



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN
ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA



CARRERA INGENIERÍA EN ALIMENTOS

Efecto de la temperatura y del poder de calentamiento en las propiedades térmicas de melloco amarillo (*Ullucus tuberosus*), zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*), achira (*Canna indica*) y papa china (*Colocasia esculenta*)

Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Trabajo de Titulación parte del Proyecto de investigación “Desarrollo de un prototipo de mezcla farinácea libre de gluten para pastelería, utilizando cultivos andinos tradicionales”, financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato según resolución 0193-CU-P-2018, coordinado por Ing. M.Sc. Diego Manolo Salazar Garcés.

Autor: Karina Marisol Caiza Farinango

Tutor: Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

Ambato - Ecuador

Enero-2020

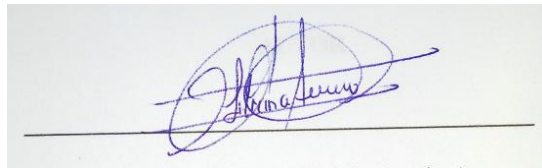
APROBACIÓN DE LA TUTORA

Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

CERTIFICO:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado, y por lo tanto autorizo la presentación de éste, debido a que responde a las normas establecidas en el reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 16 de diciembre del 2019.



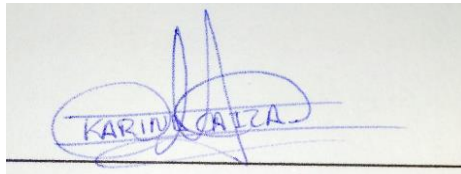
Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos

C.I. 180406708-8

TUTORA

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Karina Marisol Caiza Farinango, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Alimentos, son absolutamente originales, auténticos y personales, a excepción de las citas bibliográficas.

A photograph of a handwritten signature in blue ink on a light-colored surface. The signature is stylized and includes the name 'KARINA CAIZA' written in capital letters across the middle of the signature.

Karina Marisol Caiza Farinango

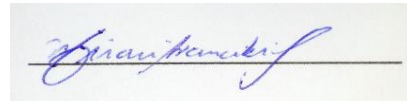
C.I. 1722749742

AUTOR

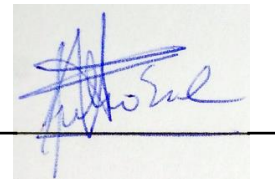
APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos Docentes Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad 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 de Tribunal de Grado



Ing. Mg. Julio César Sosa Cárdenas

C.I. 1716650849



Ing. M.Sc. Daniel Alfonso Cabrera Valle

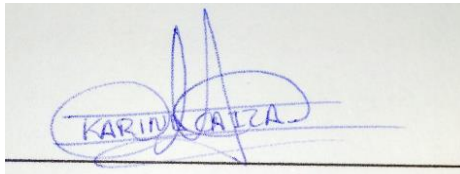
C.I. 1802561595

Ambato, 17 de enero del 2020

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, que haga uso de este 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 trabajo de titulación, con fines de difusión pública; además, apruebo su reproducción dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autora.

A photograph of a handwritten signature in blue ink on a light-colored surface. The signature is stylized and appears to read 'KARINA CAIZA'. Below the signature, the name 'KARINA CAIZA' is printed in a simple, sans-serif font.

Karina Marisol Caiza Farinango

C.I. 172274974-2

AUTOR

DEDICATORIA

A Dios por darme la fuerza y la sabiduría para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres por todo el amor que me han brindado durante toda mi vida y por el apoyo incondicional para poder cumplir mis metas. Para ustedes Jorge Caiza y María Farinango.

A mi hijo Isaías, quien es el motivo principal para seguir adelante, y quien con su amor y ternura me ha dado las fuerzas para enfrentar cualquier adversidad.

A mis hermanos Cristian, Jhonny y Gaby por su apoyo y sus consejos que siempre me motivaron a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

A mis padres por su ejemplo de perseverancia para cumplir los sueños, a mi hijo, por su paciencia y por todo su amor, y a mis hermanos por sus consejos y su apoyo incondicional.

A mis amigos Lorena S., Angélica Z., Abigail A., Francisco G., Katherine A., Maribel C., Eleana M. y Verónica R., con quienes compartimos momentos maravillosos y por enseñarme el verdadero valor de la amistad.

A Wilson L. a quien a pesar de la distancia siempre supo brindarme su apoyo incondicionalmente.

A los docentes de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología por abrirme las puertas y permitirme formarme profesionalmente. Gracias por sus conocimientos y consejos.

A mi tutora Ing. M.Sc. Liliana Patricia Acurio Arcos, por su paciencia y por brindarme la confianza para la elaboración del presente trabajo.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

Portada.....	i
Aprobación de la tutora.....	ii
Declaración de autenticidad.....	iii
Aprobación de los miembros del tribunal de grado.....	iv
Derechos de autor.....	v
Dedicatoria.....	vi
Agradecimiento.....	vii
Índice general de contenidos.....	viii
Índice de figuras.....	x
Índice de tablas.....	xi
Índice de ecuaciones.....	xiii
Índice de anexos.....	xiv
Resumen.....	xv
Abstract.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes investigativos.....	1
1.1.1 Cultivos andinos.....	1
1.1.2 Melloco.....	2
1.1.3 Zanahoria blanca.....	2
1.1.4 Achira.....	2
1.1.5 Papa china.....	3
1.1.6 Propiedades térmicas en alimentos.....	3
1.1.7 Correlación de propiedades térmicas con otras variables.....	5
1.2 Objetivos.....	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
1.3 Hipótesis.....	6
1.3.1 Hipótesis nula (H₀).....	6
1.3.1 Hipótesis alternativa (H_a).....	6
1.4 Señalamiento de variables.....	6

1.4.1 Variable independiente	6
1.4.2 Variable dependiente	6
CAPÍTULO II	7
MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
2.1. Materia prima.....	7
2.2 Métodos	7
2.2.1 Determinación de calor específico.....	7
2.2.1.1 Calibración del calorímetro.....	7
2.2.2 Determinación de conductividad térmica	8
2.2.3 Determinación de difusividad térmica	9
2.2.4 Análisis estadístico.....	10
2.2.5 Correlación entre las propiedades térmicas y la temperatura	10
CAPÍTULO III	11
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
3.1 Calor específico.....	11
3.2 Difusividad térmica	14
3.3 Conductividad térmica	17
3.4. Correlaciones entre propiedades térmicas y temperatura	20
3.4.1. Correlación entre calor específico y temperatura	20
3.4.2. Correlación entre difusividad térmica y la temperatura	20
3.4.3. Correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento	21
CAPÍTULO IV	22
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	22
4.1 Conclusiones	22
4.2 Recomendaciones	23
5. MATERIALES DE REFERENCIA	24
ANEXO A	32
ANEXO A. ANOVAS.....	32
ANEXO B.....	39
Resultados bibliográficos obtenidos mediante ecuaciones de Choi y Okos.....	39
ANEXO C	42
Fotografías	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de un calorímetro para determinación de calor específico por el método de las mezclas.....	9
Figura 2. Esquema del equipo diseñado para la determinación de conductividad térmica.....	10
Figura 3. Esquema del cilindro de acero para medir la difusividad térmica.....	11
Figura 4. Interacción doble Tukey HSD a 95% de tipo de tubérculo y forma de determinación para calor específico.....	33
Figura 5. Interacción doble Tukey HSD a 95% de temperatura y tipo de tubérculo para calor específico.....	33
Figura 6. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para difusividad térmica.....	35
Figura 7. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para difusividad térmica.....	35
Figura 8. Interacción doble de temperatura y tipo de tubérculo para difusividad térmica.....	36
Figura 9. Interacción doble de forma de determinación y poder de calentamiento para conductividad térmica.....	37
Figura 10. Interacción doble de forma de determinación y tipo de tubérculo para conductividad térmica.....	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición nutricional de los tubérculos.....	3
Tabla 2. Calor específico.....	14
Tabla 3. Porcentaje de almidón de los tubérculos andinos en base húmeda	
Tabla 4. Difusividad térmica.....	17
Tabla 5. Conductividad térmica.....	20
Tabla 6. Ecuaciones de correlaciones entre calor específico y temperatura.....	21
Tabla 7. Ecuaciones de correlaciones entre difusividad térmica y temperatura.....	21
Tabla 8. Ecuaciones de correlaciones entre conductividad térmica y temperatura...	22
Tabla 9. Análisis de varianza para calor específico.....	32
Tabla 10. Prueba de Tukey HSD a 95% para calor específico por tipo de tubérculo.	32
Tabla 11. Prueba de Tukey HSD a 95% para calor específico por forma de determinación.....	32
Tabla 12. Pruebas de Tukey HSD a 95% para calor específico por temperatura.....	32
Tabla 13. Análisis de varianza para difusividad térmica.....	34
Tabla 14. Prueba de Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por tipo de tubérculo.....	34
Tabla 15. Prueba de Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por forma de determinación	34
Tabla 16. Prueba de Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por temperatura.....	34
Tabla 17. Análisis de varianza para conductividad térmica	36
Tabla 18. Prueba de Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por tipo de tubérculo.....	36
Tabla 19. Prueba de Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por forma de determinación.....	37
Tabla 20. Prueba de Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por temperatura.....	37
Tabla 21. Calor específico para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos.....	39
Tabla 22. Calor específico para extracto obtenidos por Choi y Okos.....	39
Tabla 23. Difusividad térmica para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos	40

Tabla 24. Difusividad térmica para extracto obtenidos por Choi y Okos.....	40
Tabla 25. Conductividad térmica para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos.....	41
Tabla 26. Conductividad térmica para extractos obtenidos por Choi y Okos.....	41

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Determinación de calor específico.....	8
Ecuación 2. Determinación de conductividad térmica.....	9
Ecuación 3. Determinación de difusividad térmica.....	10

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A.	
Anovas.....	32
ANEXO B.	
Resultados bibliográficos obtenidos mediante ecuaciones de Choi y Okos.....	39
ANEXO C.	
Fotografías.....	42

RESUMEN

Se determinó el calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica de cuatro tubérculos andinos (achira, melloco amarillo, papa china y zanahoria blanca), con el propósito de obtener datos que puedan ser utilizados en el diseño de equipos y en la optimización de procesos. La experimentación se realizó tanto en los tubérculos enteros como de sus extractos, variando las temperaturas (en el caso del calor específico y difusividad térmica) y variando el poder de calentamiento (en el caso de la conductividad térmica).

Se observó que la composición nutricional juega un papel importante en el análisis de calor específico y de difusividad térmica. Sin embargo, en el análisis de conductividad térmica se observa que influyen en la misma medida la estructura fibrosa y la porosidad de las muestras. Por otra parte, se presentan valores inferiores de conductividad térmica a 5 voltios; esta dependencia se debe a que se incrementa el valor de la potencia disipada por la resistencia, y por lo tanto se incrementa el flujo de calor. Finalmente, se observan valores superiores en las tres propiedades térmicas al trabajar con los extractos, debido a que la cantidad de agua presente en estas muestras produce una transferencia de calor convectiva que origina movimiento en el interior del fluido.

Palabras clave: calor específico, conductividad térmica, difusividad térmica, tubérculos andinos.

ABSTRACT

The specific heat, thermal diffusivity and thermal conductivity of four Andean tubers were determined, in order to obtain data that can be used in equipment design and process optimization. The experimentation was carried out in the whole tubers and their extracts, varying the temperatures (in the case of specific heat and thermal diffusivity) and varying the heating power (in the case of thermal conductivity).

It was observed that the nutritional composition plays an important role in the analysis of specific heat and thermal diffusivity. However, in the thermal conductivity the fibrous structure and the porosity of the samples influence more. On the other hand, there are lower values of thermal conductivity at 5 volts; This dependence is due to the fact that the value of the power dissipated by the resistance is increased, and therefore the heat flux is increased. Finally, higher values are observed in the three thermal properties when working with the extracts, because the amount of water present in these samples produces a convective heat transfer that causes movement inside the fluid.

Keywords: specific heat, thermal diffusivity, thermal conductivity, Andean tubers.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

1.1.1 Cultivos andinos

Las raíces y tubérculos andinos (RTA) tienen gran importancia económica, social y nutricional; sin embargo, su producción y consumo en Ecuador mantienen una tendencia decreciente, con excepción de la zanahoria blanca. Según Scheldeman et al. (2001) y Janick (2001), estos cultivos se están perdiendo. De esta problemática nacen proyectos como el denominado “Biodiversidad de las raíces y tubérculos andinos”, mismo que plantea aumentar su competitividad por medio de la determinación de los factores limitantes de la productividad y uso (Espinosa et al., 1997).

En este sentido, uno de los objetivos del Plan Nacional del Buen Vivir es garantizar el derecho humano a la provisión de alimentos sanos, nutritivos y culturalmente apropiados, lo que actualmente se resume dentro del término de Soberanía Alimentaria (Comisión Legislativa y de Participación - Asamblea Nacional de Ecuador, 2009). Dicho régimen de soberanía alimentaria se creó con la idea de fomentar la producción suficiente, la adecuada conservación y promover la comercialización y consumo de alimentos autóctonos, provenientes preferentemente de la micro y mediana producción campesina, respetando los conocimientos y formas de producción tradicionales y ancestrales.

Por otra parte, analizando las tendencias en el diseño de nuevos productos, se observa mayor influencia de alimentos que incorporen materias primas no convencionales y menos artificiales, como es el caso de frutas y cultivos andinos. Por ejemplo, Sánchez Moreno (2018), propone la incorporación de harina de melloco en la elaboración de yogurt, misma que proporciona excelentes características viscosas.

Así mismo, los tubérculos son ampliamente estudiados en la industria alimenticia en busca de aumentar la tolerancia a tratamientos industriales drásticos como esterilización, congelación, entre otros. En este sentido, el almidón de la zanahoria blanca presenta bajo contenido de amilosa (alrededor del 4%), lo que lo hace resistente a condiciones de

refrigeración o congelación, presentando baja o ninguna retrogradación. Esto lo convierte en un potencial sustituto de almidones modificados con bajo o ningún contenido de amilosa (Cobo et al., 2013). En el mismo contexto, el almidón de achira, con un contenido de amilosa de 50.81%, es utilizado como estabilizante, gelificante y espesante en pastas, y se utiliza en la fabricación jarabes de glucosa, dextrosa y fructosa (Pérez et al., 2017).

1.1.2 Melloco

El melloco (*Ullucus tuberosos*), es el segundo tubérculo más consumido en Ecuador, luego de la papa. El contenido de materia seca oscila entre 14 y 20%, compuesta por 4.4 a 15.7% de proteína, 73.5 a 81.1% de carbohidratos, 0.1 a 1.4% de grasa, 2.8 a 4% de ceniza y 3.6 a 5% de fibra cruda. Su composición calórica varía de 377 a 381 cal/100 g de materia seca. Dentro de los minerales, Vimos et al. (1993), reportan el contenido de fósforo, lo que le proporciona una ventaja muy particular en la alimentación humana.

1.1.3 Zanahoria blanca

La zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*), es una de las plantas más antiguas cultivadas en América. Actualmente presenta un incremento en su uso industrial a nivel mundial, debido a que forma parte de alimentos para bebés y sopas instantáneas (Jiménez, 2005); sin embargo, su uso en Ecuador se limita al consumo en fresco o mediante algún tipo de procesamiento artesanal (Mazón et al., 1996). En su composición nutricional destaca el almidón por ser fino y uniforme, acompañado de un aroma propio debido a la presencia de un aceite espeso característico de la planta. Así mismo destaca por su contenido de calcio y fósforo (Palacios et al., 2011).

1.1.4 Achira

La achira (*Canna indica*), puede ser sembrada sola o con cultivos de maíz y arveja, no requiere de fertilizantes si se ha preparado la tierra antes de sembrar. Sus tubérculos contienen valores importantes de almidón (Bonete et al., 2016). Este componente es de fácil digestibilidad debido a que contiene 19.95% de almidón resistente tipo III (ARIII), lo que lo hace apto para la alimentación de niños y personas de la tercera edad, así como para el desarrollo de alimentos funcionales (Loor Toledo, 2008). Además, presenta contenido bajo de grasa y proteína (0.17, 0.56% respectivamente).

1.1.5 Papa china

La papa china (*Colocasia esculenta*) se considera originaria de la región entre India y Malasia. A nivel mundial ocupa el lugar decimocuarto entre los cultivos de hortalizas de primera necesidad. Por otra parte, estudios de microscopía y luz láser muestran que algunas variedades tienen almidones de 1-0.5 μm de diámetro, debido a esta particularidad es rápidamente digerible tanto para el hombre, como para los animales (Caicedo et al., 2014). Presenta un alto contenido de almidón, calcio, magnesio y potasio (Tabla 1).

Tabla 1. Composición nutricional de los tubérculos

	Achira	Papa china	Zanahoria blanca	Meloco
Humedad	82.3	71.9	71.56	86.3
Carbohidratos	15.5	23.8	19.53	11.8
Proteína	0.9	1.7	1.13	0.7
Grasa	0.1	0.8	0.28	0.2
Fibra	0.8	0.6	0.66	0.3
Ceniza	0.9	1.2	1.1	0.6

Fuente: Aldaz Chimborazo (2011), Espín et al. (2004), Loor Toledo (2008), Higuera Rosero y Prado Argoti (2014)

1.1.6 Propiedades térmicas en alimentos

Analizando los procesos industriales de transformación y/o conservación a los que son sometidos los alimentos, se observa que existen propiedades de vital importancia como son: calor específico, difusividad térmica y conductividad térmica, mismas que son necesarias para estimar procesos de calentamiento, refrigeración, congelación, secado e incluso tostado de alimentos (Gordillo Delgado et al., 2009a; Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). Estas propiedades físicas determinan por ejemplo, la capacidad de un alimento para enfriarse o calentarse, así como la velocidad con la que el calor se transmite a través de la unidad de espesor de un material cuando entre sus extremos existe una unidad de gradiente de temperatura, siendo básicamente una medida de su capacidad para conducir el calor ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$) (Zegarra Quevedo, 2014).

Las propiedades térmicas de los alimentos son de considerable importancia en la ingeniería para los procesadores de alimentos, ya que ellas gobiernan los cambios de temperatura en procesos que involucran la transferencia de calor, en procesos tales como calentamiento, secado y congelación (Singh & Heldman, 2009).

El calor específico es una propiedad que se puede determinar mediante el incremento de calor a temperatura constante y utilizando cartas de distribución de temperatura. Otra manera de predecir esta propiedad térmica es mediante la ecuación de Choi y Okos (1986), para lo que previamente se debe conocer el calor específico de cada componente nutricional y realizar una sumatoria (Sweat, 1986). Los alimentos presentan valores de calor específico bajos, por ejemplo almendras frescas presentan valores de 2.65 kJ/(kg×C) (Arrázola, Páez, et al., 2014) y almendras secas de 1.9 a 2.8 kJ/(kg×C) (Bitra et al., 2010).

La conductividad térmica es una propiedad que depende principalmente de la composición y otros factores que afectan el flujo de calor a través del material, tales como porcentaje de espacios vacíos y homogeneidad. Además, es una propiedad necesaria para el cálculo de la velocidad de transferencia de calor durante el calentamiento o enfriamiento (Sweat, 1986). Según Muñoz (2002), para medir la conductividad en sólidos se han desarrollado numerosas técnicas experimentales, muchas de las cuales son válidas para rangos de temperaturas y productos alimenticios específicos.

Estudios demuestran que los alimentos presentan valores de conductividad térmica bajos, por ejemplo acerolas frescas arrojan un valor promedio de 0.598 W/(m×C), determinado mediante análisis de propiedades físico-químicas (Arrázola, Alvis, et al., 2014) y se reportan valores de 0.52, 0.57 y 0.55 W/(m×C) para fresa, melón y tomate frescos, respectivamente (Alvarado, 1996). Según Singh y Heldman (2009), la mayoría de los alimentos con altos contenidos de agua tienen valores de conductividad térmica similares al del agua; es decir, esta propiedad depende del contenido de humedad.

Por otro lado, la conductividad térmica de alimentos secos y porosos presenta influencia por la presencia de aire. Hassan y Ramaswamy (2011), mencionan que la presencia de aditivos, como el alginato de sodio, provocan una disminución significativa en los valores de conductividad térmica, obteniéndose valores de $0.41-0.51 \times 10^{-6}$ W/(m×C) en carne y de $0.53-0.64 \times 10^{-6}$ W/(m×C) en zanahoria, debido principalmente a la disminución del contenido de humedad por la presencia de dichos compuestos.

Finalmente, la difusividad térmica es la magnitud que cuantifica la velocidad con la que se distribuye el calor en un material y no solo depende de la conductividad, sino también de la velocidad a la que la energía puede ser almacenada.

Está asociada con la velocidad de propagación del calor y, por tanto, con el tiempo que el material tarda en alcanzar el equilibrio térmico. El valor de la difusividad térmica de un alimento puede calcularse si se conocen su conductividad térmica, densidad y calor específico (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2005). En alimentos se presentan valores bajos; por ejemplo, pulpa de guanábana presenta un valor promedio de $1.05 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ a 60°C (Ramírez & Jhinm, 2014).

Además, este parámetro de transporte térmico está relacionado con la microestructura y composición química (Gordillo Delgado et al., 2009b). En este sentido, Ramos Huallpartupa (2017) obtuvo valores de difusividad térmica de $4.36 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ para papa nativa en cubos de 0.0125 m^3 , evidenciando que el corte permitió el paso de forma rápida del calor. Mientras que en masa de yuca fermentada (con 74.36%) se observó la influencia de la humedad presentando un valor promedio de $1.31 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Chura & Yubani, 2010).

1.1.7 Correlación de propiedades térmicas con otras variables

Giraldo-Gómez et al. (2010), determinaron que tanto la temperatura como el contenido de agua presentan una influencia directamente proporcional con las propiedades termofísicas en jugos concentrados ($r^2 = 0.974$). Otros autores también demostraron una correlación de estas propiedades con la humedad; por ejemplo en zanahorias (Hassan & Ramaswamy, 2011), en papas (Jara Acuña, 2012), y en yuca fermentada diluida (Chura & Yubani, 2010). Mientras que Ramírez y Jhinm (2014), demostraron la correlación de la difusividad térmica con la temperatura en pulpas de guanábana ($r^2 = 0.989$).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar el efecto de la temperatura y del poder de calentamiento en las propiedades térmicas de melloco amarillo (*Ullucus tuberosus*), zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*), achira (*Canna indica*) y papa china (*Colocasia esculenta*).

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la temperatura en el calor específico de melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china, utilizando el método de Hwang & Hayakawa.

- Evaluar el efecto del poder de calentamiento en la conductividad térmica de melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china, mediante el método de la sonda.
- Evaluar el efecto de la temperatura en la difusividad térmica de melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china, mediante el método de Dickerson.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis nula (H₀)

El tipo de tubérculo, la forma de determinación, la temperatura o el poder de calentamiento no tienen un efecto en las propiedades térmicas: calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica, de melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china.

1.3.1 Hipótesis alternativa (H_a)

El tipo de tubérculo, la forma de determinación, la temperatura o el poder de calentamiento tienen un efecto en las propiedades térmicas: calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica, de melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china.

1.4 Señalamiento de variables

1.4.1 Variable independiente

- Tipo de tubérculo (melloco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china).
- Forma de determinación (entero y extracto).
- Temperatura (calor específico: 8 y 16°C; difusividad térmica: 35 y 60°C).
- Poder de calentamiento (conductividad térmica: 7.5 y 9V).

1.4.2 Variable dependiente

- Calor específico
- Conductividad térmica
- Difusividad térmica

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materia prima

Los tubérculos andinos analizados en este trabajo (mel loco amarillo, zanahoria blanca, achira y papa china) fueron obtenidos en el Mercado Mayorista de la ciudad de Ambato.

2.2 Métodos

2.2.1 Determinación de calor específico

2.2.1.1 Calibración del calorímetro

Se realizó mediante el método de la mezcla propuesto por Hwang y Hayakawa (1979). Para la calibración del calorímetro se colocaron 350 ml de agua fría (8 y 16°C) en el calorímetro, después de alcanzar el equilibrio se registró la temperatura. Posteriormente se colocaron 350 ml de agua al ambiente, y se registró la temperatura una vez que el sistema llegó al equilibrio. Este proceso se realizó por triplicado.

2.2.2. Calor específico de la muestra

Se colocaron 350 ml de agua fría (8 y 16°C) en el calorímetro y se registró la temperatura; seguidamente se colocó la muestra en el calorímetro y se registró la segunda temperatura de equilibrio (calorímetro+agua fría+tubérculo). El valor de la propiedad se halló mediante la ley de la conservación de la energía (Ecuación 1) (Mohsenin, 1980). La determinación se realizó tanto del tubérculo entero como en el extracto, a dos diferentes temperaturas (8 y 16°C) para poder obtener una correlación. Las temperaturas se seleccionaron en base al estudio de Alvarado (1996), quien recomienda utilizar agua a una temperatura menor que la ambiental.

$$c_s = \left[\frac{[(m_c \times c_c) + (m_w \times c_w)](T_e - T_{wi})}{m_s \times (T_{si} - T_e)} \right] \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: m_c masa del calorímetro (kg); m_s masa de la muestra (kg); m_w masa del agua (kg); c_c calor específico del calorímetro (J/kg×°C); c_w calor específico del agua (J/kg×°C); T_e temperatura de equilibrio (°C); T_{si} temperatura inicial de la muestra (°C); T_{wi} temperatura inicial del agua (°C); y c_s calor específico de la muestra (J/kg×°C).

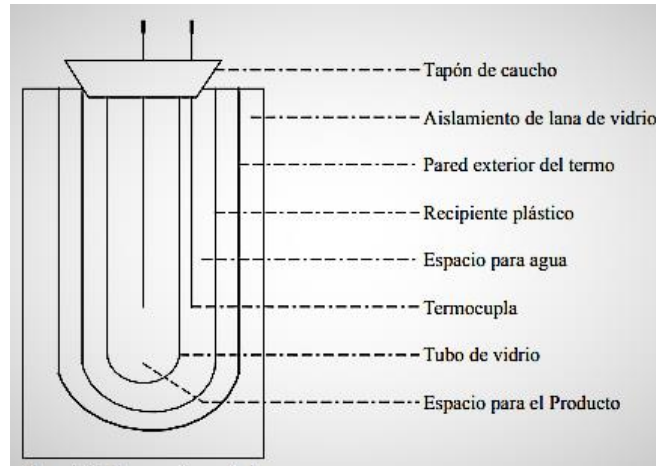


Figura 1. Esquema de un calorímetro para la determinación de calor específico por el método de las mezclas (Alvarado, 1996).

2.2.2 Determinación de conductividad térmica

Para la determinación de la conductividad térmica se utilizó el método propuesto por Sweat (1986). Consiste en una sonda que está diseñada de acero inoxidable y con un termopar tipo T y un hilo de calentamiento. La sonda se colocó en el centro de un cilindro de aluminio cerrado que contenía la muestra (tubérculo entero o extracto). El sistema suministró a la muestra una corriente constante de 7.5 o 9 voltios. Los voltajes fueron establecidos tomando en cuenta lo reportado por Sahin y Sumnu (2006), debido a que dichos valores reducen errores en la determinación de conductividad térmica en este método. El cálculo de la conductividad térmica se realizó utilizando la Ecuación 2.

$$\frac{4\pi\Delta T}{Q} = \frac{1}{k} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde: $\ln(t)$ logaritmo natural del tiempo; ΔT variación de la temperatura entre el alimento y el medio ($^{\circ}\text{C}$) y Q potencia generada por la sonda durante el calentamiento (W/m).

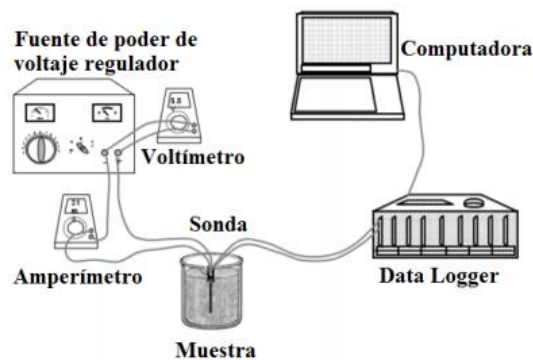


Figura 2. Esquema de la sonda para determinar conductividad térmica (Acurio et al., 2016).

2.2.3 Determinación de difusividad térmica

La determinación de la difusividad térmica se realizó mediante una técnica de transferencia de calor en régimen no estacionario, propuesto por Dickerson (1965). El equipo para realizar los experimentos consistió en una celda cilíndrica de acero (radio interno de 24.75×10^{-3} m y longitud de 248.5×10^{-3} m) completamente cerrada. Para la determinación de la difusividad térmica se llenó la celda cilíndrica con muestra y se cerraron los extremos. En la parte central se introdujo un termómetro tipo aguja procurando que llegue hasta el centro del cilindro. Se registró la temperatura y seguidamente se colocó el cilindro en un baño termostático estabilizado a la temperatura de trabajo. Se realizó el registro de temperaturas a intervalos de un minuto hasta que llegó a una temperatura de equilibrio. La determinación se realizó con el tubérculo entero y el extracto a dos temperaturas de baño diferentes (35 y 65°C), con el objetivo de establecer correlaciones. El cálculo de difusividad se realizó mediante la Ecuación 3.

$$\alpha = \frac{0,398}{\left(\frac{1}{R^2}\right) + \left(\frac{0,427}{b^2}\right)} f \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde: R radio del cilindro (m); b mitad de la altura del cilindro (m), f tiempo requerido para que la sección recta del historial de temperatura atravesase un ciclo logarítmico (s) y α difusividad térmica (m^2/s).

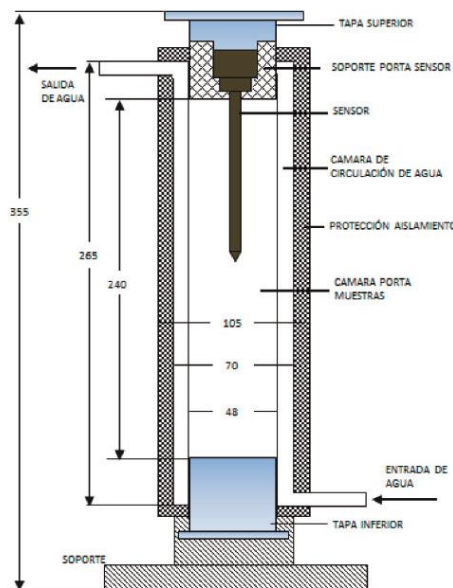


Figura 3. Esquema del cilindro de acero para determinar la difusividad térmica (Huamán Castilla et al., 2016).

2.2.4 Análisis estadístico

Se aplicó un Anova multifactorial, para evaluar la influencia del tipo de tubérculo, forma de determinación y temperatura o poder de calentamiento en las propiedades térmicas. Las diferencias mínimas significativas se calcularon mediante la prueba de Tukey HSD con un 95% de confianza, utilizando el paquete estadístico Statgraphics Centurion XV.

2.2.5 Correlación entre las propiedades térmicas y la temperatura

Las correlaciones entre las propiedades térmicas y la temperatura o el poder de calentamiento, se analizaron mediante el uso del software estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS). Se utilizaron además los resultados del estudio reportado por Cando y Acurio (2019), debido a que ambos fueron obtenidos bajo las mismas condiciones de experimentación. En dicho estudio se trabajó con dos niveles en las variables temperatura y poder de calentamiento; por esta razón, la presente investigación amplió los niveles de cada una de las variables a cuatro, con lo que según Walpole et al. (2007), se consigue la formación de bloques que reducen el error experimental efectivo. Además, para obtener una máxima eficiencia, se realizaron el mismo número de observaciones para cada combinación, siendo verdaderas réplicas, y no sólo medidas repetidas.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Calor específico

Los valores obtenidos en la experimentación guardan relación con diferentes estudios en los que se ha determinado esta propiedad térmica en alimentos. Por ejemplo Alvarado (1996) reporta valores de 3.28 kJ/kg°C en papas sin cáscara, Njie et al. (1998) obtuvieron valores de 3.245 kJ/kg °C en tubérculos de yuca, mientras que Oke et al. (2009) presentan valores de 2.809 kJ/kg°C para tubérculos de ñame (*Dioscorea alata*: planta trepadora oriunda de África, Asia del Sur y de las islas del Pacífico, conocido en otros lugares como "taro" o "aro").

En el análisis estadístico se observaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las tres variables de estudio (tipo de tubérculo, forma de determinación y temperatura) (Tabla 9). En cuanto al tipo de tubérculo se observaron valores superiores en achira y melloco amarillo, sin diferencia significativa entre ellos (Tabla 10). Este efecto guarda relación con los valores altos de humedad que ambos tubérculos poseen, mismos que son superiores al resto de muestras analizadas. Dicha relación fue observada previamente por Vele Punin (2019) en su estudio sobre la estabilidad térmica del almidón procedente de la zanahoria blanca, en el que el bajo contenido de humedad influyó relativamente en la obtención de valores bajos de calor específico. Un comportamiento inverso que ratifica lo previamente discutido presenta papa china reportando el valor más bajo en esta propiedad térmica, debido a que posee un porcentaje de humedad bajo en relación con el resto de los tubérculos en estudio (Tabla 1).

Al analizar la variable “forma de determinación”, se observan valores superiores de calor específico al trabajar con los extractos, con diferencia significativa con las muestras enteras analizadas (Tabla 11). Según Espín et al. (2004), el agua es el componente mayoritario de los tubérculos, y en estudios previamente realizados se ha determinado que el agua tiene un calor específico muy alto en relación a la mayoría de los constituyentes alimenticios, por ende el calor específico de los extractos de estos alimentos se ve notablemente influenciado por la cantidad de este componente (Telis-Romero et al., 1998).

En este mismo sentido, al analizar la interacción doble entre el “tipo de tubérculo” y la “forma de determinación” se observa que el único tubérculo que marca la diferencia significativa es la achira, presentando valores muy superiores al ser analizada en forma de extracto (Figura 4). Este efecto puede deberse a que, a diferencia del resto de tubérculos en estudio, éste contiene la cantidad más elevada de fibra (Tabla 1), componente que en su mayoría se retiene en el proceso de extracción. Dicha retención genera un aumento en el porcentaje de agua del extracto y por ende influye considerablemente en el calor específico bajo los efectos previamente discutidos.

Al analizar la última variable se observan valores superiores a 16°C con diferencia significativa con el resto de las temperaturas analizadas. Este fenómeno se ha observado en otros estudios realizados; por ejemplo Rodas Guizado (2019), reportó una tendencia similar hallada en papas nativas; es decir, la capacidad de calor aumentó linealmente con el aumento de la temperatura y el contenido de agua (Minim et al., 2002). Además, Gabas et al. (2005), reportaron un comportamiento similar en muestras de ciruela y Mykhailyk y Lebovka (2014) en manzanas.

Esta tendencia directamente proporcional se debe a que cuando hay una variación en la temperatura del sistema, ocurre una variación en la energía interna, produciendo una transferencia de calor que incrementa el valor de calor específico (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2002). Así mismo, Singh y Heldman (2009), mencionan que la transferencia de calor es usualmente interpretada como un intercambio molecular de energía cinética, es decir el movimiento genera impactos entre las moléculas aledañas provocando un incremento del calor específico.

Finalmente, analizando la interacción Tipo de tubérculo-Temperatura se observa que tanto el melloco amarillo como la achira presentan tendencias similares en todas las temperaturas analizadas (Figura 5). Nuevamente la composición nutricional juega un papel importante en el análisis de esta similitud presentada.

Tabla 2. Valores de calor específico obtenidos experimentalmente

Tubérculo	Temperatura (°C)	Forma	Experimental	Bibliográfico
Achira	4	Entero	3.5022±0.09 ^{a,p,q}	3.3019
		Extracto	4.1456±0.03 ^{a,p,r}	3.6703
	8	Entero	3.5008 ±0.12 ^{a,t,q}	3.3043
		Extracto	3.6718±0.04 ^{a,t,r}	3.6717
	12	Entero	3.6385±0.03 ^{a,u,q}	3.3068
		Extracto	4.3695±0.001 ^{a,u,r}	3.6732
	16	Entero	3.7041 ±0.11 ^{a,s,q}	3.3094
		Extracto	3.6748 ±0.17 ^{a,s,r}	3.6748
Melloco amarillo	4	Entero	3.7784±0.030 ^{b,p,q}	3.8905
		Extracto	3.8941±0.02 ^{b,p,r}	3.9126
	8	Entero	3.8044 ±0.04 ^{b,t,q}	3.8915
		Extracto	3.9031 ±0.02 ^{b,t,r}	3.9133
	12	Entero	3.9681 ± 0.03 ^{b,u,q}	3.8925
		Extracto	4.0159 ± 0.09 ^{b,u,r}	3.9141
	16	Entero	4.2114 ±0.23 ^{b,s,q}	3.8937
		Extracto	4.0338 ±0.08 ^{b,s,r}	3.9151
Papa china	4	Entero	3.5392 ±0.02 ^{c,p,q}	3.4577
		Extracto	3.6236 ±0.04 ^{c,p,r}	3.6989
	8	Entero	3.5929 ±0.01 ^{c,t,q}	3.4577
		Extracto	3.6608 ±0.02 ^{c,t,r}	3.7002
	12	Entero	3.6428 ± 0.03 ^{c,u,q}	3.4598
		Extracto	3.7625 ± 0.02 ^{c,u,r}	3.7016
	16	Entero	3.7171 ±0.03 ^{c,s,q}	3.4620
		Extracto	3.7685 ±0.16 ^{c,s,r}	3.7031
Zanahoria blanca	4	Entero	3.5420 ± 0.02 ^{d,p,q}	3.5132
		Extracto	3.7217 ±0.02 ^{d,p,r}	3.7384
	8	Entero	3.5886 ±0.01 ^{d,p,q}	3.5151
		Extracto	3.7955 ±0.03 ^{d,p,r}	3.7396
	12	Entero	3.6751 ± 0.04 ^{d,u,q}	3.5170
		Extracto	3.8090 ± 0.05 ^{d,u,r}	3.7409
	16	Entero	3.8145 ±0.05 ^{d,s,q}	3.5190
		Extracto	3.9593 ±0.05 ^{d,s,r}	3.7424

Promedios y desviación estándar de tres réplicas y tres repeticiones. Subíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza ^{a, b, c, d} diferentes tipos de tubérculos; ^{p, t, u, s,} diferencias entre temperaturas; ^{q, r,} diferencias entre formas de determinación.

3.2 Difusividad térmica

Los valores obtenidos en la experimentación guardan relación con diferentes estudios en los que se ha determinado esta propiedad térmica en alimentos. Por ejemplo, Jara Acuña (2012), reporta una difusividad térmica de $1.36 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ para tubérculos de yacón (*Smallanthus sonchifolius*: tubérculo cultivado en zonas cálidas y templadas de la cordillera de los Andes, presenta una textura crujiente y sabor dulce debido a un alto contenido de fructooligosacáridos). El valor reportado en este alimento es similar a los valores observados en las muestras de zanahoria blanca ($1.41 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Esta similitud se debe a que ambas muestras poseen humedades similares (yacón: 80.44%; zanahoria blanca: 77.63%).

Por otra parte Coral y Guevara (2012), reportan valores de difusividad térmica para hojas de fique (*Furcraea andina*: planta monocotilédnea que se asemeja al agave en la forma suculenta y grande de las hojas en roseta) de la variedad uña de águila de 1.43×10^{-7} a $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ y para la variedad negra común de 1.43×10^{-7} a $1.61 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, en el rango de temperaturas de 20 a 65°C. En este sentido, todos los alimentos previamente citados, incluidos los del presente estudio, se encuentran en el rango de valores de difusividad térmica establecido por Peleg (1983) (1 a $2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$).

Mediante el análisis estadístico de difusividad térmica se observa que existe diferencia significativa ($p < 0.05$) en las tres variables analizadas (tipo de tubérculo, forma de determinación y temperatura). Al analizar el factor “tipo de tubérculo” se observan valores inferiores en papa china y zanahoria blanca, sin diferencia significativa entre ellas (Tabla 4). Esta tendencia se relaciona con el bajo porcentaje de humedad que estos tubérculos presentan, en relación al resto de tubérculos (Tabla 1) (Dotto et al., 2016).

Por otro lado, achira y melloco amarillo presentan valores superiores, igualmente sin diferencias significativas entre ellos. Similar a lo discutido previamente en calor específico, estos valores de difusividad térmica se relacionan con los valores altos de humedad. En este sentido, Bon, Vaquiro, Benedito, & Telis-Romero (2010), mencionan que la difusividad térmica varía linealmente con el contenido de humedad, tendencia que fue evidente en su estudio sobre propiedades termo-físicas de la pulpa de mango.

En relación con la variable “forma de determinación” se observa diferencias estadísticamente significativas entre las muestras enteras y en extracto ($p < 0.05$), debido

al aumento en el porcentaje de agua en éstas últimas. Este efecto se debe a que en las muestras en extracto se produce una transferencia de calor convectiva que origina movimiento en el interior del fluido (Chamarro Aguilera & Esplugas Vidal, 2005). Mientras que, en las muestras enteras se presentan valores bajos debido a que el mecanismo de transferencia de calor predominante es la conducción. Es decir, en este caso influye la presencia de los componentes sólidos, debido a que sus partículas reducen el coeficiente de transferencia de calor por convección (Wolti-Chanes et al., 2005). Similar efecto se observó en el estudio del efecto de la concentración sobre las propiedades físicas del jugo de anacardo (*Anacardium occidentale*: es un árbol originario de Venezuela y del nordeste de Brasil, conocido como nuez de la india o merey) (Azoubel et al., 2005).

Con respecto a la variable “temperatura” se puede observar que entre 35 y 70°C existen diferencias estadísticamente significativas. Aparentemente una menor temperatura de análisis provoca menor variación de energía interna y por ende una menor transferencia de calor. Por el contrario, según Kostaropoulos y Saravacos (1997), al incrementar la diferencia de temperatura entre la muestra y el medio de experimentación (baño termostato), aumenta la convección dentro de la celda de Dickerson debido al movimiento rápido de las moléculas y un mayor número de colisiones, lo que al final genera una mejor transferencia de calor y por ende valores superiores de difusividad térmica (Chamarro Aguilera & Esplugas Vidal, 2005).

En las interacciones dobles entre las variables tipo de tubérculo y temperatura (Figura 8), se puede observar que achira y melloco amarillo siguen una tendencia semejante entre ellos. Este comportamiento puede estar relacionado con el porcentaje de almidón, debido a que es similar en ambos tubérculos (Tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje de almidón de los tubérculos andinos en base húmeda

	Amilosa (%)	Amilopectina (%)
Melloco	26	74
Achira	27	73
Papa china	22	78
Zanahoria blanca	20	80

Fuente: Songor Loza y Tenesaca Vergara (2019) y Espín et al. (2004)

Tabla 4. Valores de difusividad térmica obtenidos experimentalmente

Tubérculo	Temperatura (°C)	Forma	Experimental	Bibliográfico
Achira	35	Entero	$9.96 \times 10^{-8} \pm 6.84 \times 10^{-9}$ a,p,q	1.327×10^{-7}
		Extracto	$1.41 \times 10^{-7} \pm 7.69 \times 10^{-9}$ a,p,r	1.402×10^{-7}
	50	Entero	$9.99 \times 10^{-8} \pm 1.76 \times 10^{-9}$ a,t,q	1.448×10^{-7}
		Extracto	$1.64 \times 10^{-7} \pm 2.98 \times 10^{-9}$ a,t,r	1.497×10^{-7}
	60	Entero	$1.01 \times 10^{-7} \pm 1.22 \times 10^{-9}$ a,u,q	1.419×10^{-7}
		Extracto	$1.68 \times 10^{-7} \pm 3.35 \times 10^{-8}$ a,u,r	1.496×10^{-7}
70	Entero	$1.01 \times 10^{-7} \pm 1.85 \times 10^{-9}$ a,s,q	1.512×10^{-7}	
	Extracto	$1.71 \times 10^{-7} \pm 8.02 \times 10^{-9}$ a,s,r	1.562×10^{-7}	
Melloco amarillo	35	Entero	$1.04 \times 10^{-7} \pm 9.44 \times 10^{-9}$ b,p,q	1.451×10^{-7}
		Extracto	$1.59 \times 10^{-7} \pm 4.17 \times 10^{-8}$ b,p,r	1.452×10^{-7}
	50	Entero	$1.06 \times 10^{-7} \pm 3.67 \times 10^{-9}$ b,t,q	1.52×10^{-7}
		Extracto	$1.62 \times 10^{-7} \pm 3.44 \times 10^{-9}$ b,t,r	1.533×10^{-7}
	60	Entero	$1.07 \times 10^{-7} \pm 1.22 \times 10^{-8}$ b,u,q	1.548×10^{-7}
		Extracto	$1.65 \times 10^{-7} \pm 3.47 \times 10^{-8}$ b,u,r	1.548×10^{-7}
70	Entero	$1.1 \times 10^{-7} \pm 8.42 \times 10^{-9}$ b,s,q	1.586×10^{-7}	
	Extracto	$1.76 \times 10^{-7} \pm 4.07 \times 10^{-9}$ b,s,r	1.599×10^{-7}	
Papa china	35	Entero	$9.9 \times 10^{-8} \pm 7.77 \times 10^{-9}$ c,p,q	1.359×10^{-7}
		Extracto	$1.04 \times 10^{-7} \pm 9.64 \times 10^{-9}$ c,p,r	1.407×10^{-7}
	50	Entero	$9.91 \times 10^{-8} \pm 2.03 \times 10^{-9}$ c,t,q	1.446×10^{-7}
		Extracto	$1.46 \times 10^{-7} \pm 2.64 \times 10^{-9}$ c,t,r	1.501×10^{-7}
	60	Entero	$1.01 \times 10^{-7} \pm 1.18 \times 10^{-8}$ c,s,q	1.452×10^{-7}
		Extracto	$1.53 \times 10^{-7} \pm 2.95 \times 10^{-9}$ c,s,r	1.503×10^{-7}
70	Entero	$1.01 \times 10^{-7} \pm 1.4 \times 10^{-9}$ c,s,q	1.51×10^{-7}	
	Extracto	$1.56 \times 10^{-7} \pm 3.36 \times 10^{-9}$ c,s,r	1.567×10^{-7}	
Zanahoria blanca	35	Entero	$9.95 \times 10^{-8} \pm 1.22 \times 10^{-8}$ d,p,q	1.372×10^{-7}
		Extracto	$1.41 \times 10^{-7} \pm 1.35 \times 10^{-8}$ d,p,r	1.416×10^{-7}
	50	Entero	$9.97 \times 10^{-8} \pm 5.07 \times 10^{-9}$ d,t,q	1.475×10^{-7}
		Extracto	$1.42 \times 10^{-7} \pm 2.74 \times 10^{-9}$ d,t,r	1.507×10^{-7}
	60	Entero	$1.05 \times 10^{-7} \pm 1.3 \times 10^{-8}$ d,s,q	1.466×10^{-7}
		Extracto	$1.47 \times 10^{-7} \pm 4.38 \times 10^{-8}$ d,s,r	1.511×10^{-7}
70	Entero	$1.06 \times 10^{-7} \pm 1.46 \times 10^{-9}$ d,s,q	1.54×10^{-7}	
	Extracto	$1.56 \times 10^{-7} \pm 8.88 \times 10^{-9}$ d,s,r	1.573×10^{-7}	

Promedios y desviación estándar de tres replicas y tres repeticiones. Subíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza ^{a, b, c, d} diferentes tipos de tubérculos; ^{p, t, u, s,} diferencias entre temperaturas; ^{q, r,} diferencias entre formas de determinación.

3.3 Conductividad térmica

Diferentes estudios presentan valores similares a los determinados experimentalmente en esta propiedad térmica. Por ejemplo, Rodas Guizado (2019), reportó valores de conductividad térmica para papas y zanahoria de 0.55 y 0.61 W/m°C respectivamente. Por otra parte, Califano y Calvelo (1991), estudiaron la conductividad térmica de papa y obtuvieron valores que oscilaron entre 0.55 y 0.96 W/m°C, siendo similares a los valores obtenidos en el presente estudio en achira entera (0.96 W/m°C). Valores que fueron a su vez también similares con otro estudio realizado en muestras cilíndricas de papas, mismo que arrojó valores entre 0.545 y 0.957 W/m°C (Drouzas & Saravacos, 1988).

A través del análisis estadístico de conductividad térmica se puede observar que existen también diferencias significativas ($p < 0.05$) en las tres variables analizadas. Con respecto a la variable “tipo de tubérculo” se observa que presenta una diferencia estadísticamente significativa entre achira y melloco amarillo, siendo superiores los valores en melloco amarillo (Tabla 18). Esta tendencia se debe a que la conductividad térmica está influenciada directamente por la estructura, la porosidad y la composición del alimento, primordialmente relacionada con el aire, agua y grasa (Muñoz, 2002).

Además, esta propiedad también se ve afectada por la cantidad de fibra que posee el alimento; la longitud de fibra corta genera muchos huecos, y por lo tanto una baja conductividad térmica (Khedari et al., 2001). Este efecto guarda relación con los valores obtenidos en achira, debido que al contener mayor cantidad de fibra (Tabla 1), presenta un valor bajo de conductividad térmica.

Referente a la variable “forma de determinación”, nuevamente se observan valores superiores en los extractos, con diferencia significativa con los valores obtenidos con las muestras enteras ($p < 0.05$). Similar a lo discutido previamente en calor específico y difusividad térmica, esta tendencia se relaciona con el porcentaje de agua que los extractos presentan (Zúñiga & Le-Bail, 2009). Y obviamente de forma contraria, la conductividad térmica de líquidos puede incrementarse con la presión, pero decrecer con un incremento de la concentración de solutos (Peleg, 1983).

Además, la conductividad térmica está muy relacionada con las propiedades del aire, por lo tanto los valores de porosidad en las muestras enteras influyen considerablemente (Ramírez & Jhinm, 2014). Esto se debe a que el aire actúa como un aislante térmico lo

que ocasiona que la transferencia de calor en sistemas alimentarios porosos se vuelva más complicada (Drouzas & Saravacos, 1988).

Al analizar la interacción doble entre las variables “forma de determinación” y “tipo de tubérculo”, se observa que no existen diferencias significativas, sin importar el tubérculo con el que estemos trabajando. Este resultado es interesante debido a que, si bien la composición del alimento ejerce un efecto en esta propiedad térmica, no es el factor predominante en su resultado final. Aparentemente existen otros factores que ejercen mayor influencia, como por ejemplo la porosidad, cambio de fase y estructura del producto, esta afirmación se fundamenta en lo reportado en el estudio de Huaman y Ancco (2012), referente a la determinación de conductividad térmica en carne de alpaca.

En cuanto al poder de calentamiento existe diferencia significativa entre todos los niveles estudiados. Los valores inferiores de conductividad térmica se presentan a 5 voltios y los valores superiores se presentan a 9 voltios. Esta dependencia del poder de calentamiento se debe a que al incrementar el valor del voltaje se incrementa el valor de la potencia disipada por la resistencia y por lo tanto se incrementa el flujo de calor (Park et al., 1999).

Tabla 5. Valores de conductividad térmica obtenidos experimentalmente

Tubérculo	Poder de calentamiento (voltaje)	Forma de determinación	Conductividad térmica (W/m°C)	
			Experimental	Bibliográfico
Achira	5	Entero	0.6484 ± 0.01 ^{a,p,q}	0.5241
		Extracto	0.6563 ± 0.003 ^{a,p,r}	0.5590
	7.5	Entero	0.6527 ± 0.156 ^{a,t,q}	0.483
		Extracto	0.8034 ± 0.322 ^{a,t,r}	0.539
	9	Entero	0.771 ± 0.11 ^{a,s,q}	0.484
		Extracto	0.9549 ± 0.415 ^{a,s,r}	0.576
Melloco amarillo	5	Entero	0.6710 ± 0.0121 ^{b,p,q}	0.572
		Extracto	0.686 ± 0.0103 ^{b,p,r}	0.583
	7.5	Entero	0.7942 ± 0.163 ^{b,t,q}	0.565
		Extracto	1.0314 ± 0.586 ^{b,t,r}	0.576
	9	Entero	1.0232 ± 0.148 ^{b,s,q}	0.566
		Extracto	1.1989 ± 0.131 ^{b,s,r}	0.576
Papa china	5	Entero	0.6320 ± 0.011 ^{c,p,q}	0.5218
		Extracto	0.6687 ± 0.0063 ^{c,p,r}	0.5620
	7.5	Entero	0.6557 ± 0.258 ^{c,t,q}	0.503
		Extracto	0.9544 ± 0.258 ^{c,t,r}	0.541
	9	Entero	0.8778 ± 0.145 ^{c,s,q}	0.496
		Extracto	0.9558 ± 0.265 ^{c, s, r}	0.545
Zanahoria blanca	5	Entero	0.6575 ± 0.006 ^{d,p,q}	0.5412
		Extracto	0.6729 ± 0.009 ^{d, p, r}	0.5661
	7.5	Entero	0.0255 ± 0.025 ^{d,t,q}	0.521
		Extracto	0.1684 ± 0.168 ^{d,t,r}	0.552
	9	Entero	0.2336 ± 0.234 ^{d,s,q}	0.523
		Extracto	0.3226 ± 0.322 ^{d, s, r}	0.549

Promedios y desviación estándar de tres réplicas y tres repeticiones. Subíndices diferentes entre filas indican diferencia significativa al 95% de confianza. ^{a, b, c, d} diferentes tipos de tubérculos; ^{p, s, t} diferencias entre poder de calentamiento; ^{q, r} diferencias entre formas de determinación.

3.4. Correlaciones entre propiedades térmicas y temperatura

3.4.1. Correlación entre calor específico y temperatura

En la Tabla 6 se puede observar las ecuaciones de correlación entre calor específico y la temperatura. Se ajusta en todos los casos a un modelo exponencial.

Tabla 6. Ecuaciones de correlación entre calor específico y temperatura

Tubérculo	Entero		Extracto	
	Ecuación	r ²	Ecuación	r ²
Mellico amarillo	$c_p = 3.6154 \times e^{(0.008 \times T)}$	0.95	$c_p = 3.8369 \times e^{(0.0031 \times T)}$	0.96
Zanahoria blanca	$c_p = 3.4148 \times e^{(0.0066 \times T)}$	0.98	$c_p = 3.644 \times e^{(0.0048 \times T)}$	0.91
Papa china	$c_p = 3.4784 \times e^{(0.0041 \times T)}$	0.99	$c_p = 3.5511 \times e^{(0.0045 \times T)}$	0.97
Achira	$c_p = 3.4474 \times e^{(0.0043 \times T)}$	0.99	$c_p = 3.9796 \times e^{(0.0078 \times T)}$	0.98

3.4.2. Correlación entre difusividad térmica y la temperatura

En la Tabla 7 se muestran las ecuaciones de correlación entre difusividad térmica y temperatura en la que existe una relación polinómica de segundo grado entre las dos variables.

Tabla 7. Ecuaciones de correlación entre difusividad térmica y temperatura

Tubérculo	Entero	
	Ecuación	r ²
Mellico amarillo	$\alpha = 7 \times 10^{-12} T^2 - 6 \times 10^{-10} T + 1 \times 10^{-7}$	0.99
Zanahoria blanca	$\alpha = 8 \times 10^{-12} T^2 - 6 \times 10^{-10} T + 1 \times 10^{-7}$	0.99
Papa china	$\alpha = 3 \times 10^{-12} T^2 - 2 \times 10^{-10} T + 1 \times 10^{-7}$	0.99
Achira	$\alpha = 1 \times 10^{-12} T^2 - 2 \times 10^{-11} T + 1 \times 10^{-7}$	0.99
Tubérculo	Extracto	
	Ecuación	r ²
Mellico amarillo	$\alpha = 2 \times 10^{-11} T^2 - 2 \times 10^{-9} T + 2 \times 10^{-7}$	0.99
Zanahoria blanca	$\alpha = 2 \times 10^{-11} T^2 - 1 \times 10^{-9} T + 2 \times 10^{-7}$	0.99
Papa china	$\alpha = -7 \times 10^{-11} T^2 + 9 \times 10^{-9} T - 1 \times 10^{-7}$	0.99
Achira	$\alpha = 2 \times 10^{-11} T^2 - 2 \times 10^{-9} T + 2 \times 10^{-7}$	0.99

3.4.3. Correlación entre conductividad térmica y poder de calentamiento

En la Tabla 8 se presentan las ecuaciones de correlación entre la conductividad térmica y el voltaje; en la que se observa una relación polinómica de segundo grado entre las dos variables.

Tabla 8. Ecuaciones de correlación entre conductividad térmica y temperatura

Tubérculo	Entero	
	Ecuación	r²
Mel loco amarillo	$k = 0.0258 V^2 - 0.2737 V + 1.3936$	0.99
Zanahoria blanca	$k = 0.0592 V^2 - 0.7399 V + 2.8758$	0.99
Papa china	$k = 0.0248 V^2 - 0.2863 V + 1.4395$	0.99
Achira	$k = 0.0217 V^2 - 0.2619 V + 1.4105$	0.99
Tubérculo	Extracto	
	Ecuación	r²
Mel loco amarillo	$k = 0.0472 V^2 - 0.5379 V + 2.1953$	0.99
Zanahoria blanca	$k = 0.0391 V^2 - 0.4226 V + 1.8075$	0.99
Papa china	$k = 0.0225 V^2 - 0.2174 V + 1.1936$	0.99
Achira	$k = 0.0332 V^2 - 0.3512 V + 1.5829$	0.99

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En calor específico se obtuvieron valores superiores en achira y melloco amarillo. Este efecto guarda relación con los valores altos de humedad que ambos tubérculos poseen. Un comportamiento inverso presenta papa china debido a que posee un porcentaje de humedad bajo en relación con el resto de los tubérculos en estudio.
- Se observaron valores inferiores de difusividad térmica en papa china y zanahoria blanca; esta tendencia se relaciona con el bajo porcentaje de humedad que estos tubérculos presentan. De acuerdo con el estudio se establece una tendencia lineal entre esta propiedad térmica y la humedad.
- Los valores inferiores de conductividad térmica se presentan a 5 voltios; esta dependencia con el poder de calentamiento se debe a que al incrementar el valor del voltaje se incrementa el valor de la potencia disipada por la resistencia, y por lo tanto se incrementa el flujo de calor.
- La composición nutricional juega un papel importante en el análisis de calor específico y de difusividad térmica, es así que los tubérculos de composición similar, melloco amarillo y achira, presentan tendencias semejantes en las tres propiedades térmicas analizadas. Sin embargo, en el análisis de conductividad térmica se observa que influyen en la misma medida la estructura fibrosa y la porosidad de las muestras.
- Se observan valores superiores en las tres propiedades térmicas al trabajar con los extractos, debido a la cantidad de agua presente en estas muestras, componente que presenta valores igualmente altos en todas las propiedades al ser analizado por separado. Además, en estas muestras se produce una transferencia de calor convectiva que origina movimiento en el interior del fluido. De todos los tubérculos, achira presenta valores muy superiores al ser analizada en forma de extracto, debido a que es la muestra que contiene la cantidad más elevada de fibra, componente que en su mayoría se retiene en el proceso de extracción.

- Se observa una tendencia directamente proporcional entre el calor específico y la difusividad térmica con la temperatura, esta tendencia se debe a que en estas condiciones existe mayor energía cinética, es decir el movimiento genera impactos entre las moléculas aledañas, provocando un incremento de estas propiedades térmicas y por ende en el flujo de calor.

4.2 Recomendaciones

- En la determinación de las tres propiedades térmicas se debe evitar dejar espacios vacíos entre los accesorios y las muestras, con la finalidad de evitar el efecto aislante que el aire presenta.

5. MATERIALES DE REFERENCIA

- Acurio, L., Zamora, A., Salazar, D., Pérez, L., & Valencia, A. (2016). Propiedades físicas, químicas, térmicas y nutricionales de la badea (*Passiflora quadrangularis*). *Agroindustrial Science*, 5(2), 95-101.
- Aldaz Chimborazo, W. F. (2011). *Elaboración de pan a partir de la mezcla de cinco niveles de harina de trigo (*Triticum vulgare*) y harina de papa china (*Colocasia esculenta*) para mejorar su valor nutricional, en la Universidad Estatal de Bolívar*. Universidad Estatal de Bolívar. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela
- Alvarado, J. (1996). Principios de ingeniería aplicados a alimentos. *Editorial OEA*. Ambato, EC, 420-453.
- Arrázola, G., Alvis, A., & Páez, M. (2014). Composición, análisis termofísico y sensorial de frutos colombianos. Parte 2: Acerola (*Malpighia emarginata* L.). *Información tecnológica*, 25(3), 23-30.
- Arrázola, G., Páez, M., & Alvis, A. (2014). Composición, Análisis termofísico y análisis sensorial de frutos colombianos: Parte 1: Almendro (*Terminalia Catappa* L.). *Información tecnológica*, 25(3), 17-22.
- Azoubel, P. M., Cipriani, D. C., El-Aouar, Â. A., Antonio, G. C., & Murr, F. E. X. (2005). Effect of concentration on the physical properties of cashew juice. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 413-417.
- Bitra, V. S. P., Banu, S., Ramakrishna, P., Narender, G., & Womac, A. R. (2010). Moisture dependent thermal properties of peanut pods, kernels, and shells. *Biosystems engineering*, 106(4), 503-512.
- Bonete, M., Urquizo, C., Guevara, R., & Yáñez, P. (2016). Estudio de cuatro tubérculos y raíces tuberosas no tradicionales de la sierra centro de Ecuador y su potencial de uso en platos de autor. *Qualitas*, 12, 37-67.

- Caicedo, Q. W., Rodríguez, B. R., & Valle, R. S. (2014). Una reseña sobre el uso de tubérculos de papa china *Colocasia esculenta* conservados en forma de ensilaje para alimentar cerdos. *REDVET. Revista Electrónica de Veterinaria*, 15(1).
- Califano, A. N., & Calvelo, A. (1991). Thermal conductivity of potato between 50 and 100° C. *Journal of Food Science*, 56(2), 586-587.
- Cando, M., & Acurio, L. (2019). *Determinación de propiedades térmicas de zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza), melloco amarillo (Ullucus tuberosus), papa china (Colocasia esculenta) y achira (Canna edulis)*. (Grado - Ingeniero en Alimentos), Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Cobo, G., Quiroz, M., & Santacruz, S. (2013). Sustitución parcial de trigo (*Triticum aestivum*) por zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* B.) en la elaboración de pan. *Avances En Ciencias E Ingenierías*, 5(2).
- Comisión Legislativa y de Participación - Asamblea Nacional de Ecuador. (2009). *Ley Orgánica del Régimen de la Soberanía Alimentaria*. (Registro Oficial Suplemento 583 de 5 de Mayo del 2009). Quito - Ecuador: Retrieved from <https://www.wipo.int/edocs/lexdocs/laws/es/ec/ec046es.pdf>.
- Coral, M., & Guevara, A. (2012). Determinación de las propiedades térmicas del jugo de fique *Furcraea* spp. de las variedades uña de águila y negra común, provenientes del municipio de el Tambo-Nariño.
- Chamarro Aguilera, M. E., & Esplugas Vidal, S. (2005). *Fundamentos de transmisión de calor*: Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- Choi, Y., & Okos, M. (1986). Effects of temperature and composition on the thermal properties of food. *Food engineering and process applications*, 93-101.
- Chura, C., & Yubani, F. (2010). Simulación del comportamiento de la difusividad térmica del masato (Masa de yuca fermentada diluida), en función al porcentaje de humedad.
- Dickerson, R. W. (1965). An apparatus for the measurement of thermal diffusivity of foods. *Food Technology*, 19(5), 198-204.

- Dotto, G. L., Pinto, L. A. A., & Moreira, M. F. P. (2016). Determination of the effective thermal diffusivity in a porous bed containing rice grains: effects of moisture content and temperature. *Heat and Mass Transfer*, 52(4), 887-896.
- Drouzas, A. E., & Saravacos, G. D. (1988). Effective thermal conductivity of granular starch materials. *Journal of Food Science*, 53(6), 1795-1799.
- Espín, S., Villacrés, E., & Brito Grandes, B. (2004). Caracterización físico-química, nutricional y funcional de raíces y tubérculos andinos.
- Espinosa, P., Vaca, R., Abad, J., & Crissman, C. C. (1997). *Raíces y tubérculos andinos cultivos marginados en el Ecuador: situación actual y limitaciones para la producción*: International Potato Center.
- Gabas, A. L., Marra-Júnior, W., Telis-Romero, J., & Telis, V. (2005). Changes of density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat of plums during drying. *International Journal of Food Properties*, 8(2), 233-242.
- Giraldo-Gómez, G. I., Gabas, A. L., Telis, V. R. N., & Telis-Romero, J. (2010). Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. *Food Science and Technology*, 30, 90-95.
- Gordillo Delgado, F., Ortega Vela, J. A., & Zárate Rincón, F. (2009a). Correlación entre parámetros térmicos de café de diferente origen. *Revista Colombiana de Física*, 41, 168-170.
- Gordillo Delgado, F., Ortega Vela, J. A., & Zárate Rincón, F. (2009b). Correlación entre parámetros térmicos de café de diferente origen. *Rev. Col. Fis*, 41, 168-170.
- Hassan, H. F., & Ramaswamy, H. S. (2011). Measurement and targeting of thermophysical properties of carrot and meat based alginate particles for thermal processing applications. *Journal of Food Engineering*, 107(1), 117-126.
- Higuera Rosero, M. W., & Prado Argoti, R. A. (2014). *Determinación de los parámetros óptimos de proceso para la elaboración de snacks a partir de zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza Bancroft)*.

- Huamán Castilla, N. L., Yupanqui, G., Allecca, E., & Allecca, G. (2016). Efecto del contenido de humedad y temperatura sobre la difusividad térmica en granos andino. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(3), 259-271.
- Huaman, N. L., & Ancco, T. (2012). Determinación de la conductividad térmica en carne de alpaca (Lama pacos) en congelación. *JOURNAL de CIENCIA y TECNOLOGIA AGRARIA*, 325.
- Hwang, M. P., & Hayakawa, K. I. (1979). A specific heat calorimeter for foods. *Journal of Food Science*, 44(2), 435-448.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2002). *Unit operations in food engineering*: CRC press.
- Ibarz, A., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*: Mundi-Prensa Libros.
- Janick, J. (2001). New crops for the 21st century. *Crop science: Progress and prospects*. CABI Publ., New York, 307-327.
- Jara Acuña, R. (2012). Determinación de la conductividad térmica de la pulpa del yacón (*Smallanthus sonchifolius*) en función de la humedad y la temperatura.
- Jiménez, F. (2005). Características nutricionales de la arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) y sus perspectivas en la alimentación. *Red Peruana de Alimentación y Nutrición (r-PAN)*.
- Khedari, J., Suttisonk, B., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2001). New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity. *Cement and Concrete Composites*, 23(1), 65-70.
- Kostaropoulos, A. E., & Saravacos, G. D. (1997). Thermal diffusivity of granular and porous foods at low moisture content. *Journal of Food Engineering*, 33(1-2), 101-109.
- Loor Toledo, K. A. (2008). *Efecto de varios ciclos de enfriamiento/calentamiento en el contenido de almidón resistente tipo III en almidones de achira (Canna edulis Ker) y papa (solanum tuberosum)*. Quito: USFQ, 2008.

- Mazón, N., Castillo, T., Hermann, M., & Espinosa, A. (1996). La Arracacha ó zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza* Bancroft) en Ecuador.
- Minim, L. A., Coimbra, J. S. R., Minim, V. P. R., & Telis-Romero, J. (2002). Influence of temperature and water and fat contents on the thermophysical properties of milk. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 47(6), 1488-1491.
- Mohsenin, N. N. (1980). Thermal properties of foods and agricultural materials. *New York. USA*.
- Muñoz, J. (2002). *Determinación de la difusividad térmica en pasta de murta (Ugni molinae Turcz.) en función de la temperatura*. Tesis Ingeniero en Alimentos. Valdivia, Chile. Universidad Austral, Facultad
- Mykhailyk, V., & Lebovka, N. (2014). Specific heat of apple at different moisture contents and temperatures. *Journal of Food Engineering*, 123, 32-35.
- Njie, D. N., Rumsey, T. R., & Singh, R. P. (1998). Thermal properties of cassava, yam and plaitain. *Journal of Food Engineering*, 37(1), 63-76.
- Oke, M. O., Awonorin, S. O., Oyelade, O. J., Olajide, J. O., Olaniyan, G. O., & Sobukola, P. O. (2009). Some thermo-physical properties of yam cuts of two geometries. *African Journal of Biotechnology*, 8(7).
- Palacios, R., Morales, M., & Arias, G. C. (2011). Evaluación químico bromatológica de tres variedades de *Arracacia xanthorrhiza* “arracacha”. *Ciencia e investigacion*, 14(2), 12-14.
- Park, K. J., Alonso, L. F. T., & Nunes, A. S. (1999). Steady state determination of thermal conductivity and thermal diffusivity for grains. *Food Science and Technology*, 19(2), 264-269.
- Peleg, M. (1983). Physical Properties of Food. AVI Pubhising Company. *INC. Westport, Connecticut. Pag*, 13-16.
- Pérez, Y. B., Garzón, M. A. B., Leal, I. C. P., Vásquez, S. T. Q., & Vargas, J. V. (2017). Caracterización y potencial uso de la raíz achira (*Canna Edulis Ker*). *Vía innova*(4), 89-97.

- Ramírez, B., & Jhinm, A. (2014). Determinación de la difusividad térmica en pulpa de Guanábana (*Annona muricata*), en función de la temperatura.
- Ramos Huallpartupa, D. J. (2017). Determinación de las propiedades termales en tres variedades de papa nativa con cortes de tamaños diferentes. *Ciencia & Desarrollo*(18).
- Rodas Guizado, M. (2019). Determinación de las propiedades termofísicas (conductividad y difusividad térmica) en cinco variedades de papas nativas (*solanum tuberosum*).
- Sahin, S., & Sumnu, S. G. (2006). *Physical properties of foods*: Springer Science & Business Media.
- Sánchez Moreno, A. E. (2018). *Efecto de la adición de harina de melloco (Ullucus Tuberosus) variedad amarillo (INIAP-Quillu) en las propiedades fisicoquímicas y reológicas del yogurt bajo en grasa*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos
- Scheldeman, X., Libreros, D., & Jiménez, D. (2001). Desarrollo de especies silvestres nativas en cultivos de exportación. *International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI), Regional Office for the Americas*.
- Singh, R. P., & Heldman, D. (2009). *Introducción a la ingeniería de los alimentos*: Editorial Acribia.
- Songor Loza, M. J., & Tenesaca Vergara, A. d. C. (2019). *Extracción y uso de almidón de papa china (Colocasia Esculenta) en la elaboración de productos cárnicos emulsionados*.
- Sweat, V. E. (1986). Thermal properties of foods. *Engineering properties of foods*, 49.
- Telis-Romero, J., Telis, V. R. N., Gabas, A. L., & Yamashita, F. (1998). Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. *Journal of Food Engineering*, 38(1), 27-40.

- Vele Punin, L. O. (2019). *Determinación del comportamiento térmico de la zanahoria blanca (Arracacia xanthorrhiza) y su almidón aplicando Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)*. Universidad del Azuay.
- Vimos, N., Nieto, C., & Rivera, M. (1993). El melloco, características técnicas de cultivo y potencial en el Ecuador.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2007). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. *Norma*, 162, 157.
- Walti-Chanes, J., Gómez-Palomares, O., Vergara-Balderas, F., & Maris-Alzamora, S. (2005). Aplicaciones de ingeniería y fenómenos de transporte al estudio de la transferencia convectiva de calor en alimentos envasados. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 4(1), 89-106.
- Zegarra Quevedo, G. M. (2014). Propiedades térmicas de los alimentos balance de Masa y otras variables en la industria frutícola factores que influyen en la evaluación sensorial de los alimentos.
- Zúñiga, R., & Le-Bail, A. (2009). Assessment of thermal conductivity as a function of porosity in bread dough during proving. *Food and Bioproducts Processing*, 87(1), 17-22.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A. ANOVAS

Tabla 9. Análisis de varianza para calor específico

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	2.1091	1	2.1092	268.15	0.00
B: Temperatura	1.1891	3	0.3964	50.39	0.00
C: Tipo de tubérculo	2.1023	3	0.7008	89.09	0.00
AB	0.0038	3	0.0013	0.16	0.9211
AC	2.7767	3	0.9256	117.67	0.00
BC	0.0937	9	0.0105	1.32	0.2334
RESIDUOS	0.8416	107	0.0079		
TOTAL (CORREGIDO)	8.6315	129			

Tabla 10. Prueba de Tukey HSD a 95% para calor específico por tipo de tubérculo

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Papa china	33	3.6639	0.0155	X
Zanahoria	30	3.7379	0.0164	X
Mellico amarillo	35	3.9495	0.0152	X
Achira	32	3.9536	0.0161	X

Tabla 11. Prueba de Tukey HSD a 95% para calor específico por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Entero	68	3.6971	0.0109	X
Extracto	62	3.9553	0.0115	X

Tabla 12. Prueba de Tukey HSD a 95% para calor específico por temperatura

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
4	32	3.7194	0.0158	X
8	28	3.7556	0.0169	X
12	37	3.8617	0.0147	X
16	33	3.9682	0.0156	X

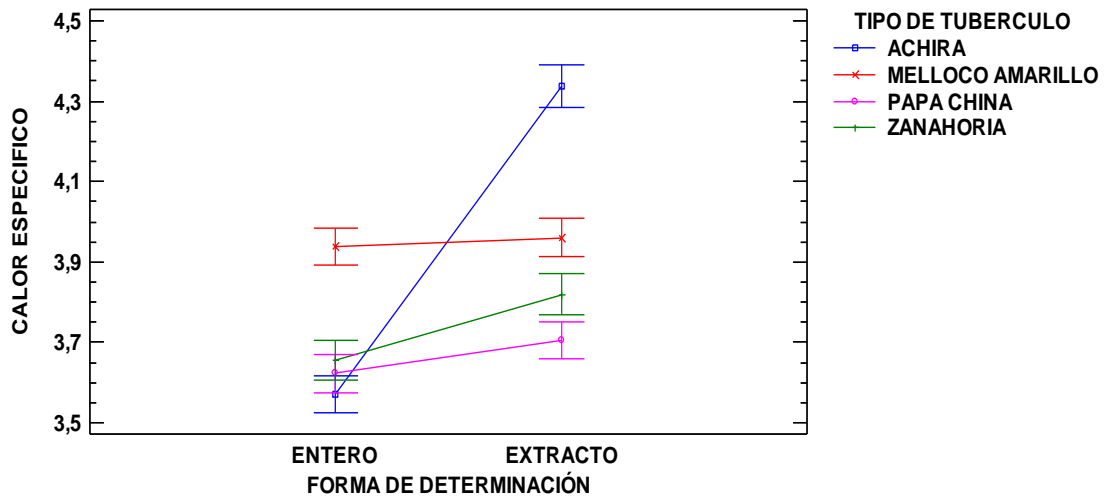


Figura 4. Interacción doble Tukey HSD a 95% de tipo de tubérculo y forma de determinación para calor específico

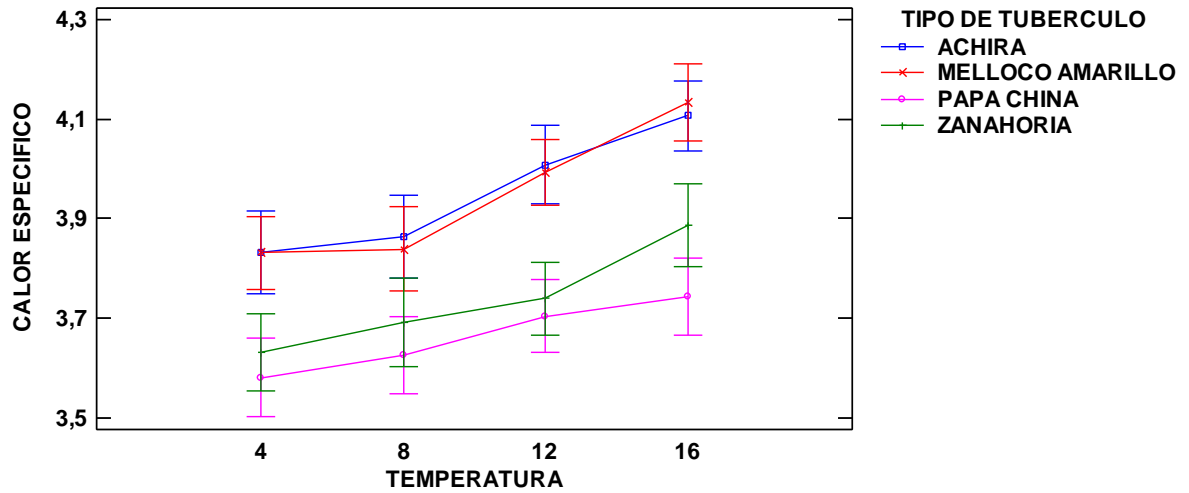


Figura 5. Interacción doble Tukey HSD a 95% de temperatura y tipo de tubérculo para calor específico

Tabla 13. Análisis de varianza para difusividad térmica

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	11.6533	1	11.6533	443.72	0.00
B: Temperatura	0.4372	3	0.1457	5.55	0.0012
C: Tipo de tubérculo	0.7615	3	0.2539	9.67	0.00
AB	0.2293	3	0.0764	2.91	0.0364
AC	0.57	3	0.19	7.23	0.0001
BC	0.1395	9	0.0155	0.59	0.8039
RESIDUOS	4.097	156	0.0263		
TOTAL (CORREGIDO)	19.5621	178			

Tabla 14. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por tipo de tubérculo

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Papa china	44	1.2071	0.0254	X
Zanahoria blanca	44	1.2449	0.0251	X
Achira	45	1.3458	0.0244	X
Mellico amarillo	46	1.3659	0.0241	X

Tabla 15. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Entero	95	1.0291	0.0169	X
Extracto	84	1.5528	0.0181	X

Tabla 16. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para difusividad térmica por temperatura

Temperatura	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
35	45	1.2231	0.0249	X
50	40	1.2738	0.0257	XX
60	48	1.3066	0.0239	XX
70	46	1.3602	0.0240	X

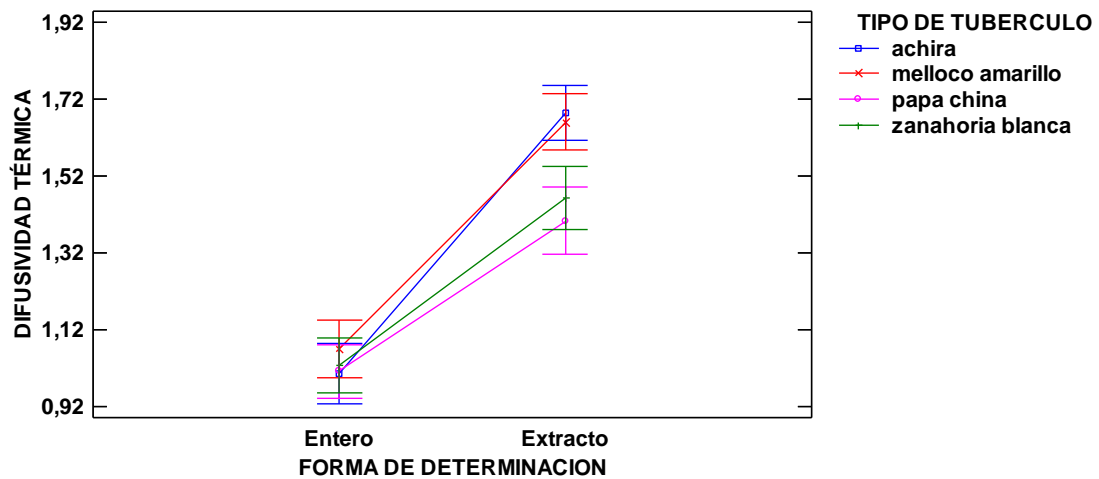


Figura 6. Interacción doble de tipo de tubérculo y forma de determinación para difusividad térmica

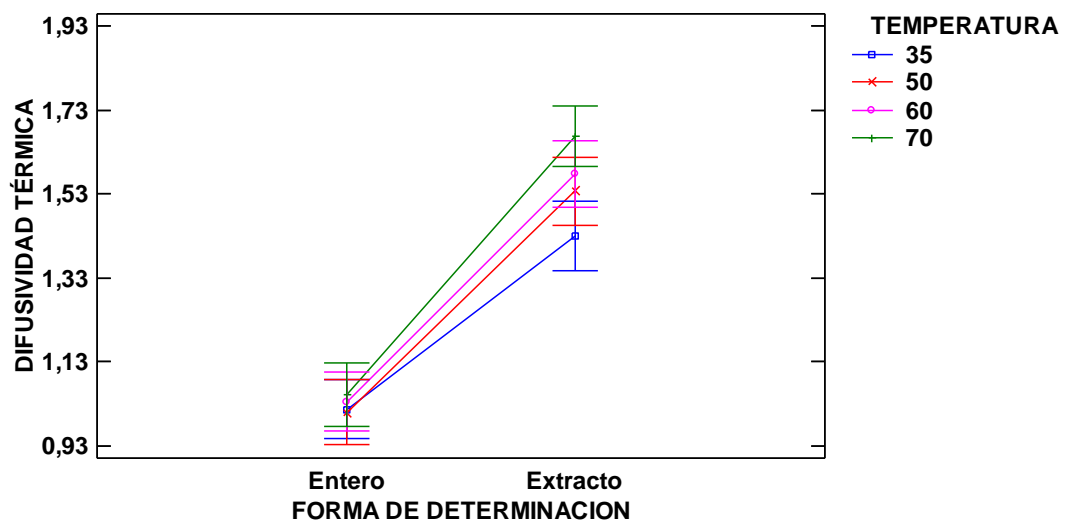


Figura 7. Interacción doble de forma de determinación y temperatura para difusividad térmica

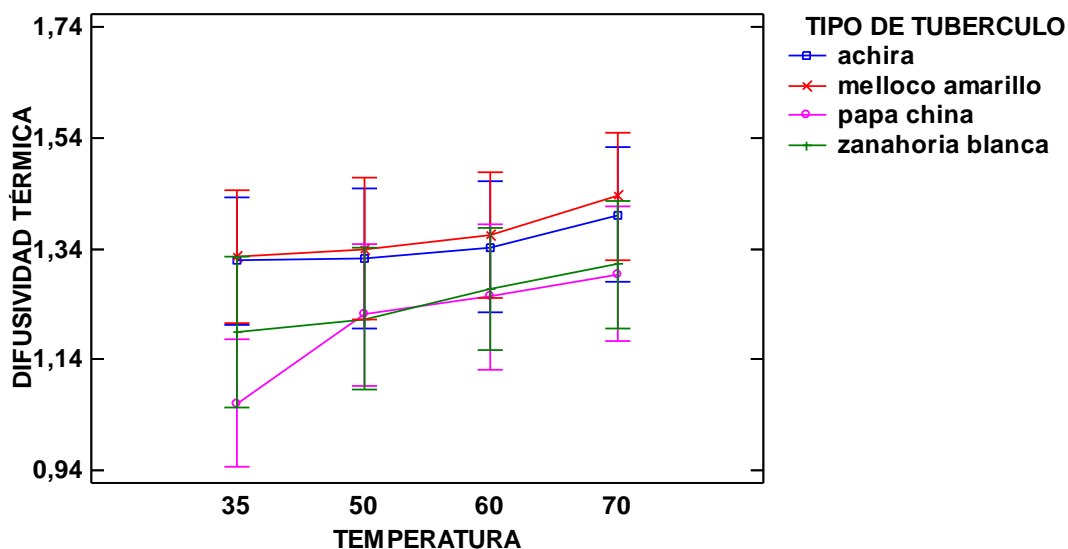


Figura 8. Interacción doble tipo de tubérculo y temperatura para difusividad térmica

Tabla 17. Análisis de varianza para conductividad térmica

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Forma de determinación	0.7233	1	0.7233	14.98	0.0002
B: Temperatura	3.2532	2	1.6266	33.68	0.00
C: Tipo de tubérculo	0.5645	3	0.1882	3.9	0.0101
AB	0.2691	2	0.1346	2.79	0.0646
AC	0.0061	3	0.002	0.04	0.9886
BC	0.4436	6	0.0739	1.53	0.1712
RESIDUOS	7.8245	162	0.0483		
TOTAL (CORREGIDO)	13.1498	179			

Tabla 18. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por tipo de tubérculo

Tipo de tubérculo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Achira	46	0.7467	0.0329	X
Papa china	46	0.7908	0.0329	XX
Zanahoria blanca	44	0.8353	0.0343	XX
Melloco amarillo	44	0.9006	0.0336	X

Tabla 19. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por forma de determinación

Forma de determinación	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Entero	91	0.7537	0.0235	X
Extracto	89	0.8829	0.0237	X

Tabla 20. Prueba de múltiples rangos Tukey HSD a 95% para conductividad térmica por temperatura

Voltaje	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
5	46	0.6617	0.0325	X
7.5	65	0.7969	0.0273	X
9	69	0.9964	0.0265	X

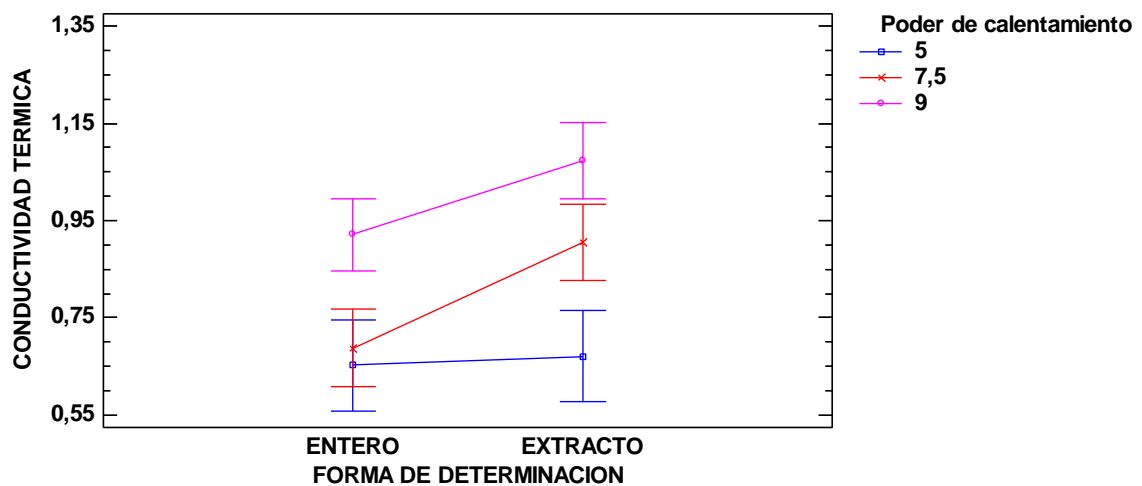


Figura 9. Interacción doble de forma de determinación y poder de calentamiento para conductividad térmica

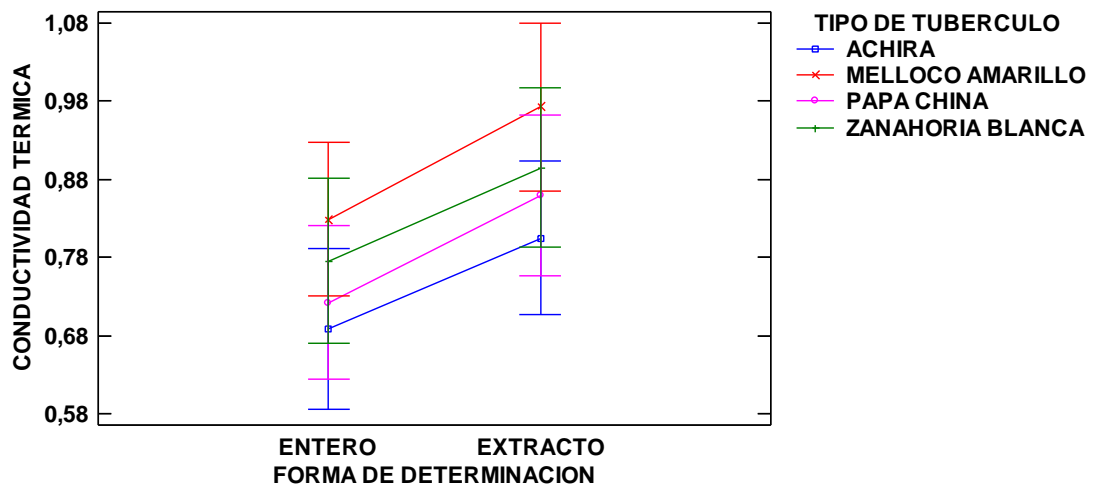


Figura 10. Interacción doble de forma de determinación y tipo de tubérculo para conductividad térmica

ANEXO B

Resultados bibliográficos obtenidos mediante ecuaciones de Choi y Okos

Tabla 21. Calor específico (kJ/kg×°C) para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos

Componentes	$c_{p i}$	Achira	Meloco amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
c_p agua	4.1758	2.7769	3.6705	3.0024	3.1068
c_p proteína	2.0177	0.0182	0.0202	0.0403	0.0161
c_p carbohidratos	1.5641	0.488	0.1846	0.3723	0.3613
c_p fibra	1.8602	0.0093	0.0055	0.0186	0.0149
c_p cenizas	1.1075	0.0099	0.0066	0.0121	0.0099
c_p grasa	1.9957	0.0019	0.0039	0.0119	0.0059
c_p final (kJ/kg×°C)		3.3043	3.8915	3.4578	3.5151

Tabla 22. Calor específico (kJ/kg×°C) para extracto obtenidos por Choi y Okos

Componentes	$c_{p i}$	Achira	Meloco amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
c_p agua	4.1761	3.3702	3.7564	3.4157	3.4787
c_p proteína	1.5787	0.274	0.1586	0.2875	0.2636
c_p carbohidratos	1.8739	0.0075	0.0062	0.0147	0.0124
c_p fibra	2.0065	0.0016	0.003	0.0213	0.0042
c_p cenizas	2.0272	0.0147	0.0182	0.0306	0.014
c_p grasa	1.1218	0.0075	0.0047	0.0093	0.0082
c_p final (kJ/kg×°C)		3.6762	3.9472	3.6854	3.7812

Tabla 23. Difusividad térmica (m²/s) para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos

Componentes	α_i	Achira	Mellico amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
α agua	0.1506	1.001×10^{-7}	1.324×10^{-7}	1.083×10^{-7}	1.120×10^{-7}
α proteína	0.0835	7.522×10^{-10}	8.357×10^{-11}	1.671×10^{-9}	6.686×10^{-10}
α carbohidratos	0.0965	3.013×10^{-8}	1.14×10^{-8}	2.298×10^{-8}	2.231×10^{-8}
α fibra	0.0894	4.471×10^{-10}	2.683×10^{-10}	8.942×10^{-10}	7.154×10^{-10}
α cenizas	0.1362	1.226×10^{-9}	8.17×10^{-10}	1.498×10^{-9}	1.226×10^{-9}
α grasa	0.0943	9.433×10^{-11}	2.063×10^{-10}	6.188×10^{-10}	3.094×10^{-10}
α final (m²/s)		1.328×10^{-7}	1.451×10^{-7}	1.359×10^{-7}	1.3726×10^{-7}

Tabla 24. Difusividad térmica (m²/s) para extracto obtenidos por Choi y Okos

Componentes	α_i	Achira	Mellico amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
α agua	0.1506	1.215×10^{-7}	1.355×10^{-7}	1.232×10^{-7}	1.254×10^{-7}
α proteína	0.0965	1.81×10^{-8}	9.705×10^{-9}	1.758×10^{-8}	1.613×10^{-8}
α carbohidratos	0.0894	3.92×10^{-10}	2.952×10^{-10}	7.03×10^{-10}	5.96×10^{-10}
α fibra	0.1031	7.35×10^{-9}	1.549×10^{-10}	1.096×10^{-9}	2.15×10^{-10}
α cenizas	0.0835	6.68×10^{-10}	7.517×10^{-10}	1.262×10^{-9}	5.78×10^{-10}
α grasa	0.1362	1.04×10^{-9}	5.719×10^{-10}	1.139×10^{-9}	9.98×10^{-10}
α final (m²/s)		1.57×10^{-7}	1.469×10^{-7}	1.392×10^{-7}	1.44×10^{-7}

Tabla 25. Conductividad térmica (W/m°C) para tubérculos enteros obtenidos por Choi y Okos

Componentes	k_i	Achira	Mel loco amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
k_{agua}	0.6079	0.4043	0.5341	0.4366	0.4557
$k_{\text{proteína}}$	0.2047	0.0018	0.0002	0.0041	0.0019
$k_{\text{carbohidratos}}$	0.2309	0.072	0.0272	0.0548	0.0583
k_{fibra}	0.2103	0.0011	0.0006	0.0021	0.0029
k_{cenizas}	0.3602	0.0032	0.0002	0.0039	0.0019
k_{grasa}	0.2438	0.0002	0.0005	0.0014	0.0006
k_{final} (W/m°C)		0.4827	0.5648	0.5030	0.5214

Tabla 26. Conductividad térmica (W/m°C) para extractos obtenidos por Choi y Okos

Componentes	k_i	Achira	Mel loco amarillo	Papa china	Zanahoria blanca
k_{agua}	0.6115	0.5056	0.5502	0.5020	0.5097
$k_{\text{proteína}}$	0.2338	0.0427	0.0235	0.0289	0.0420
$k_{\text{carbohidratos}}$	0.2113	0.0002	0.0004	0.0027	0.0004
k_{fibra}	0.3614	0.0009	0.0007	0.0017	0.0024
k_{cenizas}	0.2320	0.0016	0.0019	0.0032	0.0016
k_{grasa}	0.2058	0.0027	0.0015	0.0031	0.0015
k_{final} (W/m°C)		0.5538	0.5782	0.5416	0.5547

ANEXO C

Fotografías

Anexo C1. Tubérculos enteros



Fotografía 1. Melloco amarillo (*Ullucus tuberosus*)



Fotografía 2. Achira (*Canna indica*)



Fotografía.3. Papa china (*Colocasia esculenta*)



Fotografía 4. Zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)

Anexo C2. Aparatos y equipos



Fotografía 5. Determinación de calor específico



Fotografía 6. Determinación de difusividad térmica



Fotografía 7. Determinación de conductividad térmica