



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Agrarias
Escuela de Ingeniería en Alimentos

Determinación de Propiedades Termofísicas de la Murta (*Ugni molinae* Turcz) Durante el Proceso de Congelación y Calentamiento

Memoria presentada como parte de
los requisitos para optar al título de
Ingeniero en Alimentos

Camila Alejandra Ahumada Tenorio

Valdivia – Chile

2016

PROFESOR PATROCINANTE:



Kong Shun Ah-Hen

Ingeniero en Alimentos, Dipl.-Ing., Dr.- Ing.
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos
Universidad Austral de Chile

PROFESORES INFORMANTES:



Ociel Muñoz Fariña

Bioquímico, Dr. en Ciencias Químicas
Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos
Universidad Austral de Chile



Roberto Lemus Mondaca

Ingeniero en Alimentos, Dr. en Cs. de la Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Alimentos
Universidad de La Serena

*Dedicada a Mi Madre, Anamaría Tenorio Correa,
Todo lo que soy y llegaré a ser, es gracias ti.*

AGRADECIMIENTOS

Mamita, gracias por todos estos años de esfuerzos, retos, consejos y amor incondicional, sin ti no hubiese llegado a ninguna parte, gracias por siempre darme todo por nosotros, te amo.

Abuelita Ena, por siempre estar apoyándome, ayudándome de manera incondicional, con el amor que sólo sabe entregar una abuelita.

Edgar, por ser mi amigo, mi compañero, mi amor. Siempre estuviste aquí, en los mejores y peores momentos. Gracias por apoyarme en todo y darme tu amor cada día, te amo.

Tatita René, aunque ya no te tenemos con nosotros, tengo la certeza que desde el cielo siempre estas acompañándome y que estas orgulloso de mí.

A mis hermanos, Nico y José, a mi familia, Nina, Nino y tío Alberto, a mis amigas Franche y Vale, gracias por darme apoyo, contención, amor y contribuir a mi educación.

Profesor patrocinante Dr. Kong Shun Ah-Hen, gracias por creer, confiar en mí y guiarme.

Profesores y funcionarios del Icytal, que de una u otra forma aportaron con su ayuda y buena disposición durante todos estos años.

ÍNDICE MATERIAS

Capítulo		Página
	RESUMEN	1
	SUMMARY	2
1	INTRODUCCIÓN	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	La murta (<i>Ugni molinae</i> Turcz)	5
2.2	Calorimetría diferencial de barrido	6
2.3	Calorímetro diferencial de barrido DSC 823e	6
2.4	Propiedades termofísicas	7
2.4.1	Calor latente	7
2.4.2	Calor específico	8
2.5	Transiciones térmicas	8
2.5.1	Cristalización	8
2.5.2	Fusión	9
2.5.3	Transición vítrea	9
3	MATERIAL Y MÉTODO	10
3.1	Lugar del ensayo	10
3.2	Materiales	10
3.2.1	Materia prima	10
3.2.2	Equipos y materiales	10
3.3	Método	10
3.3.1	Selección de materia prima	10
3.3.2	Preparación de la muestra	11
3.3.3	Experimento	11
3.3.4	Análisis de datos	11
3.3.4.1	Cálculo punto de congelación y punto de fusión	11
3.3.4.2	Cálculo calor latente de congelación y fusión	12
3.3.4.3	Cálculo fracción de agua no congelable	12

3.3.4.4	Cálculo calor específico	14
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	15
4.1	Humedad	15
4.2	Análisis de termogramas	15
4.2.1	Punto de cristalización y punto de fusión	18
4.2.2	Calor latente	19
4.2.3	Fracción y porcentaje de agua no congelada	20
4.2.4	Calor específico	22
4.2.5	Modelo propuesto para calcular el calor específico de la murta	25
5	CONCLUSIONES	26
6	BIBLIOGRAFÍA	28
7	ANEXOS	30

ÍNDICE CUADROS

Cuadro		Página
1	Contenido de agua en la pulpa, epidermis y semilla de murta	15
2	Punto de cristalización y punto de fusión para la pulpa, epidermis y semilla de murta	19
3	Calor latente para pulpa, epidermis y semilla.	20
4	Fracción de agua no congelada pulpa, epidermis y semilla	20
5	Porcentaje de agua no congelada	21
6	Calor específico a diferentes temperaturas para pulpa, epidermis y semilla	22
7	Promedio calor específico a diferentes temperaturas para pulpa, epidermis y semilla	24
8	Promedio fracción p/p de cada sección de la murta.	24
9	Calor específico murta entera	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Termograma DSC para una muestra de pulpa durante el proceso de congelación y calentamiento	16
2	Termograma DSC para una muestra de epidermis durante el proceso de congelación y calentamiento	17
3	Termograma DSC para muestra de semilla durante el proceso de congelación y calentamiento	17
4	Termograma DSC para una muestra de pulpa, epidermis y semilla durante el proceso de congelación y calentamiento	18
5	Calor específico promedio por sección	23
6	Modelo matemático calor específico	26

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen		Página
1	Fruto de murta <i>Ugni molinae</i> Turcz	5

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Comparación de contenido de agua en pulpa, epidermis y semilla	30
2	Comparación de punto de cristalización y fusión en pulpa, epidermis y semilla de murta	31
3	Comparación de calor latente de cristalización y fusión en pulpa, epidermis y semilla de murta	32
4	Comparación de la fracción de agua no congelada β_c y β_f en pulpa, epidermis y semilla de murta	33
5	Comparación de calor específico a 20 °C y 30 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta	34
6	Comparación de calor específico a 40 °C y 50 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta	35
7	Comparación de calor específico a 60 °C y 70 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta	36
8	Comparación de calor específico a 80 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta	37

RESUMEN

Se determinó en este estudio el comportamiento de las propiedades termofísicas de la murta (*Ugni molinae* Turcz), utilizando como muestra las distintas partes de la fruta: pulpa, epidermis y semilla. Por medio del método de la calorimetría diferencial de barrido (DSC) se analizó los eventos térmicos durante el proceso de congelación y calentamiento. Los ensayos se llevaron a cabo en un rango de temperatura entre -50 °C a 100 °C. Las muestras consistieron de un conjunto de diez bayas de murta pelada y separada por sección. En un crisol estándar de aluminio de 40 μ L se pesaron entre 10 y 40 mg de muestra y se inició la medición junto a un crisol testigo vacío en el calorímetro diferencial de barrido. Cada ensayo arrojó un termograma, lo que permitió determinar los puntos de cristalización y de fusión, el calor latente, la fracción de agua no congelada y el calor específico. Este último fue medido y modelado para el rango de temperatura entre 20 y 80 °C. Se demostró que el comportamiento de las secciones, pulpa, epidermis y semilla es diferente, dado que tienen diferentes composiciones. El contenido de agua de cada sección tiene la mayor ponderación en el resultado obtenido.

SUMMARY

In this study the behaviour of the thermophysical properties of murta (*Ugni molinae* Turcz) was determined, using as sample the different parts of the fruit: pulp, peel and seeds. Through the method of differential scanning calorimetry (DSC) the occurring thermal events were analysed during freezing and heating processes. The assays were performed within a temperature range between -50 °C and 100 °C. The samples consisted of a set of ten murta berries, peeled and separated. In a standard aluminium pan of 40 μ L a sample weight between 10 and 40 mg was sealed and together with an empty reference pan measurement was started on the differential scanning calorimeter. Each assay produced a thermogramme that allowed determination of crystallization and fusion points, latent heat, unfreezable water fraction and specific heat capacity. The latter was determined and modelled for a temperature range between 20 and 80 °C. It was shown that the behaviour of the different sections of the berry, pulp, peel and seeds was different, due to their different composition. Water content had a prevalent effect on the results obtained.

1. INTRODUCCIÓN

La murta o murtilla (*Ugni molinae* Turcz) es una planta arbustiva, de hoja perenne, perteneciente a la familia de las Myrtaceae, encontrándose habitualmente en terrenos despejados, en los bordes de los bosques o formando matorral arbustivo (HOFFMANN, 1982). En el último tiempo el interés por la murta ha tenido un crecimiento exponencial; se estima que el crecimiento de hectáreas plantadas en Chile irá en aumento en los próximos años, ya que, la murta es un fruto que posee cualidades benéficas para el organismo humano las que son motivo de estudio y además es un fruto que se puede comercializar tanto fresco como procesado.

El estudio de las características térmicas de la murta puede contribuir al entendimiento de las propiedades termofísicas, siendo estas esenciales para la industria alimentaria, ya que, son un parámetro crítico en el diseño de un proceso alimentario siendo fundamentales para controlar y optimizar procesos. Dentro de estas propiedades se encuentran el calor específico, calor latente, conductividad térmica, entre otras.

La calorimetría diferencial de barrido (DSC, Differential Scanning Calorimetry) permite el estudio de las variaciones térmicas, pudiendo observar calores específicos, puntos de cristalización y fusión y otras transiciones de primer y segundo orden.

Hipótesis:

“Con el método del calorímetro diferencial de barrido (DSC) es posible determinar el comportamiento de las propiedades termofísicas de la murta en un rango determinado de temperatura midiendo por separado las secciones de la murta (*Ugni molinae* Turcz) epidermis, pulpa y semilla”

Objetivo general:

Determinar el comportamiento de las propiedades termofísicas de la pulpa, epidermis y semilla de murta durante el proceso de congelamiento y calentamiento a través del método del calorímetro diferencial de barrido.

Objetivos específicos:

- Determinar la humedad de las muestras de pulpa, epidermis y semilla de murta.
- Obtener y analizar los termogramas en el rango de -50°C a 100°C del DSC (calorímetro diferencial de barrido).
- Determinar el calor específico de la murta en el rango de temperatura de 20°C a 80°C .
- Determinar la fracción de agua no congelada en la pulpa, epidermis y semilla de la murta.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. La murta (*Ugni molinae* Turcz)

La murta o murtilla (*Ugni molinae* Turcz) es una de las frutas silvestres más populares de Chile, perteneciente a la familia de las Myrtaceae, ésta especie arbustiva posee una amplia distribución en la zona sur del país, que va de la VI a la XI región (TACÓN, 2004). La murtilla silvestre se obtiene de la recolección manual, siendo vendida principalmente en mercados locales, tanto como producto fresco como alimento procesado, como lo son las mermeladas, conservas y licores (OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS (ODEPA, 2013)).

Sus cualidades organolépticas son comparables a las de otros berries, por lo que existe gran interés internacional por desarrollar su cultivo, como muestran diversos artículos (LANDRUM Y DONOSO, 1990).



Imagen 1. Fruto de murta *Ugni molinae* Turcz

Esta especie como ya se dijo anteriormente es una especie de crecimiento arbustivo, produce frutos globosos, pequeños de agradable sabor y aroma. En su hábitat natural la especie se desarrolla formando plantas de altura variable, entre 0,3 m y 1,70 m, y excepcionalmente puede alcanzar alturas superiores a las 3 m (SEGUEL Y TORRALBO, 2000).

En relación al tamaño del fruto (diámetro ecuatorial), éste fluctúa entre 0,9 y 1,3 cm. Los diámetros varían de manera importante al cambiar de latitud, destacándose los frutos provenientes de la X Región. En cuanto al peso del fruto, éste fluctúa entre 0,21 y 1,01

g, y al igual que el diámetro ecuatorial, aumenta de norte a sur. Lo anterior, deja claramente establecido que los frutos de mayor diámetro y peso se encuentran en la X Región (SEGUEL Y TORRALBO, 2000).

2.2. Calorimetría diferencial de barrido

La calorimetría diferencial de barrido (DSC), es una de las técnicas de análisis térmico más común para observar fases y los estados de transición, incluyendo la transición vítrea en alimentos, permite la observación de las fases de transición de los cambios exotérmicos y endotérmicos cuando el flujo de calor de una muestra es comparado con una muestra de referencia (LUND, 1983 CITADO POR HELDMAN Y LUND, 2006).

Esta se basa en la medición de pequeños eventos termales producidos en procesos térmicos. Como resultado de los análisis se entrega un termograma que demuestra cualquier aumento o pérdida de energía, mientras que el equipo explora en un rango dado el excedente de la elevación de la temperatura en un intervalo seleccionado de temperatura (MOHSENIN, 1980).

El área bajo el termograma es proporcional a la energía térmica absorbida o entregada por la muestra durante el proceso de calentamiento y enfriamiento. El sistema consiste en un sostenedor de la muestra del material de referencia, un programador de temperatura y su sistema incorporado de calentamiento o enfriamiento. Se utilizan crisoles sellados para encapsular la muestra debido a la existencia de humedad en los materiales biológicos (MOHSENIN, 1980).

Las transiciones de primer orden exhiben una reacción exotérmica como la cristalización, cuando se libera calor o una endotérmica como la fusión, cuando requerimos de calor para el cambio de fase (LUND, 1983) CITADO POR HELDMAN Y LUND, 2006).

2.3. Calorímetro diferencial de barrido DSC 823e

El DSC823e presenta un horno de plata muy resistente, con sensores patentados con 56 o 120 termocuplas, se encuentran cubiertos por una capa de cerámica la que lo hace resistente a la corrosión. El horno permite realizar ensayos con temperatura programada sin modificaciones. El equipo permite el cambio de crisoles, velocidades de calentamiento y gases de purga sin necesidad de nuevas calibraciones. Además este

esquipo permite la posibilidad de enfriamiento, ya sea por ventilación con aire, criostato, intracooler o nitrógeno líquido.

El equipo consta de un software STARe V. 14.0 en el cual se puede programar el método que se quiere utilizar, las temperaturas, pesos, etc. Al terminar el análisis este software arroja un termograma que su vez puede ser analizado a cabalidad por el mismo.

2.4. Propiedades termofísicas

Las propiedades termofísicas, como lo son el calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica influyen en la transferencia de calor. El conocimiento y dominio de estas es muy importante para el cálculo, diseño de procesos, equipamiento y finalmente lo más importante, la calidad del producto terminado. Estas propiedades están influenciadas por la temperatura y la composición del producto, durante un tratamiento térmico (RAHMAN, 1995 CITADO POR RAHMAN, 2006).

Las propiedades termofísicas de los alimentos son muy importantes en la industria alimentaria, son necesarias para la optimización y eficacia de los procesos y así poder calcular rapidez de enfriamiento o calentamiento, cantidades de energía requeridas para pasteurización, esterilización, congelación, entre otros.

2.4.1. Calor latente. El calor latente se define como la cantidad de calor que necesita una sustancia para pasar del estado sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gas (calor latente de vaporización) sin que ocurra un cambio de temperatura.

$$Q = m L \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

Q :	Cantidad de calor (J)
m :	Masa (kg)
L :	Calor latente (J/kg)

2.4.2. Calor específico. El calor específico según ORREGO (2003) es la cantidad de energía, en forma de calor, que gana o pierde un sistema de masa, para que produzca en él un cambio de temperatura de un grado Celsius, sin que se produzca un cambio de estado.

$$C_p = \frac{q}{m\Delta T} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

q :	Calor ganado o perdido (J)
m :	Masa (kg)
ΔT :	Cambio de temperatura (K)
C_p :	Calor específico (J/kgK)

2.5 Transiciones térmicas

Existen transiciones térmicas de primer orden que se refiere a transiciones entre estados físicos básicos (sólido, líquido y gaseoso) como lo es la cristalización y la fusión y transiciones térmicas de segundo orden que son aquellas en las que no se observa calor latente de transición y el cambio de la energía interna se evidencia con el aumento o disminución de la capacidad calórica del sistema, que ocurre mediante un salto o discontinuidad, como lo es la transición vítrea (PEREIRA Y OLIVEIRA, 2000).

2.5.1. Cristalización. La cristalización ocurre durante el proceso de congelación, donde las moléculas pasan de un estado líquido a sólido. En este fenómeno son importantes dos factores, la velocidad de formación de los núcleos de cristalización y la velocidad de crecimiento de los cristales de hielo. Se ha encontrado que la velocidad de formación de núcleos cristalinos aumenta al disminuir la temperatura, es decir, al incrementar la velocidad de congelación el número de cristales de hielo formados es mayor. Con la

congelación lenta se generan pocos cristales de hielo pero de gran tamaño a diferencia de la congelación rápida que formara un gran número de cristales de hielo pero de menor tamaño (BARREIRO Y SANDOVAL, 2006).

2.5.2. Fusión. La fusión de una sustancia consiste en aplicar suficiente calor para que las moléculas tengan la energía suficiente para causar la ruptura de enlaces donde el sólido sufre un cambio de fase y se convierte en líquido (WILSON Y BUFFA, 2003).

2.5.3. Transición vítrea. La transición vítrea es un fenómeno donde un material en estado vítreo se transforma, por aumento de la temperatura o contenido de humedad a un fundido subenfriado, llamado estado cauchoso, o sufre el proceso inverso si ocurre enfriamiento (LE MESTE *et al.* 2002).

3. MATERIAL Y MÉTODO

3.1 Lugar del ensayo

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Procesos del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de la Facultad de Ciencias Agrarias, perteneciente a la Universidad Austral de Chile.

3.2 Materiales

3.2.1. Materia prima. Murta o murtilla (*Ugni molinae* Turcz) proveniente de la décimo cuarta Región de Los Ríos, Chile.

3.2.2. Equipos y materiales.

- Calorímetro diferencial de barrido DSC823e, Mettler Toledo.
- Crisoles de aluminio estándar 40 μ L.
- Balanza analítica XS 205 SM-DR, Mettler Toledo.
- Selladora de crisoles, Mettler Toledo.
- Computador con software STARe de evaluación, versión 14.00.
- Estufa de secado ZRD-A5055, Zhicheng.
- Crisoles porcelana.
- Bisturí, pinzas y utensilios menores de laboratorio.

3.3. Método

3.3.1. Selección de materia prima. Los frutos fueron seleccionados al azar, con un previo examen visual en el cual se excluyeron los frutos sobre maduros, dañados o golpeados.

3.3.2. Preparación de la muestra. Para la preparación de la muestra se seleccionaron 10 frutos, los cuales se pesaron y separaron en pulpa, epidermis y semilla por medio de bisturí y pinzas. Obtenidas las 10 pulpas, epidermis y semillas se registró el peso de cada sección para luego en un crisol de aluminio estándar de 40 μL se pesó entre 10 y 40 mg de cada sección para la respectiva muestra. Se realizaron 5 repeticiones por cada sección bajo las mismas condiciones. Las secciones fueron pesadas y secadas en un horno a $105 (+ -) 1^{\circ}\text{C}$ por 5 horas y luego cada una hora hasta llegar a una diferencia del porcentaje de humedad menor al 1%, finalmente la humedad se obtuvo registrando el peso inicial de la muestra y el final para luego calcular por diferencia la pérdida de agua.

3.3.3. Experimento. Las muestras fueron analizadas en el calorímetro diferencial de barrido en un rango de temperatura en enfriamiento desde 25 a -50°C permaneciendo a esta temperatura por 5 min para luego un calentamiento hasta 100°C a una tasa de 10 K/min junto a un crisol de referencia vacío. El flujo de nitrógeno en el horno fue de 40 mL/min manteniéndolo constante durante todo el experimento y el flujo de purga fuera del horno fue de 200 mL/min. Los parámetros del experimento fueron controlados mediante el software de evaluación STARe versión 14.00.

Se analizó en el calorímetro diferencial de barrido una muestra blanco que fue un crisol vacío con un crisol testigo también vacío, bajo las mismas condiciones en las que posteriormente se analizaron las muestras con murta.

3.3.4. Análisis de datos. Los análisis fueron obtenidos y analizados por el software de evaluación STARe de Mettler Toledo, el cual entregó termogramas con la información de cada muestra.

3.3.4.1. Cálculo punto de congelación y punto de fusión. El punto de congelación y de fusión para cada sección, pulpa, epidermis y semilla, fue determinado por la función ONSET, del software de evaluación aplicada al evento térmico. El proceso de congelación es un proceso exotérmico que usando el sistema ICTA (INTERNATIONAL CONFEDERATION FOR THERMAL ANALYSIS) se verá reflejado con un pico hacia arriba y en el caso de la fusión que es un proceso endotérmico el pico será hacia abajo. En ambos casos la función ONSET del software mostrara el inicio de la transición.

3.3.4.2. Cálculo calor latente de congelación y fusión. La energía o calor latente para cada sección, pulpa, epidermis y semilla, se obtuvo utilizando la función INTERGATION del software de evaluación, la cual calcula el área bajo la curva del evento térmico, ya sea en el proceso de congelación tanto como en el de fusión.

3.3.4.3. Cálculo fracción de agua no congelable. En el caso de la fracción de agua no congelable para cada sección, pulpa, epidermis y semilla, el equipo no presenta una función que entregue inmediatamente el valor por lo que se usa la función CRISTALLINITY utilizando el valor 334 J/g que es el calor de fusión del agua a 0°C, (GUAYASAMIN, 2010), para así obtener el porcentaje de agua que está presente en el evento térmico.

El contenido C del compuesto sometido a una transición o reacción química en el intervalo de temperaturas en evaluación, se calcula con la siguiente formula:

$$C = \frac{\Delta H}{\Delta H_{100\%}} \times 100 \quad \text{Ec. 3.}$$

Donde,

- C : Contenido del compuesto (%).
- ΔH : Calor de transición /reacción medido (J/g).
- $\Delta H_{100\%}$: Calor transición / reacción del componente puro (J/g), en este caso 334 J/g (Guayasamin, 2010).

La fracción de agua congelada según (BARREIRO Y SANDOVAL, 2006), se define como:

$$\alpha = (mh / (mh + ma)) \quad \text{Ec. 4.}$$

Donde,

α :	Fracción de agua congelada.
mh :	Porcentaje de hielo presente (Crystallinity).
ma :	Porcentaje de agua líquida presente (%).

También es sabido que el hielo presente (mh) más el agua presente (ma) corresponde al total de la humedad de la muestra, por lo tanto podemos decir que la fracción de agua no congelada β se define como:

$$\beta = 1 - (mh/\%A) \quad \text{Ec. 5.}$$

Donde,

β :	Fracción de agua no congelada
mh :	Porcentaje de hielo presente (Crystallinity).
$\%A$	Porcentaje de agua de la muestra

Finalmente se puede determinar el porcentaje de agua no congelada como:

$$\%ANC = \%A \times \beta \quad \text{Ec. 6.}$$

Donde,

$\%ANC$:	Porcentaje de agua no congelada
$\%A$:	Porcentaje de agua total
β :	Fracción de agua no congelada

3.3.4.4. Cálculo calor específico. El calor específico para cada sección, pulpa, epidermis y semilla, se obtuvo con la función SPECIFIC HEAT del software de evaluación, la medición se realizó en el rango de temperatura de 20 a 80°C cada 10°C. Para obtener el calor específico del fruto completo, se calculó la fracción p/p por sección, pulpa, epidermis, semilla y perdida, para así obtener el calor específico real del fruto.

El calor específico real se obtendrá con la siguiente ecuación, según (MORAGA, 2008):

$$cp = \sum x_i \times cp_i \quad \text{Ec. 7.}$$

$$cp = (x_{pulpa} \times cp_{pulpa}) + (x_{epidermis} \times cp_{epidermis}) + (x_{semilla} \times cp_{semilla}) \quad \text{Ec. 8.}$$

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Humedad.

La medición de la humedad se realizó registrando la pérdida de peso luego de que las muestras fueran secadas en un horno a $105 \pm 1^\circ\text{C}$.

Cuadro 1. Contenido de agua en la pulpa, epidermis y semilla de murta

Contenido de agua			
Muestra	PULPA	EPIDERMIS	SEMILLA
1	80,913	74,698	17,130
2	78,305	75,051	16,013
3	76,917	72,558	17,248
4	78,166	73,983	19,598
5	78,324	73,784	22,200
$X \pm s$	$78,525 \pm 1,458^a$	$74,015 \pm 0,963^b$	$18,438 \pm 2,475^c$

De acuerdo a lo que se muestra en el Cuadro 1, se puede ver que existe diferencia en el porcentaje promedio de agua entre las secciones de la murta, el análisis estadístico se realizó con el software STATGRAPHICS, estadísticamente hablando se tiene un 99% de confianza de que hay diferencias significativas entre el porcentaje de agua presente en la pulpa, epidermis y semilla (Anexo 1).

4.2. Análisis de termogramas.

Durante la medición las 5 muestras de cada sección, (pulpa, epidermis y semilla) se obtuvo un comportamiento similar, con pequeñas variaciones entre sí. En los termogramas se observó un pico para el proceso de cristalización (Figuras 1, 2, 3 y 4). Los termogramas siguen la conversión ICTA.

Las secciones tienen termogramas diferentes, en el caso de la pulpa y la epidermis se observan similitudes y son diferentes del termograma obtenido para la semilla. En el caso de la semilla se puede notar dos picos antes del pico que muestra la fusión; esto puede deberse a que no sólo el agua reacciona, sino que también puede deberse a la

presencia de otros compuestos en la semilla. Según Valdebenito et al. (2003) la semilla de la murta posee un alto contenido de ácido graso linoleico.

Mientras más grande el pico, más energía se usó para cristalizar y fusionar la muestra, como era de esperarse la pulpa requirió de más energía para cristalizar y fusionar, debido a que es la sección que presenta una mayor cantidad de agua.

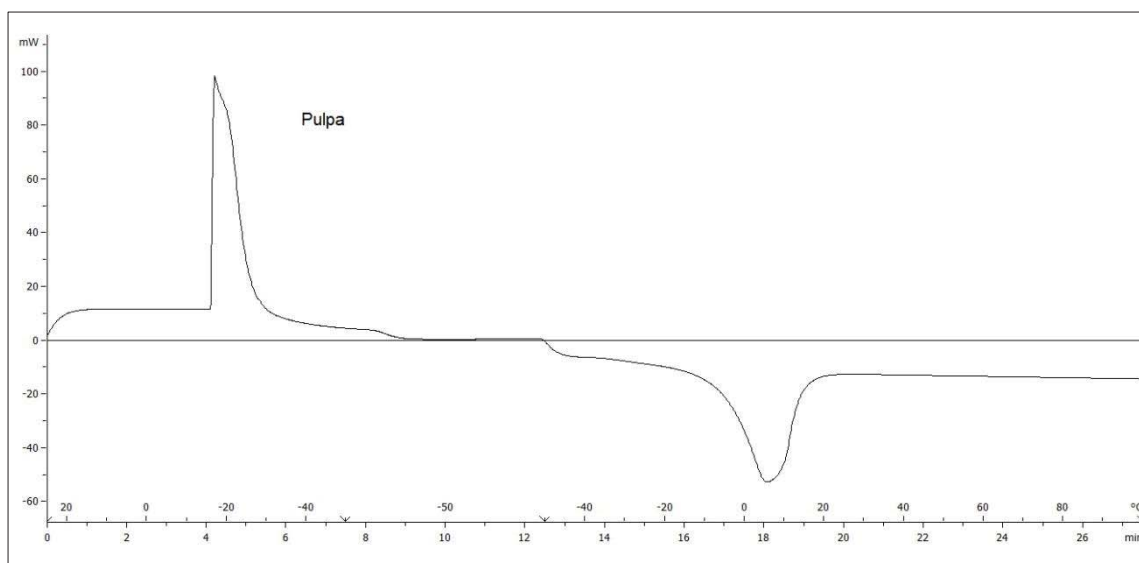


Figura 1. Termograma DSC para una muestra de pulpa durante el proceso de congelación y calentamiento

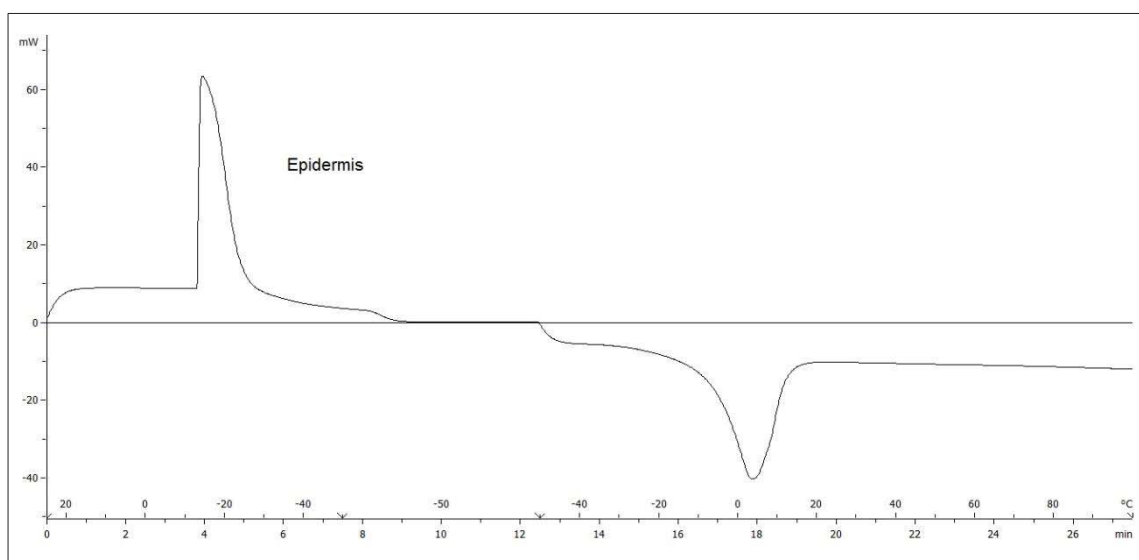


Figura 2. Termograma DSC para una muestra de epidermis durante el proceso de congelación y calentamiento

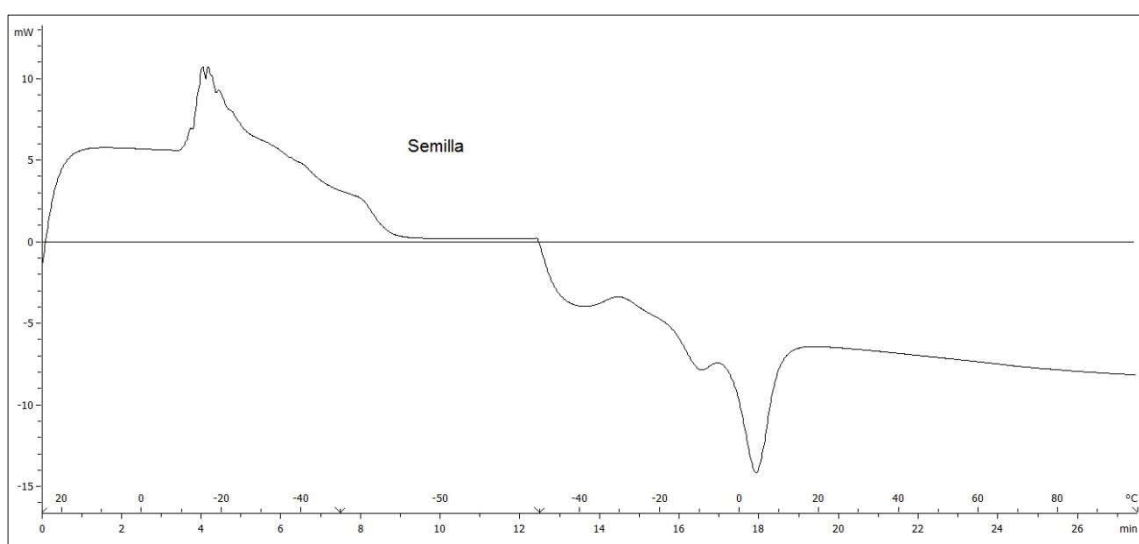


Figura 3. Termograma DSC para muestra de semilla durante el proceso de congelación y calentamiento

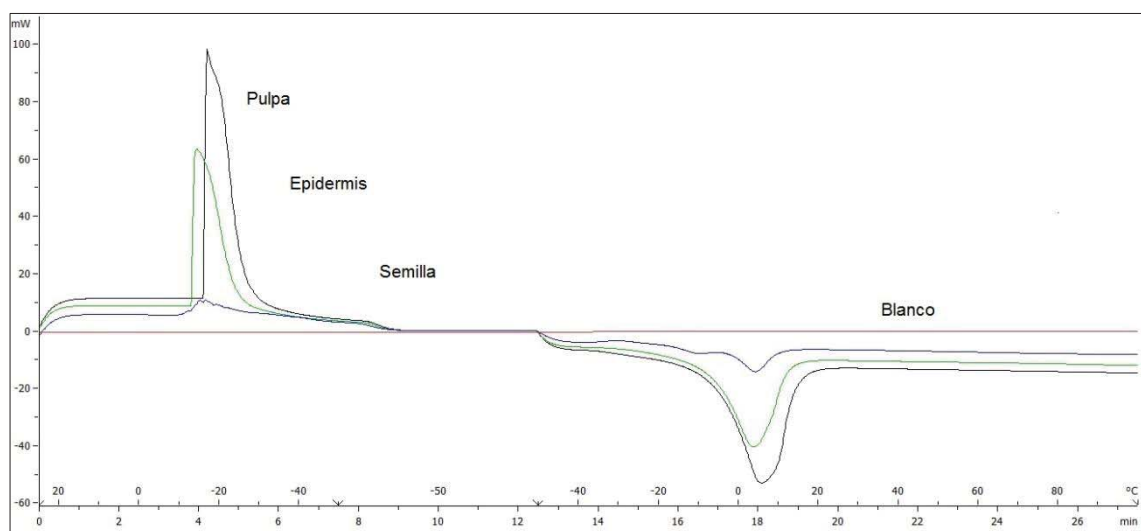


Figura 4. Termograma DSC para una muestra de pulpa, epidermis y semilla durante el proceso de congelación y calentamiento

Para todos los termogramas de las diferentes secciones se midió el punto inicial de la transición, el área bajo la curva que es el calor latente, la fracción de agua no congelada, todo esto para el proceso de cristalización y el de fusión. También se midió el calor específico en los termogramas en un rango de temperatura acotado de 20°C a 80°C.

4.2.1. Punto de cristalización y punto de fusión. El punto de cristalización y el punto de fusión se midió para las 3 secciones, pulpa, epidermis y semilla. Se entiende por punto de cristalización o de fusión el momento en el que ocurre el evento térmico, ya sea congelación de la fase acuosa presente en las secciones o descongelación de la misma.

Cuadro 2. Punto de cristalización y punto de fusión para la pulpa, epidermis y semilla de murta

Muestra	PUNTO DE CRISTALIZACIÓN Y FUSIÓN (°C)					
	PULPA		EPIDERMIS		SEMILLA	
	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión
1	-14,64	-6,73	-10,82	-5,93	-12,75	-2,81
2	-12,28	-6,33	-10,23	-7,2	-11,23	-3,14
3	-14,72	-6,85	-11,36	-6,52	-12,29	-3,47
4	-11,37	-5,99	-12,03	-7,76	-11,79	-2,72
5	-13,39	-6,66	-10,85	-7,7	-11,72	-2,64

Al analizar los datos estadísticamente, para el punto de cristalización se obtuvieron dos grupos homogéneos, epidermis-semilla y pulpa-semilla, lo que indica que entre estos pares no existen diferencias estadísticamente significativas con un 95% de confianza, pero para el caso epidermis-pulpa se tiene un 95% de confianza de que si existen diferencias significativas (Anexo 2).

En el caso del punto de fusión, hubo un 99% de confianza de que existen diferencias significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, pero en el caso de la epidermis-pulpa hubo un 99% de confianza de que no existen diferencias significativas (Anexo 2).

4.2.2. Calor latente. El calor latente o energía latente, es la energía necesaria para que ocurra el cambio de fase. De acuerdo a los datos obtenidos, la pulpa presenta los valores más elevados, ya que posee mayor contenido de agua en su interior y para congelar y fusionar esto requerirá más energía; en el caso del calor latente de cristalización y del de fusión, los datos presentan signos distintos debido a que el proceso de cristalización es un proceso exotérmico y el de fusión es un proceso endotérmico.

Cuadro 3. Calor latente para pulpa, epidermis y semilla

Muestra	CALOR LATENTE (J/g)					
	PULPA		EPIDERMIS		SEMILLA	
	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión
1	178,89	-178,71	173,82	-167,08	11,86	-25,81
2	188,29	-184,54	178,65	-178,37	17,5	-24,91
3	184,88	-183,69	161,42	-160,51	10,88	-29,68
4	189,27	-188,36	162,86	-161,6	13,02	-23,79
5	190,44	-188,98	160,8	-160,04	16,2	-28,91

De acuerdo al análisis estadístico para el calor latente de cristalización, se tiene un 99% de confianza de que hay diferencias significativas entre las secciones, pulpa, epidermis y semilla (Anexo 3). Para el caso del calor latente de fusión hubo un 99% de confianza de que existen diferencias altamente significativas entre las secciones de la murta, pupa, epidermis y semilla (Anexo 3).

4.2.3. Fracción y porcentaje de agua no congelada. La fracción y el porcentaje de agua no congelada fueron calculados con las ecuaciones que se explicaron anteriormente, donde β_c es la fracción de agua no congelada en el proceso de cristalización y β_f es la fracción de agua no congelada en el proceso de fusión.

Cuadro 4. Fracción de agua no congelada pulpa, epidermis y semilla

Muestra	FRACCIÓN DE AGUA NO CONGELADA, β_c y β_f					
	PULPA		EPIDERMIS		SEMILLA	
	β_c	β_f	β_c	β_f	β_c	β_f
1	0,338	0,338	0,303	0,330	0,792	0,548
2	0,279	0,294	0,287	0,288	0,672	0,534
3	0,280	0,2849	0,333	0,337	0,802	0,545
4	0,275	0,278	0,340	0,346	0,801	0,636
5	0,272	0,277	0,347	0,350	0,781	0,609

Cuadro 5. Porcentaje de agua no congelada

Muestra	% AGUA NO CONGELADA					
	PULPA		EPIDERMIS		SEMILLA	
	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión	Cristalización	Fusión
1	27,363	27,403	22,658	24,678	13,580	9,400
2	21,925	23,055	21,561	21,651	10,773	8,553
3	21,567	21,917	24,228	24,498	13,838	9,408
4	21,496	21,776	25,223	25,603	15,698	12,478
5	21,304	21,744	25,644	25,874	17,350	13,540

Observando los resultados obtenidos se ve que la semilla tuvo una mayor fracción de agua no congelada, seguida por la epidermis y la pulpa para ambos casos β_c y β_f , estadísticamente hablando del caso β_c se tiene un 99% de confianza de que existen diferencias altamente significativas entre las secciones de epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario para las secciones epidermis-pulpa no existen diferencias significativas (Anexo 4).

Para el caso de β_f , se tiene un 99% de confianza de que existen diferencias altamente significativas entre las secciones de epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario para las secciones epidermis-pulpa no existen diferencias significativas (Anexo 4).

4.2.4. Calor específico. El Calor específico fue medido en un rango de temperatura de 20°C a 80°C con intervalos de 10°C en las diferentes secciones de la murta.

Cuadro 6. Calor específico a diferentes temperaturas para pulpa, epidermis y semilla

Sección	Muestra	Cp (J/g K)						
		20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
Pulpa	1	3,838	3,806	4,053	4,432	5,007	5,919	7,438
	2	3,755	3,704	3,750	3,796	3,841	3,896	3,962
	3	4,498	4,479	4,564	4,646	4,722	4,804	4,890
	4	4,017	3,660	3,672	3,693	3,710	3,733	3,772
	5	4,963	4,963	4,762	4,838	4,917	5,000	5,088
Epidermis	1	3,737	3,734	3,786	3,832	3,868	3,910	3,985
	2	4,516	4,255	4,330	4,409	4,480	4,558	4,646
	3	3,899	3,913	3,998	4,078	4,153	4,332	4,328
	4	4,429	4,493	4,593	4,682	4,761	4,849	4,960
	5	4,012	3,956	4,021	4,083	4,021	4,083	4,275
Semilla	1	1,252	1,282	1,322	1,368	1,427	1,498	1,561
	2	2,263	2,328	2,414	2,502	2,594	2,691	2,764
	3	2,303	2,440	2,625	2,878	3,249	3,807	4,622
	4	1,492	1,548	1,627	1,711	1,801	1,896	1,970
	5	2,452	2,546	2,651	2,767	2,890	3,019	3,129

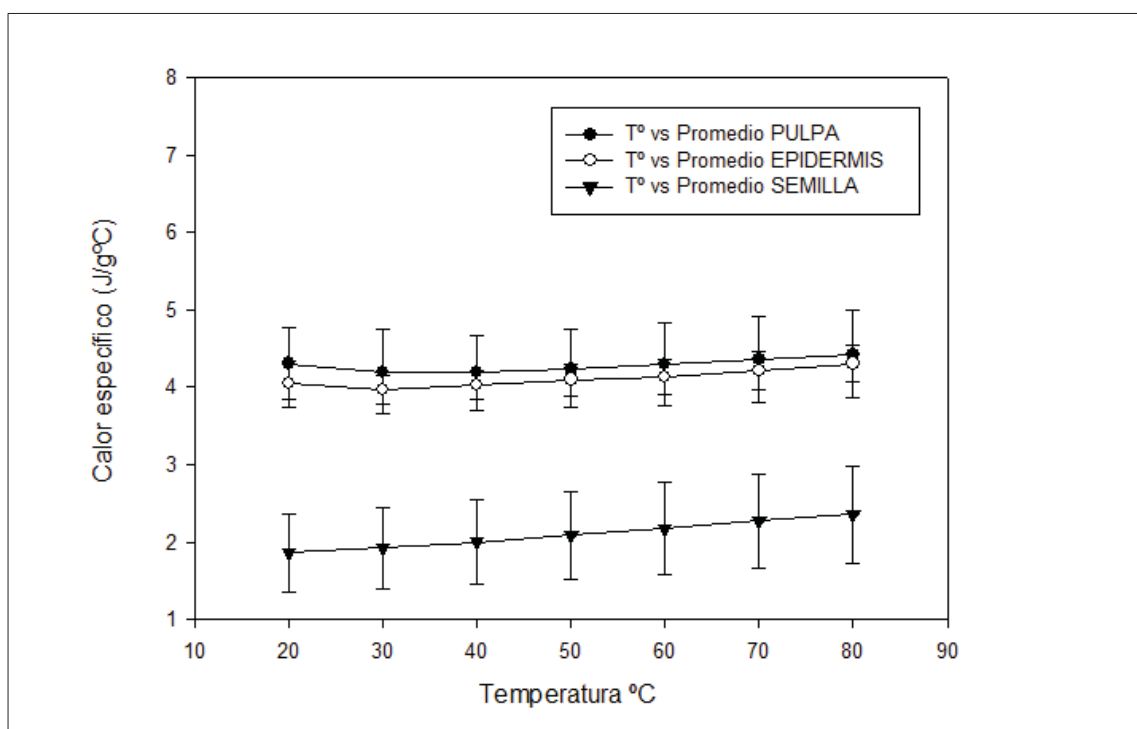


Figura 5. Calor específico promedio por sección

Analizando los resultados estadísticos obtenidos para el calor específico a 20°C se tiene un 99% de confianza de que existen diferencias altamente significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 5).

Calor específico a 30°C: se tiene un 99% de confianza de que hay diferencias altamente significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 5).

Calor específico a 40°C: se tiene un 99% de confianza de que hay diferencias altamente significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 6).

Calor específico a 50°C: se tiene un 95% de confianza de que hay diferencias significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 6).

Calor específico a 60°C: se tiene un 95% de confianza de que hay diferencias significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en la sección epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 7).

Calor específico a 70°C, se tiene un 95% de confianza de que hay diferencias significativas entre las secciones epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 7).

Calor específico a 80°C: se tiene un 95% de confianza de que hay diferencias significativas en las secciones pulpa-semilla, por el contrario en las secciones epidermis-pulpa y epidermis-semilla, en las cuales no hay diferencias significativas (Anexo 8).

De los calores específicos obtenidos se tomó el promedio por sección a las diferentes temperaturas. (Cuadro 7), se calculó la fracción de peso recuperada (Cuadro 8) tomando en cuenta el peso de las murtas seleccionadas, contemplando el desecho, pulpa, epidermis y semilla, para luego poder así calcular el calor específico real que se obtuvo del fruto completo a las temperaturas dadas. (Cuadro 9).

Cuadro 7. Promedio calor específico a diferentes temperaturas para pulpa, epidermis y semilla

Temperatura °C	Pulpa Cp promedio (J/g K)	Epidermis Cp promedio (J/g K)	Semilla Cp promedio (J/g K)
20	4,214 ± 0,508 ^a	4,119 ± 0,338 ^a	1,952 ± 0,542 ^b
30	4,122 ± 0,575 ^a	4,070 ± 0,301 ^a	2,028 ± 0,573 ^b
40	4,160 ± 0,485 ^a	4,146 ± 0,316 ^a	2,127 ± 0,612 ^b
50	4,281 ± 0,511 ^a	4,217 ± 0,331 ^a	2,245 ± 0,669 ^b
60	4,439 ± 0,616 ^a	4,256 ± 0,361 ^a	2,392 ± 0,758 ^b
70	4,670 ± 0,889 ^a	4,346 ± 0,373 ^a	2,258 ± 0,915 ^b
80	5,030 ± 1,461 ^a	4,439 ± 0,374 ^{ab}	2,809 ± 1,413 ^b

Cuadro 8. Promedio fracción p/p de cada sección de la murta

Promedio Fracción p/p pulpa	0,592 ± 0,041
Promedio Fracción p/p epidermis	0,329 ± 0,042
Promedio Fracción p/p semilla	0,034 ± 0,004

Cuadro 9: Calor específico murta entera

Temperatura °C	Cp (J/g K)
20	3,973
30	3,896
40	3,915
50	3,974
60	4,030
70	4,099
80	4,166

4.2.5. Modelo propuesto para calcular el calor específico de la murta. Los resultados obtenidos en los ensayos realizados con el DSC utilizando las diferentes secciones de la murta (pulpa, semilla y piel) pueden expresarse en un modelo matemático (Figura 6), correlacionando el calor específico con la temperatura. El modelo lineal (Ecuación 9) arrojó un coeficiente de determinación de R^2 de 0,9796, indicando una dependencia del calor específico de la temperatura. Por otra parte, es posible obtener una mejor correlación usando un modelo cuadrático (R^2 de 0,9963), tal como se muestra en la Ecuación 10. Estos modelos pueden servir para una estimación rápida del calor específica de la murta, especialmente para su uso en simulación computacional de procesos involucrando la transferencia de calor.

Modelo lineal $y = 0,0056x + 3,7056$ Ec.9.

$$R^2 = 0,9796$$

Modelo cuadrático $y = 5e-05 x^2 + 9e-05x + 3,8423$ Ec.10.

$$R^2 = 0,9963$$

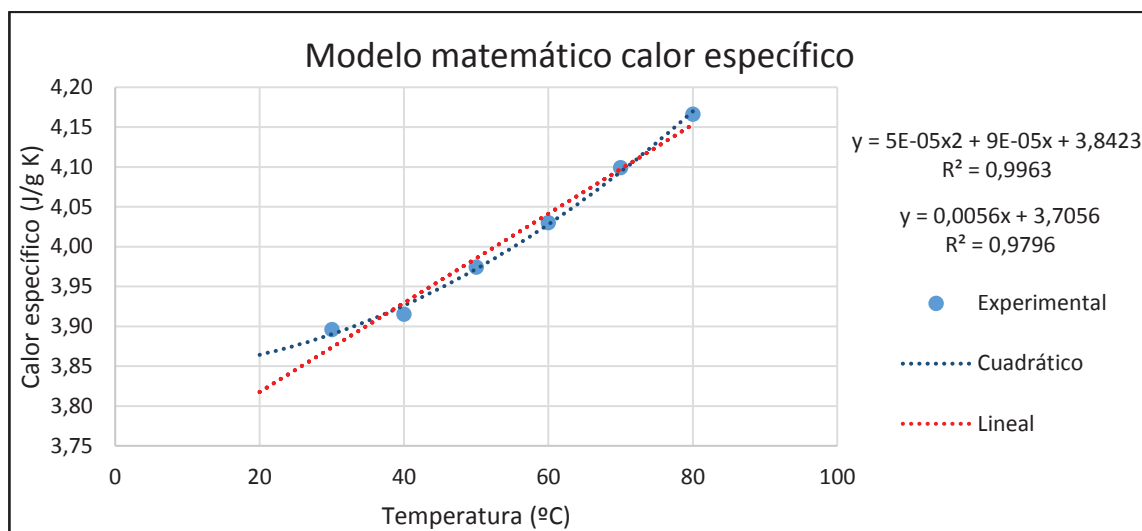


Figura 6. Modelo matemático calor específico de la murta.

5. CONCLUSIONES

Las muestras de murta analizadas por el DSC tuvieron un comportamiento esperado, lo cual comprueba la validez de la hipótesis.

En el caso de la pulpa y la epidermis se obtuvo dos picos representando el proceso de congelación y el de fusión del agua, pero en el caso de la semilla se obtuvo más de un pico para ambos procesos, debido a que la semilla presenta una alta cantidad de lípidos.

El comportamiento de las secciones de murta fue diferente, la medición del contenido de humedad fue primordial, ya que, mostró las diferentes proporciones de agua que se encuentran en las secciones; la pulpa presentó el contenido de agua más elevado, seguido por la epidermis y finalmente la semilla.

Para el calor latente de fusión y cristalización, la pulpa presentó el valor más elevado seguida por la epidermis y luego la semilla, debido a la diferencia en el contenido de agua; a mayor contenido de agua en la muestra mayor será el calor latente.

Para la fracción de agua no congelada en el caso de β_c y β_f , se obtuvo que hay diferencias altamente significativas entre epidermis-semilla y pulpa-semilla, a diferencia de la sección epidermis-pulpa la cual no presentó diferencias significativas. La semilla fue la sección con mayor fracción de agua no congelada, seguida de la epidermis y la pulpa. Se observa que la cantidad de agua es altamente significativa sobre la fracción de agua no congelada.

Se comprobó que para determinar el calor específico del fruto entero de murta es posible usar un modelo matemático incluyendo la proporción másica de las secciones de murta. Para las temperaturas medidas hubo diferencias significativas al 99% y 95% entre epidermis-semilla y pulpa-semilla, por el contrario, no se encontraron diferencias significativas entre las secciones de epidermis-pulpa, por lo que se puede decir que la cantidad de agua tiene relación directa en el valor del calor específico.

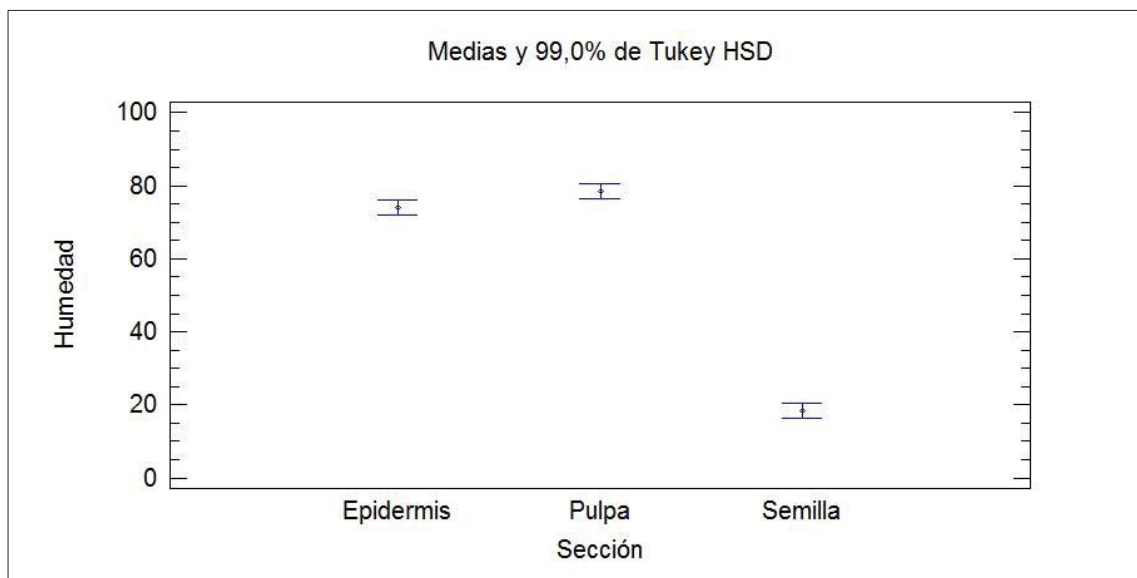
Finalmente se puede decir que la cantidad de agua presente en las diferentes secciones de murta tiene relación directa con los parámetros estudiados.

6. BIBLIOGRAFÍA

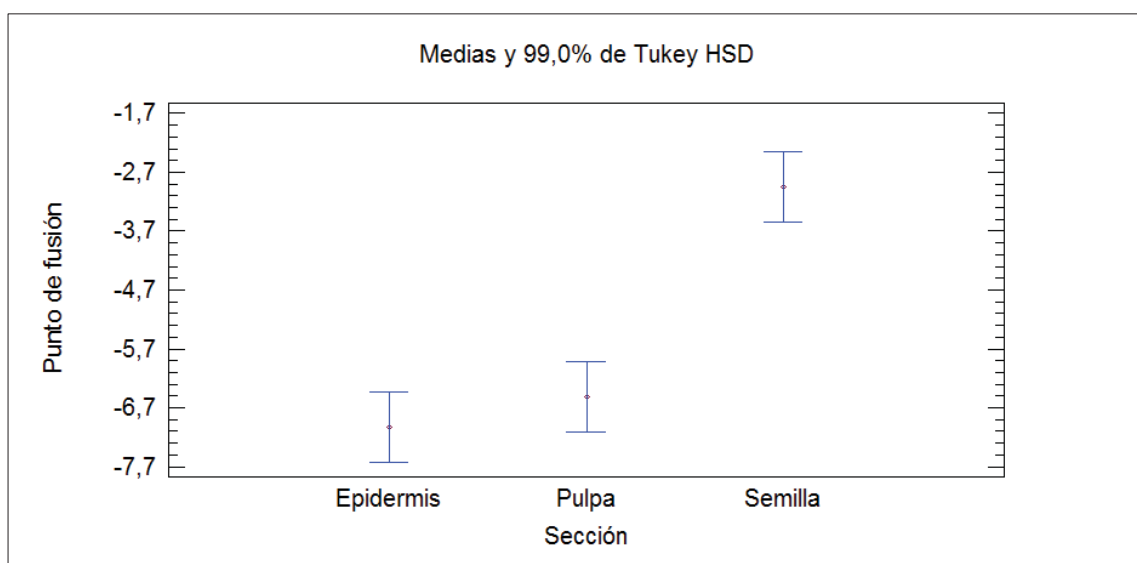
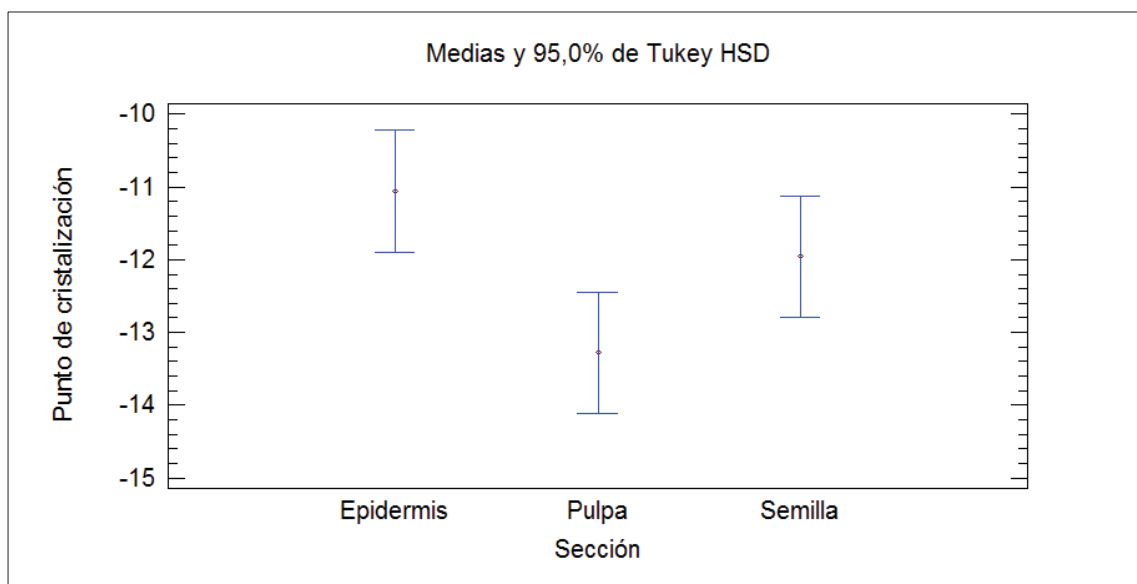
- BARREIRO, J. y SANDOVAL, A. 2006. Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. Ed. Equinoccio. Venezuela. 9-11 p.
- GOMEZ, L. 2009. Determinación de la fracción de agua no congelada en murta (*Ugni molinae* Turcz) mediante termoanálisis con calorímetro diferencial de barrido. Tesis Lic. Alim. Universidad Austral de Chile. 24-25 p.
- GUAYASAMIN, G. 2010. Física: Ciencia Fundamental. Ed. Xlibris Corporation. United States of América. 205 p.
- HELDMAN, D. y LUND, D. 2006. Handbook of Food Engineering. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. 82-350 p.
- HOFFMANN, A. 1982. Flora Silvestre de Chile, Zona Austral. Editorial Fundación Claudio Gay. Chile. 258 p.
- KANE, J. STERNHEIM, M. 2007. Física. Segunda edición. Editorial Reverté, S. A.
- LANDRUM, L. y DONOSO, C. 1990. Notes on Economic Plants. Economic Botany.
- LE MESTE, M. CHAMPION, D. ROUDAUT, G. BLOND, G. y SIMATOS, D. 2002 Glass Transition and Food Technology: A Critical Appraisal. JFS: Concise reviews and hypotheses in food science.
- METTLER TOLEDO. 2012. Service Manual. Thermal Analysis DSC823e
- MORAGA, J. 2008. Determinación del calor específico de murta (*Ugni molinae* Turcz) y arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) en un rango de temperatura entre 20°C y 80°C por el método de la calorimetría diferencial de barrido. Tesis Lic. Alim. Universidad Austral de Chile. 20 p.

- OFICINA DE ESTUDIOS Y POLITICAS AGRARIAS (ODEPA), 2013. Estudio sobre los nuevos procesos industriales que permiten ampliar las alternativas de uso para los berries en Chile. 25-40 p. http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1412099018Estudioberries.pdf Visitado el 14/07/2016.
- ORREGO, C. 2003. Procesamiento de alimentos. Universidad nacional de Colombia sede Manizales. 61 p.
- PEREIRA, P. y OLIVEIRA, J. 2000. Measurement of glass transition in native wheat flour by dynamic mechanical thermal analysis (DMTA). International Journal of Food Science and Technology. 183-192 p.
- RAHMAN. S. 2006. Food Properties Handbook. Second edition. CRC Press Taylor & Francis Group. 550-551 p.
- SEGUEL, I. TORRALBO, L. 2000. Murtilla, el berry nativo del sur de Chile. http://www.colegioagronomos.cl/imagen/musrtilla_1.pdf Visitado el 20/09/2016.
- TACÓN, A. 2004. Manual de productos forestales no madereros. Proyecto CIPMA-FMAM. 19-21 p.
- VALDEBENITO, G. CAMPOS, J. LARRAIN, O. AGUILERA, M. KAHLER, C. FERRANDO, M. GARCIA, E. y SOTOMAYOR, A. 2003. Información tecnológica de productos forestales no madereros del bosque nativo en Chile. Boletín divulgativo Ugni molinae Turcz. 7 p.
- WILSON, J. y BUFFA, A. 2003 Física 5ª edición. PEARSON EDUCACION, México. 380-400 p.

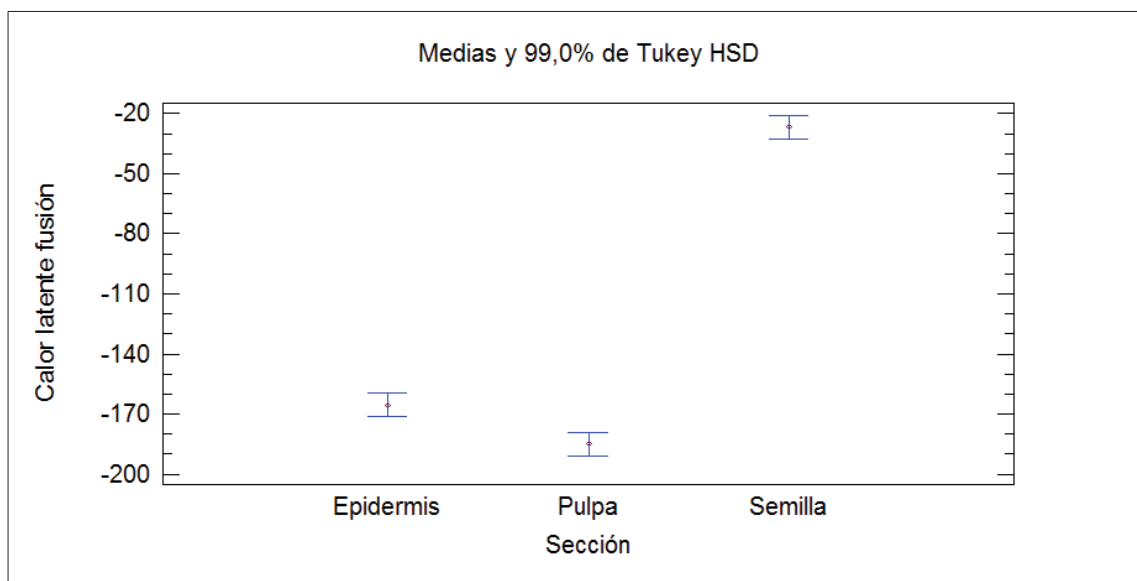
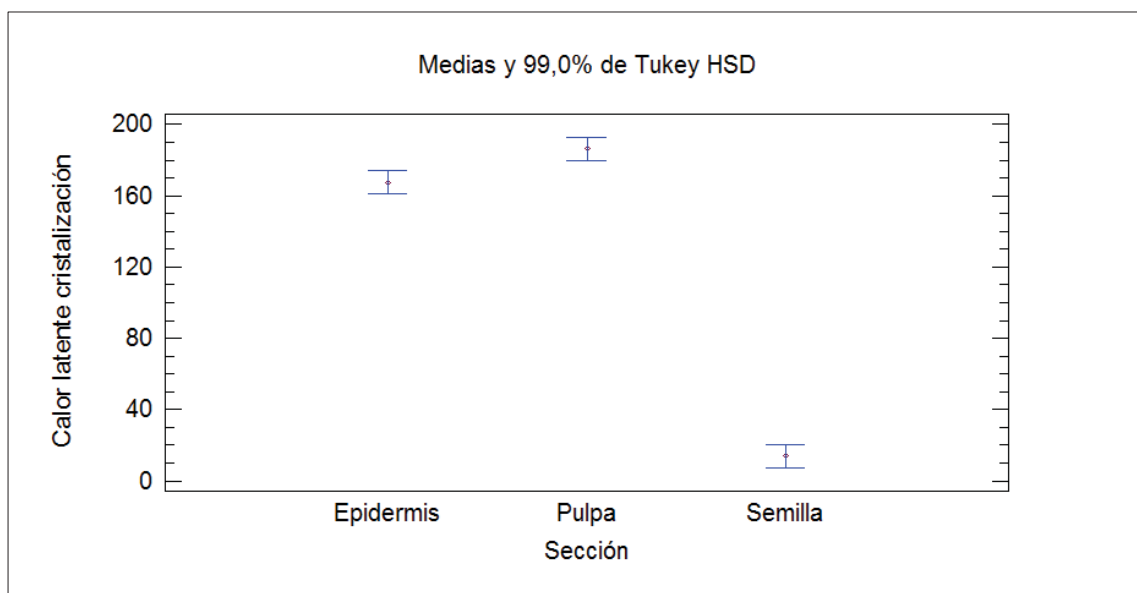
7. ANEXOS

Anexo 1. Comparación de contenido de agua en pulpa, epidermis y semilla

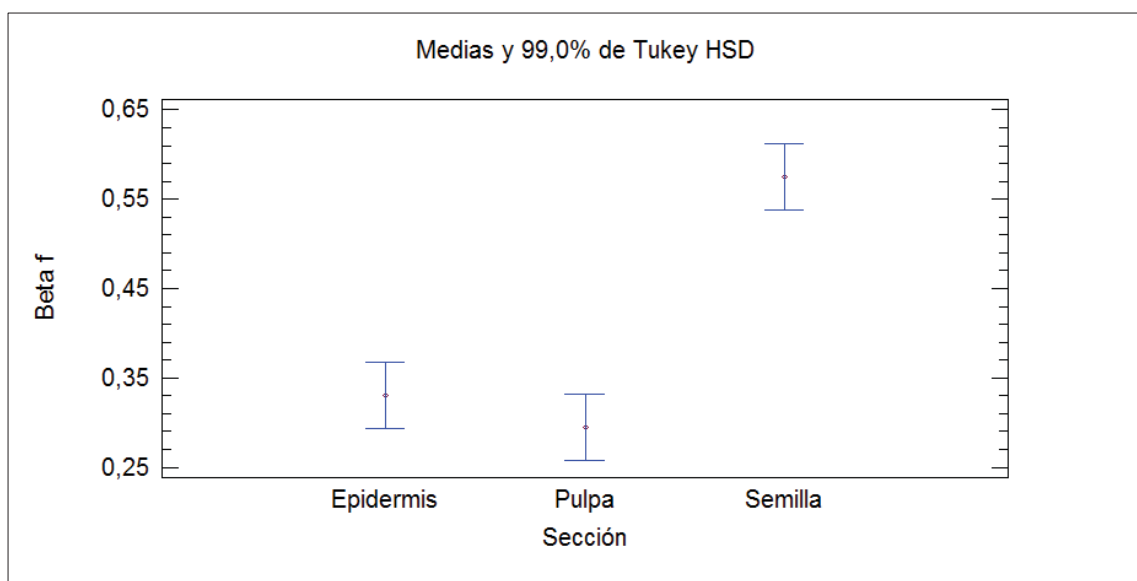
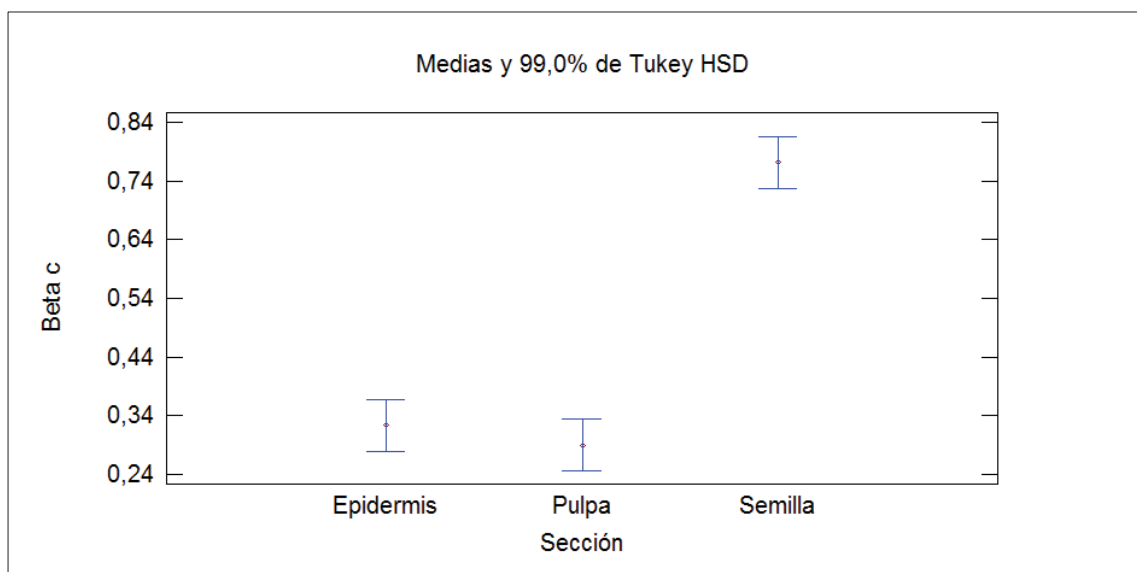
Anexo 2. Comparación de punto de cristalización y fusión en pulpa, epidermis y semilla de murta



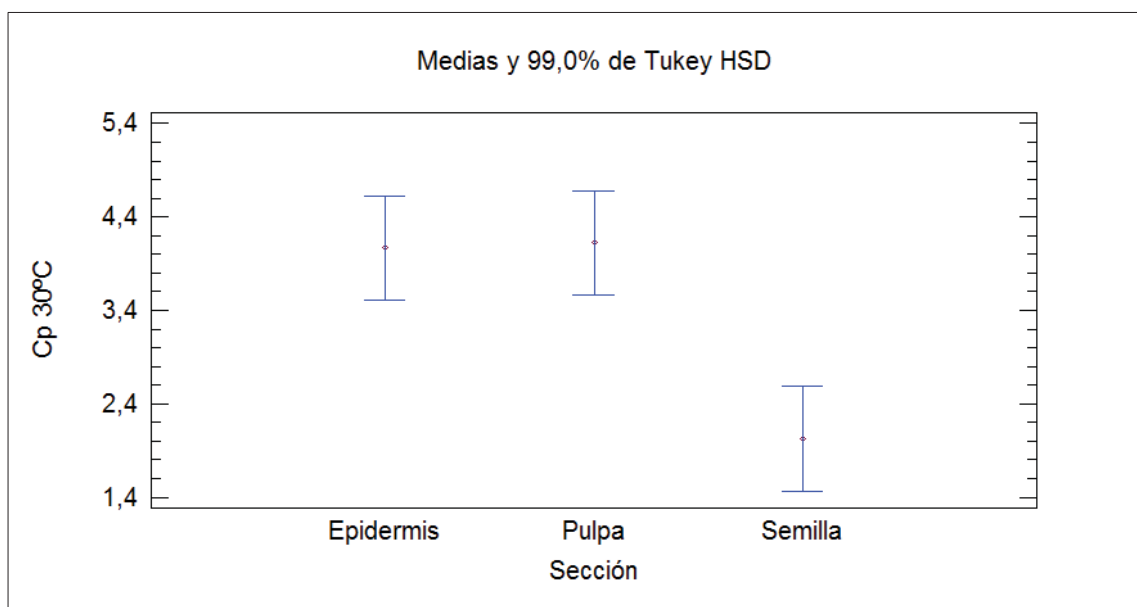
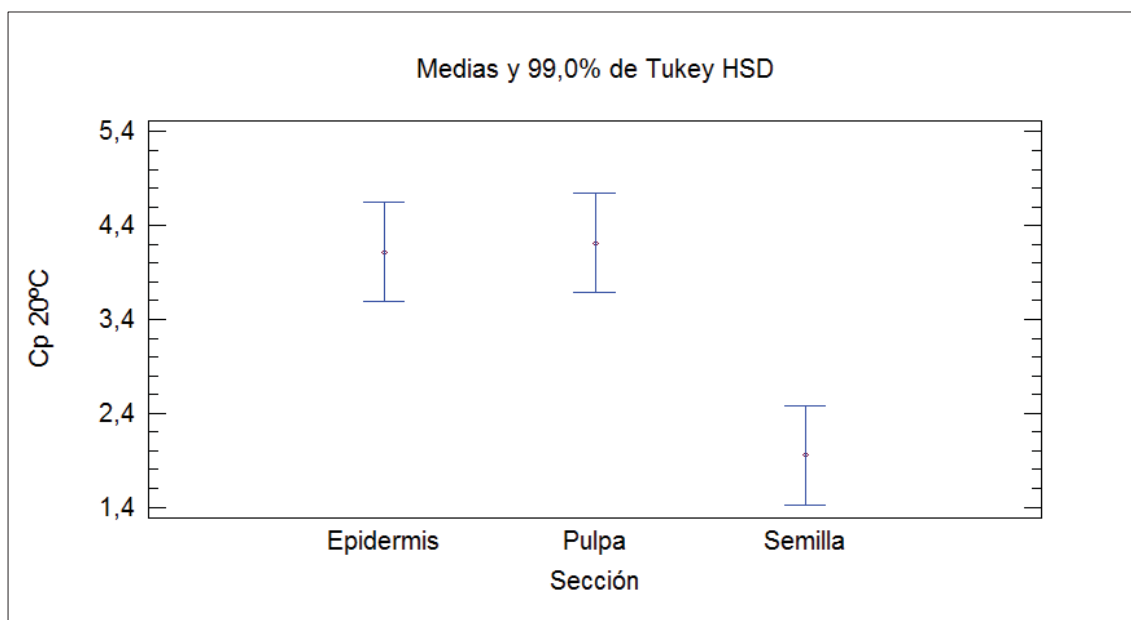
Anexo 3. Comparación de calor latente de cristalización y fusión en pulpa, epidermis y semilla de murta



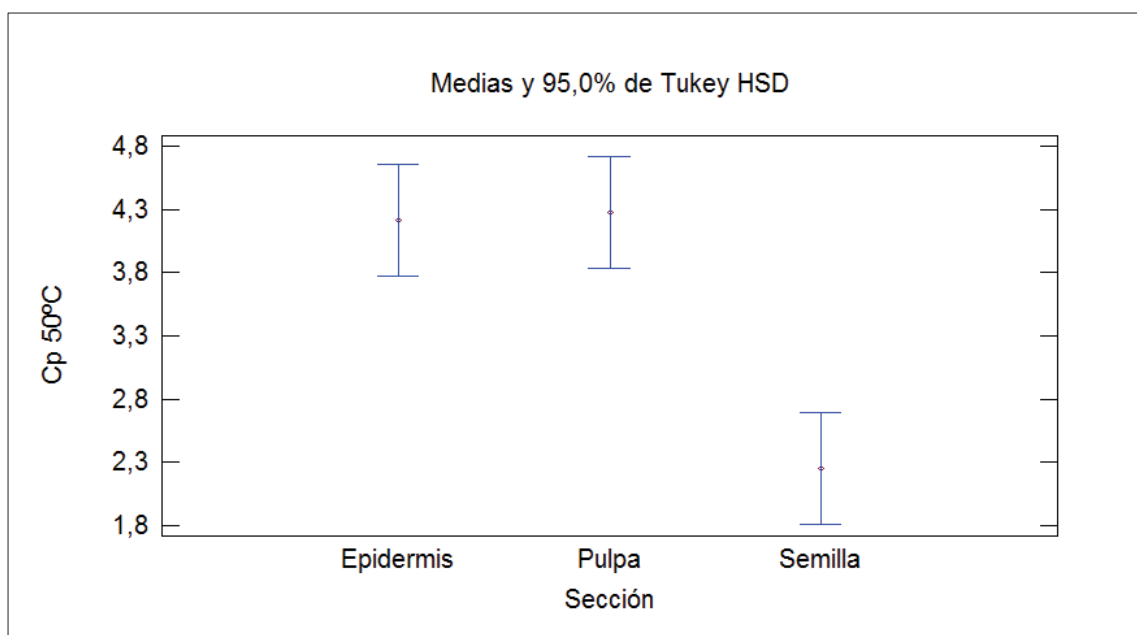
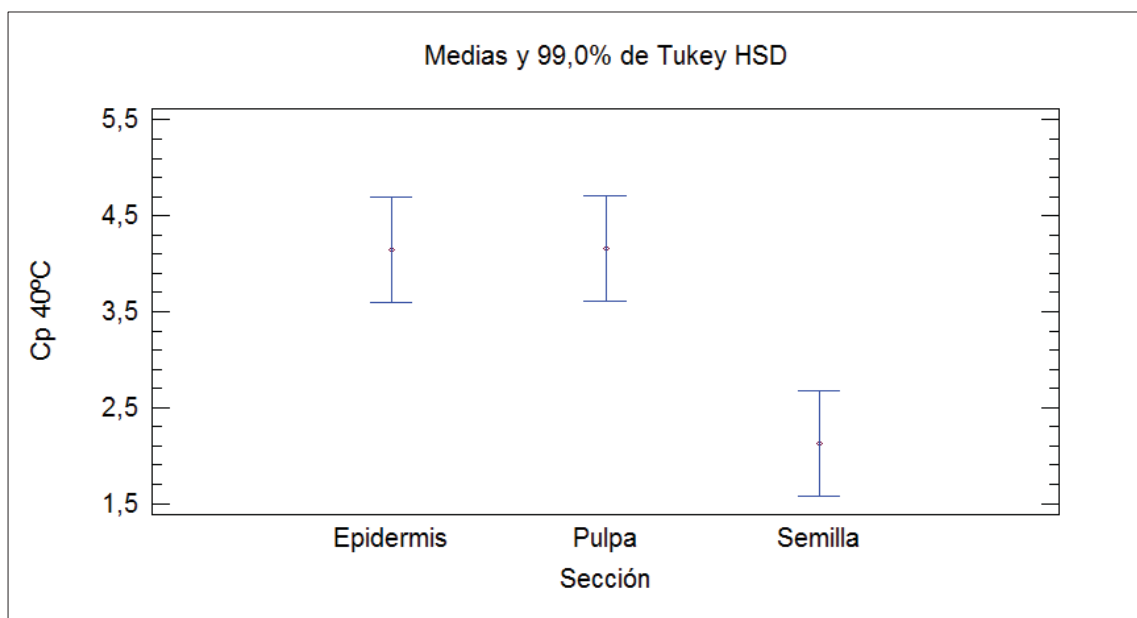
Anexo 4. Comparación de la fracción de agua no congelada β_c y β_f en pulpa, epidermis y semilla de murta



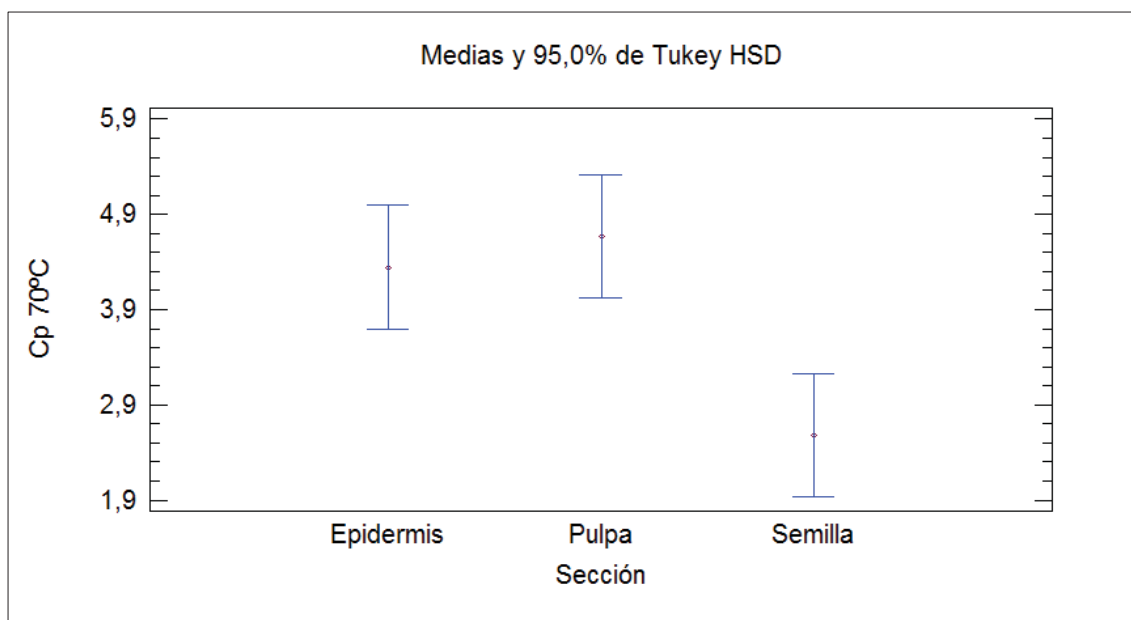
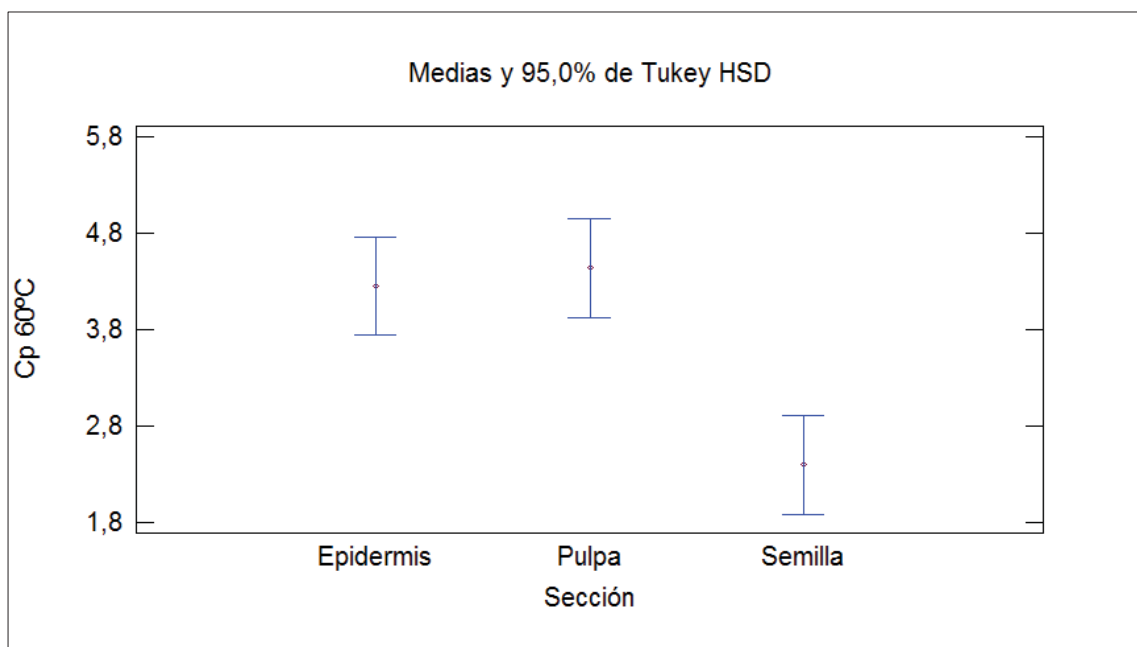
Anexo 5. Comparación de calor específico a 20 °C y 30 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta



Anexo 6. Comparación de calor específico a 40 °C y 50 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta



Anexo 7. Comparación de calor específico a 60 °C y 70 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta



Anexo 8. Comparación de calor específico a 80 °C en pulpa, epidermis y semilla de murta

