

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE FRONTERA**

**Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias y Biotecnología**

**Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias**



**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERA DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**

**“Efecto de proporción de mezclas binarias de variedades de mango  
(*Mangifera indica L.*) en el perfil espectral de la pulpa”**

**Autora: Br. Mónica Jazmín Castro Barba**

**Asesor: Dr. Wilson Manuel Castro Silupu**

**Coasesor: MSc. Roberto Simón Seminario Sanz**

**Registro: PY-EPIIA-050**

**Sullana - Perú**

**2022**

## **Dedicatoria**

A Dios y a mis Padres: Julio Castro Estrada y Giovanna Barba Panta, por enseñarme a ser disciplinada con mis objetivos y fortalecer mí deseo de superación permanente.

A mis compañeros de pregrado, alentándoles a seguir el camino para obtener satisfactoriamente su título profesional.

## **Agradecimiento**

A Dios, pues “Si el Señor no edifica la casa, en vano se esfuerzan los albañiles. Si el Señor no cuida la ciudad, en vano hace guardia los vigilantes. En vano madrugan ustedes, y se acuestan muy tarde, para comer un pan de fatigas, porque Dios concede el sueño a sus amados” (Salmo 127: 1–2).

Al Dr. Wilson Manuel Castro Silupu y al MSc. Roberto Simón Seminario Sanz, asesor y coasesor, por su inspiración y orientación aliento para el desarrollo del presente trabajo.

Al personal del Laboratorio de Inocuidad de Alimentos: Ing. William Vera, Ing. Jorge Mogollón, Ing. Susana Trelles y Lic. Glenda Palomino; por su apoyo en las labores de diseño y experimentación. A mis compañeros, autoridades y personal administrativo de la Oficina de Gestión de la investigación y del programa “Financiamiento de Investigaciones Conducentes al Grado Académico de Bachiller o Título Profesional” de la Universidad Nacional de Frontera, mi Alma Mater, quienes me apoyaron de forma desinteresada en el momento oportuno.

## Visto Bueno del Asesor de la Tesis

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE FRONTERA</b> Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias y Biotecnología			
	<b>ANEXO 1 - B</b> <b>Carta de Conformidad del Asesor</b>			
Factor 7: Código Estándar 22-23-24 Acreditación-SINEACE <sup>11</sup>	Criterios 1,3,4,10 de Acreditación-ICACIT <sup>12</sup>	Versión: 001	Aprobado: Resolución N° 168/2021-UNF/CO	Fecha: 25/05/2021

Señor

**Dr. Luis Ángel Paucar Flores**

Coordinador(e) de la Facultad de Ingeniería de Industrias Alimentarias y Biotecnología  
 Universidad Nacional de Frontera

El suscrito, en mi condición de asesor de la **Br. Mónica Jazmín Castro Barba** de la Escuela Profesional de **Ingeniería de Industrias Alimentarias** informo que la Tesis titulada **"Efecto de proporción de mezclas binarias de variedades de mango (*Mangifera indica L.*) en el perfil espectral de la pulpa"** se encuentra conforme a lo indicado en el Reglamento de Grados y Títulos.

Sullana, 4 de setiembre de 2022



.....  
 Dr. Wilson Manuel Castro Silupu  
 DNI: 40322327

<sup>11</sup> SINEACE (2016) Modelo de Acreditación para Programas de Estudios de Educación Superior Universitaria. Disponible: <https://www.sineace.gob.pe/wp-content/uploads/2014/08/Anexo-1-nuevo-modelo-programas-Resolucion-175.pdf>

<sup>12</sup> ICACIT (2021) Criterios Generales, Informe Autoestudio ICACIT. Disponible: <https://icacitperu.org/web/es/acreditacion/criterios-de-acreditacion/acreditacion-en-ingenieria>

## **Jurado evaluador**



---

**Presidente**

**MBA. Patricia Mercedes Torres Becerra**



---

**Secretario**

**MBA. Leandro Alonso Vallejos More**



---

**Vocal**

**Dr. MPhil. Fermín Máximo Saavedra**

# Acta de sustentación



UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
FRONTERA

## Acta de Evaluación de Sustentación del Informe de Tesis

Siendo las 14:00 horas del día 20 del mes de setiembre del año 2022 se reunieron en la sala virtual <https://meet.google.com/tes-ojah-yvs?pli=1&authuser=3> de la Universidad Nacional de Frontera, los miembros del Jurado de Tesis para evaluar el Informe de Tesis denominado: "EFECTO DE PROPORCIÓN DE MEZCLAS BINARIAS DE VARIEDADES DE MANGO (Mangifera indica L.) EN EL PERFIL ESPECTRAL DE LA PULPA".

Siendo sustentado en sesión pública por el autor: Br. MÓNICA JAZMÍN CASTRO BARBA, como requisito para obtener el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias

Terminada la sustentación, se procedió a la defensa del Informe de Tesis, etapa en que los miembros del Jurado de Tesis formularon sus inquietudes y preguntas de manera individual, las que fueron respondidas por el(los) sustentante(s).

Seguidamente, el Jurado solicitó el retiro de todos los asistentes y del (los) sustentante(s) de la sala virtual o física según sea el caso; el Jurado de Tesis determinó la calificación concedida a la sustentación del Informe de Tesis para la Obtención de Título Profesional, en términos de:

**Aprobado (a)** con el calificativo de diecinueve (19), levantándose la sesión a 14:30 horas del mismo día. Se concluye el acto de sustentación, suscribiendo el acta.

**Presidente**

MBA. Patricia Mercedes Torres Becerra

**Secretario**

MBA. Leandro Alonso Vallejos More

**Vocal**

MPhil. Fermín Máximo Saavedra Cano

No.	DESCRIPCIÓN	RECOMENDAR	
		SI	NO
1.	Recomendar para presentar en eventos	X	
2.	Recomendar para publicación	X	
3.	Recomendar para patente		
4.	Recomendar para Meritorio		
5.	Recomendar para Laureado	X	

Código:

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>12</b>
1.1. Mango . . . . .	13
1.2. Pulpa de mango . . . . .	16
1.3. Importancia económica . . . . .	16
1.4. Técnicas empleadas en la detección de adulteración de alimentos . . . . .	18
1.5. Fundamento de la técnica de imágenes hiperespectrales . . . . .	20
1.6. Quimiometría . . . . .	21
1.7. Antecedentes . . . . .	22
1.8. Realidad problemática . . . . .	24
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>25</b>
2.1. Materia prima . . . . .	25
2.2. Materiales e insumos de laboratorio . . . . .	25
2.3. Equipos . . . . .	26
2.4. Metodología . . . . .	27
2.5. Obtención de pulpa . . . . .	27
2.6. Adquisición de imágenes hiperespectrales modo transmitancia . . . . .	33
2.7. Extracción y pretratamiento de los espectros . . . . .	34
2.8. Modelado (PLSR) . . . . .	35
2.9. Cálculo de métricas . . . . .	35
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>36</b>

3.1. Colorimetría en pulpas de mango . . . . .	36
3.2. Perfiles espectrales de las mezclas Criollo vs Chato de Ica y Criollo vs Kent .	39
3.3. Coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y Raíz de la Media de Errores Cuadráticos (RMEC) . . . . .	40
<b>4. DISCUSIÓN</b>	<b>44</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>45</b>
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	<b>46</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>47</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>52</b>

## Índice de figuras

1.	<i>Características morfológicas externas de las variedades de mango estudiadas.</i>	15
2.	<i>Participación de los principales países exportadores . . . . .</i>	18
3.	<i>Exportación de mango peruano durante el periodo del 2013 al 2020 . . . . .</i>	19
4.	<i>Exportación de mango peruano en valores USD durante el periodo 2013-2020</i>	19
5.	<i>Modos de detección de imágenes hiperespectrales . . . . .</i>	21
6.	<i>La programación clásica frente al Machine Learning . . . . .</i>	22
7.	<i>Localización geográfica de la zona de recolección de muestras en el distrito de Tambogrande, Piura, Perú . . . . .</i>	26
8.	<i>Esquema de la metodología experimental . . . . .</i>	28
9.	<i>Mezclas binarias en diferentes concentraciones . . . . .</i>	31
10.	<i>Medición de colorimetría en pulpas de mango adulteradas . . . . .</i>	33
11.	<i>Sistema de imágenes hiperespectrales modo transmitancia y sus elementos . . . . .</i>	34
12.	<i>Valores de colorimetría L= Luminosidad de mezclas binarias de pulpas de mango . . . . .</i>	37
13.	<i>Valores de colorimetría a*= Coordenadas rojo/verde de mezclas binarias de pulpas de mango . . . . .</i>	38
14.	<i>Valores de colorimetría b*= Coordenadas amarillo/azul de mezclas binarias de pulpas de mango . . . . .</i>	38
15.	<i>Perfiles espectrales medios de mezclas binarias de pulpas de mango . . . . .</i>	40
16.	<i>Gráficos de dispersión de las mezclas binarias Criollo vs Kent . . . . .</i>	41
17.	<i>Gráficos de dispersión de las mezclas binarias Criollo vs Chato de Ica . . . . .</i>	42
18.	<i>Coefficientes de correlación <math>R^2</math> . . . . .</i>	43

19.	<i>Raíz de la Media de Errores Cuadráticos RMEC</i>	44
20.	<i>Recepción y pesado de materia prima</i>	52
21.	<i>Proceso de escaldado de materia prima</i>	52
22.	<i>Pelado y troceado de mango</i>	53
23.	<i>Proceso de pulpeado de mango</i>	53
24.	<i>Filtrado y refinado de pulpa de mango</i>	53
25.	<i>Pasteurización de pulpas de mango</i>	54
26.	<i>Medición de brix y PH de pulpas de mango</i>	54
27.	<i>Pesado y envasado de pulpas de mango</i>	54
28.	<i>Rotulación y almacenamiento de pulpas de mango a -18 C</i>	55
29.	<i>Adulteración y Llenado de pulpas en cubetas de cuarzo</i>	55
30.	<i>Medición de colorimetría de pulpa de mango adulterada</i>	55
31.	<i>Adquisición de imágenes hiperespectrales mediante sistema de transmitancia</i>	56

## Índice de tablas

1.	<i>Clasificación taxonómica del mango . . . . .</i>	13
2.	<i>Información nutricional de macronutrientes y micronutrientes en pulpa de mango. . . . .</i>	17
3.	<i>Pruebas de Múltiple Rangos para colorimetría en pulpa de mango . . . . .</i>	39
4.	<i>Valores de colorimetría para pulpa de mango criollo adulterada con Chato de Ica. . . . .</i>	56
5.	<i>Valores de colorimetría para pulpa de mango criollo adulterada con Kent . . . . .</i>	57

## Resumen

La pulpa de mango (*Mangifera indica L.*) muestra diferentes atributos sensoriales de acuerdo a la variedad, y, el precio tiene relación con la mejor aceptabilidad sensorial del producto. Esto motiva la adulteración de la pulpa de mango criollo con pulpa de variedades como Kent o Chato de Ica; hecho que por su similitud dificulta su identificación, haciendo necesario el desarrollo de métodos que detecten este tipo de fraude. Por ello; el objetivo de esta investigación fue determinar el potencial de las imágenes hiperespectrales (HSI) en modo transmitancia acopladas a técnicas quimiométricas para detectar adulteración de pulpa del mango criollo con Kent y chato de Ica. Para este fin, se adquirieron mangos de tres variedades; se obtuvo pulpa pura, por variedad, a partir de ellas se prepararon mezclas (a) Criollo – Kent y (b) Criollo – Chato de Ica, en concentraciones crecientes de 0 – 100 % de la variedad adulterante, distribuidos en cinco tratamientos. Por tratamiento, se obtuvieron 100 imágenes hiperespectrales de transmitancia en el rango de 400-1000 nm (Vis–NIR) y se extrajeron perfiles espectrales medios. Posteriormente, se desarrollaron modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR); modelos completos con el total de las longitudes de onda y optimizados usando longitudes seleccionadas en función de los beta coeficientes. En cada modelo se calcularon los coeficientes de correlación ( $R^2$ ) y la raíz de la media de errores cuadráticos (RMEC). Los resultados muestran que los modelos completos tuvieron  $R^2$  de 0.99 y 0.95 para mezcla a y b respectivamente. Asimismo, los modelos optimizados  $R^2$  de 0.98 y 0.96. En cuanto al RMEC se observó que modelos optimizados, usando 5 y 10 longitudes de onda relevantes, para mezcla a y b mostraron valores de 0.1 a 0.01 en promedio para ambas mezclas. Por tanto; es posible usar este método permite determinar con precisión adulteración en pulpa de mango Criollo con variedades similares como el Kent y Chato de Ica.

**Palabras clave:** Pulpa de mango, adulteración, imágenes hiperespectrales, regresión múltiple.

## Abstract

Mango (*Mangifera indica L.*) pulp shows different sensory attributes according to variety, and price is related to the best sensory acceptability of the product. This motivates the adulteration of Criollo mango pulp with pulp of varieties such as Kent or Chato de Ica; a fact that, due to its similarity, makes its identification difficult, making necessary the development of methods to detect this type of fraud. Therefore, the objective of this research was to determine the potential of hyperspectral imaging (HSI) in transmittance mode coupled to chemometric techniques to detect pulp adulteration of Criollo mangoes with Kent and Chato de Ica. For this purpose, mangoes of three varieties were acquired; pure pulp was obtained, per variety, from which mixtures were prepared (a) Criollo – Kent and (b) Criollo – Chato de Ica, in increasing concentrations of 0 – 100 % of the adulterating variety, distributed in five treatments. Per treatment, 100 transmittance hyperspectral images were obtained in the 400-1000 nm range (Vis–NIR) and mean spectral profiles were extracted. Subsequently, partial least squares regression (PLSR) models were developed; models complete with total wavelengths and optimized using selected wavelengths based on beta coefficients. Correlation coefficients ( $R^2$ ) and root mean squared error (RMEC) were calculated for each model. The results show that the full models had  $R^2$  of 0.99 and 0.95 for mixture a and b respectively. Likewise, the optimized models  $R^2$  of 0.98 and 0.96. As for RMEC it was observed that optimized models, using 5 and 10 relevant wavelengths, for mixture a and b showed values from 0.1 to 0.01 on average for both mixtures. Therefore, it is possible to use this method to accurately determine adulteration in Criollo mango pulp with similar varieties such as Kent and Chato de Ica.

**Key words:** Mango pulp, adulteration, hyperspectral imaging, multiple regression.

# 1. INTRODUCCIÓN

El mango es el fruto de la planta de *Mangifera indica*, proveniente de la India y distribuido a varios países de clima tropical y subtropical. Existen alrededor de 70 géneros y 600 especies (Khalid et al., 2020), de acuerdo a ello, los frutos muestran diferentes formas, colores, tamaños, composición química, sabor y aroma (Tharanathan et al., 2006).

El mango tiene gran demanda a nivel mundial, debido a sus atributos nutritivos y sensoriales, el consumo promedio per cápita es de cinco kg anuales (FAO/OCDE, 2020). Mayoritariamente se consume en fresco; sin embargo, al tratarse de un fruto estacional, es necesario procesarlo para mantenerlo disponible en diferentes épocas del año. El principal subproducto es la pulpa, constituye aproximadamente el 50 % de la masa del fruto (Okino Delgado y Fleuri, 2016), tiene importante contenido nutricional, especialmente en fibra y compuestos bioactivos antioxidantes (Siddiq et al., 2017). La pulpa se utiliza para elaborar una serie de derivados tales como; néctar, zumo, jalea, conserva y otros dulces (Okino-Delgado et al., 2020). La pulpa se cotiza principalmente por sus atributos sensoriales, los mismos que dependen de la variedad, siendo el mango criollo el de calidad preferencial (Coello Salazar, 2013).

En ese contexto, con el incremento de la demanda de pulpa de mango criollo y su cotización relativamente alta en el mercado, surge la adulteración con pulpa de otras variedades de menor valor comercial, como el Chato de Ica y Kent. Esta práctica tiene como objetivo reducir el costo de la materia prima para obtener mayores ganancias, en desmedro de la satisfacción de los consumidores. Aunque este tipo de fraude no tiene efectos adversos sobre la salud, constituye engaño al consumidor, por tanto, es una práctica ilegal (Meerza et al., 2019).

Existen métodos analíticos fiables para la detección de fraude en derivados de fruta, incluido el análisis de ADN (Xu et al., 2020) y cromatografía acoplada a espectrometría de masas (Wistaff et al., 2021). Sin embargo; estas metodologías requieren preprocesamiento de las muestras, uso de reactivos, son exigentes en personal especializado, además de ser relativamente lentas. Como alternativa, las imágenes hiperespectrales (HSI), constituyen una técnica rápida, no destructiva y no requiere el uso de reactivos (Nobari-Moghaddam et al., 2021), además, han demostrado potencial para la detección de fraude en alimentos (Lohumi et al., 2015).

Estudios precedentes abordaron la adulteración de pulpa de frutas con otras sustancias incluída

el agua, almidón y jarabe de sacarosa (Basantia, 2018); sin embargo, no se ha explorado suficientemente la adulteración con pulpa de otras variedades más baratas. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de proporción de mezclas binarias de variedades de mango en el perfil espectral de pulpa, como método rápido y no invasivo para detectar la adulteración de la pulpa del mango criollo con sus similares; kent y chato de Ica.

## 1.1. Mango

La planta de mango (*Mangifera indica L.*), es un árbol leñoso, perenne, de gran tamaño, que crece habitualmente en zonas intertropicales, pertenece a la orden *Sapindales*, familia *Anacardaceae*, su clasificación taxonómica se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
*Clasificación taxonómica del mango*

Categoría	Denominación
Nombre científico	<i>Mangifera indica L.</i>
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Subdivisión	Magnoliophytina
Clase	Rosidae
Orden	Sapindales
Familia	Anacardaceae
Género	Mangifera
Especie	<i>Mangifera indica L.</i>

*Nota.* La tabla 1 muestra la taxonomía del mango *Mangifera Indica L.*, donde se detalla las diferentes categorías y su respectiva denominación, adaptado de Flores (2014).

El fruto de *Mangifera indica L.* tiene una forma ovoide, el color de la piel varía entre verde, amarillo y una ligera tonalidad rojiza denominada comúnmente como “*chapa*”. La pulpa es blanda y viscosa con color variable tornándose de amarillo claro a naranja intenso a medida que avanza su estado de madurez. El fruto maduro tiene un sabor dulce, mientras que en

estado verde su sabor es ácido y astringente. En general, el fruto maduro es dulce, fibroso y jugoso, su tamaño y peso es variable, en promedio su longitud es de 12 cm y su peso de 350 g (Tharanathan et al., 2006).

El mango es un producto agrícola representativo de la región Piura - Perú. Se cultivan diversas variedades que provienen de plantas francas y mejoradas; las plantas francas (poliembriónico y no injertado), como el Chato de Ica, Rosado de Ica y Criollo de Chulucanas son utilizadas principalmente para la producción de jugos, concentrados y pulpas y son exportados a Europa; mientras que, las variedades mejoradas (monoembrionarias e injertadas), como Tommy Atkins, Kent, Edward y Haden son exportadas generalmente en fresco (Mayorga Triviño, 2020).

En el presente estudio se utilizaron tres variedades de mango; criollo, Chato de Ica y Kent, los mismos que se describen en las subsecciones siguientes.

#### ■ **Mango criollo de Chulucanas**

Esta variedad pertenece al tipo de plantas francas (no injertadas y poliembriónicas), su fruto es de tamaño relativamente pequeño, presenta coloración amarilla, cáscara amarilla gruesa, este fruto es de forma ovoide u ovalado, su pulpa es fibrosa de color amarillo y sabor dulce. El peso de este fruto varía entre 100 a 190 g individualmente (Correa Ramirez, 2019). La época de cosecha comprende el periodo de enero a marzo, esta variedad se destina a la producción de concentrados y extractos y se comercializa en el ámbito nacional. Asimismo, se emplea para la elaboración de pulpas, las cuales se exportan principalmente al mercado Europeo (Anticona Cabellos y Torres Diaz, 2020).

#### ■ **Mango Chato de Ica**

El mango de variedad Chato de Ica pertenece al tipo de plantas francas (no injertadas y poliembriónicas), es un fruto mediano de color amarillo anaranjado con chapa roja, cáscara gruesa, la forma que presenta este fruto es oblonga-oval redondeada, su pulpa es de sabor dulce y de poca fibra. El peso de este fruto varía de 280 a 450 g en comparación con otros frutos. (Minaya, 1999). Su ciclo de cosecha es de diciembre a principios de marzo, esta variedad viene siendo utilizada como materia prima para la obtención de jugos concentrados y pulpa, los cuales se exportan en su mayoría a Europa (Herrera Garay, 2016).

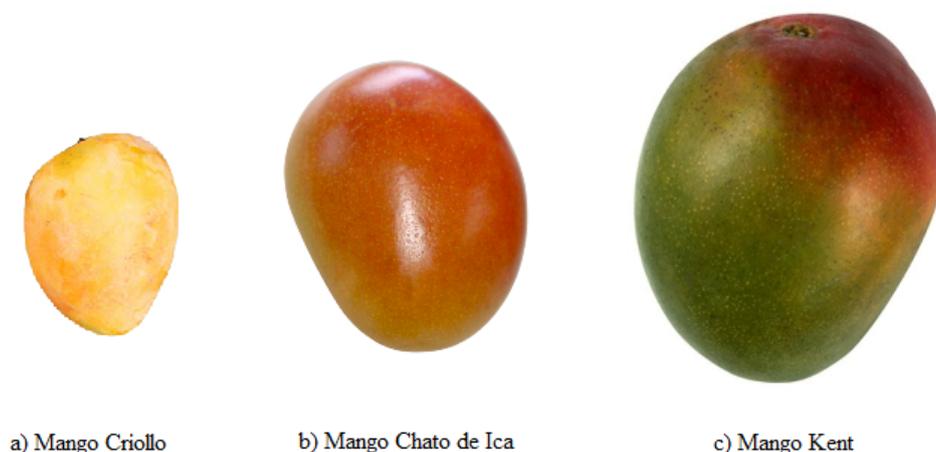
## ■ Mango Kent

El mango Kent es una variedad injertada, su fruto es relativamente grande, su coloración se torna entre amarillo anaranjado con tonalidades rojizas conocida como “chapa”, la cual se aprecia en la madurez. El mango Kent se caracteriza por su cáscara resistente lo cual le permite soportar el tratamiento hidrotérmico (45 °C) con el fin de eliminar huevos de mosca de la fruta (Encalada Rojas, 2017), la forma que presenta este fruto es ovalada orbicular, el sabor de su pulpa es dulce, deleitoso, de textura jugosa con poca fibrosidad. El peso del mango Kent varia de 500 a 800 g en comparación con otras variedades. Dicha Variedad es semi-tardía y su temporada de producción se da en el mes setiembre, terminando en el mes de Diciembre (Artica Arroyo, 2008), se utiliza para consumo interno y es una de las variedades mas comerciales, siendo exportadas principalmente en fresco a Estados unidos y Canada (Garcia et al., 2005).

Las características físicas externas que diferencian las variedades utilizadas en el presente estudio se muestran en la Figura 1

### Figura 1

*Características morfológicas externas de las variedades de mango estudiadas.*



*Nota.* Esta figura representa las características morfológicas de las diferentes variedades de mango *Mangifera Indica L.* utilizadas en este estudio, viéndose que cada variedad se diferencia en tamaño y aspecto.

## **1.2. Pulpa de mango**

La pulpa de fruta es un producto suave, viscosa y cremosa, sin disolver, ni haberse sometido a proceso de concentración, ni fermentación, se obtiene por la disgregación y tamizado de la parte comestible de los frutos, maduros, limpios y sanos ( Falquez Muy y Ubilla González, 2010), es un producto popular en la industria alimentaria, resalta por su aporte alto en fibra dietética y compuestos bioactivos antioxidantes; debido a sus atributos sensoriales y su gran popularidad, se destina como materia prima para la elaboración de productos derivados, por ejemplo; néctar, jugo, mermelada, jalea y zumos (Siddiq et al., 2017).

La pulpa de mango es una fuente valiosa de macro y micronutrientes tal como se muestra en la Tabla 2. Por cada 100 g de pulpa proporciona aproximadamente 63.5 calorías, 0.7 g de proteína, 1.76 g de fibra dietaria total (principalmente fibra soluble) y 156 mg de potasio, entre otros elementos. Respecto a sus micronutrientes, todas las variedades de mango consituyen una buena fuente de vitaminas como la vitamina A,B,C,E, entre otras, siendo la vitamina C (VitC), la que se presenta en cantidades mayores con un aporte aproximado de 28 mg por cada 100 g de pulpa, cantidad suficiente para cubrir el 45 % del requerimiento diario recomendado en consumidores de 19 a 50 años (Wall-Medrano et al., 2015).

## **1.3. Importancia económica**

En el 2019, se reportaron 29 mil hectáreas de mango en producción, de las cuales el 69 % aproximadamente se encuentran localizadas en la región Piura. El volumen de las exportaciones para ese mismo periodo bordeó las 233 mil TM, lo cual significó ingresos por USD 258 millones lo que ubica al Perú entre los cinco principales exportadores de mango fresco a nivel mundial, por debajo de Tailandia, México, Países Bajos y Vietnam, mostrando un crecimiento del 37 % frente a las 170 mil TM exportadas en la campaña precedente (2018/2019).Las exportaciones del mango peruano se destinan principalmente a los mercados de; Países Bajos (37 %), Estados Unidos (24 %), España (9 %), Corea del Sur (6 %) (Mayorga Triviño, 2020). Tal como se muestran en la Figura 2.

Durante lo últimos años el Perú ha presentado crecimiento sostenido en la producción e ingresos de mango, tal como se muestran en las Figuras 3 y 4; evolucionando constantemente las

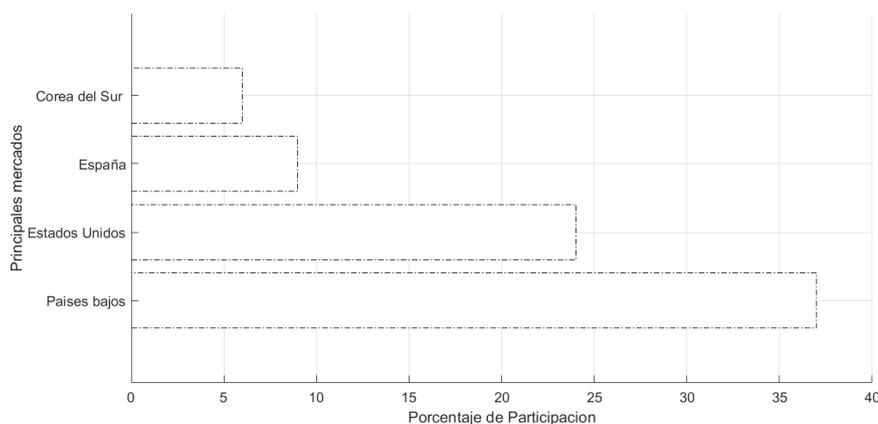
**Tabla 2**

*Información nutricional de macronutrientes y micronutrientes en pulpa de mango.*

Componentes	Unidad	Cantidad
Energía	kcal/100 g	63.5
Agua	g/100 g	83.1
Proteínas	g/100 g	0.7
Lípidos	g/100 g	0.2
Carbohidratos	g/100 g	13.6
Azúcares	g/100 g	13.1
Almidón	g/100 g	0.3
Fibra	g/100 g	1.76
Vitamina A	µg/100 g	54
Vitamina B1	mg/100 g	0.058
Vitamina B2	mg/100 g	0.057
Vitamina B3	mg/100 g	0.717
Vitamina B6	mg/100 g	0.134
Vitamina B9	µg/100 g	14
Vitamina C	mg/100 g	27.7
Vitamina E	mg/100 g	1.12
Calcio	mg/100 g	10
Fósforo	mg/100 g	11
Magnesio	mg/100 g	9
Hierro	mg/100 g	0.13
Potasio	mg/100 g	156
Zinc	mg/100 g	0.04

*Nota.* La Tabla 2 muestra la información nutricional de pulpa de mango *Mangifera Indica L.*, donde se detalla la cantidad de macronutrientes y micronutrientes por cada 100 gr de pulpa. Tomado de USDA (2018).

**Figura 2**  
*Participación de los principales países exportadores*



*Nota.* Esta figura muestra los porcentajes de participación de los principales países exportadores de mango, donde los países bajos son el principal destino de exportación con 37 %.

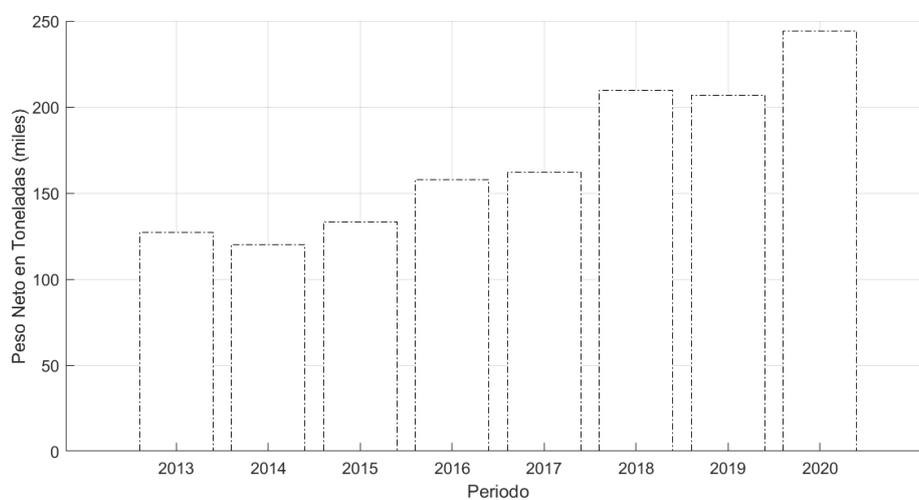
cifras de exportación en toneladas de mango fresco cuya producción en 2013 fue de 127,86 toneladas, mientras que en el año 2020 se registró 244,308 toneladas exportadas, con tendencia ascendente en volumen e ingresos económicos. El precio de mango tiene comportamiento muy variable en cada campaña, lo cual no necesariamente se asocia al volumen exportado, pues está más asociado a la oferta mundial (Campos Gomez y Martinez Roque, 2019).

#### **1.4. Técnicas empleadas en la detección de adulteración de alimentos**

Se han usado técnicas como espectroscopia de masas y cromatografía líquida de alto/ultra rendimiento, puesto que son herramientas eficaces para detección de adulterantes específicos e identificar adulteración de alimentos (Wistaff et al., 2021); también se han utilizado técnicas como análisis de ADN (Xu et al., 2020). No obstante, estas son relativamente lentas, costosas y generan residuos. Por lo que, surgen como alternativa las imágenes hiperespectrales ya que son técnicas rápidas, seguras, no destructivas, no causan residuos tóxicos, son más económicas y cuidadosas con el ambiente, en comparación con los métodos tradicionales. Asimismo, se han aplicado con éxito para identificar adulteración de alimentos y controlar el proceso de producción en miel por reflectancia y transmitancia (Alamprese et al., 2016; Shafiee et al., 2016; Shao et al., 2022), leche de cabra adulterada, (dos Santos Pereira et al., 2022) entre otros.

**Figura 3**

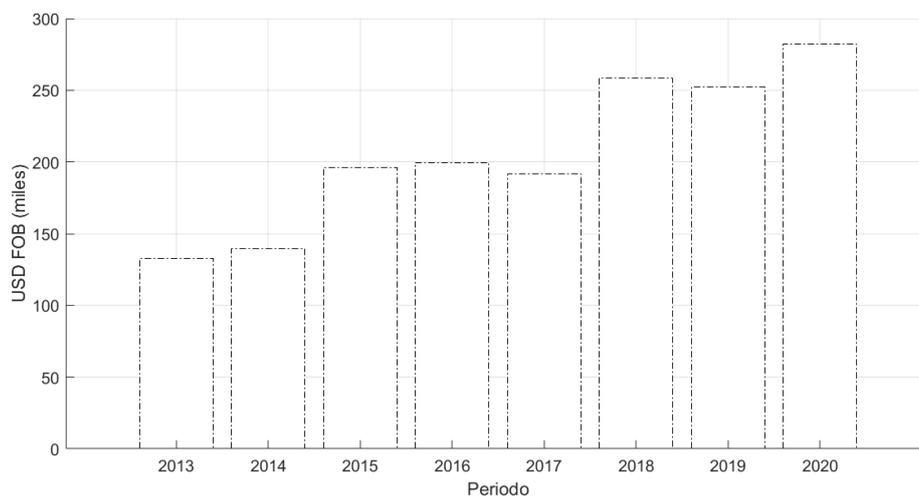
*Exportación de mango peruano durante el periodo del 2013 al 2020*



*Nota.* Esta figura muestra los miles de toneladas de mango que fueron exportadas durante el periodo 2013-2020, donde se muestra que la mayor exportación fue durante el año 2020.

**Figura 4**

*Exportación de mango peruano en valores USD durante el periodo 2013-2020*



*Nota.* Esta figura representa el ritmo de crecimiento de exportación de mango en USD FOB (Miles) que fueron exportadas durante el periodo 2013-2020, donde se muestra que la exportación continua en aumento durante este periodo.

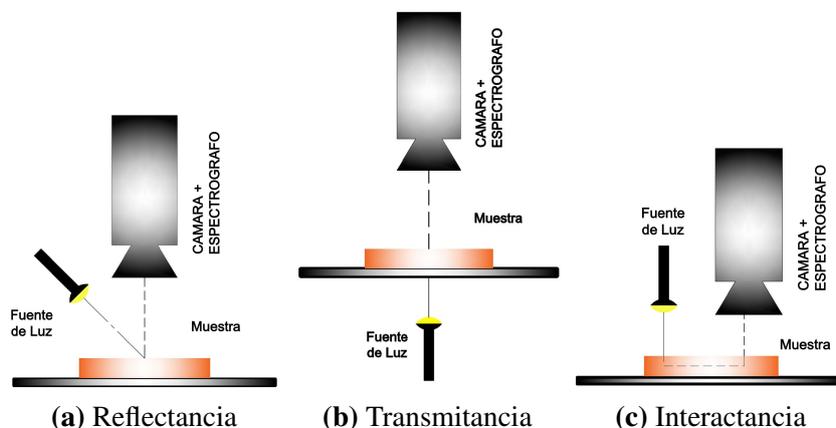
## 1.5. Fundamento de la técnica de imágenes hiperespectrales

La industria alimentaria ha aplicado ampliamente la tecnología de imágenes para evaluación de calidad y seguridad de alimentos (Mabood et al., 2020). Dicha tecnología permite extraer y analizar la información contenida en el modo espacial (bidimensional) y espectral de acuerdo a las longitudes de onda (unidimensional). Las imágenes espectrales permiten obtener gran cantidad de información sobre una muestra, cada píxel constituye un espectro completo, formado por capas igual al número de longitud de ondas captadas por el sensor (mayores a 100), para extraer y analizar esta información, es necesario hacer uso de herramientas quimiométricas (Amigo et al., 2013).

La adquisición de imágenes hiperespectrales puede realizarse por 3 modalidades; reflectancia, transmitancia e interactancia, las mismas que se muestran en la Figura 5 (Prats-Montalbán et al., 2011).

- **Reflectancia** El sensor capta la luz que refleja la muestra desde el mismo lado donde se ubica la fuente de luz. Este modo ayuda a obtener características de calidad externa tales como, textura, color, forma y defectos.
- **Transmitancia** El sensor capta la luz que transmite la muestra, llevando información interna, dicha información es utilizada generalmente para determinar los componentes internos y la concentración de defectos de objetos relativamente transparentes tales como verduras, frutas y pescado.
- **Interactancia** El sensor y la fuente de luz se colocan paralelos entre sí y en el mismo lado de la muestra. Este modo identifica información de la muestra más profunda y tiene menos efecto de superficie en comparación con el modo de reflectancia (Castro, 2015).

**Figura 5**  
*Modos de detección de imágenes hiperespectrales*



*Nota.* Esta figura representa los tres modos de detección de imágenes hiperespectrales los cuales son: reflectancia, transmitancia e interactancia. Adaptado de Castro (2015).

## 1.6. Quimiometría

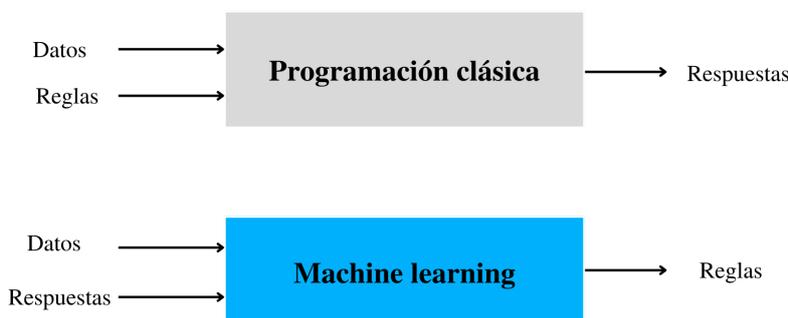
La quimiometría hace referencia a los métodos estadísticos y matemáticos empleados para la extracción, optimización y análisis de información relevante a partir de una gran cantidad de datos. Los datos espectrales obtenidos de un alimento comprenden propiedades químicas, básicamente relacionadas con los enlaces O-H, C-H, N-H y S-H (Marini, 2013). El análisis quimiométrico implica uso de estadística multivariante, puesto que requiere el análisis paralelo de una o más variables dependientes en relación a dos o más variables independientes. Los métodos quimiométricos más usados en la evaluación de calidad de alimentos son las redes neuronales artificiales (ARN, por sus siglas en inglés), análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés), el análisis discriminante (DA, por sus siglas en inglés) y la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR, por sus siglas en inglés). Estos métodos generalmente requieren operaciones de pretratamiento como escalado y normalización para evitar el sesgo en los datos sin alterar significativamente la calidad de la información. La quimiometría aplicada al análisis de alimentos, permite resolver problemas de autenticidad, calidad e inocuidad alimentaria (Granato et al., 2018).

El Aprendizaje Automático es una rama de la Inteligencia Artificial, donde las máquinas son

entrenadas para “aprender” por sí solas, sin necesidad de ser programadas por usuarios. El entrenamiento consiste en analizar datos históricos denominados “datos de entrenamiento”, el algoritmo de Aprendizaje Automático genera patrones a través de los cuales aprender y reconoce nuevos datos para predicciones futuras (Ramiro y Alvarado, 2018). A diferencia de la programación clásica, que requiere de una serie de instrucciones diseñadas por usuarios para obtener datos de salida que se alineen a dichas reglas a partir de los datos de entrada.

En cambio, el Machine Learning, genera el conjunto de reglas más efectivas para relacionar los datos de entrada con las salidas que se espera obtener a través del proceso de aprendizaje de la máquina, tal como se muestra en la Figura 6. La virtud del Machine Learning radica en que puede aplicarse a diversos datos de entrada para producir salidas generadas automáticamente durante el entrenamiento y no por la interacción con usuarios (Chollet, 2017).

**Figura 6**  
*La programación clásica frente al Machine Learning*



*Nota.* Esta figura representa la diferencia que existe entre programación clásica y el machine learning. Adaptado de Maisueche Cuadrado et al. (2019).

## 1.7. Antecedentes

En relación al problema tratado, se encontraron los siguientes estudios:

Shafiee et al. (2016) utilizaron imágenes hiperespectrales en modo de transmitancia para determinar la adulteración en miel de abeja. Un conjunto de mieles, que incluía 28 muestras de

miel pura, fueron submuestreadas y luego adulteradas con soluciones adulterantes de fructosa-glucosa en cuatro niveles; 10, 20, 30 y 50 p/p, capturando imágenes hiperespectrales de muestras adulteradas y puras usando una cámara hiperespectral VIS-NIR (400 - 1000 nm). Después de pre procesar las imágenes, aplicaron cinco técnicas diferentes basadas en minería de datos, incluida redes neuronales artificiales (ANN), máquinas de vectores de soporte (SVM), análisis discriminante lineal (LDA), clasificadores Fisher y Parzen para la clasificación de imágenes supervisada. Los resultados de la prueba del clasificador mostraron mayor precisión de clasificación del 95 % para el clasificador ANN. Otros clasificadores, incluidos SVM con función de núcleo de base radial (92 %), LDA (90 %), Fisher (89 %) y Parzen con tasa de clasificación correcta del 84 %, también mostraron resultados aceptables.

Caramês et al. (2019) realizaron una investigación cuyo objetivo fue detectar y distinguir la pulpa de açaí adulterada con 5 %, 10 %, 20 % y 40 % p/p de harina de yuca, tapioca, trigo. También utilizaron emulsionante para adulterar la pulpa de acai, utilizando valores más bajos (1 %, 2,5 %, 5 % y 10 % p/p) y comparar el rendimiento de mediante espectros NIR y MIR para esta aplicación. Los modelos validados presentaron alto porcentaje de especificidad y sensibilidad; los modelos MIR construidos con PLS-DA presentaron una especificidad y sensibilidad del 100 % en dos de cinco clases, y se observó el mismo rendimiento para los modelos NIR con KNN y PLS-DA. Ambas técnicas lograron distinguir las muestras auténticas de las adulteradas y también pudieron identificar el tipo de todos los adulterantes en las muestras.

Bázár et al. (2016) realizaron un estudio para detectar adulteración de cuatro mieles de Robinia artesanales usando jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) como adulterante, en proporciones de 0 a 40 %, se evaluaron usando técnica de espectroscopia (NIR), los espectros de infrarrojo cercano (NIR) se registraron con una sonda de inmersión de fibra óptica. Los niveles de adulteración de JMAF podrían detectarse con precisión mediante la validación cruzada ( $RMSE_{CV} = 1,48$ ;  $R_{CV}^2 = 0,987$ ), regresión de mínimos cuadrados parciales y el 1300–1800 intervalo espectral nm que contiene bandas de absorción relacionadas tanto con el agua como con los carbohidratos. Se determinó que la espectroscopia NIR rápida y no destructiva combinada con acuafotónica podría usarse para describir las estructuras moleculares del agua en la miel y detectar una forma bastante común de adulteración de la misma.

Shao et al. (2022) usaron imágenes hiperespectrales en modo de reflectancia combinadas con

técnicas quimiométrica para detectar la adulteración de la miel, y se estableció el modelo de adulteración LIBSVM (Library for support vectory, por sus siglas en inglés), el modelo de predicción del nivel de adulteración PLSR. La precisión de clasificación de LIBSVM para la adulteración de la miel fue del 92,5 %, demostraron que el modelo LIBSVM tenía buena capacidad de predicción para la detección de la adulteración de la miel. La precisión de validación del modelo de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) fue de 0,84 y el error cuadrático medio (RMSE) de validación fue de 5,26 % . Por lo tanto, se determinó que el uso de estas tecnologías son eficientes para detectar la adulteración de la miel mediante imágenes hiperespectrales.

Los antecedentes previamente mostrados permiten deducir que la búsqueda de detección de efectos de proporción de mezclas binarias de pulpa mango (*Mangifera indica L.*) de sus diferentes variedades en el perfil espectral del producto no ha sido adecuadamente explorado y en consecuencia este trabajo permitirá llenar un espacio existente en la actualidad y con repercusión industrial importante.

## **1.8. Realidad problemática**

La industria alimentaria requiere de técnicas e instrumentos de detección rápida de adulteración en materias primas e insumos en la línea de producción (Engo et al., 2015). La adulteración de un producto puede ser realizada cambiando parcialmente su concentración con productos de menor valor económico o productos que presentan características similares a la materia prima inicial; un ejemplo de esto, es la adulteración del producto original de una variedad específica con variedades distintas, como se da en la producción de vinos, donde la variedad de uva es importante por las características organolépticas que se busca obtener en el producto final. En este rubro, suele suceder que los vinos son elaborados con diferentes variedades de uvas, reemplazando la variedad específica y deseada por uvas de variedades más abundantes y más baratas reduciendo los costos de producción, con fines de lucro (de Lima et al., 2020; Herrera Garay, 2016).

Otro caso simbólico en este tipo de fraude es el de la miel, frecuentemente adulterada con jarabe de fructuosa (Shao et al., 2022; Shafiee et al., 2016), aceites insaturados sustituidos parcialmente con aceites de menor calidad que presentan características similares a la materia

prima inicial pero no es lo que promete en su etiqueta final (Rifna et al., 2022; Wang et al., 2022; Zhang et al., 2017).

Es evidente el interés por desarrollar métodos rápidos, fiables y no invasivos para la detección de este tipo de fraude. Sin embargo, después de la revisión de la literatura científica actual se ha observado que no existen estudios sobre la detección de adulteración de pulpa de mango usando tecnologías no invasivas, como técnicas de imágenes hiperespectrales, en modo de transmitancia. Por lo antes mencionado el presente proyecto pretende determinar si es viable el uso de esta técnica para identificar la adulteración de las mezclas binarias de pulpas de mango.

En base a la situación problemática previamente mencionada se propone el siguiente problema de investigación: ¿Cuál es el efecto de proporción de mezclas binarias de pulpa mango (*Mangifera indica L.*) de sus diferentes variedades en el perfil espectral del producto?

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Materia prima**

Se recolectaron frutos maduros de 3 variedades de mango (*Mangifera indica L.*); Criollo de Chulucanas (40 kg), Kent (50 kg) y Chato de Ica (25 kg). Se recolectaron frutos maduros y en condiciones de buena calidad.

Los frutos fueron recolectados de un predio agrícola ubicado en el distrito de Tambogrande, provincia de Sullana y departamento de Piura, (UTM: -4.895359 y -80.342439). La ubicación geográfica se muestra en la Figura 7.

### **2.2. Materiales e insumos de laboratorio**

Se emplearon los siguientes materiales para la elaboración y análisis de pulpa de mango:

**Figura 7**

*Localización geográfica de la zona de recolección de muestras en el distrito de Tambogrande, Piura, Perú*



*Nota.* En esta figura muestra la localización geográfica de la zona donde se recolectaron las muestras de mango utilizadas para el presente estudio. Adaptado de Juárez-Noé y González-Coronado (2020).

## Insumos de laboratorio

- Ácido ascórbico al 0.04 % (Anhydrous, Perú).
- Ácido cítrico al 0.3 % (Anhydrous, Perú).
- Sorbato de potasio al 0.1 %, (JOFSAC, Perú).

## 2.3. Equipos

- Balanza de precisión (HWA-S, China, Max 220 g, Min 0.01 g, e= 0.001 g, d= 0.0001)
- Balanza digital (AND FX3000i, Corea, Max 3200 g, d= 0.01 g)

- Congeladora (Electrolux EFUP222HRG, China)
- Colorímetro (ShenZhen FRU WR-10QC, China)
- Potenciómetro digital portátil (Hanna HI910, Italia)
- Refractómetro digital portátil (Atago, Japón)
- Sistema de imágenes hiperespectrales (Specim FX10, Finlandia)

## 2.4. Metodología

La metodología aplicada en el presente trabajo de investigación se resume en la Figura 8, desde la obtención de pulpas hasta aplicación del modelo de análisis de datos, la misma que se detalla en las subsecciones siguientes.

## 2.5. Obtención de pulpa

### ■ Recolección de muestras

Los frutos de las tres variedades de mango; Criollo, Kent y Chato de Ica, fueron adquiridos en un mercado local, ubicado en el distrito de Tambogrande, provincia y departamento de Piura, Perú. Inmediatamente se transportaron al Laboratorio de Inocuidad de Alimentos de la Universidad Nacional de Frontera para su procesamiento dentro de las 24 horas siguientes.

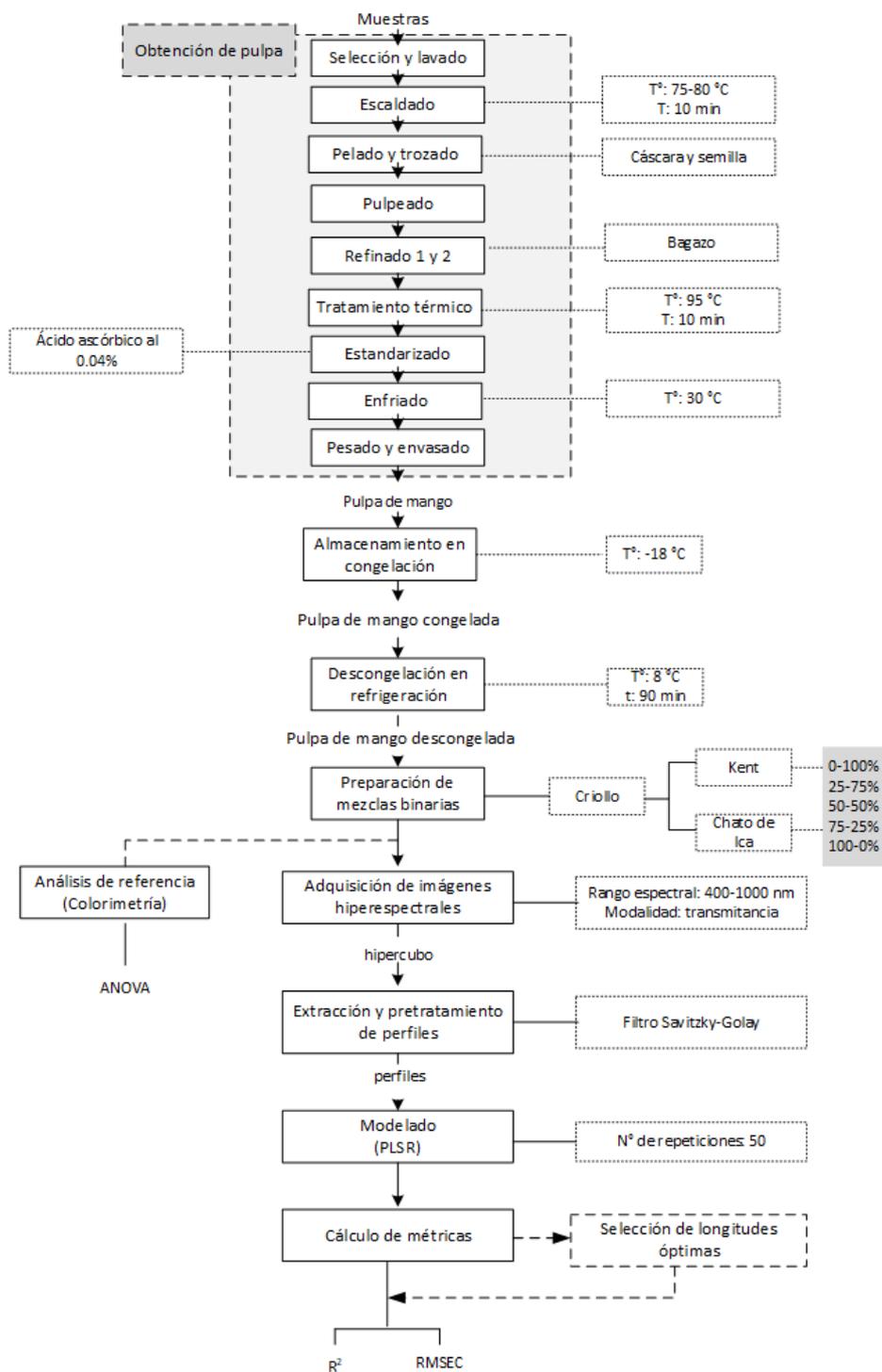
### ■ Selección y lavado

Se recibió la materia prima en un lugar amplio, limpio, libre de roedores, insectos, animales u otro que pudo causar daño. La fruta se procesó dentro de las 24 horas de haber recepcionado la materia prima.

Se seleccionó las frutas con las siguientes características:

- Maduración verificada por coloración externa y textura ligeramente firme.
- Sin daños mecánicos o por insectos.
- Textura y color uniformes y características del fruto.

**Figura 8**  
*Esquema de la metodología experimental*



*Nota.* Esta figura representa la metodología experimental que se utilizó para la elaboración del presente estudio.

- PH de 3,5 a 4.0
- El valor mínimo de sólidos solubles (13°Brix).

Posteriormente se realizó un primer lavado con agua potable a fin de eliminar el polvo y otras impurezas físicas presentes en el fruto. Luego se realizó un segundo lavado con el objetivo de disminuir la carga microbiana.

#### ■ **Escaldado**

Esta etapa se realiza con el fin de:

- Ablandar la materia prima para despulpar fácilmente.
- Disminución de recuentos microbianos.
- Eliminación del aire atrapado dentro de la fruta.
- Eliminación de olores y sabores indeseables.
- Fijar el color.
- Inactivar enzimas.

Se realizó sumergiendo la fruta en agua hirviendo (inmersión), por 10 minutos; hasta que la temperatura alcanzó 75-80 °C.

#### ■ **Pelado y trozado**

En esta parte del proceso se separó la cáscara y semilla de la pulpa de mango; realizando esta manualmente. Los trozos de mango fueron colocados en fuentes de acero inoxidable limpias, y llevados a la pulpadora o licuadora.

#### ■ **Pulpeado**

La fruta se sometió a un proceso de disminución de tamaño, para obtener un puré de frutas, haciendo uso de una licuadora o pulpeadora. La materia que se separó de la pulpa se recibió en recipientes de acero inoxidable y se separó del proceso.

#### ■ **Refinado 1 y 2**

Para obtener un puré de mango fino, se recomienda tamizar el puré haciéndolo pasar por un colador con mallas muy finas, asegurando la eliminación de las fracciones no

deseadas; se realizó otro refinado con el fin de separar completamente el bagazo del pure fino, listo para procesar.

#### ■ **Tratamiento térmico**

La pulpa de mango fue sometida a un tratamiento térmico adecuado con el fin de evitar el deterioro microbiológico y químico.

Dicho tratamiento consistió en aplicar calor hasta que el centro de la pulpa que fue colocada en una cocina de convección semi industrial alcance los 95 °C, manteniendo esta temperatura durante 10 minutos. La agitación es muy importante a lo largo de este proceso.

#### ■ **Estandarizado**

Para lograr prolongar la vida útil de las pulpas de mango se aplicó aditivos alimentarios tales como el ácido cítrico al 0.3 % cuya función es actuar como acidulante para la reducción del pH con el fin de evitar crecimiento microbiano. También tenemos como conservante sorbato de potasio al 0.1 %. Otro aditivo recomendado es el ácido ascórbico al 0.04 %, debido a que éste actúa como antioxidante y logra evitar que el producto final cambie de color (oscurecimiento); además de ayudar a combatir levaduras y hongos. Dichos aditivos se adicionaron minutos antes de culminar el tratamiento térmico, cinco minutos aproximadamente y se disolvieron en una pequeña cantidad de pulpa, la que posteriormente se vertió en el resto de la pulpa agitando frecuentemente con el fin de homogenizar el producto. De tal manera que los grados Brix de la pulpa de mango final estuvieran entre los valores de 13 a 16 y pH de 3,4 a 3,5.

#### ■ **Enfriado**

Este enfriamiento se realizó con agua potable a una temperatura aproximada de 4° C, con el fin de dar un shock térmico a las pulpas de mango, llevándolas a una temperatura de 30° C y así eliminar todo tipo de microorganismos, otorgando así una pulpa inocua y de mejor calidad.

#### ■ **Pesado y envasado**

Se pesó y se envasó la pulpa en bolsas de polietileno con capacidad para 500 g. de primer uso y con cierre hermético.

Luego, se procedió a etiquetar cada bolsa de pulpa de acuerdo a la variedad (Criollo de Chulucanas, chato de Ica o Kent), se registró la fecha de envasado y el peso bruto en gramos.

#### ■ Almacenamiento en congelación

Se procedió a almacenar la pulpa envasada y etiquetada en una congeladora (Electrolux EFUP222HRG, China) a temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ .

#### ■ Descongelación

Las muestras de pulpa congelada se sometieron a un proceso de descongelación lenta, usando un refrigerador (Daewoo FR120RB, China) programado a temperatura de  $8^{\circ}\text{C}$ , por 90 minutos.

#### ■ Preparación de mezclas binarias

La preparación de las mezclas binarias Criollo-Kent y Criollo- Chato de Ica se realizó en vasos precipitados de 200 ml y se realizaron los cálculos correspondientes en porcentajes de adulteración (0-100;25-75;50-50;75-25;100-0), se obtuvieron un total de nueve mezclas binarias, cada mezcla se codificó en base a su variedad y porcentaje de adulteración tal como se muestra en la Figura 9.

**Figura 9**

*Mezclas binarias en diferentes concentraciones*

	C1	C2	C3	C4	C5
Criollo	100%	75%	50%	25%	0%
Adulterante	0%	25%	50%	75%	100%

*Nota.* Esta figura muestra los porcentajes usados para adulterar la pulpa de mango criollo de Chulucanas con otras variedades como lo fueron Chato de Ica y Kent.

## ■ Análisis de referencia (colorimetría)

Se utilizó colorimetría para evaluar las variaciones de color en la pulpa de mango criollo adulterada con pulpa de las variedades Kent y Chato de Ica; puesto que una de las cualidades más importantes de los alimentos es el color. Para la mayoría de los consumidores, el color es un factor importante que determina su aceptación (Durán et al., 2012).

Las determinaciones de colorimetría se realizan con instrumentos sencillos, llamados colorímetros, que realizan las mediciones de color a partir de valores triestímulos; necesitan una fuente de luz (luz blanca), tres filtros que duplican la respuesta del ojo humano y un sistema detector (Meléndez-Martínez et al., 2007).

La medición del color puede representarse mediante normas internacionales, la Commission Internationale del Éclairage (CIE), ha establecido una nomenclatura conocida como sistema CIE, incluyendo CIE XYZ, CIE L\*C\*h, y CIE L\*a\*b\*, para expresar y comunicar el color de manera objetiva.

El espacio de color L\*a\*b\* se modeló en base a la teoría de colores opuestos, dicha teoría nos indica que dos colores no pueden ser verde y rojo a la vez o azul y amarillo juntamente (Aramburo y Figueroa, 2016).

A continuación se muestra los significados de la nomenclatura del color donde L\* indica la luminosidad y a\* y b\* son las coordenadas cromáticas.

L\*=luminosidad

a\*= coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde)

b\* = coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul)

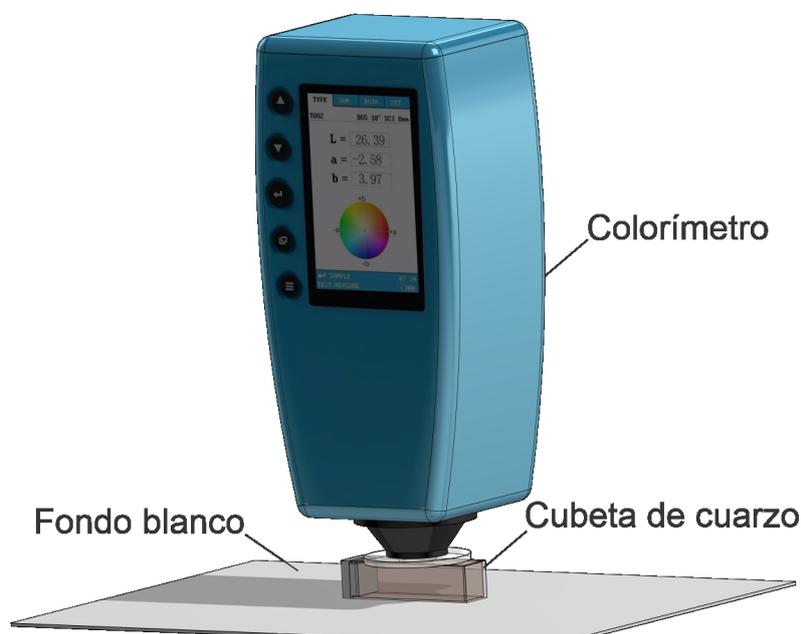
Para medir el color en las pulpas de mango se utilizó un colorímetro de modelo WR-10QC (China), previamente calibrado, las determinaciones de color en pulpa de mango adulterada y los parámetros de color se expresaron en unidades CIE L\*a\*b\* usando iluminante D65 y un ángulo de observación de 10°.

Para realizar la correcta medición se colocaron las muestras adulteradas en cubetas de cuarzo de 3.5 ml sobre un fondo blanco, se colocó el colorímetro en el centro de la cubeta que contenía la pulpa adulterada y se procedió a realizar la lectura, el valor de las coordenadas L\*a\*b\* fueron registradas en una tabla en excel para su posterior análisis.

Tal como se muestra en la Figura 10.

### Figura 10

*Medición de colorimetría en pulpas de mango adulteradas*



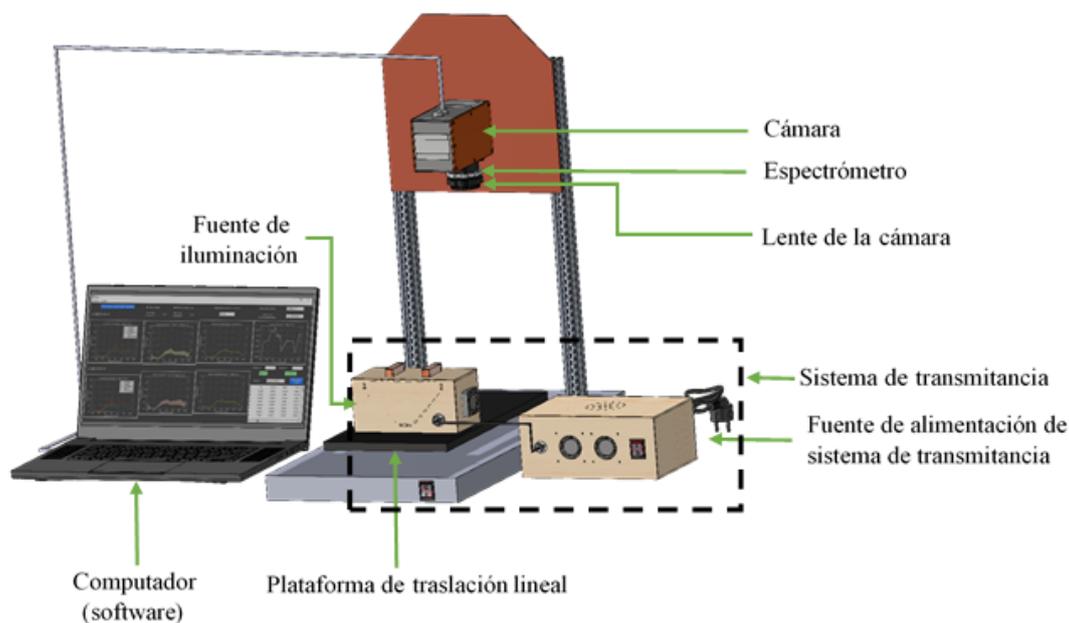
*Nota.* Esta figura muestra los elementos para medición de colorimetría en pulpas de mango adulteradas.

## 2.6. Adquisición de imágenes hiperespectrales modo transmitancia

Para la captura de imágenes se utilizó un sistema de imágenes hiperespectrales de escaneo lineal, en modo transmitancia, integrado por; cámara hiperespectral (Specim Fx10, Finlandia) con rango de longitud de onda de 400 a 1000 nm. (VIS-NIR), sistema de iluminación compuesto por fuente de alimentación conmutada (220 VAC-12VDC/20A) que abastece a 2 lámparas halógenas (12VDC/4.5A), plataforma portamuestra móvil y ordenador personal con sistema operativo Windows 10 y aplicativo Lunmi scan. Los elementos del sistema HSI se indican en la figura 11 .

**Figura 11**

*Sistema de imágenes hiperespectrales modo transmitancia y sus elementos*



*Nota.* Esta figura muestra el sistema de imágenes hiperespectrales y sus elementos en modo de detección de transmitancia, equipo que fue utilizado para el desarrollo del presente estudio.

## 2.7. Extracción y pretratamiento de los espectros

Las imágenes hiperespectrales son una gran fuente de información. Debido a las altas dimensiones de los datos, las imágenes hiperespectrales tienen una alta carga computacional (Sánchez Bernabé, 2016), para resolver estos problemas, primero se deben realizar las correcciones adecuadas para determinar la transmitancia de la escena a partir de la radiancia. La corrección de las imágenes se realizó mediante la Ecuación 1

$$R_c = \frac{R - R_D}{R_W - R_D} \quad (1)$$

Donde:

$R_c$  = imagen hiperespectral corregida en transmitancia relativa

$R$  = imagen hiperespectral en bruto

$R_D$  = imagen en negro

$R_w$  = imagen de referencia en blanco.

Se extrajeron los perfiles medios y se suavizaron con el filtro Savitzky-Golay de segundo orden con una longitud de diez pasos para eliminar el ruido espectral.

## **2.8. Modelado (PLSR)**

Se aplicaron modelos de aprendizaje supervisado, utilizando un modelo de predicción para el reconocimiento de patrones que permitan obtener las salidas deseadas. Se desarrollaron modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR).

La regresión PLSR es un método que generaliza y acopla características de la regresión múltiple y del análisis de componentes principales, es especialmente útil cuando necesitamos predecir un grupo de variables dependientes a partir de un conjunto muy grande de variables independientes; es decir, predictores (Abdi, 2003).

Dicho método de análisis de datos constituye un instrumento de gran utilidad en la química analítica, es especialmente relevante para el tratamiento de datos de alta dimensión, principalmente cuando el número de variables explicativas excede el número de muestras (Metz et al., 2021).

El desarrollo de este modelo requiere un proceso de entrenamiento con un conjunto de variables predictivas ( $K$ ), cada variable contiene ( $N$ ) muestras (también llamadas observaciones) y el correspondiente conjunto de valores objetivo,  $M$  (también llamados respuestas o salidas del proceso). Durante este proceso de entrenamiento, las variables predictivas adoptan la forma de una matriz  $X$  con la dimensión  $[K \times N]$ , mientras que la(s) respuesta(s) está(n) representada(s) por una matriz  $Y$  con la dimensión de  $[M \times N]$  (Elsamahy et al., 2021).

## **2.9. Cálculo de métricas**

Se calcularon las métricas usando modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR): modelos completos con el total de las longitudes de onda y luego fueron optimizados usando longitudes seleccionadas en función a los beta coeficientes.

Para los modelos de regresión de mínimos cuadrados se realizaron 50 repeticiones en función a los beta coeficientes, los que se consideraron como indicadores de las longitudes de onda más importantes que contribuyeron a la predicción.

En cada modelo a través de un algoritmo en el programa Matlab se calcularon los datos estadísticos; coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y raíz de la media de errores cuadráticos (RMEC). Un buen modelo debe tener una alta correlación y un bajo RMSE, estos parámetros se calcularon mediante las Ecuaciones 2 y 3 (Inoue et al., 2012).

$$R_{CV}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$RMSE_{CV} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (3)$$

Donde:

$n$ = número de muestras

$\hat{y}_i$  = valores predichos

$y_i$ = valores medidos

$\bar{y}$ = valor medio

### 3. RESULTADOS

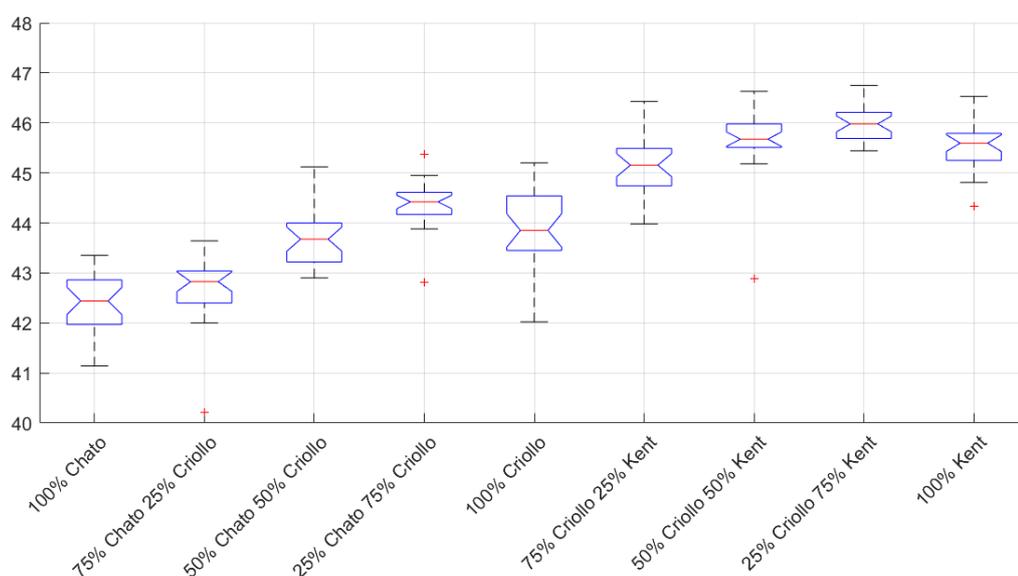
#### 3.1. Colorimetría en pulpas de mango

En la Figura 12, 13 y 14 se muestran los valores de colorimetría de las nueve mezclas binarias de pulpa de mango adulterada, respecto a L= luminosidad se muestran valores ascendentes, se observó que la pulpa adulterada con más valor promedio de luminosidad fue la mezcla de 75 % Kent 25 % criollo ( $45.98 \pm 0.35$ ) y el menor valor fue para la pulpa 100 % Chato de Ica ( $42.29 \pm 0.67$ ). Respecto a las coordenadas  $a^*$  =coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde), se observó que el mayor valor promedio se obtuvo en la pulpa 100 % chato de

Ica ( $3.27 \pm 0.16$ ) y el valor menor para la mezcla 100 % criollo ( $3.27 \pm 0.16$ ). Finalmente en las coordenadas  $b^*$ = coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul) el mayor valor promedio se obtuvo en la pulpa 100 % Kent ( $31.18 \pm 1.13$ ), mientras que el menor valor fue de la pulpa 100 % Chato de Ica ( $25.77 \pm 1.33$ ).

### Figura 12

Valores de colorimetría L= Luminosidad de mezclas binarias de pulpas de mango

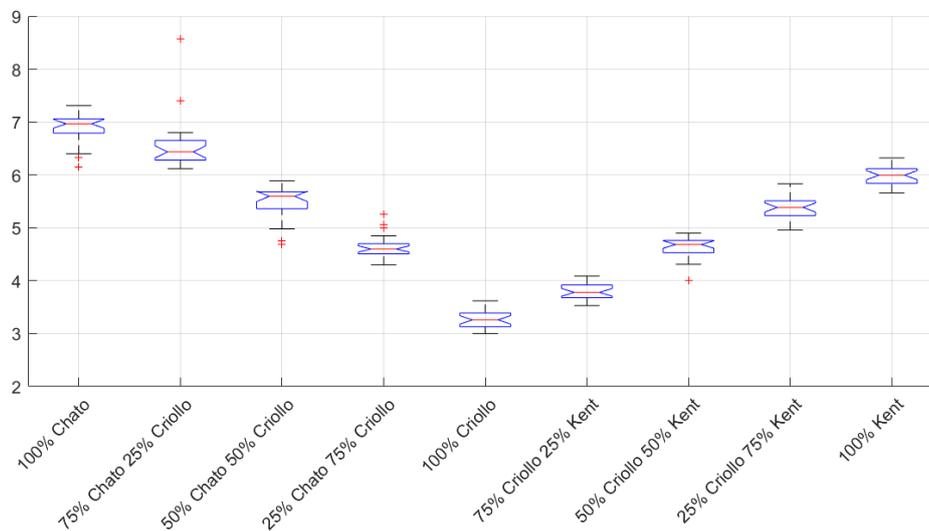


Nota. Esta figura muestra los valores de colorimetría respecto a L= luminosidad de las nueve mezclas binarias de pulpas de mango.

En la Tabla 3 se muestran las pruebas de múltiples rangos para determinar las mezclas que son significativamente diferentes de otras, donde se observan 4 grupos homogéneos, el primer grupo es la pulpa de mango Chato de Ica pura, Criollo pura, y la mezcla adulterada Criollo 25 % -Kent 75 %; el segundo grupo homogéneo son las mezclas adulteradas Criollo 50% - Chato 50 % y Criollo 75 % - Chato 25 % ; como tercer grupo están las mezclas binarias Criollo 75 % - Chato 25 %, Criollo 25 % - Chato 75 % y Criollo 50 % - Kent 50 %; finalmente el cuarto grupo homogéneo lo comprenden las mezclas Criollo 25 % - Kent 75 % y Kent 100 % pura, estos grupos homogéneos nos indican que no existe diferencia significativa entre ellos, con un nivel de 95 % de confianza.

**Figura 13**

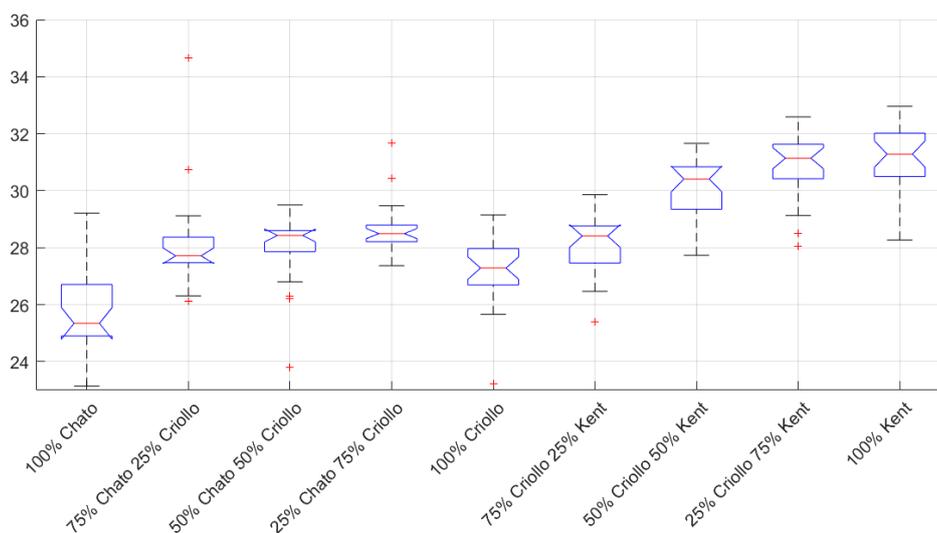
Valores de colorimetría  $a^*$ = Coordenadas rojo/verde de mezclas binarias de pulpas de mango



Nota. Esta figura muestra los valores de colorimetría  $a^*$ = coordenadas rojo/verde de las nueve mezclas binarias de pulpas de mango.

**Figura 14**

Valores de colorimetría  $b^*$ = Coordenadas amarillo/azul de mezclas binarias de pulpas de mango



Nota. Esta figura muestra los valores de colorimetría  $b^*$ = coordenadas amarillo/azul de las nueve mezclas binarias de pulpas de mango.

**Tabla 3**  
*Pruebas de Múltiple Rangos para colorimetría en pulpa de mango*

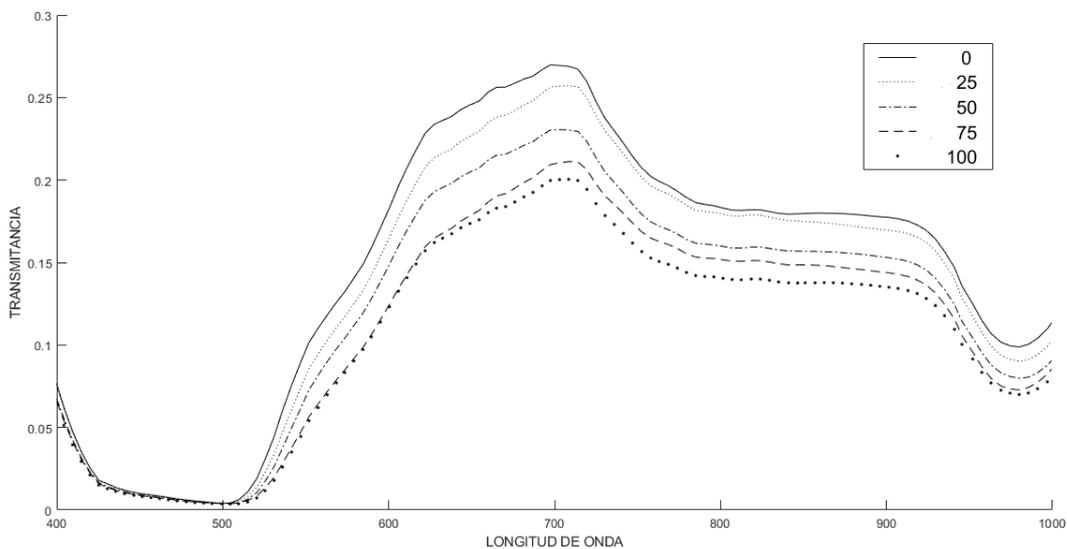
Muestra	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
Chato de Ica	26	32,2211	0,224602	X
Criollo	25	32,2511	0,22905	X
Criollo 25 % - Kent 75 %	26	32,6188	0,224602	X
Criollo 50 % - Chato 50 %	26	33,3364	0,224602	X
Criollo 75 % - Chato 25 %	26	33,4248	0,224602	X X
Criollo 25 % - Chato 75 %	26	33,9723	0,224602	X
Criollo 50 % - Kent 50 %	26	33,9732	0,224602	X
Criollo 25 % - Kent 75 %	26	34,9901	0,224602	X
Kent	26	35,4494	0,224602	X

*Nota.* La tabla 3 muestra las pruebas de múltiples rangos para colorimetría de pulpas de mango variedad Criollo de Chulucanas adulterada a diferentes porcentajes con pulpas de variedad Chato de Ica Y Kent.

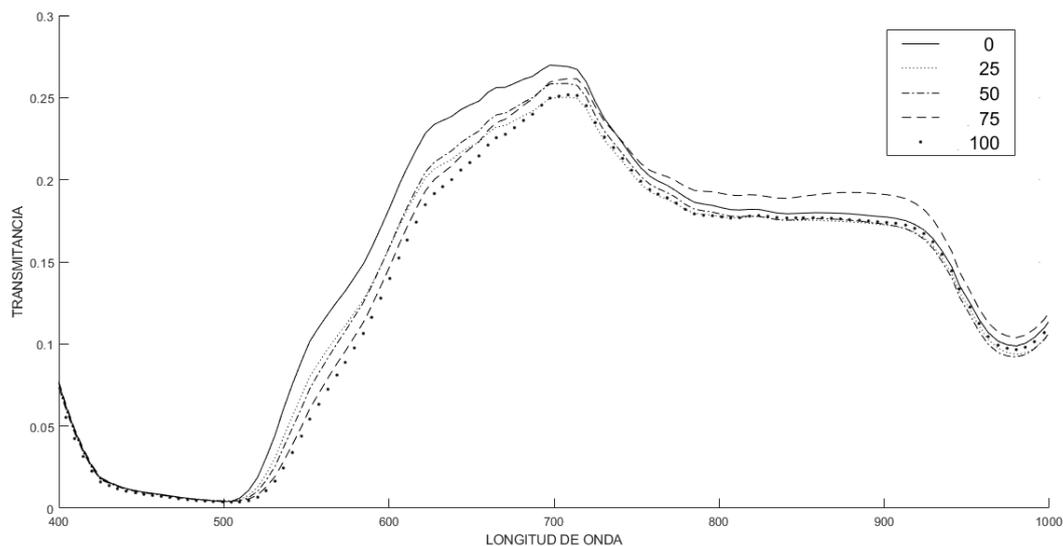
### **3.2. Perfiles espectrales de las mezclas Criollo vs Chato de Ica y Criollo vs Kent**

Los espectros Vis-NIR mostraron que existe relación inversa en los perfiles medios, dado que a medida que se incrementa el porcentaje de adulteración con pulpas Kent y Chato de Ica los perfiles espectrales se reducen desde las longitudes de onda  $\lambda = 708.5$  hasta  $\lambda = 985.5$ ; sin embargo desde las longitudes de onda 400 a 500 nm se aprecia que no existe cambios en los perfiles medios, además se observa que los niveles de transmitancia se encuentran inversamente relacionados a la concentración de pulpas adulteradas de mango; puesto que cuando incrementa la concentración de adulteración disminuyen los niveles de transmitancia. Los perfiles medios de las mezclas de mango Criollo - % Kent y Criollo- % Chato de Ica se presentan en la Figura 15.

**Figura 15**  
Perfiles espectrales medios de mezclas binarias de pulpas de mango



(a) Criollo - % Kent



(b) Criollo - % Chato de Ica

*Nota.* Esta figura representa los perfiles medios de las mezclas binarias de pulpa de mango donde se aprecian dos picos, el primero en  $\lambda = 708.5$  y otro a  $\lambda = 985.5$ .

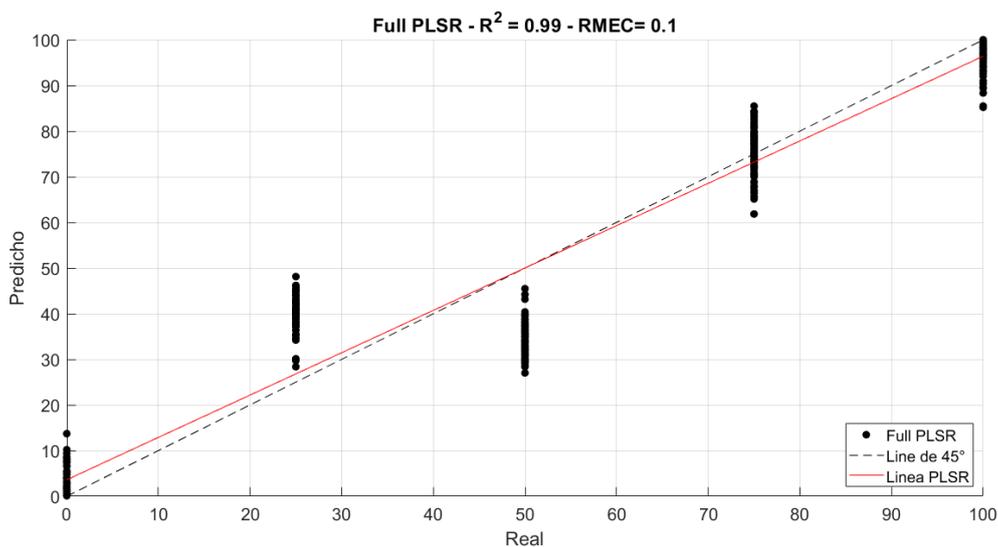
### 3.3. Coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y Raíz de la Media de Errores Cuadráticos (RMEC)

En cada modelo se calcularon los datos estadísticos; coeficiente de correlación ( $R^2$ ) y raíz de la media de errores cuadráticos (RMEC) de las combinación de variedad Criollo vs Kent (a)

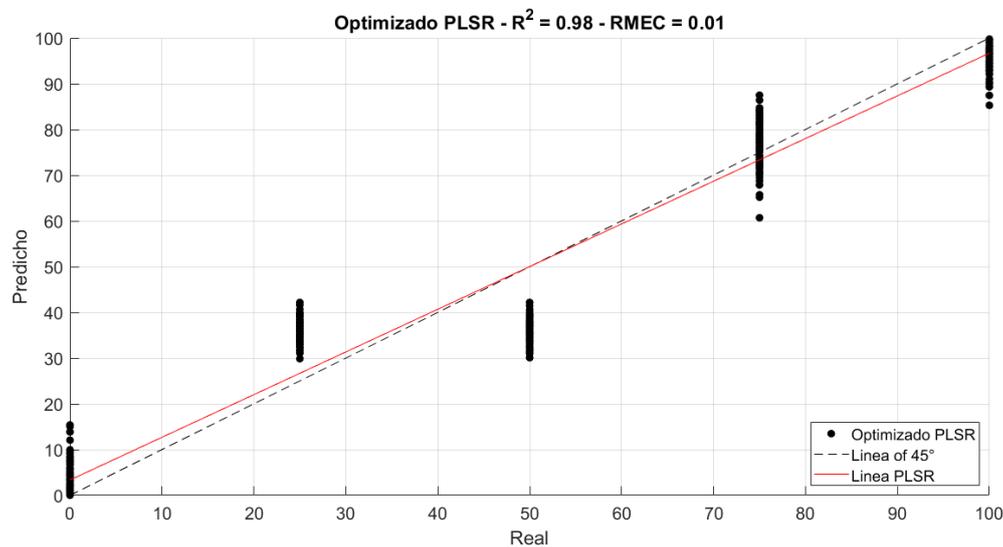
Criollo vs Chato de Ica (b). Tal como se muestra en la Figura 16 y 17. Los modelos se desarrollaron con longitudes de onda completas (112) y con longitudes relevantes en función a los beta coeficientes; se seleccionaron 10 y 5 longitudes para las mezclas a y b respectivamente.

**Figura 16**

*Gráficos de dispersión de las mezclas binarias Criollo vs Kent*



**(a)** Modelo PLSR full de mezcla Criollo vs kent

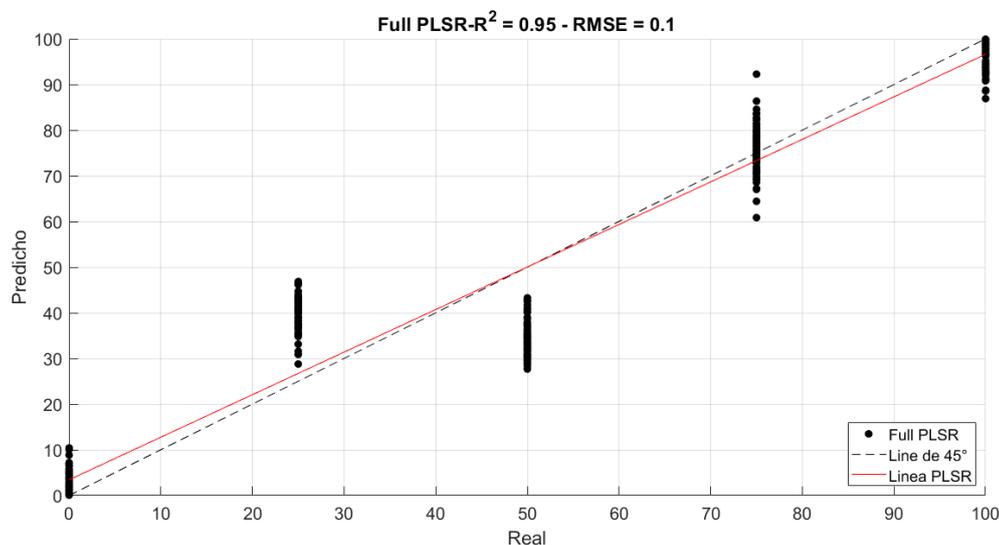


**(b)** Modelo PLSR optimizado de mezcla Criollo vs kent

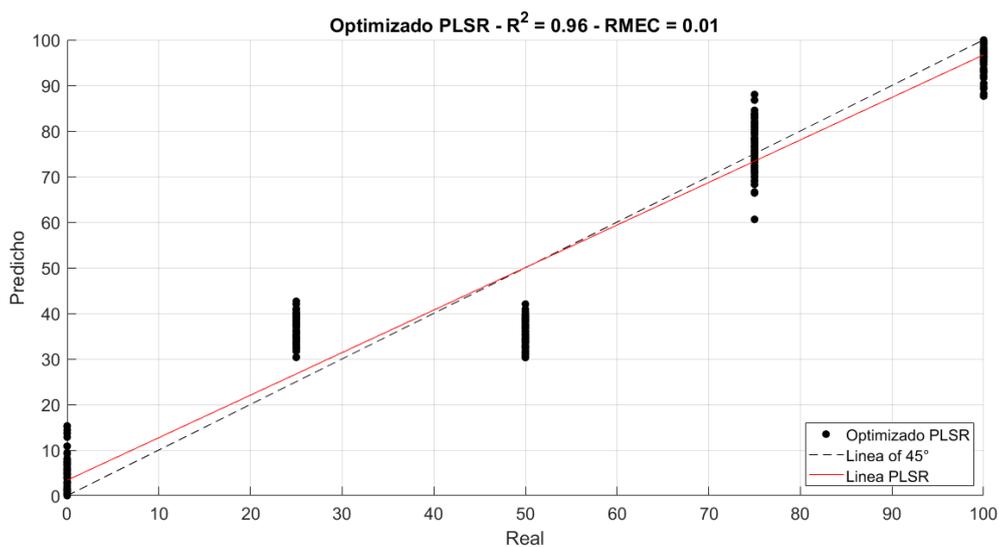
*Nota.* Esta figura representa gráficos de dispersión del modelo PLSR aplicado a la pulpa de mango criollo adulterada con pulpa de variedad Kent en diferentes porcentajes (0,25,50,75,100 %), donde se muestran los valores de coeficiente de correlación  $R^2$  y RMEC full y optimizados.

**Figura 17**

*Gráficos de dispersión de las mezclas binarias Criollo vs Chato de Ica*



**(a)** Modelo PLSR full de mezcla Criollo vs Chato de Ica



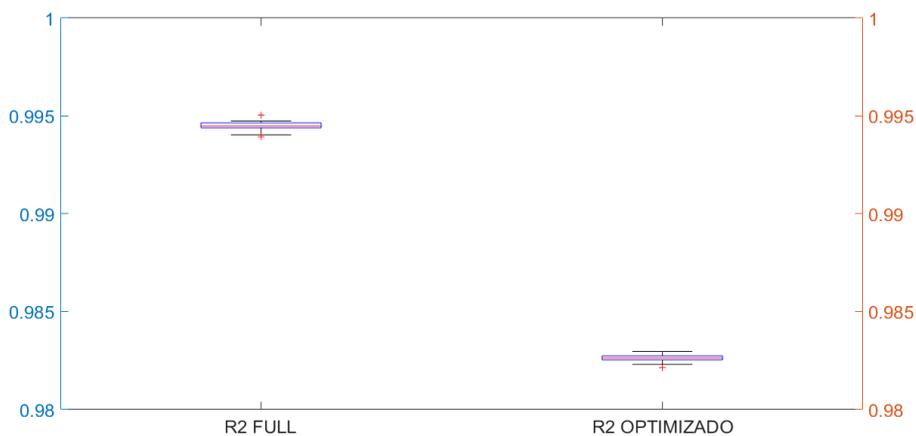
**(b)** Modelo PLSR optimizado de mezcla Criollo vs Chato de Ica

*Nota.* Esta figura representa gráficos de dispersión del modelo PLSR aplicado a la pulpa de mango criollo adulterada con pulpa de variedad Chato de Ica en diferentes porcentajes (0,25,50,75,100 %), donde se muestran los valores de coeficiente de correlación  $R^2$  y RMEC full y optimizados.

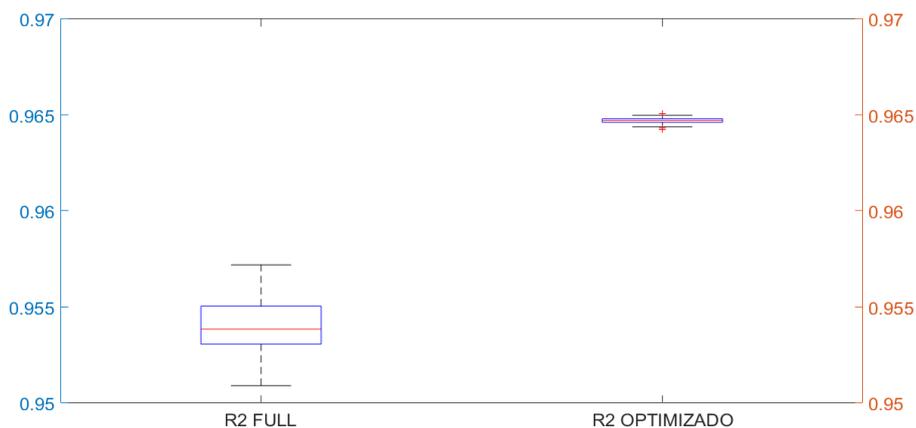
Para la mezcla (a); el modelo completo presentó un mejor ajuste ( $R^2 = 0.99$ ) respecto al modelo optimizado ( $R^2 = 0.98$ ). Sin embargo, para la mezcla (b) el ajuste del modelo completo ( $R^2 =$

0.95) fue menor frente al modelo optimizado ( $R^2 = 0.96$ ), dichos modelos se muestran en la Figura 18.

**Figura 18**  
*Coefficientes de correlación  $R^2$*



**(a)** Criollo - % kent

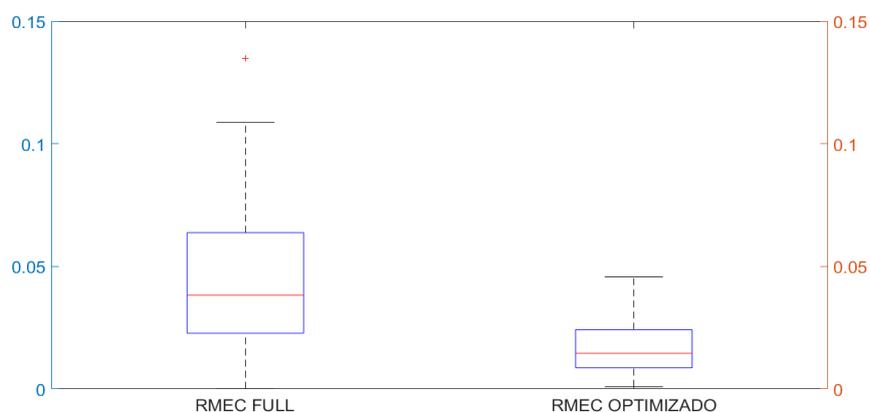


**(b)** Criollo - % Chato de Ica

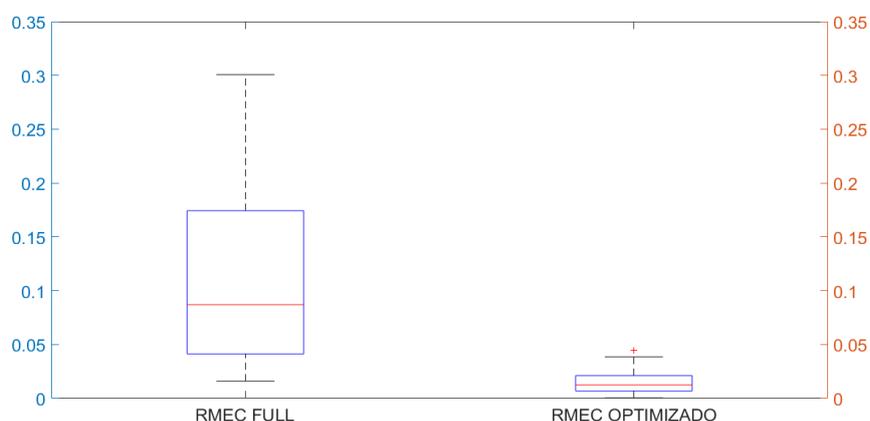
*Nota.* Esta figura representa los coeficientes de regresión full y optimizados de la pulpa de mango criollo adulterada con pulpa de mango Kent y Chato de Ica en diferentes porcentajes.

En cuanto a la raíz de la media de errores cuadráticos (RMEC) se presentan en la Figura 19, se observó que los modelos optimizados permitieron reducir el error de 0.1 a 0.01 en promedio para las dos mezclas.

**Figura 19**  
*Raíz de la Media de Errores Cuadráticos RMEC*



**(a)** Criollo - % kent



**(b)** Criollo - % Chato de Ica

*Nota.* Esta figura representa Raíz de la Media de Errores Cuadráticos (RMEC) full y optimizados de la pulpa de mango criollo adulterada con pulpa de mango Kent y Chato de Ica en diferentes porcentajes.

## 4. DISCUSIÓN

En el presente trabajo de investigación los valores de colorimetría respecto a Luminosidad se encontraron entre  $42.29 \pm 0.67$  y  $45.98 \pm 0.67$ , para las coordenadas  $a^*$  los valores promediados fueron entre  $3.27 \pm 0.16$  y  $6.87 \pm 0.29$ ; finalmente para las coordenadas  $b^*$  se obtuvieron valores desde  $25.77 \pm 1.33$  hasta  $31.18 \pm 1.13$ , valores menores a los valores obtenidos por (Chien et al.,

2007) quien determinó los efectos del recubrimiento de quitosano sobre la calidad y la vida útil de la fruta de mango Irwin en rodajas, analizó colorimetría CIE  $L^*a^*b^*$  en pulpas de mango Irwin y obtuvo valores de Luminosidad ( $66,76 \pm 1,09$ ), para  $a^*$  ( $10,27 \pm 0,56$ ) y para  $b^*$  ( $15,37 \pm 0,31$ ) dichos valores pueden diferir debido al aumento de la síntesis de carotenoides que está asociado al cambio de color en síntesis de la variedad del fruto de mango (Mercadante et al., 1997).

En la presente investigación, para detectar adulteración de pulpas de mango usando el sistema de HSI por el modo de detección de transmitancia en el rango de 400-1000 nm y usando como modelo de análisis de datos Regresión Parcial por Mínimos Cuadrados (PLSR) se obtuvieron los coeficientes de correlación optimizados ( $R^2$ ) que mostraron resultados de predicción de 98 % y 96 %, porcentaje similar a lo obtenido por (Shafiee et al., 2016) quien uso HSI por modo de detección de transmitancia para determinar adulteración en miel de abeja usando una cámara hiperespectral VIS-NIR (400 - 1000 nm) cuyos resultados de la prueba mostraron la mayor precisión usando el clasificador de red neuronal artificial (RNA) con un 95 % de predicción.

En cuanto a la Raíz de la Media de Errores Cuadráticos (RMEC) se observó que modelos optimizados, usando 5 y 10 longitudes de onda relevantes, para mezcla de pulpas de mango adulteradas redujeron el error de 0.1 a 0.01, resultados menores a los obtenidos por (Bázár et al., 2016) quien detectó adulteración en jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) usando espectroscopia NIR en un intervalo espectral 1300–1800 nm, cuyos valores de error fueron 1,48 a 0,987.

## 5. CONCLUSIONES

Se concluye que existe efecto inverso en los perfiles medios, dado que a medida que se incrementa el porcentaje de adulteración con pulpas Kent y Chato de Ica los perfiles espectrales se reducen desde las longitudes de onda  $\lambda = 708.5$  hasta  $\lambda = 985.5$ ; sin embargo desde las longitudes de onda 400 a 500 nm se aprecia que no existe cambios en los perfiles medios; además se observa que los niveles de transmitancia se encuentran inversamente relacionados a la concentración de pulpas adulteradas de mango; puesto que cuando incrementa la concentración de adulteración disminuyen los niveles de transmitancia. Los modelos de predicción comple-

tos a partir de PLSR permitieron obtener coeficientes de correlación ( $R^2$ ) iguales o mayores a 0.95, se obtuvo un  $R^2$  de 0.99 y 0.95 para mezcla Criollo vs Kent (a) y Criollo vs Chato de Ica (b) respectivamente; asimismo, se obtuvieron los modelos optimizados  $R^2$  de 0.98 y 0.96. En cuanto al RMEC se observó que modelos optimizados, usando 5 y 10 longitudes de onda relevantes, para mezcla a y b permitieron reducir el error de 0.1 a 0.01 en promedio para las dos mezclas. Por tanto; el uso de este método permitió determinar con precisión la adulteración en pulpa de mango de variedad Criollo lo que demuestra que las técnicas de imágenes hiperespectrales son efectivas para identificar pulpas de mango adulteradas con otras pulpas de diferentes variedades más comerciales.

## 6. RECOMENDACIONES

- Evaluar adulteración en pulpas de mango, utilizando otras variedades mas comerciales o de características similares a las usadas netamente para pulpas, como Haden, Ataulfo, Tomy Atkins, entre otras.
- Analizar pulpas de mango adulteradas usando otro modo de detección como lo es el modo de reflectancia ó interactancia y comparar resultados de predicción.
- Evaluar pulpas o néctares de diferentes frutas aplicando técnicas de imágenes hiperespectrales y usando PLSR u otros métodos de predicción para analizar porcentajes de presición.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi, H. (2003). Partial least square regression (PLS regression). *Encyclopedia for research methods for the social sciences*, 6(4), 792-795.
- Alamprese, C., Amigo, J. M., Casiraghi, E., & Engelsen, S. B. (2016). Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Meat Science*, 121, 175-181.
- Amigo, J. M., Martu, I., & Gowen, A. (2013). Hyperspectral imaging and chemometrics: a perfect combination for the analysis of food structure, composition and quality. En *Data handling in science and technology* (pp. 343-370). Elsevier.
- Anticona Cabellos, G. J., & Torres Diaz, L. B. (2020). Efecto de la concentración de almidón de almendra de mango criollo (*mangifera indica L.*) en la obtención de películas.
- Aramburo, E. A. H., & Figueroa, G. A. (2016). TEÑIDO DE FIBAS NATURALES CON COLORANTES NATURALES. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 1134-1138.
- Artica Arroyo, M. (2008). Caracterización fisicoquímica y funcional de la fibra dietética de cáscara de mango criollo de Satipo (*Mangifera indica L.*)
- Basantia, N. (2018). Hyperspectral Imaging: Application in Quality and Safety of Beverages. En *Hyperspectral Imaging Analysis and Applications for Food Quality* (pp. 245-253). CRC Press.
- Bázár, G., Romvári, R., Szabó, A., Somogyi, T., Éles, V., & Tsenkova, R. (2016). NIR detection of honey adulteration reveals differences in water spectral pattern. *Food chemistry*, 194, 873-880.
- Campos Gomez, A. E., & Martinez Roque, S. A. (2019). Estudio de pre-factibilidad para la instalacion de una planta empacadora de mango fresco refrigerado variedad Kent (*Mangifera Indica L.*) con fines de exportación.
- Caramês, E., Alamar, P., & Pallone, J. (2019). Detection and identification of açai pulp adulteration by NIR and MIR as an alternative technique: Control charts and classification models. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 123, 704-711.
- Castro, W. (2015). Aplicación de la tecnología de imágenes hiperespectrales al control de calidad de productos agroalimentarios de la región de amazonas (Perú). *Universidad Politécnica de Valencia*.

- Chien, P.-J., Sheu, F., & Yang, F.-H. (2007). Effects of edible chitosan coating on quality and shelf life of sliced mango fruit. *Journal of food engineering*, 78(1), 225-229.
- Chollet, F. (2017). The limitations of deep learning. *Deep learning with Python*.
- Coello Salazar, E. A. (2013). *Identificación de las características físicas y químicas de mango criollo (Mangifera indica L.) de calidad preferencial y su aprovechamiento en la obtención de pulpa* (B.S. thesis). Quevedo: UTEQ.
- Correa Ramirez, D. E. (2019). Efecto del tiempo de extracción y tipo de solvente en el rendimiento de taninos de la semilla de mango criollo (*Mangifera Indica L.*) y su aplicación en el curtido de pieles.
- de Lima, C. M., Fernandes, D. D. S., Pereira, G. E., de Araújo Gomes, A., de Araújo, M. C. U., & Diniz, P. H. G. D. (2020). Digital image-based tracing of geographic origin, wine-maker, and grape type for red wine authentication. *Food chemistry*, 312, 126060.
- dos Santos Pereira, E. V., de Sousa Fernandes, D. D., de Almeida, L. F., Maciel, M. I. S., & Diniz, P. H. G. D. (2022). Goat milk authentication by one-class classification of digital image-based fingerprint signatures: detection of adulteration with cow milk. *Microchemical Journal*, 107640.
- Durán, E., Pérez, R., Cardoso, W., & Pérez, O. (2012). Análise colorimétrica de açúcar mascavo e sua aceitação no mercado de Viçosa-MG, Brasil. *Temas Agrarios*, 17(2), 30-42.
- Elsamahy, M., Nagla, T. F., & Abdel-Rahman, M. A. (2021). Continuous online monitoring in pressurized water reactors during flexible operation using PLSR-based technique—Case study: Load following test. *Annals of Nuclear Energy*, 161, 108473.
- Encalada Rojas, H. J. (2017). Efecto de la temperatura y el espesor en el proceso de deshidratado de mango (*mangifera indica L.*) variedad Kent.
- Engo, N., Fuxman, A., Gonzalez, C. B., Negri, L., Polenta, G. A., & Vaudagna, S. R. (2015). Desarrollo de las exigencias sobre calidad e inocuidad de alimentos en el mundo (2025).
- Falquez Muy, S. L., & Ubilla González, J. D. (2010). Proyecto de factibilidad de empresa comercializadora de pulpa de mango.
- FAO/OCDE. (2020). *Perspectivas Agrícolas 2020-2029*. OECD Publishing, Paris.
- Flores, J. (2014). Evaluación de un fertilizante foliar orgánico y uno químico aplicados en dos etapas de desarrollo en la producción de mango variedad tommy atkins. *Guatemala de la Asunción: Universidad Rafael Landívar*.

- García, J. A. O., Beltrán, J., & López, M. A. U. (2005). Efecto del 1-metilciclopropeno (1-MCP) sobre la vida de anaquel y calidad de mango para exportación. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 28(3), 271-278.
- Granato, D., Putnik, P., Kovačević, D. B., Santos, J. S., Calado, V., Rocha, R. S., Cruz, A. G. D., Jarvis, B., Rodionova, O. Y., & Pomerantsev, A. (2018). Trends in chemometrics: Food authentication, microbiology, and effects of processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(3), 663-677.
- Herrera Garay, C. P. (2016). Evaluación de la cinética de congelación de zumo de mango a diferentes concentraciones de las variedades chato de Ica y Haden.
- Inoue, Y., Sakaiya, E., Zhu, Y., & Takahashi, W. (2012). Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements. *Remote Sensing of Environment*, 126, 210-221.
- Juárez-Noé, G., & González-Coronado, U. (2020). Listado preliminar de Mantodea, Blattodea y Orthoptera (Insecta) de la región de Piura, Perú. *Graellsia*, 76(1), e103-e103.
- Khalid, F., Nawaz, H., Hanif, M. A., Rehman, R., & Al-Sadi, A. M. (2020). Mango. En *Medicinal Plants of South Asia* (pp. 495-508). Elsevier.
- Lohumi, S., Lee, S., Lee, H., & Cho, B.-K. (2015). A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 85-98.
- Mabood, F., Boqué, R., Alkindi, A. Y., Al-Harrasi, A., Al Amri, I. S., Boukra, S., Jabeen, F., Hussain, J., Abbas, G., Naureen, Z., et al. (2020). Fast detection and quantification of pork meat in other meats by reflectance FT-NIR spectroscopy and multivariate analysis. *Meat science*, 163, 108084.
- Maisueche Cuadrado, A., et al. (2019). Utilización del Machine Learning en la industria 4.0.
- Marini, F. (2013). *Chemometrics in food chemistry*. Newnes.
- Mayorga Triviño, C. F. (2020). Exportación de mango de Perú al mercado de los países bajos 2010-2020.
- Meerza, S. I. A., Giannakas, K., & Yiannaka, A. (2019). Markets and welfare effects of food fraud. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 63(4), 759-789.
- Meléndez-Martínez, A. J., Britton, G., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2007). Relationship between the colour and the chemical structure of carotenoid pigments. *Food Chemistry*, 101(3), 1145-1150.

- Mercadante, A. Z., Rodriguez-Amaya, D. B., & Britton, G. (1997). HPLC and mass spectrometric analysis of carotenoids from mango. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(1), 120-123.
- Metz, M., Abdelghafour, F., Roger, J.-M., & Lesnoff, M. (2021). A novel robust PLS regression method inspired from boosting principles: RoBoost-PLSR. *Analytica Chimica Acta*, 1179, 338823.
- Minaya, A. (1999). *El mango en el Perú y sus vínculos con el mercado internacional* (inf. téc.). Ministerio de Agricultura, Lima (Peru); IICA, Lima (Peru).
- Nobari-Moghaddam, H., Tamiji, Z., Akbari-Lakeh, M., Khoshayand, M. R., & Haji-Mahmoodi, M. (2021). Multivariate analysis of food fraud: A review of NIR based instruments in tandem with chemometrics. *Journal of Food Composition and Analysis*, 104343.
- Okino Delgado, C. H., & Fleuri, L. F. (2016). Orange and mango by-products: Agro-industrial waste as source of bioactive compounds and botanical versus commercial description—A review. *Food Reviews International*, 32(1), 1-14.
- Okino-Delgado, C., Prado, D., Pereira, M. S., Camargo, D. A., Koike, M. A., & Fleuri, L. F. (2020). Mango. En *Valorization of Fruit Processing By-products* (pp. 167-181). Elsevier.
- Prats-Montalbán, J. M., de Juan, A., & Ferrer, A. (2011). Multivariate image analysis: A review with applications. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 107(1), 1-23.
- Ramiro, A., & Alvarado, V. (2018). *Introducción al Machine Learning*.
- Rifna, E., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Rao, K. S., Dwivedi, M., Kumar, M., Thirumdas, R., & Ramesh, S. (2022). Advanced process analytical tools for identification of adulterants in edible oils—A review. *Food Chemistry*, 369, 130898.
- Sánchez Bernabé, E. (2016). *Procesado de imágenes hiperespectrales*.
- Shafiee, S., Polder, G., Minaei, S., Moghadam-Charkari, N., Van Ruth, S., & Kuś, P. M. (2016). Detection of honey adulteration using hyperspectral imaging. *IFAC-PapersOnLine*, 49(16), 311-314.
- Shao, Y., Shi, Y., Xuan, G., Li, Q., Wang, F., Shi, C., & Hu, Z. (2022). Hyperspectral imaging for non-destructive detection of honey adulteration. *Vibrational Spectroscopy*, 118, 103340.

- Siddiq, M., Sogi, D. S., & Roidoung, S. (2017). Mango processing and processed products. *Handbook of Mango Fruit: Production, Postharvest Science, Processing Technology and Nutrition*, 195-216.
- Tharanathan, R., Yashoda, H., & Prabha, T. (2006). Mango (*Mangifera indica* L.), “The king of fruits”—An overview. *Food Reviews International*, 22(2), 95-123.
- USDA, U. (2018). National nutrient database for standard reference legacy release.
- Wall-Medrano, A., Olivas-Aguirre, F. J., Velderrain-Rodríguez, G. R., González-Aguilar, A., Rosa, L. A., López-Díaz, J. A., & Álvarez-Parrilla, E. (2015). El mango: aspectos agro-industriales, valor nutricional/funcional y efectos en la salud. *Nutricion hospitalaria*, 31(1), 67-75.
- Wang, J., Han, Y., Wang, X., Li, Y., Wang, S., Gan, S., Dong, G., Chen, X., & Wang, S. (2022). Adulteration detection of Qinghai-Tibet Plateau flaxseed oil using HPLC-ELSD profiling of triacylglycerols and chemometrics. *LWT*, 160, 113300.
- Wistaff, E. A., Beller, S., Schmid, A., Neville, J. J., & Nietner, T. (2021). Chemometric analysis of amino acid profiles for detection of fruit juice adulterations—Application to verify authenticity of blood orange juice. *Food Chemistry*, 343, 128452.
- Xu, L., Xu, Z., Wang, X., Wang, B., & Liao, X. (2020). The application of pseudotargeted metabolomics method for fruit juices discrimination. *Food chemistry*, 316, 126278.
- Zhang, L., Huang, X., Li, P., Na, W., Jiang, J., Mao, J., Ding, X., & Zhang, Q. (2017). Multivariate adulteration detection for sesame oil. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 161, 147-150.

## 8. ANEXOS

**Figura 20**  
*Recepción y pesado de materia prima*



**Figura 21**  
*Proceso de escaldado de materia prima*



**Figura 22**  
*Pelado y troceado de mango*



**Figura 23**  
*Proceso de pulpeado de mango*



**Figura 24**  
*Filtrado y refinado de pulpa de mango*



**Figura 25**  
*Pasteurización de pulpas de mango*



**Figura 26**  
*Medición de brix y PH de pulpas de mango*



**Figura 27**  
*Pesado y envasado de pulpas de mango*

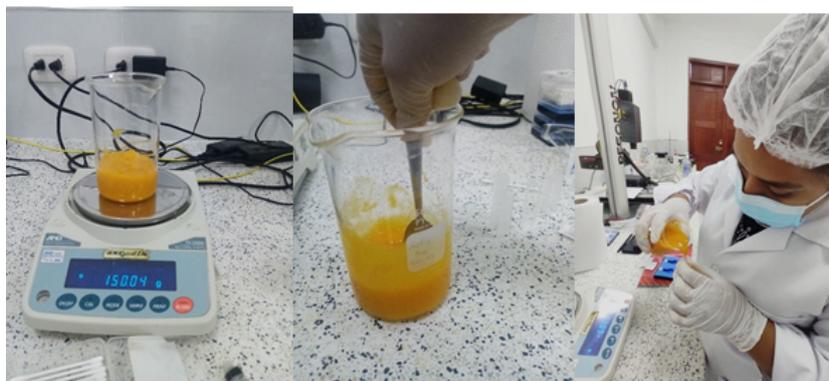


**Figura 28**

*Rotulación y almacenamiento de pulpas de mango a -18 C*

**Figura 29**

*Adulteración y Llenado de pulpas en cubetas de cuarzo*

**Figura 30**

*Medición de colorimetría de pulpa de mango adulterada*



**Figura 31**

*Adquisición de imágenes hiperespectrales mediante sistema de transmisión*

**Tabla 4**

*Valores de colorimetría para pulpa de mango criollo adulterada con Chato de Ica.*

COLORIMETRIA	L	a	b
100 % CRIOLLO	43.97±0.75	3.27± 0.16	27.14± 1.21
25 % CHATO 75 % CRIOLLO	44.37±0.48	4.64±0.21	28.57±0.91
50 % CHATO 50 % CRIOLLO	43.66±0.53	5.50±0.32	28.01±1.17
75 % CHATO 25 % CRIOLLO	42.70±0.65	6.56±0.49	28.07±1.63
100 %CHATO DE ICA	42.29±0.67	6.87±0.29	25.77±1.33

*Nota.* La Tabla 4 muestra los valores promedios de colorimetría para la pulpa de mango criollo adulterada con mango chato de Ica.

**Tabla 5**

*Valores de colorimetría para pulpa de mango criollo adulterada con Kent*

COLORIMETRIA	L	a	b
100 % CRIOLLO	43.97± 0.75	3.27±0.16	27.14± 1.21
25 % KENT 75 % CRIOLLO	45.13±0.61	3.79±0.15	28.10±1.04
50 % KENT 50 % CRIOLLO	45.68±0.68	4.63±0.20	29.77±1.76
75 % KENT 25 % CRIOLLO	45.98±0.35	5.39±0.20	30.95±1.15
100 %KENT	45.52±0.51	5.99±0.18	31.18±1.13

*Nota.* La Tabla 5 muestra los valores promedios de colorimetría para la pulpa de mango criollo adulterada con mango Kent.