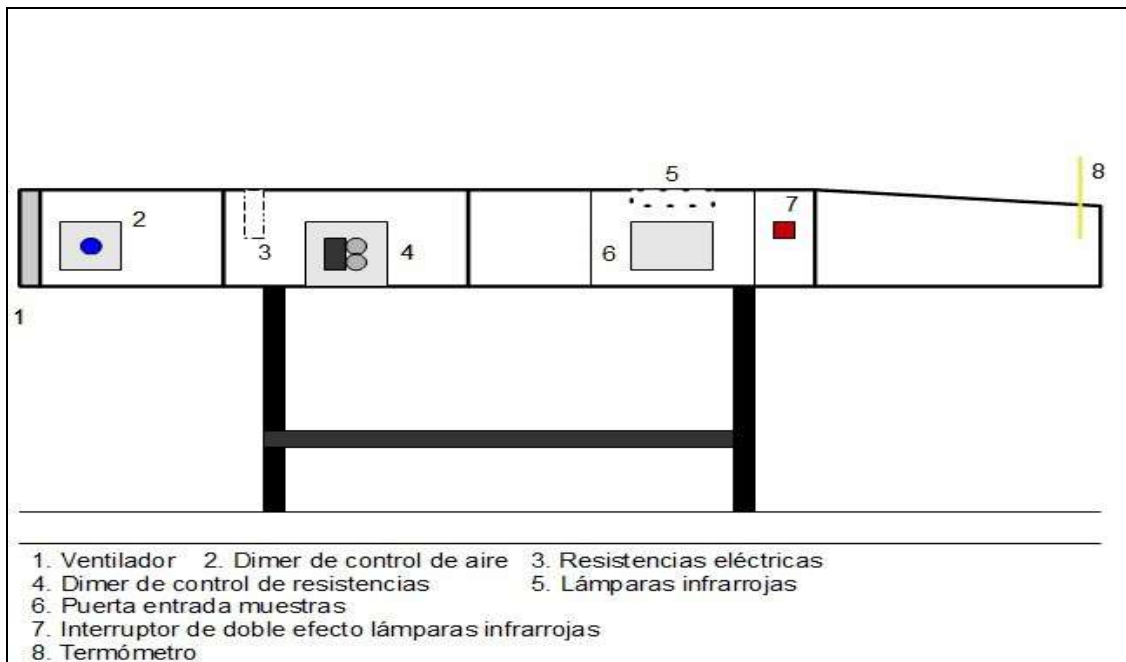


Figura 4.2: Esquema del secador infrarrojo utilizado en la deshidratación del fruto de murtilla.



Figura 4.3: Fotografía del secador infrarrojo ubicado en el Laboratorio de Procesos de Alimentos. Universidad de Chile.

#### 4.2.5. Curvas de secado y modelamiento matemático

Al concluir los tratamientos de secado para el fruto de murtilla, se procedió a realizar las curvas de secado para cada experiencia, las que relacionan la humedad del fruto en función del tiempo de secado ( $t$ ). La humedad del fruto de murtilla se expresó con el factor adimensional MR (moisture ratio) calculado de acuerdo a la ecuación número 9:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (9)$$

En dónde  $M_0$  es el contenido inicial de humedad del fruto de murtilla (gramos de agua / gramos de sólido seco),  $M_t$  es el contenido de humedad al tiempo  $t$  (gramos de agua / gramos de sólido seco) y  $M_e$  es la humedad de equilibrio (gramos de agua / gramos de sólido seco). Debido a que el valor de  $M_e$  es relativamente pequeño en comparación a  $M_t$  o  $M_0$ , se asume igual a cero (Shi et al., 2008)

Utilizando el programa SigmaPlot 11.0 se ajustaron los datos obtenidos a seis modelos matemáticos de cinéticas de secado: Newton, Page, logarítmico, Henderson-Pabis, Thompson y Wang and Singh. (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Modelos matemáticos de secado utilizados para estimar la cinética de deshidratación del fruto de murtilla.

Modelo	Ecuación
Newton	$MR = \exp (-k \cdot t)$
Page Modificado	$MR = \exp [-(k \cdot t)^n]$
Henderson and Pabis	$MR = a \cdot \exp (-k \cdot t)$
logarítmico	$MR = a \cdot \exp (-k \cdot t) + c$
Wang and Singh	$MR = at^2 + bt + 1$
Thompson	$t = a \cdot [\text{Ln}(MR)]^2 + b \cdot \text{Ln}(MR)$

Para cada modelo se determinó el coeficiente de determinación múltiple R cuadrado ( $R^2$ ) entre los valores experimentales y los valores predichos además del coeficiente Chi cuadrado ( $X^2$ ), la suma de los errores cuadrados (SSE) y la raíz media de los errores cuadrados (RMSE):

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (10)$$

$$SSE = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2 \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2} \quad (12)$$

$MR_{exp,i}$  y  $MR_{pre,i}$  corresponden a los MR experimentales y predichos respectivamente, N es el número de observaciones y z el número de constantes cinéticas (Shi et al., 2008)

La difusión del agua es el mecanismo de transporte probablemente más estudiado durante el secado de vegetales . La difusión es el proceso por el cual las moléculas son transferidas desde una región a otra en base a movimientos aleatorios en el cual no existe una dirección determinada. Además, durante la difusión las moléculas se mueven desde las zonas de alta concentración a las de baja concentración. Generalmente se asume que durante el secado el agua difunde desde las regiones internas (con alto contenido de humedad) hacia la superficie (con bajo contenido de humedad) donde se evapora si la cantidad de calor suministrada es suficiente.(Derossi et al., 2010) Este mecanismo es descrito por la segunda Ley de Fick, la cual puede ser expresada como:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} \quad (13)$$

Dónde m es el contenido de humedad, t es el tiempo , x es una coordenada espacial y  $D_{eff}$  el coeficiente de difusión efectivo (Derossi et al., 2010). Si la difusión ocurre en tres dimensiones la ecuación (13) toma la forma:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_{eff} \left( \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 m}{\partial z^2} \right) \quad (14)$$

Las soluciones de la ecuación (14) son diferentes dependiendo de la geometría de las muestras. Soluciones para geometrías simples como láminas, cilindros, esferas y paralelepípedos (finitos e infinitos) fueron desarrolladas por Crank (1975) (Derossi et al., 2010).

Con los datos experimentales obtenidos se calculó la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ) para cada experiencia de secado, utilizando la ecuación de Crank (1975) para difusión asumiendo la forma del fruto de murtilla como esférico, considerando el radio del fruto igual a 0,005 metros y asumiendo el encogimiento del fruto como despreciable:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} e^{\left(\frac{-n^2 \pi^2 D_{eff} \cdot t}{r^2}\right)} \quad (15)$$

Dónde  $D_e$  es la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ),  $r$  es el radio del fruto de la murtilla (m) y  $t$  el tiempo (s). Para largos tiempos de secado al ecuación (15) puede ser simplificada de la siguiente forma:

$$\ln(MR) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{eff} \cdot t}{r^2} \quad (16)$$

Al graficar  $\ln(MR)$  v/s  $t$  se obtiene el valor de la difusividad efectiva ( $m^2/s$ ) para cada tratamiento de secado. Una vez obtenidos los valores de difusividad efectiva se calculó la energía de activación del proceso de secado utilizando el modelo de Arrhenius linearizado (Shi et al., 2008) :

$$\ln(D_{eff}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R} \times \frac{1}{T} \quad (17)$$

Dónde  $E_a$  es la energía de activación (kJ/mol),  $R$  es la constante de los gases ( $8,314 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura absoluta (K) y  $D_0$  es el factor pre exponencial de Arrhenius (Puente et al., 2010). Al graficar  $\ln(D_{eff})$  v/s  $1/T$  se obtiene el valor de la energía de activación del proceso (kJ/mol).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

### **5.1 Humedad inicial del fruto**

La humedad inicial del fruto de murtilla fue de  $80,2 \pm 0,9$  en términos porcentuales. Este valor corresponde a 0,8021 gramos de agua por gramo de sólido húmedo o a 4,0531 gramos de agua por gramo de sólido seco. Muñoz (2002) informó un resultado similar para la humedad del fruto de murtilla en estado fresco, equivalente a  $77,80 \pm 0,33$  en términos porcentuales.

### **5.2 Curvas y tiempos de secado**

Para cada tratamiento de secado se utilizaron tres muestras del fruto de murtilla para obtener las curvas de secado (Anexo 1). Con el valor promedio de MR en relación al tiempo (minutos), se obtuvieron las curvas de secado para cada tratamiento. (Figura 5.1) hasta obtener un producto con un 10% de humedad. (base húmeda). Los tiempos de secado para cada tratamiento de secado fueron: 1410; 480; 210; 720; 270; 120; 510; 195 y 90 minutos para los tratamientos 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 y 9 respectivamente. (Figura 5.1). A partir de estos resultados se deduce que mientras mayores sean las temperaturas y potencias de infrarrojo aplicadas al proceso de secado, menores son los tiempos requeridos para deshidratar el fruto de la murtilla. Estos resultados concuerdan con lo obtenido por Shi et al. (2008), Toğrul (2005), Kumar et al. (2005), Hebbar et al. (2004), entre otros, en donde se demuestra que utilizando una fuente de energía infrarroja en combinación con una corriente de aire caliente, los tiempos de secado disminuyen en forma drástica, en comparación al secado convencional por aire.

El tiempo requerido para obtener un producto deshidratado con un 10 % de humedad se reduce en 85, 83 y 82 % al comparar las experiencias sin

infrarrojo y en las que se utilizó una potencia de 800 Watts de infrarrojo, a 40, 50 y 60 ° C respectivamente. Al comparar las experiencias sin infrarrojo y las que utilizaron 400 Watts de infrarrojo, los tiempos se redujeron en 66, 63 y 62 % a 40, 50 y 60 ° C respectivamente.

MR v/s tiempo

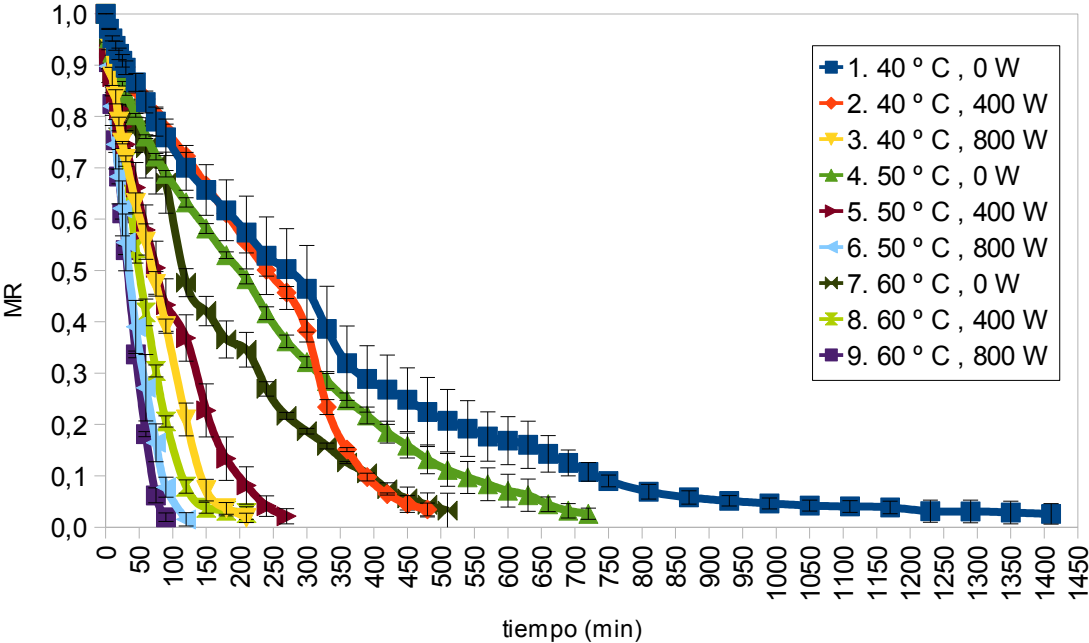


Figura 5.1: MR v/s tiempo para cada tratamiento de secado

**5.3 Ajuste de modelos teóricos de secado**

Para cada experiencia de secado se determinó el ajuste de los datos experimentales a los modelos de Newton, Page Modificado, Henderson-Pabis, logarítmico, Wang and Singh y Thompson, a través del coeficiente de determinación múltiple R cuadrado ( $R^2$ ), (que varía entre 0 y 1) y los parámetros estadísticos Chi cuadrado, ( $\chi^2$ ) RMSE y SSE (los cuáles mientras más cercanos a cero sean indican un mejor ajuste) (Anexo 2). La Tabla 5.1

entrega los valores promedios obtenidos de estos factores para cada experiencia de secado.

Tabla 5.1: Ajuste de modelos matemáticos para el secado asistido infrarrojo de murtilla.

Modelo	Ecuación	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
Newton	$MR = \exp(-k * t)$	0,9807 <sup>ab</sup>	0,0023 <sup>ab</sup>	0,0429 <sup>bc</sup>	0,0022 <sup>ab</sup>
Page Modificado	$MR = \exp[-(k * t)^n]$	0,9794 <sup>a</sup>	0,0024 <sup>ab</sup>	0,0429 <sup>bc</sup>	0,0021 <sup>ab</sup>
Henderson Pabis	$MR = a * \exp(-k * t)$	0,9830 <sup>ab</sup>	0,0022 <sup>ab</sup>	0,0400 <sup>bc</sup>	0,0019 <sup>ab</sup>
Logarítmico	$MR = a * \exp(-k * t) + c$	0,9976 <sup>c</sup>	0,0006 <sup>a</sup>	0,0217 <sup>a</sup>	0,0005 <sup>a</sup>
Wang and Singh	$MR = at^2 + bt + 1$	0,9900 <sup>bc</sup>	0,0012 <sup>a</sup>	0,0314 <sup>ab</sup>	0,0011 <sup>a</sup>
Thompson	$t = a \cdot [\ln(MR)]^2 + b \cdot \ln(MR)$	0,9855 <sup>abc</sup>	0,0039 <sup>b</sup>	0,0539 <sup>c</sup>	0,0035 <sup>b</sup>

Nota: Letras distintas en una misma columna indican que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) (Anexo 3)

Los resultados que se resumen en la Tabla 5.1, indican que los datos experimentales del secado se ajustan mejor al modelo logarítmico, ya que el valor obtenido para R<sup>2</sup> fue el más cercano a 1, mientras que los estadísticos X<sup>2</sup>, RMSE y SSE son los más cercanos a 0. El valor de R<sup>2</sup> obtenido para el modelo logarítmico es significativamente mayor ( $p < 0,05$ ) que el valor de R<sup>2</sup> obtenido para los modelos de Newton, Page modificado y Henderson y Pabis. (Anexo 3). Además el valor de RMSE obtenido para el modelo logarítmico es significativamente menor ( $p < 0,05$ ) que los valores de RMSE obtenidos para los modelos de Newton, Page Modificado, Henderson y Pabis y Thompson (Anexo 3). Estos resultados demuestran que los datos experimentales obtenidos se ajustan mejor al modelo logarítmico en comparación al resto de los modelos. Puente et al. (2010) también obtuvieron que el mejor ajuste se daba con el modelo logarítmico para el secado asistido de láminas de descartes de limón.



Shi et al. (2008) obtuvieron que con el modelo de Thompson se obtenía el mejor ajuste de los datos experimentales del secado de arándanos impregnados y no impregnados con azúcar utilizando infrarrojo. Toğrul (2005) obtuvo que el mejor modelo que describe la cinética de secado para rodajas de zanahorias deshidratadas con infrarrojo fue el modelo de Midilli (modelo no utilizado en este trabajo). Çaglar et al. (2009) obtuvieron sus propias ecuaciones para describir el secado de uvas durante el secado infrarrojo. Con estos antecedentes es posible inferir que el modelo que mejor se ajuste a los datos experimentales depende altamente del producto sometido al proceso de secado, así como de las condiciones en que este se encuentre (entero, láminas o rodajas) además de las condiciones propias establecidas en el proceso (temperaturas, potencias de infrarrojo y velocidad del aire).

#### **5.4 Constantes cinéticas de modelos.**

De acuerdo a los resultados obtenidos para cada tratamiento de secado (Tabla 5.2) se observa que el valor de la constante “k” ( $\text{min}^{-1}$ ) presente en los modelos de Newton, Page Modificado, Henderson and Pabis y logarítmico tiende a aumentar a medida que se aumenta la temperatura y la potencia de infrarrojo. Este resultado concuerda con lo obtenido por autores como Vega et al. (2007) y Puente et al. (2010) en donde se comprueba que este parámetro cinético es dependiente de la temperatura. También se encuentra este comportamiento en artículos de secado de arándanos con infrarrojo (Shi et al., 2008) y de secado infrarrojo de subproductos de uva (Ruiz et al., 2009) La misma tendencia a aumentar con la temperatura y la potencia de infrarrojo se ve para los parámetros “n” del modelo de Page Modificado y “a” del modelo logarítmico Vega y Lemus. (2006), señalan que estos parámetros podrían estar más ligados a la estructura del tejido del alimento y a la velocidad del aire de secado, más que a la temperatura.

Tabla 5.2: Constantes cinéticas obtenidas para cada modelo matemático y tratamiento de secado.

M o d e l o	Newton	Page Modificado		Henderson and Pabis		Logarítmico			Wang and Singh		Thompson	
	k	k	n	k	a	k	a	c	a	b	a	b
1	0,0029	0,0031	0,9137	0,0029	0,9903	0,0028	0,9987	-0,0107	1,01x10 <sup>-6</sup>	-0,0020	18,21	-290,23
2	0,0037	0,0034	1,0166	0,0039	1,0252	0,0051	1,2412	-0,1810	4,79x10 <sup>-7</sup>	-0,0024	-79,51	-382,54
3	0,0120	0,0134	1,0907	0,0124	1,0172	0,0077	1,2502	-0,2677	2,15x10 <sup>-5</sup>	-0,0092	-10,24	-90,66
4	0,0040	0,0037	0,8786	0,0038	0,9711	0,0031	1,0523	-0,0974	2,36x10 <sup>-6</sup>	-0,0030	-42,80	-353,59
5	0,0098	0,0106	0,9682	0,0097	0,9918	0,0070	1,1317	-0,1646	1,50x10 <sup>-5</sup>	-0,0076	-12,56	-117,06
6	0,0219	0,0236	1,1522	0,0228	1,0327	0,0162	1,1749	-0,1757	7,19x10 <sup>-5</sup>	-0,0167	-5,57	-51,16
7	0,0056	0,0060	0,8600	0,0054	0,9717	0,0045	1,0361	-0,0782	4,86x10 <sup>-6</sup>	-0,0043	-15,28	-201,88
8	0,0153	0,0156	1,1643	0,0166	1,0665	0,0145	1,1114	-0,0612	2,91x10 <sup>-5</sup>	-0,0110	1,72	-48,69
9	0,0238	0,0263	1,2685	0,0257	1,0577	0,0133	1,4635	-0,4543	7,70x10 <sup>-5</sup>	-0,0180	-6,24	-46,62

\* = número del tratamiento aplicado.

## 5.5 Difusividad efectiva y energía de activación.

Los resultados de Tabla 5.3, indican que aumentando la temperatura de secado y la potencia de infrarrojo, los valores de la difusividad efectiva aumentan. Esta tendencia concuerda con los resultados obtenidos por Giraldo-Zuniga et al. (2010) en la deshidratación de pulpa de cupuaçu, en donde se señala, además, que la difusividad efectiva varía conforme se modifican las condiciones del proceso de secado (temperatura, velocidad del aire, etc.) y no depende del producto a secar. Otros estudios que también obtienen esta relación entre la temperatura y la difusividad del agua son los realizados por Puente et al. (2010) al deshidratar con infrarrojo subproductos del limón; Schmalcko y Alzamora (2005) al deshidratar yerba mate, en donde además se concluye que la humedad inicial y el diámetro del producto también son influyentes; Corzo et al.(2008) al aplicar el proceso de secado en láminas de coroba y Faustino et al. (2007) al secar pimentones verdes.

Tabla 5.3: Difusividad efectiva obtenida para cada tratamiento de secado.

Tratamiento	Difusividad efectiva ( $D_{eff}$ ) $\times 10^{-10}$ m/s <sup>2</sup>
1. 40 ° C ,0 W IR	1,0556
2. 40 ° C ,400 W IR	1,1747
3. 40 ° C ,800 W IR	4,0784
4. 50 ° C ,0 W IR	1,1779
5. 50 ° C ,400 W IR	3,6596
6. 50 ° C ,800 W IR	8,1083
7. 60 ° C ,0 W IR	1,4117
8. 60 ° C ,400 W IR	4,7618
9. 60 ° C ,800 W IR	8,5186

Con los valores obtenidos de difusividad para tratamientos 1, 4 y 7 se estimó que la energía de activación del proceso de secado, utilizando la ecuación de Arrhenius linearizada. Al graficar  $\ln(D_{eff})$  versus el inverso de las temperaturas de secado (K) (Figura 5.2) se obtuvo una pendiente de valor 1,51. Multiplicando este valor por la constante de los gases 8,314 kJ/ mol·K, se obtuvo que la energía de activación del proceso es igual a 12,56 kJ/ mol.

El valor obtenido es menor en comparación a los obtenidos por Toğrul (2005) en el secado de zanahorias (22,43 kJ/ mol), en un rango de 50 a 80 °C; por los obtenidos por Faustino et al. (2007) en el secado de pimentones utilizando temperaturas de secado de 30 a 70 °C (47,10 kJ/ mol) y por los obtenidos por Ruiz et al. (2009) al deshidratar subproductos de uva en un rango de temperaturas de 100 a 160 °C (19,27 kJ /mol). Esto indica que la deshidratación del fruto murtilla puede llevarse a cabo en forma satisfactoria con requerimientos de energía relativamente bajos.

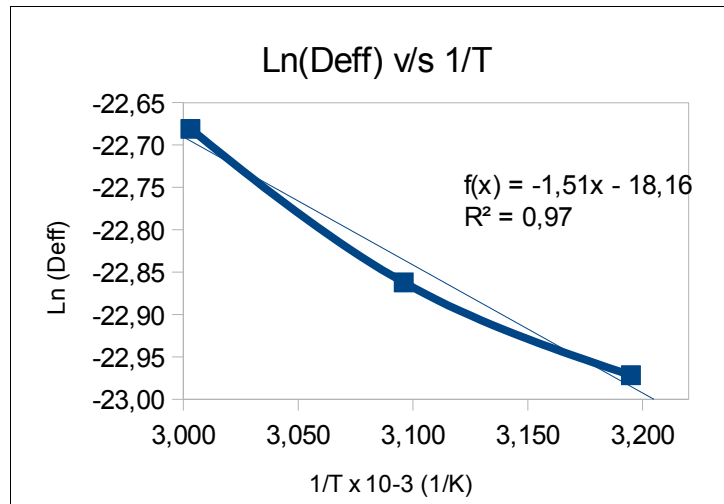


Figura 5.2: Variación de la difusividad efectiva con la temperatura.

## 5.6 Color

Los resultados obtenidos indican que existe una disminución del valor de los parámetros  $a^*$  (la muestra se vuelve menos roja) y  $b^*$  (la muestra aumenta la tonalidad azul) al comparar la muestra fresca con las muestras deshidratadas, mientras que el parámetro  $L^*$  muestra una tendencia a ser mayor en las muestras deshidratadas con respecto a las muestras frescas. (aumenta luminosidad) (Tabla 5.4, Figura 5.3) Este resultado concuerda con lo obtenido por Nasiroglu y Kocabiyik (2009) y Boudhrioua et al. (2008) en el secado infrarrojo de rodajas de pimentón rojo y hojas de oliva, respectivamente. Los análisis estadísticos que se realizaron (Anexo 4) indican que no existieron diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) para luminosidad ( $L^*$ ) al comparar las muestras frescas y deshidratadas excepto con la muestra deshidratada a 40 °C y 800 Watts de infrarrojo. Para el parámetro  $a^*$ , existieron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) en todos los casos, al comparar las muestras frescas y deshidratadas. Con respecto al parámetro  $b^*$  también existieron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) para todos los casos, excepto al comparar la muestra

fresca con la muestra deshidratada a 40 ° C y 400 W de infrarrojo. Si bien, en este último caso se ve una tendencia de disminución del parámetro b\*, es posible apreciar que no existen diferencias significativas al comparar los tratamientos de secado entre sí, por lo que puede inferirse que el aumento de la Temperatura de secado y la potencia de infrarrojo no afectarían el color del fruto en forma significativa. Es decir, a pesar de que hay un pérdida significativa de color al deshidratar el fruto de la murtila con casi todos los tratamientos aplicados, el tipo de tratamiento aplicado no influiría en la mayor o menor variación de color que tenga el fruto. (utilizando un rango de temperatura de 40 a 60 ° C y 400 y 800 W de infrarrojo) Una tendencia similar se ve para el parámetro a\*.

Tabla 5.4: Resultados de color para muestras frescas y deshidratadas del fruto de murtila.

Muestra	L*	a*	b*
Murtilla Fresca	43,49 ± 0,89 <sup>c</sup>	53,02 ± 3,18 <sup>c</sup>	34,22 ± 1,96 <sup>c</sup>
1. 40 ° C ,0 W IR	50,62 ± 4,77 <sup>c</sup>	34,32 ± 4,63 <sup>d</sup>	23,47 ± 2,05 <sup>d</sup>
2. 40 ° C ,400 W IR	47,25 ± 4,75 <sup>c</sup>	30,66 ± 2,37 <sup>de</sup>	25,94 ± 9,64 <sup>cd</sup>
3. 40 ° C ,800 W IR	35,55 ± 5,30 <sup>d</sup>	26,54 ± 3,71 <sup>e</sup>	17,04 ± 2,68 <sup>d</sup>
4. 50 ° C ,0 W IR	49,99 ± 7,48 <sup>c</sup>	31,84 ± 0,88 <sup>de</sup>	24,86 ± 8,49 <sup>d</sup>
5. 50 ° C ,400 W IR	45,22 ± 3,54 <sup>c</sup>	30,66 ± 4,82 <sup>de</sup>	24,46 ± 6,03 <sup>d</sup>
6. 50 ° C ,800 W IR	47,68 ± 1,45 <sup>c</sup>	35,29 ± 2,45 <sup>d</sup>	24,85 ± 1,37 <sup>d</sup>
7. 60 ° C ,0 W IR	43,33 ± 3,18 <sup>c</sup>	25,66 ± 5,29 <sup>e</sup>	20,91 ± 4,62 <sup>d</sup>
8. 60 ° C ,400 W IR	48,15 ± 2,64 <sup>c</sup>	29,87 ± 5,64 <sup>de</sup>	22,55 ± 4,97 <sup>d</sup>
9. 60 ° C ,800 W IR	45,54 ± 5,63 <sup>c</sup>	28,12 ± 3,26 <sup>de</sup>	22,22 ± 4,02 <sup>d</sup>

Nota: Letras distintas en una misma columna indican que existen diferencias significativas (p < 0,05). (Anexo 4)

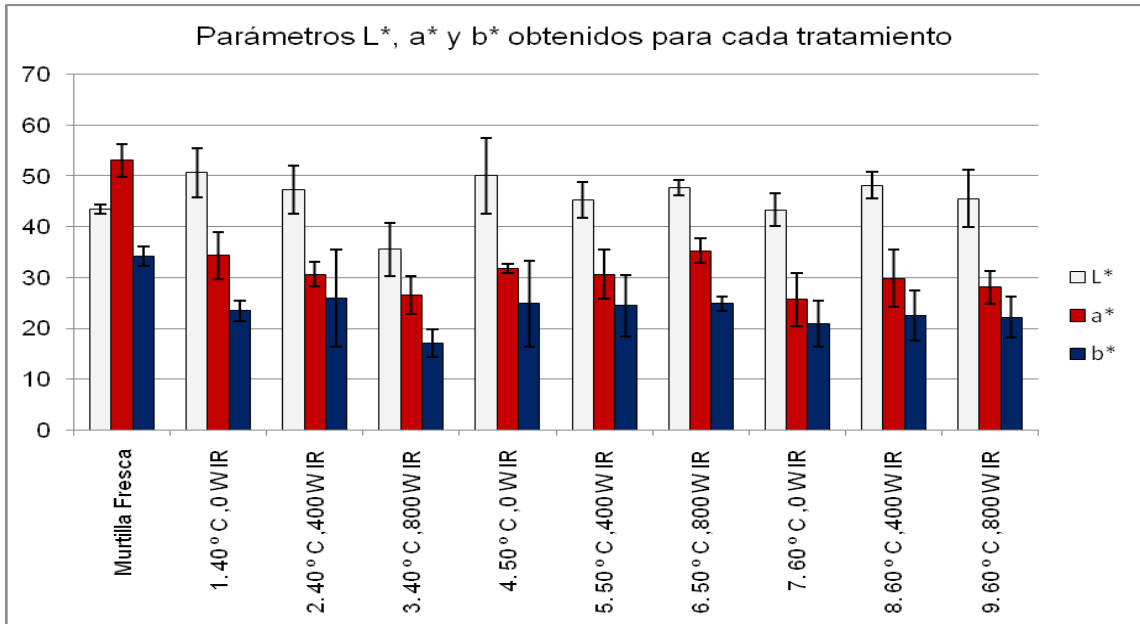


Figura 5.3: Gráfico de barras para parámetros L\*, a\* y b\* de cada tratamiento de secado

La tabla 5.5 muestra las variaciones totales para L\*, a\* y b\* y el cambio total de color ( $\Delta E$ ) de las muestras deshidratadas. La figura 5.4 muestra el cambio total de color para cada caso.

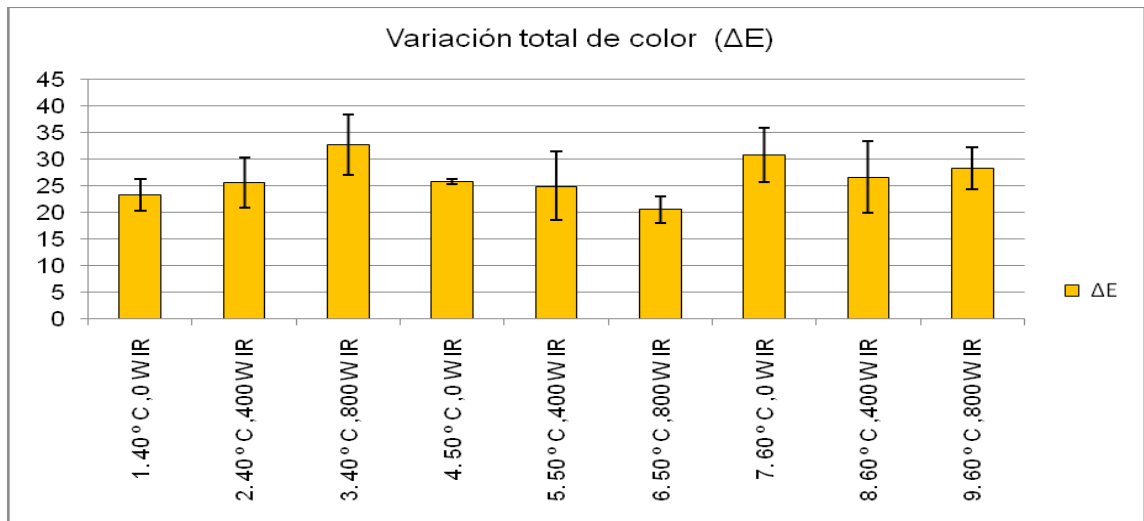


Figura 5.4: Variación total de color  $\Delta E$  de cada tratamiento de secado.

Tabla 5.5: Variación de L, a y b entre muestras frescas y deshidratadas y variación total de color ( $\Delta E$ )

Tratamiento	$\Delta L$	$\Delta a$	$\Delta b$	$\Delta E$
1	$7,13 \pm 4,77^d$	$18,7 \pm 4,63^{de}$	$10,75 \pm 2,05^d$	$23,3 \pm 2,95^{de}$
2	$3,77 \pm 4,75^d$	$22,36 \pm 2,37^{def}$	$8,28 \pm 9,64^d$	$25,5 \pm 4,71^{def}$
3	$7,94 \pm 5,30^d$	$26,48 \pm 3,71^f$	$17,18 \pm 2,68^d$	$32,7 \pm 5,60^f$
4	$6,50 \pm 7,48^d$	$21,17 \pm 0,88^{def}$	$9,37 \pm 8,49^d$	$25,8 \pm 0,48^{def}$
5	$1,74 \pm 3,54^d$	$22,36 \pm 4,82^{def}$	$9,77 \pm 6,03^d$	$24,9 \pm 6,44^{def}$
6	$4,19 \pm 1,45^d$	$17,73 \pm 2,45^d$	$9,37 \pm 1,37^d$	$20,5 \pm 2,48^d$
7	$0,16 \pm 3,18^d$	$27,36 \pm 5,29^f$	$13,31 \pm 4,62^d$	$30,8 \pm 5,11^{ef}$
8	$4,66 \pm 2,64^d$	$23,15 \pm 5,64^{def}$	$11,67 \pm 4,97^d$	$26,6 \pm 6,69^{def}$
9	$2,05 \pm 5,63^d$	$24,89 \pm 3,26^{ef}$	$12,01 \pm 4,02^d$	$28,2 \pm 3,91^{def}$

Nota: Letras distintas en una misma columna indican que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). (Anexo 5)

Con los resultados obtenidos, es posible apreciar que la experiencia en donde la variación total de color fue menor corresponde al tratamiento de secado número 6 ( $50^\circ \text{C}$ , 800 Watts) en donde el valor de  $\Delta E$  fue  $20,5 \pm 2,48$  mientras que con el tratamiento número 3 ( $40^\circ \text{C}$ , 800 Watts) se presentó el mayor cambio de color ya que se obtuvo un  $\Delta E$  igual a  $32,7 \pm 5,60$ . Los tratamientos de secado aplicados no presentan diferencias significativas ( $p > 0,05$ ) entre sí, para el cambio total de los parámetros  $L^*$  y  $b^*$  ( $\Delta L$  y  $\Delta b$ ) mientras que sí existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos de secado para la variación de los parámetros  $a^*$  y  $E$  ( $\Delta a$  y  $\Delta E$ ). (Anexo 5). No se aprecia una tendencia clara de los valores obtenidos que pueda servir para comprobar la influencia de la temperatura y/o el infrarrojo en la variación total de color. Autores como Kumar et al. (2005) concluyen que el uso de un secado asistido infrarrojo permite conservar mejor el color de las muestras deshidratadas de rodajas cebolla, en comparación a las obtenidas con secado convectivo e infrarrojo por separado. Además obtienen que la variación de color es mayor al trabajar con una temperatura de secado baja ( $30^\circ \text{C}$ ), en donde se

requirieron largos tiempos de secado y al trabajar con una temperatura de secado alta (50 °C) en donde se requirieron menores tiempos de secado, en comparación a un secado a una temperatura intermedia (40 °C) . Por otra parte, Nasiroglu y Kocabiyik (2009) indican que al aumentar la potencia de infrarrojo y la velocidad del aire de secado, la variación total de color es significativamente mayor en láminas de pimentón rojo deshidratadas, en comparación a las muestras frescas; Shi et al. (2008) obtienen que existe mayor cambio de color en arándanos deshidratados con infrarrojo en comparación a los deshidratados por aire caliente. Las diferencias obtenidas en los estudios indican que existe una fuerte influencia en el tipo de producto a deshidratar y las condiciones en que se lleva a cabo el proceso de secado.

## **5.7 Polifenoles totales**

Los resultados obtenidos para polifenoles totales (Tabla 5.6) indican que el contenido de polifenoles disminuye en forma significativa ( $p < 0,05$ ) al aplicar el proceso de secado asistido en el fruto de murtilla (Anexo 6). Reyes et al. (2010) también obtuvieron una disminución en el contenido total de polifenoles presentes en el fruto de murtilla aplicando un proceso de secado por liofilización, sin embargo señalan que la reducción del contenido de polifenoles a la mitad por la aplicación de tratamientos térmicos en frutas podría no afectar su actividad antioxidante.

Analizando los valores obtenidos, se aprecia que los tratamientos de secado llevados a cabo a 40 ° C son los que conservan en mayor medida el contenido de polifenoles presentes en el fruto, mientras que aquellos realizados a 60° C los polifenoles se mantuvieron en menor cantidad, lo que indica que puede haber una influencia de la temperatura para este parámetro. Otra tendencia que arrojan los resultados obtenidos es que en los tratamientos de secado en dónde se trabajó con la presencia de infrarrojo, la cantidad de



compuestos antioxidantes es mayor que en los tratamientos en donde sólo se trabajó con aire caliente. Reyes et al. (2010) indican que la utilización de infrarrojo puede ayudar a mantener la actividad antioxidante en el fruto de murtilla.

Tabla 5.6: Contenido de polifenoles totales expresado en gramos de ácido gálico en 100 g de producto seco.

Muestra	g ácido gálico / 100 g producto seco
Murtilla Fresca	4,35 ± 0,12 <sup>a</sup>
1.40 ° C ,0 W IR	2,17 ± 0,10 <sup>b</sup>
2.40 ° C ,400 W IR	3,27 ± 0,09 <sup>c</sup>
3.40 ° C ,800 W IR	3,74 ± 0,04 <sup>d</sup>
4.50 ° C ,0 W IR	1,40 ± 0,05 <sup>e</sup>
5.50 ° C ,400 W IR	2,93 ± 0,08 <sup>f</sup>
6.50 ° C ,800 W IR	3,41 ± 0,14 <sup>c</sup>
7.60 ° C ,0 W IR	0,96 ± 0,04 <sup>h</sup>
8.60 ° C ,400 W IR	1,77 ± 0,04 <sup>i</sup>
9.60 ° C ,800 W IR	2,22 ± 0,07 <sup>b</sup>

Nota: Letras distintas indican que existen diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). (Anexo 6)

Además al comparar las experiencias que utilizaron infrarrojo a una misma temperatura, se aprecia que el contenido de polifenoles es mayor cuando se utiliza una potencia de 800 Watts de infrarrojo para todas las experiencias, en comparación en las que se usaron 400 Watts. Esta tendencia puede deberse a que al aplicar el secado asistido infrarrojo, los tiempos de secado son menores, por lo que el producto podría conservar en mayor cantidad el contenido de polifenoles. Resultados obtenidos por Lee et al. (2006) indican que el contenido de polifenoles totales es mayor para subproductos de maní sometidos a radiación infrarroja en comparación a un secado tradicional por aire.

Diversos resultados indican que la presencia de compuestos bioactivos puede verse afectada al someter alimentos a temperaturas de secado por largos minutos. Esto puede deberse a que el calor afecta la concentración de taninos extractables en las plantas (Chau y Cheung, 1997; Rajko y Szabó, 1997) como producto de la formación de complejos tanino-proteínas (Jackson et al., 1996). Otras evidencias indican que el secado de las plantas disminuye la concentración de polifenoles condensados extractables y aumenta la formación de complejos polifenol-proteína, con lo cual se afecta la determinación de dichos compuestos. (Jackson et al., 1996; Ahn et al., 1997).

Estudios realizados por Chan et al. (2009) y Roy et al. (2007), indican que existe pérdida significativa de compuestos polifenoles totales en vegetales deshidratados, mientras otros autores como Wanyo et al. (2011) indican que el contenido de éstos es mayor en muestras deshidratadas que en muestras frescas.

La diversidad de resultados obtenidos al comparar compuestos fenólicos entre muestras frescas y deshidratadas, indicaría que el aumento, mantención o pérdida de este tipo de compuestos depende en gran medida del producto sometido a secado y de las condiciones en que el proceso se lleva a cabo.

## 6. CONCLUSIONES

- El secado asistido infrarrojo permite reducir los tiempos de secado en forma considerable en comparación al secado convencional por aire. Para el fruto de murtilla el ahorro en el tiempo de secado alcanzó un máximo de 85 % comparando el secado asistido con el secado convencional.
- El modelo logarítmico es el modelo que mejor describe la cinética de deshidratación del fruto de murtilla. ( $R^2 = 0,9976$ ). Con los modelos de Wang and Singh y Thompson también se obtiene un ajuste aceptable de los datos experimentales. ( $R^2 = 0,9900$  y  $R^2 = 0,9885$  respectivamente)
- Utilizando la ley de Fick es posible obtener la difusividad efectiva de agua en el fruto de murtilla considerando su forma como esférica. Este valor aumenta a medida que las temperaturas y potencias de infrarrojo se incrementan.
- La energía de activación para el secado asistido del fruto de murtilla fue de 12,56 kJ/mol. Este valor depende tanto de las temperaturas de secado como del producto utilizado.
- El valor de las constantes cinéticas (k y n) de los modelos matemáticos utilizados muestran una tendencia a aumentar con la temperatura de secado y las potencias de infrarrojo.
- Con respecto al color, los valores de los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  mostraron una tendencia a disminuir (significativamente) al comparar muestras deshidratadas con respecto a las muestras frescas, mientras que para el parámetro de luminosidad ( $L^*$ ) la tendencia fue a aumentar.

- A menores temperaturas de secado se observan menores pérdidas de polifenoles en el fruto de murtila. Además el secado asistido infrarrojo permitió mantener mayor cantidad de compuestos fenólicos en el fruto de murtila, en comparación al secado tradicional.
- Fue posible deshidratar el fruto de murtila en forma satisfactoria utilizando un secado asistido infrarrojo, lo que constituye una alternativa para el secado de frutas, vegetales y otros productos alimenticios que requieran extender su vida útil mediante la eliminación de agua.

## 7. REFERENCIAS

- **AGUILA, C., & Nahuelhual, L. (2008).** CULTIVO DE MURTILLA (*Ugni molinae* Turcz.) COMO ALTERNATIVA DE DIVERSIFICACIÓN PRODUCTIVA PARA LA AGRICULTURA FAMILIAR CAMPESINA DE LA CORDILLERA DE LA COSTA. *AGRO SUR*, 36 (3): 158-167.
- **AHN, J.H., Elliott, R. & Norton, B.W. (1997).** Oven drying improves the nutritional value of *Calliandra calothyrsus* and *Gliricidia sepium* as supplements for sheep given low quality straw. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 75 (4):503-510.
- **ARANCIBIA-AVILA, P., Toledo, F., Werner, E., Suhaj, M., Leontowicz, H., Leontowicz, M., Martínez-Ayala, A., Pasko, P., Gorinstein, S. (2011).** Partial characterization of a new kind of Chilean Murtilla-like berries. *Food Research International*, 44: 2054-2062.
- **AZFAL, T.M., Abe, T. & Hikida, Y. (1999).** Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*, 42(4): 177-182.
- **BOUDHRIOUA, N., Bahloul, N., Ben Slimen, I., Kechaou, N. (2009).** Comparison on the total phenol contents and the color of fresh and infrared dried olive leaves. *Industrial crops and products*. *Industrial crops and products*, 29: 412-419.
- **ÇAĞLAR, A., Toğlur, I. & Toğlur, H. (2009).** Moisture and thermal diffusivity of seedless grape under infrared drying. *Food and Bioproducts processing*, 87: 292-300.

- **CHAN, E.W.C., Lim, Y.Y., Wong, S.K., Lim, K.K., Tan, S.P., Lianto, F.S. & Yong, M.Y. (2009).** Effects of different drying methods on the antioxidant properties of leaves and tea of ginger species. *Food Chemistry*, 113:166-172.
- **CHAU, C.F.J & Cheung, P.C.K. (1997).** Effect of Various Processing Methods on Antinutrients and *in Vitro* Digestibility of Protein and Starch of Two Chinese Indigenous Legume Seeds. *J. Agric. Food Chem.*, 45: 4773-4776.
- **CONTRERAS, C. (2006).** Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. Tesis Doctoral. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. 233 p.
- **CORZO, O., Bracho, N., Pereira, A. & Vásquez, A. (2008).** Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. *Food Science and Technology*, 41 (10): 2023-2028.
- **DEROSSO, A., Severini, C., & Cassi, D. (2011).** Mass transfer mechanisms during dehydration of vegetable food: traditional an innovative approach. En: EL-AMIN, M. (2011). *Advances topics in mass transfer*. 1ª ed. Rijeka. InTech. 305-354 p.

- **ERDOĞDU, B., Ekiz, I.H., Erdoğan, F., Atungulu, G.G., Pan, Z. (2011).** Industrial Applications of Infrared Radiation Heating and Economic Benefits in Food and Agricultural Processing. *En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 237-274 p.*
- **FAUSTINO, J.M.F., Barroca, M.J., Guiné, R.P.F. (2007).** Study of the drying kinetics of green bell pepper and chemical characterization. *Trans IChemE, Part C, Food and Bioproducts Processing*, 85 (C3): 163-170.
- **FITO, P., Andrés A., Barat J., Albors A. (2001).** Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Valencia, editorial U.P.V. 210 p.
- **GIRALDO-ZUNIGA, A., Arévalo-Pinedo, A., Silva, A., Silva, P., Valdés-Serra, J.C, Pavlak, M.C. (2010).** Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 30(1): 179-182.
- **HEBBAR, U., Vishwanatha, K.H., Ramesh, M.N. (2004).** Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal of Food Engineering*, 65: 557-563.
- **HUANG, D. Boxin, U. Prior, R. (2005).** The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(6): 1841-1856.

- **JACKSON, F., & Barry, T. (1996).** The Extractable and Bound Condensed Tannin Content of Ideaves from Tropical Tree, Shrub and Forage Legumes. *J. Sci. Food Agric.*, 71: 103-110
- **JANGAM, S.V., Law, C.L., & Mujumdar, A.S. (2011).** Drying of Foods, Vegetables and Fruits, Volume 2. ISBN: 978-981-08-7985-3.
- **JUN, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. & Demirci, A. (2011).** Fundamentals and Theory of Infrared Radiation. En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 1-18 p.
- **KOCABIYIK, H. (2011).** Combined Infrared and Hot Air Drying. En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 101-114 p.
- **KRISHNAMURTHY, K., Khurana, H. K., Jun, S., Irudayaraj, J., & Demirci, A. (2008).** Infrared heating in food processing: an overview. *Comprehensive reviews in food sciences and food safety*, 7: 2-13.
- **KUDRA, T., & Mujumdar, A.S. (2009).** Advanced Drying Technologies. 2<sup>a</sup> ed. Boca Ratón. CRC Press. 455 p.
- **KUMAR, D.G., Hebbar, U., Sukumar, D. & Ramesh, M.N.(2005).** Infrared and hot-air drying of onions. *Journal of Food Processing and Preservation*, 29: 132-150.



- **LEE, S.C., Jeong, S.M., Kim, S.Y., Park, H.R., Nam, K.C. & Ahn, D.U. (2006).** Effect of far-infrared radiation and heat treatment on the antioxidant activity of water extracts from peanut hulls. *Food Chemistry* 94: 489-493.
- **MUJUMDAR, A. (2006).** Principles, Classification, and Selection of Dryers. *Handbook of Industrial Drying*. 4 -31 p.
- **MUÑOZ, J.C. (2002).** Determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (*Ugni molinae Turcz*), en función de la temperatura. Tesis (Licenciado en Ingeniería en Alimentos). Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Ingeniería en Alimentos. 90 p.
- **NASIROGLU, S. & Kocabiyik, H. (2009).** Thin-layer infrared radiation drying of red pepper slices. *Journal of Food Process Engineering*, 32: 1-16.
- **NINDO, C., & MWITHIGA, G., (2011).** Infrared Drying. En: PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011). Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 89-99 p.
- **PAN, Z., & Atungulu, G.G. (2011).** Infrared heating for food and agricultural processing. Boca Ratón. CRC Press. 284 p.
- **PUENTE, L., Castro, E., Echegaray, E. & Pinto, C.(2010).** Mathematical modeling of infrared-assisted drying of thin layer lemon waste (citrus limon (l.) burm. f. cv. Genova) (No publicado)

- **RAJKO, R. & Szabó, G. (1997).** Designed experiments for reducing antinutritive agents in Soybean by microwave energy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 45: 3565-3569
- **RATTI, C., & Mujumdar, A. (2006).** Infrared drying. Handbook of Industrial Drying. 423 -437 p.
- **REYES, A., Bubnovich, R., Bustos, R., Vásquez, M., Vega, R. & Scheuermann, E. (2010).** Comparative study of different process conditions of freeze drying of murtilla berry. *Drying Technology*, 28: 1416-1425.
- **ROY, M.K., Takenaka, M., Isobe, S. & Tsushida, T. (2007).** Antioxidant potential, anti-proliferative activities, and phenolic content in water-soluble fractions of some commonly consumed vegetables: Effects of thermal treatment. *Food Chemistry*, 103: 106-114.
- **RUBILAR, M., Jara, C., Poo, Y., Acevedo, F., Gutierrez, C., Sineiro, J. & Shene, C. (2011).** Extracts of Maqui (*Aristotelia chilensis*) and Murta (*Ugni molinae* Turcz.): Sources of Antioxidant Compounds and  $\alpha$ -Glucosidase/ $\alpha$ -Amylase Inhibitors. *J. Agric. Food Chem.*, 59: 1630–1637.
- **RUIZ, A., López, F. & Cuadros, F. (2009).** Experimental modelling of infrared drying of industrial grape by-products. *Food and bioproducts processing*, 87: 247–253.

- **RUIZ, A., Hermosín, I., Mardones, C., Vergara, C., Herlitz, E., Vega, M., Dorau, C., Winterhalter, P. & Von Baer, D. (2010).** Polyphenols and Antioxidant Activity of Calafate (*Berberis microphylla*) fruits and other native berries from southern Chile. *J. Agric. Food Chem.*, 58: 6081–6089
- **SAN MARTIN, J., Seguel, I. & Berrios, M. (2009).** Estrategias en manejo de poda en murtila. Informativo INIA Raihuen.(42) Instituto de investigaciones agropecuarias. Ministerio de agricultura.
- **SANDU, C.(1986).** Infrared radiative drying in food engineering: A process analysis. *Biotechnology Progress*, 2: 109-119.
- **SCHEUERMANN, E., Seguel, I., Montenegro, A., Bustos, R., Hormazabal, E. & Quiroz, A. (2008).** Evolution of aroma compounds of murtila fruits (*Ugni molinae* Turcz) during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88: 485-492.
- **SCHMALCKO, M., & Alzamora, S., (2005).** Modelling the drying of a twig of “yerba mate”considering as a composite material Part II: mathematical model.*Journal of Food Engineering*, 67(3): 267-272.
- **SHI, J., Pan, Z., McHugh, T., Wood, D., Hirschberg, E. & Olson, D. (2008).** Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. *Food Science and Technology*, 41: 1962-1972.

- **TOĞRUL, H. (2006).** Suitable drying model for infrared drying of carrot. *Journal of Food Engineering*, 77: 610-619.
- **TUNCEL, N., Yilmaz, N., Kocabiyik, H., Öztürk, N. & Tuncel, M. (2010).** The effects of infrared and hot air drying on some properties of corn (*Zea mays*). *Journal of Food Agriculture & Environment*, 8 (1): 63-68.
- **VEGA, A. & Lemus, R. (2006).** Modelado de la Cinética de Secado de la Papaya Chilena (*Vasconcellea pubescens*). *Información Tecnológica*, 17 (3): 23-31.
- **VEGA, A., Tello, C. & Lemus, R. (2007).** Simulación matemática del proceso de secado de la gracilaria chilena (*gracilaria chilensis*). *Revista Chilena de Ingeniería*, 5 (1): 55-64.
- **YAM, K., & PAPADAKIS, S., (2004).** A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surface. *Journal of Food Engineering*, 61:137-142.
- **WANYO, P., Siriamornpun, S. & Meeso, N. (2011).** Improvement of quality and antioxidant properties of dried mulberry leaves with combined far-infrared radiation and air convection in Thai tea process. *Food and bioproducts processing*, 89: 22-30.

## 8. ANEXOS

Anexo 1: Curvas de secado de cada tratamiento de secado del fruto de murtilla.

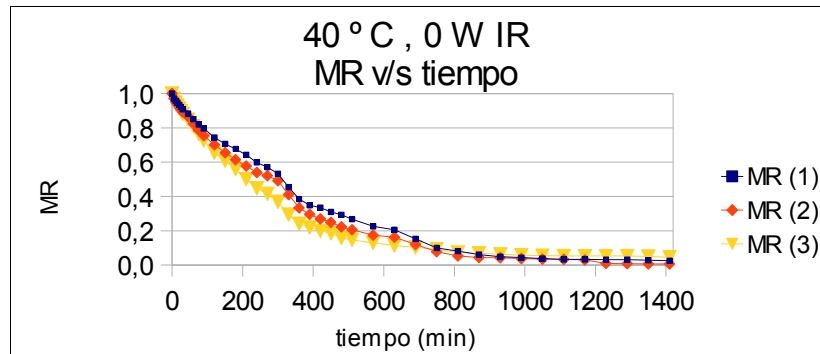


Figura 8.1: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 40 ° C y 0 W de infrarrojo.

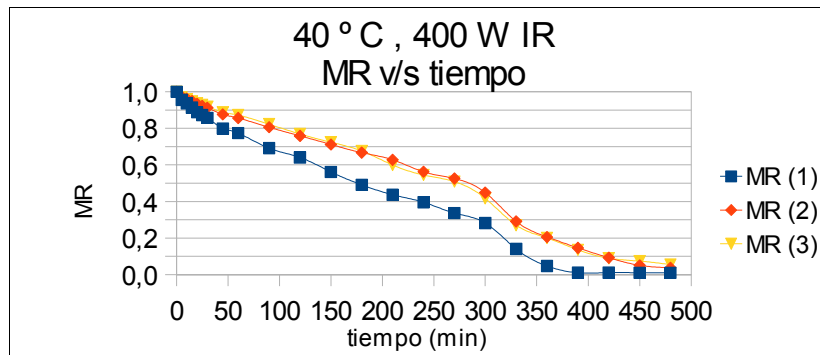


Figura 8.2: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 40 ° C y 400 W de infrarrojo.

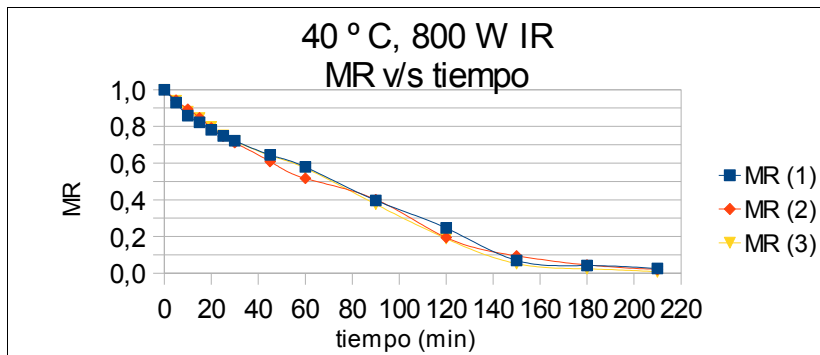


Figura 8.3: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 40 ° C y 800 W de infrarrojo.

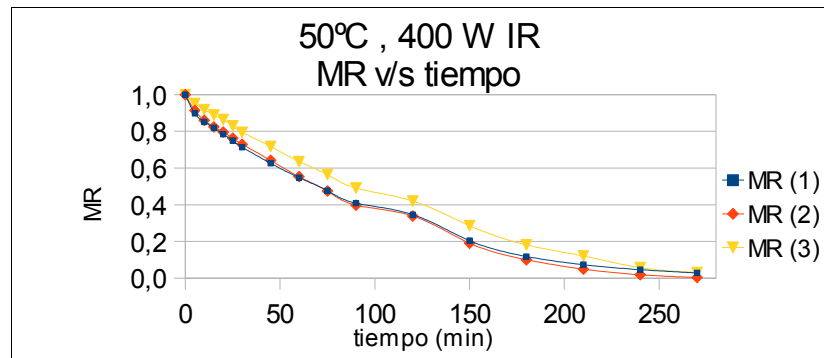


Figura 8.4: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 50 ° C y 0 W de infrarrojo.

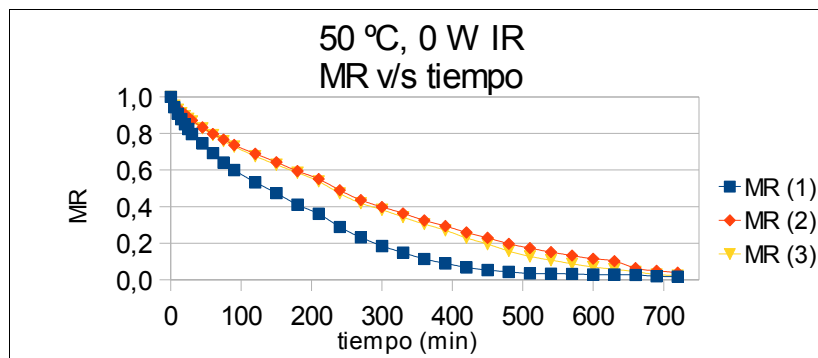


Figura 8.5: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 50 ° C y 400 W de infrarrojo.

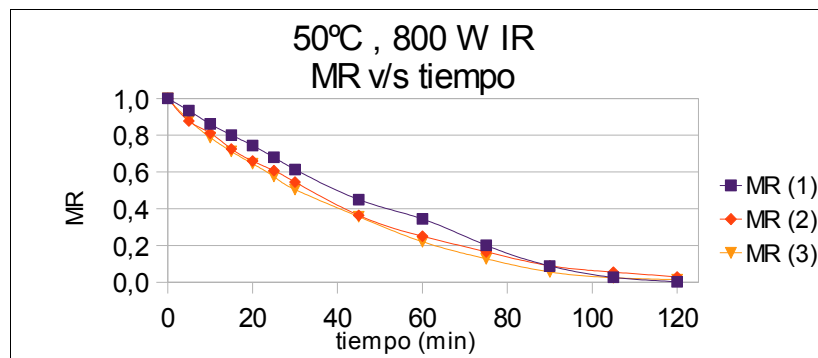


Figura 8.6: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 50 ° C y 800 W de infrarrojo.

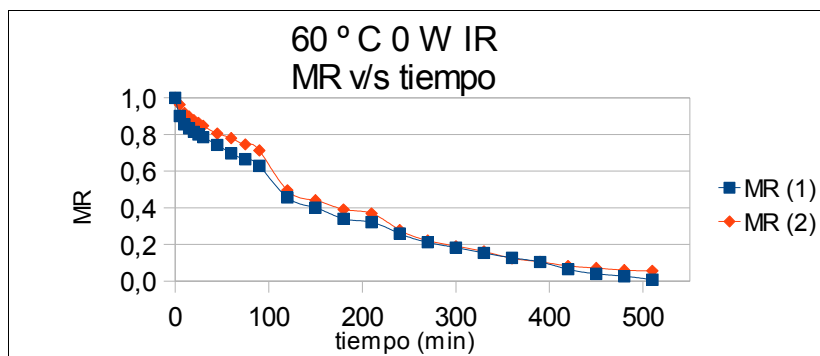


Figura 8.7: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 60 ° C y 0 W de infrarrojo.

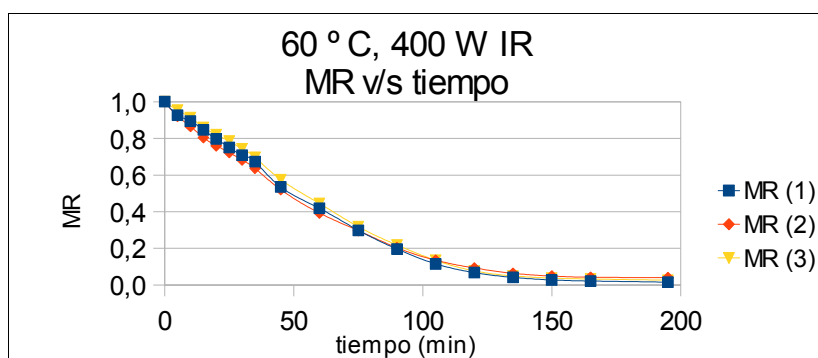


Figura 8.8: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 60 ° C y 400 W de infrarrojo.

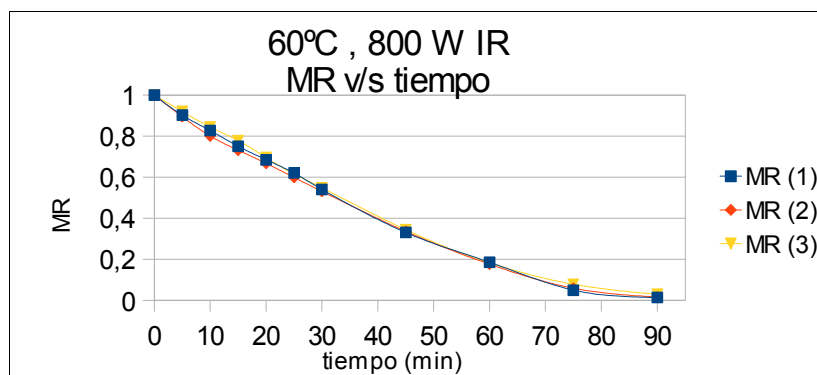


Figura 8.9: Pérdida de humedad del fruto de murtilla a 60 ° C y 800 W de infrarrojo.

**Anexo 2:** Estadísticos y constantes cinéticas para modelos matemáticos.

Tabla 8.1: Constantes obtenidas para el modelo de Newton y parámetros estadísticos

<b>MR = exp (-k · t)</b>					
	k	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C ,0 W IR	0,0029	0,9966	0,00042	0,02023	0,00041
2. 40 ° C ,400 W IR	0,0037	0,9404	0,00695	0,08153	0,00665
3. 40 ° C ,800 W IR	0,0120	0,9812	0,00230	0,04624	0,00214
4. 50 ° C ,0 W IR	0,0040	0,9932	0,00076	0,02721	0,00074
5. 50 ° C ,400 W IR	0,0098	0,9906	0,00105	0,03140	0,00099
6. 50 ° C ,800 W IR	0,0022	0,9874	0,00149	0,03709	0,00138
7. 60 ° C ,0 W IR	0,0056	0,9908	0,00105	0,03176	0,00101
8. 60 ° C ,400 W IR	0,0015	0,9795	0,00277	0,05132	0,00263
9. 60 ° C ,800 W IR	0,0024	0,9669	0,00387	0,05929	0,00352
<b>Promedios</b>		<b>0,9807</b>	<b>0,00230</b>	<b>0,04290</b>	<b>0,00216</b>

Tabla 8.2. Constantes obtenidas para el modelo de Henderson-Pabis y parámetros estadísticos

<b>MR = a·exp (-k · t)</b>						
	a	k	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C ,0 W IR	0,9903	0,0029	0,9968	0,00041	0,01975	0,00039
2. 40 ° C ,400 W IR	1,0252	0,0039	0,9421	0,00707	0,08035	0,00646
3. 40 ° C ,800 W IR	1,0172	0,0124	0,9818	0,00241	0,04541	0,00206
4. 50 ° C ,0 W IR	0,9711	0,0038	0,9950	0,00059	0,02346	0,00055
5. 50 ° C ,400 W IR	0,9918	0,0097	0,9908	0,00110	0,03113	0,00097
6. 50 ° C ,800 W IR	1,0327	0,0228	0,9893	0,00138	0,03422	0,00117
7. 60 ° C ,0 W IR	0,9717	0,0054	0,9925	0,00089	0,02858	0,00082
8. 60 ° C ,400 W IR	1,0665	0,0166	0,9852	0,00211	0,04362	0,00190
9. 60 ° C ,800 W IR	1,0577	0,0257	0,9734	0,00344	0,05309	0,00282
<b>Promedios</b>			<b>0,9830</b>	<b>0,00216</b>	<b>0,03995</b>	<b>0,00190</b>



Tabla 8.3. Constantes obtenidas para el modelo logarítmico y parámetros estadísticos.

<b>MR = a·exp (-k · t) + c</b>							
	a	k	c	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C, 0 W IR	0,9987	0,0028	-0,0107	0,9984	0,00040	0,01935	0,00037
2. 40 ° C, 400 W IR	1,2412	0,0051	-0,1810	0,9954	0,00118	0,03199	0,00102
3. 40 ° C, 800 W IR	1,2502	0,0077	-0,2677	0,9973	0,00076	0,02451	0,00060
4. 50 ° C, 0 W IR	1,0523	0,0031	-0,0974	0,9991	0,00021	0,01369	0,00019
5. 50 ° C, 400 W IR	1,1317	0,0070	-0,1646	0,9987	0,00032	0,01631	0,00027
6. 50 ° C , 800 W IR	1,1749	0,0162	-0,1757	0,9995	0,00014	0,01044	0,00011
7. 60 ° C, 0 W IR	1,0361	0,0045	-0,0782	0,9974	0,00065	0,02392	0,00057
8. 60 ° C, 400 W IR	1,1114	0,0145	-0,0612	0,9944	0,00168	0,03781	0,00143
9. 60 ° C, 800 W IR	1,4635	0,0133	-0,4543	0,9986	0,00040	0,01696	0,00029
<b>Promedios</b>				<b>0,9976</b>	<b>0,00064</b>	<b>0,02166</b>	<b>0,00054</b>

Tabla 8.4. Constantes obtenidas para el modelo Wang and Singh y parámetros estadísticos.

<b>MR = at<sup>2</sup> + bt + 1</b>						
	a	b	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C ,0 W IR	1,01x10 <sup>-6</sup>	-0,0020	0,9780	0,00278	0,05137	0,00264
2. 40 ° C ,400 W IR	4,79x10 <sup>-7</sup>	-0,0024	0,9886	0,00139	0,03557	0,00127
3. 40 ° C ,800 W IR	2,15x10 <sup>-5</sup>	-0,0092	0,9942	0,00077	0,02566	0,00066
4. 50 ° C ,0 W IR	2,36x10 <sup>-6</sup>	-0,0030	0,9869	0,00152	0,03780	0,00143
5. 50 ° C ,400 W IR	1,50x10 <sup>-5</sup>	-0,0076	0,9900	0,00119	0,03238	0,00105
6. 50 ° C ,800 W IR	7,19x10 <sup>-5</sup>	-0,0167	0,9985	0,00019	0,01263	0,00016
7. 60 ° C ,0 W IR	4,86x10 <sup>-6</sup>	-0,0043	0,9830	0,00203	0,04321	0,00187
8. 60 ° C ,400 W IR	2,91x10 <sup>-5</sup>	-0,0110	0,9921	0,00112	0,03178	0,00101
9. 60 ° C ,800 W IR	7,70x10 <sup>-5</sup>	-0,0180	0,9987	0,00017	0,01180	0,00014
<b>Promedios</b>			<b>0,9900</b>	<b>0,00124</b>	<b>0,03136</b>	<b>0,00114</b>

Tabla 8.5. Constantes obtenidas para el modelo de Thompson y parámetros estadísticos.

<b>t = a·[Ln(MR)]<sup>2</sup> +b·Ln(MR)</b>						
	a	b	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C ,0 W IR	18,2069	-290,2380	0,9895	0,00109	0,03215	0,00103
2. 40 ° C ,400 W IR	-79,5144	-382,5405	0,9629	0,00939	0,09261	0,00858
3. 40 ° C ,800 W IR	-10,2436	-90,6583	0,9868	0,00176	0,03886	0,00151
4. 50 ° C ,0 W IR	-42,8040	-353,5941	0,9979	0,00566	0,07286	0,00531
5. 50 ° C ,400 W IR	-12,5643	-117,0596	0,9962	0,00214	0,04349	0,00189
6. 50 ° C ,800 W IR	-5,5713	-51,1584	0,9966	0,00135	0,03385	0,00115
7. 60 ° C ,0 W IR	-15,2792	-201,8804	0,9966	0,00145	0,03657	0,00134
8. 60 ° C ,400 W IR	1,7251	-48,6927	0,9538	0,01044	0,09695	0,00940
9. 60 ° C ,800 W IR	-6,2351	-46,6162	0,9889	0,00170	0,03733	0,00139
<b>Promedios</b>			<b>0,9855</b>	<b>0,00389</b>	<b>0,05385</b>	<b>0,00351</b>

Tabla 8.6. Constantes obtenidas para el modelo de Page Modificado y parámetros estadísticos.

<b>MR = exp [-(k · t)<sup>n</sup>]</b>						
	k	n	R <sup>2</sup>	X <sup>2</sup>	RMSE	SSE
1. 40 ° C ,0 W IR	0,00306	0,9137	0,9929	0,00084	0,02819	0,00079
2. 40 ° C ,400 W IR	0,00340	1,0166	0,9368	0,00825	0,08659	0,00750
3. 40 ° C ,800 W IR	0,01345	1,0908	0,9772	0,00286	0,04917	0,00242
4. 50 ° C ,0 W IR	0,00369	0,8786	0,9741	0,00176	0,04056	0,00164
5. 50 ° C ,400 W IR	0,01066	0,9682	0,9750	0,00190	0,04076	0,00166
6. 50 ° C ,800 W IR	0,02364	1,1522	0,9846	0,00111	0,03039	0,00092
7. 60 ° C ,0 W IR	0,00603	0,8600	0,9712	0,00209	0,04376	0,00191
8. 60 ° C ,400 W IR	0,01561	1,1643	0,9853	0,00098	0,02954	0,00087
9. 60 ° C ,800 W IR	0,02628	1,2685	0,9773	0,00172	0,03705	0,00137
<b>Promedios</b>			<b>0,9749</b>	<b>0,00239</b>	<b>0,04289</b>	<b>0,00212</b>

### Anexo 3: Resultados del análisis ANOVA para parámetros R<sup>2</sup>, X<sup>2</sup>, RMSE y SSE

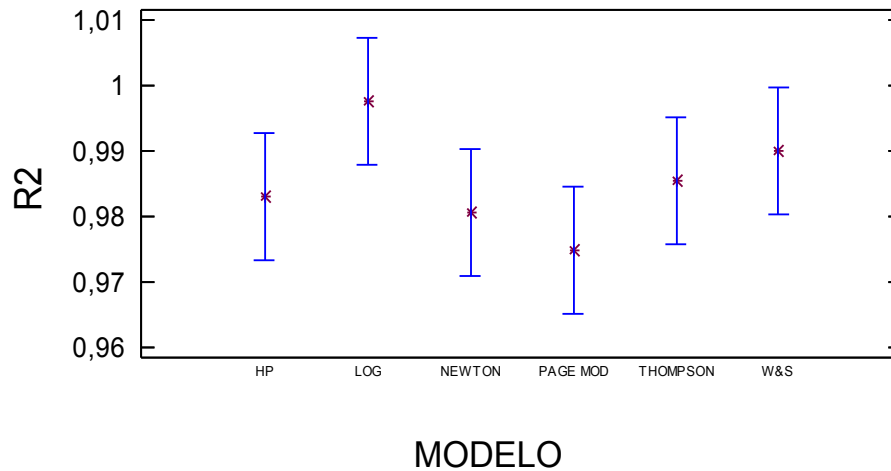
#### ANOVA Factorial - R<sup>2</sup>

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: R<sup>2</sup>  
Factores: MODELO

Número de casos completos: 54

#### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza para R<sup>2</sup> - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MODELO	0,0027735	5	0,000554699	2,89	0,0234
RESIDUOS	0,00922791	48	0,000192248		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0120014	53			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para R2  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	54	0,985294			
MODELO					
HP	9	0,982989	0,00462179	0,973696	0,992282
LOG	9	0,997644	0,00462179	0,988352	1,00694
NEWTON	9	0,980733	0,00462179	0,971441	0,990026
PAGE MOD	9	0,974933	0,00462179	0,965641	0,984226
THOMPSON	9	0,985467	0,00462179	0,976174	0,994759
W&S	9	0,99	0,00462179	0,980707	0,999293

Contraste Múltiple de Rangos para R2 según MODELO

Método: 95,0 porcentaje LSD

MODELO	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
PAGE MOD	9	0,974933	0,00462179	X
NEWTON	9	0,980733	0,00462179	XX
HP	9	0,982989	0,00462179	XX
THOMPSON	9	0,985467	0,00462179	XXX
W&S	9	0,99	0,00462179	XX
LOG	9	0,997644	0,00462179	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
HP - LOG	*-0,0146556	0,0131419
HP - NEWTON	0,00225556	0,0131419
HP - PAGE MOD	0,00805556	0,0131419
HP - THOMPSON	-0,00247778	0,0131419
HP - W&S	-0,00701111	0,0131419
LOG - NEWTON	*0,0169111	0,0131419
LOG - PAGE MOD	*0,0227111	0,0131419
LOG - THOMPSON	0,0121778	0,0131419
LOG - W&S	0,00764444	0,0131419
NEWTON - PAGE MOD	0,0058	0,0131419
NEWTON - THOMPSON	-0,00473333	0,0131419
NEWTON - W&S	-0,00926667	0,0131419
PAGE MOD - THOMPSON	-0,0105333	0,0131419
PAGE MOD - W&S	*-0,0150667	0,0131419
THOMPSON - W&S	-0,00453333	0,0131419

\* indica una diferencia significativa.

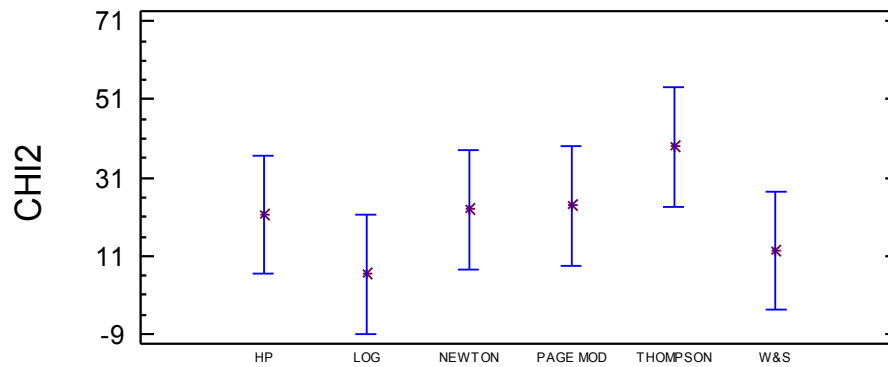
## ANOVA Factorial - X<sup>2</sup>

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: CHI2  
Factores: MODELO

Número de casos completos: 54

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



### MODELO

Análisis de la Varianza para CHI2 - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:MODELO	0,0000557577	5	0,0000111515	2,36	0,0542
RESIDUOS	0,000226992	48	0,000004729		
TOTAL (CORREGIDO)	0,00028275	53			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para CHI2  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	54	0,00210093			
<b>MODELO</b>					
HP	9	0,00215556	0,000724876	0,000698092	0,00361302
LOG	9	0,000637778	0,000724876	-0,000819686	0,00209524
NEWTON	9	0,00229556	0,000724876	0,000838092	0,00375302
PAGE MOD	9	0,00239	0,000724876	0,000932537	0,00384746
THOMPSON	9	0,00388667	0,000724876	0,0024292	0,00534413
W&S	9	0,00124	0,000724876	-0,000217463	0,00269746

Contraste Múltiple de Rangos para CHI2 según MODELO

```

-----
Método: 95,0 porcentaje LSD
MODELO      Recuento  Media LS      Sigma LS      Grupos Homogéneos
-----
LOG          9          0,000637778  0,000724876  X
W&S          9          0,00124      0,000724876  X
HP           9          0,00215556   0,000724876  XX
NEWTON       9          0,00229556   0,000724876  XX
PAGE MOD     9          0,00239      0,000724876  XX
THOMPSON     9          0,00388667   0,000724876  X
-----
Contraste                                Diferencias      +/- Límites
-----
HP - LOG                                     0,00151778        0,00206116
HP - NEWTON                                -0,00014          0,00206116
HP - PAGE MOD                              -0,000234444      0,00206116
HP - THOMPSON                              -0,00173111       0,00206116
HP - W&S                                    0,000915556       0,00206116
LOG - NEWTON                               -0,00165778       0,00206116
LOG - PAGE MOD                             -0,00175222       0,00206116
LOG - THOMPSON                             *-0,00324889      0,00206116
LOG - W&S                                  -0,000602222     0,00206116
NEWTON - PAGE MOD                          -0,0000944444    0,00206116
NEWTON - THOMPSON                          -0,00159111      0,00206116
NEWTON - W&S                               0,00105556       0,00206116
PAGE MOD - THOMPSON                        -0,00149667      0,00206116
PAGE MOD - W&S                             0,00115          0,00206116
THOMPSON - W&S                             *0,00264667      0,00206116
-----

```

\* indica una diferencia significativa.

## ANOVA Factorial - RMSE

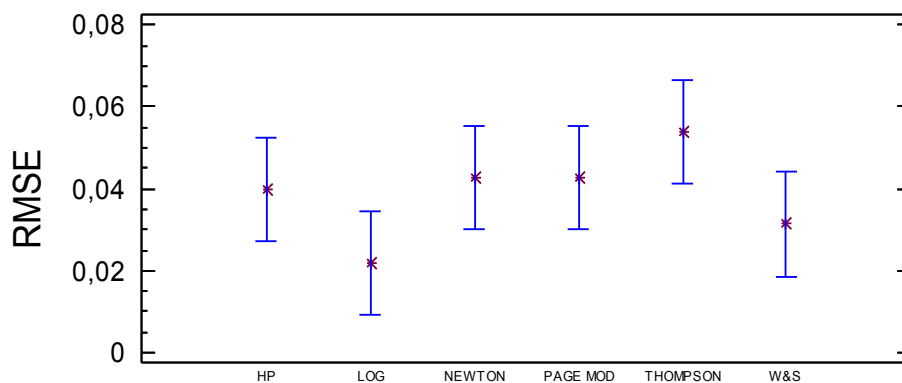
Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: RMSE

Factores: MODELO

Número de casos completos: 54

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



## MODELO

Análisis de la Varianza para RMSE - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MODELO	0,00549413	5	0,00109883	3,36	0,0111
RESIDUOS	0,0156948	48	0,000326974		
TOTAL (CORREGIDO)	0,0211889	53			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para RMSE con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	54	0,0387693			
MODELO					
HP	9	0,0399567	0,00602748	0,0278376	0,0520757
LOG	9	0,0216644	0,00602748	0,00954537	0,0337835
NEWTON	9	0,0428967	0,00602748	0,0307776	0,0550157
PAGE MOD	9	0,04289	0,00602748	0,0307709	0,0550091
THOMPSON	9	0,0538522	0,00602748	0,0417331	0,0659713
W&S	9	0,0313556	0,00602748	0,0192365	0,0434746



Método: 95,0 porcentaje LSD				
MODELO	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
LOG	9	0,0216644	0,00602748	X
W&S	9	0,0313556	0,00602748	XX
HP	9	0,0399567	0,00602748	XX
PAGE MOD	9	0,04289	0,00602748	XX
NEWTON	9	0,0428967	0,00602748	XX
THOMPSON	9	0,0538522	0,00602748	X
Contraste			Diferencias	+/- Límites
HP - LOG			*0,0182922	0,017139
HP - NEWTON			-0,00294	0,017139
HP - PAGE MOD			-0,00293333	0,017139
HP - THOMPSON			-0,0138956	0,017139
HP - W&S			0,00860111	0,017139
LOG - NEWTON			*-0,0212322	0,017139
LOG - PAGE MOD			*-0,0212256	0,017139
LOG - THOMPSON			*-0,0321878	0,017139
LOG - W&S			-0,00969111	0,017139
NEWTON - PAGE MOD			0,00000666667	0,017139
NEWTON - THOMPSON			-0,0109556	0,017139
NEWTON - W&S			0,0115411	0,017139
PAGE MOD - THOMPSON			-0,0109622	0,017139
PAGE MOD - W&S			0,0115344	0,017139
THOMPSON - W&S			*0,0224967	0,017139

\* indica una diferencia significativa.

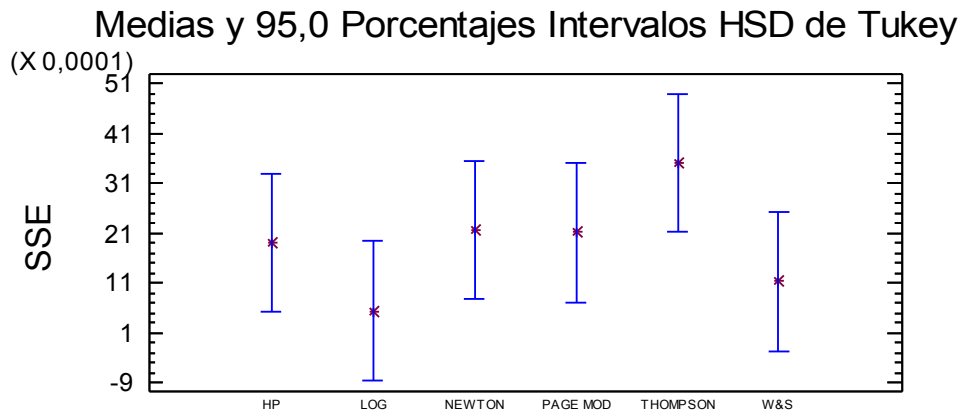
## ANOVA Factorial - SSE

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: SSE

Factores: MODELO

Número de casos completos: 54



### MODELO

Análisis de la Varianza para SSE - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:MODELO	0,0000463377	5	0,00000926754	2,32	0,0574
RESIDUOS	0,000191579	48	0,00000399123		
TOTAL (CORREGIDO)	0,000237917	53			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para SSE  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	54	0,00189574			
MODELO					
HP	9	0,00190444	0,000665936	0,000565488	0,0032434
LOG	9	0,000538889	0,000665936	-0,000800067	0,00187785
NEWTON	9	0,00216333	0,000665936	0,000824377	0,00350229
PAGE MOD	9	0,00212	0,000665936	0,000781044	0,00345896
THOMPSON	9	0,00351111	0,000665936	0,00217215	0,00485007
W&S	9	0,00113667	0,000665936	-0,000202289	0,00247562

Contraste Múltiple de Rangos para SSE según MODELO

```

-----
Método: 95,0 porcentaje LSD
MODELO      Recuento  Media LS      Sigma LS      Grupos Homogéneos
-----
LOG          9          0,000538889  0,000665936  X
W&S         9          0,00113667   0,000665936  X
HP           9          0,00190444   0,000665936  XX
PAGE MOD    9          0,00212      0,000665936  XX
NEWTON      9          0,00216333   0,000665936  XX
THOMPSON    9          0,00351111   0,000665936  X
-----
Contraste                                     Diferencias      +/- Límites
-----
HP - LOG                                       0,00136556       0,00189357
HP - NEWTON                                  -0,000258889     0,00189357
HP - PAGE MOD                                -0,000215556     0,00189357
HP - THOMPSON                                -0,00160667      0,00189357
HP - W&S                                       0,000767778     0,00189357
LOG - NEWTON                                  -0,00162444     0,00189357
LOG - PAGE MOD                                -0,00158111     0,00189357
LOG - THOMPSON                               *-0,00297222     0,00189357
LOG - W&S                                       -0,000597778     0,00189357
NEWTON - PAGE MOD                             0,0000433333     0,00189357
NEWTON - THOMPSON                             -0,00134778     0,00189357
NEWTON - W&S                                    0,00102667      0,00189357
PAGE MOD - THOMPSON                           -0,00139111     0,00189357
PAGE MOD - W&S                                 0,000983333     0,00189357
THOMPSON - W&S                               *0,00237444     0,00189357
-----

```

\* indica una diferencia significativa.

## Anexo 4: Resultados del Análisis ANOVA para parámetros de color L\*, a\* y b\*.

### ANOVA Factorial - L\*

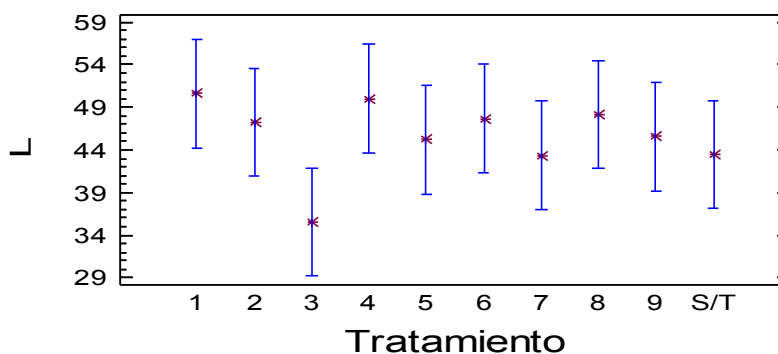
Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: L

Factores: Tratamiento

Número de casos completos: 30

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza para L - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
<b>EFFECTOS PRINCIPALES</b>					
A:Tratamiento	506,422	9	56,2691	2,91	0,0224
RESIDUOS	386,987	20	19,3494		
TOTAL (CORREGIDO)	893,409	29			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para L con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	30	45,6826			
<b>Tratamiento</b>					
1	3	50,621	2,53964	45,3234	55,9186
2	3	47,2547	2,53964	41,9571	52,5523
3	3	35,5463	2,53964	30,2487	40,8439
4	3	49,9907	2,53964	44,6931	55,2883
5	3	45,225	2,53964	39,9274	50,5226
6	3	47,6783	2,53964	42,3807	52,9759
7	3	43,3293	2,53964	38,0317	48,6269
8	3	48,149	2,53964	42,8514	53,4466
9	3	45,5427	2,53964	40,2451	50,8403
S/T	3	43,489	2,53964	38,1914	48,7866

Contraste Múltiple de Rangos para L según Tratamiento

-----				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
-----				
3	3	35,5463	2,53964	X
7	3	43,3293	2,53964	X
S/T	3	43,489	2,53964	X
5	3	45,225	2,53964	X
9	3	45,5427	2,53964	X
2	3	47,2547	2,53964	X
6	3	47,6783	2,53964	X
8	3	48,149	2,53964	X
4	3	49,9907	2,53964	X
1	3	50,621	2,53964	X
-----				
Contraste			Diferencias	+/- Límites
-----				
1 - 2			3,36633	7,49196
1 - 3			*15,0747	7,49196
1 - 4			0,630333	7,49196
1 - 5			5,396	7,49196
1 - 6			2,94267	7,49196
1 - 7			7,29167	7,49196
1 - 8			2,472	7,49196
1 - 9			5,07833	7,49196
1 - S/T			7,132	7,49196
2 - 3			*11,7083	7,49196
2 - 4			-2,736	7,49196
2 - 5			2,02967	7,49196
2 - 6			-0,423667	7,49196
2 - 7			3,92533	7,49196
2 - 8			-0,894333	7,49196
2 - 9			1,712	7,49196
2 - S/T			3,76567	7,49196
3 - 4			*-14,4443	7,49196
3 - 5			*-9,67867	7,49196
3 - 6			*-12,132	7,49196
3 - 7			*-7,783	7,49196
3 - 8			*-12,6027	7,49196
3 - 9			*-9,99633	7,49196
3 - S/T			*-7,94267	7,49196
4 - 5			4,76567	7,49196
4 - 6			2,31233	7,49196
4 - 7			6,66133	7,49196
4 - 8			1,84167	7,49196
4 - 9			4,448	7,49196
4 - S/T			6,50167	7,49196
5 - 6			-2,45333	7,49196
5 - 7			1,89567	7,49196
5 - 8			-2,924	7,49196
5 - 9			-0,317667	7,49196
5 - S/T			1,736	7,49196
6 - 7			4,349	7,49196
6 - 8			-0,470667	7,49196
6 - 9			2,13567	7,49196
6 - S/T			4,18933	7,49196
7 - 8			-4,81967	7,49196
7 - 9			-2,21333	7,49196
7 - S/T			-0,159667	7,49196
8 - 9			2,60633	7,49196
8 - S/T			4,66	7,49196
9 - S/T			2,05367	7,49196
-----				

\* indica una diferencia significativa.

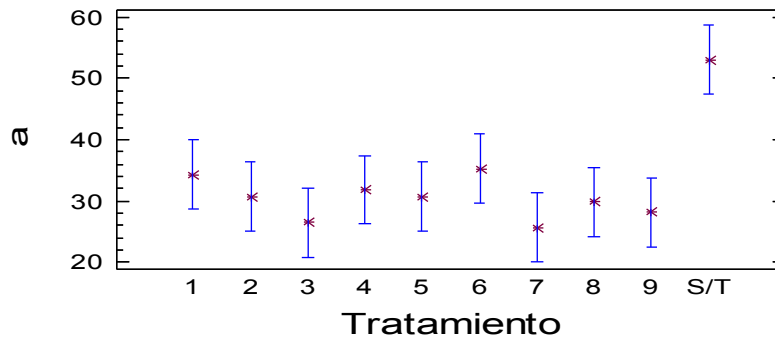
## ANOVA Factorial - a\*

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: a  
Factores: Tratamiento

Número de casos completos: 30

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza para a - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Tratamiento	1642,72	9	182,525	12,05	0,0000
RESIDUOS	302,826	20	15,1413		
TOTAL (CORREGIDO)	1945,55	29			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para a  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	30	32,5964			
Tratamiento					
1	3	34,3153	2,24658	29,629	39,0016
2	3	30,657	2,24658	25,9707	35,3433
3	3	26,541	2,24658	21,8547	31,2273
4	3	31,8433	2,24658	27,157	36,5296
5	3	30,6573	2,24658	25,971	35,3436
6	3	35,2877	2,24658	30,6014	39,974
7	3	25,6563	2,24658	20,97	30,3426
8	3	29,8667	2,24658	25,1804	34,553
9	3	28,1223	2,24658	23,436	32,8086
S/T	3	53,0167	2,24658	48,3304	57,703

Contraste Múltiple de Rangos para a según Tratamiento

-----				
Método: 95,0 porcentaje LSD				
Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
-----				
7	3	25,6563	2,24658	X
3	3	26,541	2,24658	X
9	3	28,1223	2,24658	XX
8	3	29,8667	2,24658	XXX
2	3	30,657	2,24658	XXX
5	3	30,6573	2,24658	XXX
4	3	31,8433	2,24658	XXX
1	3	34,3153	2,24658	XX
6	3	35,2877	2,24658	X
S/T	3	53,0167	2,24658	X
-----				
Contraste			Diferencias	+/- Límites
-----				
1 - 2			3,65833	6,62741
1 - 3			*7,77433	6,62741
1 - 4			2,472	6,62741
1 - 5			3,658	6,62741
1 - 6			-0,972333	6,62741
1 - 7			*8,659	6,62741
1 - 8			4,44867	6,62741
1 - 9			6,193	6,62741
1 - S/T			*-18,7013	6,62741
2 - 3			4,116	6,62741
2 - 4			-1,18633	6,62741
2 - 5			-0,000333333	6,62741
2 - 6			-4,63067	6,62741
2 - 7			5,00067	6,62741
2 - 8			0,790333	6,62741
2 - 9			2,53467	6,62741
2 - S/T			*-22,3597	6,62741
3 - 4			-5,30233	6,62741
3 - 5			-4,11633	6,62741
3 - 6			*-8,74667	6,62741
3 - 7			0,884667	6,62741
3 - 8			-3,32567	6,62741
3 - 9			-1,58133	6,62741
3 - S/T			*-26,4757	6,62741
4 - 5			1,186	6,62741
4 - 6			-3,44433	6,62741
4 - 7			6,187	6,62741
4 - 8			1,97667	6,62741
4 - 9			3,721	6,62741
4 - S/T			*-21,1733	6,62741
5 - 6			-4,63033	6,62741
5 - 7			5,001	6,62741
5 - 8			0,790667	6,62741
5 - 9			2,535	6,62741
5 - S/T			*-22,3593	6,62741
6 - 7			*9,63133	6,62741
6 - 8			5,421	6,62741
6 - 9			*7,16533	6,62741
6 - S/T			*-17,729	6,62741
7 - 8			-4,21033	6,62741
7 - 9			-2,466	6,62741
7 - S/T			*-27,3603	6,62741
8 - 9			1,74433	6,62741
8 - S/T			*-23,15	6,62741
9 - S/T			*-24,8943	6,62741
-----				

\* indica una diferencia significativa.

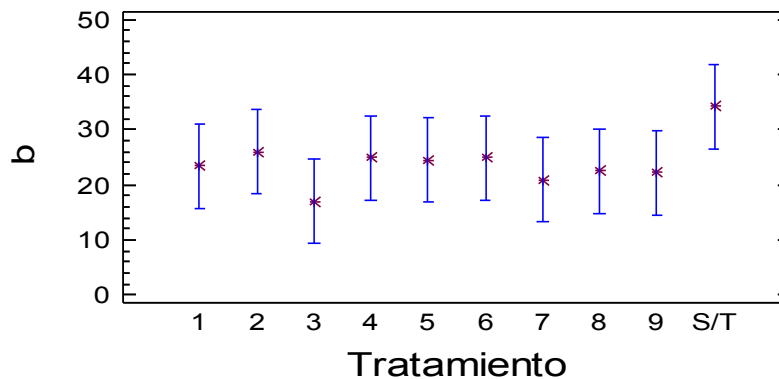
## ANOVA Factorial - b\*

ANOVA Factorial - bResumen del Procedimiento

Variable dependiente: b  
Factores: Tratamiento

Número de casos completos: 30

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza parab - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	520,274	9	57,8082	2,06	0,0857
RESIDUOS	561,563	20	28,0781		
TOTAL (CORREGIDO)	1081,84	29			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para b  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	30	24,054			
Tratamiento					
1	3	23,473	3,05931	17,0914	29,8546
2	3	25,942	3,05931	19,5604	32,3236
3	3	17,0413	3,05931	10,6597	23,423
4	3	24,8563	3,05931	18,4747	31,238
5	3	24,458	3,05931	18,0764	30,8396
6	3	24,8533	3,05931	18,4717	31,235
7	3	20,913	3,05931	14,5314	27,2946
8	3	22,554	3,05931	16,1724	28,9356
9	3	22,2243	3,05931	15,8427	28,606
S/T	3	34,2243	3,05931	27,8427	40,606



Contraste Múltiple de Rangos para b según Tratamiento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
3	3	17,0413	3,05931	X
7	3	20,913	3,05931	X
9	3	22,2243	3,05931	X
8	3	22,554	3,05931	X
1	3	23,473	3,05931	X
5	3	24,458	3,05931	X
6	3	24,8533	3,05931	X
4	3	24,8563	3,05931	X
2	3	25,942	3,05931	XX
S/T	3	34,2243	3,05931	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	-2,469	9,02498
1 - 3	6,43167	9,02498
1 - 4	-1,38333	9,02498
1 - 5	-0,985	9,02498
1 - 6	-1,38033	9,02498
1 - 7	2,56	9,02498
1 - 8	0,919	9,02498
1 - 9	1,24867	9,02498
1 - S/T	*-10,7513	9,02498
2 - 3	8,90067	9,02498
2 - 4	1,08567	9,02498
2 - 5	1,484	9,02498
2 - 6	1,08867	9,02498
2 - 7	5,029	9,02498
2 - 8	3,388	9,02498
2 - 9	3,71767	9,02498
2 - S/T	-8,28233	9,02498
3 - 4	-7,815	9,02498
3 - 5	-7,41667	9,02498
3 - 6	-7,812	9,02498
3 - 7	-3,87167	9,02498
3 - 8	-5,51267	9,02498
3 - 9	-5,183	9,02498
3 - S/T	*-17,183	9,02498
4 - 5	0,398333	9,02498
4 - 6	0,003	9,02498
4 - 7	3,94333	9,02498
4 - 8	2,30233	9,02498
4 - 9	2,632	9,02498
4 - S/T	*-9,368	9,02498
5 - 6	-0,395333	9,02498
5 - 7	3,545	9,02498
5 - 8	1,904	9,02498
5 - 9	2,23367	9,02498
5 - S/T	*-9,76633	9,02498
6 - 7	3,94033	9,02498
6 - 8	2,29933	9,02498
6 - 9	2,629	9,02498
6 - S/T	*-9,371	9,02498
7 - 8	-1,641	9,02498
7 - 9	-1,31133	9,02498
7 - S/T	*-13,3113	9,02498
8 - 9	0,329667	9,02498
8 - S/T	*-11,6703	9,02498
9 - S/T	*-12,0	9,02498

\* indica una diferencia significativa.

**Anexo 5: Resultados del Análisis ANOVA para la variación de los parámetros L\*, a\*, b\* y para el cambio total de color  $\Delta E$ .**

**ANOVA Factorial  $\Delta L$**

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: dL  
Factores: Tratamiento  
Número de casos completos: 27

Análisis de la Varianza para dL - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	91,1705	8	11,3963	0,68	0,7062
RESIDUOS	303,261	18	16,8478		
TOTAL (CORREGIDO)	394,432	26			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

**Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey**

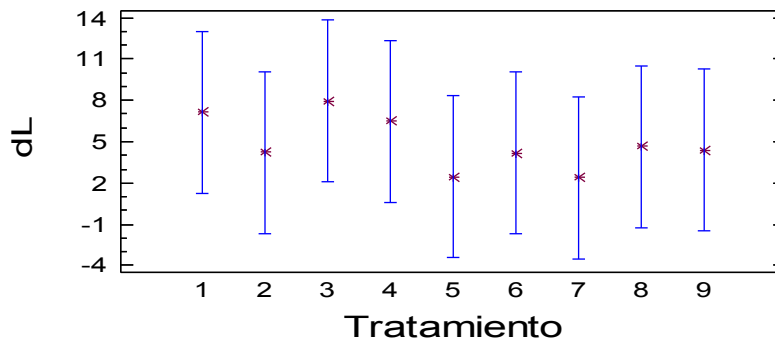


Tabla de Medias por mínimos cuadrados para dL con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	27	4,87533			
Tratamiento					
1	3	7,132	2,3698	2,15323	12,1108
2	3	4,238	2,3698	-0,740773	9,21677
3	3	7,94233	2,3698	2,96356	12,9211
4	3	6,50233	2,3698	1,52356	11,4811
5	3	2,43333	2,3698	-2,54544	7,41211
6	3	4,18933	2,3698	-0,789439	9,16811
7	3	2,40367	2,3698	-2,57511	7,38244
8	3	4,66	2,3698	-0,318773	9,63877
9	3	4,377	2,3698	-0,601773	9,35577

-----  
 Contraste Múltiple de Rangos para dL según Tratamiento  
 -----

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
7	3	2,40367	2,3698	X
5	3	2,43333	2,3698	X
6	3	4,18933	2,3698	X
2	3	4,238	2,3698	X
9	3	4,377	2,3698	X
8	3	4,66	2,3698	X
4	3	6,50233	2,3698	X
1	3	7,132	2,3698	X
3	3	7,94233	2,3698	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	2,894	7,04105
1 - 3	-0,810333	7,04105
1 - 4	0,629667	7,04105
1 - 5	4,69867	7,04105
1 - 6	2,94267	7,04105
1 - 7	4,72833	7,04105
1 - 8	2,472	7,04105
1 - 9	2,755	7,04105
2 - 3	-3,70433	7,04105
2 - 4	-2,26433	7,04105
2 - 5	1,80467	7,04105
2 - 6	0,0486667	7,04105
2 - 7	1,83433	7,04105
2 - 8	-0,422	7,04105
2 - 9	-0,139	7,04105
3 - 4	1,44	7,04105
3 - 5	5,509	7,04105
3 - 6	3,753	7,04105
3 - 7	5,53867	7,04105
3 - 8	3,28233	7,04105
3 - 9	3,56533	7,04105
4 - 5	4,069	7,04105
4 - 6	2,313	7,04105
4 - 7	4,09867	7,04105
4 - 8	1,84233	7,04105
4 - 9	2,12533	7,04105
5 - 6	-1,756	7,04105
5 - 7	0,0296667	7,04105
5 - 8	-2,22667	7,04105
5 - 9	-1,94367	7,04105
6 - 7	1,78567	7,04105
6 - 8	-0,470667	7,04105
6 - 9	-0,187667	7,04105
7 - 8	-2,25633	7,04105
7 - 9	-1,97333	7,04105
8 - 9	0,283	7,04105

-----  
 \* indica una diferencia significativa.

## ANOVA Factorial - $\Delta a$

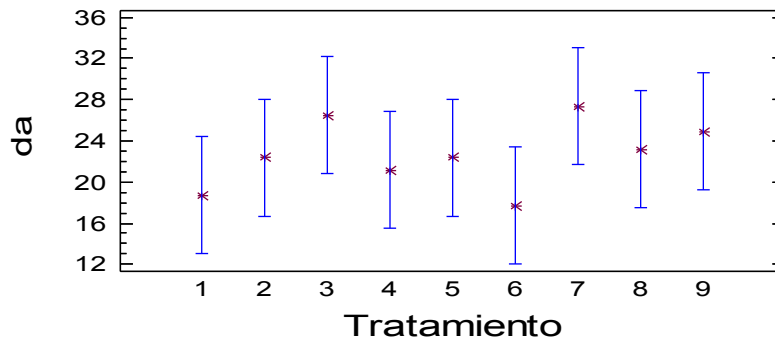
Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: da

Factores: Tratamiento

Número de casos completos: 27

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza parada - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	252,743	8	31,5929	2,01	0,1040
RESIDUOS	282,646	18	15,7026		
TOTAL (CORREGIDO)	535,39	26			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para da con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	27	22,689			
Tratamiento					
1	3	18,7013	2,28784	13,8948	23,5079
2	3	22,359	2,28784	17,5524	27,1656
3	3	26,475	2,28784	21,6684	31,2816
4	3	21,1733	2,28784	16,3668	25,9799
5	3	22,3593	2,28784	17,5528	27,1659
6	3	17,7287	2,28784	12,9221	22,5352
7	3	27,36	2,28784	22,5534	32,1666
8	3	23,15	2,28784	18,3434	27,9566
9	3	24,894	2,28784	20,0874	29,7006

Contraste Múltiple de Rangos para da según Tratamiento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
6	3	17,7287	2,28784	X
1	3	18,7013	2,28784	XX
4	3	21,1733	2,28784	XXX
2	3	22,359	2,28784	XXX
5	3	22,3593	2,28784	XXX
8	3	23,15	2,28784	XXX
9	3	24,894	2,28784	XX
3	3	26,475	2,28784	X
7	3	27,36	2,28784	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	-3,65767	6,79752
1 - 3	*-7,77367	6,79752
1 - 4	-2,472	6,79752
1 - 5	-3,658	6,79752
1 - 6	0,972667	6,79752
1 - 7	*-8,65867	6,79752
1 - 8	-4,44867	6,79752
1 - 9	-6,19267	6,79752
2 - 3	-4,116	6,79752
2 - 4	1,18567	6,79752
2 - 5	-0,000333333	6,79752
2 - 6	4,63033	6,79752
2 - 7	-5,001	6,79752
2 - 8	-0,791	6,79752
2 - 9	-2,535	6,79752
3 - 4	5,30167	6,79752
3 - 5	4,11567	6,79752
3 - 6	*8,74633	6,79752
3 - 7	-0,885	6,79752
3 - 8	3,325	6,79752
3 - 9	1,581	6,79752
4 - 5	-1,186	6,79752
4 - 6	3,44467	6,79752
4 - 7	-6,18667	6,79752
4 - 8	-1,97667	6,79752
4 - 9	-3,72067	6,79752
5 - 6	4,63067	6,79752
5 - 7	-5,00067	6,79752
5 - 8	-0,790667	6,79752
5 - 9	-2,53467	6,79752
6 - 7	*-9,63133	6,79752
6 - 8	-5,42133	6,79752
6 - 9	*-7,16533	6,79752
7 - 8	4,21	6,79752
7 - 9	2,466	6,79752
8 - 9	-1,744	6,79752

\* indica una diferencia significativa.

## ANOVA Factorial - Δb

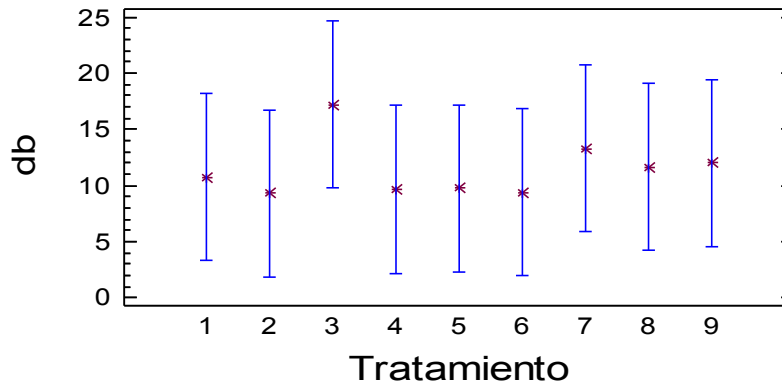
Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: db

Factores: Tratamiento

Número de casos completos: 27

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza para db - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Tratamiento	156,393	8	19,5491	0,73	0,6658
RESIDUOS	483,314	18	26,8508		
TOTAL (CORREGIDO)	639,707	26			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para db  
con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	27	11,4463			
Tratamiento					
1	3	10,7513	2,9917	4,46599	17,0367
2	3	9,30933	2,9917	3,02399	15,5947
3	3	17,1827	2,9917	10,8973	23,468
4	3	9,65433	2,9917	3,36899	15,9397
5	3	9,766	2,9917	3,48066	16,0513
6	3	9,371	2,9917	3,08566	15,6563
7	3	13,311	2,9917	7,02566	19,5963
8	3	11,6707	2,9917	5,38533	17,956
9	3	12,0	2,9917	5,71466	18,2853

Contraste Múltiple de Rangos para db según Tratamiento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
2	3	9,30933	2,9917	X
6	3	9,371	2,9917	X
4	3	9,65433	2,9917	X
5	3	9,766	2,9917	X
1	3	10,7513	2,9917	X
8	3	11,6707	2,9917	X
9	3	12,0	2,9917	X
7	3	13,311	2,9917	X
3	3	17,1827	2,9917	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	1,442	8,88881
1 - 3	-6,43133	8,88881
1 - 4	1,097	8,88881
1 - 5	0,985333	8,88881
1 - 6	1,38033	8,88881
1 - 7	-2,55967	8,88881
1 - 8	-0,919333	8,88881
1 - 9	-1,24867	8,88881
2 - 3	-7,87333	8,88881
2 - 4	-0,345	8,88881
2 - 5	-0,456667	8,88881
2 - 6	-0,0616667	8,88881
2 - 7	-4,00167	8,88881
2 - 8	-2,36133	8,88881
2 - 9	-2,69067	8,88881
3 - 4	7,52833	8,88881
3 - 5	7,41667	8,88881
3 - 6	7,81167	8,88881
3 - 7	3,87167	8,88881
3 - 8	5,512	8,88881
3 - 9	5,18267	8,88881
4 - 5	-0,111667	8,88881
4 - 6	0,283333	8,88881
4 - 7	-3,65667	8,88881
4 - 8	-2,01633	8,88881
4 - 9	-2,34567	8,88881
5 - 6	0,395	8,88881
5 - 7	-3,545	8,88881
5 - 8	-1,90467	8,88881
5 - 9	-2,234	8,88881
6 - 7	-3,94	8,88881
6 - 8	-2,29967	8,88881
6 - 9	-2,629	8,88881
7 - 8	1,64033	8,88881
7 - 9	1,311	8,88881
8 - 9	-0,329333	8,88881

\* indica una diferencia significativa.

## ANOVA Factorial - ΔE

Resumen del Procedimiento

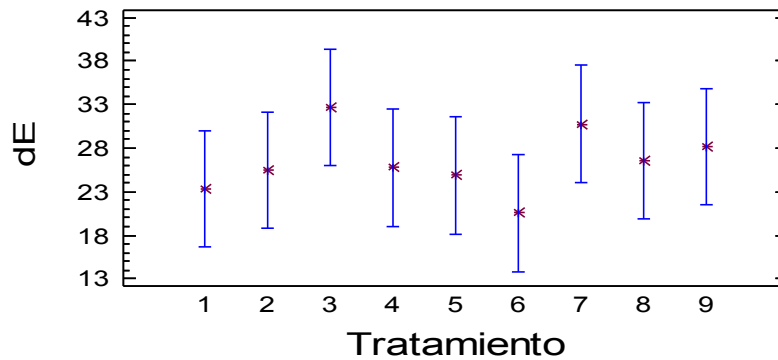
Variable dependiente: dE

Factores:

Tratamiento

Número de casos completos: 27

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey



Análisis de la Varianza para dE - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A: Tratamiento	330,213	8	41,2767	1,89	0,1243
RESIDUOS	392,527	18	21,8071		
TOTAL (CORREGIDO)	722,741	26			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

Tabla de Medias por mínimos cuadrados para dE con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	27	26,4753			
Tratamiento					
1	3	23,2953	2,69611	17,631	28,9597
2	3	25,4707	2,69611	19,8063	31,135
3	3	32,7263	2,69611	27,062	38,3907
4	3	25,7683	2,69611	20,104	31,4327
5	3	24,875	2,69611	19,2107	30,5393
6	3	20,5487	2,69611	14,8843	26,213
7	3	30,7893	2,69611	25,125	36,4537
8	3	26,577	2,69611	20,9127	32,2413
9	3	28,2267	2,69611	22,5623	33,891



Contraste Múltiple de Rangos para dE según Tratamiento

Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
6	3	20,5487	2,69611	X
1	3	23,2953	2,69611	XX
5	3	24,875	2,69611	XXX
2	3	25,4707	2,69611	XXX
4	3	25,7683	2,69611	XXX
8	3	26,577	2,69611	XXX
9	3	28,2267	2,69611	XXX
7	3	30,7893	2,69611	XX
3	3	32,7263	2,69611	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	-2,17533	8,01058
1 - 3	*-9,431	8,01058
1 - 4	-2,473	8,01058
1 - 5	-1,57967	8,01058
1 - 6	2,74667	8,01058
1 - 7	-7,494	8,01058
1 - 8	-3,28167	8,01058
1 - 9	-4,93133	8,01058
2 - 3	-7,25567	8,01058
2 - 4	-0,297667	8,01058
2 - 5	0,595667	8,01058
2 - 6	4,922	8,01058
2 - 7	-5,31867	8,01058
2 - 8	-1,10633	8,01058
2 - 9	-2,756	8,01058
3 - 4	6,958	8,01058
3 - 5	7,85133	8,01058
3 - 6	*12,1777	8,01058
3 - 7	1,937	8,01058
3 - 8	6,14933	8,01058
3 - 9	4,49967	8,01058
4 - 5	0,893333	8,01058
4 - 6	5,21967	8,01058
4 - 7	-5,021	8,01058
4 - 8	-0,808667	8,01058
4 - 9	-2,45833	8,01058
5 - 6	4,32633	8,01058
5 - 7	-5,91433	8,01058
5 - 8	-1,702	8,01058
5 - 9	-3,35167	8,01058
6 - 7	*-10,2407	8,01058
6 - 8	-6,02833	8,01058
6 - 9	-7,678	8,01058
7 - 8	4,21233	8,01058
7 - 9	2,56267	8,01058
8 - 9	-1,64967	8,01058

\* indica una diferencia significativa.

## Anexo 6: Resultados del Análisis ANOVA para polifenoles totales.

### ANOVA Factorial - Polifenoles

Resumen del Procedimiento

Variable dependiente: Polifenoles

Factores: Tratamiento

Análisis de la Varianza para Polifenoles - Sumas de Cuadrados de Tipo III

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Tratamiento	32,2225	9	3,58028	517,13	0,0000
RESIDUOS	0,138467	20	0,00692333		
TOTAL (CORREGIDO)	32,3609	29			

Los cocientes F están basados en el error cuadrático medio residual.

### Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos HSD de Tukey

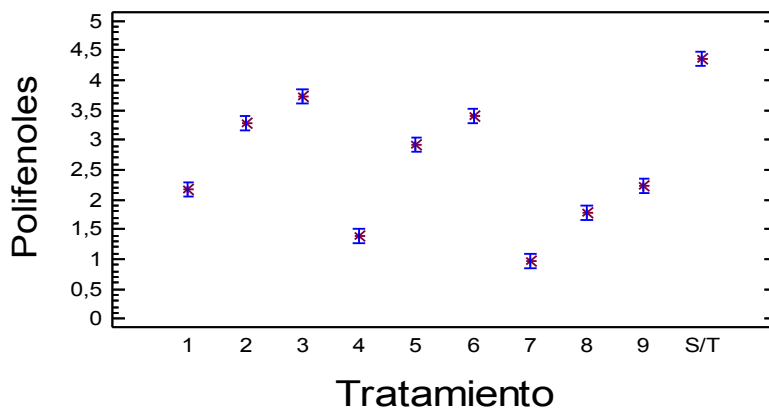


Tabla de Medias por mínimos cuadrados para Polifenoles con 95,0 Intervalos de confianza

Nivel	Frecuencia	Media	Error Estándar	Límite Inferior	Límite Superior
Media Total	30	2,62133			
Tratamiento					
1	3	2,16667	0,0480393	2,06646	2,26688
2	3	3,27	0,0480393	3,16979	3,37021
3	3	3,74	0,0480393	3,63979	3,84021
4	3	1,4	0,0480393	1,29979	1,50021
5	3	2,93333	0,0480393	2,83312	3,03354
6	3	3,41	0,0480393	3,30979	3,51021
7	3	0,956667	0,0480393	0,856458	1,05688
8	3	1,76667	0,0480393	1,66646	1,86688
9	3	2,22	0,0480393	2,11979	2,32021
S/T	3	4,35	0,0480393	4,24979	4,45021

Contraste Múltiple de Rangos para Polifenoles según Tratamiento

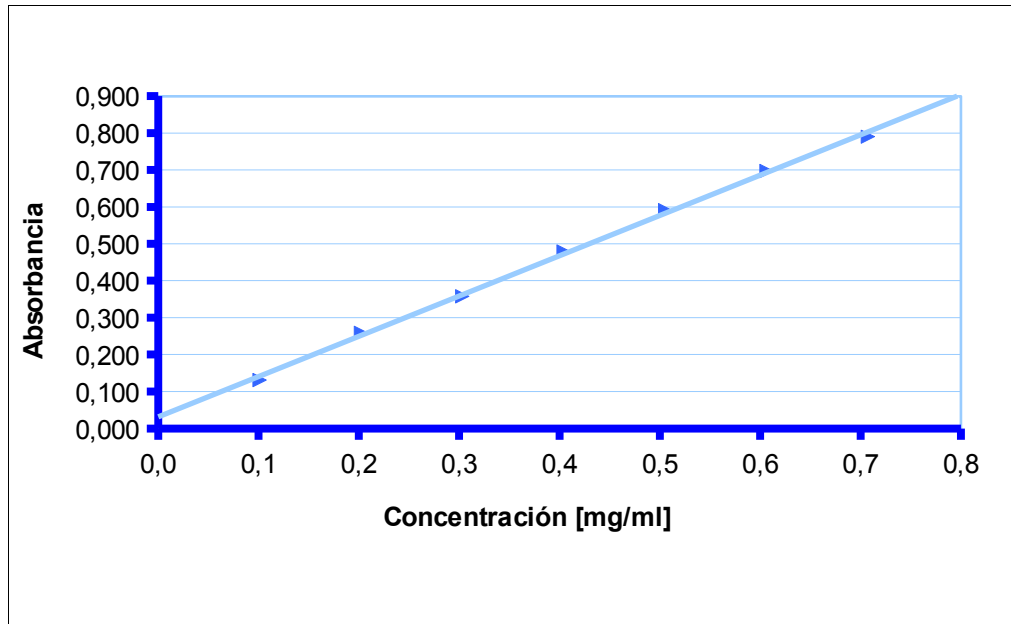
Método: 95,0 porcentaje LSD

Tratamiento	Recuento	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
7	3	0,956667	0,0480393	X
4	3	1,4	0,0480393	X
8	3	1,76667	0,0480393	X
1	3	2,16667	0,0480393	X
9	3	2,22	0,0480393	X
5	3	2,93333	0,0480393	X
2	3	3,27	0,0480393	X
6	3	3,41	0,0480393	X
3	3	3,74	0,0480393	X
S/T	3	4,35	0,0480393	X

Contraste	Diferencias	+/- Límites
1 - 2	*-1,10333	0,141716
1 - 3	*-1,57333	0,141716
1 - 4	*0,766667	0,141716
1 - 5	*-0,766667	0,141716
1 - 6	*-1,24333	0,141716
1 - 7	*1,21	0,141716
1 - 8	*0,4	0,141716
1 - 9	-0,0533333	0,141716
1 - S/T	*-2,18333	0,141716
2 - 3	*-0,47	0,141716
2 - 4	*1,87	0,141716
2 - 5	*0,336667	0,141716
2 - 6	-0,14	0,141716
2 - 7	*2,31333	0,141716
2 - 8	*1,50333	0,141716
2 - 9	*1,05	0,141716
2 - S/T	*-1,08	0,141716
3 - 4	*2,34	0,141716
3 - 5	*0,806667	0,141716
3 - 6	*0,33	0,141716
3 - 7	*2,78333	0,141716
3 - 8	*1,97333	0,141716
3 - 9	*1,52	0,141716
3 - S/T	*-0,61	0,141716
4 - 5	*-1,53333	0,141716
4 - 6	*-2,01	0,141716
4 - 7	*0,443333	0,141716
4 - 8	*-0,366667	0,141716
4 - 9	*-0,82	0,141716
4 - S/T	*-2,95	0,141716
5 - 6	*-0,476667	0,141716
5 - 7	*1,97667	0,141716
5 - 8	*1,16667	0,141716
5 - 9	*0,713333	0,141716
5 - S/T	*-1,41667	0,141716
6 - 7	*2,45333	0,141716
6 - 8	*1,64333	0,141716
6 - 9	*1,19	0,141716
6 - S/T	*-0,94	0,141716
7 - 8	*-0,81	0,141716
7 - 9	*-1,26333	0,141716
7 - S/T	*-3,39333	0,141716
8 - 9	*-0,453333	0,141716
8 - S/T	*-2,58333	0,141716
9 - S/T	*-2,13	0,141716

\* indica una diferencia significativa.

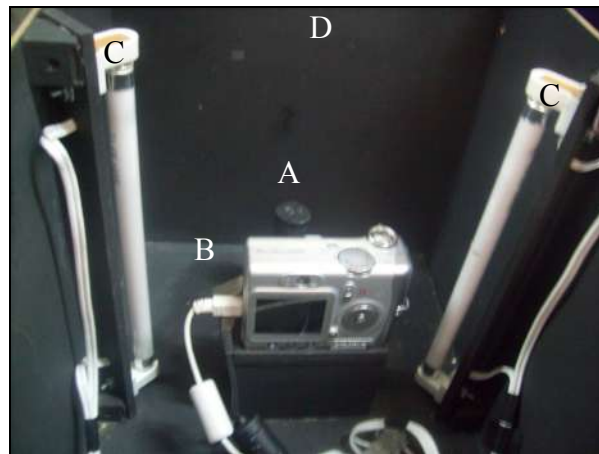
**Anexo 7:** Curva de calibración polifenoles totales expresados en equivalentes a ácido gálico.



$$A = 1,09 \cdot C + 0,031$$

$$R^2 = 1$$

**Anexo 8:** Colorímetro utilizado para determinar parámetros  $L^*$   $a^*$  y  $b^*$  e imágenes obtenidas para el fruto de murtila estado fresco y deshidratado.



A: Zona de muestra  
 B: Cámara digital  
 C: Iluminación  
 D: Caja Negra

