

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA

AGROINDUSTRIAL



**“DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS PARA LA
CONGELACIÓN DE LA PULPA DE CARAMBOLA (*Averrhoa
CARAMBOLA L*), PRODUCIDO EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA,
DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”**

TESIS PRESENTADO POR:

Bach. CRUZ CUELLO, ANDRÉS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERIO AGROINDUSTRIAL**

ASESOR: Ing. MEGO MEGO, VIRNE

CO-ASESOR: Ing. CHAVEZ PINCHI, MIGUEL

PUERTO MALDONADO, 2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL AMAZONICA DE MADRE
DE DIOS**

FACULTAD DE INGENIERIA

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
AGROINDUSTRIAL**



**“DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TÉRMICAS PARA LA
CONGELACIÓN DE LA PULPA DE CARAMBOLA (*Averrhoa carambola*
L), PRODUCIDO EN LA PROVINCIA DE TAMBOPATA,
DEPARTAMENTO DE MADRE DE DIOS”**

TESIS PRESENTADO POR:

Bach. CRUZ CUELLO, ANDRÉS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:
INGENIERIO AGROINDUSTRIAL**

ASESOR: Ing. MEGO MEGO, VIRNE

CO-ASESOR: Ing. CHAVEZ PINCHI, MIGUEL

PUERTO MALDONADO, 2018

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida, por sus bendiciones y lecciones medidas, por darme perseverancia y permitirme alcanzar este logro.

A mi esposa Lucia Condori Quispe y a mi hija Elayne Daniveth Cruz Condori por ser el motor y la razón de mi vida.

A mis Padres Benito Cruz Tinta y Ascencia Cuello Nina, quienes me brindan motivación constante, gran paciencia e incondicional apoyo en todos los momentos de mi vida.

“La educación no cambia el mundo,
cambia a las personas que van a cambiar
el mundo”

Paulo Freire.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios**, porque en sus aulas recibí mi formación profesional, y a todos los docentes de la Carrera Profesional de Ingeniería Agroindustrial; quienes contribuyeron en mi formación con sus conocimientos brindados durante los años de estudios en la Universidad.

De manera especial y sincera a mis asesores **Ing. Virne Mego Mego e Ing. Miguel Chávez Pinchi**, por sus valiosas sugerencias, paciencia y disposición de tiempo para ayudarme y guiarme en la elaboración del presente trabajo de investigación.

A los miembros del Jurado Calificador: **Ing. Raúl Huamán Cruz, Ing. Julián Colquehuanca Vilca y Lic. Ramón Romero Mejía**, por su valioso tiempo, sugerencias y recomendaciones para mejorar el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Finalmente a todas las personas que de una y otra forma colaboraron durante el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Andrés Cruz Cuello.

PRESENTACIÓN:

El presente trabajo de investigación tuvo como finalidad determinar las propiedades térmicas para la congelación de la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.), producido en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios.

De acuerdo al Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, la presente investigación está estructurada en cuatro capítulos.

En el Capítulo I; Problema de investigación, se incluyó la descripción del problema, la formulación del problema. El problema general planteado fue: ¿De qué manera el contenido de sólidos, el contenido de agua y la temperatura influyen sobre los parámetros termofísicos como son el punto inicial de congelación, entalpía, contenido de hielo y agua no congelada, porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente para la congelación de la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.), producido en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios?. También se plantearon los objetivos generales y específicos de la investigación. Asimismo, se definieron las variables de la investigación: independiente y dependientes y por ende la operacionalización de las variables establecidos en sus dimensiones e indicadores. De igual forma se plantearon la hipótesis general y la hipótesis específicas y como también se señala las razones que justifican el desarrollo del presente trabajo de investigación.

En el Capítulo II: Marco Teórico, comprendió antecedentes de investigaciones realizadas afines con el presente trabajo de investigación sobre todo con estudios relativos a las variables estudiadas, asimismo se describió un amplio marco teórico, la misma que fue organizada en función de las bases teóricas, científicas y tecnológicas referentes a las propiedades térmicas de los alimentos por debajo del punto de congelación como son: el punto inicial de congelación, la entalpía de congelación, el contenido de hielo y agua no

congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente, además para complementar este capítulo se añadió conceptos de términos utilizadas y que están relacionados al tema de la investigación.

En el Capítulo III, se tiene descrita la metodología de la Investigación, donde se describe el tipo de estudio y diseño del estudio, así como los procedimientos de obtención de datos y el tratamiento que se les da a los datos utilizados en la investigación. Nuestro trabajo de investigación fue de tipo experimental. Por el carácter que presenta esta investigación, se determinó que es una investigación aplicada, con un enfoque cuantitativo y experimental, porque el alcance de la investigación es más aplicable y sostiene por las leyes de la física y el término físico, además de parámetros técnicos para procesar los datos experimentales obtenidos. Este planteamiento dio como resultado el sustento científico y cuantitativo que nos permitió llegar a las conclusiones finales de nuestro trabajo de investigación. De igual forma, el método deductivo tuvo una gran importancia en la etapa experimental, ya que parte de una hipótesis sustentada por el desarrollo teórico de una determinada ciencia, que siguiendo las reglas lógicas de la deducción, permitió llegar a nuevas conclusiones. De igual manera se aplicó el método analítico que permitió construir las teorías científicas, posibilitando la sistematización del conocimiento científico, al ser deducido de un número limitado, preciso de principios e hipótesis.

En el Capítulo IV, Resultados del Trabajo de Investigación, los resultados del presente trabajo de investigación se presentaron a través de tablas, gráficos y cálculos de parámetros mediante el uso de ecuaciones matemáticas propuestos por Schwartzberg y Chen para el cálculo de propiedades térmicas de los alimentos por debajo del punto de congelación, como son el punto inicial de congelación, la entalpía de congelación, el contenido de hielo y agua no congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente, se concluyó esta parte con las explicaciones e interpretaciones de los cuadros y gráficos y las discusiones de los resultados.

Finalmente se consignó las conclusiones y recomendaciones a los que arriba la investigación y las fuentes bibliográficas utilizadas como soporte de la investigación. Finalizó con los anexos respectivos.

RESUMEN

El presente trabajo consistió en determinar las propiedades termofísicas de la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.), relacionados con su congelación. Las frutas de carambola fueron obtenidas del mercado modelo de la ciudad de Puerto Maldonado, Provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios.

El índice de madurez se observó cuando la fruta a la presión ejercida con la mano era suave y blanda, color característico al estado de maduro y aroma propio de la fruta madura. El fruto de carambola utilizado presentó un diámetro entre 4 a 8 cm., peso de 70 g., rendimiento en pulpa de 90% y pH de 2.80. La composición química proximal de la fruta presentó los siguientes valores: 88.10 % de humedad, 0.34 % de proteína, 0.10 % de grasa, 0.44 % de ceniza, 1.20 % de fibra y 11.02% de carbohidratos respectivamente.

El punto inicial de congelación de la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.) fue de $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir de este parámetro y utilizando las ecuaciones de SCHWARTZBERT (1981) y CHEN (1985), se obtuvieron los valores de b (relación de masa de agua ligada) de 0.30; M_s (relación de peso molecular efectivo) de 314 y E (relación de peso molecular del agua entre el peso molecular efectivo de sólidos) de 0.06205.

Las curvas precedidas de contenido de hielo, calor específico aparente y entalpía de la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.), presentan comportamientos similares de curvas de otras frutas reportadas por RIEDEL (1956), HELDMAN (1982), HSIEH et al. (1977), GONZALES (1991), presentando una aceptable concordancia con los valores calculados por las ecuaciones de SCHWARTZBERT (1,976, 1981) y CHEN (1985).

Así mismo las curvas de congelación encontradas, presentan el comportamiento típico para los alimentos.

ABSTRACT

The present paper is based on determination of thermophysical properties of Carambola (*Averrhoa carambola* L.) fruit, with relationship to freezing. The fruits were obtained from Puerto Maldonado city, Province of Tambopata, Región of Madre de Dios.

The ripeness index, observed when pulp both on pressure by hand that notified soft and bland, characteristic color state and proper aroma of ripe fruit. Carambola fruit used presents a diameter between 4 to 8 cm., weight 70 g., yield in pulp 90% and pH 2.8.

The approximate chemical composition presented following content for both Carambola, moisture 88.10 %, protein 0.34 %, fat 0.10 %, ash 0.44, and carbohydrate 11.02 % respectively.

By these approximate chemical conditions it obtained the freezing initial point for carambola – 1.5°C, starting this and using SCHWARTZBERT (1981) and CHEN (1985) equations, it got values b (relationship between water mass) 0.30, M_s (relationship effective molecular weight) 314 and E (relationship water molecular weight between effective molecular weight of solids) 0.06205.

The predicted curves of ice content, apparent specific heat and enthalpy as much Carambola, present similar behaviours to indicated by in another fruits reported by RIEDEL (1956), HELDMAN (1982), HSIEH et al. (1977), GONZALES (1991), presenting an acceptable concord with estimate values by SCHWARTZBERT (1976, 1981) and CHEN (1985) equations.

Likewise the encountered freezing curves, present the typical behavior for of foods.

INTRODUCCIÓN

En la región amazónica del Perú encontramos una amplia disponibilidad de frutos nativos, y que muchos de ellos son considerados por la comunidad científica mundial como fuentes naturales de antioxidantes que tienen efecto beneficio para la salud humana. El fruto de carambola *Averrhoa carambola* L., es una oxalidaceae que lleva consigo características sensoriales inconfundibles en su aroma y sabor, razón por la cual, resulta siendo un fruto de gran interés para la industria alimentaria y la industria farmacéutica. Debido a que en su composición química encontramos cantidades considerables de minerales (calcio, fósforo y hierro) y vitaminas del complejo B (Caroteno, Tiamina, Riboflavina y niacina), así como el ácido ascórbico o también conocido como vitamina C, el fruto de la carambola se ha convertido por excelencia, en una fuente importante en la nutrición humana y sobre todo en aquellas personas con problemas de salud referente a males como: obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares y ciertos tipos de cáncer. Los cultivos de carambola tienen elevados índices de productividad, siendo de mucha importancia económica para el productor, y los frutos como fuente de materia prima importante para la agroindustria, es usada para la elaboración de refrescos, néctares, mermeladas, bebidas energizantes, suplementos vitamínicos, salsas dulces, saladas y picantes, entre otros.

El consumo frecuente del fruto de carambola ya sea en su forma fresca o procesada en la alimentación humana, impacta positivamente en la salud, actuando sobre el organismo humano ya sea bloqueando y eliminando los radicales libres, así como retardan el envejecimiento prematuro, previenen los infartos, disminuyen los niveles de colesterol y triglicéridos en la sangre, y lo más extraordinario descubierto por la ciencia médica es que disminuyen las probabilidades de que se desarrollen el cáncer al colon, mal de Alzheimer, arteriosclerosis, enfermedades hepáticas, problemas prostáticos y neoplasias en la piel. (Martinez, 2011).

Preparar un refresco o un jugo de carambola, que además de ser una bebida saludable y por poseer bondades nutraceuticas, Es recomendado para niños,

jóvenes, adultos, deportistas, madres embarazadas o lactantes y ancianos. Por sus bondades medicinales, también son usadas para combatir la fiebre, la diarrea y el escorbuto. (Gavica & Estefania, 2010-2011). De igual manera, la carambola es un agente que se utiliza en el campo de la medicina para elevar los niveles de plaquetas en seres humanos y como agente antipirético para bajar la fiebre y también como agente antiinflamatorio para minimizar el dolor de huesos en casos de dengue clásico o hemorrágico (Martínez, 2011).

Por su bajo contenido de calorías (36 - 57 cal/100 g), el fruto de carambola es una fuente importante de potasio y de vitamina C. En la industria alimentaria se procesan los frutos para ser conservados por los principios de tratamiento térmico (enlatado), principios de secado o deshidratación (orejones o rodajas secas), principios de conservación por azucaramiento (néctares, refrescos, mermeladas, etc). (Domínguez, et al. 2012). Además, también la carambola se usa dentro de la medicina tradicional, para el tratamiento de hemorroides, el asma, es diurético para pacientes hipertensos, vermífugo, antídoto contra venenos y alivia el malestar por el exceso de licor. (Casaca, 2005). En similar manera la pulpa ácida de la carambola es usada en forma casera, para quitar manchas en la ropa blanca y en la parte metal-mecánica para abrillantar metales de latón y bronce. (Orduz y Rangel, 2002).

El fruto de carambola es un alimento altamente perecible, debido a su composición química, el contenido de humedad del fruto que lo hace muy inestable, presencia de microorganismos y enzimas propias de la fruta, y también se ven influenciados por otros factores como la temperatura, la luz solar, la humedad relativa del medio, la presencia de oxígeno, las condiciones de transporte y embalaje, el sistema de manipuleo, las condiciones ambientales (frijes, lluvias intensas y temperaturas extremas de verano) del Departamento de Madre de Dios, lo cual hace propicia la velocidad del proceso de deterioro de la fruta de carambola; trayendo como consecuencia pérdidas económicas para el productor, y también pérdidas en la calidad de la materia prima.

Los principios que gobiernan la congelación de los alimentos, es utilizada en la industria para la conservación de los productos durante un largo tiempo. Este tipo de conservación, consiste en congelar la mayor parte del agua que contiene el producto a una temperatura más baja que el punto de congelamiento, que por lo general es de $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la agroindustria es una de las técnicas más aplicadas para la obtención de productos mínimamente procesados, productos de humedades intermedias y productos de baja humedad que pueden ampliar su tiempo de comercialización y vida útil al ser refrigerados y congelados adecuadamente.

En el diseño de cámaras de congelación y sistemas de almacenamiento de alimentos en frío, es importante realizar una serie de experimentos para conocer cómo varía la temperatura del alimento en función del tiempo y la composición del alimento para determinar los parámetros de congelación como son la temperatura interna, la temperatura del medio ambiente, la humedad y la humedad relativa, la presión, la velocidad de congelación, el punto inicial de congelación, el método de congelación, y hasta las condiciones ambientales (épocas de verano e invierno) y geográficas del lugar donde son instaladas la planta de frío, (altitud, temperaturas promedio anuales, presión atmosférica, entre otros). El proceso de congelación del agua es distinto al proceso de congelación de los alimentos. (Ibarz & Barboza - Cánovas, 2005).

Las propiedades térmicas de mayor importancia en los alimentos son: la difusividad térmica, conductividad térmica, y el calor específico. Están estrechamente relacionada la entalpía y los coeficientes de penetración de calor. En este grupo también se consideran otras propiedades como la cantidad de agua no congelada y punto de congelación inicial y otras.

Anteriormente para la aplicación de cálculos de ingeniería era común emplear valores generales de propiedades térmicas, pero con el avance la innovación, investigación y aplicación de los modelos matemáticos y numéricos se vio la necesidad de disponer de datos exactos y concretos. Finalmente, planteó la necesidad de disponer de datos exactos y específicos.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.3 OBJETIVOS	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2. Objetivos Específicos	19
1.4 VARIABLES	19
1.4.1. Variable Independiente	19
1.4.2. Variables Dependientes	19
1.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	20
1.6 HIPÓTESIS	21
1.6.1. Hipótesis General.....	21
1.6.2. Hipótesis Específicas	21
1.7 JUSTIFICACIÓN	22
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES REALIZADAS AFINES CON EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	23
2.2 MARCO TEORICO	29
2.2.1 El cultivo de carambola (<i>Averrhoa carambola</i> L.).....	29
2.2.2 Clasificación Científica	30
2.2.3 Descripción Botánica.....	30
2.2.4 Proceso de obtención de pulpa de fruta	34
2.2.5 Composición química proximal del fruto de carambola.....	40
2.2.6 El proceso de congelación	40
2.2.7 El agua en los alimentos congelados	44
2.2.8 Estimación de las propiedades termodinamicas de un alimento a temperaturas de congelación	47
2.2.9 Propiedades termicas de los alimentos a bajas temperaturas	62
2.2.10 Investigación Experimental y Métodos de Medición	68
2.2.11 Diagramas de congelación de alimentos.....	69
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	73
CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN	76
3.1 TIPO DE ESTUDIO	76
3.2 DISEÑO DEL ESTUDIO.....	76
3.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS	76
3.4. TRATAMIENTO DE LOS DATOS	77
3.5 LUGAR DE EJECUCIÓN	77
3.6 MATERIA PRIMA	78
3.7 EQUIPOS Y MATERIALES	78

3.7.1.	Equipos.....	78
3.7.2.	Materiales.....	78
3.8	MÉTODOS.....	79
3.8.1	Análisis Químico.....	79
3.8.2	Análisis Organoléptico del Producto Congelado	80
3.8.3.	Preparación de Muestras	80
3.8.4	Determinación experimental del punto inicial de congelación	81
3.8.5.	Determinación experimental de la entalpía de congelación.....	83
3.8.6.	Evaluación de los parámetros del punto de congelación.....	85
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		87
4.1.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	87
4.1.1.	Análisis químico	87
4.1.2.	Análisis físico.....	88
4.1.3	Análisis organoléptico	89
4.1.4	Punto inicial de congelación y parámetros empíricos.....	89
4.1.5	contenido y velocidad de formación de hielo con la temperatura	93
4.1.6	Entalpía de congelación	96
4.1.7.	Calor específico aparente	99
4.1.8	Evaluación del producto congelado	102
4.2	CONCLUSIONES.....	105
4.3	RECOMENDACIONES.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		107
ANEXO 01: CALIBRACIÓN DEL TERMO COMERCIAL.....		113
ANEXO 02: CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL DEI FRUTO DE CARAMBOLA		115
ANEXO 03: VALORES EXPERIMENTALES DEL PUNTO INICIAL DE CONGELACION DE LA PULPA DE CARAMBOLA		116
ANEXO N° 04: Ficha de Evaluación Sensorial del Atributo Sabor de la pulpa de Carambola		118
ANEXO 05: FOTOS DEL DESARROLLO DE LA PARTE EXPERIMENTAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....		119
ANEXO 06: CÁLCULO DE PARÁMETROS TERMOFÍSICOS		125

Índice de Tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables	20
Tabla 2. Predicción de propiedades termo físicas de 43 productos alimenticios	25
Tabla 3: Valores experimentales de la conductividad térmica del jugo de guayaba en distintas concentraciones y temperaturas	27
Tabla 4: Operaciones generales en la obtención de pulpas.....	34
Tabla 5: Composición química de la carambola en base a 100 g de parte comestible.	40
Tabla 6: Propiedades físicas del agua y el hielo	45
Tabla 7: Calor específico según componente químico.....	65
Tabla 8: Análisis Físico Químico del Fruto de Carambola.....	79
Tabla 9: Composición químico proximal promedio del fruto de carambola (Averrhoa carambola L.).....	87
Tabla 10: Características físicas del fruto de carambola (Averrhoa carambola L.).....	88
Tabla 11: Punto inicial de congelación experimental y calculado de la pulpa de carambola (Averrhoa carambola L.).	91
Tabla 12: Contenido y velocidad de formación de hielo calculado en función de la temperatura para la pulpa de Carambola.	94
Tabla 13: Contenido de hielo y agua no congelada con respecto a la temperatura para la pulpa de Carambola.	95
Tabla 14: Determinación calorimétrica de la entalpía para la pulpa de carambola.....	97
Tabla 15: Entalpía de congelación experimental y calculada para la pulpa de carambola.....	97
Tabla 16: Calor específico aparente de la pulpa de carambola.....	100
Tabla 17: Evaluación sensorial del atributo sabor de la pulpa de carambola	102
Tabla 18: Análisis de varianza del atributo sabor de la pulpa de carambola	102

Índice de Graficas

Grafica 1: Planta y fruto de la carambola	29
Grafica 2: Diagrama del proceso de obtención de pulpa de fruta	35
Grafica 3: Curvas de congelamiento para agua pura y conteniendo un soluto	71
Grafica 4: Curvas de congelación típica de alimentos a diferentes velocidades de congelación	73
Grafica 5: Diagrama de Flujo de Preparación de la Materia Prima	81
Grafica 6: Termo comercial utilizada en la determinación del punto de congelación de la pulpa de carambola.....	82
Grafica 7: Termo utilizado en la determinación de la entalpía del fruto de carambola.	83
Grafica 8: Curva de congelación de la pulpa de carambola	91
Grafica 9: Curva teórica del punto de congelación de la pulpa de carambola en comparación con los resultados experimentales.....	92
Grafica 10: Curva de contenido de hielo calculado en función de la temperatura para la pulpa de Carambola	96
Grafica 11: Comparación de valores experimentales de entalpía con teóricos obtenidos mediante la ecuación de Schwartzberg para la pulpa de Carambola. .	98
Grafica 12: Comparación de valores experimentales de entalpía con teóricos obtenidos mediante la ecuación de Chen para la pulpa de Carambola.	99
Grafica 13: Curva de calor específico aparente para la pulpa de carambola, obtenida mediante la ecuación de SCHWARTZBERG (1981).	101
Grafica 14: Curva de calibración de la garrafa térmica comercial	114

CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Las frutas y hortalizas son alimentos altamente perecibles, éstos son influenciados de sobre manera por factores internos como son la composición química de la fruta, el pH, el contenido de humedad, los grados Brix, el índice de madurez, la presencia de microorganismos y enzimas propias de la fruta, etc.; y también los factores externos como son la temperatura, la luz solar, la humedad relativa, la presencia de oxígeno, las condiciones de transporte y embalaje, el sistema de manipuleo, las condiciones ambientales (frijajes, lluvias intensas y temperaturas extremas de verano) del Departamento de Madre de Dios, lo cual hace propicia la velocidad del proceso de deterioro de los frutos frescos; trayendo como consecuencia pérdidas económicas para el productor, y también perdidas en la calidad de la materia prima.

Uno de los mayores problemas al comercializar e industrializar la fruta de carambola *Averrhoa carambola* L., es el pardemiento enzimático a causa de la polifenol oxidáosla cual genera un aspecto indeseable para el comprador, y esto es un gran problema en la industria ya que genera perdida de valor comercial y calidad.

La congelación de alimentos es el proceso mayormente utilizados para su conservación, debido a 2 factores principales, el primer factor es que la mayoría de los microorganismos no crecen a temperaturas bajas, y el otro factor es que el agua del producto se transforma en hielo, haciendo que descienda el agua del producto y esto permite a que no se desarrollen los microorganismos.

Los alimentos poseen sistemas muy complejos debido a que veces son anisotrópicos, termolábiles, poseen variabilidad en su composición y son perecedores, por lo tanto es un desafío establecer leyes y principios en la ingeniería de alimentos. Por estas razones, hacen mucha falta investigar aún más a profundidad trabajos referente a procesos de alimentos, principalmente que justifique la necesidad de hacer investigaciones aplicadas que permitan realizar una exploración sobre el cumplimiento de leyes científicas en

productos sembrados, producidos y consumidos en la región de Madre de Dios.

Una de las restricciones para la elaboración de procesos de productos alimenticios es la falta de datos. Es por ello que es importante tomar en consideraciones las transformaciones que suceden cuando los productos son sometidos a procesos de deshidratación, evaporación y congelación.

En muchos casos, la falta de métodos estandarizados limita la validez de los valores reportados, debido a la innovación continua y al progreso tecnológico. Existen varios modelos para calcular las propiedades térmicas, pero la mayoría de ellos considera a la "composición" como factor primordial, incluso otros agregan la temperatura. Estos modelos se utilizan cuando no existe un modelo en particular, e incluso son importantes cuando se trata de datos de puntos de congelaciones de alimentos, debido a que el factor determinante es el agua congelada.

Asimismo para la utilización de las ecuaciones para calcular las propiedades termo físicas, como punto de congelación inicial, peso molecular, entalpía, calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, se requiere de conocimiento el método para su determinación en el laboratorio. Pues por su variedad inmensa de producto se requieren ser determinados de acuerdo a sus índices de control de calidad para lo cual es preciso su cuantificación experimental.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera el contenido de sólidos, el contenido de agua y la temperatura influyen sobre los parámetros termofísicos como son el punto inicial de congelación, entalpía, contenido de hielo y agua no congelada, porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente, para la congelación de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola* L, producida en la provincia de Tambopata, Departamento de Madre de Dios?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Determinar las propiedades termofísicas para la congelación de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L*, producido en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar la composición química proximal, propiedades físicas y características sensoriales del atributo sabor del fruto de carambola *Averrhoa carambola L*.
- Determinar experimentalmente los parámetros termofísicos de congelación como son el punto inicial de congelación y la entalpía de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L*.
- Estimar otros parámetros de congelación como son el contenido de hielo y agua no congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L*, mediante ecuaciones matemáticas de correlación de resultados experimentales.

1.4 VARIABLES

1.4.1. Variable Independiente

- Temperatura

1.4.2. Variables Dependientes

- Punto inicial de congelación
- Entalpía de congelación
- Contenido de hielo y agua no congelada
- Porcentaje y velocidad de formación de hielo
- Calor específico aparente

1.5 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES
1. Variable Independiente: -Temperatura	Rango de Temperaturas comprendidas entre 30°C a -15°C.	Intervalos de lectura de la temperatura cada 10 segundos.
2. Variables Dependientes: - Propiedades termofísicas	Punto inicial de congelación	- Valores experimentales del punto inicial de congelación. - Valores del punto inicial de congelación calculados mediante la fórmula de Schwartzberg.
	Entalpía de congelación	- Valores experimentales de la entalpía de congelación. - Valores de la entalpía de congelación calculados mediante la fórmula de Schwartzberg - Valores de la entalpía de congelación calculados mediante la fórmula de Chen.
	Contenido de hielo y agua no congelada	- Valores del contenido de hielo en % calculados mediante la fórmula de Schwartzberg. - Valores del contenido de hielo en % calculados mediante la fórmula de Chen. - Valores del contenido de agua no congelada en calculada mediante la fórmula de Schwartzberg. - Valores teóricos del contenido de agua no congelada en % calculados mediante la fórmula de Chen.
	Porcentaje y velocidad de formación de hielo	- Valores del contenido de hielo calculados mediante la fórmula de Schwartzberg. - Valores del contenido de hielo calculados mediante la fórmula de Chen. - Valores teóricos de la velocidad de formación de hielo calculados mediante la fórmula de Schwartzberg.

		-Valores teóricos de la velocidad de formación de hielo calculados mediante la fórmula de Chen.
	Calor específico aparente	-Valores teóricos del calor específico aparente calculados mediante la fórmula de Schwartzberg. -Valores teóricos del calor específico aparente calculados mediante la fórmula de Chen.

Fuente: Elaboración propia

1.6 HIPÓTESIS

1.6.1. Hipótesis General

Las calidad organoléptica se relaciona significativamente con el contenido de humedad y la temperatura de congelación de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L.* producida en la provincia de Tambopata, departamento de madre de Dios.

1.6.2. Hipótesis Específicas

- **Ha:** El porcentaje de humedad y la temperatura de congelación afecta significativamente la característica sensorial del sabor durante el tiempo de almacenamiento de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L.* producida en la provincia de Tambopata, departamento de madre de Dios.
- **Ho:** El porcentaje de humedad y la temperatura de congelación no afecta significativamente la característica sensorial del sabor durante el tiempo de almacenamiento de la pulpa de carambola *Averrhoa carambola L.* producida en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios.

NOTA: No se han planteado hipótesis específicas para los objetivos específicos 2 y 3, por cuanto se han hecho comparaciones entre los resultados obtenidos experimentalmente y los cálculos efectuados a través de las

ecuaciones matemáticas de Schwartzberg y Cheng respectivamente, para las variables dependientes: punto inicial de congelación, entalpía, contenido de hielo y agua no congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente.

1.7 JUSTIFICACIÓN

Es de mucha importancia conocer las propiedades térmicas de los alimentos, con el propósito de que pueda diseñar el tamaño de equipos para el manejo específico de cargas térmicas, tiempos necesarios para que el alimento sea procesado, las mejoras y optimización de la productividad y eficiencia de las operaciones de congelamiento y descongelamiento, además de cómo estos procesos pueden ser manipulados de manera eficiente para compensar condiciones irregulares y desarreglos en el proceso de congelación y sobre todo que garanticen la calidad del producto obtenido.

Los datos térmicos en la ingeniería alimentaria tienen muchos usos. Por ello están clasificados en 3 grandes grupos: flujos de calor, cálculos de carga de calor basada en entalpía (H), y por último los criterios de calidad, donde se da los cambios de fase.

Por otro lado también son utilizadas en la tecnología de alimentos como: construcción de equipos, diseño o comparación de máquinas y a la vez en el control de las plantas industriales, en donde se puede evitar pruebas experimentales de mayor costo y prolongadas, como indicador de control de la calidad de propiedades del punto de fusión o el inicio de congelación se utilizan ampliamente para determinar la pureza de los alimentos, especialmente en la leche y grasa.

Actualmente los tratamientos que reciben ciertas frutas, se centran primordialmente en alargar su vida de los productos en el mercado, con total seguridad para su consumo, para conseguir este fin, generalmente se utiliza las tecnologías térmicas, pero los tratamientos que se le da al producto hace que disminuya su vitamina y otros nutrientes que posee.

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES REALIZADAS AFINES CON EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CORONADO, Manuel (1992), determinó los parámetros termodinámicos para la congelación del músculo de camarón gigante *Macrobrachium rosenbergii*, siendo su punto inicial de congelación de $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, para un contenido de humedad de 78.6 %. El rango de valores de la entalpía de congelación varió de -47.04 Kcal/Kg a -70.44 Kcal/Kg ; el porcentaje de hielo a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue de 89.56 % mediante la ecuación de Schwartzbert y de 90.84 % mediante la ecuación de Chen. Mientras que la velocidad de formación de hielo a la temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ fue de $0.0004\text{ Kg/Kg }^{\circ}\text{C}$ por la ecuación de Schwartzbert y $0.0005\text{ Kg/Kg }^{\circ}\text{C}$ por la ecuación de Chen, así como el calor específico aparente fue de 0.540 y $0.470\text{ Kcal/Kg }^{\circ}\text{C}$ para las ecuaciones mencionadas anteriormente.

FLORES, Abner (2000), realizó el estudio de las propiedades termofísicas de los frutos de arazá *Eugenia stipitata Mc. Vaugh* y pomarrosa *Syzigium jambos Alston* para su congelación, habiendo logrado determinar el punto inicial de congelación de la pulpa de arazá de $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y para la pulpa de pomarrosa de $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ para contenidos de humedad de 86.8 y 85.4 % respectivamente. A partir de estos datos y utilizando las ecuaciones de Schwartzberg y Chen determinó la relación de masa de agua ligada (b) de 0.290 para el arazá y de 0.225 para la pomarrosa, relación de peso molecular efectivo (M_s) de 310.00 para el arazá y de 247.18 para la pomarrosa, relación de peso molecular del agua entre el peso molecular efectivo de sólidos (E) de 0.058 para el arazá y de 0.072 para la pomarrosa. Las curvas predecidas del contenido de hielo, calor específico aparente y entalpía tanto para el arazá y la pomarrosa, presentaron comportamientos similares de curvas de otras frutas reportadas por Riedel (1956), Helmand (1982), Hsieh et. al (1977), Gonzáles (1991), presentando una aceptable concordancia con los valores calculados por las ecuaciones de Schwartzberg (1976 y 1981) y Chen (1985).

MOREIRA A. et al (2003), realizó el trabajo de investigación titulado “Efecto de las concentraciones de sólidos solubles en las propiedades termofísicas del jugo de marañón”. En este trabajo, los investigadores determinaron la conductividad térmica, la difusividad térmica, la densidad y la viscosidad del jugo de marañón medido a 30 °C en función del contenido de sólidos solubles comprendidos en el rango de 5.5 a 25 °Brix. La conductividad térmica y difusividad térmica se determinaron simultáneamente utilizando una sonda de fuente de calor lineal. Las ventajas de este método son la corta duración de los experimentos, simplicidad, velocidad y se requieren de pequeñas cantidades de muestra. Mientras que para medir la densidad de las diferentes concentraciones de jugo de marañón, utilizó el método del picnómetro. Así mismo un reómetro de Brookfield programable utilizó para determinar la viscosidad y velocidad de cizallamiento del jugo.

En cuanto a los resultados obtenidos luego de la medición de la conductividad térmica y la difusividad térmica, comprobó que existe una fuerte dependencia de estas propiedades con la concentración de los sólidos solubles. Tal es así, que a menor concentración de los grados brix se incrementa los valores de la conductividad térmica (K), mientras que cuando la concentración de los grados brix aumenta el valor de K disminuye. El comportamiento lineal de la difusividad térmica versus la concentración de los grados brix a temperatura constante de 30°C, apreció que a menor concentración de los grados brix del jugo de marañón se incrementó el valor de la difusividad térmica, mientras que a mayor concentración de los grados brix disminuyó el valor de la difusividad térmica respectivamente.

En cuanto a la relación entre la densidad y los sólidos solubles del jugo de marañón, pudo observar que la densidad del jugo de marañón es directamente proporcional a la concentración de los grados brix, es decir a mayor concentración de los grados brix del jugo de marañón, la densidad aumenta.

En este trabajo de investigación, los investigadores llegaron a las siguientes conclusiones: a) las propiedades físicas eran dependientes de la

concentración de los grados brix del jugo de marañón; b) la conductividad térmica y la difusividad térmica disminuyeron con el aumento de la concentración de los grados brix, mientras que la densidad y la viscosidad aumentaron; c) Las ecuaciones de regresión obtenidos en el presente estudio son capaces de simular las propiedades físicas del jugo de marañón; d) Los resultados de este trabajo tienen aplicación directa en el procesamiento de frutas que involucran flujo de fluidos y transferencia de calor.

PHAM, Q. (1994), publicó el trabajo de investigación titulado “Predicción de Propiedades Térmicas y Tiempo de Congelación de 43 productos alimenticios en base a su composición”. En este trabajo, el investigador utilizó el modelo de Schwartzberg para determinar el calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, punto inicial de congelación, tiempo de congelación y la actividad de agua enlazada de una gama de alimentos (carnes cocidas y crudas: res, pollo, cordero, cerdo, pescado, surimi, frutas, quesos, mantequillas, helados, gelatina de hubos, grasas de animales, etc.) sobre el rango de temperaturas de -40 a 40 ° C en base a datos de su composición química proximal, para ello utilizó un calorímetro adiabático. En la Tabla 02 se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación.

Tabla 2. Predicción de propiedades termo físicas de 43 productos alimenticios

ALIMENTOS	C_U	C_F	Q_F	X_b
(PHAM, et al, 1994)				
Tylose (76,1% wáter)	3.809	1.905	- 0.797	0.084
Tylose (76,9 % wáter)	3.784	2.308	- 0.615	0.123
Lamb Lean	3.679	2.118	- 0.803	0.054
Beef Lean	3.644	2.159	- 0.732	0.050
Chicken Lean	3.706	2.063	- 0.806	0.049
Chicken Fat	3.451	2.291	- 0.344	- 0.066
Mutton Cooked	3.660	2.092	- 0.948	0.044
Butter	3.971	1.675	- 4.809	- 0.093
Butter Unsalted	4.440	2.324	- 0.728	- 0.038
Peas Frozen	4.166	2.339	- 0.783	0.019
Mutton Liver	3.840	2.168	- 0.894	0.032
Mutton Kidney	3.939	2.215	- 0.665	0.025
Ham Cooked	3.510	1.803	- 3.283	- 0.005
Hamburger Patties	3.525	1.664	- 1.897	- 0.013
Kiwifruit	3.382	2.408	- 1.332	0.030
Venison	3.687	2.141	- 0.863	0.044
Mutton Brains	3.719	2.101	- 0.592	0.018
Gurnard	3.777	2.057	- 0.786	0.040
Terakihi	3.679	2.054	- 0.817	0.049

Pork lean	3.620	2.060	- 0.790	0.034
Beef fat	3.680	1.600	- 2.690	- 0.093
Beef lard	3.700	1.600	- 3.390	- 0.069
Pork fat	3.620	1.640	- 1.870	- 0.124
(Lindsay & Lovatt, 1994)				
Tylose	3.720	2.320	- 0.580	0.125
Butter unsalted	4.210	2.140	- 1.120	0.026
Butter salted	3.940	1.670	- 6.250	- 0.052
Cheddar cheese	3.410	1.650	- 5.930	0.026
Mozarella cheese	3.530	2.120	- 2.350	0.055
Icecream	4.070	2.870	- 2.390	- 0.020
Lean Pork	3.650	2.090	- 0.820	0.031
Venison	3.980	2.540	- 1.100	- 0.014
Pork sausage meat	3.810	1.930	- 2.230	- 0.012
Beef sausage meat	3.790	1.950	- 2.340	0.003
Beef mince	3.620	2.040	- 0.780	0.056
Beef fat	3.840	1.750	- 1.950	- 0.040
Pork kidney fat	4.060	1.760	- 0.800	- 0.058
Surimi	3.530	2.210	- 1.860	0.025
Apple (Red Delicious)	3.850	2.300	- 1.270	0.009
(Fleming, 1969)				
Lamb Loin lean	3.383	1.880	- 0.896	0.071
Lamb Loin medium	2.944	1.754	- 0.842	0.080
Lamb Loin fat	3.340	1.579	- 0.841	0.080
Lamb Kidney	3.929	2.313	- 0.957	0.094
Calf Veal	3.535	1.847	- 0.682	0.065

Fuente: PHAM Q.T. (1994), Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Nueva Gales del Sur – Australia.

ROSNAH S., et al. (1999), realizaron el trabajo de investigación titulado “Propiedades termo físicas del jugo de guayaba Tailandesa sin semilla en el rango de temperaturas de 30 a 80°C y concentración de 10 a 40 °Brix”.

En el jugo de guayaba, a 10° Brix de concentración, se realizaron el análisis proximal que incluyó proteínas, carbohidratos, grasas, cenizas, humedad y fibra. El punto inicial de congelación del jugo de guayaba se determinó por congelación de la muestra utilizando un Blast Freezer modelo FT36-C. La temperatura dentro de la muestra se midió utilizando un termocupla sonda sensor tipo HOB0 TMC6-HC. La sonda sensor termopar fue ubicado en el centro del vaso.

La conductividad térmica se determinó usando un tipo de analizador de propiedades térmicas KD2. Este se basó en el método de fuente de calor de línea y los valores se obtuvieron directamente de la lectura digital.

El calor específico se determinó a partir de análisis proximal utilizando la expresión propuesta por Held-homb y Lund (1992):

$$C_{ps} = m_w C_{pw} + m_p C_{pp} + m_F C_{Pf} + m_c C_{pc} + m_a C_{pa}$$

Los resultados del análisis químico proximal del jugo de guayaba a concentración de 10° Brix fueron los siguientes: Humedad 92.9%, Ceniza 0.74%, proteína 0.80%, fibra 0.81%. Así mismo, se ha reportado los resultados de las propiedades termofísicas del jugo de guayaba a 30°C y 10 ° Brix de concentración, según los siguientes valores: punto inicial de congelación -1.07°C, actividad de agua 1.00, y los valores de la conductividad térmica en distintas concentraciones y temperaturas se muestran en la Tabla 03.

Tabla 3: Valores experimentales de la conductividad térmica del jugo de guayaba en distintas concentraciones y temperaturas

Temperatura (°C)	Concentración (°Brix)					
	10	15	20	25	30	35
Conductividad térmica (Wm°C)						
30	0.56	0.56	0.54	0.49	0.51	0.48
40	0.56	0.48	0.52	0.41	0.51	0.50
50	0.60	0.46	0.54	0.52	0.54	0.52
60	0.59	0.61	0.56	0.56	0.54	0.52
70	0.59	0.70	0.52	0.57	0.52	0.54
80	0.59	0.78	0.54	0.56	0.61	0.55

Fuente: ROSNAH S. (1999) – Tailandia.

GIRALDO G. et al (2010), realizaron el trabajo de investigación denominado “Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo *Solanum quitoense Lam* a temperaturas por encima del punto de congelación”. La presente investigación tuvo como propósito medir la conductividad térmica, densidad, difusividad térmica y el calor específico del jugo de lulo, a una temperatura

que oscila de 48 a 78.6°C y con un contenido de agua que oscila de 0.55 a 0.90 (p/p en base humedad).

Para la obtención del calor específico y la conductividad térmica se utilizó una célula conformada por 2 cilindros concéntricos operando en estado no estacionario y estacionario correspondientemente. Se utilizó el método Dickerson para la obtención de la difusividad térmica y la picnometría para determinar la densidad del jugo.

El contenido del agua y la temperatura influenciaron mayormente en los datos de la propiedad termo físicas del jugo de lulo, dichos resultados se usaron para crear modelos matemáticos que ayuden a predecir propiedades en función de la temperatura y la concentración.

Los valores experimentales de la temperatura mostraron una menor dependencia con el contenido del agua mientras que la densidad, presentaron una fuerte dependencia. Para la comprobación de las relaciones se empleó el análisis de regresión múltiple, con lo cual obtuvieron la ecuación $\rho = 1464.88 - 483.82 X_w - 0.47 T$ con un $R^2 = 0.974$, donde X_w es el contenido de agua y T es la temperatura.

En cuanto al variable calor específico respecto al contenido de agua a diferentes temperaturas, se observe un aumento del calor específico con cada incremento de agua, este resultado fue correlacionado con un modelo lineal con la cual se obtuvo la ecuación: $C_p = 1464.88 - 483.82 X_w - 0.47 T$, con un $R^2 = 0.974$, donde X_w es el contenido de agua y T es la temperatura. Este modelo lineal señala que la variable calor específico se ve afectado significativamente con la variable contenido de agua.

El incremento del contenido del agua y la temperatura incrementa la conductividad, siendo menor su efecto. La ecuación $K = 0.137 + 0.367 X_w + 0.000899 T$, da a conocer que la variable conductividad térmica encuentra influenciada de manera directa por la temperatura y contenido de agua.

El contenido del agua y la temperatura influyó a la variable difusividad térmica esto se pudo demostrar en función a la ecuación:

$\alpha = 8.29 \times 10^{-8} + 5.27 \times 10^{-8} X_w + 2.76 \times 10^{-10} T$, Donde los signos de los coeficientes de la ecuación señalan que se da un efecto positivo de las 2 variables respecto a la difusividad térmica.

Por lo tanto a la concluyeron que la temperatura y el contenido del agua influyen significativamente en las propiedades termo físicas del jugo de lulo. Además recomiendan usar las ecuaciones encontradas.

2.2 MARCO TEORICO

2.2.1 El cultivo de carambola (*Averrhoa carambola* L.)

Descripción General

La carambola, durante años se ha cultivado en países asiáticos como: Sri Lanka, India y Malasia. Hace 1 siglo se introdujo la carambola en EE.UU, Florida. Inicialmente los frutos eran ácidos, después los países asiáticos introdujeron semillas que permitieron tener variedades de carambola. “Los mayores productores son: Taiwan, Malasia, Guyana, India, Filipinas, Australia, Israel y los Estados Unidos (Florida y Hawaii)”. (Pérez & Valdivia, 2004).



Grafica 1: Planta y fruto de la carambola

2.2.2 Clasificación Científica

La clasificación taxonómica es la siguiente:

<i>Reino</i>	: Plantae
<i>División</i>	: Espermatofita
<i>Clase</i>	: Dicotiledónea
<i>Orden</i>	: Geraniales o Gruinales
<i>Familia</i>	: Oxalidaceae
<i>Género</i>	: <i>Averrhoa</i>
<i>Especie</i>	: <i>Averrhoa carambola</i> L.

Nombre común: carambolo(a) o fruto estrella.

Fuente: Pérez & Valdivia, 2004.

2.2.3 Descripción Botánica

El árbol de la carambola posee una altura que oscila de 7 a 9 metros, las hojas de este árbol son compuestas e imparipinadas, sus flores tienen la forma de panículas, el fruto de la carambola se presenta en racimos en las ramas y tronco, tiene una forma ovalada, estrellado con 5 ángulos su color es amarillo pálido y su pulpa es muy jugosa.

El olor y sabor depende del tipo de variedad, algunos poseen un sabor agrio, dulce y muy dulce y poseen con concentración de vitamina c. (**Pérez & Valdivia, 2004**).

Distribución

El cultivo de la carambola se da en zonas de clima tropicales. En los EE.UU., la carambola mayormente se cultiva en Hawaii y al sur de Florida en los condados de Palm Beach, Lee, Miami-Dade y Broward.

Polinización

Generalmente las flores de la carambola poseen estilos cortos y largos, las cuales se denominan heterostilia. Algunos tipos de carambola para producir buena cosecha requiere de una polinización cruzada. Pero los tipos de

carambola como Arkin y Gold Star producen buenas cosechas cuando estas crecen en bosques sólidos.

Propagación Por Injerto

La enjertación de las carambolas habitualmente se realiza en patrones obtenidos de las semillas. Los patrones de la variedad Golden Star, son las que mejor se adaptan a suelos con alto pH.

Durante el periodo de crecimiento los injertos laterales y chapilla logran mejores resultados. Las plántulas sanas y vigorosas que miden 7mm (1/4 inch) de diámetro son el mejor patrón para realizar la injercción. Los esquejes deben sacarse de ramas que posean hojas si es posible cuando las yemas estén creciendo o alternativamente parar los esquejes durante 3 a 4 días antes del injerto, lo que generara el crecimiento de las yemas.

Distancias

La distancias que tienes las plantaciones de carambola es de 4,6 a 6,2 metros (15-20 pies) por entre plántulas y de 6,1 a 7.6 metros (20-25 pies) entre filas.

Producción

La producción de la fruta de la carambola puede producirse durante los diez o catorces meses de su plantación, esperando una producción de 4,5 a 18 kilos por árbol, durante los tres primeros años. A medida que va creciendo la producción aumentara, de tal forma que en el 5to y 6to año la producción seria de 45 a 68 kilos por árbol, y de 112 a 160 kilos de carambola en arboles maduros de 7 a 12 años.

En EE.UU, Florida la carambola realiza dos floraciones al año de abril a mayo y de setiembre a octubre. Pero existen floraciones que se dan durante todo el año. La cosecha del fruto mayormente se realiza durante los meses de junio a febrero con alta producción de agosto a octubre y diciembre a febrero.

Abonamiento

Las siguientes recomendaciones se basan en observaciones.

Los árboles plantados (1-2 años) en suelos de baja fertilidad requieren de unos abonos mixtos que posean nitrógeno (N), fosforo (P) y potasio (K), (¼ a ½ lb; 0.6 a 1.1 kg por árbol por aplicación) cada treinta a sesenta días. A medida que va creciendo el árbol se va incrementando la cantidad de abono

(de 1 a 3 lbs., 0.45 a 1.4 kg por árbol por aplicación) con una repetición de cuatro a ocho veces al año.

Irrigación

La irrigación mayormente se realiza en plantaciones comerciales, pero no se determinaron una frecuencia apropiada de riego. Una recomendación frecuente es que en tiempos de sequía 2 veces a la semana se aplique 1.3 cm de agua por acre.

Precaución

No es aconsejable realizar la irrigación durante temperaturas heladas y es más si existe vientos mayores a 5 mph.

Podas

En las plantaciones comerciales, controlar el tamaño de los árboles es muy importante para mantener la producción de frutos en la parte inferior de la copa y promover la fumigación foliar y la cosecha. En la actualidad no existe ninguna sugerencia para formar arboles jóvenes en frutales. Pero si existe investigaciones sobre arboles adultos, donde dan a conocer que la eliminación de las ramas bajas, hace que un árbol de 7 a 9 años tenga una altura de 1 y 13 metros , sin perjudicar su producción de frutos.

Cosecha

La cosecha de la carambola se realiza a mano, ni bien este comenzado a desarrollarse el color amarillo, para posterior almacenarlas y embarcarlas sin ningún problema.

En los campos, la carambola es colocada en caja de 25 libras, hasta ser enviados a las empacadoras, para su selección, lavado, empacado y almacenado.

La carambola para consumo casero se puede cosechar una vez que esté completamente madura o de color amarillo – dorado.

Plagas

Las plantaciones de la carambola sufren varios ataque de plagas en toda sus partes por ejemplo:

El picudo "*Diaprepes abbreviatus* L." ataca a las raíces de las plantaciones, ocasionando que esta plantación puede morir regresivamente.

La **Escama plumosa** "*Morganella longispina* Morgan" y la escama **Philephedra** "*Philephedra tuberculosa* Nakahara y Gill", ataca a las ramas y hojitas ocasionando defoliación de la planta y generar una muerte.

El **minador** "*Lepidoptera: gracillaridae*" Provoca daños en la superficie de la piel cerosa y se puede identificar por los giros y las marcas marrones que quedan en la superficie de la fruta.

La **chinche apestosa** "*Nezara* sp." y otras chinches "*Acanthocephala* sp." Pueden dañar la fruta, lo que incluye pequeños agujeros en la superficie de la fruta y áreas secas en la pulpa debajo de los agujeros. Esto puede provocar infecciones por hongos y pudrición de la fruta.

La **escama carmelita** "*Coccus hesperidum* L." y los **piojitos con cintura roja** "*Selenothrips rubrocinctus* Giard" se comen las frutas. Por otro lado al inicio de la temporada las los mapaches, zarigüeyas y los pájaros se comen las frutas.

Enfermedades

Las plantaciones de carambola sufren varios tipos de enfermedades como por ejemplo:

Los Hongos "*Cercospora averrhoa* Petch, *Corynespora cassiicola* Berk. y Curt., y *Phomopsis* sp." causan machas en las hojas y generalmente este tipo de enfermedad son comunes en plantaciones y se da en hojas viejas.

Alga roja "*Cephaleuros virescens* Kunze", atacan a las ramas, algunas señales de esta enfermedad es manchas de forma circular de color verde-rojo oxido y muerte de ramas.

La **antracnosis** "*Colletotrichum gloesporioides* Penz" son hongos que dañan a las frutas maduras. Además el hongo (*Leptothyrium* sp.) generan en las frutas áreas negruzcas. Y últimamente se ha identificado el hongo (*Pythium splendens* Braun) que es responsable del síndrome del enanismo del árbol. Este síntoma ha generado perdida de hojas, vigor, producción y a la vez reducción de los frutos.

Maduración y Almacenamiento

La cosecha de la carambola se realiza ni bien este comenzado a desarrollarse el color amarillo o verde-amarillento, para posterior ser enviados a las empacadoras, para su selección, lavado, empacado y almacenado y

embarcarlas. Esta fruta se puede almacenar a una humedad relativa del 85 al 95% y a una temperatura 41°F a 50°F, durante aproximadamente 21 días sin daños significativos o degradación de la calidad. (PÉREZ & VALDIVIA, 2004). La carambola no aumenta el contenido de azúcar después de la cosecha. Por lo tanto para consumo en casa se puede cosechar una vez que esté completamente madura o de color amarillo – dorado.

2.2.4 Proceso de obtención de pulpa de fruta

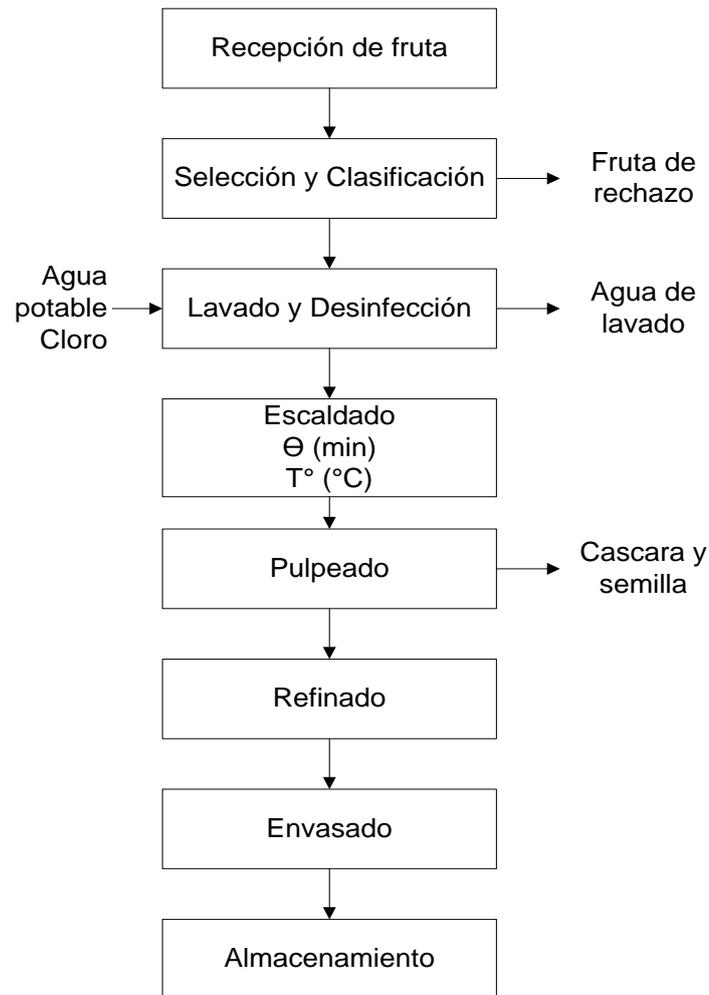
Se llama operación de adecuación a todo el proceso desde que llega el fruto a la planta hasta la separar las partes no comestibles. Las operaciones posteriores se denominan operaciones de reparación y mantenimiento. (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

Tabla 4: Operaciones generales en la obtención de pulpas

Adecuación	Higiene en la planta, Recepción, Pesado, Selección, Clasificación, Limpieza y Lavado, Desinfección, Enjuague y Pesado.
Separación	Pelado, Cortado, Extracción, Molido, Despulpado, Pesado, Refinado, Homogeneizado, Desairado, Pesado y Control de Calidad.
Conservación	Escaldado-Empacado-Congelado; Pasteurizado-Empacado; Adición de Conservan-Empacado; Esterilizado-Empacado; Concentrado-Empacado; Deshidratado-Empacado.

Fuente: MANCERA, 2010.

En el Gráfico 02, podemos observar el diagrama del proceso obtención de pulpa de frutas.



Grafica 2: Diagrama del proceso de obtención de pulpa de fruta

Fuente: HIGUERA & VILLARREAL (2002).

Descripción de las operaciones

a. Recepción

En este paso inicial se tiene establecido normas internas para recepción de frutas, como, cantidad mínimas de frutas verdes y frutos no climatéricos y frutos que no puedan continuar con el proceso fisiológico de maduración.

La cantidad de fruta maltratada o que haya sufrido daño microbiológico no debe superar el 5%. (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

b. Selección y clasificación

En este proceso se realiza la selección y clasificación de producto con ciertos criterios, como forma, tamaño, sabor, color olor, manchas, daños por insecto,

golpes, magulladuras y ausencia de defectos, etc., y todo ello con el propósito de obtener una uniformidad del producto terminado. (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

c. Limpieza y desinfección

Es la eliminación de restos no deseables que poseen microorganismos o sustancias no conocidas.

La limpieza se lleva a cabo mediante procesos físicos que consiste en cepillar y enjuagar; y procesos fisicoquímicos o químicos, a través del uso de agua con jabón o algún desinfectante.

En el caso de las frutas, estas pueden ser lavadas a través de dos formas distintas:

Por inmersión: Consiste en colocar las frutas en agua por un tiempo determinado. Mediante este método la suciedad no se desprende de la fruta por sí sola, pero este método suele usarse previo al lavado por aspersion. Para ello, según la cantidad, por cada 45 kilogramos de fruta fresca se requiere de 130 ltrs. de agua.

Por agitación: Agitar las frutas en agua ayudará a que el lavado por inmersión sea mejor.

El proceso de desinfección se lleva a cabo con la finalidad de reducir en lo mayor posible aquellos microorganismos que contienen la cascara de las frutas. Para este proceso de desinfección usualmente se hace uso de hipoclorito de sodio en solución, con una concentración de 50 ppm de cloro.

Durante el proceso de lavar y desinfectar las frutas, resulta necesario resaltar cuán importante es el manejo óptimo que se haga del agua a fin de reducir los costos de operaciones por servicios; para ello, es necesario recircular el agua que queda de la etapa de desinfección y de la etapa de aspersion, puesto que el propósito principal de la etapa de prelavado es sacar la tierra y otros

componente no deseado que pueden disminuir la calidad de las frutas (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

d. Escaldado

Es un proceso térmico que habitualmente se realiza en las industrias alimentarias, para conservar verduras y frutas, este proceso que consiste en introducir los productos en agua a una temperatura de 85°C – 100°C, durante un breve tiempo de 20 segundos a 15 minutos, dependiendo del producto, esto se realiza antes de la congelación. (FERNÁNDEZ, 2008; ANDERSSON, GEKAS, LIND, OLIVEIRA, & ÖSTE, 1994).

El escaldado se puede realizar de dos formas, la primera en agua hirviendo y la segunda a vapor de agua hirviendo. Lo recomendable es realizarlo de la segunda manera ya que permite conservar los nutrientes y la textura del producto (ALZAMORA, GUERRERO, NIETO, & VIDALE, 2004), el tiempo de escaldado depende del método de escaldación, del tipo de especie, su madurez, tamaño y básicamente de acuerdo a la temperatura que se efectúe. Durante el proceso de escaldado las enzimas catalasas, oxidasas, lipoxigenasas y peroxidasas son destruidas por la alta temperatura (FERNÁNDEZ, 2008). El propósito más importante del escaldado neutralizar las enzimas ya que ellos son los encargados de producir olores y sabores extraños, también ocasionan la pérdida de vitaminas, durante el tiempo de congelación. El escaldado también posee una variedad de ventajas secundarias como: elimina microorganismo de la superficie del alimento, mejora el color de verduras verdes, elimina restos de plaguicidas y sabores extraños (FERNÁNDEZ, 2008) y además suaviza la fruta, lo que permite una mejor despulpación y se consiga un mayor rendimiento (GÓMEZ & VELASCO, 2010).

Las consecuencias desfavorables de la operación del escaldado, radica principalmente en la modificación de la estructura vegetal, la solubilización y destrucción de nutrientes tales como proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales en el medio de escaldado y cambios del color debido a la transformación de clorofilas en feofitinas. Por ello, el mundo científico le ha impartido especial importancia al escaldado, para ello se vienen estudiando

niveles de temperaturas altas (entre 90 y 98°C) y reducción de los niveles de los tiempos cortos (entre 3 – 5 minutos), logrando de esta manera minimizar los efectos perjudiciales en la calidad sensorial del producto como son: olor, color, sabor, textura) mediante la aplicación de distintos procedimientos (FERNÁNDEZ, 2008).

En los tejidos vegetales, la pared celular es el elemento estructural básico, y juega un papel importante en el mantenimiento de la textura. Por ello, los cambios que se producen en la pared celular, tendrán una importancia fundamental en el ablandamiento de los tejidos vegetales. El tratamiento térmico de los frutos sometidos a temperaturas comprendidos entre 60 - 70°C, ocasionan la ruptura de las membranas, la descompartimentación de los componentes celulares y la degradación de las pectinas de la lámina media y de la pared celular, siendo dichos fenómenos muy perceptibles en frutas y hortalizas de baja acidez, trayendo consigo la pérdida de su textura. A pesar de la eficacia del tratamiento térmico, su utilización sólo se recomienda cuando se trata de la inhibición del pardeamiento enzimático en frutas o vegetales que son destinadas a la congelación de la pulpa y a elaboración de conservas de frutas debido a los efectos de cocción, causantes de pérdidas de textura y al desarrollo de reacciones de pardeamiento no enzimático. El oxígeno disuelto en el fruto afecta la conservación de la calidad nutricional, funcional y sensorial de los jugos de frutas. La disminución de los niveles de oxígeno disuelto en los frutos al aplicar el escaldado, se debe a que al incrementarse la temperatura trae como consecuencia el desprendimiento de los gases ocluidos en el alimento, y ésta desgasificación favorece las operaciones posteriores, disminuyendo principalmente la pérdida de los compuestos antioxidantes por la reacción con el oxígeno o por acción enzimática (Calderón - Ortiz, 2009) y al aumentar la concentración de Dióxido de Carbono - CO₂ se inhibe la síntesis de metabolitos fenólicos (HERNÁNDEZ-VALDEZ, 2009).

e. Despulpado y refinado

Proceso a través del cual se separan la pulpa de la fruta, la cáscara, las semillas o pepas y demás residuos. “Se realiza mediante el uso de un equipo

denominado despulpadora y el despulpado se realiza por medio de una centrífuga y tamices los cuales determinan el grado de fineza de la pulpa” (HIGUERA & VILLARREAL, 2002).

f. Envasado

Este proceso consiste en llenar las pulpas de los productos en envases adecuados con una cantidad apropiada. Este proceso se puede realizar de dos formas manual y automática. La forma automática posee mayor rendimiento a un menor costo. Las maquinarias utilizadas para el envasado. Los equipos o maquinarias empleados para tal fin, deben tener una variedad de funciones, incluidos cambios de volumen o peso, presión de llenado y facilidad de limpieza de todas las piezas de acero inoxidable en contacto con la pulpa. “Existen sistemas de llenado simples en el cual las operaciones de llenar el recipiente y cerrarlo son separadas” (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

g. Almacenamiento

El producto envasado y/o empacado convenientemente deberá ser sometido al sistema de almacenamiento. Las condiciones de almacenamiento dependerán del método de conservación que se haya escogido. Las pulpas se conservan mejor bajo régimen de congelación entre -15 a -25°C, en el cual lo más importante es la estabilización de la baja temperatura y las condiciones de distribución de los envases y embalajes en el recinto, para garantizar las buenas condiciones del producto terminado que le ha de llegar al consumidor (HERNÁNDEZ & BARRERA, 2004).

2.2.5 Composición química proximal del fruto de carambola

Tabla 5: Composición química de la carambola en base a 100 g de parte

COMPONENTES MAYORES	(g)	MINERALES	(mg)	VITAMINAS	(mg)
Agua	90.0	Calcio	5.0	Caroteno (A)	90.00
Proteínas	0.5	Fósforo	18.0	Tiamina (B1)	0.04
Grasas	0.3	Hierro	0.4	Rivoflavina (B2)	0.02
Carbohidratos	9.0			Niacina (B5)	0.30
Fibra	0.6			Ac. ascórbico (C)	35.00

Fuente: TELLO, et al. (2002).

2.2.6 El proceso de congelación

La congelación es un método de conservación de los alimentos, porque tiene un efecto positivo en la prolongación de la vida de los alimentos, por lo que es más útil que otros métodos.

Este es un método basado en la influencia que provoca que la temperatura sea más baja que el punto de congelación del agua en los alimentos. Su objetivo es reducir el contenido de agua convirtiendo en hielo; reducir tanto como sea posible el agua de los alimentos no ayudara el crecimiento microbiano y las reacciones enzimáticas. Por lo tanto dado que existen moléculas de agua disponibles, solo pueden crecer aquellos que pueden vivir con poca actividad de agua. Incluso los microorganismos llegan a morir debido a la congelación y generación de cristales de hielo.

Los alimentos congelados pueden conservarse solo por tiempo de debido a que las reacciones enzimáticas siguen desarrollándose muy lentamente, además que las propiedades físico-químicas y térmicas del producto sufren cambios debido a la velocidad de formación de cristales de hielo.

La calidad de los productos congelados depende básicamente de dos factores. Por un lado, la velocidad de su progreso, por otro lado, el tamaño de los cristales formados.

Para congelar alimentos, su temperatura debe reducirse por debajo del punto de congelación de su jugo de celular; el punto de congelación de los alimentos deben estar entre -05°C y -4°C . El cambio del estado líquido del producto al estado sólido no es de manera instantánea. Un alimento no cambia su fase acuosa a sólida de forma instantánea, Es decir, no puede cristalizar de manera uniforme, porque cuando se forman los primeros cristales de hielo, el soluto disuelto en el agua aumenta en concentración, y esto lleva a la sensación de que el punto de congelación disminuye a medida que avanza el punto de congelación.

Características del proceso de congelación:

Cuando congelamos los alimentos, estos pasan por diversas fases.

- Cuando los alimentos se encuentran en ambientes muy fríos, estos comenzaran a bajar su temperatura hasta alcanzar el “punto de congelación” del líquido que contiene. La situación normal es que en este tiempo los alimentos se estén preparando para la formación de cristales.
- Fase de enucleación: en esta fase es donde recién empiecen a desarrollarles los núcleos de los cristales, y si logran conseguir un tamaño significativo, este empezara a desarrollar el crecimiento cristalino, por lo que conseguirá que el líquido o las moléculas de agua lleguen a migrar dentro del mismo alimento en forma de cristales de hielo.

Si tenemos conocimientos respecto al desarrollo de los cristales, lograremos controlar el tamaño y su desarrollo controlando la temperatura. Observemos como se realiza.

- **Temperaturas muy bajas:** los núcleos de cristales se desarrollan rápidamente, y a muy bajas temperaturas, estos surgirán a mayor cantidad dentro y fuera de las células, Este proceso se le conoce como “ultra congelación”.

- **Temperaturas cercanas al punto de fusión:** a esta temperatura el desarrollo de gérmenes son lento y pocos., por consecuencia la formación de cristales es menor pero de mayor tamaño. Este proceso se le conoce como “congelación”.

Cambios durante el proceso de congelación:

La transición del estado líquido del alimento a estado sólido, genera un incremento de volumen del alimento, llegando hasta el punto de que la envoltura del alimento se pueda romper si no consiguen dilatarse. Por lo tanto el desarrollo de los cristales de hielo, puede modificar la textura del alimento y a la vez provocar cambios químicos como: transformación de textura cremosa a arenosa, inestabilidad del sistema, desnaturalización de proteínas, precipitación de compuestos y deshidratación de tejidos próximos por migración de moléculas de agua hacia zonas que están quedando más concentradas.

Aplicaciones de la congelación:

Actualmente el “proceso de congelación” posee diversas utilidades.

- Es un método de almacenamiento de productos primarios que se utilizan en cocina.
- Método de mantenimiento de alimentos semielaborados, que concluyen elaborarse con tan solo un tratamiento de calor.
- Es un método de preservar los alimentos mayor tiempo, ya que algunos son trasladados de un lugar a otro para su consumo.

Buenas prácticas en la preparación de congelados:

- ✓ Elección y preparación de las materias primas

Cuando el producto se descongela, reflejará la calidad original del alimento al congelar, (el frío no mata microorganismos ni mejora la calidad organoléptica).

✓ Envasado del producto

El envasado de producto se realiza para evitar la transmisión de olores, oxidaciones, etc., además el envase debe cumplir ciertos requisitos para poder conservar el producto y resistir diversos factores físicos y ambientales.

✓ Congelado

Un producto congelado se considera cuando la mayor parte del contenido líquido del producto se encuentra en cristales de hielo. Cabe mencionar que existen productos que no resisten la congelación.

✓ Almacenado

La normativa alimentaria menciona que 18 °C es la temperatura adecuada para almacenar los productos congelados, ya que la actividad microbiana a esa temperatura se encuentra paralizada, más no las reacciones químicas.

✓ Descongelación

Implica colocar los alimentos a una temperatura superior a 0°C, por lo que se requiere de cierto calor. De hecho se trata de una acción delicada ya que puede repercutir respecto a sus calidades sanitarias y organolépticas del producto. Durante este proceso los alimentos generan una exudación, aun más si los tejidos de los alimentos fueron dañados por la congelación.

La exudación de los alimentos es un medio excelente para el desarrollo de los microorganismos, aun más cuando el alimento se encuentra en lugares de temperaturas positivas. Es por ello que se recomienda que el producto se encuentre entre 4 -65°C el menor tiempo posible.

Y es por estas causas que se recomienda una descongelación bajo 4°C, considerando que la exudación facilita el desarrollo de microorganismos, además un producto descongelado debe ser preparada y consumida inmediatamente. Congelar nuevamente un alimento puede ser peligroso.

2.2.7 El agua en los alimentos congelados

El agua y las propiedades térmicas de los alimentos congelados.

El papel del agua en el establecimiento de las propiedades de un alimento congelado es evidente por diversas razones. El agua es el ingrediente básico de las materias primas y de los alimentos. El contenido de agua en los alimentos está sometido a grandes oscilaciones. En los productos vegetales viene a ser de un 80 a 95% (guisantes, tomates, pepinos, etc.), en las diversas clases de carne fluctúa entre el 50 a 75% (carne de cerdo, grasa de cerdo, ternera), en las aves entre el 53 a 75% (carne de ganso, carne de pollo, en el pescado entre el 55 y más del 80% (pejerrey, bacalao). (GRUDA Y POSTOLSKI, 1986).

Adicionalmente el proceso de congelamiento, causa un cambio de fase en el agua y las propiedades de los productos congelados, son influenciadas significativamente por las diferencias del agua en el estado congelado y el no congelado, (HELDMAN, 1966).

El agua es el solvente que permite el proceso de difusión y posteriores reacciones químicas y bioquímicas. Un factor importante para inhibir el proceso es la solidificación del agua. En los alimentos no aparece el agua nunca en estado puro, sino en forma de soluciones por añadidura una parte del agua se halla firmemente ligada en las estructuras proteicas y sacáridas. Estos hechos influyen esencialmente sobre las propiedades físicas del agua y también sobre el propio proceso de congelación. El agua (forma con estas sustancias una solución con dispersión de las moléculas) ve modificada sus propiedades físicas al convertirse en hielo como indica el Tabla 06. Es también importante como están unidas las sustancias a las moléculas de agua. La forma de esta ligazón puede ser muy variable. Una parte del agua que está

sólidamente unida a las sustancias proteicas no se congela nunca, ni siquiera con temperaturas muy bajas, circunstancia que influye sobre las propiedades físicas de la solución congelado y provoca también el descenso de la entalpía específica de solidificación. (GRUDA Y POSTOLSKI, 1986).

Tabla 6: Propiedades físicas del agua y el hielo

PROPIEDADES FÍSICAS	AGUA	HIELO
Calor específico (KJ/Kg °C)	4232	2098
Densidad (Kg/m ³)	1000	917
Coeficiente de conductividad calórica (W/m °K)	0.59	2.24
Coeficiente de difusividad térmica (m ² /s)	0.214x10 ⁻⁶	1.16x10 ⁻⁶
Constante dieléctrica (f/m)	88	35

Fuente: GRUDA Y POSTOLSKI (1986).

Agua ligada

El agua que contiene los alimentos está dividida en agua que se une a la estructura del tejido de forma mediata, agua libre y agua ligada por hidratación.

El agua libre que se encuentra entre las células del alimento es un disolvente de sustancias orgánico y compuestos minerales. Actúa de forma inmediata en los cambios bio-físicos-químicos en el producto. Es peculiar del agua libre que salga del producto con mucha facilidad bajo la acción de factores externos, entre otros, en procesos de sublimación durante el depósito en congelación o en forma de goteo durante el descongelado.

La mayor parte del agua se encuentra de manera indirecta en la estructura del tejido del producto mediante enlaces de hidrogeno y fuerzas electrostáticas.

La mayor cantidad de agua del producto es unida y se halla de manera mediata a la estructura tisular a través de puentes de hidrógeno y fuerzas electrostáticas. Esta agua no se ve, como la agua ligada, ninguna diferencia esencial de comportamiento así también tiene, entre otras propiedades, el

carácter de un disolvente y lo mismo que el agua libre participa en las transformaciones.

El agua de hidratación del producto se encuentra en las moléculas dipolares se enlazan sólidamente, mediante adsorción con iones y grupos proteicos polares, así como a veces con polisacáridos. El agua de hidratación no está sujeta a influencias externas y no participa en el cambio de fase que se produce durante el proceso de congelación. El grado de concentración de las moléculas de agua de hidratación resultantes de las fuerzas de adsorción se manifiesta en diferencias importantes referentes a las propiedades (mayor densidad, menor tensión de vapor, diferentes magnitudes de la capacidad calórica específica y de las constantes dieléctricas).

La fracción del agua ligada de hidratación es relativamente constante oscilando alrededor del 10% de la cantidad total de agua del producto. Las proporciones entre el agua libre y el agua unida mediatamente dentro de la estructura tisular, varían dentro de una amplia zona bajo la influencia de diversos factores que actúan durante la elaboración y almacenamiento. El proceso de congelación se caracteriza principalmente por la proporción existente entre la cantidad de agua congelada y la cantidad total de agua. La cantidad definitiva de agua congelada determina las propiedades físicas del producto congelado. (GRUDA Y POSTOLSKI, 1986).

En el pescado se admiten cifras de agua ligada de 0.35 Kg/Kg. En la carne con diferentes contenidos de agua, se obtienen valores cercanos a 0.35 Kg/Kg. (RIEDEL, 1956) mencionado por (GRUDA Y POSTOLSKI, 1986).

DUCKWORTH (1971) citado por (GRUDA Y POSTOLSKI, 1986), reportó valores de agua ligada de 0.24 – 0.27 Kg/Kg. para carne y músculo de pescado; y para vegetales de 0.18 a 0.25 Kg/Kg., usando un analizador térmico diferencial.

2.2.8 Estimación de las propiedades termodinámicas de un alimento a temperaturas de congelación

Generalidades

El ingeniero agroindustrial tiene muchas veces la necesidad de predecir transferencia de calor en alimentos congelados o descongelados, que le permita determinar procedimientos de producción y manejos convenientes. Sin embargo la confiabilidad de estas predicciones está directamente relacionada a la exactitud para estimar valores de propiedades termofísicas del sistema de alimentos en el rango de temperatura de congelación. (HAYAKAWA, 1977), indicado por (SUCCAR, 1985)

Estos valores incluyen entalpías y/o calor específico aparente y conductividad térmica. Métodos teóricos y empíricos han sido desarrollados a fin de predecir estas propiedades de alimentos congelados. Las ecuaciones teóricas son usualmente desarrolladas sobre las bases de las propiedades termofísicas de los componentes del alimento y/o suposición de aquellos alimentos que se comportan como un sistema de solución binaria idealizada. Las ecuaciones empíricas están basadas sobre el previo conocimiento de los datos termofísicos de los alimentos medidos a través de procedimientos experimentales, como también la aplicación de técnicas estadísticas y matemáticas. (SUCCAR, 1985).

Relación termodinámica fundamental

HELDMAN (1982), afirma que uno de los parámetros más básicos en el área de procesamiento de alimentos y sus aplicaciones es el contenido de calor o entalpía. En termodinámica, este parámetro está definido por la siguiente ecuación:

$$H = U + P V \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dónde: U es la energía interna de un sistema, P es la presión absoluta y V es el volumen del sistema.

Algún cambio en la entalpía sería debido a un cambio en el contenido de calor del sistema, cuando el cambio ocurre a una presión constante. La entalpía (H) entonces queda bien definida como una función de estado, junto con otros parámetros básicos, tales como la energía interna (U), temperatura (T), presión (P) y volumen (V).

Uno de los parámetros básicos de la termodinámica, usada considerablemente en la descripción del cocimiento y congelamiento de productos alimenticios es el calor específico a presión constante, definida por la siguiente ecuación:

$$C_p = \left. \frac{\partial H}{\partial T} \right|_p \dots\dots\dots (2)$$

Como indica la ecuación (2), el calor específico a presión constante, representa el cambio en entalpía o contenido de calor para un cambio dado en temperatura, cuando el cambio ocurre a una presión constante. Este parámetro toma valores diferentes dependiendo del producto considerado. Si los valores de este parámetro termodinámico son conocidos, esto es casi exclusivamente usado en el cálculo del contenido de calor o entalpía de un producto sobre un referencial dado.

Otra función de estado es la entropía. El cambio de entropía es definido por la siguiente ecuación:

$$ds = \frac{dq}{T} \dots\dots\dots (3)$$

Si un sistema es mantenido a una temperatura y presión constante, como es el caso de muchos productos alimenticios que están en almacenamiento, mejor dicho un tipo especial de condición de equilibrio es logrado. Esta condición de equilibrio resulta en la definición de una nueva función termodinámica llamada energía libre y descrita por la siguiente ecuación:

$$G = H - TS \quad \dots\dots\dots (4)$$

Como es indicado por la ecuación (4) la energía libre (G) es igual a la diferencia entre la entalpía (H) y el producto de la temperatura y entropía. Un cambio en la energía libre durante alguna clase de reacción es frecuentemente igualado al trabajo neto determinado sobre un sistema en un proceso reversible. Para procesos isotérmicos esto es obvio de la ecuación (4), que el cambio en la energía libre puede ser definido por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad \dots\dots\dots (5)$$

Muchos procesos usados en la industria alimenticia envuelven un cambio de estado dentro del producto. La termodinámica puede ser utilizada para describir o explicar las condiciones existentes. Si este cambio ocurre a una temperatura y presión constante, como es el caso en la mayoría de los cambios de fase de interés, los cambios del sistema de un estado de alta energía libre a un estado de baja energía libre, este cambio en energía libre es normalmente considerado como el potencial termodinámico, la diferencia, entre los niveles de energía libre de dos fases implicadas en un cambio de fase.

Esta definición de potencial termodinámico conduce hacia la definición de potencial químico, el cual está expresado por la siguiente ecuación:

$$u_i = \left[\frac{\partial G}{\partial n_i} \right]_{T, P, n_j} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Donde u representa el número de moles del componente (i) presente en el sistema. El potencial químico representa el cambio en la energía libre en el sistema, con el cambio en número de moles de los componentes dados (i), mientras la temperatura, presión y número de moles de todos los otros componentes indicados por j, son mantenidos constantes. En otras palabras el potencial químico es una medida de como la energía libre de un cambio de fase depende de los cambios en composición. El potencial químico será utilizado en la derivación de expresiones describiendo la depresión del punto

de congelamiento y la elevación del punto de ebullición que puede ser aplicado para productos alimenticios.

Una de las más relevantes propiedades del agua en el alimento, es la depresión del punto de congelamiento. Dado que todos los productos alimenticios contienen relativamente grandes cantidades de humedad o agua en el cual varios solutos están presentes, el punto inicial de congelamiento del agua en el producto será depreciado a algún nivel debajo de lo esperado para agua pura. La magnitud de esta depresión del punto de congelamiento se convierte en una función directa del peso molecular y concentración de solutos en el producto alimenticio y dentro de una solución en el agua. La expresión o expresiones que predicen en gran parte la depresión del punto de congelamiento pueden ser derivadas de la relación termodinámica, basado en el equilibrio entre los estados de un sistema.

Fundamentado en la situación que el cambio de energía libre, para un sistema libre en equilibrio debe ser cero y la ecuación (6), que define el potencial químico para cada fase de un sistema debe ser igual, como se ilustra en la siguiente ecuación:

$$u^{\alpha} = u^{\beta} \dots\dots\dots (7)$$

Donde (α) y (β) representan dos fases separadas del sistema. Utilizando una de las relaciones básicas de la termodinámica que indican que el cambio en el potencial químico con presión a una temperatura constante será igual al volumen parcial molar, ello indica que el potencial químico de una solución será descrito por la siguiente expresión:

$$n_A^{\text{soln}} = n_A^{\circ} + Rg T_A \ln P_a \dots\dots\dots (8)$$

En la ecuación (8), el potencial químico a 1 atmósfera de presión, tiene sobre escrita cero y T es la temperatura absoluta.

Utilizando la Ley de Raoult:

$$P_A = X_A P_A^{\circ} \dots\dots\dots (9)$$

Donde P_A es la presión parcial de vapor del componente A sobre una solución, el cual tiene la fracción mol (X_A) y P_A^0 es la presión de vapor del líquido puro (A) a la misma temperatura.

La ecuación (8) se convierte en:

$$n_A = n_A^0 + RgT_A \ln P_A^0 + RgT_A \ln X_A \quad \dots\dots\dots (10)$$

Que expresa la relación entre mol fracción (X_A) y el potencial químico del componente A en solución. A una temperatura y presión constantes, los primeros dos términos del extremo derecho de la ecuación (10) son constantes y la expresión puede ser escrita como sigue:

$$n_A = n_A^{ol} + RgT_A \ln X_A \quad \dots\dots\dots (11)$$

El cual ilustra la relación directa entre el potencial químico de un componente A y la fracción mol de aquel componente en una solución ideal. Para los sólidos y líquidos en equilibrio, la ecuación (11) puede ser escrito como sigue:

$$n_A^s = n_A^{ol} + RgT_A \ln X_A \quad \dots\dots\dots (12)$$

Utilizando la definición del potencial químico dado por la ecuación (6), se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{G_A^{os} - G_A^{ol}}{Rg T_A} = \ln X_A \quad \dots\dots\dots (13)$$

El cual expresa la diferencia en las energías molar libre entre las fases sólido y líquido. Dado que la energía libre puede ser relacionado con la entalpía por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial T_A} \left[\frac{G}{T_A} \right] = - \frac{H}{T_A^2} \quad \dots\dots\dots (14)$$

La ecuación (12), puede ser escrita en términos de las diferencias en entalpías de las fases sólida y líquida o el calor latente de fusión como se ilustra por la siguiente expresión:

$$\frac{\bar{H}_A^{ol} - \bar{H}_A^{os}}{R_g T_A^2} = \frac{\lambda^*}{R_g T_A^2} = \frac{d \ln X_A}{dT_A} \quad \dots\dots\dots (15)$$

La ecuación (15), relaciona el calor latente de fusión con la fracción mol y temperatura. Por integración de la ecuación (15) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{\lambda^*}{R_g} \left[\frac{1}{T_{Ao}} - \frac{1}{T_A} \right] = \ln X_A \quad \dots\dots\dots (16)$$

Donde T_{Ao} es el punto de congelamiento del líquido puro (A) y X_A es la fracción mol del agua en solución. La ecuación (16) es una forma aceptable para el cálculo de la depresión del punto de congelamiento, sin embargo, la expresión es normalmente simplificada para soluciones diluidas.

Suposiciones y métodos termodinámicos

Los alimentos comienzan a congelar a temperaturas más bajas del agua pura y el congelamiento se va desarrollando en un descenso de la temperatura y no a una única temperatura. Este comportamiento es típico debido a que las fases acuosas de los tejidos animales y vegetales y de numerosas preparaciones alimenticias, son soluciones, relativamente diluidas, de un gran número de solutos. El tratamiento conduce a una ecuación exacta para la curva de descenso del punto de congelamiento en función de la concentración de solutos en la solución. (KIECKBUSH, 1986).

Para el propósito del análisis fueron hechas las siguientes cinco suposiciones, (BARTLETT, 1944) citado por (CHEN, 1985):

- a) El alimento es un sistema heterogéneo en un estado de equilibrio termodinámico a presión constante.
- b) El sistema se encuentra en todo instante por encima de la temperatura eutéctica.
- c) La ley de Raoult es aplicable.

- d) La capacidad térmica de la fase solución es una función lineal de la concentración y es independiente de la temperatura.
- e) Las capacidades térmicas de la fase sólida son constantes ya que la ley de Raoult es válido solo para una solución ideal, su aplicación y limitaciones para alimentos necesitan ser establecidos experimentalmente.

Sobre la base de las suposiciones arriba mencionadas, (BARTLETT, 1944); (CHEN, 1985), citados por Alva (1990) y las relaciones termodinámicas basados en el equilibrio entre los estados de un sistema, (HELDMAN, 1966), se obtuvo la siguiente fórmula integral del descenso crioscópico.

$$\ln A_w = \frac{M_w \Delta H_o}{R} \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T} \right] \dots\dots\dots (17)$$

Donde:

A_w es la actividad de agua,

M_w es el peso molecular del agua pura (18 Kg/Kg-mol)

T_o es el punto de congelación del agua (273.15 °K)

T es el punto de congelación del alimento (°K)

H_o es el calor latente de fusión (Kcal/Kg)

R es la constante de los gases ideales (1.987 Kcal/Kg-mol °K).

Dado que a bajas concentraciones de solutos, los alimentos pueden ser tratados como soluciones ideales, A_w puede ser aproximado a X_w , la fracción molar del agua en el alimento. Por consiguiente:

$$\ln X_w = \frac{M_w \Delta H_o}{R} \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{T} \right] \dots\dots\dots (18)$$

Utilizando la definición de fracción y la Ley de Raoult, la fracción molar del solvente (agua), X_w queda como:

Reordenando la ecuación (19) resulta:

$$A_w \approx X_w = \frac{\frac{n_w}{M_w}}{n_w + n_s M_w / M_s} = \frac{n_w}{n_w + E n_s} \quad \dots\dots (20)$$

Donde:

n_w es la fracción de agua no congelable a temperatura de congelación T (Kg/Kg de alimento)

n_s es la fracción de sólidos totales (solubles e insolubles) (Kg/Kg de alimento)

M_w es el peso molecular del agua (18 Kg/Kg-mol)

M_s es el peso molecular efectivo de los sólidos totales (Kg/Kg-mol)

$E = M_w/M_s = 18/M_s$.

Del reemplazo del equivalente de X_w en la ecuación (18) fue obtenida la siguiente ecuación global:

$$\ln \left[\frac{n_w}{n_w + E n_s} \right] = \frac{18 \Delta H_o}{R} \left[\frac{T - T_o}{T T_o} \right] \quad \dots\dots (21)$$

Si la temperatura inicial de congelación (T_i) del alimento es conocido, T puede ser reemplazado por T_i en la ecuación (18) y la fracción molar del agua (X_w) podría ser calculado. Con este valor es posible determinar el valor de E usando la definición de fracción molar de la ecuación (20), donde la fracción de agua no congelada (n_w) puede ser reemplazado por la fracción del contenido inicial de agua (n_{w0}) del alimento a $T = T_i$.

Una vez que E es establecido, la ecuación (21) puede ser usado para determinar n_w en función de la temperatura de congelación (T), (SUCCAR, 1985).

Según Alva (1990), la posibilidad de predecir la fracción de agua no congelada versus temperatura, mediante la ecuación global del descenso crioscópico (21) ha sido investigada por HELDMAN (1966). Él observó una buena concordancia entre los valores predecidos y los datos experimentales en frutas y jugos, con resultados menos positivos para carne y otros productos cárnicos, donde la interacción entre el agua y los componentes de los productos es más pronunciada. En este caso obtuvo una mejor correspondencia al considerar en sus cálculos un 10% de agua no congelable. HELMAN (1966) especuló que la falta de concordancia entre los valores predecidos y experimentales está asociado con las condiciones no ideales y no diluidas existente en el producto, ya que la ecuación (21) es válida para soluciones ideales y diluidas. HELDMAN (1966) contrastó además, la exacta predicción de la relación porcentaje de agua no congelada versus temperatura dependía del dato exacto del punto inicial de congelación del alimento, pues una variación de 0.22°C duplicaba los desvíos encontrados.

SCHWARTZBERG (1976) ha utilizado sucesivamente la siguiente relación del descenso crioscópico:

$$\ln A_w = \frac{18 \bar{\Delta H} (T - T_0)}{RTT_0} \dots\dots\dots (22)$$

Donde:

$\bar{\Delta H}$ es el calor de fusión promedio a lo largo de T_0 y T, y es equivalente a:

$$\bar{\Delta H} = \Delta H_0 - 0.5 \Delta C_p (T_0 - T) \dots\dots\dots (23)$$

Donde:

ΔC_p es la diferencia entre C_w , la capacidad calorífica del hielo.

El análisis de los resultados obtenidos por HELDMAN (1966) llevó a SCHWARTZBERG a reformular la expresión para la fracción molar X_w . Basado en los trabajos de DUCKWORTH (1971), citado por SCHWARTZBERG (1976) incluyó en ella un nuevo parámetro que representaba aquella fracción de agua no congelable del alimento, conocido como “agua ligada”. La nueva expresión planteada fue la siguiente:

$$A_w \approx X_w = \frac{n_w - bn_s}{n_w + (E - b) n_s} \dots\dots\dots (24)$$

Donde:

b es la fracción de agua ligada (Kg/Kg de sólidos)

Reemplazando el equivalente de A_w de la ecuación (24) en la ecuación (22) y después de una serie de consideraciones y simplificaciones obtuvo lo siguiente:

$$\frac{En_s}{(n_w - bn_s)} = \frac{18 \Delta H_o}{RT_o^2} (T_o - T) \dots\dots\dots (25)$$

Si en la ecuación (25) se reemplaza n_w por $n_{wo} = 1 - n_s$ y $T_i - T_o$ por t_i , por despeje se obtiene:

$$t_i = \frac{- E n_s RT_o^2}{18 \Delta H_o [1 - n_s (1 + b)]} \dots\dots\dots (26)$$

Donde t_i es numéricamente igual a la temperatura inicial de congelación expresada en ° C.

Contenido de Hielo

La relación agua – hielo puede ser expresado según SCHWARTZBERG (1976) y CHEN (1985) como:

$$n_h = n_{wo} - n_w \quad \dots\dots\dots (27)$$

Donde:

n_h es la fracción de hielo formado (Kg/Kg de alimento)

n_{wo} es la fracción inicial de agua (Kg/Kg de alimento) y

n_w es la fracción de agua no congelada (Kg/Kg de alimento).

Reemplazando el correspondiente equivalente de n_w en la ecuación (27), SCHWARTZBERG (1976), obtuvo la siguiente ecuación simplificada del contenido de hielo:

$$n_h = (n_{wo} - n_s) \frac{(T_i - T)}{(T_o - T)} \quad \dots\dots\dots (28)$$

Donde:

n_s es la fracción de sólido (Kg/Kg de alimento).

T_i es la temperatura inicial de congelación del alimento (°K)

T es la temperatura de congelación (°K).

T_o es la temperatura de congelación del agua pura (273.15°K).

CHEN (1985), obtuvo una expresión diferente para la relación contenido de hielo – temperatura expresada como:

$$n_h = \frac{n_s}{M_s} \frac{RT_o^2}{\Delta H_o} \frac{(t_i - t)}{t t_i} \dots\dots\dots (29)$$

Donde:

$t = (T - T_o) = (T - 273.15) ^\circ\text{K}$ y es numéricamente igual a la temperatura de congelación en $^\circ\text{C}$ ($- 40 \leq t < 0^\circ\text{C}$).

T es la temperatura de congelación ($^\circ\text{K}$).

$t_i = (t_i - t_o) = (t_i - 273.15)^\circ\text{K}$ y es numéricamente igual a la temperatura inicial de congelación ($^\circ\text{K}$).

Una expresión que ha sido sucesivamente utilizada por CHEN (1985), para el cálculo de peso molecular efectivo de los sólidos (M_s) de carne de res, pescado y jugo de naranja es la que sigue:

$$M_s = \frac{n_s RT_o^2}{\dots\dots\dots} \dots\dots\dots (30)$$

$$\left[\frac{H_f}{t - t_r} - 0.37 - 0.3n_s \right] t t_r$$

Donde:

H_f es la entalpia por debajo de la congelación (Kcal/Kg).

$t_r = T_r - T_o = (T_r - 273.15)^\circ\text{K}$ y es numéricamente igual a la temperatura de referencia ($^\circ\text{K}$).

Valores experimentales de entalpia en el intervalo de 10°C por debajo del punto inicial de congelación fueron reemplazados en la ecuación (30) para el

cálculo de M_s . El punto inicial de congelación de cada alimento estudiado fue determinado del punto de inflexión de la curva de entalpía versus temperatura planteado de datos calorimétricos.

El contenido de hielo expresado como un porcentaje del contenido total de humedad inicial del alimento puede obtenerse de la siguiente relación:

$$h = \frac{100 n_h}{n_{w0}} \dots\dots\dots (31)$$

Donde:

h = es el contenido de hielo (%)

n_h = es la fracción de hielo (Kg/kg de alimento)

n_{w0} = es el contenido inicial de humedad (kg/kg de alimento).

Velocidad de Formación de Hielo con la Temperatura

La velocidad de formación de hielo “S” es definido como kilogramo masa de hielo formado por grado de descenso en la temperatura por Kg. de alimento y expresada como:

$$S = \frac{\partial n_h}{\partial T} \dots\dots\dots (32)$$

Cuando n_w es deducido de la ecuación (24) y su equivalencia es reemplazada en la ecuación (22) se tiene:

$$n_{w0} - E n_s A_w$$

$$n_h = \frac{\dots}{1 - A_w + bn_s} \dots \quad (33)$$

SCHWARTZBERG (1981), mediante la derivación parcial de la ecuación (33) obtuvo la siguiente expresión final para “S”.

$$S = (n_{wo} - bn_s) \frac{(T_o - T_i)}{(T_o - T)^2} \dots \quad (34)$$

Cuando n_w es despejado de la ecuación (20) y su equivalente es reemplazado en la ecuación (27) se obtiene:

$$n_h = n_{wo} - En_s \frac{A_w}{1 - A_w} \dots \quad (35)$$

Mediante la derivación parcial de la ecuación (35), CHEN (1985) obtuvo la siguiente ecuación simplificada para “S”:

$$S = \frac{n_s}{M_s} \frac{RT_o^2}{\Delta H_o} \frac{1}{t^2} \dots \quad (36)$$

Evaluación de Parámetros del Punto de Congelación

HELDMAN (1974), indicado por ALVA (1990), ha tratado M_s y de aquí E como una constante empírica, la cual es determinada del propio punto de congelación del alimento. SCHWARTZBERG (1976) consideró que en esencia b podría ser considerado también como una constante empírica, la cual simultáneamente estima la cantidad de “agua ligada” y corrige las desviaciones de la idealidad.

Si E o b se conoce para un alimento, el valor que resta puede ser determinado del punto inicial de congelación (T_i) a un conocido contenido de agua, una ecuación revisada y propuesta por SCHWARTZBERG (1976) es la siguiente:

$$E = (N - b) \frac{(1 - A_w)}{A_w} \dots\dots\dots (37)$$

Donde:

N es el peso del agua por unidad de peso de sólidos y A_w es determinado de la ecuación (22) para $T = T_i$. Si puntos de congelación están disponibles para dos contenidos de agua (tales pueden ser obtenidos mediante concentración o secando parcialmente una porción del alimento previo a la congelación), la ecuación que sigue presentado por SCHWARTZBERG (1976), puede ser usado para el cálculo de b.

$$b = \frac{N_1 A_{w2} - N_2 A_{w1} + A_{w1} A_{w2} (N_2 - N_1)}{A_{w2} - A_{w1}} \dots\dots\dots (38)$$

Donde:

A_{w1} y A_{w2} son obtenidos de la ecuación (22) haciendo $T = T_i$ y $T = T_2$ respectivamente.

N_1 y N_2 son los correspondientes contenidos de agua.

SCHWARTZBERG (1976), observó que los valores calculados de E y b variaban un poco, dependiendo del par de puntos usados en el cálculo de ellos. Sin embargo concluyó que prescindiendo de esta variación, los valores de E y b obtenidos por pares de temperaturas separados aproximadamente por 4°C o más, proporciona en un amplio rango de temperaturas y concentraciones, excelentes correlaciones de los puntos de congelación.

Una vez obtenido el valor de E, el peso molecular promedio M_s puede ser obtenido de $E = 18/M_s$ por despeje:

$$M_s = 18/E \dots\dots\dots (39)$$

2.2.9 Propiedades termicas de los alimentos a bajas temperaturas

Calor Específico Aparente

Es conocido que el calor específico es dependiente de la composición química y la temperatura, STAPH Y WOLRICH (1951), citado por CHEN (1985). Según ALVA (1990), el agua a causa de que tiene un calor específico y calor latente de fusión alto, ejerce mayor influencia sobre esta propiedad y en alimentos no congelados, el calor específico se hace ligeramente más bajo cuando la temperatura se eleva de 0 a 20°C.

Durante la congelación el calor específico de los alimentos se hace muy dependiente de la temperatura, puesto que esta controla la contribución del calor latente de fusión. La fracción de hielo es importante puesto que el calor específico del hielo es 0.49 KJ/Kg °C (a 0°C) comparado con 1.0 KJ/Kg °C del agua. ROLFE (1968).

Muchos de los valores del calor específico de los alimentos reportados en la literatura han sido calculados mediante el uso de fórmulas sencillas que relacionan el calor específico con el contenido de agua y materia sólida. SIEBEL (1918), citado por ALVA (1990) utilizó para el cálculo del calor específico por debajo del punto de congelación la siguiente ecuación:

$$C_e = 0.003 a + 0.20 \dots\dots\dots (40)$$

Donde C_e es el calor específico, a es el porcentaje de contenido de agua y 0.20 es una base arbitraria asumida para representar el calor específico de los constituyentes sólidos.

Los valores del calor específico, derivados de las ecuación (40) ocasionan error ya que es asumido que toda el agua se convierte a hielo. Esta suposición no es enteramente correcta en vista de que la congelación puede ser incompleta, la muestra puede no tener hielo solamente, sino una mixtura de constituyentes congelados y no congelados. ASHRAE (1977) citado por ALVA (1990).

Un término usualmente aplicado y que incluye tanto el calor latente de fusión como el calor sensible, es el calor específico aparente, C_{pa} expresada como:

$$C_{pa} = \frac{\partial H}{\partial T} \dots\dots\dots (41)$$

SCHWARTZBERT (1976), en la derivación de la capacidad calorífica efectiva, asumió que las entalpías de los componentes alimenticios son aditivos, en consecuencia la entalpía por unidad de masa durante la composición es:

$$H = H_s n_s + H_w n_w + H_h n_h \dots\dots\dots (42)$$

Donde H_s , H_w y H_h son las entalpías por unidad de masa de sólidos, agua y hielo respectivamente; n_s , n_w y n_h son las fracciones de sólidos, agua no congelada y hielo respectivamente.

Diferenciando la ecuación (42) con respecto a T y a través de relaciones matemáticas basadas en ciertas consideraciones, obtuvo muchas expresiones alternativas para C_{pa} . Una de las ecuaciones propuestas por

SCHWARTZBERT (1981) que ha mostrado buena concordancia entre los valores predecidos y experimentales es como sigue:

$$C_{pa} = C_f + (n_{wo} - bn_s) \Delta H_c \frac{(T_o - T_i)}{(T_o - T)^2} \dots\dots\dots (43)$$

Donde C_f es la capacidad calorífica de la muestra totalmente congelada y puede ser calculada de la ecuación:

$$C_f = C_{sn_s} + C_h (n_{wo} - bn_s) + bC_{wn_s} \dots\dots\dots (44)$$

Donde C_{sn_s} es el calor específico de los sólidos totales expresado en Kcal/Kg de alimento °C. Este término puede ser obtenido, si los calores específicos y las fracciones de masa de cada uno de los componentes de la fracción sólida del alimento son conocidos. Una ecuación con la siguiente forma general puede ser utilizada para calcular C_{sn_s} :

$$C_{sn_s} = \sum_{i=1}^n S_i C_i + S_2 C_2 + S_3 C_3 + \dots + S_n C_n \dots\dots\dots (45)$$

Donde:

C_{sn_s} es el calor específico de los sólidos totales (Kcal/Kg de alimento °C).

S es el calor específico de un componente de la fracción sólida (Kcal/Kg de componente °C).

C es la fracción masa del componente (Kg de componente/Kg de alimento) y n es el número de componentes considerado en el cálculo.

SCHWARTZBERT (1985), ha sugerido los siguientes valores según componente:

Tabla 7: Calor específico según componente químico

COMPONENTE	CALOR ESPECIFICO (Kcal/Kg °C)
Proteína	0.36
Grasa	0.42
Cenizas	0.42
Carbohidratos	0.34

CHEN (1985), partiendo de una ecuación modificada de SIEBEL, ASHRAE (1981), citado por CHEN (1985), para C_f y usando la ecuación de velocidad de formación de hielo (ecuación 34) obtuvo la siguiente relación para C_{pa} :

$$C_{pa} = 0.37 + 0.3n_s + \frac{n_s}{M_s} \frac{RT_o^2}{t_2} \dots\dots\dots (46)$$

La ecuación (46) está limitada para alimentos con humedad mayor de 40%. Su validez fue demostrada por CHEN (1985), trabajando con carne de res, pescado y jugos de frutas con diferentes concentraciones de humedad.

Entalpía

La entalpía o contenido calórico de un alimento es la combinación de calor sensible y calor latente. La contribución del calor sensible a la entalpía está relacionada con los cambios de temperatura, mientras que la contribución del calor latente está directamente relacionada con la magnitud de la fracción de agua congelada en el producto. La entalpía total (H_t), según HELDMAN (1982), puede ser expresada como la suma de los contenidos calóricos de los componentes del producto.

$$H_t = H_s + H_w + H_i + H_h \dots\dots\dots(47)$$

Donde:

H_s es la entalpía de los sólidos del producto

H_w es la entalpía del agua no congelada

H_1 es la entalpía de solidificación

H_h es la entalpía del agua congelada

Todas las contribuciones a la entalpía total, son funciones de la temperatura y de la fracción de agua congelada a una temperatura dada. Cuando se tabula la entalpía como una función de la temperatura, una temperatura base debe ser identificada. Esta es la temperatura a la cual la entalpía es arbitrariamente designada como cero. Esto no implica que el contenido de calor del alimento a la temperatura base es cero. En lugar de ello significa que éste, es un punto de referencia el cual permite el uso de diferencias de entalpía. Normalmente la entalpía de referencia ($H_r = n$) se fija en $T_r = -40^\circ\text{C}$. FENNEMA y POWRIE (1964).

Fórmula de predicción:

Una forma integrada para el cálculo de la entalpía total a partir de los contenidos calóricos del producto ha sido propuesta por HELDMAN (1982), cuya ecuación es:

$$H_T = n_s C_s \int_{-40}^{T_p} dT + n_w C_w \int_{T_i}^{T_p} dT + \int_{-40}^{T_i} n_w(T) C_w(T) dT + n_w(T) L + \int_{-40}^{T_i} n_h(T) C_h(T) dT \quad \dots(48)$$

Donde:

C_s es el calor específico de la porción sólida.

C_w es el calor específico del agua.

$C_w(T)$ es el calor específico del agua no congelada a temperatura de congelación (t).

L es el calor latente de fusión del agua.

$C_h(T)$ es el calor específico del agua congelada que puede no ser dependiente de la temperatura si el calor específico del hielo es constante en el rango de temperatura inicial del producto.

T_i es la temperatura inicial de congelación del producto.

n_s , n_w y n_h son las fracciones de masa de sólidos, agua y hielo respectivamente.

El cálculo de la entalpía a través de la integración de una capacidad calorífica aparente derivado a partir de una forma modificada de la ecuación del descenso del punto de congelación han sido propuestos por SCHWARTZBERT (1976, 1985) y CHEN (1985).

Multiplicando la ecuación (43) por dT e integrando entre una temperatura de referencia (T_r) conocida y temperaturas en el rango de congelación, SCHWARTZBERT (1985), obtuvo la siguiente ecuación:

$$H = (T - T_r) \left\{ C_f + (n_{wo} - bn_s) \left[\frac{\Delta H_o}{(T_o - T_r)} \frac{(T_o - T_i)}{(T_o - T)} \right] \right\} \dots\dots\dots (49)$$

Donde H es la entalpía de congelación (Kcal/Kg) y C_f es el calor específico del material completamente congelado, el cual puede ser obtenido de la ecuación (44). Cuando $T_r = T_i$ obtuvo:

$$H = (T - T_i) \left[C_f + (n_{wo} - bn_s) \frac{\Delta H_o}{(T_o - T)} \right] \dots\dots\dots (50)$$

Sustituyendo la ecuación (46) por C_{pa} e integrando la ecuación (41) entre una temperatura de referencia, t_r y t , la siguiente ecuación para la entalpía fue obtenido por CHEN (1985) para la temperatura por debajo del punto de congelación:

$$H = (t - t_r) \left(0.37 + 0.3n_s + \frac{n_s}{M_s} \frac{RT_o^2}{t t_r} \right) \dots\dots\dots (51)$$

Para $t_r = t_i$, la ecuación (51) se convierte en:

$$H = (t - t_i) \left(0.37 + 0.3n_s + \frac{n_s}{M_s} \frac{RT_o^2}{t t_i} \right) \dots\dots\dots (52)$$

Donde:

$t = (T - T_o) = (T - 273.15)^\circ\text{K}$ y es numéricamente igual a la temperatura inicial de congelación ($^\circ\text{K}$) expresado en $^\circ\text{C}$.

T la temperatura de congelación ($^\circ\text{K}$)

$t_i = (T_i - T_o) = (T_i - 273.15)^\circ\text{K}$ y es numéricamente igual a la temperatura inicial de congelación expresado en $^\circ\text{C}$.

T_i es la temperatura inicial de congelación ($^\circ\text{K}$).

2.2.10 Investigación Experimental y Métodos de Medición

Muchos métodos desarrollados y algunos de potencial aplicación, han sido sugeridos y aplicados en la medición experimental de las propiedades térmicas de los alimentos. La determinación del mejor método e instrumento, requiere de algún conocimiento del rango de valores esperados, propiedades térmicas deseadas, exactitud requerida y la cantidad de tiempo utilizable para recoger los datos.

Los métodos de régimen permanente son usualmente no complicados, pero tediosos y demanda tiempo en su aplicación. Los métodos transientes pueden ser ejecutados en el escaso tiempo de 10 segundos.

Los calorímetros que usan un método de mezcla y sus modificaciones, son los más utilizados para la determinación del calor específico y entalpía por ser de construcción más simple. La técnica consiste, en la adición de una cantidad conocida de agua a una temperatura dada del material cuyo calor específico o entalpía se quiere determinar. El calor específico desconocido puede ser

calculado de un balance de energía a partir del equilibrio de temperatura. OHLSSON (1983) mencionado por KLEEBERG (1986).

ALVA (1990), determinó la entalpía de congelación de caracol crudo y precocido utilizando un calorímetro construido a partir de una garrafa térmica con excelentes resultados.

2.2.11 Diagramas de congelación de alimentos

Diagramas de congelamiento de agua y soluciones simples

El diagrama de temperatura de un producto versus el calor eliminado o tiempo de congelamiento, puede proveer una útil información acerca del proceso de congelamiento. FENNEMA y POWRIE (1964). El Gráfico 03 presenta la curva de enfriamiento para agua pura y una curva típica de congelamiento para agua conteniendo un soluto. La forma característica de la curva de congelamiento proviene de las siguientes propiedades físicas:

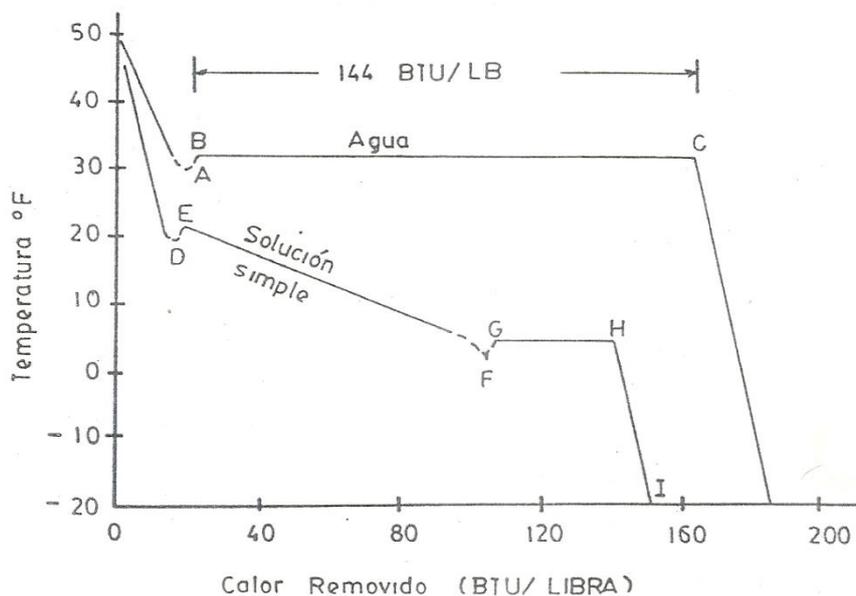
Calor específico del agua	= 1.00
Calor específico del hielo a 0°C	= 0.49
Calor latente de fusión (calor de cristalización)	=79.7 Caloría/gramo

El agua en el rango de 32 – 212 °F requiere la remoción de 1 BTU/libra por cada grado de reducción en la temperatura (50°F hasta el punto A). El punto A y el D representan un supercongelamiento, el cual siempre ocurre en algún grado previo a la cristalización. FENNEMA Y POWRIE (1964).

Con el comienzo de la nucleación, el crecimiento de los cristales de hielo es rápido, con una libre relación del calor de cristalización. Como resultado de este calor la temperatura sube rápidamente del punto de congelamiento del agua pura y restos de esta temperatura hasta que toda el agua ha sido solidificada. (B a C, Gráfico 03).

Una vez que el agua es congelado, además de la remoción calorífica, resulta en un decrecimiento en la temperatura a una proporción aproximada de 1°F por cada 0.49 BTU removido de cada libra de hielo.

En el congelamiento de una simple solución, la secuencia de nucleación, crecimiento de cristales de hielo y liberación de calor, causan la elevación de la temperatura al verdadero punto de congelamiento, E. El congelamiento adicional resulta en un decrecimiento gradual en la temperatura como se muestra en la sección EF. Durante este periodo el agua es transformada gradualmente en cristales de hielo, originando una solución restante para hacerse progresivamente más concentrada. Finalmente hay una ligera supersaturación y el calor de la cristalización causa una elevación de la temperatura al punto G, conocida como la temperatura criogénica que es definido como la más alta temperatura, a la cual la máxima cristalización del agua y solutos puede ocurrir en un sistema acuoso. Demás la remoción del calor a través de la sección GH resulta en un cambio de estado sin cambio en la temperatura. Durante este periodo el agua y el soluto cristaliza simultáneamente en una constante proporción, formando un conglomerado entremezclado y el decrecimiento de la fase líquida es invariable en composición. En el punto H, la cristalización del agua y el soluto es completa. La mayor diferencia entre las dos curvas de congelamiento, es que el agua pura experimenta una completa cristalización en una temperatura constante, mientras que una simple solución (un soluto) comienza a congelarse a una temperatura más baja que el agua pura y durante la solidificación este experimenta la concentración de solutos y un gradual decrecimiento en la temperatura. La solución simple muestra un cambio de estado a temperatura constante, solamente después de lograr la temperatura criogénica. FENNEMA Y POWRIE (1964).



Grafica 3: Curvas de congelamiento para agua pura y conteniendo un soluto

Fuente: FENNEMA Y POWRIE (1964).

Diagramas de Congelación de Materiales Alimenticios.

Cuando se mide la variación de la temperatura de un alimento durante la congelación, se obtienen curvas bastantes regulares, en las que generalmente, no aparecen el comienzo de la congelación y los diversos eutécticos. CHEFTEL J. Y CHEFTEL H. (1976). Las curvas de congelación varían de acuerdo con los siguientes factores: métodos de congelación, tamaño, forma, composición química, propiedades físicas del producto y tipo de envasado (o ausencia de éste). GRUDA y POSTOLSKI (1986).

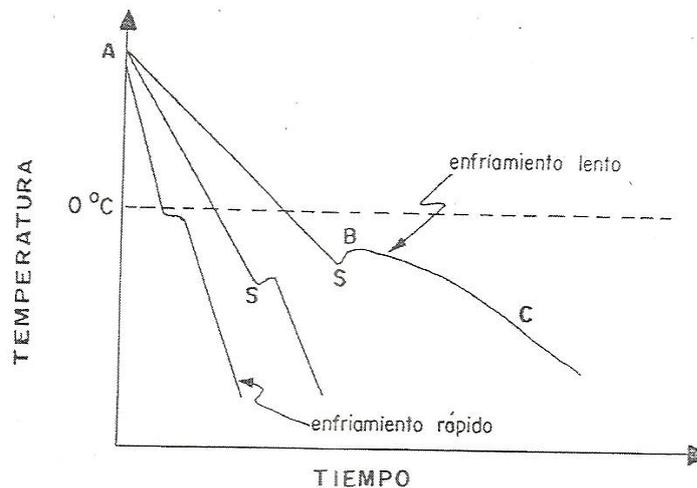
En la Gráfica 04 son mostrados esquemáticamente curvas de congelación típica de alimentos a diferentes velocidades de congelación. El enfriamiento de A a S envuelve sólo la extracción de calor sensible. El sobreenfriamiento S es posible que ocurra en todos los materiales biológicos, dependiendo su extensión de circunstancias particulares. LOVE y HARALDSON (1961), citados por FENNEMA y POWRIE (1964). Pequeñas muestras son más propensas a sobreenfriarse que las muestras grandes. LUNESA (1955), citado por FENNEMA y POWRIE (1964). La composición del material también

influencia la extensión del sobreenfriamiento. Coloides y glicoles (específicamente glicerol) son particularmente efectivos promotores de sobreenfriamientos. KUPRIANOFF (1962), citado por FENNEMA y POWRIE (1964). A velocidades de congelación muy lentas (curva 1, Gráfico 04), el sobreenfriamiento S es completamente evidente y cuando la velocidad de remoción de calor se va incrementando, las diversas etapas de congelación se convierten en menos evidentes hasta que finalmente, a velocidades muy altas a menudo se convierten en indistinguibles (curva 3, Gráfico 04).

Acompañando al arranque de cristalización en el punto S, el calor de cristalización liberado causa que la temperatura se eleve prontamente al punto de congelación inicial B, de la muestra (si el sobreenfriamiento es limitado y el enfriamiento moderadamente lento). Mientras que los productos alimenticios manufacturados frecuentemente difieren mucho en sus puntos iniciales de congelación, los alimentos naturales generalmente congelan dentro de un estrecho rango de temperaturas. FENNEMA Y POWRIE (1964). KUPRIANOFF (1964), mencionado por ALVA (1990), reveló que el punto de congelación de productos alimenticios está entre -0.5 a -5°C , pero para la mayoría de alimentos por encima de -2°C .

Cheftel J. y Cheftel H. (1976), reportó que tanto la carne (músculo) y como el pescado tienen su punto de congelación dentro del rango de -0.8 a -1.0°C . Un trabajo de PLANK (1963) y citado por KIECKBUSH (1986), reporta valores de punto de congelación de especies marinas haciendo una distinción entre animales hipotónicos e isotónicos. En los hipotónicos, está situado entre -0.6 a -1.0°C , a este grupo pertenece la mayoría de peces marítimos y gadideos como bacalao, abadejo, caballa, lenguado, róbalo, etc. En el grupo de los isotónicos se encuentran los tiburones y rayas y su punto de congelamiento va desde $-1,8$ hasta -2°C muy cerca a la del agua de mar que es de -2.6°C . A este grupo pertenecen también cangrejos, ostras y mejillones. ASHRAE (1977) citado por ALVA (1990), reportó un valor promedio de -2°C para algunos mariscos de importancia económica tales como ostras, conchas y almejas.

La sección BC representa el periodo durante el cual, el calor latente de cristalización está siendo removido y el cambio de estado está ocurriendo. Durante las etapas iniciales de la sección BC, el agua separa en forma de hielo puro produciéndose sólo un incremento moderado de la concentración de solutos en la fase no congelada (ligero descenso del punto de congelación) mientras que durante los últimos estados de la sección BC, mezclas criohídricas y otros tipos de estructuras desarrollan. En el punto C la cristalización es casi completa, evidenciado por la rápida caída de la temperatura, cuando el calor adicional es removido. FENNEMA y POWRIE (1964).



Gráfica 4: Curvas de congelación típica de alimentos a diferentes velocidades de congelación

Fuente: Cheftel J. y Cheftel H. (1976),

2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Pulpa de fruta

Según el CODEX STAN 247-2005, la pulpa (puré) de fruta, se define como “el producto sin fermentar, pero fermentable, obtenido mediante procedimientos idóneos, por ejemplo tamizando, triturando o desmenuzando la parte comestible de la fruta entera o pelada sin eliminar el zumo (jugo)”.

HERNÁNDEZ & BARRERA (2004); MANCERA (2010), definen como “pulpa de frutas, al producto pastoso, no diluido, ni concentrado, ni fermentado obtenido por la desintegración y tamizado de la fracción comestible de frutas frescas, sanas, maduras y limpias”.

BALLESTEROS & RUIZ (2013), “La pulpa se diferencia del jugo solamente en su consistencia, las pulpas son más espesas”. HIGUERA & VILLARREAL (2002), señala que la pulpa están hechas con materias primas 100% naturales y que están sometidas a estrictos procedimientos de calidad en cada etapa del proceso: “selección de materia prima, escaldado, despulpado, pasteurización, empaque y almacenamiento. Ideales para la preparación de jugos a nivel doméstico e institucional, variando su presentación para la venta en cada caso”. (HIGUERA & VILLARREAL, 2002),

Calor específico

Se define como “la energía necesaria para elevar un grado la temperatura de la unidad de masa”. (IBARZ, A. & BARBOZA-CANOVAS, G., 2005).

Densidad

Se define como “la relación entre la masa de una muestra dada y su volumen”. (IBARZ, A. & BARBOZA-CANOVAS, G., 2005).

Temperatura de congelación:

“La temperatura de congelación es aquella en la que empiezan a formarse los primeros cristales de hielo, es decir, la temperatura en la que coexisten en equilibrio cristales de hielo y agua líquida. Para el agua pura esta temperatura corresponde a 0°C”. (IBARZ, A. & BARBOZA-CANOVAS, G., 2005).

Agua no congelada

“El determinar la cantidad de agua no congelada es importante, ya que va a afectar no sólo a las propiedades del producto, sino también a la entalpía necesaria para llevar a cabo la congelación”. (IBARZ, A. & BARBOZA-CANOVAS, G., 2005).

Tiempo de congelación

El parámetro de mayor importancia para el diseño de etapa de congelación es el tiempo de congelación, porque esto nos indica el tiempo que puede permanecer el producto dentro de la máquina de congelación. Por lo tanto el tiempo de congelación “representa el tiempo necesario para que el centro geométrico del alimento cambie su temperatura inicial hasta una final predeterminada, inferior a la de congelación, que también se le denomina tiempo efectivo de congelación”. (IBARZ, A. & BARBOZA-CANOVAS, G., 2005).

CAPÍTULO III: METODOLOGIA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE ESTUDIO

El tipo de investigación tuvo un enfoque aplicado, cuantitativo de carácter experimental, de acuerdo a los alcances del estudio son más aplicativos y se basan por medio de leyes físicas y termofísicas y de parámetros tecnológicos para el procesamiento de los datos experimentales obtenidos. Este planteamiento dio como resultado el sustento científico y cuantitativo que nos permitió llegar a las conclusiones finales de nuestro trabajo de investigación.

3.2 DISEÑO DEL ESTUDIO

Hernández, Fernández y Baptista (2004) definieron el diseño como el “plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea”. Teniendo en cuenta el tipo – nivel y método de investigación, se aplicó el diseño cuantitativo, por las relaciones causa – efecto que existe entre la variable independiente (Temperatura) y la Variable Dependiente (Propiedades Termofísicas como son: El punto inicial de congelación, la entalpía de congelación, el contenido de hielo y agua no congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente).

X ----- Y

X: Variable 1: Temperatura (X)

Y: Variable 2: Propiedades termofísicas (Y)

3.3 MÉTODOS Y TÉCNICAS

El método deductivo tuvo una gran importancia en la etapa experimental, ya que parte de una hipótesis sustentada por el desarrollo teórico de una determinada ciencia, que siguiendo las reglas lógicas de la deducción, permitió llegar a nuevas conclusiones. De igual manera se aplicó el método analítico que permitió construir las teorías científicas,

posibilitando la sistematización del conocimiento científico, al ser deducido de un número limitado, preciso de principios e hipótesis.

3.4. TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Una vez obtenido los datos experimentales, parte de éstos fueron comparados con las ecuaciones matemáticas propuestas por SCHWARTZBERT y CHEN para el cálculo teórico de las propiedades termofísicas de la pulpa de carambola como son: el punto inicial de congelación, la entalpía de congelación, el contenido de hielo y agua no congelada, el porcentaje y velocidad de formación de hielo y el calor específico aparente), estos parámetros estuvieron referidos a los objetivos específicos 2 y 3 respectivamente.

Así mismo, otra parte de los datos experimentales, especialmente para el objetivo específico 1, en cuanto a la evaluación de la característica sensorial del atributo sabor de la carambola, los datos fueron tratados estadísticamente utilizando un Diseño de Bloques Completamente al Azar, utilizando 8 jueces (bloques) y 9 muestras (tratamientos). Se preparó una ficha para evaluar este atributo mediante una Escala Hedónica Valorativa de 09 puntos, a través del cual cada juez expresó su calificación.

Una vez realizado el Análisis de Varianza, se determinó que existían diferencias altamente significativas entre los tratamientos, aceptándose la hipótesis alterna y rechazándose la hipótesis nula para el valor de $\alpha = 0.05$, por lo que fue necesario recurrir a la prueba de Duncan para comparar las diferencias entre pares de medias de los tratamientos.

3.5 LUGAR DE EJECUCIÓN

El presente trabajo se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Procesos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios, y la determinación del análisis químico proximal del fruto de carambola fresca se realizó en el laboratorio de química de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

3.6 MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada para el presente trabajo de investigación fue la carambola (*Averrhoa carambola* L.), cultivada en la provincia de Tambopata del Departamento de Madre de Dios, la misma que fue obtenida del mercado local y de los agricultores en forma directa.

3.7 EQUIPOS Y MATERIALES

3.7.1. Equipos

- Balanza analítica Sauter, 0,1 mg. de aproximación.
- Balanza electrónica Sartorius, 0.1 mg. de aproximación.
- Caja de poliuretano (tecnopor)
- Congeladora Imaco, Modelo CCA-320, temperatura mínima -15°C.
- Equipo de destilación
- Equipo digestor de proteínas
- Equipo extractor de grasa
- Estufa Memmert, rango de temperatura de 30 a 200°C.
- Garrafa térmica
- Refrigeradora Philips, Modelo IP – 200.
- Termómetro Fisher Scientific, rango de temperatura de – 10°C a 220°C, 0.1 de aproximación.
- Termómetro digital de vástago largo
- Termopares de cobre acoplables.
- Micrómetro
- Selladora de mesa
- Potenciómetro Electrónico digital
- Brixómetro manual
- Licuadora de mesa
- Ventilador de pedestal.

3.7.2. Materiales

- Buretas

- Pipetas
- Matraces Erlenmeyer
- Fiolas
- Placas Petri
- Probetas
- Vasos de Precipitación
- Soporte Universal
- Morteros
- Embudos
- Crisoles
- Cuchillos
- Tablas de picar
- Papel Aluminio
- Empaques de polietileno
- Sal
- Regla centimetrada
- Bandejas de plástico
- Agua destilada

3.8 MÉTODOS

3.8.1 Análisis Químico

El análisis físico-químico proximal del fruto de carambola fue determinado en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, según la metodología descrita en la Tabla 08.

Tabla 8: Análisis Físico Químico del Fruto de Carambola

ANALISIS	NORMA
Humedad (g/100 g.)	AOAC 920.151 (2012)
Proteína (g/100 g.)	AOAC 920.152 (2012)

Grasa (g/100 g.)	AOAC 930.009 (2012)
Cenizas (g/100 g.)	AOAC 940.26 (2012)
Fibra (g/100 g.)	NTP 205.003(1980), Rev. 2012
Carbohidratos	Por diferencia
Ph	NTP 203.108(1989), Rev. 2012
Acidez (%) (Ac. Cítrico)	NTP 203.070(1977), Rev. 2012
Densidad (g/cc) a 20°C	AOAC 940.012 (2012)

Fuente: Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco – 2014.

3.8.2 Análisis Organoléptico del Producto Congelado

Las muestras congeladas fueron sometidas a un tratamiento térmico a una temperatura de 90°C y un tiempo de 10 minutos, para posteriormente evaluar básicamente el atributo sabor mediante una escala hedónica valorativa de 9 puntos. Para ello se empleó un panel semi-entrenado compuesto por 8 personas y con los datos obtenidos se efectuó un ANVA y una prueba de Duncan al nivel de 0,05 de nivel de significancia.

3.8.3. Preparación de Muestras

La preparación de las muestras se procedió según el diagrama de flujo mostrado en la Gráfica 05. Los frutos de carambola (*Averrhoa carambola* L.) fueron recepcionados en el laboratorio de procesos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios para el respectivo control organoléptico y físico, luego se lavaron con abundante agua a fin de eliminar cualquier suciedad presente. Una vez comprobada el estado fitosanitario de los frutos, fueron cortados en cubos de aproximadamente 2 – 3 cm de lados con el objeto de contar con muestras de distintos grados de humedad, las porciones de pulpas fueron puestas a secar con la ayuda de un ventilador, en intervalos de tiempo de 1 – 3 horas aproximadamente. Cada una de las muestras de pulpa de carambola pre secadas fueron envueltas en papel aluminio y mantenidas en refrigeración por 24 horas a fin de permitir la uniformización de la humedad de las muestras.



Grafica 5: Diagrama de Flujo de Preparación de la Materia Prima

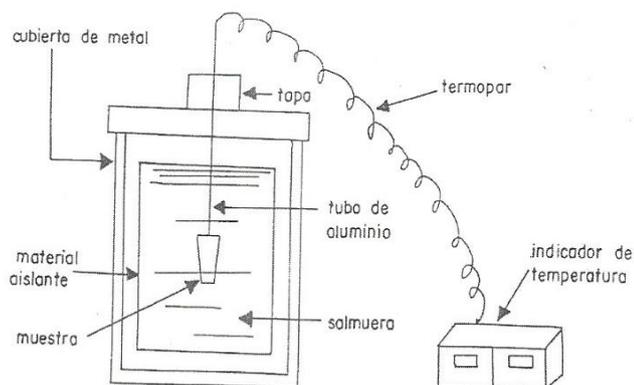
Fuente: Elaboración propia

3.8.4 Determinación experimental del punto inicial de congelación

FENNEMA, et al. (1,973), citado por Alva, ha considerado que la forma más simple para la determinación del punto inicial de congelación, consiste en colocar en una muestra, un equipo indicador de temperatura (termocupla, termómetro o termómetro con resistencia de platino) y mantener un registro

de tiempo y temperatura cuando la muestra es enfriada, sobre enfriada y parcialmente congelada. El punto inicial de congelación es derivado de la meseta de temperaturas relativamente extensa que sigue el sobre enfriamiento cuando es trazado el gráfico temperatura versus tiempo.

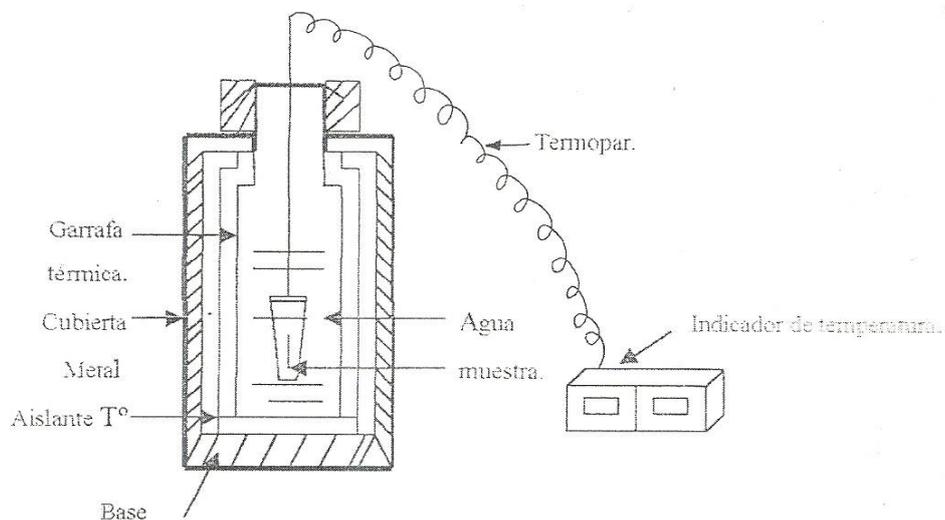
Para la determinación precisa del punto inicial de congelación se usó un termopar de cobre constantán N° 24 acoplado a un indicador de temperatura de $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ de aproximación. Una muestra representativa de trozo de pulpa de carambola conteniendo un termómetro digital de vástago largo en su centro, fue colocado en una garrafa térmica tal como se muestra en la Figura N° 06 conteniendo aproximadamente 500 ml. de salmuera saturada a -15°C . La temperatura fue registrada cada 10 segundos, hasta sobrepasar el punto inicial de congelación, el cual finalmente fue anotado, seguidamente se determinó la humedad de la muestra, esta fue descongelada y congelada por 3 veces para verificar la reproductibilidad de la prueba.



Grafica 6: Termo comercial utilizada en la determinación del punto de congelación de la pulpa de carambola

3.8.5. Determinación experimental de la entalpía de congelación

Para la determinación experimental de la entalpía de congelación fue utilizado un método de mezcla descrito por KLEEBERG, citado por FLORES GARCÍA (2000). Para tal efecto un termo comercial fue adaptado para realizar los ensayos. Antes de cada prueba el termo fue cuidadosamente secado y pesado, agregándose entonces agua (aproximadamente 100 ml.) al cual se tomaba la temperatura y luego se pesaba nuevamente para confirmar la masa de agua. Seguidamente una muestra conteniendo un termopar en su centro geométrico conectado a un indicador de temperatura, es colocado en el interior del termo (Gráfico 07), luego la muestra se procedía a sumergir en agua (en ese momento se registraba la temperatura de la muestra) sobre una constante agitación del termo, hasta alcanzar la temperatura de equilibrio que también fue anotada. El conjunto es nuevamente pesado y la diferencia con el peso del termo y agua juntos corresponderá a la masa de la pulpa de carambola.



Grafica 7: Termo utilizado en la determinación de la entalpía del fruto de carambola.

A partir de los datos experimentales de masa y temperatura y el correspondiente balance térmico del sistema, los valores de entalpía fueron comparados con los valores obtenidos mediante fórmulas de correlación de Schwartzberg y Chen.

Eligiendo la temperatura de inicio de congelación (T_i) como la temperatura referencial donde la entalpía fue asumida cero ($H_{Ti} = 0$), el siguiente balance calórico fue obtenido para el cálculo de la entalpía:

$$W_a (H_{Ti} - H_T) + W_m C_m (T_e - T_i) = W_w C_w (T_{Wo} - T_e) + q_c$$

Despejando H_T de la ecuación se obtuvo:

$$H_T = \frac{-[W_w C_w (T_{Wo} - T_e) - W_m C_m (T_e - T_i) + q_c]}{W_a}$$

Dónde:

H_T es la entalpía de congelación (Kcal/Kg);

W_w es el peso del agua (Kg);

C_w es el calor específico del agua (Kcal/Kg °C);

W_m es el peso de la muestra de la pulpa de carambola (Kg);

T_{Wo} es la temperatura inicial del agua (°C),

T_e es la temperatura de equilibrio de la mezcla agua – pulpa de carambola (°C) y

q_c es el calor asociado con la capacidad térmica del calorímetro entre las temperaturas inicial y final (Kcal).

El calor asociado de la muestra C_m por encima del punto de congelación fue calculado de la siguiente ecuación:

$$C_m = C_s n_s + C_w n_{wo}$$

Donde: C_s es el calor específico de los sólidos totales (Kcal/Kg °C). Este parámetro fue obtenido a partir de los calores específicos y fracciones de masa de los componentes de la fracción sólida de la muestra.

3.8.6. Evaluación de los parámetros del punto de congelación

a) Fracción de masa de agua ligada “b”

Fue calculado mediante la ecuación (38), Schwartzberg. Los valores de actividad de agua requerida para la aplicación de la ecuación (38) fueron determinados reemplazando las temperaturas iniciales de congelación obtenidos experimentalmente, en la ecuación (17) del descenso crioscópico.

b) Fracción de masa de agua ligada “E”

Fue obtenido a partir del punto inicial de congelación de la muestra y la aplicación de la ecuación (37) de Schwartzberg.

c) Determinación del Peso Molecular Efectivo “Ms”

El peso molecular efectivo “Ms” fue calculado mediante la ecuación (39) de Schwartzberg y también con la ecuación (30) de Chen, a partir de valores experimentales de entalpía dentro del rango de 10°C por debajo del punto inicial de congelación de las muestras.

d) Contenido de hielo

El contenido de hielo formado a diferentes temperaturas de congelación, expresado como Kg/Kg de alimento fue estimado mediante dos ecuaciones: la ecuación (28) de Schwartzberg y la ecuación (29) de Chen.

El contenido de hielo expresado como un porcentaje del contenido inicial de agua fue calculado mediante la ecuación (31).

e) Velocidad de formación de hielo con la temperatura

Fue estimado usando la ecuación (34) de Schwartzberg y la ecuación (36) de Chen.

f) Calor específico aparente

Fue calculado usando la ecuación (43) de Schwartzberg y la ecuación (46) de Chen. Para la aplicación de la ecuación (43), el calor específico de la muestra totalmente congelada, C_f fue determinado por la ecuación (44).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

4.1. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1.1. Análisis químico

Los resultados obtenidos en la composición químico proximal del fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.) se presenta en la Tabla 09, la misma que demuestra que es un fruto con alto contenido de humedad (88.10%), bajo contenido en proteína (0.34%) por lo que no aportan valores considerables a la dieta, en cuanto a la grasa (0.10%) es bajo, por lo que su aporte calórico a la dieta también es bajo en comparación con las carnes y nueces, igualmente tenemos la ceniza del orden del 0.44%, la fibra de 1,20% y finalmente los carbohidratos del 11.02 %.

Tabla 9: Composición químico proximal promedio del fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.)

COMPONENTE	%
Humedad	88.10
Proteína	0.34
Grasa	0.10
Ceniza	0.44
Fibra	1.20
Carbohidratos	11.02

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico - UNSAC.

TELLO et. al. (2002) ha determinado la composición química proximal del fruto de carambola, cuyos valores reportados fueron: agua (90.0%), proteínas (0.5%), grasas (0.3%), carbohidratos (9.0 %), fibra (0.6%) y cenizas (0.4%). De igual manera COLLAZOS, CH. et al. (1990) en su libro de Composición Química de los Alimentos Peruanos ha reportado la composición química del fruto de carambola según el siguiente detalle: 90.6% de agua, 1.0% de proteína, 0.6% de grasa, 7.4 % de carbohidratos, 0.4% de cenizas, 35.0 Kcal de energía, 5.0 mg de calcio, 9.0 mg de fósforo, 0.3 mg de hierro, 8.8 mg de

sodio, 203.0 mg de potasio, 0.04 mg de tiamina, 0.08 mg de riboflavina y 20,8 mg de ácido ascórbico.

Los valores encontrados en la composición química del fruto de carambola realizado en nuestro trabajo de investigación, varían ligeramente con los resultados obtenidos por TELLO et. al. y COLLAZOS, CH. et al. La composición química, las características y comportamiento de las frutas están íntimamente relacionadas con la especie, variedad, grado de madurez y las condiciones ambientales durante el desarrollo de la fruta, conforme lo señala BALLESTEROS & RUÍZ, (2013). Por lo que el fruto de carambola que se cultiva en la Región de Madre de Dios contiene también antioxidantes, oxalato de calcio y fibra soluble por lo que es recomendada para diabéticos, hipertensos y cardíacos. También el fruto de carambola es utilizado para el tratamiento de hemorroides, sedativo para pacientes con asma, diurético, vermífugo, antídoto contra venenos y alivia el malestar por el exceso de licor.

4.1.2. Análisis físico

Los resultados de las características físicas del fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.) son presentados en la Tabla 10. El diámetro de la fruta promedio es de 4 a 8 cm., con una altura máxima de 6 a 8 cm. en estado óptimo de madurez, con un peso promedio de 70 g. Además el tamaño varía de acuerdo al tipo de terreno y abono recibido, condiciones ambientales, edad. El pH fue de 2.80 y la acidez titulable fue de 1.15 % expresado como ácido cítrico, esto debido a las características propias de la fruta y la densidad a 20°C fue de 1.0014 g/cc.

Tabla 10: Características físicas del fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.)

CARACTERISTICAS	VALORES PROMEDIOS DE 04 FRUTOS DE CARAMBOLA
Diámetro (cm.)	6.00
Peso entero (g)	70.00
Ph	2.80

°Brix	8.00
Acidez titulable (ácido cítrico) (%)	1.15
Densidad a 20°C (g/cc)	1.0014

Fuente: Laboratorio de Análisis Químico – UNSAC, 2014.

4.1.3 Análisis organoléptico

En el fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.) se observó las siguientes características:

- Fruto maduro de un color amarillo
- Olor característico de la fruta
- Textura blanda típico de la madurez completa
- Apariencia general de la fruta era de lo mejor.

La percepción de las características anteriormente mencionadas indicó que la materia prima utilizada fue de muy buena calidad.

4.1.4 Punto inicial de congelación y parámetros empíricos

Las ecuaciones teóricas presentadas en la revisión bibliográfica, además de ser útiles para un cabal entendimiento de los principios que rigen el proceso de congelación, nos permite evaluar la precisión que tienen los resultados experimentales. Estas ecuaciones, sin embargo para poder ser aplicadas requieren del conocimiento de un cierto número de parámetros de entrada que generalmente son estimados a partir de valores experimentales obtenidos del producto no congelado, HELDMAN (1982).

Los valores obtenidos para la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.) fueron los siguientes:

Constante empírica , $E = 0.06205$
 Peso Molecular Efectivo, $M_s = 314$
 Constante empírica, $b = 0.30$

Para lograr un valor de **b** confiable se requiere de algún conocimiento del rango de valores esperados, por lo que es factible tomar como valores de referencia productos como hortalizas y algunas frutas como lo demostró GONZALES (1991) en el caso de pulpa de lúcuma que alcanzó el valor de 0.325.

El valor de **b** calculado para la pulpa de carambola (*Averrhoa carambola* L.) representa la fracción de agua no congelable/Kg de materia seca, el cual es cercano al valor reportado por MEDINA et. al, (1998); quienes determinaron para jugo de piña y otras frutas el rango de 0.20 y 0.31, sin embargo, también se puede comprobar usando el rango de valores de **b**, reportados por DUCKWORTH (1969), mencionado por GRUDA y POSTOLSKI (1986), en el cálculo de puntos iniciales de congelación (ecuación 26) para el fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.); estos mostraron un porcentaje menor del Error Medio Relativo, que los valores de **b** reportados por DUCKWORTH (1969), que arrojaron Error Medio Relativo relativamente más altos, esto puede entenderse debido a que no existe un criterio uniforme entre los investigadores respecto al contenido de agua ligada, las considerables controversias se deben fundamentalmente a los instrumentos y métodos empleados para determinar los parámetros térmicos deseados.

De igual manera el valor de **E** encontrado para el fruto de carambola (*Averrhoa carambola* L.) presenta una tendencia parecida a los valores de **E** reportados por KLEEBERG (1986), citado por CORANADO (1992), dado que **E** está en relación inversa al peso molecular (M_s). Este valor en las frutas es de menor cuantía debido al pequeño porcentaje de proteínas y grasas que presentan, lo cual se incrementa básicamente en los productos cárnicos, debido a que presentan mayor porcentaje de proteínas y grasas.

En la Tabla 11, se presenta para fines de comparación y trazado de una curva teórica, los puntos iniciales de congelación calculados mediante la ecuación 26. El Error Medio Relativo (EMR) estimado para el fruto de carambola es de 6.95%, lo que nos indica una buena concordancia de los valores

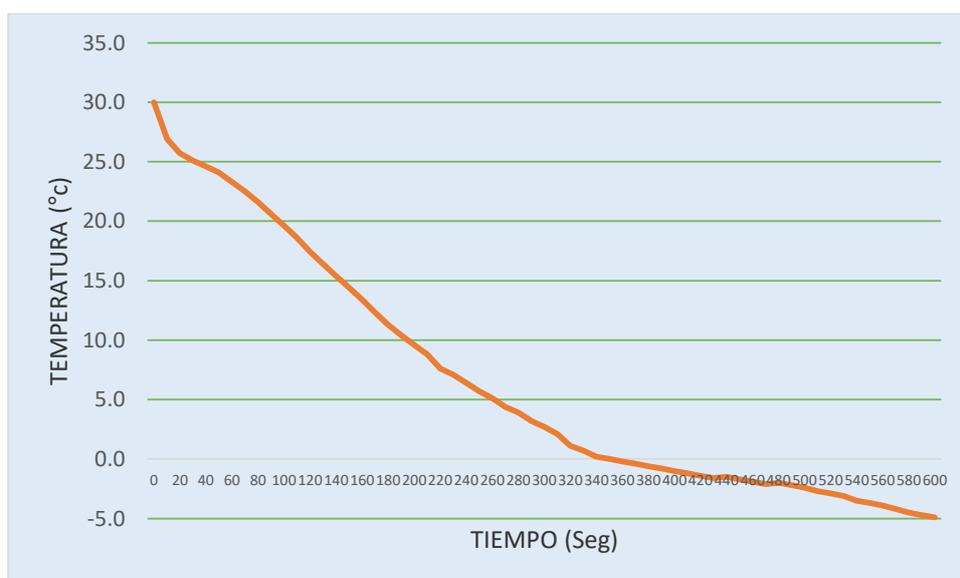
experimentales con los predecidos mediante la ecuación propuesta por SCHWARTZBERG (1981).

Tabla 11: Punto inicial de congelación experimental y calculado de la pulpa de carambola (Averrhoa carambola L.).

HUMEDAD $100n_{wo}$ (%)	SOLIDOS TOTALES n_s (Kg/Kg)	PUNTO INICIAL DE CONGELACIÓN T_i (°C)	
		Experimental	Calculado
88.10	0.1190	-1.50	-1.50
84.00	0.1600	-1.78	-1.79
80.50	0.1950	-1.97	-1.97
77.90	0.2210	-2.22	-2.26
ERROR MEDIO RELATIVO (EMR)			6.95

Fuente: Elaboración Propia

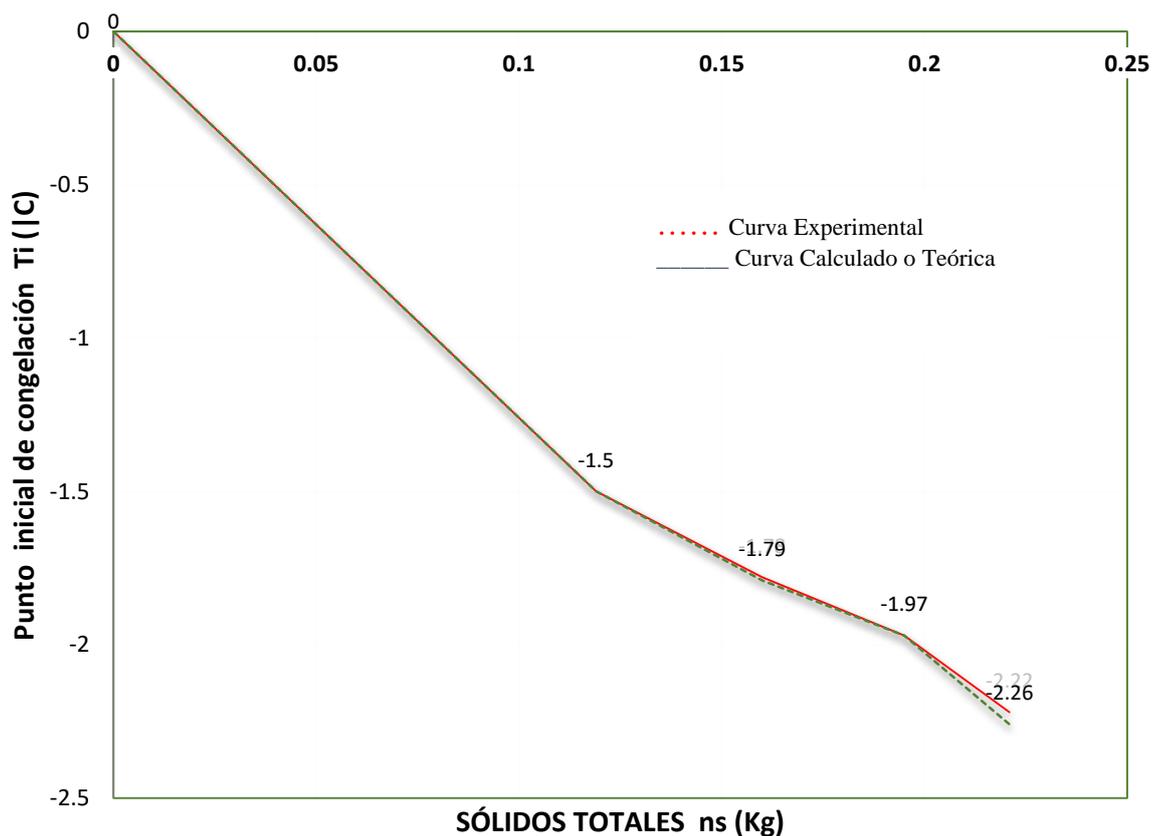
En el Gráfico 08, se muestra el comportamiento de la curva de congelación de la pulpa de carambola en función de la temperatura versus tiempo, con un contenido inicial de humedad de 88.10 %. El punto inicial de congelación fue de -1.50 °C en un tiempo de 440 segundos, es decir a los 7 minutos con 20 segundos. La curva fue construida con los datos experimentales del punto inicial de congelación que se muestra en el Anexo 03.



Gráfica 8: Curva de congelación de la pulpa de carambola

Fuente: Elaboración propia.

Cuando un producto alimenticio pierde agua mediante algún proceso de deshidratación en términos de composición química, produce un aumento relativo de los demás componentes como sales, solventes de tipo iónico, no iónico y apolar; éstos hechos causan cambios muy importantes en las propiedades coligativas del agua que incluye entre otros la depresión del punto de congelación, BADUI (1984), citado por ALVA (1990), lo cual se refleja en el trazado de los puntos de congelación versus contenido de sólidos (Gráfico 09), que muestra la tendencia decreciente de los puntos de congelación, conforme el contenido de sólidos de la pulpa de carambola se incrementa y ratifica además la concordancia de los resultados experimentales con los teóricos.



Grafica 9: Curva teórica del punto de congelación de la pulpa de carambola en comparación con los resultados experimentales.

Fuente: Elaboración propia.

Que de la fase experimental en lo concerniente al punto inicial de congelación, luego de haberse sometido a deshidratación la pulpa de carambola mediante el uso de un ventilador con velocidad de aire constante a diversos intervalos de tiempo (1 – 3 horas), se puede apreciar que a medida que el contenido de sólidos totales del fruto de carambola aumenta, el punto inicial de congelación disminuye, conforme se tiene en la Tabla 09, para una humedad de 84% y un contenido total de sólidos de 0,16 Kg/Kg el valor del punto inicial de congelación de la fruta de carambola disminuyó a $-1.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, de igual forma para una humedad de 80.50% y un contenido de sólidos totales de 0,1950 Kg/Kg el valor del punto inicial de congelación bajó a $-1.97\text{ }^{\circ}\text{C}$, así mismo para una humedad de 77.90% y un contenido total de sólidos de 0,2210 Kg/Kg el valor del punto inicial de congelación de la fruta de carambola disminuyó a $-2.26\text{ }^{\circ}\text{C}$ respectivamente, corroborándose de esta forma lo manifestado por BADUI (1984), citado por ALVA (1990), que señala que la deshidratación afecta la composición química de los alimentos y por ende cambios en sus propiedades del agua que incluye entre otros la depresión del punto inicial de congelación.

Los puntos iniciales de congelación teóricos fueron calculados mediante el uso de la ecuación (26) modificada por SCHWARTZBERG (1981) y descrita en la página 54 del presente trabajo de investigación, para ello fue necesario reemplazar datos en la fórmula como son el valor de la constante empírica de $E = 0.06205$, constante de los gases de $R = 1.987\text{ Kcal/Kg-mol }^{\circ}\text{K}$, valor de la constante empírica de $b = 0.30$, el valor de $\Delta H_0 = 79.8\text{ Kcal/Kg}$ y n_s que es la fracción de sólidos totales para cada contenido de humedad del fruto de carambola y una temperatura T_0 . En el Anexo 06 se muestran los cálculos realizados para los valores del punto inicial de congelación, teniendo como base los datos obtenidos en la Tabla 10.

4.1.5 contenido y velocidad de formación de hielo con la temperatura

El conocimiento de la cantidad de hielo en los alimentos, es de mucha importancia ya que servirá para predecir los daños que pueden ocasionar los cristales en la estructura de los tejidos, más aún si se trata de frutas, por el

alto contenido de agua que tienen y la presencia de enzimas y otros componentes, como las vitaminas que se degradarían, ocasionando pérdida nutritiva y comercial, debido a que se vuelve menos turgente. DUCKWORTH (1969).

En la Tabla 12 se reportan los resultados del contenido de hielo y su velocidad de formación a diferentes temperaturas para la pulpa de carambola, para el cual se utilizaron las ecuaciones (28) y (34) de SCHWARTZBERG y (29) y (36) de CHEN, los cuales no muestran diferencias significativas en los valores encontrados.

Tabla 12: Contenido y velocidad de formación de hielo calculado en función de la temperatura para la pulpa de Carambola.

TEMPERATURA (°C)	CONTENIDO DE HIELO n_h (Kg/Kg)		VELOCIDAD DE FORMACION DE HIELO S (Kg/Kg °C)	
	SCHWARTZBERG ¹	CHEN ²	SCHWARTZBERG ¹	CHEN ²
0.0	0.000	0.000	0.0000	0.0000
-2.5	0.414	0.417	0.1530	0.1530
-5.0	0.605	0.609	0.0400	0.0405
-7.0	0.657	0.664	0.0196	0.0195
-10.0	0.700	0.705	0.0097	0.0097
-12.0	0.716	0.721	0.0068	0.0068
-15.0	0.732	0.737	0.0044	0.0044
-20.0	0.747	0.753	0.0025	0.0025
-30.0	0.761	0.769	0.0012	0.0012
-40.0	0.771	0.777	0.0007	0.0070

Fuente: Elaboración Propia

¹ Parámetros empleados: $n_{wo} = 0.8810$, $T_i = -1.5^\circ\text{C}$, $b = 0.30$

² Parámetros empleados: $n_s = 0.1190$, $T_i = -1.5^\circ\text{C}$, $M_s = 314$

Comparando los valores obtenidos para la pulpa de carambola con valores encontrados por FLORES, A. (2000) en los frutos amazónicos de arazá y pomarrosa, existen mucha concordancia, pudiéndose observar que para los mismos niveles de temperatura, el contenido de hielo es mayor para el caso de la carambola fuera del rango de la zona crítica (0 a -5°C), esto se manifiesta debido a que las frutas en general en este rango presentan una mayor retención de agua libre en estado líquido por la presencia de azúcares, los

cuales se encuentran en solución en los tejidos. Esto es corroborado por los trabajos experimentales realizados por RIEDEL (1956), citado por ALVA (1990), quién señala que en alimentos con mayores contenidos de humedad se forma mayor contenido de hielo, pero que también dentro de un rango crítico existía una menor cuantía debido a la presencia de azúcares.

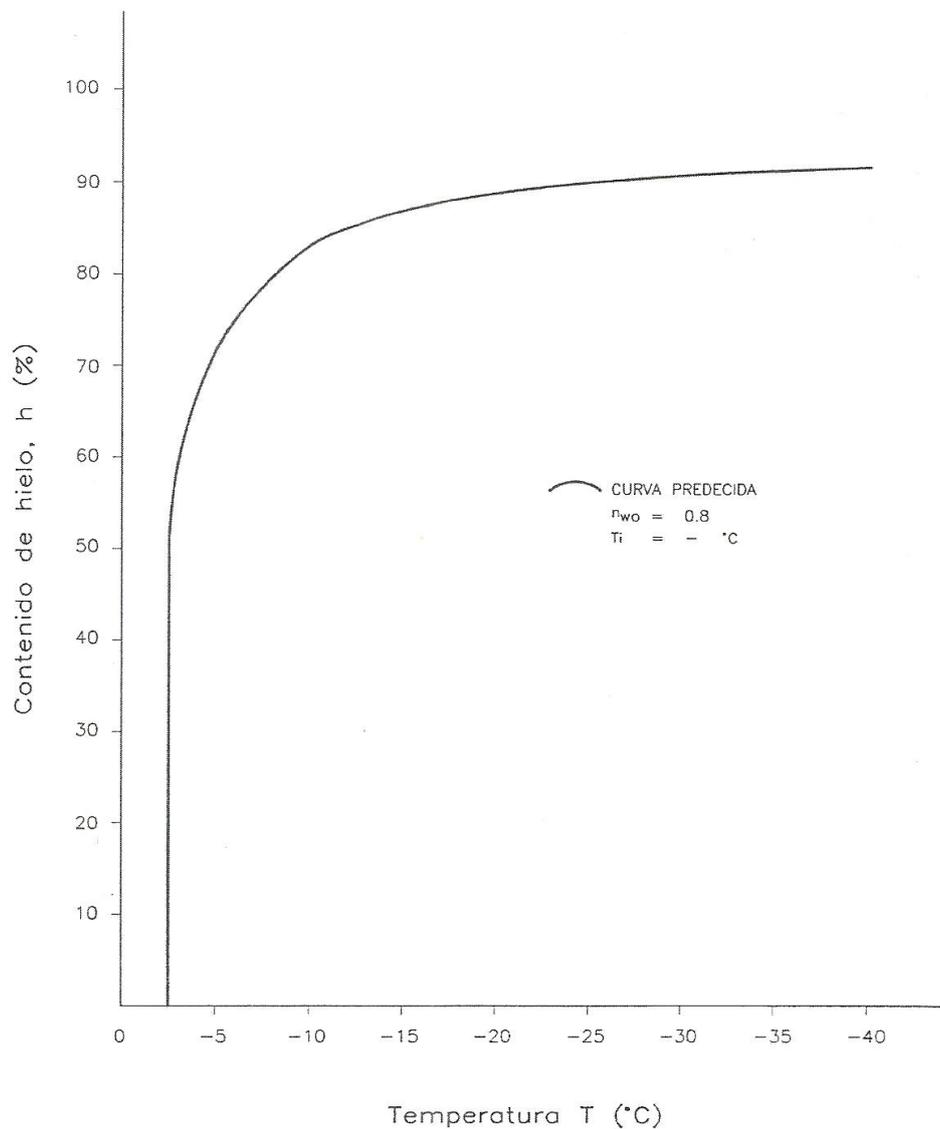
Los contenidos de porcentaje de hielo y agua no congelada de la pulpa de carambola, se muestra en la Tabla 12 con cuyos valores se trazaron la curva de contenido de hielo, la misma que se muestra en el Gráfico 10.

En la Tabla 13 se muestran los valores calculados del porcentaje de hielo y agua no congelada hasta niveles de temperatura de -40°C , para lo cual se utilizó la ecuación (27) y (31), para los modelos de SCHWARTZBERG (1981) y CHEN (1985), obteniendo valores cercanos al 10%, en concordancia con las curvas obtenidas donde la tendencia de la curva se vuelve constante entre el 90 al 92%, citado por muchos autores entre ellos GRUDA y POSTOLSKI (1986).

Tabla 13: Contenido de hielo y agua no congelada con respecto a la temperatura para la pulpa de Carambola.

Temperatura (°C)	Contenido de hielo (%)		Contenido de agua no congelada (%)	
	SCHWARTZBERG	CHEN	SCHWARTZBERG	CHEN
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
-2.5	49.14	49.48	50.86	50.52
-5.0	71.82	72.31	28.18	27.69
-7.0	78.30	78.84	21.70	21.16
-10.0	83.16	83.73	16.84	16.27
-12.0	85.03	85.63	14.97	14.37
-15.0	86.94	87.53	13.06	12.47
-20.0	88.82	89.43	11.18	10.57
-30.0	90.72	91.34	9.28	8.66
-40.0	91.66	92.29	8.34	7.71

Fuente: Elaboración Propia



Gráfica 10: Curva de contenido de hielo calculado en función de la temperatura para la pulpa de Carambola

Fuente: Elaboración propia.

4.1.6 Entalpía de congelación

Los valores experimentales de entalpía de congelación encontrados para la pulpa de carambola se muestran en la Tabla 14, las cuales fueron calculadas a través de las ecuaciones (50) y (52) de SCHWARTBERG (1981) y CHEN (1985) respectivamente.

Tabla 14: Determinación calorimétrica de la entalpía para la pulpa de carambola.

Muestra		Agua		Agua + Muestra		Termo	Carambola
T° Inicial T (°C)	Peso W _m (Kg)	Peso W _w (Kg)	T° Inicial T _{wo} (°C)	T° Equilib T _e (°C)	Calor cedido q _p (Kcal)	Entalpía Exprim. H _T (Kcal/Kg)	
-2.7	0.00630	0.1006	24.90	22.22	0.109	-36.70	
-3.5	0.00650	0.1086	24.10	22.00	0.182	-42.37	
-5.5	0.00615	0.1103	22.70	21.57	0.298	-51.61	

Fuente: Elaboración propia.

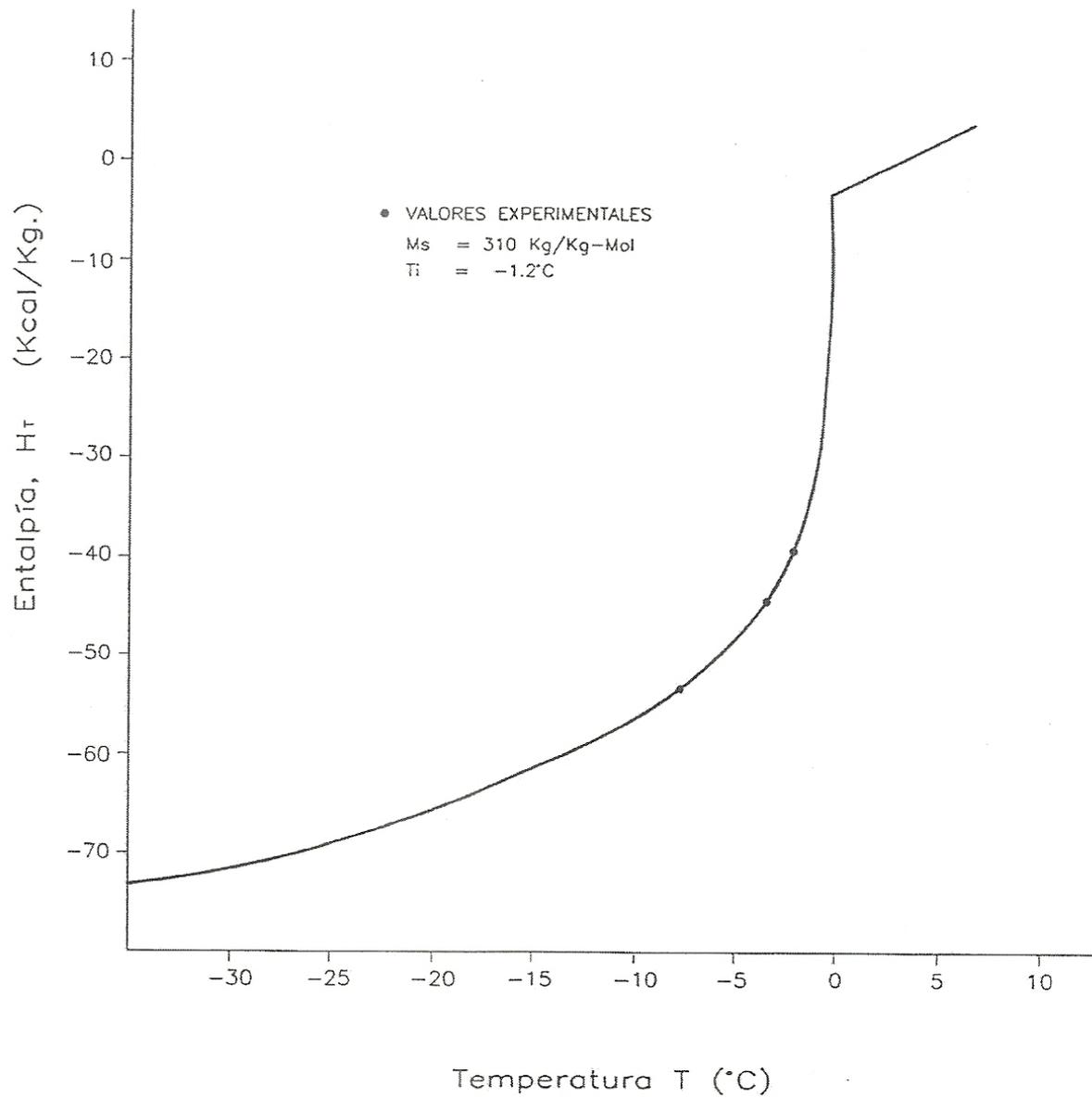
Tabla 15: Entalpía de congelación experimental y calculada para la pulpa de carambola

Temperatura (°C)	Entalpía Experimental (H) (Kcal/Kg)	Entalpía Calculado (H) (Kcal/Kg)	
		SCHWARTZBERG ^a	CHEN ^b
10.0	----	8.74	8.74
5.0	----	4.38	4.38
3.0	----	2.64	2.64
-1.5	0.00	0.00	0.00
-2.7	- 36.70	- 35.93	- 36.07
-3.5	- 42.37	- 42.75	- 42.88
-5.5	- 51.61	- 51.62	- 51.64
ERROR (EMR) 5.6%		7.8%	

Fuente: Elaboración propia.

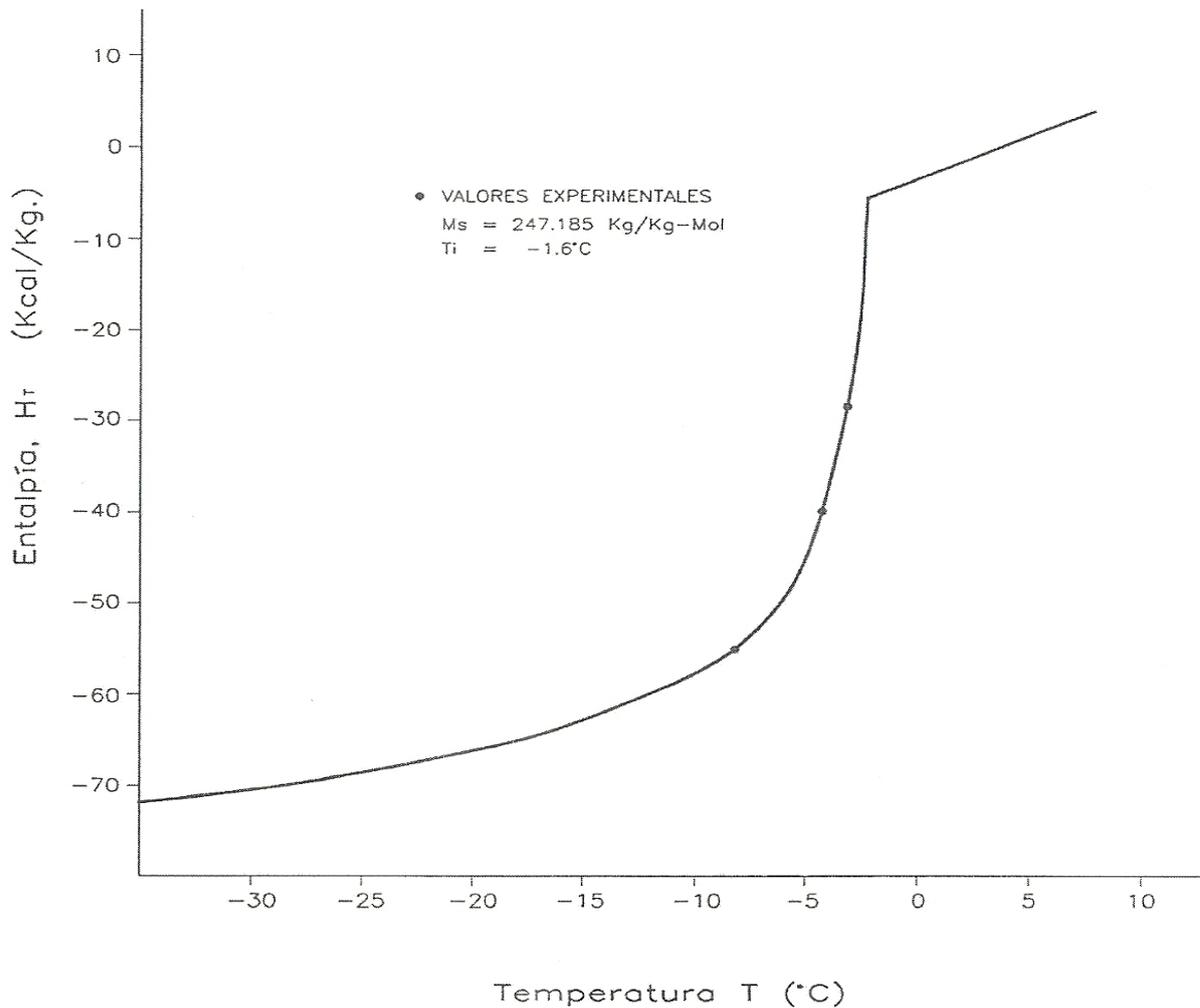
^a Parámetros empleados: $n_{wo} = 0.8810$, $T_i = -1.5^\circ\text{C}$, $b = 0.30$, $c_f = 0.4873$

^b Parámetros empleados: $n_s = 0.1190$, $T_i = -1.5^\circ\text{C}$, $M_s = 314$



Gráfica 11: Comparación de valores experimentales de entalpía con teóricos obtenidos mediante la ecuación de Schwartzberg para la pulpa de Carambola.

Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 12: Comparación de valores experimentales de entalpía con teóricos obtenidos mediante la ecuación de Chen para la pulpa de Carambola.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Calor específico aparente

Para el cálculo de los valores del calor específico aparente de la pulpa de carambola, se ha utilizado las ecuaciones (43) y (46) de SCHWARTBERG (1981) y CHEN (1985) respectivamente.

Los valores calculados del calor específico aparente de la pulpa de carambola se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16: Calor específico aparente de la pulpa de carambola

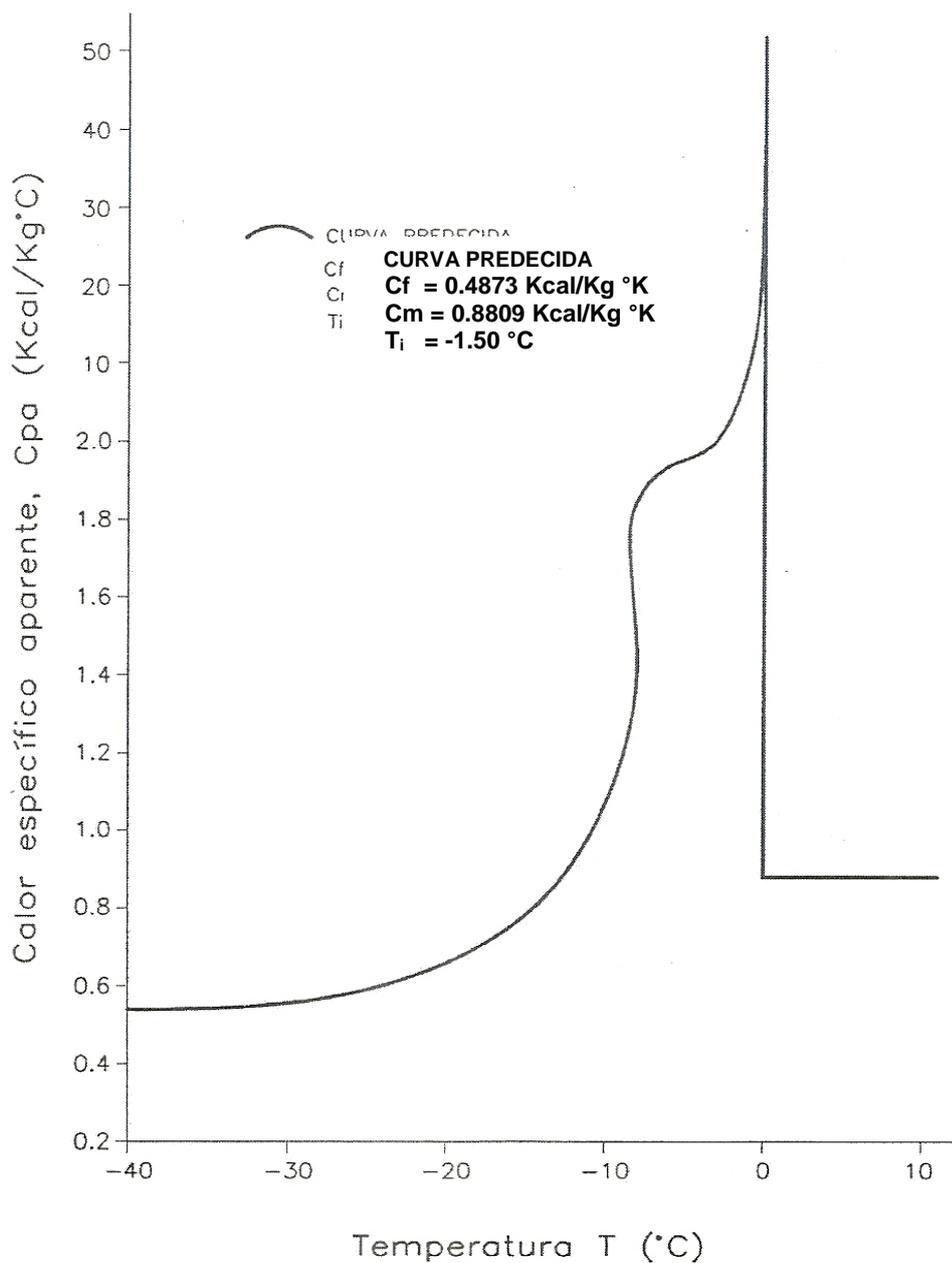
Temperatura (°C)	Calor Específico Aparente (Kcal/Kg °C)	
	SCHWARTZBERG ^a	CHEN ^b
10.0	0.866	0.866
5.0	0.866	0.866
0.0	0.866	0.866
-1.5	39.99	40.26
-3.0	11.73	11.76
-5.0	4.54	4.51
-7.0	2.56	2.52
-9.0	1.71	1.70
-11.0	1.33	1.28
-13.0	1.083	1.043
-15.0	0.95	0.89
-20.0	0.75	0.69
-30.0	0.61	0.55
-40.0	0.54	0.50

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 15 se puede apreciar, que en el rango de temperaturas desde 0 a 10 °C los valores del calor específico de la pulpa de carambola fue de 0.866 Kcal / Kg °C tanto por la ecuación de SCHWARTBERG (1981) y CHEN (1985) respectivamente, no existiendo variaciones en este rango de temperaturas. Conforme lo señala CHEN (1985), que el calor específico es dependiente de la composición química y la temperatura. De la Tabla 15, se puede apreciar que efectivamente conforme la temperatura desciende por debajo del punto de congelación, los valores del calor específico aparente de la pulpa de carambola también varían con tendencia hacia la baja, lo que se corrobora con numerosos modelos publicados sobre el particular.

ALVARADO J. (1996) señala que cuando se usa una ecuación para calcular el calor específico de un alimento por debajo del punto de congelación, como lo es nuestra investigación, la cantidad de agua congelada es un factor determinante. También BURANELO et al (2015) señalan que además de la

composición química y la temperatura, existen otros factores que inciden en el cálculo de este parámetro como lo son el índice de madurez del fruto, los grados Brix, la procedencia del fruto, los métodos de cultivo y hasta los factores ambientales.



Grafica 13: Curva de calor específico aparente para la pulpa de carambola, obtenida mediante la ecuación de SCHWARTZBERG (1981).

Fuente: Elaboración propia.

4.1.8 Evaluación del producto congelado

Tabla 17: Evaluación sensorial del atributo sabor de la pulpa de carambola

JUECES	MUESTRAS									TOTAL
	125	208	438	345	790	579	604	833	988	
1	4	4	4	4	3	3	3	2	3	30
2	4	3	3	3	3	3	3	3	3	28
3	3	3	4	4	2	2	3	3	2	26
4	3	3	3	3	2	1	3	2	2	22
5	4	4	3	3	3	3	2	2	2	26
6	3	3	3	3	2	2	2	2	2	22
7	4	2	3	3	2	2	2	2	1	21
8	4	4	2	3	3	2	3	2	1	24
TOTAL	29	26	25	26	20	18	21	18	16	199

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18: Análisis de varianza del atributo sabor de la pulpa de carambola

Fuente de Variación	G.L	S.C	CM	Fc	0.01	Fr	0.05
Tratamientos	8	20.861	2.608	8.201	2.85	2.12	**
Jueces	7	8.319	1.188	3.738	2.98	2.19	
Error	56	17.806	0.318				
Total	71	46.986					

Fuente: Elaboración propia, (2015).

$$cv = \frac{\sqrt{CME}}{\text{Promedio total}} \times 100$$

$$cv = \frac{\sqrt{0.318}}{2.764} \times 100 = 20.41\%$$

Interpretación:

Como F calculado es mayor a F tabulado tanto al 1% al 5%, entonces se concluye con un 99% de certeza que existe diferencias altamente significativas entre los tratamientos de la pulpa de carambola sometidos a diferentes contenidos de humedad y tiempos de deshidratación. El coeficiente de variabilidad (20.41%) nos muestra que los datos están dentro de la distribución normal y que podemos proseguir con los análisis.

Resumiendo se tiene:

Tratamiento	Promedio	Grupo 5 %		
		125	3.625	a
208	3.250	a	b	
438	3.250	a	b	c
345	3.125	a	b	c
790	2.625	a	b	c
579	2.500		b	c
604	2.250			c
833	2.250			c
988	2.000			c

Interpretación:

Se concluye con un 95% de certeza de que los tratamientos 125, 208, 438, 345 y 790 son estadísticamente iguales, y que al mismo tiempo son superiores a los tratamientos 579, 604, 833 y 988.

4.2 CONCLUSIONES

Las principales conclusiones a la que se llegó en el presente trabajo de investigación son las siguientes:

1. El punto inicial de congelación de la pulpa de carambola fue de $-1.50\text{ }^{\circ}\text{C}$ para un contenido de humedad de 88.10% .
2. El valor obtenido de la entalpía total de congelación para la pulpa de carambola fluctúa entre -36.70 y -51.61 Kcal / Kg para un rango de temperatura de hasta -5.5°C .
3. El peso molecular efectivo para la pulpa de carambola fue de 314 Kg / Kg-mol .
4. Los porcentajes de hielo encontrados para la pulpa de carambola a -40°C son de 91.66 y 92.29% calculados con las ecuaciones de SCHWARTZBERG y CHEN respectivamente, con una velocidad de formación de hielo de 0.0007 ; y calor específico aparente de $0.55\text{ Kcal / Kg }^{\circ}\text{C}$.
5. Los valores obtenidos del punto de congelación para el fruto de carambola presenta buena correlación con el contenido de sólidos de la pulpas utilizando la ecuación propuesta por SCHWARTZBERG y CHEN, para lo cual se utilizaron los parámetros de ajuste para la pulpa de carambola de $b = 0.30$ y $E = 0.06205$.
6. Las ecuaciones de SCHWARTZBERG y CHEN correlacionan bien los datos experimentales de entalpía de congelación para la pulpa de carambola con valores de EMR comprendidos entre 7.6 respectivamente.
7. Utilizando un termo comercial y una solución de salmuera saturada se pueden obtener resultados experimentales confiables para la entalpía de congelación.

4.3 RECOMENDACIONES

1. Determinar parámetros termofísicos de congelación para la fruta de carambola que hayan sufrido pre-tratamiento de despulpado y concentrado.
2. Realizar trabajos similares con otras especies de frutas tropicales nativas.
3. Aplicar los resultados obtenidos en el diseño de equipos de conservación por frío.
4. Aplicar modelos matemáticos asistidos por computador para la obtención de parámetros y propiedades termofísicas tanto para frutas tropicales y carnes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVA, M. *Estudio de los parámetros termodinámicos de congelamiento del caracol (Thais chocolate) precocido.*, Tesis UNALM, Lima – Perú, 1990.
2. ALVARADO, Juan De Dios. *Principios de Ingeniería Aplicados a Alimentos.* Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos., Universidad Técnica de Ambato – Ecuador, 1996.
3. ALZAMORA, S. et al. *Conservación de frutas y hortalizas mediante tecnologías combinadas.* Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO, 2004.
4. A.O.A.C. *Official Methods of Analysis Association of Official Agriculture Chemist*, 11va. Edición, 1970.
5. ANDERSSON, A. et al. *Effect of preheating on potato texture. Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Edición N° 34, pp: 229-251, 1994.
6. BALLESTEROS P. & RUIZ L. *Estudio de factibilidad para el montaje y puesta en marcha de una empresa comercializadora y distribuidora de pulpa de fruta derivada de la mora y el lulo.* Facultad de Tecnología de la Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
7. CALDERÓN-ORTIZ C. *Evaluación del efecto de procesos clásicos de transformación sobre las propiedades antioxidantes de la mora costarricense variedad 'Vino con espinas' (Rubus adenotrichus Schltdl).* Facultad de Ciencias Agroalimentarias de la Universidad de Costa Rica, 2009.
8. CORONADO, Manuel. *Determinación de los parámetros termodinámicos para la congelación de camarón gigante*

- (*Macrobrachium rosenbergii*). Tesis. Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, 1992.
9. CHEFTEL J. & CHEFTEL H. *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de Alimentos*. Vol. I, Editorial Acribia, Zaragoza – España, 1976.
 10. CHEN, S. *Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Enthalpy and Apparent Specific Heat*. J. Food Sci. 50: pp. 1158, 1985a.
 11. CHEN, S. *Thermodynamic analysis of the freezing and thawing of foods: Ice content and Mollier Diagram*, J. Food Sci. 50: pp. 1163 - 1166, 1985b.
 12. DUCKWORTH, N. *Frutas y Verduras*. Editorial Acribia, Zaragoza – España, 1969.
 13. FENNEMA, R. & POWRIE W. *Fundamentals of low temperatures food preservation*. Adv. Food Research 13: pp. 219 – 301, 1964.
 14. FERNÁNDEZ, C. *Caracterización reológica y optimización de la textura de purés de patata frescos y congelados. Efectos del proceso y adición de crioprotectores*. Memoria para optar al grado de doctor, Facultad de Veterinaria de la Universidad Complutense de Madrid – España, 2008.
 15. FERNANDEZ, S. *Tecnología de los Alimentos, Tema 6: Escaldado y pelado al vapor*, Zaragoza – España, 2004.
 16. FLORES, Abner. *Determinación de dos propiedades termofísicas para la congelación de dos frutos tropicales: Arazá (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh) y Pomarrosa (*Syzigium jambos* Alston) en la Región San Martín*. Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, 2000.

17. GIRALDO, G. et al. *Propiedades Termofísicas del Jugo Concentrado de Lulo a Temperaturas por Encima del Punto de Congelación*. Revista Científica de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Págs. 90 -95, Mayo 2010, Campinas-Brazil, 2010.
18. GAVILÁNEZ, M. *Influencia de la radiación ultravioleta (UV-C) sobre el contenido de vitaminas de frutas ecuatorianas: carambola, uvilla, tomate de árbol, naranjilla, mortiño y mora de castilla*. Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Tecnológica Equinoccial, 2013.
19. GONZALES, P. *Determinación de propiedades termodinámicas de la pulpa de lúcuma (Lucuma abovata H.B.K), relacionadas con su congelación*. Tesis Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú, 1991.
20. GRUDA, Z. & POSTOLSKI, J. *Tecnología de la congelación de los alimentos*. Edit. Acribia S.A 631, Zaragoza, España, 1986.
21. HELMAND, D. *Predicting refrigeration requirements for freezing ice cream*. Mich. Agric. Exp. Sta. Quart. Bull. 49: 144 – 154, 1966.
22. HELMAND, D. *Food process Engineering*. Edit. The AVI. Publishing Company INC, 1975.
23. HELMAND, D. *Food properties during freezing*, Food techol. 36: pp. 96-96, 1982.
24. HERNÁNDEZ-VALDEZ, C. *Acción y efectos de la polifenoloxidasas en alimentos*. Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana, 2009.
25. IBARZ A. & BARBOSA – CÁNOVAS G. *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Ediciones Mundi – Prensa, pp547 – 559, 2005.

26. KIECKBUSH, T. *Laboratorio de Engenharia de Alimentos*. Universidade Estadual de Campinas – Sao Paulo, Brasil, 1986, pp. 26.
27. KLEEBERG, H. *Estudo comparativo dos parametros termodinámicos e da cinetica de congelamento de file de pescado (Cynoscion petranas) cru e cozido*. Teis. Universidade de gradual de Campinas. Sao Paulo – Brasil, 1986.
28. MANCERA A. J., (2010). *Diseño de una pulpa funcional de frutas y hortalizas con propiedades antioxidantes y probióticas*. Facultad de Ingeniería de la Tesis para optar al título de M.Sc. en Ingeniería Química, Área de Bioprocesos Universidad Nacional de Colombia.
29. MEDINA, M. et al. *Determinación de propiedades termofísicas de pulpa de piña y solución de sacarosa*. Facultad de Engenharia de Alimentos – Unicamp, Campinas, Sao paulo, Brasil, 1998.
30. MOREIRA, A. et al. *Efecto de las concentraciones de solutos en las Propiedades Físicas del Jugo de Marañón*. Departamento de Ingeniería de Alimentos, Universidad Estatal de Campinas, Brasil, 2003.
31. PÉREZ, B. & VALDIVIA, V. *Carambola (Averroha carambola L.), su cultivo y producción en Nayarit*. Santiago Ixcuintla, Nayarit, México.: INIFAP, CIRPAC. Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Folleto Técnico Núm. 2, 2004.
32. PHAM, Q. *Predicción de propiedades térmicas y tiempo de congelación de 43 productos alimenticios en base a su composición*. Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Nueva Gales del Sur, Sydney – Australia, 1994.
33. PRIETO, S. et al. *Evaluación de la actividad antioxidante y el efecto antiinflamatorio del jugo de Averrhoa carambola L. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos, FH1311 - FH1319, 2010.*

34. ROLFE, E. *The chilling and freezing of food stuffs. Biochemical and Biological Engineering Science*. N. Blacketbough Academic Press Inc, N.Y., 1968.
35. ROSNAH, S. et al. *Propiedades termofísicas del jugo de guayaba Tailandesa sin semilla en el rango de temperaturas de 30 y 80°C y concentración de 10 a 40°Brix*. Journal Of Food Process Engineering, 25, 417-433, 1999.
36. RIEDEL, L. *Investigaciones calorimétricas sobre la congelación de pescado y carnes rojas*. Kaltetechnik, t. 45, Alemania, 1956.
37. SCHWARTZBERG, H. *Effective heat capacities for the freezing and thawmg of food* J. Food Sci. 41: pp. 152-156, 1976.
38. SCHWARTZBERG, H. *Mathematical Analysis of the Freezing and Thawing of Foods*. AIChE. Summer Meeting, August Detroit. USA, 1981.
39. SILLER, C. et al. *Calidad en frutos de carambola (Averrhoa carambola L.) cosechada en cuatro estados de madurez*. Revista Chapingo Serie Horticultura , 10(1): pp. 23-29, 2004.
40. SUCCAR, J. *Estimation of thermophysical properties of food at freezing temperaturas*. Beatrice Hund – wesson foods. Research and Development Center. Fullerton, California, USA, 1985.
41. TELLO, O. et al. *Conservación de Averrhoa carambola "Carambola" por azúcar y calor*. Revista Amazónica de Investigación Alimentaria, 2 (1): pp. 49 – 58, 2002.

A N E X O S

ANEXO 01: CALIBRACIÓN DEL TERMO COMERCIAL

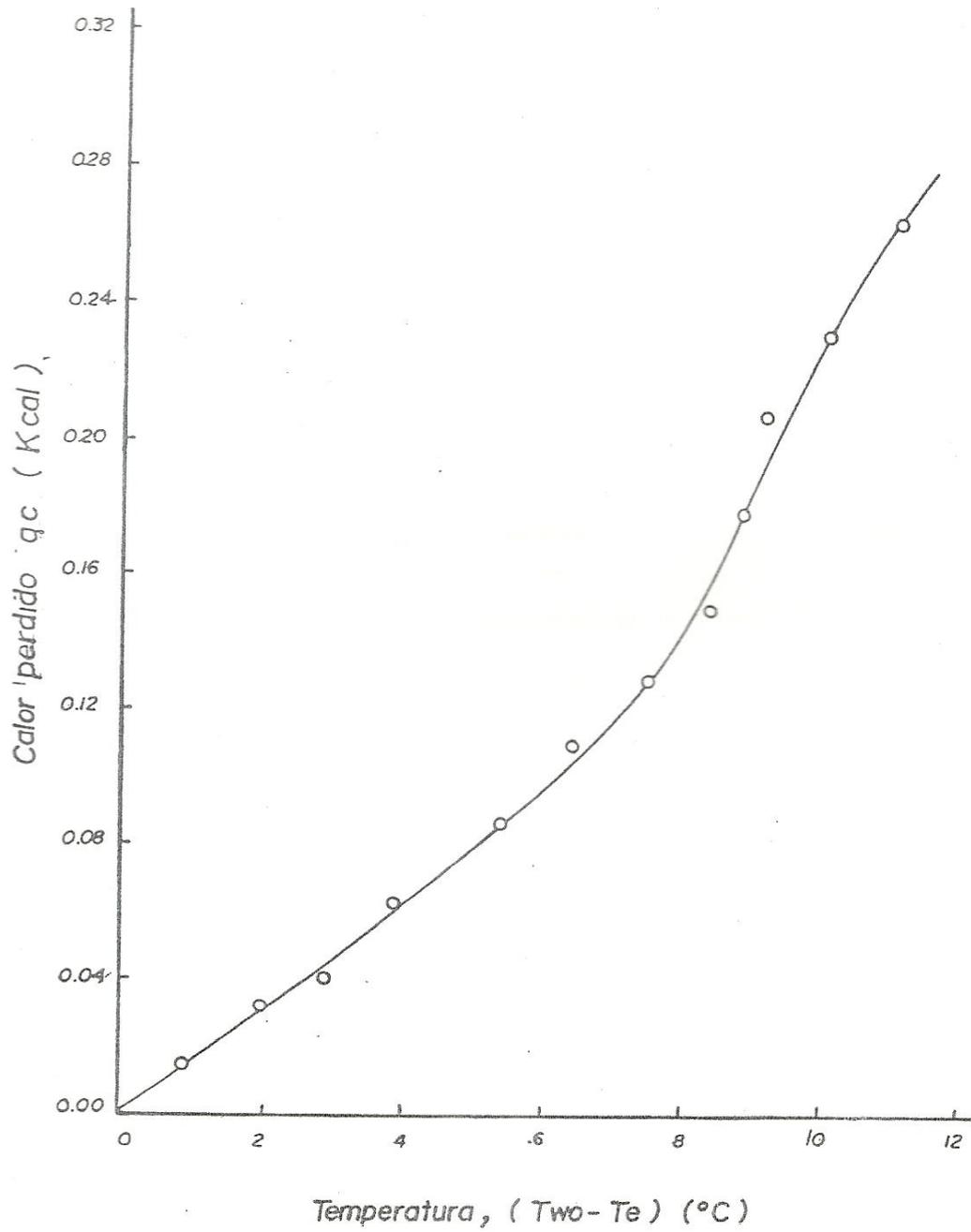
En la determinación calorimétrica de cualquier material, se presenta dos tipos de errores de medición: una debida a la pérdida de calor por variación de temperatura entre el interior y el exterior, y la otra debido al movimiento del agitador, aislamiento de paredes, entre otros, las mismas que ceden energía cuando se producen una variación interna de temperatura. En la calibración del termo, se busca considerar ambos tipos de error para realizar la corrección.

Se usaron cubos de hielo los cuales fueron previamente estabilizados con agua a fin de mantener temperaturas de 0°C. El hielo era secado con papel secante y luego sumergido dentro del termo previamente pesado, el cual contenía cerca de 100 g de agua a temperatura ambiente. Esta mezcla era nuevamente pesada con la finalidad de obtener la masa del hielo adicionado, de acuerdo a la cantidad de hielo utilizado se obtenían diferentes temperaturas finales que eran registradas cuidadosamente. El calor perdido fue calculado por la siguiente ecuación:

$$W_h (\lambda_f + C_{pw} T_e) = W_{wo} C_{pw} (T_{wo} - T_e) + q_c \quad \dots\dots\dots(I)$$

La ecuación (I) representa el balance calórico del sistema agua – hielo. En esta ecuación q_c es el calor perdido (Kcal), W_{wo} es la masa inicial de agua (Kg), λ_f es el calor de fusión del agua (79.8 Kcal/Kg), C_{pw} es el calor específico del agua al inicio de la prueba (°C) y T_e es la temperatura final (°C).

Las determinaciones tuvieron una duración de aproximadamente 15 minutos, que era el tiempo requerido con las muestras del fruto de carambola. Con los valores de q_c obtenidos y las correspondientes diferencias de temperaturas fue trazada la curva mostrada en el Gráfico N° 12.



Gráfica 14: Curva de calibración de la garrafa térmica comercial

Fuente: Elaboración propia.

**ANEXO 02: CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO PROXIMAL DEI
FRUTO DE CARAMBOLA**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

Av. de la Cultura 722
Pabellón C - Of. 106

Apartado Postal 921 - Cusco Perú
Teléfono - fax - modem: 224831



**UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANALISIS QUIMICO
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE QUIMICA
INFORME DE ANALISIS**

Nº0398-14-LAQ

SOLICITANTE: ANDRES CRUZ CUELLO
MUESTRA : AVERRHOA CARAMBOLA-L
FECHA : C/02/07/2014

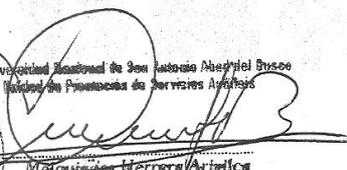
RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

=====	
pH	2.80
Acidez % (Ac.Cítrico)	1.15
Humedad %	88.10
Proteína %	0.34
Grasa %	0.10
Ceniza %	0.44
Fibra %	1.20
Carbohidratos %	11.02
Densidad g/cc 20°C	1.0014
=====	

*

Cusco, 04 de Julio 2014



 Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestaciones de Servicios Análisis

 Mariana Herrera Arriola
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO
 DE ANALISIS QUIMICO

**ANEXO 03: VALORES EXPERIMENTALES DEL PUNTO INICIAL DE
CONGELACION DE LA PULPA DE CARAMBOLA**

TIEMPO (seg)	TEMPERATURA (°C)
0	30.0
10	26.9
20	25.7
30	25.1
40	24.6
50	24.1
60	23.3
70	22.5
80	21.6
90	20.6
100	19.6
110	18.6
120	17.4
130	16.4
140	15.4
150	14.4
160	13.4
170	12.3
180	11.3
190	10.4
200	9.6
210	8.8
220	7.6
230	7.1
240	6.4
250	5.7
260	5.1
270	4.4
280	3.9
290	3.2
300	2.7
310	2.1
320	1.1
330	0.7
340	0.2
350	0.0

360	-0.2
370	-0.4
TIEMPO (seg)	TEMPERATURA (°C)
380	-0.6
390	-0.8
400	-1.0
410	-1.2
420	-1.4
430	-1.6
440	-1.5
450	-1.7
460	-1.9
470	-2.1
480	-2.0
490	-2.2
500	-2.4
510	-2.7
520	-2.9
530	-3.1
540	-3.5
550	-3.7
560	-3.9
570	-4.2
580	-4.5
590	-4.7
600	-4.9

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO N° 04: Ficha de Evaluación Sensorial del Atributo Sabor de la pulpa de Carambola

Nombre: _____ Fecha: _____

Producto: Pulpa de Carambola

Pruebe las muestras de fruto de carambola que se le presentan e indique,
Según la escala, su opinión sobre el sabor de cada uno de ellas.

Marque con una X el renglón que corresponda
a la calificación para cada muestra.

MUESTRAS

ESCALA	125	208	345	438	579	604	790	833
989								
Me gusta muchísimo	___	___	___	___	___	___	___	___

Me gusta mucho	___	___	___	___	___	___	___	___

Me gusta bastante	___	___	___	___	___	___	___	___

Me gusta ligeramente	___	___	___	___	___	___	___	___

Ni me gusta ni me disgusta	___	___	___	___	___	___	___	___

Me disgusta ligeramente	___	___	___	___	___	___	___	___

Me disgusta bastante	___	___	___	___	___	___	___	___

Me disgusta mucho	___	___	___	___	___	___	___	___

Me disgusta muchísimo	___	___	___	___	___	___	___	___

Comentarios:

MUCHAS GRACIAS

**ANEXO 05: FOTOS DEL DESARROLLO DE LA PARTE EXPERIMENTAL
DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**



Foto 01. Tara del envase antes del pesado de los frutos



Foto 02. Pesado de los frutos de carambola.



Foto 03. Registro del peso de los frutos de carambola.



Foto 04. Preparando la muestra para el análisis de acidez.



Foto 05. Obtención de la pulpa de carambola.



Foto 06. Determinación de la acidez de la pulpa de carambola



Foto 07. Viraje de color de la determinación de la acidez de la pulpa de carambola.



Foto 08. Determinación del pH de la pulpa de carambola.

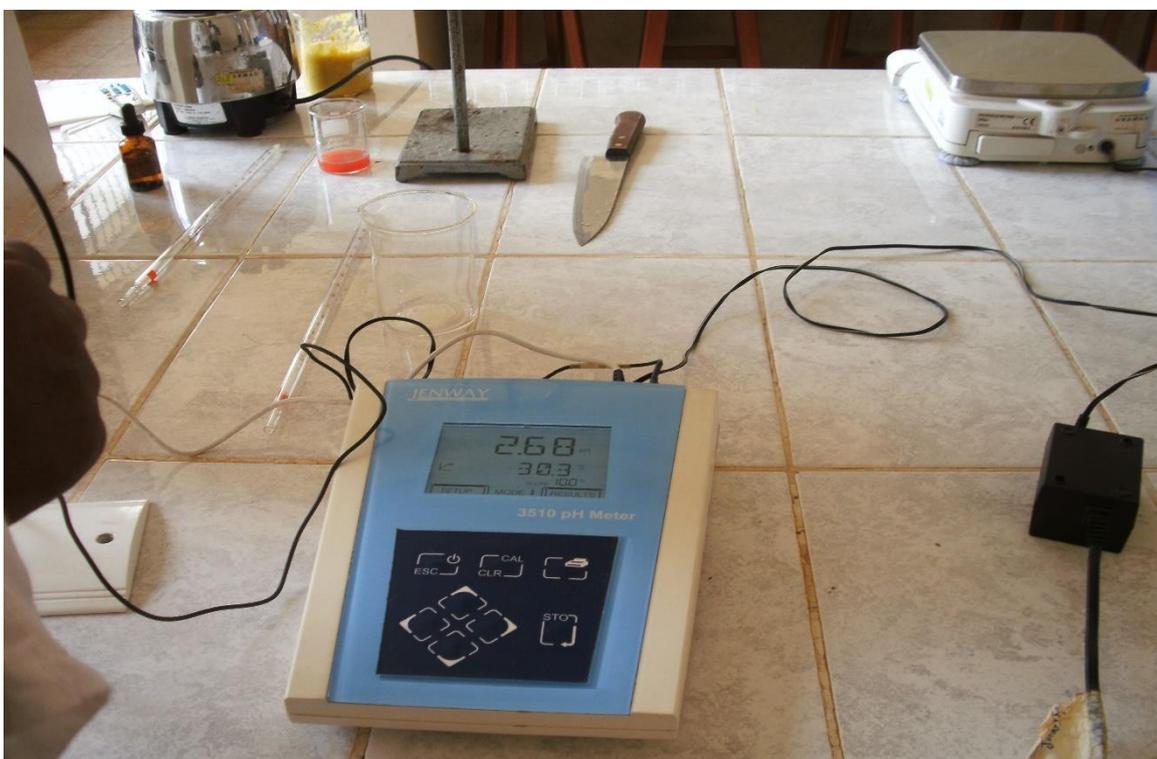


Foto 09. Resultado de la determinación del pH de la pulpa de carambola.



Foto 10. Medición del °Brix de la pulpa de carambola.

ANEXO 06: CÁLCULO DE PARÁMETROS TERMOFÍSICOS

I. Contenido de agua ligada

Datos:

Características de la pulpa de carambola

$$(n_{wo})_1 = 0.8810 \text{ kg agua / Kg alimento}$$

$$(n_s)_1 = 0.1190 \text{ Kg de sólido / Kg alimento}$$

$$(T_i)_1 = - 1.50 \text{ °C} = 271.65 \text{ °K}$$

$$(n_{wo})_2 = 0.7790 \text{ kg agua / Kg alimento}$$

$$(n_s)_2 = 0.2210 \text{ Kg de sólido / Kg alimento}$$

$$(T_i)_2 = - 2.22 \text{ °C} = 270.93 \text{ °K}$$

Constantes:

$$\Delta H_o = 79.8 \text{ Kcal / kg}$$

$$C_{pw} = 1.0 \text{ Kcal / Kg.°K}$$

$$T_o = 273.15 \text{ °K}$$

$$C_{ph} = 0.5 \text{ Kcal / Kg.°K}$$

$$R = 1.987 \text{ Kcal / Kg-mol °K}$$

$$M_w = 18 \text{ Kg / Kg-mol}$$

Para $T = (T_i)_1$, aplicando fórmula 23 se tiene:

$$\bar{\Delta H} = \Delta H_o - 0.5 \Delta C_p (T_o - T) \dots\dots\dots (23)$$

$$\bar{\Delta H} = \Delta H_o - 0.5 (C_{pw} - C_{ph}) (T_o - T)$$

$$\bar{\Delta H} = 79.8 - 0.5 (1.0 - 0.5) (273.15 - 271.65)$$

$$\bar{\Delta H} = 79.425 \text{ Kcal / Kg.}$$

Por fórmula 22, se tiene:

$$\ln A_w = \frac{\overline{\Delta H} (T - T_o)}{RTT_o} \dots\dots\dots (22)$$

$$\ln A_{w1} = \frac{18 (79.425) (271.65 - 273.15)}{1.987 (273.15) (271.65)}$$

$$A_{w1} = 0.9856$$

$$N_1 = 0.8810 / 0.1190 = 7.4034 \text{ Kg agua / Kg sólido}$$

Para $T = (T_i)_2$, aplicando fórmula 23 se tiene:

$$\overline{\Delta H} = 79.8 - 0.5 (1.0 - 0.5) (273.15 - 270.93)$$

$$\overline{\Delta H} = 79.245 \text{ Kcal / Kg.}$$

$$\ln A_{w2} = \frac{18 (79.245) (270.93 - 273.15)}{1.987 (273.15) (270.93)}$$

$$A_{w2} = 0.9787$$

$$N_2 = 0.7790 / 0.2210 = 3.5249 \text{ Kg agua / Kg sólido}$$

Y el valor de b, mediante la aplicación de la fórmula 38.

$$N_1 A_{w2} - N_2 A_{w1} + A_{w1} A_{w2} (N_2 - N_1)$$

$$b = \frac{\dots\dots\dots}{A_{w2} - A_{w1}} \dots\dots\dots (38)$$

$$b = 0.30 \text{ Kg agua / Kg de sólido}$$

II. Relación Peso Molecular del Agua Entre el Peso Molecular Efectivo de los Sólidos $E = 18/ M_s$

Datos:

Para las condiciones iniciales de la pulpa de carambola

$$N = 7.4034 \quad b = 0.30 \quad A_w = 0.9856$$

Reemplazando estos valores en la ecuación (37), se tiene:

$$E = (N - b) \frac{1 - A_w}{A_w} \dots\dots\dots (37)$$

$$E = (7.4034 - 0.30) \frac{1 - 0.9856}{0.9856}$$

$$E = 0.06205$$

III. Peso Molecular Efectivo de los Sólidos “Ms”

IV. Contenido de Hielo

V. Entalpía

VI. Calor Especifico Aparente