



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA

CARRERA DE ALIMENTOS

Tema: Determinación experimental y predicción matemática del tiempo de congelación de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)

Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Autor: Kevin Daniel Arboleda Verdesoto

Tutor: Ing. Santiago Esmiro Cadena Carrera

Ambato – Ecuador

Julio – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

Dr. Santiago Esmiro Cadena Carrera

CERTIFICA:

Que el presente Informe Final del Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 23 de junio de 2025



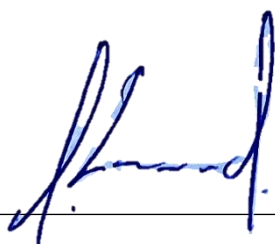
Ing. Santiago Cadena Carrera

1715602593

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Daniel Arboleda Verdesoto, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Alimentos son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas bibliográficas.



Kevin Daniel Arboleda Verdesoto

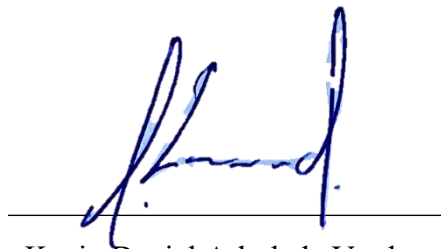
1804796371

AUTOR

DERECHOS DEL AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Informe Final del Trabajo de Titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Informe Final del Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



Kevin Daniel Arboleda Verdesoto

1804796371

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Profesores Calificadores, aprueban el presente Informe Final del Trabajo de Titulación, Opción Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:



Presidente del Tribunal



Ing. Mayra Liliana Paredes Escobar

0501873954



Ing. Andrea Verónica Delgado Ramos

0401305008

Ambato, 08 de julio de 2025

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a Dios, quien me ha regalado la fuerza, la paciencia y la sabiduría para poder cumplir con todo lo que me he propuesto en la vida.

A mi madre, Patricia, quien ha sido el pilar fundamental de mi vida, que con su amor, los valores inculcados y sobre todo la confianza han hecho de mí un hombre y un profesional de bien.

A mi padre, Darwin, que a pesar de la lejanía siempre tuvo mucho amor y estuvo apoyándome incondicionalmente para poder llegar siempre a donde me propongo.

A mis viejitos, mis abuelitos, Mario, Martha, Angelita y Francisco, que con su sabiduría han sabido guiarme por el camino correcto además de la compañía y buena crianza que han sabido darme.

A mis hermanos, que a pesar de ser pequeños siempre me han demostrado el apoyo, la admiración y el orgullo que tienen hacia mí.

A mi segundo papá, Luis, por enseñarme que siempre existen las segundas oportunidades y que siempre se puede ser mejor, por brindarme el apoyo y el amor incondicional de un padre.

A mi enamorada Fátima, por apoyarme desde el primer día y por motivarme a ser siempre mejor cada.

Y sobre todo me lo dedico a mí, porque solo yo sé todo lo que ha sucedido en esta etapa y por todo lo que he pasado para poder llegar hasta aquí.

Daniel Arboleda Verdesoto

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios, porque sin Él nada de esto habría sido posible, gracias por darme la vida, la sabiduría y la fuerza para poder culminar una etapa más de mi vida.

A mi madre, gracias por su amor incondicional, por cuidarme, y sobre todo, por nunca perder la confianza en mí. Le amo con todo mi corazón, gracias por nunca hacer que me falte nada, gracias por darme lo suficiente e incluso más de lo que necesitaba. Es la mejor madre del mundo, siempre estaré orgulloso de ser su hijo. No existen palabras ni tiempo suficiente para agradecer todo lo que ha hecho por mí.

A mis hermanos, gracias por confiar en mí, por cada sonrisa, por cada abrazo que me dieron en los momentos que más lo necesitaba.

A mi segundo papá, gracias, Luchito por darme tu cariño y tu confianza, pero sobre todo por el apoyo incondicional y los buenos consejos para ser un hombre de bien. Gracias infinitas.

A mi padre, gracias por el apoyo incondicional y la confianza que ha depositado en mí.

A mis abuelitos, gracias por enseñarme valores, por su amor constante, por el apoyo no solo emocional sino también económico, gracias por haber estado siempre que los necesite. Los amo mucho, son una parte esencial de mi vida.

A mi novia preciosa, Fatita, gracias por tu compañía, por cada momento que me hizo olvidar lo pesado de la universidad, gracias por hacer de esta etapa una aventura muy divertida, eres la mejor, te amo de aquí al fin del mundo.

A mi tutor, gracias, Inge Santi Cadena, el respeto y admiración hacia usted es muy grande. Le agradezco que haya confiado en mí incluso cuando yo dudaba. Muchas gracias por sus enseñanzas, su apoyo y por entender que, aunque a veces me cuesta, siempre intento dar lo mejor de mí.

A los piezas, gracias por siempre estar ahí cuando los necesite, más que amigos, son mis hermanos de otra madre. No cambien nunca.

A mis pequeñas mascotas: Paquito, Marco, Pillo y Acenix, gracias por hacerme compañía todas las noches que estuve en vela. Los quiero mucho.

Finalmente, gracias a mí. A mi yo del pasado gracias por no rendirte, por seguir adelante a pesar de todo, por levantarte cada vez que caíste. Gracias, Kevin, por no dejar que nada te detenga.

Y a mi yo del futuro... deja de hacer todo a último momento, después estás sufriendo.

Con amor y gratitud, Daniel.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DEL AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO 1	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes Investigativos	1
1.1.1. Justificación.....	1
1.1.2. Producción de atún en Ecuador	3
1.1.3. Producción de brócoli en Ecuador.....	3
1.1.4. Congelación.....	4
1.1.4.1. Proceso de congelación	5
1.1.4.4. Velocidad de congelación.....	7
1.1.4.5. Tiempo de congelación.....	7
1.1.4.6. Métodos matemáticos para predecir el tiempo de congelación.....	8
1.1.4.7. Transferencia de calor durante el proceso de congelación	11
1.1.4.8. Transferencia de calor por conducción.....	11
1.1.4.9. Transferencia de calor por convección.....	12

1.1.5.	Variación de las propiedades termofísicas durante el proceso de congelación...	12
1.1.5.1.	Conductividad térmica (k).....	13
1.1.5.2.	Calor específico (Cp).....	14
1.1.5.3.	Calor latente de fusión (L).....	14
1.1.5.4.	Densidad (ρ)	14
1.1.5.5.	Difusividad térmica (α).....	15
1.2.	Objetivos.....	16
1.2.1.	Objetivo general	16
1.2.2.	Objetivos Específicos	16
CAPÍTULO 2		17
2.	METODOLOGÍA	17
2.1.	Materiales	17
2.2.	Métodos	18
2.2.1.	Construcción de curvas de congelación de atún (<i>Thunnus albacares</i>) y brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) a partir de la variación de temperatura con el tiempo mediante registradores de temperatura	18
2.2.1.1.	Obtención y preparación de muestras.....	18
2.2.1.2.	Caracterización proximal de las muestras	19
2.2.1.3.	Preparación del equipo IQF	20
2.2.1.4.	Adecuación para el proceso de congelación en el equipo IQF	20
2.2.1.5.	Obtención experimental de la variación de temperatura en función del tiempo	21
2.2.1.6.	Construcción de las curvas de congelación de atún y brócoli	21
2.2.2.	Aplicación de modelos matemáticos referenciales para la predicción del tiempo de congelación de atún (<i>Thunnus albacares</i>) y brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)....	21
2.2.2.1.	Predicción matemática del tiempo de congelación.....	22

2.2.3. Comparación de los tiempos de congelación experimentales de atún (<i>Thunnus albacares</i>) y brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) con los tiempos calculados por diferentes modelos matemáticos teóricos	22
2.2.3.1. Análisis Estadístico.....	22
CAPÍTULO 3	23
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
3.1. Análisis y discusión de resultados	23
3.1.1. Construcción de curvas de congelación de atún (<i>Thunnus albacares</i>), y brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) a partir de la variación de la temperatura con el tiempo, mediante registradores de temperatura.	23
3.1.2. Aplicación de modelos matemáticos referenciales para la predicción del tiempo de congelación del atún (<i>Thunnus albacares</i>), y el brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).	
29	
3.1.3. Comparación los tiempos de congelación experimentales del atún (<i>Thunnus albacares</i>), y el brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>), con los tiempos calculados por diferentes modelos matemáticos teóricos.	32
CAPÍTULO 4	35
4. Conclusiones y recomendaciones.....	35
4.1. Conclusiones.....	35
4.2. Recomendaciones	36
ANEXOS	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Modelos matemáticos para predecir el tiempo de congelación.	9
Tabla 2 Variación de las propiedades termofísicas de las muestras de atún y brócoli dependiendo de la temperatura.	12
Tabla 3 Recursos materiales.	17
Tabla 4 Dimensiones de las muestras de Atún (<i>Thunnus albacares</i>) y Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).....	19
Tabla 5 Condiciones experimentales y calculados bajo las condiciones del flujo de aire en dirección horizontal.	31
Tabla 6 Condiciones experimentales y calculados bajo las condiciones del flujo de aire en dirección vertical.	31
Tabla 7 Tiempo de congelación del atún (<i>Thunnus albacares</i>).....	33
Tabla 8 Tiempo de congelación del brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Atún (<i>Thunnus albacares</i>)	3
Figura 2 Brócoli de cabeza (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).....	4
Figura 3 Etapas de congelamiento/Curva de congelación.....	5
Figura 4	24
Figura 5 Curva de congelación del brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) y atún (<i>Thunnus albacares</i>) hasta -10 °C sometido a flujo de aire vertical.....	26
Figura 6 Curvas de congelación de la muestra de atún (<i>Thunnus albacares</i>) a diferente dirección de flujo de aire	27
Figura 7 Curvas de congelación de muestras de brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>) a diferente dirección de flujo de aire	28

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Caracterización proximal del atún (<i>Thunnus albacares</i>) y del brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).....	43
Anexo 2 Medición de velocidad y temperatura del aire dentro del equipo IQF).....	43
Anexo 3	43
Anexo 4 Registro de tiempo y temperatura en equipo IQF con sentido de flujo de aire vertical	44
Anexo 5 Análisis de varianza ANOVA de atún (<i>Thunnus albacares</i>).....	44
Anexo 6 Análisis de varianza ANOVA de brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Italica</i>).	45
Anexo 7 Prueba Tukey de la muestra de brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>).....	45

RESUMEN EJECUTIVO

La conservación, el transporte y el almacenamiento de alimentos son factores clave para garantizar la calidad del producto final. En este contexto, la correcta aplicación de procesos de congelación representa un desafío importante. La construcción de curvas de congelación permite estudiar el comportamiento térmico de las matrices alimentarias, lo que facilita la determinación de temperaturas y tiempos óptimos de congelación con el objetivo de obtener productos de alta calidad. En la presente investigación, se utilizó un equipo IQF para congelar muestras de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) hasta alcanzar una temperatura de menos diez grados centígrados en el centro térmico de cada muestra, considerada como temperatura óptima de congelación. A través de una serie de ensayos experimentales, se determinó el tiempo de congelación y se compararon estos resultados con los tiempos estimados mediante modelos matemáticos. Los resultados mostraron que el tiempo de congelación experimental fue diferente a los resultados calculados por los modelos matemáticos de Pham, Nagaoka y Plank. Asimismo, se comprobó que la dirección del flujo de aire influye significativamente en el proceso. En particular, cuando las muestras fueron expuestas a un flujo de aire vertical ascendente (de abajo hacia arriba), el tiempo de congelación se redujo en aproximadamente quince minutos en comparación con el flujo de aire horizontal.

Palabras clave: Curvas de congelación, flujo de aire, velocidad de congelación, tiempo de congelación, atún, brócoli.

ABSTRACT

Food preservation, transportation and storage are key factors in ensuring the quality of the final product. In this context, the correct application of freezing processes represents an important challenge. The construction of freezing curves allows the study of the thermal behavior of food matrices, which facilitates the determination of optimal freezing temperatures and times to obtain high quality products. In the present investigation, an IQF was used to freeze samples of tuna (*Thunnus albacares*) and broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) until a temperature of minus ten degrees Celsius was reached at the thermal center of each sample, considered the optimum freezing temperature. Through a series of experimental trials, the freezing time was determined, and these results were compared with the times estimated by mathematical models. The results showed that the experimental freezing time was different from the results calculated by the mathematical models of Pham, Nagaoka and Plank. Also, it was found that the direction of air flow significantly influences the process. When the samples were exposed to a vertical upward (bottom-up) air flow, the freezing time was reduced by approximately fifteen minutes compared to horizontal air flow.

Key words: Freezing curves, air flow, freezing velocity, freezing time, tuna, broccoli.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes Investigativos

1.1.1. Justificación

El Ecuador, a lo largo del tiempo y sobre todo en la actualidad ha utilizado productos agroalimentarios como el atún (*Thunnus albacares*) y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) como base esencial de la economía nacional, además de ser productos importantes para el comercio internacional del país (Gallegos & Piguave, 2019).

El BCE (2024) expone que, durante el cuarto trimestre del 2024, se registró una exportación total de 19.0 mil t de atún, equivalente a \$65.6 millones. Para ese mismo año Ecuador registró una exportación de 106892.8 t de brócoli, lo que corresponde a un ingreso de \$204514.3 mil según el MAG (2024). Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y considerando que tanto el atún como el brócoli son productos altamente perecederos, necesitan el uso de técnicas de conservación avanzadas, como los métodos de congelamiento aplicados, para poder ofertar un producto de alta calidad que permita mantener todas sus características organolépticas y nutricionales, estos factores dependen casi en su totalidad del correcto manejo de la cadena de frío (Emam et al., 2023).

Entre los factores más importantes que se deben considerar al momento de trabajar con atún y brócoli son la frescura y textura del producto, ya que son los más afectados debido a su sensibilidad durante los cambios de temperatura y humedad, lo que podría reducir el tiempo de vida útil y, por lo tanto, su valor en el mercado (Hoffmann et al., 2023). Teniendo en cuenta esto, es importante el uso de técnicas como; el congelamiento rápido y empaquetado optimizado, las cuales permiten asegurar que los productos mencionados anteriormente lleguen a su destino con las condiciones óptimas de calidad (FAO, 2022).

En la actualidad existen varias técnicas de congelamiento, tales como; congelación lenta, congelación rápida y ultracongelación. Sin embargo, una de las más utilizada es el *supercooling*; esta técnica se fundamenta en mantener los alimentos por debajo del punto de

congelación inicial, con el objetivo de evitar la formación de cristales de hielo hasta llegar a la temperatura de inicio de congelación del producto. Además, se caracteriza por su alta velocidad de congelación, asegurando que la formación de cristales surja de manera controlada minimizando el daño celular. Este proceso permite prolongar la vida útil de los alimentos conservando la calidad de estos **(Shafel et al., 2015)**.

A pesar de ser una técnica de congelación comúnmente utilizada, **Fukuma et al. (2012)** mencionan que, la super congelación presenta un gran desafío al momento de mantener la temperatura de super congelamiento por largos periodos de tiempo, debido a que este estado tiende a ser inestable y puede resultar complicado replicar los resultados. Además, es importante considerar que la calidad del alimento puede disminuir si no se logra tener controladas las condiciones de velocidad de congelación. De igual forma, si no se aplican temperaturas adecuadas en las técnicas de ultracongelación se pueden generar cristales de hielo grandes provocando daños irreversibles en las estructuras del alimento, con cambios de textura y de sabor **(Gómez & Medina, 2024)**.

Debido a esto, se han evaluado varias técnicas de ultracongelación, como la congelación por medio de aire forzado (túneles de congelación), que permiten la formación de cristales de menor tamaño en los espacios inter e intracelulares, manteniendo la estructura original del alimento y de igual forma sus propiedades sensoriales y nutricionales. Además, que, el tiempo de congelación se produce en lapsos de tiempo de entre 15 a 30 minutos **(Alhamdan et al., 2018)**.

Para poder definir el tiempo de congelación adecuado de un producto, se pueden basar en la construcción de curvas del perfil de temperatura, esto permite monitorear el proceso de congelación, facilitando así la optimización del **proceso (Bilbao et al., 2019)**. Este proceso se lo puede realizar, como lo señalan **Xu et al. (2017)**, mediante dispositivos auxiliares como sensores de temperatura. Sin embargo, el monitoreo de temperatura durante el proceso puede presentar complicaciones o los equipos/sensores pueden ser costosos, por lo tanto, de forma complementaria se puede determinar el tiempo de congelación mediante el uso de modelos matemáticos reportados bibliográficamente, considerando, la posición del alimento además de las condiciones del proceso, con las limitaciones asociadas a las mismas **(Shaikh & Prabhu, 2007)**.

Por lo que, considerando lo expuesto anteriormente, el presente trabajo de investigación plantea realizar la determinación experimental y predicción matemática del tiempo de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), construyendo curvas de congelamiento a partir de datos experimentales de congelamiento de estos alimentos en IQF (*Individual Quick Freezing*) que permita aportar información aplicable a procesos industriales.

1.1.2. Producción de atún en Ecuador

La industria atunera del Ecuador (**Figura 1**) es una de las bases fundamentales de la economía nacional e internacional. El **BCE (2024)** señala que en el último trimestre del 2024 se lograron exportar 19,0 miles de t con un valor de aproximadamente de \$65,6 millones. Estos valores permiten evidenciar el éxito de la exportación de atún hacia otras partes del mundo debido a la calidad del producto ofertado. Esta calidad es posible debido al correcto uso de técnicas de congelamiento que permite mantener estándares de calidad y frescura (**Zambrano, 2024**).

Figura 1

Atún (*Thunnus albacares*)



Fuente: (Falzon & Charter, 2023)

1.1.3. Producción de brócoli en Ecuador

La calidad del brócoli en Ecuador ha crecido de manera exponencial. Debido a esto la demanda ha aumentado significativamente, por lo que, las provincias de Cotopaxi,

Imbabura, Pichincha y Chimborazo han aumentado su producción con estándares de calidad que han venido presentando a lo largo de los años (Peñañiel, 2024). Entre las variedades más demandadas se encuentra el brócoli de cabeza (*Brassica oleracea* var. *italica*) (Figura 2), debido a que cumple con las características adecuadas: tamaño de entre 10 y 15 cm de largo y un peso que oscila entre 300 a 500 gramos (Miao et al., 2019).

Figura 2

Brócoli de cabeza (*Brassica oleracea* var. *italica*).



1.1.4. Congelación

Un proceso de conservación que permite garantizar la calidad y seguridad de un alimento fresco es la congelación. Durante este proceso, el agua contenida dentro de los alimentos se cristaliza. Es importante considerar que una mala utilización de este método ocasionaría la pérdida de características sensoriales y organolépticas de los mismos (Xu et al., 2015).

Es un proceso que permite prolongar el tiempo de vida útil, disminuir la actividad bacteriana e inhibir procesos de deterioro de la matriz alimentaria. El mismo que puede ser controlado y visualizado de mejor manera con la construcción de curvas de congelación, que facilitan la observación de la evolución de la temperatura a lo largo de un determinado tiempo, esto permite establecer temperaturas y tiempos adecuados de congelación, evitando así el deterioro ocasionado por la formación de cristales (Li et al., 2018).

Chaves & Acosta (2023) mencionan que los sistemas de ultracongelación o de congelación rápida como el IQF (*Individual Quick Freezing*) permiten obtener tiempos de congelación muy cortos gracias a que los coeficientes de transferencia térmica h son elevados.

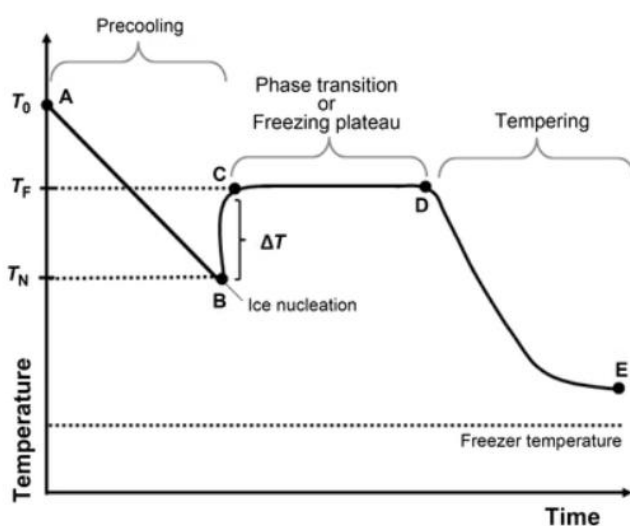
1.1.4.1. Proceso de congelación

Según **Dincer (2003)** este proceso de conservación es de gran importancia en la industria alimentaria y se divide en tres etapas, como se muestra en la **Figura 3**:

1. Fase de preenfriamiento: esta fase permite enfriar el alimento desde la temperatura inicial del alimento hasta llegar a la temperatura a la que empieza la congelación. Se transfiere el calor suficiente para disminuir la temperatura sin que exista un cambio de fase (calor sensible).
2. Etapa de cambio de fase: En esta etapa inicia la formación de hielo y se extiende desde el punto inicial de congelación hasta una temperatura media de 5°C más frío que en el centro. En esta etapa una gran cantidad de agua se convierte en hielo conseguido principalmente por un cambio de entalpía.
3. Fase de templado: en esta fase se produce el enfriamiento hasta alcanzar la temperatura final de almacenamiento o a su vez la temperatura óptima de conservación. Es recomendable enfriar el producto entre los -10°C y los -18°C, temperatura a la cual se obtiene una estabilidad térmica.

Figura 3

Etapas de congelamiento/Curva de congelación



Nota: La imagen muestra una interpretación de una curva de congelamiento y como la temperatura varía a lo largo del tiempo, estableciendo límites para cada una de las fases de

esta técnica.

Fuente: (Otero et al., 2016)

1.1.4.2. Congelación rápida individual (*Individual Quick Freezing*)

Un congelador IQF, es un equipo diseñado para congelar productos rápidamente, mediante la utilización de corrientes de aire frío entre -35 °C y -42°C a una velocidad de entre 2 y 8 m/s, permitiendo la formación de cristales de menor tamaño y evitando la destrucción de los tejidos celulares de los alimentos, permitiendo mantener sus características físicas y químicas, asegurando su calidad **(FPS, 2022)**. **Kamiloglu (2019)** menciona que el proceso de la técnica IQF ayuda a conservar la estructura celular gracias a la formación de cristales de hielo muy pequeños, evitando así que se produzcan rupturas en los tejidos vegetales, y que al momento de realizar la descongelación no exista pérdida de fluidos celulares.

Además, según **Otero et al. (2013)** la superficie de contacto entre el alimento y el medio de refrigeración aumenta asegurando así un proceso de congelación más efectivo. No obstante, se debe cumplir con ciertos parámetros tanto de tiempo como de temperatura, por ejemplo, se debe operar en periodos de tiempo cortos (2 a 5 minutos) y , y entre temperaturas de -130°C y -40°C. Sin embargo, se debe considerar el tipo de alimento, el tamaño y la velocidad del aire a la que se encuentra expuesto

1.1.4.3. Punto de congelación

Es importante considerar que no todos los alimentos presentan temperaturas de congelación estándar, sino que esta varía dependiendo del tipo de alimento **(Cerros, 2011)**. Por esto, **Dincer (2017)** destaca la necesidad de realizar mediciones con sensores que permitan monitorear la temperatura en el centro térmico de las muestras, debido a que en este punto se presentan variaciones significativas. Estas mediciones, nos permiten establecer el inicio de cristalización del agua.

1.1.4.4.Velocidad de congelación

Según **Singh (2001)** lo que permite garantizar la calidad de un alimento es la velocidad a la que dicho alimento haya sido congelado. Esta velocidad se mide en °C/h y se calcula dividiendo la diferencia entre la temperatura inicial y la temperatura final por el tiempo de congelación.

Es importante destacar que la calidad del producto congelado depende de la velocidad de congelación. Entre los tipos de congelación, según su velocidad, tenemos:

- Lenta: $v = < 1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ y $T = -15 \text{ a } -30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (calidad baja)
- Rápida: $v = (1 - 5) \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ y $T = -30 \text{ a } -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (calidad buena)
- Ultracongelación: $v = > 5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$ y $T = < -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (calidad excelente)

(Kim et al., 2023)

1.1.4.5.Tiempo de congelación

Como lo indican **Singh & Heldman (2009)** el tiempo de congelación es el periodo en el cual la temperatura inicial desciende hasta llegar a una temperatura final predeterminada. Debido a las variaciones de temperatura que presenta el proceso de congelación, se debe tomar como referencia el centro térmico de cada producto, Este centro, hace referencia al punto o región donde el enfriamiento ocurre de forma más lenta. Este periodo de tiempo no solo establece el tiempo que debe permanecer un alimento en el proceso de congelación, sino que permite a su vez evaluar el rendimiento de este proceso.

Además, se debe considerar los siguientes factores para determinar el tiempo de congelación.

- Temperaturas inicial y final del producto.
- Cantidad de calor eliminado.
- Forma y dimensión del producto.
- Propiedades termofísicas del producto
- Coeficientes de transferencia de calor.
- Densidad

Debido a que realizar mediciones puede resultar complejo, y en ciertas ocasiones difícil de llevar a cabo, se recurre al uso de modelos matemáticos, en donde se tomarán en cuenta las propiedades térmicas, composición proximal y la forma característica del alimento con el fin de predecir el tiempo de congelación de las muestras (**Barbosa et al., 2005**).

1.1.4.6. Métodos matemáticos para predecir el tiempo de congelación

El cálculo para estimar los tiempos requeridos en la congelación de alimentos es un problema complejo que integra la transferencia de calor, el cambio de fase y las propiedades térmicas variables de los productos. Estos cálculos implican la utilización de diversos modelos, que van desde formulaciones analíticas con ecuaciones simples hasta enfoques numéricos que requieren de la ayuda de ordenadores para facilitar la resolución (**Mascheroni & Calvelo, 1982**).

Según **Dincer (2003)**, la ecuación de Plank (**Tabla 1**), es una de las aproximaciones analíticas más utilizadas para predecir el tiempo de congelación en alimentos. Este modelo es aplicable a diferentes geometrías. Además, asume que la congelación del alimento se produce a temperatura constante y que el cambio de fase ocurre dentro de un intervalo definido de temperaturas.

Por su parte, el modelo de Pham (**Tabla 1**) es un ajuste de la ecuación de Plank diseñada para describir la congelación de alimentos con formas irregulares usando como referencia un elipsoide. Para usar este modelo, se debe considerar que el calor sensible es despreciable y que la temperatura a la que se libera el calor latente será siempre constante (**Soares et al., 2012**).

Finalmente, **Sun (2005)** menciona que, el modelo de Nagaoka (**Tabla 1**) es una variación de la ecuación de Plank; cuya ecuación es utilizada para el cálculo del tiempo de congelación de un alimento, en la que se propone calcular las propiedades del producto de manera similar a los modelos de Pham y Plank, con la excepción de la entalpía, que debe determinarse teniendo en cuenta la temperatura inicial y final en el centro térmico durante el proceso.

A continuación, en la **Tabla 1**, se presentan las ecuaciones más utilizadas para la predicción del tiempo de congelación.

Tabla 1

Modelos matemáticos para predecir el tiempo de congelación.

Ecuación	Ecuación	Referencia
PLANK	$t_f = \frac{\rho_f * L_f}{T_f - T_a} * \left(\frac{P'a}{h_c} + \frac{R'a^2}{k_f} \right)$ $L_f = m_m L$	(Singh & Heldman, 2009, p. 353-654)
PHAM	$t = \frac{d_c}{E_f h} * \left[\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left(1 + \frac{N_{Bi}}{2} \right)$ $\Delta H_1 = \rho_u c_u * (T_i - T_{fm})$ $\Delta H_2 = \rho_f [L_f + c_f (T_{fm} - T_c)]$ $\Delta T_1 = \left(\frac{T_i + T_{fm}}{2} \right) - T_a$ $\Delta T_2 = T_{fm} - T_a$ $T_{fm} = 1,8 + 0,263 T_c + 0,105 T_a$	(Pham, 1986, p. 210 - 2012)
NAGAOKA	$t_f = \frac{\Delta H * \rho_f}{T_f - T_a} * \left(\frac{P'a}{h_c} + \frac{R'a^2}{k_f} \right)$ $\Delta H = (1 + 0,008 T_i)(c_u(T_i - T_f) + L_f + c_f(T_f - T_c))$	(Sun, 2005, p. 377)

Nota. Ecuaciones matemáticas con mayor frecuencia usadas en matrices alimentarias y consideradas para la predicción del tiempo de congelación.

Donde:

- **Ecuación de Plank**

ρ_f : Densidad del alimento (congelado) - $\frac{kg}{m^3}$

L_f : Calor latente de congelación - $\frac{kJ}{kg}$

m_m : Fracción másica (congelado)

L : Calor latente de fusión - $\frac{kJ}{kg}$

- **Ecuación de Pham**

t : Tiempo de congelación - s

E_f : Factor de forma - adimensional

d_c : Diámetro característico - m

h : Coef.de transferencia de calor - $\frac{W}{m^2 K}$

N_{Bi} : Número de Biot - adimensional

ΔT : Intervalo de temperatura - °C

ΔH : Intervalo de entalpía volumétrico - $\frac{kJ}{kg}$

ρ_u : Densidad del alimento (no congelado) - $\frac{kg}{m^3}$

c_u : Calor específico (no congelado) - $\frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C}$

L_f : Calor latente de fusión - $\frac{kJ}{kg}$

c_f : Calor específico (congelado) - $\frac{kJ}{kg}$

T_{fm} : Temperatura media de fusión - °C

T_i : Temperatura inicial del alimento - °C

T_c : Temperatura de congelación - °C

T_a : Temperatura ambiente - °C

ρ_f : Densidad del alimento (congelado) - $\frac{kg}{m^3}$

ρ_u : Densidad del alimento (no congelado) - $\frac{kg}{m^3}$

- **Ecuación de Nagaoka**

t_f : Tiempo final del proceso térmico - s

ΔH : Cambio de entalpía - $\frac{kJ}{kg}$

ρ_f : Densidad del alimento (congelado) - $\frac{kg}{m^3}$

T_f : Temperatura final deseada - °C

T_a : Temperatura aire de congelación - °C

P, R : Constantes de Plank – adimensional

a : Dimensión característica del alimento - m

h_c : Coeficiente de transferencia de calor - $\frac{W}{m^2 K}$

k_f : Conductividad térmica - $\frac{W}{m K}$

T_i : Temperatura inicial del alimento - °C

T_c : Temperatura de congelación - °C

c_u : Calor específico (no congelado) - $\frac{kJ}{kg ^\circ C}$

L_f : Calor latente de fusión. - $\frac{kJ}{kg}$

1.1.4.7. Transferencia de calor durante el proceso de congelación

James & James (2014) mencionan que, durante el proceso de congelación el calor contenido por el alimento se elimina por conducción y por convección, radiación y evaporación en la superficie. Sin embargo, si se pone en práctica este proceso los cuatro modos de transferencia de calor ocurrirán de manera simultánea. Así mismo, si la temperatura varía únicamente en función de la posición en la que se encuentre, lo cual implica que cualquier variación de temperatura ocurre de forma instantánea, lo que permitirá obtener un equilibrio térmico.

Por otro lado, si se considera un sistema en estado transitorio, la temperatura del sistema varía con el tiempo y también con la posición. En este último ejemplo, el sistema se muestra inestable y la congelación se producirá únicamente cuando el centro alcance la temperatura determinada para su congelación (**Incropera et al., 2011**).

1.1.4.8. Transferencia de calor por conducción

Este fenómeno ocurre cuando en un sistema, sea sólido, gaseoso o líquido, ocurre un diferencial de temperatura. Se produce una transferencia de energía de las moléculas con mayor energía hacia las de menor energía, a través de las interacciones que ocurren entre ellas. Sin embargo, si se tiene un sistema netamente sólido, la energía es receptada por algún tipo de vibración, esto se debe a que cada molécula vibra en una posición fija, permitiendo el intercambio de energía con las moléculas que se encuentren a su alrededor. El resultado de esto evidenciará un aumento considerable de la temperatura en las moléculas que se encontraban con menor temperatura (**Cao, 2024**)

1.1.4.9. Transferencia de calor por convección

Según Cao (2024), la convección es un medio de transmisión de calor presente en fluidos que se encuentran en movimiento y una superficie sólida. En este método de transferencia mientras más rápido es el movimiento una mayor cantidad de energía será transferida al sólido. Cabe recalcar que existirá transferencia de calor por convección siempre y cuando el fluido se mantenga en movimiento, caso contrario la transferencia será por conducción.

1.1.5. Variación de las propiedades termofísicas durante el proceso de congelación.

Nesvadba (2008) señala que las propiedades termofísicas son un factor fundamental para el diseño y control de procesos térmicos, debido a que garantizan la calidad y estabilidad del producto final. Estas propiedades dependen significativamente del contenido de agua de un alimentos y del estado físico en la que se presenta el alimento. Debido a esto, si existe cualquier pérdida de agua o cambio de fase, las propiedades se verán afectadas, especialmente durante el proceso de congelación. Es por esto, que se han planteado modelos matemáticos que permitan predecir el cambio existente en las propiedades termofísicas de las muestras. Estos modelos, se basan en la composición proximal del alimento y se considera el efecto de la temperatura en rangos comprendidos entre -40°C y 150°C.

Gracias a estos modelos, se pueden establecer valores de conductividad térmica, difusividad, densidad, entre otros de los productos con los cuales se está experimentando. A continuación la **Tabla 2** permite observar el cambio de las propiedades termofísicas de acuerdo con la temperatura, además de la variación que existe dependiendo el tipo de muestra:

Tabla 2
Variación de las propiedades termofísicas de las muestras de atún y brócoli dependiendo de la temperatura.

	Atún					
Temperatura °C	18.8	10	0	-2.2	-5	-10

Densidad kg/m^3	1057.088	1058.651	1059.858	1042.841	1061.523	1033.097
Calor específico $kJ/kg\ ^\circ C$	3.524	3.520	3.517	8.863	3.035	2.393
Difusividad térmica m^2/s	1.29E-07	1.24E-07	1.19E-07	-4.28E-06	3.83E-07	7.69E-07
Conductividad térmica $W/m\ ^\circ C$	0.511	0.499	0.484	-6.460	0.896	1.490
Brócoli						
Temperatura $^\circ C$	18.5	10	0	-1	-5	-10
Densidad kg/m^3	1047.522	1048.550	1049.082	895.268	976.532	968.067
Calor específico $kJ/kg\ ^\circ C$	3.882	3.880	3.878	0.233	2.367	2.114
Difusividad térmica m^2/s	1.38E-07	1.33E-07	1.27E-07	1.93E-06	9.30E-07	1.08E-06
Conductividad térmica $W/m\ ^\circ C$	0.570	0.557	0.540	3.382	1.795	2.014

1.1.5.1. Conductividad térmica (k)

Según **Fellows (2009)**, la conductividad se ve afectada en medida que el agua contenida se transforma en hielo, además, permite determinar cómo la velocidad de transferencia aumenta dependiendo del estado en el que se encuentra el alimento; mientras más líquido mayor tiempo tomará la transferencia, mientras que cuando existe mayor cantidad de hielo la velocidad de transferencia de calor aumenta. En este contexto, el uso de congelación rápida como el IQF permite mejorar la eficiencia del proceso de congelación debido a que el rápido congelamiento de las capas externas incrementa la formación de cristales de hielo. Esto implica que exista una mayor conductividad térmica, facilitando la transferencia de calor de adentro hacia afuera. Además, factores externos como la velocidad del aire, la temperatura,

tamaño y forma de la muestra, influyen en esta transferencia.

1.1.5.2. Calor específico (C_p)

El calor específico se ve afectado principalmente por la variación de temperatura y por el contenido de agua libre o congelada. Cuando la temperatura varía entre 0°C y -10°C, el calor específico disminuye, debido a que el agua obtenida está en proceso de congelación. Esta variación de valores de C_p , si no son considerados, ocasiona que el cálculo del tiempo de congelación se vea afectado y no se obtenga un valor real (**Fricke & Becker, 2001**).

1.1.5.3. Calor latente de fusión (L)

A pesar de no variar durante los procesos de congelación, esta constante afecta los cálculos de tiempos de congelamiento. Si no se lo determina correctamente, se puede ver afectado el balance térmico y, por lo tanto, la precisión del cálculo del tiempo de congelación. Además, se debe considerar que en caso de que, en una experimentación con un equipo IQF, no se use un valor de L adecuado, puede existir una ineficiencia energética o pérdida de calidad en el producto (**Pham, 2006**).

1.1.5.4. Densidad (ρ)

La densidad de un alimento es una propiedad que brinda información sobre la masa de una muestra dividida para su volumen. Esta propiedad se puede ver afectada de forma directa por la variación de la temperatura, mientras menor es la temperatura, mayor será el valor de la densidad, y viceversa. De igual forma, la densidad varía según la fase de la materia en la que se encuentre la muestra, la densidad de los líquidos y sólidos son un tanto comparables, ya que sus átomos están en estrecho contacto. Mientras que la densidad de los gases es menor que las de los líquidos y sólidos, debido a que los átomos de los gases están separados por grandes espacios y no existe contacto entre átomos de forma constante (**Parmar et al., 2019**).

1.1.5.5. Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica es una propiedad que indica la rapidez con la que el flujo de calor se propaga por el alimento durante el calentamiento o enfriamiento, esta propiedad es única para cada material. Los alimentos que tengan una alta difusividad térmica distribuyen de forma rápida la energía térmica en todo su volumen y la temperatura cambiará rápidamente durante el calentamiento o enfriamiento. Por el contrario, los alimentos con una difusividad térmica baja tienen una respuesta lenta a los cambios de temperatura, por lo tanto desarrollarán gradientes de temperatura más grandes (Alvis et al., 2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Determinar experimentalmente y predecir matemáticamente el tiempo de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).

1.2.2. Objetivos Específicos

- Construir curvas de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) a partir de la variación de la temperatura con el tiempo, mediante registradores de temperatura.
- Aplicar modelos matemáticos referenciales para la predicción del tiempo de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).
- Comparar los tiempos de congelación experimentales del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), con los tiempos calculados por diferentes modelos matemáticos teóricos.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1. Materiales

Para la elaboración de este proyecto de titulación, se realizó una serie de experimentaciones en los laboratorios de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

A continuación, en la **Tabla 3**, se detallan los materiales, materia prima, equipos y reactivos utilizados durante toda la experimentación:

Tabla 3

Recursos materiales.

Materia prima
Atún (<i>Thunnus albacares</i>)
Brócoli (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>italica</i>)
Equipos
Balanza analítica
Estufa
Mufla
Balanza de humedad
Digestor Kjeldahl
Destilador Kjeldahl
Extractor Soxhlet
Equipo IQF
Pie de rey
Anemómetro
Recursos materiales
Desecador

Cápsulas
Matraz
Mufla
pH-Metro
Probeta
Pipeta
Reactivos
Ácido sulfúrico H_2SO_4
Pastilla catalizadora
Hidróxido de sodio $NaOH$
Ácido bórico $B(OH)_3$
Éter etílico $C_2H_{10}O$
Agua destilada
Recursos tecnológicos
Computador
Multímetro
Termocuplas tipo K

2.2. Métodos

2.2.1. Construcción de curvas de congelación de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) a partir de la variación de temperatura con el tiempo mediante registradores de temperatura

2.2.1.1. Obtención y preparación de muestras

La materia prima fue obtenida en el Mercado Central de Ambato. Una vez que se obtuvo el atún (*Thunnus albacares*) y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) se realizó un proceso de limpieza y clasificación de las muestras por dimensiones. Las muestras de atún fueron fileteadas en forma de placas con el fin de obtener muestras del mismo peso y dimensión. Posteriormente se evaluó la geometría de cada una de las matrices, teniendo como resultado

que el atún presentó una geometría de placa y el brócoli una geometría irregular que posteriormente se la adaptó a la de una esfera, cuyas dimensiones se muestran en la **Tabla 4** a continuación:

Tabla 4

Dimensiones de las muestras de Atún (Thunnus albacares) y Brócoli (Brassica oleracea var. italica).

Atún		
Tipo de Flujo	Horizontal	Vertical
Largo (cm)	4.67	4.01
Ancho (cm)	2.35	3.20
Espesor (cm)	1.22	0.97
Peso (g)	11.79	12.91
Brócoli		
Tipo de Flujo	Horizontal	Vertical
Tallo (cm)	5.22	5.22
Florete (cm)	5.93	5.84
Peso (g)	24.69	17.26

Nota: los valores de las dimensiones tomadas para cada una de las muestras es el resultado del promedio de dos muestras.

2.2.1.2. Caracterización proximal de las muestras

La caracterización proximal de las muestras de brócoli y atún fueron realizadas experimentalmente bajo los métodos analíticos establecidos por la **AOAC International (2023)** en su AOAC 21^a edición. Se utilizó el método (1934.01) para la determinación del contenido de humedad, el método de extracto etéreo 2003.06 para la extracción de grasa , además se usó el método (923.03) para la determinación de la cantidad de cenizas. Para la proteína se utilizó el método Kjeldhal (2001.11), este procedimiento se lo realizó en el Laboratorio de Control y Análisis de Alimentos (LACONAL) de la FCIAB – UTA.

2.2.1.3. Preparación del equipo IQF

Para la preparación de equipo IQF (Dártico, DIOFLUI-361, Cali, Colombia) se siguió el siguiente proceso descrito por **Espinoza (2021)**:

1. Conexión el equipo a la fuente de energía
2. Encendido el equipo
3. Verificación de voltaje
4. Configuración de las condiciones del flujo de aire.
 - a. Medición de la velocidad del flujo de aire.
 - b. Medición de la temperatura del flujo de aire.

Una vez configurado, el equipo estuvo listo para su uso.

2.2.1.4. Adecuación para el proceso de congelación en el equipo IQF

El proceso de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) se llevó a cabo utilizando un equipo IQF, siguiendo el procedimiento de puesta en marcha recomendado por **Espinoza (2021)** para garantizar un adecuado acondicionamiento del sistema IQF la temperatura del aire de enfriamiento fue de -40°C.

Una vez colocadas las muestras, se utilizó un anemómetro (SPER Scientific, 840032, Scottsdale, Arizona, Estados Unidos) con el fin de medir la velocidad del flujo de aire dentro del túnel, esto con el fin de calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección h , utilizando las siguientes fórmulas:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor – $W/m^2 K$

Nu : Número de Nusselt

L : Longitud – m

k : Conductividad térmica del fluido – $W/m K$

Finalmente, se colocó termopares en el centro de cada una de las muestras, con los cuales se

registró la temperatura del centro térmico de las mismas. Los termopares permitieron monitorear las muestras hasta que estas logren alcanzar la temperatura adecuada, que en este caso fue de -10°C (Galarce et al., 2024).

2.2.1.5. Obtención experimental de la variación de temperatura en función del tiempo

El registro de la variación de temperatura fue realizado mediante termopares tipo K colocados dentro de la muestra en el centro geométrico, o también llamado centro térmico. Los termopares fueron conectados a un multímetro digital que permitió el registro de los datos (Fluke, 189, Everett, Washington, EE. UU.).

El registro de temperatura se llevó a cabo hasta que el centro térmico alcance una temperatura de -10°C , que se consideró como finalizado el proceso de congelación. Posteriormente las medidas realizadas por el multímetro se almacenaron en la memoria interna del equipo para que por medio del software *Fluke View Forms FVF®* sean descargadas y analizadas (Fluke, 2000).

Este proceso fue replicado para los dos tipos de flujo disponibles en el equipo; el primero un, flujo horizontal de izquierda a derecha y el segundo; vertical de abajo hacia arriba.

2.2.1.6. Construcción de las curvas de congelación de atún y brócoli

Una vez obtenidos los datos, se elaboraron las curvas de congelación, para esto se consideró al tiempo como variable independiente y temperatura como variable dependiente, estas curvas fueron realizadas en el software Python. Una vez obtenidas las curvas de congelamiento, se realizó un análisis de la variación de la temperatura de cada una de las matrices y cómo afecta el paso de tiempo en la disminución de la temperatura en el centro térmico de las muestras.

2.2.2. Aplicación de modelos matemáticos referenciales para la predicción del tiempo de congelación de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).

2.2.2.1. Predicción matemática del tiempo de congelación

Inicialmente mediante el modelo de Choi & Okos **Choi (1986)**, se calculó las propiedades térmicas de las muestras considerando la temperatura inicial de estas y una temperatura final de -10°C . Entre los valores obtenidos se encuentra la densidad, la conductividad térmica, el calor específico, debido a que estos valores son necesarios para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección h , así como para el cálculo del tiempo de congelación.

Posteriormente se procedió al uso de modelos matemáticos, disponibles en la **Tabla 1**. Los modelos matemáticos de Nagaoka, Pham y Plank, se adaptaron a características geométricas tanto del atún (placa) como del brócoli (esfera), esta última, debido a que permite facilitar los cálculos de transferencia de calor sin que existan diferencias significativas del comportamiento térmico real del vegetal.

Estos valores permitieron calcular el tiempo teórico de congelación para cada una de las muestras utilizadas.

2.2.3. Comparación de los tiempos de congelación experimentales de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) con los tiempos calculados por diferentes modelos matemáticos teóricos

2.2.3.1. Análisis Estadístico

Los tiempos de congelación fueron realizados por duplicado, tanto teórica como experimentalmente, con el fin de compararlos mediante el análisis de varianza de una vía (*One-way* ANOVA). Este proceso permitió determinar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes procesos empleados para la estimación de las medias de tiempos de congelación con un nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$). Finalmente, siendo analizado mediante la prueba de Tukey que confirma la existencia de diferencias significativas.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y discusión de resultados

3.1.1. Construcción de curvas de congelación de atún (*Thunnus albacares*), y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) a partir de la variación de la temperatura con el tiempo, mediante registradores de temperatura.

Las **Figuras 4 y 5**, muestran las curvas de congelación que describen el comportamiento de cada una de las muestras dependiendo de la dirección de flujo de aire a la que fue sometida.

La **Figura 4** evidencia el comportamiento térmico de las muestra durante el proceso de congelación cuando están sometidas al flujo de aire horizontal. Esta figura permite observar las tres etapas de congelación descritas por **Dincer (2003)**. En primer lugar, se observa el descenso de temperatura desde los 18°C hasta un aproximado de 0°C. Esta primera etapa corresponde a la fase de preenfriamiento, donde se muestra el descenso de temperatura sin que el agua contenida en el alimento cambie de fase. Además, se puede observar que la velocidad de enfriamiento es similar para ambas muestras, obteniendo un valor de aproximadamente $v = 3.26 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Esto se debe a que si observamos la **Tabla 2**, la variación de propiedades termofísicas desde aproximadamente 19°C hasta 0°C es mínima y posee valores similares de densidad, calor específico, difusividad y conductividad térmicas para ambas muestras, por lo tanto, la velocidad y tiempo de congelamiento, en esta fase, es similar para las dos muestras.

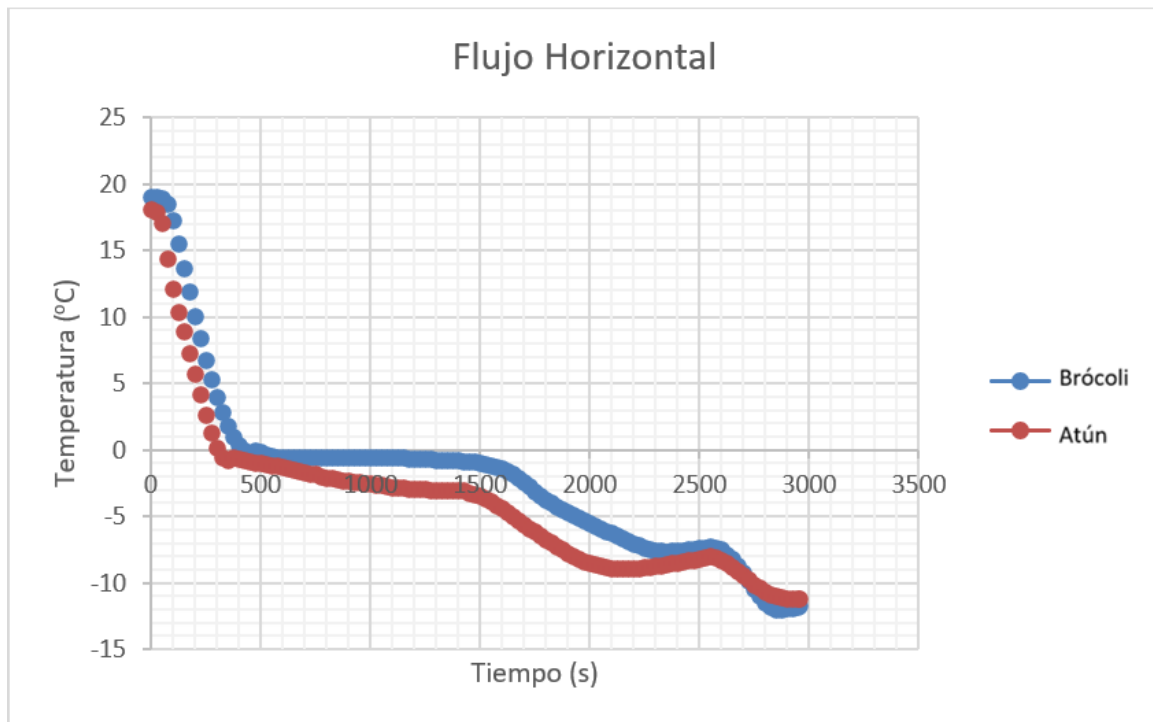
Posteriormente, la curva expone el cambio de fase que se produce, dentro de las muestras. En esta etapa comienza la solidificación rápida del contenido de agua de las muestras. Así mismo, comienzan a diferenciarse las tendencias de las curvas debido a que las propiedades termofísicas varían dependiendo del contenido proximal que tiene cada una, como se muestra en la **Tabla 2**. Además de las propiedades termofísicas, la forma característica de las muestras afecta al coeficiente h provocando así la diferencia de tiempos de congelación, evidenciando que el atún, al tener una forma más compacta y homogénea, la velocidad de congelamiento del atún será mayor que la muestra de brócoli.

En cuanto a la muestra de atún sometida a flujo horizontal (**Tabla 5**) el tiempo experimental para alcanzar una temperatura de -10°C en el centro térmico, fue de 45 minutos, para una muestra de longitud $L = 0.0467\text{ m}$. Además, se consideró una dirección de flujo de aire en específico, siendo este de manera horizontal (de izquierda a derecha) (**Pham et al., 2023**). La muestra de atún contaba con las siguientes experimentales: Temperatura inicial $T_i = 18.5^{\circ}\text{C}$, temperatura de inicio de congelación $T_c = -2.2^{\circ}\text{C}$ (**ASHRAE [American Society of Heating and Air Conditioning], 2002**).

De igual manera, para el brócoli las condiciones iniciales fueron similares $T_i = 19.4^{\circ}\text{C}$, $T_c = -1^{\circ}\text{C}$ (**ASHRAE, 2002**) y una longitud $L = 0.0593\text{ m}$ el tiempo de experimental para alcanzar los -10°C fue el mismo. No obstante esto no evidencia igualdad en comportamiento térmico debido a que las propiedades térmicas, las propiedades proximales y la geometría son diferentes (**Jeremiah, 2019**). Según mencionan **Sutariya & Sunkesula (2020)** la similitud de tiempos de congelación puede atribuirse al alto contenido de agua en ambas muestra, que contienen una conductividad térmica comparable (Agua= $0.6 \frac{\text{W}}{\text{m}}^{\circ}\text{C}$ y hielo = $2.2 \frac{\text{W}}{\text{m}}^{\circ}\text{C}$), lo que influye significativamente la transferencia de calor en cada etapa del proceso de congelación. De igual manera, la longitud característica similar (**Tabla 4**), además de que las condiciones de aire a las que están sometidas son las mismas, pueden ocasionar una convergencia de efectos compensatorios.

Figura 4

Curva de congelación del brócoli (Brassica oleracea var. italica) y atún (Thunnus albacares) hasta -10°C sometido a flujo de aire horizontal.



Nota: la Figura muestra la evolución de la temperatura respecto al tiempo de una muestra de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) en un equipo IQF cuya dirección de flujo de aire es horizontal (izquierda a derecha).

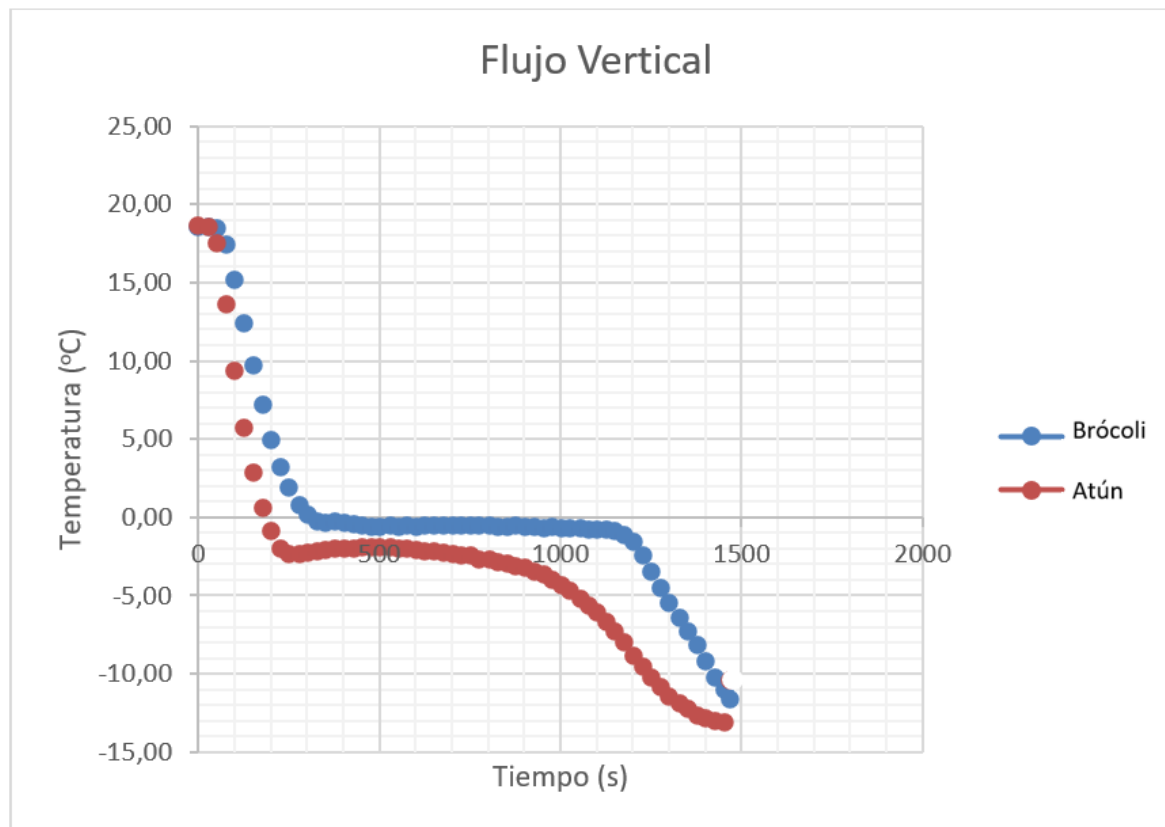
Como se muestra en la **Figura 5**, los valores de las propiedades termofísicas actúan de la misma manera que en el caso anterior, sin embargo, la superficie de contacto de la muestra de atún es mayor, como se muestra en la **Tabla 4**, por lo tanto, la transferencia de calor aumenta ocasionando que el tiempo de congelación disminuya de manera considerable en la primera etapa de congelación. Para la segunda etapa, el cambio de fase, se observa una meseta térmica cercana a los -2°C . En esta etapa el agua libre de las muestras comienza a solidificarse. En el caso del atún la meseta es más rápida *e irregular*, a diferencia del brócoli que presenta una meseta más prolongada y *uniforme*.

Finalmente, se muestra que el atún presenta una tendencia irregular durante la fase final del congelamiento, mientras que el brócoli muestra una tendencia más uniforme y estable. Esta diferencia puede ser ocasionadas por las características estructurales de cada alimento. En el caso del brócoli, su alto contenido de humedad y su baja concentración de solutos favorecen la transferencia de calor, lo que evidencia su comportamiento regular durante el proceso.

La evaluación realizada, respecto a la dirección del flujo permite determinar que el flujo de aire vertical aumenta la eficiencia del congelamiento al ofrecer una mayor tasa de transferencia de calor, lo que se traduce en tiempos de congelación menores para alcanzar la temperatura de -10°C en el centro térmico de las muestras. No obstante, se debe tener en cuenta que tanto la conductividad térmica como el contenido de agua de las muestras influye en la dinámica de los procesos de congelación.

Figura 5

Curva de congelación del brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) y atún (*Thunnus albacares*) hasta -10°C sometido a flujo de aire vertical.



Nota: la Figura muestra la evolución de la temperatura respecto al tiempo de una muestra de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) en un equipo IQF cuya dirección de flujo de aire es vertical (de abajo hacia arriba).

Por otro lado, si se observa la **Figura 6**, se puede evidenciar de mejor manera la diferencia de utilizar diferentes direcciones de flujo de aire en el equipo IQF. En cuanto a la muestra

de atún se puede observar que, el tiempo de congelación es menor (20 minutos) en el flujo vertical en comparación del flujo horizontal (45 minutos). Esto evidencia una disminución notable del tiempo para alcanzar la temperatura de -10°C de las muestras. Ya que al variar la dirección del flujo, varía también la superficie de contacto y por consecuencia la longitud característica para estos casos fue de $L = 0.0097\text{ m}$.

Al variar la orientación la superficie de contacto entre el aire y el atún aumenta, lo que implica una mayor eficiencia térmica reduciendo considerablemente la distancia por la cual debe ser conducido el calor. Esta diferencia, puede explicarse debido a que el coeficiente de transferencia de calor h para el atún pasó de $50.68\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $107.62\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Estos valores del coeficiente h calculados, permiten demostrar que la eficiencia del proceso de congelación en el flujo vertical es más eficiente que el horizontal, por lo tanto, el cambio de fase y la fase de congelación serán más cortos. Sin embargo, en comparación al flujo vertical, el flujo horizontal presenta un cambio de fase más uniforme aunque más extendida.

Por otra parte, el comportamiento térmico brócoli (**Figura 7**), cumple una tendencia similar a la del atún, con la diferencia de que presenta una fase de congelación más plana y uniforme, lo que indica una transición más constante durante el cambio de fase. Así mismo, la influencia del flujo vertical es más eficiente que la del flujo horizontal. Aunque los valores de h son similares para ambas direcciones ($44.97\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ horizontal y $43.86\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ vertical), el tiempo total requerido para alcanzar la temperatura deseada (-10°C) fue de 24 minutos, casi la mitad del tiempo observado con flujo horizontal (45 minutos). Esta diferencia podría atribuirse al alto contenido de agua presente en el brócoli, así como a su menor longitud característica, facilitará la eficiencia en la transferencia de calor.

Figura 6

Curvas de congelación de la muestra de atún (Thunnus albacares) a diferente dirección de flujo de aire

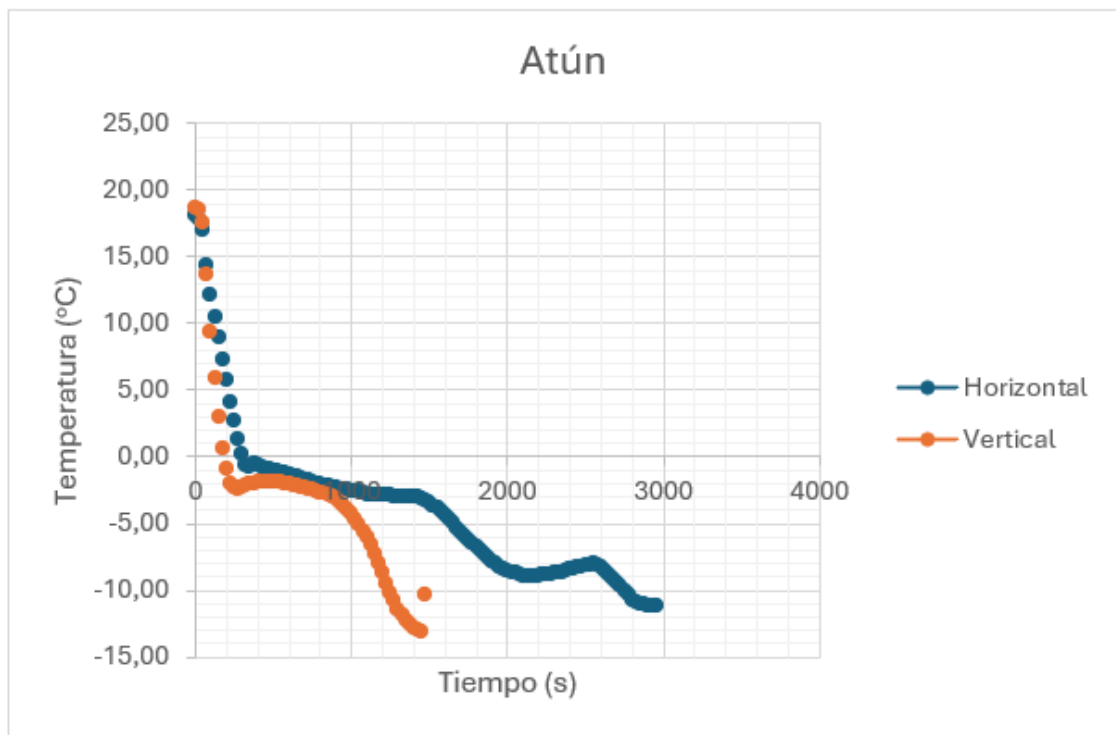
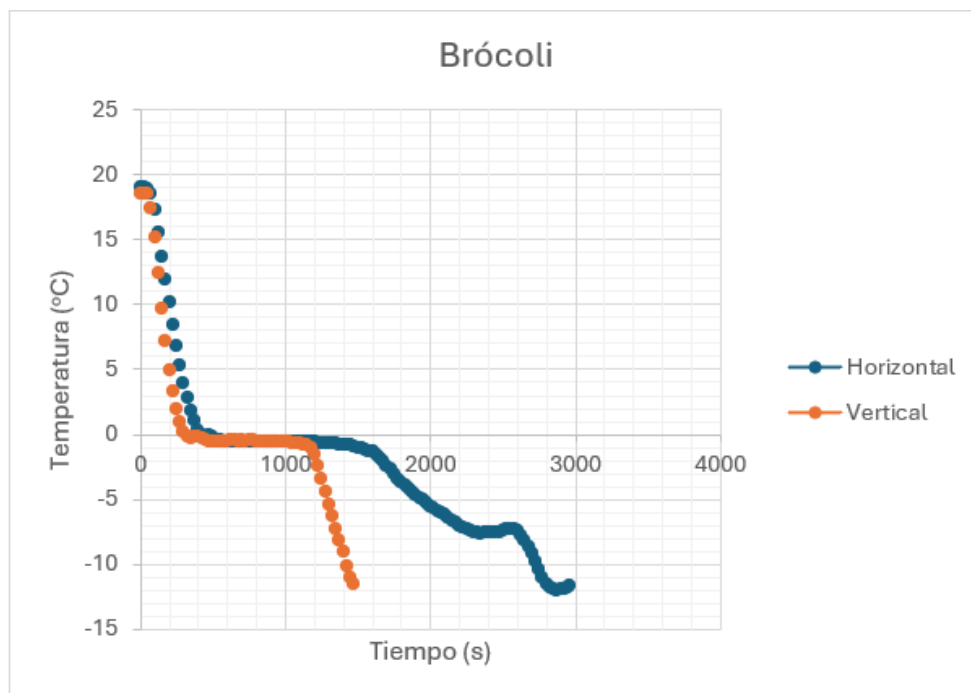


Figura 7

*Curvas de congelación de muestras de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) a diferente dirección de flujo de aire*



Estos resultados evidencian que tanto la composición proximal, como las propiedades termofísicas y la geometría del alimento, influyen significativamente en la velocidad del proceso de congelación.

3.1.2. Aplicación de modelos matemáticos referenciales para la predicción del tiempo de congelación del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*).

Uno de los puntos focales de la investigación se basó en el cálculo y predicción del tiempo de congelación de las muestras de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) mediante la utilización de modelos matemáticos clásicos. Estos métodos, detallados en la **Tabla 1**, permiten analizar de manera teórica, cuál es el tiempo para que el centro térmico de las muestras de atún y brócoli alcancen la temperatura deseada de -10°C. Sin embargo, la aplicación de estos modelos representa un gran reto, esto se debe a que cada una de las ecuaciones presenta una serie de supuestos que dependen de la compleja composición de las muestras, además que el comportamiento biológico de los materiales biológicos que las conforman es impredecible (**Pham, 2014**).

Por ejemplo, el modelo de Plank evalúa un proceso de congelación a temperatura constante, por lo tanto, constantes térmicas que no varían, lo cual no refleja una experimentación realista (**Góral et al., 2016**). En cuanto a Pham, este modelo sí considera las variaciones de las propiedades térmicas de acuerdo con la temperatura, analizadas dependiendo las etapas de congelación descritas por **Becker & Fricke (1999)**. Por otra parte, el modelo de Nagaoka se plantea como una extensión de Plank, incluyendo variables específicas dependiendo del tipo de alimento, lo que permite mejorar la precisión de los resultados, sin embargo, requiere una caracterización más a fondo de las muestras (**Ray et al., 2024**).

La **Tabla 5** muestra el impacto directo de las propiedades térmicas en el tiempo de congelación, debido a que estas propiedades permiten el cálculo de la conductividad térmica. Cuyo valor es directamente proporcional a la velocidad de transferencia de calor e inversamente proporcional al tiempo de congelación, esto quiere decir que, si el valor de la conductividad aumenta, la velocidad de transferencia aumenta permitiendo que la muestra se congele en menor tiempo (**Fricke & Becker, 2001**).

Otro factor importante que se debe tomar en cuenta es el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h), valor el cual depende de la geometría que poseen las muestras, además de la dirección de fluido utilizado para el proceso de congelación.

Según **Gupta et al. (2014)** el valor del coeficiente de transferencia de calor varía dependiendo de las condiciones en las que se presenta el fluido, estas condiciones, velocidad del flujo, temperatura del flujo, el tipo de movimiento del fluido, además de la longitud de la muestra experimental pueden afectar de manera directa al valor de (h).

Esto se observa al momento de calcular el valor de (h) con las condiciones experimentales usadas. Las condiciones de flujo de aire de velocidad $v = 7.9 \text{ m/s}$ y temperatura $T_a = -40^\circ\text{C}$ dio como resultado un valor de $h = 50.68 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para el atún y de $h = 44.97 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para el brócoli para el flujo horizontal. Para el flujo vertical, la **Tabla 6** muestra que el valor de h aumentó $h = 107.62 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ para el atún, sin embargo, para el brócoli disminuyó teniendo un valor de $h = 43.86 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Esta diferencia se puede explicar netamente a la diferencia de geometría y orientación de las muestras, ya que en el caso del flujo vertical la longitud característica disminuye permitiendo así un mejor intercambio térmico.

De igual manera, la **Tabla 6**, evidencia el comportamiento de las propiedades termofísicas de acuerdo con la temperatura a la que se encuentra la muestra bajo las mismas condiciones del flujo de aire mencionadas anteriormente, sin embargo, al variar la dirección de flujo a vertical, la longitud característica del atún disminuye ocasionando que el valor de h aumente de manera significativa.

Esto resalta que a pesar de tener las mismas condiciones de velocidad y temperatura dentro del túnel, la geometría y orientación de la muestra afecta notablemente la eficiencia del proceso de congelación **Gupta et al. (2014)**.

Tabla 5

Condiciones experimentales y calculados bajo las condiciones del flujo de aire en dirección horizontal.

	Alimento		Unidades
	Atún	Brócoli	
Temperatura inicial (T_i)	18.50	19.40	°C
Temperatura inicio de congelamiento (T_f)	-2.20	-1	°C
Temperatura final congelación (T_c)	-10	-10	°C
Longitud/Diámetro (a)	0.01	0.06	m
Densidad (sin congelar) (ρ_u)	1057.14	1047.38	kg/m^3
Calor específico (sin congelar) (C_u)	3.52	3.88	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica (sin congelar) (k_u)	0.51	0.57	$W/m\ ^\circ C$
Densidad (congelado) (ρ_f)	1033.10	968.07	kg/m^3
Calor específico (congelado) (C_f)	2.39	2.11	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica (congelado) (k_f)	1.49	2.01	$W/m\ ^\circ C$
Coeficiente de calor por convección (h)	50.68	44.97	$W/m^2\ ^\circ C$

Nota: los valores calculados y reportados fueron calculados utilizando el valor promedio entre dos replicas independientes experimentales.

Tabla 6

Condiciones experimentales y calculados bajo las condiciones del flujo de aire en dirección vertical.

	Alimento		Unidades
	Atún	Brócoli	
Temperatura inicial (T_i)	18.80	18.85	°C
Temperatura inicio de congelamiento (T_f)	-2.20	-1	°C
Temperatura final congelación (T_c)	-10	-10	°C
Longitud/Diámetro (a)	0.01	0.06	m

Densidad (sin congelar) (ρ_u)	1057.09	1047.47	kg/m^3
Calor específico (sin congelar) (C_u)	3.52	3.88	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica (sin congelar) (k_u)	0.51	0.57	$W/m\ ^\circ C$
Densidad (congelado) (ρ_f)	1033.10	968.07	kg/m^3
Calor específico (congelado) (C_f)	2.39	2.11	$kJ/kg\ ^\circ C$
Conductividad térmica (congelado) (k_f)	1.49	2.01	$W/m\ ^\circ C$
Coefficiente de calor por convección (h)	107.62	43.86	$W/m^2\ ^\circ C$

Nota: los valores calculados y reportados fueron calculados utilizando el valor promedio entre dos replicas independientes experimentales.

Es importante destacar que el proceso de congelación en equipos IQF, se basa únicamente en dos mecanismos de transferencia de calor: convección forzada (uso de flujo de aire) y conducción de calor (dentro del alimento). Debido a esto, la transferencia de calor por radiación es insignificante, ya que la energía emitida es despreciable para procesos en donde la velocidad del flujo es alta (Srisuma et al., 2024).

3.1.3. Comparación los tiempos de congelación experimentales del atún (*Thunnus albacares*), y el brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), con los tiempos calculados por diferentes modelos matemáticos teóricos.

La **Tabla 7**, muestra un resumen de los tiempos de congelación calculados y experimentales para las muestras de atún, mediante los modelos matemáticos Nagaoka, Pham y Plank, tanto para el flujo horizontal como vertical. Se observa que existe un margen de error significativo entre los resultados, especialmente en la comparación de Plank y Pham.

Becker & Fricke (1999) mencionan que la ecuación de Plank, utiliza valores de las propiedades termofísicas en dos puntos en específico: inicio de la experimentación ($T_i \approx 20^\circ C$) y en el punto final del proceso de congelación, en este caso ($-10^\circ C$) además considera la geometría de la muestra, por lo tanto, sobreestima al experimental en un 25.18% mientras que el modelo de Pham lo sobreestima en un 421.64%. Por otro lado, el modelo de Nagaoka

subestima el tiempo de congelación en un 4267%. En cuanto al flujo vertical, el modelo de Pham presenta una diferencia tan solo de -13.40%, lo que indica una mejor aproximación al analizar la muestra con la segmentación del proceso en fases térmicamente variadas como lo mencionó **Dincer (2003)**.

Tabla 7

Tiempo de congelación del atún (Thunnus albacares).

Método	Atún (Flujo Horizontal) (min)	Diferencia con el tiempo experimental (%)	Atún (Flujo vertical) (min)	Diferencia con el tiempo experimental (%)
Experimental	45		20	
Nagaoka	25.80	42.67	13.51	32.45
Pham	234.74	421.64	17.32	13.40
Plank	56.33	25.17	5.51	72.45

De igual manera la **Tabla 8**, muestra la deferencia porcentual de los valores calculados mediante los modelos matemáticos para las muestras de brócoli. En este caso el modelo de Nagaoka muestra el valor más próximo al valor experimental, tanto en el flujo horizontal (-29.44%) como en flujo vertical (+31.63%). Sin embargo, el modelo de Pham vuelve a sobreestimar el tiempo de congelación, en especial en el flujo vertical (+300.04%). Estos resultados permiten evidenciar que la precisión depende netamente de la forma de la muestra y del ajuste de las propiedades específicas para cada tipo de alimento (**Pham, 2014**).

Tabla 8

Tiempo de congelación del brócoli (Brassica oleracea var. italica).

Método	Brócoli (Flujo Horizontal) (min)	Diferencia tiempo experimental (%)	Brócoli (Flujo vertical) (min)	Diferencia tiempo experimental (%)
Experimental	45		24	

Nagaoka	31.75	29.44	31.59	31.63
Pham	105.15	133.67	96.01	300.04
Plank	35.81	20.42	36.16	50.67

La diferencia entre la predicción de tiempo de congelación experimental y teórica puede asociarse a que las propiedades termofísicas dependen de la temperatura, o también podría deberse a la falta de homogeneidad del flujo de aire dentro del equipo IQF, esto quiere decir que, una vez colocadas las muestras dentro de este se pueden generar espacios en donde el flujo de aire impacte con mayor intensidad de enfriamiento ocasionando una alteración del coeficiente h en cada punto.

Debido a esto, el análisis de varianza evidencia que existen diferencias estadísticamente significativas en la muestra de brócoli, como se observa se observa el valor de la probabilidad ($p = 0.0029$) inferior al nivel de significancia de 0.05 (**Anexo 6**). Esto demuestra, que al menos uno de los tiempos presenta un comportamiento distinto, por lo tanto, es necesario la aplicación de la prueba Tukey.

La prueba Tukey (**Anexo 7**) evidencia que existen diferencias significativas en todas las comparaciones realizadas. Esto puede estar asociado a factores de posición de muestras, orientación de flujo o las propiedades termofísicas y características geométricas de las muestras.

Estos resultados evidencian la necesidad del control preciso de estas variables en procesos de congelación en IQF debido a que una pequeña variación en las condiciones del proceso puede generar diferencias significativas en los tiempos de congelación.

CAPÍTULO 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones

- Se logró construir las curvas de congelación para cada una de las muestras de atún (*Thunnus albacares*) y de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*), de tal manera que permiten observar la variación de temperatura respecto al tiempo, siendo clave la identificación de las diferentes fases de congelación que existen. Además, gracias a la construcción de las curvas de congelación se logró identificar la diferencia que existe al momento de usar flujos de aire en dirección vertical y horizontal, dando como resultado que la utilización de flujo vertical permite llegar a la temperatura deseada de -10°C en menor tiempo 20 minutos (atún) y 24 minutos (Brócoli), a comparación del flujo horizontal que tomó 45 minutos para ambas muestras. Estos valores nos permiten recopilar datos del proceso de congelación mediante el uso del equipo IQF.
- Mediante valores de datos de composición proximal se calcularon las propiedades termofísicas permitiendo así calcular y predecir los tiempos de congelación de las muestras de atún (*Thunnus albacares*) y brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) utilizando los modelos matemáticos como; Nagaoka, Plank y Pham. Dichos tiempos calculados, mostraron diferencias tanto en el atún como en el brócoli. Esto se debe a que cada uno de los modelos matemáticos propuestos usan diferentes tipos de variables, haciendo énfasis en las propiedades térmicas y en la geometría de la muestra, siendo este último un factor clave para la obtención de un tiempo de congelación real y aproximado al tiempo de congelación ideal, dando como resultado al método de Pham como el que proporciona menor porcentaje de error.
- Finalmente, se comparó los valores obtenidos tanto experimental como los valores calculados teóricamente. Esta comparación dio como resultado un alto porcentaje de error entre los valores calculados teóricamente y los valores obtenidos experimentalmente. Sin embargo, al realizar un análisis de varianza (ANOVA *one way*) el resultado dio que no existen diferencias significativas para las muestras de atún, tanto para el flujo vertical como horizontal, pero para las muestras de brócoli si se evidencia diferencias

significativas.

4.2. Recomendaciones

- Registrar los valores de velocidad y temperatura de flujo de aire equipo IQF una vez que este haya llegado a la temperatura deseada.
- Utilizar muestras dimensionalmente similares.

Bibliografía

- Alhamdan, A., Hassan, B., Alkahtani, H., Abdelkarim, D., & Younis, M. (2018). Freezing of fresh Barhi dates for quality preservation during frozen storage. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 25(8), 1552–1561. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.02.003>
- Alvis, A., González, A., & Arrázola, G. (2015). Efecto del recubrimiento comestible en las propiedades de trozos de batata (*Ipomoea Batatas* Lam) fritos por inmersión. Parte 2: Propiedades termofísicas y de transporte. *Informacion Tecnologica*, 26(1), 103–116. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000100012>
- American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2002). *ASHRAE Handbook: Thermal Properties of Foods*. <https://xp20.ashrae.org/book/hbref.htm>
- AOAC International. (2023). *Official Methods of Analysis of AOAC International* (G. W. Latimer Jr., Ed.; 21st ed.). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001>
- Barbosa, G., Altunakar, B., & Mejía, D. (2005). Freezing of fruits and vegetables: an agribusiness alternative for rural and semi-rural areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://ucanr.edu/datastoreFiles/234-2087.pdf>
- BCE. (2024). Boletín analítico trimestral Comercio Exterior: Cuarto trimestre de 2024. www.bce.ec
- Becker, B. R., & Fricke, B. A. (1999). Freezing times of regularly shaped food items. https://b.web.umkc.edu/beckerb/publications/journals/freezing_reg.pdf
- Bilbao, C., Sinrod, A., Powell, M. J., Dao, L., Takeoka, G., Williams, T., Wood, D., Ukpai, G., Aruda, J., Bridges, D. F., Wu, V. C. H., Rubinsky, B., & McHugh, T. (2019). Preservation of sweet cherry by isochoric (constant volume) freezing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 52, 108–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.10.016>
- Cao, E. (2024). *Transferencia de calor en ingeniería de procesos* (E. Cao, Ed.; Fifth). https://www.svsconsultores.com.ar/assets/files/Transferencia_de_Calor_5taEd-Cao.pdf
- Cerros, E. (2011). *Conservación de alimentos por frío*. https://fusades.org/publicaciones/conservacion_alimentos_frio.pdf
- Chaves, J., & Acosta, O. (2023). Isochoric freezing: advantages and research opportunities

- in the food industry. *Agronomía Mesoamericana*, 34(3), 52879.
<https://doi.org/10.15517/am.2023.52879>
- Choi, Y. H. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal conductivity and thermal diffusivity of some food components. *Korean J. Food Sci. Technol*, 18.
- Dincer, I. (2003). Refrigeration systems and applications: Vol. I (pp. 503–504). Wiley.
<https://research-solution.com/uplode/books/book-56417.pdf>
- Dincer, I. (2017). Food Freezing. In *Refrigeration Systems and Applications* (pp. 573–630).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781119230793.ch9>
- Emam, M. A., Leibrecht, M., & Chen, T. (2023). The Impact of a “National green export review” on competitiveness: Empirical evidence for Ecuador’s fish exports. *Agriculture (Switzerland)*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/agriculture13010062>
- Espinoza, C. (2021). Sistema de monitoreo de temperatura y tiempo de congelación para la estación IQF de lecho fluidizado DIOFLUI-361 del Laboratorio de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato. [Universidad Técnica de Ambato]. In 2021.
<https://repositorio.espe.edu.ec/items/55ac1e92-a7f0-4eff-8414-3e21dfb05016>
- Falzon, A., & Charter, B. (2023). Thunnus albacares. Ficha de pez.
<https://www.fishipedia.es/pez/thunnus-albacares>
- FAO. (2022). World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022. In *World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2022*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc2211en>
- Fellows, P. J. (2009). Heat processing. In P. J. Fellows (Ed.), *Food Processing Technology* (Third Edition) (pp. 339–366). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845696344.3.339>
- Fluke. (2000). Model 187 & 189 True RMS Multimeter. <http://www.fluke.com>.
- FPS. (2022). Congeladores IQF. https://justin-lai.squarespace.com/s/FPS_IQF_Brochure_Spanish_Updated_20221221_For-Web.pdf
- Fricke, B., & Becker, B. (2001). Evaluation of thermophysical property models for foods. *HVAC&R Research*, 7, 311–330. <https://doi.org/10.1080/10789669.2001.10391278>
- Fukuma, Y., Yamane, A., Itoh, T., Tsukamasa, Y., & Ando, M. (2012). Application of supercooling to long-term storage of fish meat. *Fisheries Science*, 78(2), 451–461.
<https://doi.org/10.1007/s12562-011-0460-6>
- Galarce, F., Rivera, D., Pacheco, D., Caiazzo, A., & Castillo, E. (2024). A fast food-freezing temperature estimation framework using optimally located sensors.

- <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2025.110374>
- Gallegos, D., & Piguave, S. (2019). Políticas comerciales y exportaciones agrícolas del Ecuador. Periodo 2010 - 2016. Quipukamayoc, 27(53), 25–31. <https://doi.org/10.15381/quipu.v27i53.15982>
- Gómez, L., & Medina, J. (2024). Importancia de la ultracongelación en el sector de alimentos enfocados en los procesos productivos [Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/9561/1/34497-2024-I-MBA.pdf>
- Góral, D., Kluza, F., Spiess, W. E. L., & Kozłowicz, K. (2016). Review of thawing time prediction models. Food Technol. Biotechnol, 54(1), 3–12. <https://doi.org/10.17113/ft>
- Gupta, M., Arora, N., Kumar, R., Kumar, S., & Dilbaghi, N. (2014). A comprehensive review of experimental investigations of forced convective heat transfer characteristics for various nanofluids. International Journal of Mechanical and Materials Engineering, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0011-x>
- Hoffmann, T. G., Meinert, C., Ormelez, F., Campani, M., Bertoli, S. L., Ender, L., & de Souza, C. K. (2023). Fresh food shelf-life improvement by humidity regulation in domestic refrigeration. Procedia Computer Science, 217, 826–834. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.279>
- Incropera, F., Dewwit, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (S. Dumas, Ed.; Seventh). John Wiley & Sons.
- James, S. J., & James, C. (2014). Chilling and Freezing of Foods. In Food Processing (pp. 79–105). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch5>
- Jeremiah, L. (2019). Freezing Effects on Food Quality (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203755495>
- Kamiloglu, S. (2019). Effect of different freezing methods on the bioaccessibility of strawberry polyphenols. International Journal of Food Science and Technology, 54(8), 2652–2660. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14249>
- Kim, J., Seo, J.-K., Kim, H.-W., & Kim, Y. H. B. (2023). Combined impacts of initial freezing rate and thawing/cooking conditions on physicochemical and textural properties of pork patties. Meat and Muscle Biology, 7(1). <https://doi.org/10.22175/mmb.16190>
- Li, X.-Y., Yang, X.-L., Gai, R.-N., Dong, Q.-X., & Li, L. (2022). Study of the dynamic characteristics of the food freezing process using a cryogenic immersion freezing tank.

- Food Science and Technology, 42. <https://doi.org/10.1590/fst.19822>
- MAG. (2024, June 22). Comercio exterior - Productos agropecuarios. <https://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/comext-productos>
- Mascheroni, R., & Calvelo, A. (1982). A Simplified Model for Freezing Time Calculations in Foods. *Journal of Food Science*, 47(4), 1201–1207. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb07648.x>
- Miao, H., Lin, J., Zeng, W., Wang, M., Yao, L., & Wang, Q. (2019). Main health-promoting compounds response to long-term freezer storage and different thawing methods in frozen broccoli florets. *Foods*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/foods8090375>
- Nesvadba, P. (2008). Thermal Properties and Ice Crystal Development in Frozen Foods. In *Frozen Food Science and Technology* (pp. 1–25). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781444302325.ch1>
- Otero, L., Bérenfere, G., & Sanz, P. (2013). Últimos avances en tecnologías de congelación de alimentos. *Alimentaria: Revista de Tecnología e Higiene de Los Alimentos*, 440, 82–89. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/89713/1/409392.pdf>
- Otero, L., Rodríguez, A., Perez, M., & Sanz, P. (2016). Effects of magnetic fields on freezing: Application to biological products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 646–667. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12202>
- Parmar, P., Tobin, J. T., O'mahony, J. A., & Shalloo, L. (2019). Effect of temperature variation on raw whole milk density and its impact on milk payment system for Irish Dairy Industry. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25148.49283>
- Peñañiel, R. (2024). La evolución de la exportación de brócoli a la Unión Europea [Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5680>
- Pham, H. T., Do, L. T. K., Chau, T. T., & Nguyen, D. T. (2023). Study on determining the freezing mode of frozen fillet bigeye tuna (*Thunnus obesus*). *Carpathian Journal of Food Science and Technology*, 15(3), 17–25. <https://doi.org/10.34302/CRPJFST/2023.15.3.2>
- Pham, Q. (1986). Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. *International Journal of Food Science and Technology*, 21(2), 209–219. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb00442.x>
- Pham, Q. T. (2006). Modelling heat and mass transfer in frozen foods: a review. *International Journal of Refrigeration*, 29(6), 876–888. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.01.013>

- Pham, T. (2014). Freezing time formulas for foods with low moisture content, low freezing point and for cryogenic freezing. *Journal of Food Engineering*, 127, 85–92. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.12.007>
- Ray, A., Minz, P. S., & Sinha, C. (2024). Framework for Accurate Estimation of Freezing Time and Convective Heat Transfer Coefficient for Freezing of Food product in Domestic Refrigerator: A Numerical and Simulation Modeling approach. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4329563/v1>
- Shafel, T., Lee, S. H., & Jun, S. (2015). Food Preservation Technology at Subzero Temperatures: A Review. *Journal of Biosystems Engineering*, 40(3), 261–270. <https://doi.org/10.5307/jbe.2015.40.3.261>
- Shaikh, N. I., & Prabhu, V. (2007). Mathematical modeling and simulation of cryogenic tunnel freezers. *Journal of Food Engineering*, 80(2), 701–710. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.04.065>
- Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos* (2nd ed.). Editorial Acribia.
- Soares, D., Santos, J., Campos, A., Costa, F., Nunes, T., & Júnior, A. (2012). The freezing time of mangaba (*Hancornia speciosa* Gomes) at Ultrafreezer through mathematical models of Planck and Pham. *Scientia Plena*, 8. <https://scientiaplenua.org.br/sp/article/view/539>
- Srisuma, P., Barbastathis, G., & Braatz, R. D. (2024). Mechanistic modeling and analysis of thermal radiation in conventional, microwave-assisted, and hybrid freeze drying for biopharmaceutical manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125023>
- Sun, D. W. (2005). *Handbook of frozen food processing and packaging* (D. W. Sun, Ed.; Second Edition). CRC Press. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781439836057_A23983154/preview-9781439836057_A23983154.pdf
- Sutariya, S., & Sunkesula, V. (2020). Food Freezing: Emerging Techniques for Improving Quality and Process Efficiency a Comprehensive Review. In *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23035-7>
- Xu, B., Zhang, M., Bhandari, B., Cheng, X., & Sun, J. (2015). Effect of Ultrasound Immersion Freezing on the Quality Attributes and Water Distributions of Wrapped Red Radish. *Food and Bioprocess Technology*, 8, 1366–1376.

<https://doi.org/10.1007/s11947-015-1496-x>

Xu, J., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Adhikari, B. (2017). Recent developments in smart freezing technology applied to fresh foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(13), 2835–2843. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1074158>

Zambrano, S. (2024). Análisis de las exportaciones de enlatados de atún hacia el mercado de España [Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí]. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/6793>

ANEXOS

Anexo 1

Caracterización proximal del atún (Thunnus albacares) y del brócoli (Brassica oleracea var. italica).

	Atún	Brócoli
Componente	%	%
Humedad	71.19	88.14
Proteína	22.35	2.15
Grasa	1.52	0.29
Cenizas	2.59	1.00
Fibra	0	2.3
Carbohidratos	2.35	6.12
Total	100	100

Anexo 2

Medición de velocidad y temperatura del aire dentro del equipo IQF).



Anexo 3

Registro de tiempo y temperatura en equipo IQF con sentido de flujo de aire horizontal



Anexo 4

Registro de tiempo y temperatura en equipo IQF con sentido de flujo de aire vertical



Anexo 5

Análisis de varianza ANOVA de atún (*Thunnus albacares*)

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	14659,00914	3	4886,336379	0,77262223	0,566746545	6,591382116
Dentro de los grupos	25297,41555	4	6324,353888			
Total	39956,42469	7				
					mayor que 0,05	
					rechaza hipótesis	
					no existe diferencias significativas	
					no se hace prueba de tukey	

Anexo 6

Análisis de varianza ANOVA de brócoli (Brassica oleracea var. Italica).

RESUMEN					q = 5,76	
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Experimenta	2	70	35	234,5778	Y1	
Nagaoka	2	63,34	31,67	0,0128	Y2	
Pham	2	201,16	100,58	41,7698	Y3	
Plank	2	72,7	36,35	0,5832	Y4	
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6604,8156	3	2201,6052	31,79860737	0,002995536	6,591382116
Dentro de los grupos	276,9436	4	69,2359			
Total	6881,7592	7				
					menor que 0,05	
					se acepta la hipótesis	
					existe diferencias significativas	
					se hace prueba de tukey	

Anexo 7

Prueba Tukey de la muestra de brócoli (Brassica oleracea var. italica)

PRUEBA TUKEY			
	Diferencia de MEDIAS	HSD	
Y1 - Y2	234,565	33,89	EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS
Y1 - Y3	192,808	33,89	EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS
Y1 - Y4	233,9946	33,89	EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS
Y2 - Y3	41,757	33,89	EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS
Y2 - Y4	0,5704	33,89	NO EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS
Y3 - Y4	41,1866	33,89	EXISTE DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS