

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE CHOTA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**PREDICCIÓN DE LA DENSIDAD Y EL CONTENIDO DE SÓLIDOS SOLUBLES DE  
LECHE FRESCA ADULTERADA MEDIANTE ESPECTROSCOPIA DIELECTRICA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**  
**INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

**AUTOR**

**YOVER FRANKLIN COLUNCHE MEJÍA**

**ASESOR**

**M. Sc. TONY STEVEN CHUQUIZUTA TRIGOSO**

Firma manuscrita en tinta azul del asesor, Tony Steven Chuquizuta Trigoso.

**CO-ASESOR**

**Dr. HUBERT LUZDEMIO ARTEAGA MIÑANO**

Firma manuscrita en tinta azul del co-asesor, Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano.

**CHOTA – PERÚ**

**2022**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

ACTA N° 009-2022/EPIA - FCA/UNACH

Siendo las 17 horas, del día 01 de junio de 2022, en video conferencia del aplicativo Meet Google, los miembros del Jurado de Tesis titulada: “Predicción de la densidad y el contenido de sólidos solubles de leche fresca adulterada mediante espectroscopia dieléctrica” integrado por:

1. Ph. D. Frank F. Velásquez Barreto (Presidente)
2. Mg. Edson E. Ramírez Tixe (Secretario)
3. M.Sc. Joe Richard Jara Velez (Vocal)

Sustentada por Bach. Yover Franklin Colunche Mejía con la finalidad de obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial.

Terminada la sustentación, con las preguntas formuladas por los integrantes del Jurado y las respuestas otorgadas por el graduando, luego de deliberar, acuerda Aprobar la tesis, calificándola con la nota de: 13 (trece), se eleva la presente Acta al Coordinador de la Facultad de Ciencias Agrarias, a fin de que se le declare EXPEDITO para conferirle el título profesional de Ingeniero Agroindustrial.

Firmado en: Chota, 01 de junio del 2022.



.....  
Ph. D. Frank F. Velásquez Barreto

Presidente



.....  
Mg. Edson E. Ramírez Tixe

Secretario



.....  
Mg. Joe Richard Jara Velez

Vocal

## AGRADECIMIENTO

*Primeramente, agradecer a Dios quien nos da vida, salud e impulso para poder culminar satisfactoriamente mi profesión como me lo había planteado, ser Ingeniero Agroindustrial.*

*A mis padres por su apoyo total y por llevarme por el camino correcto, por todo el amor absoluto que me han brindado para ser la persona que soy, han sido el pilar de mi formación logrando de mi un excelente ser humano, para poder alcanzar mis metas proyectadas.*

*A mi asesor M. Sc. Tony Steven Chuquizuta Trigoso, por su amistad y profesionalismo demostrado durante la elaboración, ejecución y redacción del informe final de tesis, por su apoyo brindado durante y después del trabajo de investigación.*

*A mi co-asesor Dr. Hubert Luzdemio Arteaga Miñano, por su amistad y dedicación de asesorarme para la redacción del proyecto de la tesis, ejecución y elaboración del informe final de tesis, por su colaboración, comentarios, sugerencias y enseñanzas.*

*A la ingeniera Mirian Yuliza Rubio Cieza, por su gran amistad, paciencia y apoyo ofrecido durante la ejecución del proyecto desarrollado en el laboratorio del Instituto de Investigación de Mejoramiento Productivo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de Chota por acogerme para poder desarrollarme y cumplir mi sueño de ser profesional, en la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial.*

*A la empresa de Derivados Lácteos MILKFRESH, a su gerente general Oscar Tafur Diaz y esposa Eleane Campos Rojas, quienes me apoyaron en todo momento y brindaron las facilidades para desarrollar mi proyecto de tesis, por sus consejos, amistad y perseverancia cada día.*

## DEDICATORIA

*Al creador por darme vida, salud e iluminarme cada día, por la fortaleza que me da para seguir y por sus bendiciones en esta etapa vivida.*

*A mi madrecita por su cariño, lecciones, valores inculcados y apoyo absoluto que me ha permitido triunfar en la vida, pero más que nada, por su infinito amor. A mi padre por los valores enseñados, por su lucha constante para salir adelante con su familia dándonos un hogar y lo necesario gracias a su trabajo, me ha enseñado a jamás rendirse en momentos complicados y que lo bueno se consigue con el apoyo y amor de una familia.*

*Especialmente dedico este trabajo al amor de mi vida, mi hija Antonella, quien me motiva a ser mejor cada día y superar cualquier obstáculo en esta travesía de la vida, que día a día con su sonrisa me llena felicidad. A mi esposa y compañera de vida Sonia Leyla por su amor y apoyo incondicional que me brinda cada día para afrontar y superar obstáculos que juntos hemos sabido superar para alcanzar nuestras metas y cumplir nuestros sueños, para mis hermanos Magaly, Miguel y Fabiana, por ser los mejores amigos, mis cómplices en cada momento y por el respaldo que me dan cada día para cumplir mis metas y objetivos trazados con plena seguridad.*

**Yover Franklin Colunche Mejía**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN .....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I .....	13
INTRODUCCIÓN .....	13
CAPÍTULO II.....	16
MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Antecedentes .....	16
2.2. Bases teóricas.....	18
2.2.1. <i>Leche</i> .....	18
A. Definición.....	18
B. Origen.....	19
C. Composición nutricional. ....	19
D. Calidad de la leche.....	22
2.2.2. <i>Adulteración</i> .....	25
A. Técnicas de adulteración. ....	26
B. Técnicas de determinación de adulteración en leche fresca.....	27
2.2.3. <i>Espectroscopia dieléctrica</i> .....	30
2.3. Marco conceptual.....	39
CAPÍTULO III.....	41
MARCO METODOLÓGICO.....	41
3.1. Ubicación .....	41
3.2. Población y muestra .....	41

3.2.1.	<i>Población</i> .....	41
3.2.2.	<i>Muestra</i> .....	41
3.3.	Equipos, materiales e insumos .....	41
3.3.1.	<i>Equipos</i> .....	41
3.3.2.	<i>Materiales</i> .....	42
3.3.3.	<i>Insumos</i> .....	42
3.4.	Metodología de la investigación .....	43
3.4.1.	<i>Desarrollo experimental</i> .....	43
3.4.2.	<i>Diseño experimental</i> .....	45
3.4.3.	<i>Recolección de muestra</i> .....	46
3.4.4.	<i>Acondicionamiento de las muestras</i> .....	46
3.4.5.	<i>Obtención de datos</i> .....	46
3.4.6.	<i>Análisis estadístico</i> .....	48
3.4.7.	<i>Evaluación del modelo</i> .....	49
CAPÍTULO IV.....		51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		51
4.1.	Caracterización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida y los espectros dieléctricos de la leche fresca a diferentes proporciones de leche/agua. ....	51
4.2.	Modelización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida con las propiedades dieléctricas a diferentes proporciones (leche/ agua) a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz.....	56
4.2.1.	<i>Desarrollo del modelo de calibración</i> .....	56
4.2.2.	<i>Validación del modelo</i> .....	61

4.3. Evaluar los modelos de predicción de la densidad, contenido de sólidos solubles y agua añadida en base a las propiedades dieléctricas utilizando el $R^2$ y RECM. ....	64
CAPÍTULO V.....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
5.1. Conclusiones .....	66
5.2. Recomendaciones.....	67
CAPÍTULO VI.....	68
REFERENCIAS BIBILOGRAFÍCAS.....	68
CAPÍTULO VII .....	77
ANEXOS .....	77

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Composición nutricional de leche de vacas de la raza Brown Swiss .....	20
<b>Tabla 2.</b> Requisitos organolépticos de leche fresca .....	23
<b>Tabla 3.</b> Requisitos físico-químicos de leche fresca.....	24
<b>Tabla 4.</b> Requisitos microbiológicos de leche fresca.....	25
<b>Tabla 5.</b> Requisitos de calidad higiénica de leche fresca.....	25
<b>Tabla 6.</b> Matriz del diseño experimental de regresión lineal simple .....	45
<b>Tabla 7.</b> Propiedades fisicoquímicas y dieléctricas de leche fresca.....	53
<b>Tabla 8.</b> Modelos de calibración para predicción de la densidad, los sólidos solubles y el agua agregada a partir de constante dieléctrica de leche fresca.....	57
<b>Tabla 9.</b> Modelos de calibración para predicción de la densidad, los sólidos solubles y el agua agregada a partir del factor de pérdida de leche fresca .....	59
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de determinación $R^2$ , RECM y $D_r$ de los modelos de predicción de la densidad, sólidos solubles y el agua añadida en función a la constante dieléctrica. ....	63
<b>Tabla 11.</b> Coeficiente de determinación $R^2$ , RECM y $D_r$ de los modelos de predicción de la densidad, sólidos solubles y el agua añadida en función del factor de pérdida.....	64
<b>Tabla 12.</b> Resultados del coeficiente de determinación ( $R_V^2$ ), RECM y NRECM de la constante dieléctrica .....	65
<b>Tabla 13.</b> Resultados del coeficiente de determinación ( $R_V^2$ ), RECM y NRECM del factor de pérdida.....	65



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Espectro electromagnético .....	31
<b>Figura 2.</b> La onda electromagnética.....	32
<b>Figura 3.</b> Diagrama del vector permitividad compleja .....	34
<b>Figura 4.</b> Tipos de sondas coaxiales .....	36
<b>Figura 5.</b> Equipo analizador de impedancias y sensor de platos paralelos .....	37
<b>Figura 6.</b> Esquema de las diferentes técnicas de medida de propiedades dieléctricas.....	38
<b>Figura 7.</b> Diagrama experimental de la investigación .....	44
<b>Figura 8.</b> Espectros dieléctricos de $\epsilon'$ de leche fresca adulterada a diferentes proporciones leche/agua, en el rango de 0,5 - 9 GHz a 25 ° .....	55
<b>Figura 9.</b> Espectros dieléctricos de $\epsilon''$ de leche fresca adulterada a diferentes proporciones leche/agua, en el rango de 0,5 - 9 GHz a 25 °C .....	55
<b>Figura 10.</b> Diagramas de dispersión de los modelos de calibración de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función de la constante dieléctrica .....	58
<b>Figura 11.</b> Diagramas de dispersión de los modelos de calibración de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función del factor de pérdida.....	60
<b>Figura 12.</b> Recojo de muestras de leche fresca.....	77
<b>Figura 13.</b> Calentamiento de equipo .....	77
<b>Figura 14.</b> Configuración de equipo de redes vectoriales.....	78
<b>Figura 15.</b> Calibración del equipo de redes vectoriales con aire .....	78
<b>Figura 16.</b> Calibración del equipo de redes vectoriales mediante corto circuito.....	79
<b>Figura 17.</b> Calibración del equipo de redes vectoriales con agua desionizada a 25 °C.....	79
<b>Figura 18.</b> Calibración del equipo de redes vectoriales completada.....	80
<b>Figura 19.</b> Analizando las propiedades dieléctricas el agua desionizada a 25 °C .....	80

<b>Figura 20.</b> Propiedades dieléctricas del agua a 25 °C.....	81
<b>Figura 21.</b> Acondicionamiento de muestras de leche fresca.....	81
<b>Figura 22.</b> Homogenización de muestras leche fresca a 25 °C.....	82
<b>Figura 23.</b> Análisis de propiedades dieléctricas de muestras de leche fresca a 25 °C.....	82
<b>Figura 24.</b> Propiedades dieléctricas de muestras de leche fresca a 25 °C .....	83
<b>Figura 25.</b> Análisis de densidad de muestras de leche fresca a 25 °C .....	83
<b>Figura 26.</b> Análisis de sólidos solubles de muestras de leche fresca a 25 °C .....	84
<b>Figura 27.</b> Análisis de propiedades fisicoquímicas de muestras de leche fresca a 25 °C, mediante el MILKOTESTER .....	84
<b>Figura 28.</b> Diagramas de dispersión de los modelos de validación de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función de la constante dieléctrica .....	87
<b>Figura 29.</b> Diagramas de dispersión de los modelos de validación de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función del factor de pérdida.....	88
<b>Figura 30.</b> Análisis estadístico para el valor p en el paquete estadístico Statgraphics Centurión	89

## RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue predecir la densidad, el contenido de sólidos solubles y el agua añadida de leche fresca adulterada con agua, utilizando propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales. Se trabajó con leche fresca proveniente de vacas sanas de la raza Brown Swiss de la comunidad de Cabracancha, Chota, Cajamarca. Para los análisis se acondicionaron siete (7) tratamientos de 200 mL cada muestra, cuya relación leche: agua fueron: 70:30; 75:25; 80:20; 85:15; 90:10; 95:5 y 100:0%; obteniéndose 50 muestras por cada tratamiento, analizando un total de 350 muestras y tomando datos por triplicado. Los 1050 espectros dieléctricos de 350 muestras se obtuvieron a 401 frecuencias discretas a escala logarítmica de 0,5 a 9 GHz a 25 °C, mediante un analizador de redes vectoriales y una sonda coaxial de terminación abierta. Seguidamente se realizó el análisis fisicoquímico de la leche, en densidad, sólidos solubles y agua añadida. Los resultados mostraron que al aumentar la frecuencia la constante dieléctrica disminuyó y el factor de pérdida dieléctrica disminuyó de 0,5 a 1,5 GHz y luego se incrementó hasta completar los 9 GHz. Los resultados con mejor predicción ( $R_V^2$ ) de la constante dieléctrica se obtuvo a frecuencia de 9 GHz (densidad con  $R_V^2 = 0,902$  y RECM = 0,002; sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$  y RECM = 0,347 y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$  y RECM = 4,161); y para el factor de pérdida se obtuvo a 2450 MHz (densidad con  $R_V^2 = 0,915$  y RECM = 0,001; sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$  y RECM = 0,395; y agua añadida con  $R_V^2 = 0,976$  y RECM = 1,587). En conclusión, con el factor de pérdida a frecuencia de 2450 MHz se obtienen mejores resultados de predicción de densidad y agua añadida, y la constante dieléctrica predijo mejor los sólidos solubles a 9000 MHz en leche fresca, pudiendo identificar la adulteración con agua.

**Palabras claves:** Propiedades dieléctricas, densidad, sólidos solubles, agua añadida y leche fresca.

## ABSTRACT

The objective of the present investigation was to predict the density, soluble solids content and added water of fresh milk adulterated with water, using dielectric properties, at point frequencies. We worked with fresh milk from healthy Brown Swiss cows from the community of Cabracancha, Chota, Cajamarca. For the analyses, seven (7) treatments of 200 mL each sample were conditioned, with a milk: water ratio of 70:30; 75:25; 80:20; 85:15; 90:10; 95:5 and 100:0%, obtaining 50 samples for each treatment, analyzing a total of 350 samples and taking data in triplicate. The 1050 dielectric spectra of 350 samples were obtained at 401 discrete logarithmic-scale frequencies from 0.5 to 9 GHz at 25 °C using a vector network analyzer and an open-ended coaxial probe. The milk was then analyzed physicochemically for density, soluble solids and added water. The results showed that as the frequency increased the dielectric constant decreased and the dielectric loss factor decreased from 0.5 to 1.5 GHz and then increased to full 9 GHz. The results with the best prediction ( $R_V^2$ ) of the dielectric constant were obtained at a frequency of 9 GHz (density with  $R_V^2 = 0.902$  and RECM = 0.002; soluble solids with  $R_V^2 = 0.909$  and RECM = 0.347 and added water with  $R_V^2 = 0.843$  and RECM = 4.161); and for the loss factor was obtained at 2450 MHz (density with  $R_V^2 = 0.915$  and RECM = 0.001; soluble solids with  $R_V^2 = 0.882$  and RECM = 0.395; and added water with  $R_V^2 = 0.976$  and RECM = 1.587).

In conclusion, with the loss factor at 2450 MHz frequency better prediction results of density and added water are obtained, and the dielectric constant better predicted soluble solids at 9000 MHz in fresh milk, being able to identify adulteration with water.

**Keywords:** Dielectric properties, density, soluble solids, added water and fresh milk.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

En 2020 el Perú registró una producción de 2'138,028.00 millones de toneladas de leche fresca de vaca, siendo sus principales productores los departamentos de Cajamarca, Arequipa y Lima tienen un porcentaje del total de 18,37%, 16,79% y 16,57%, respectivamente. Asimismo, el 53% de la producción total de la leche producida es destinada para productos lácteos (yogurt, queso, leche evaporada y otros) y el 47% es destinada para la alimentación de terneros y consumo en fresco (MINAGRI, 2020).

Para la producción de derivados lácteos, es importante tener leche fresca de calidad aceptable y de alto valor nutricional, para ello es necesario realizar un control de calidad fisicoquímica y a su vez el descartar adulteraciones en la leche fresca (Guo et al., 2010). Los productores con la finalidad de tener mayor rentabilidad en su producción y venta de leche fresca vienen realizando malas prácticas agropecuarias, es decir adulteración de la leche, utilizando diversos agentes adulterantes como: adición de agua, urea, azúcares, almidón y suero de quesería (Guo et al., 2010; Jitendra et al., 2017; Zhao et al., 2019). Estos productos que se mezclan con la leche fresca a menudo alteran sus propiedades fisicoquímicas, disminuyendo el rendimiento de producción del producto terminado. Asimismo, diversos estudios manifiestan que el consumo de leche adulterada puede causar problemas de salud (Guo et al., 2010).

El control de calidad y la determinación de adulteración en leche fresca se realiza con métodos de análisis fisicoquímicos básicos como densidad, °Brix, acidez, entre otros y cromatográficos, técnicas electroforéticas, pruebas inmunológicas e identificación de ADN para determinar adulteración (Pereira et al., 2020), siendo estos análisis tediosos, costosos, demandan de insumos químicos y necesitan de personal altamente capacitado (Guo et al., 2010); por tal

motivo, la industria láctea demanda de nuevas tecnologías no invasivas, que permitan obtener los datos al instante para tomar decisiones de manera rápida y precisa. Durante las últimas décadas, los avances tecnológicos en el sector lácteo vienen desarrollando diversas técnicas espectroscópicas para evaluar la calidad y detectar la presencia de productos ajenos en la leche fresca de vaca, como: Infrarrojo cercano por Kamboj et al. (2019); Yang et al. (2016); Yu et al. (2015), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier por Balan et al. (2020) y dieléctricas realizadas por Guo et al. (2010); Jitendra et al. (2017) y Zhao et al. (2019).

Una de las alternativas tecnológicas para la determinación de adulteración de leche fresca es la espectroscopia dieléctrica (ED), la misma que se basa en las propiedades dieléctricas (PD) del material o matriz alimentaria y su interacción con un estímulo del campo electromagnético. Se ha demostrado que las PD de los materiales alimenticios dependen de: La composición química, temperatura y frecuencia medida (Zhu & Kang, 2015). En los últimos años, la ED se ha utilizado ampliamente en área de investigación de alimentos como: carnes (Castro et al., 2011; Wondwossen, 2014), vegetales (Torrealba et al., 2016), frutas (Reyes & Yarlequé, 2018), tubérculos (Chuquizuta et al., 2021), zumo de cítricos (Trigoso et al., 2020), leche (Guo et al., 2010), etc. Demostrando ser una técnica viable para el control de calidad y determinación de adulteración precisa, rápida y no destructiva.

Diversos esfuerzos se vienen realizando en la determinación de adulteración de leche fresca a partir de las propiedades dieléctricas (espectros dieléctricos) en el rango de radio frecuencia [100 Hz a 1 MHz] realizadas por Bertemes et al. (2010); Das et al. (2018); Das et al. (2011) y en microondas [10 Hz a 40 GHz] por Liu et al. (2018); Pereira et al. (2020); Zhao et al. (2019) y Zhu et al. (2014, 2016, 2018), aplicándose en leche fresca de vacas por Zhu & Kang (2015), búfalas por Nitika et al. (2021) y cabras por Zhu et al. (2014). Sin embargo, esta técnica por sí sola no es

capaz de determinar o predecir las propiedades fisicoquímicas y/o adulteración de la leche, es por ello que diversas técnicas quimiométricas se viene utilizando como complemento, entre ellas: regresión de mínimos cuadrados parciales (RMCP), maquina vectorial de soporte (MVS), máquina de aprendizaje extremo (MAE), las mismas que se basan en la selección de variables representativas para poder generar el modelo estadístico predictivo, previa validación de los datos o entrenamiento. No obstante, algunas de estas técnicas antes mencionadas deberían utilizar criterios técnicos otorgados por la Federal Communications Commission (Estados Unidos) utilizando frecuencias puntuales ( $915 \pm 13$ ,  $2450 \pm 50$ ,  $5800 \pm 75$  y  $24125 \pm 125$  MHz) para uso industrial, científico y medico (Montinel, 2008) y más aún utilizadas en el modelamiento de sus propiedades fisicoquímicas en la leche.

En tal sentido, el objetivo general de la presente investigación fue predecir la densidad, contenido de sólidos solubles y agua añadida de leche fresca adulterada con agua utilizando propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales; y como objetivos específicos; caracterización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida y los espectros dieléctricos de la leche fresca a diferentes proporciones de leche/agua; modelización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida con las propiedades dieléctricas a diferentes proporciones (leche/ agua) a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz y evaluar los modelos de predicción de la densidad, contenido de sólidos solubles y agua añadida en base a las propiedades dieléctricas utilizando el  $R^2$  y RECM.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

Calderón et al. (2013) evaluaron la adulteración de la leche en cuatro procesadoras de quesos en Montería-Colombia, de las muestras de leche obtenidas determinaron densidad, % de acidez, grasa, sólidos no grasos, sólidos totales y presencia de adulterantes como: adición de agua, féculas, sacarosa, peróxido de hidrógeno, cloruros y neutralizadores alcalinos. Para el análisis de datos utilizaron la estadística descriptiva utilizando el software SAS. Los resultados obtenidos demostraron la adición de agua en 22,22%, neutralizantes alcalinos en 21,21%, sacarosa en 8,08% y de féculas en 7,07%. No se encontró peróxido de hidrógeno ni cloruros en las muestras analizadas. Concluyendo que existe malas prácticas de los productores de leche al encontrar adulterantes o sustancias extrañas en las leches utilizadas para la elaboración de quesos.

Zhao et al. (2019) evaluaron el efecto del contenido de agua y urea, utilizando la técnica de la espectroscopia dieléctrica para determinar el porcentaje adulteración de la leche. Utilizaron muestras de leche entera, leche descremada, agua con diferentes concentraciones de urea (15, 30, 75, 150, 300, 750, 1500 mg/ 100 mL) respectivamente, la medición de propiedades dieléctricas se realizó rangos de frecuencias entre 100 MHz a 40 GHz. Los resultados demostraron que la espectroscopia dieléctrica de microondas puede utilizarse como un medio de monitoreo para determinar adulteración de la leche con agua o urea.

Liu et al. (2018) determinaron los valores de permitividad dieléctrica para la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) y factor de pérdida ( $\epsilon''$ ) en leche descremada con diferentes niveles de sólidos no grasos, en un rango de frecuencias de 20 a 4500 MHz a 25 °C. Utilizaron leche descremada fresca procedente de vacas de la raza Holstein, fraccionaron la leche descremada y adicionaron leche en



polvo descremada para incrementar los sólidos no grasos (10,04% hasta 14,68%). Observaron que  $\epsilon'$  de la leche desnatada disminuyó a medida que aumentaba la frecuencia, y  $\epsilon''$  disminuyó a frecuencias de 20 Hz hasta 2000 MHz, seguidamente aumentó hasta los 4500 MHz. Los resultados mostraron una relación lineal entre  $\epsilon'$  y el contenido de sólidos no grasos con un  $R^2 = 0,940$  [20 Hz - 50 MHz] y  $R^2 = 0,990$  [150 hasta 4500 MHz];  $\epsilon''$  tuvo una relación lineal positiva con el contenido de sólidos no grasos con un  $R^2 = 0,970$  en todas las frecuencias investigadas.

Zhu et al. (2018) evaluaron la viabilidad de la ED como una herramienta rápida y sencilla para determinar la concentración de grasa en leche fresca. Utilizaron 143 muestras de 500 g de leche fresca de vaca a  $24 \pm 1$  °C, realizaron la adquisición de las PD en 201 frecuencias discretas de 20 a 4500 MHz. Los modelos que estudiaron fueron: modelo lineal de regresión de mínimos cuadrados parciales (RMCP), modelo de máquinas de aprendizaje extremo (MAE) y máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados (MVSMC). RMCP resultó ser el mejor modelo de predicción para determinar la concentración de grasa presente en la leche con  $R^2_V$  de 0,924 y RECMP de 0,168% en este estudio.

Guo et al. (2010) estudiaron la influencia del contenido de agua agregada y frescura de la leche de vaca, durante el almacenamiento a 22 °C y 5 °C a frecuencias de 10 Hz a 4500 MHz. Las muestras utilizadas fueron leche diluida con agua a concentraciones desde 70 a 100% (incremento de 5) almacenada durante 36 horas a 22 °C y 144 horas a 5 °C. Los resultados muestran que la constante dieléctrica de la leche disminuyó al aumentar la frecuencia, y el factor de pérdida disminuyó de 10 a 1700 MHz y luego aumentó hasta los 4500 MHz a 22 °C. Los resultados muestran que el factor de pérdida obtuvo el mayor  $R^2 = 0,995$  a 915 MHz.

Zhu & Kang (2015) evaluaron las PD dependientes de la frecuencia y la temperatura de la leche de cabra adulterada con proteína de soja, a frecuencias de 20 a 4500 MHz, a temperaturas

desde 5 a 75 °C. Las muestras utilizadas fueron de 300 mL de leche a las cuales le añadieron proteína de soya de 1 a 5% respectivamente. Observaron que  $\epsilon'$  disminuyó al aumentar la frecuencia o la temperatura. El  $\epsilon''$  disminuyó al aumentar la frecuencia de 1000 a 3000 MHz y luego aumentó a medida que aumentaba la frecuencia. Tanto  $\epsilon'$  como  $\epsilon''$  aumentaron linealmente al aumentar el contenido de proteína de soya.

Zhu et al. (2016) evaluaron la viabilidad de utilizar espectroscopia dieléctrica para medir la cantidad de proteínas en leche de vaca. Las muestras de leche fresca se recolectaron de 145 vacas diferentes, las cuales se midieron a 201 frecuencias discretas de 20 a 4500 MHz. Los datos se trabajaron en dos grupos (calibración y validación) para predecir el contenido de proteínas. Se utilizaron los modelos de regresión de mínimos cuadrados parciales (RMCP), modelo de máquinas de aprendizaje extremo (MAE) y máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados (MVSMC) para correlacionar las propiedades dieléctricas con el contenido de proteínas. MVSMC resultó ser el mejor para determinar el contenido de proteínas con un coeficiente de determinación en el conjunto de predicción  $R_V^2 = 0,865$ , raíz del error cuadrático medio del conjunto de predicciones  $REMP = 0,094$ , y la desviación predictiva residual  $DPR = 2,604$ . Los resultados muestran la cantidad proteína en la leche podría determinarse de manera precisa mediante el uso de espectroscopia dieléctrica combinada con métodos quimiométricos.

## **2.2. Bases teóricas**

### **2.2.1. Leche**

#### **A. Definición.**

De acuerdo con la Norma Técnica Peruana 202.001 (2003), la leche es un producto que se obtiene a través de la secreción mamaria de vacas lecheras saludables, mediante ordeños higiénicos y completos que se realizan de manera interrumpida. Esta leche es destinada para su procesamiento

y posterior consumo. Además, la leche fresca es aquella que no ha sido sometida a ningún proceso de calentamiento o tratamiento térmico (INDECOPI, 2003).

### **B. Origen.**

La leche proviene de la secreción mamaria de los mamíferos hembra (vacas, ovejas y cabras, etc.), cuyo objetivo principal es satisfacer nutricionalmente las necesidades básicas del recién nacido durante los primeros meses de vida (Zavala, 2005). Asimismo, presenta características de color blanquecino y exento de olores y sabores extraños, sin embargo, por sus características nutricionales convierten a la leche en un producto perecedero muy propenso a contaminación microbiana (Artica, 2014; MINAGRI, 2017).

### **C. Composición nutricional.**

La composición nutricional de la leche establece su calidad nutricional y el rendimiento de producción de derivados lácteos como el queso. Esta composición puede variar dependiendo del tipo de raza de ganado vacuno, en su contenido de carbohidratos, grasas, agua, vitaminas, sales minerales y proteínas, esta última es de alto valor biológico en una proporción de 3,5 g de proteínas por cada 100 mL (Agudelo & Bedoya, 2008). En la Tabla 1 se detalla la composición nutricional de la leche de vacas de raza Brown Swiss.

**Tabla 1***Composición nutricional de la leche de vacas de raza Brown Swiss*

<b>Componente</b>	<b>NTP 202.001 (2003)</b>	<b>Magariños (2000)</b>	<b>Taverna (2019)</b>	<b>Colos (2012)</b>	<b>Santos (2005)</b>
Agua	85-90	85-90	85-90	85-90	86,59
Grasa	3,2	4,01	4	3,83	4,01
Proteínas	-	3,61	3,5	3,28	3,61
Latosa	-	5,04	4,8	4,82	5,04
Ceniza	0,7	0,73	-	-	0,73
Sólidos no grasos	8,2	9,40	-	-	-
Sólidos Totales	11,4	12,41	13	12,69	-

**Agua.** La leche es un líquido que se compone principalmente de agua (entre el 85% y el 90%), en la que se encuentran glóbulos de grasa y otros componentes emulsionados o suspendidos. Las proteínas se encuentran en un estado coloidal, es decir, en forma liofilizada (caseína y globulina) o liofilizada (albúmina). Además, la lactosa y las sales están presentes en la leche en forma de solución verdadera. En general, la leche tiene una estructura en la que diferentes componentes se encuentran en diferentes formas y estados en la fase dispersante de agua (Agudelo & Bedoya, 2008).

**Carbohidratos.** El principal carbohidrato presente en la leche es la lactosa, formado por glucosa y galactosa. Su concentración en la leche es relativamente constante y está presente aproximadamente entre un 4 a 5% jugando un papel importante en el sabor y textura de la leche (FAO, 2018).

**Grasa.** Gran porcentaje de grasa presente en la leche son sintetizadas por las células secretoras de las glándulas mamarias y constituyen alrededor del 3,5% al 4% de la leche. Estas

grasas se encuentran presentes en la leche como partículas emulsionadas o suspendidas en pequeñas microesferas rodeadas por una capa de fosfolípidos. Esta estructura permite que la grasa no se acumule y se mantenga suspendida en la fase acuosa de la leche, impidiendo su separación (Agudelo & Bedoya, 2008).

El contenido de grasa presente en la leche influye de acuerdo la dieta, salud, edad y raza del animal que la produce. Se pueden realizar pruebas químicas y eléctricas para determinar el contenido de grasa en la leche y verificar si ha sido alterada de alguna manera (Agudelo & Bedoya, 2008).

**Proteínas.** La proteína láctea es un componente importante de la leche y está compuesta de múltiples fracciones proteicas con diferentes pesos moleculares, que representan entre el 2,5% y el 3,5% de la leche (Agudelo & Bedoya, 2008). Existiendo dos tipos principales de proteínas en la leche: la caseína y las proteínas del suero. La caseína es un grupo especial de proteínas y representan el 80 % del total de proteínas presentes en la leche, además contienen fosfatos y son insolubles a un pH de 4,6 a 20 °C. Por otro lado, las proteínas del suero representan el 20% del total de proteínas de la leche y constituidas por lactoglobulina y lactoalbúmina (Agudelo & Bedoya, 2008).

**Minerales.** La leche es una fuente rica de diferentes minerales, como sodio, manganeso, hierro, magnesio, cobalto, potasio, cobre y flúor. La gran parte de minerales se pueden encontrar en mayor concentración en la membrana de los glóbulos grasos (Agudelo & Bedoya, 2008).

**Vitaminas.** La composición nutricional de la leche contiene una serie de vitaminas que son importantes para la salud humana como la vitamina: A, D, E, K, B1, B2, B6, B12, C, carotenos, nicotinamida, biotina y ácido fólico (Agudelo & Bedoya, 2008). La concentración de estas vitaminas contenidas en la leche depende de las condiciones ambientales y alimenticias de los

animales que producen la leche (Agudelo & Bedoya, 2008). Por ejemplo, el contenido de carotenos y vitamina A puede aumentar si el ganado se alimenta con forrajes frescos, mientras que el contenido de vitamina E puede aumentar durante el verano, cuando los animales consumen forrajes más secos y el contenido graso de la leche aumenta (Agudelo & Bedoya, 2008).

**Enzimas.** Hay dos tipos de enzimas presentes en la leche: enzimas corporales y enzimas enzimáticas. Las enzimas corporales se originan en el cuerpo y llegan a la leche de forma natural, ya sea desde la sangre o desde las células corporales. Las enzimas enzimáticas, por otro lado, son producidas por las glándulas mamarias y tienen un papel importante en la producción y procesamiento de la leche. Ambos tipos de enzimas son importantes para el funcionamiento y la salud del organismo (Agudelo & Bedoya, 2008).

Las hidrolasas: El funcionamiento del mecanismo se basa en una hidrólisis, en la que participan enzimas como las esterasas, las lipasas y las proteasas.

Las oxido-reductasas: Entre las enzimas presentes en la leche, las más significativas son la catalasa y la peroxidasa. Estas enzimas son importantes porque son indicadores de la calidad microbiológica de la leche. Por lo tanto, su presencia o ausencia puede proporcionar información sobre la salud y la pureza de la leche. Es importante tener en cuenta que la leche debe ser producida y manejada de manera adecuada para garantizar su calidad y seguridad alimentaria.

#### **D. Calidad de la leche.**

La leche cruda de calidad deberá estar exenta de agentes químicos (preservantes o conservantes) y de otras sustancias extrañas a su composición (FAO, 2011). Asimismo, no haber sido expuesta a tratamientos que pueda disminuir o modificar sus componentes originales (MINAGRI, 2017). Las características organolépticas, fisicoquímicas, microbiológicas y calidad higiénica de la leche fresca se pueden apreciar en las Tablas (1, 2, 3 y 4).

**Requisitos organolépticos.** En la Tabla 2 se visualizan los parámetros estandarizados de calidad de leche fresca, establecidos por la Norma Técnica Peruana 202.001.

**Tabla 2**

*Requisitos organolépticos de leche fresca*

<b>Requisitos Organolépticos</b>	
<b>Color</b>	Blanco opalescente o ligeramente amarillento.
<b>Olor</b>	Suave, lácteo característico, exento de olores anormales.
<b>Sabor</b>	Característico, ligeramente dulce, debido a la lactosa.
<b>Aspecto</b>	Uniforme, exento de elementos extraños.
<b>Textura</b>	Consistencia líquida, pegadiza y levemente viscosa. Debido a la presencia de azúcares y sales disueltas.
<b>Opacidad</b>	Es opaca incluso en capas muy finas, esta característica se debe a la presencia de caseína, grasas y sales disueltas, las cuales no permiten el paso de la luz.

*Nota.* Tomada de la Norma Técnica Peruana 202.001. INDECOPI (2003).

**Requisitos físico-químicos.** En la Tabla 3 se detallan los parámetros estandarizados de calidad de leche fresca, establecidos por la Norma Técnica Peruana 202.001.

**Tabla 3**

*Requisitos físico-químicos de leche fresca*

<b>Ensayo</b>	<b>Requisito</b>	<b>Método de Ensayo</b>
Materia grasa (g/100 g)	Mínimo 3,2	NTP 202.028:1998 FIL – IDF ID:1996
Sólidos no grasos (g/100 g)	Mínimo 8,2	Por diferencia entre los sólidos totales y la materia grasa
Sólidos totales (g/100 g)	Mínimo 11,4	NTP 202. 118: 1998
Acidez, expresada en g. de ácido láctico (g/100 g)	0,14 – 0,18	NTP 202. 116: 2000
Densidad a 15° C (g/ mL)	1,0296 – 1,0340	NTP 202. 007: 1998 NTP 202. 008: 1998
Índice de refracción del suero, 20 °C	Mínimo 1,34179 (lectura refractométrica 37,5)	NTP 202. 016: 1998
Ceniza total (g/100 g)	Máximo 0,7	NTP 202. 172: 1998
Alcalinidad de la ceniza total (mL de solución de NaOH 1 N)	Máximo 1,7	NTP 202. 172: 1998
Índice crioscópico	Máximo -0,540 °C	NTP 202. 184: 1998
Prueba de alcohol (74% v/ v)	No coagulable	NTP 202. 030: 1998
Prueba de la reductasa con azul de metileno	Mínimo 4 horas	NTP 202. 014: 1998

*Nota.* Tomada de la Norma Técnica Peruana 202.001. INDECOPI (2003).



**Requisitos microbiológicos.** En la Tabla 4 se detallan los parámetros estandarizados de calidad de leche fresca, establecidos por la Norma Técnica Peruana 202.001.

**Tabla 4**

*Requisitos microbiológicos de leche fresca*

<b>Ensayo</b>	<b>Requisitos</b>	<b>Método de ensayo</b>
Numeración de microorganismos mesófilos aerobios y facultativos viables UF/mL	Máximo $1 \times 10^6$	FIL LDF 100B: 1991
Numeración de coliformes UFC/mL	Máximo $1 \times 10^3$	FIL IDF 738: 1998

*Nota.* Tomada de la Norma Técnica Peruana 202.001. INDECOPI (2003).

**Requisitos de calidad higiénica.** En la Tabla 5 se detallan los parámetros estandarizados de calidad de leche fresca, establecidos por la Norma Técnica Peruana 202.001.

**Tabla 5**

*Requisitos de calidad higiénica de leche fresca*

<b>Ensayo</b>	<b>Requisitos</b>	<b>Método de ensayo</b>
Conteo de células somáticas/mL	Máximo $5 \times 10^5$	NTP 202 173: 1998

*Nota.* Tomada de la Norma Técnica Peruana 202.001. INDECOPI (2003).

### **2.2.2. Adulteración**

La adulteración de la leche, viene a estar dado por la adición o sustracción de algún componente de su constitución química, provocando cambios en su composición fisicoquímica (Calderón et al., 2013). Los productores con la finalidad de tener mayor rentabilidad en su producción y venta de leche fresca vienen realizando malas prácticas agropecuarias, es decir adulteración de la leche, utilizando diversos agentes adulterantes como: Adición de agua, urea, azúcares, almidón y suero de quesería (Guo et al., 2010; Jitendra et al., 2017; Zhao et al., 2019).

Estos adulterantes suelen afectar a las características fisicoquímica y composicional de la leche fresca, disminuyendo el rendimiento y la producción del producto terminado. Asimismo, diversos estudios manifiestan que el consumo de leche adulterada puede generar problemas a la salud de los consumidores (Guo et al., 2010).

#### **A. Técnicas de adulteración.**

**Adulteración con agua.** La dilución de la leche fresca con agua del grifo reduce su valor nutricional y puede ser una fuente de contaminación microbiológica. Esta práctica, que aumenta el volumen de la leche, se considera el fraude más simple y común en la industria láctea (Galindo et al., 2006).

**Adulteración con cloruros.** El rango de cloruros presente en la leche es de 0,07% a 0,13%, sin embargo, en vacas con mastitis la leche es acida, y la adición de cloruros como la urea, permiten generar una red entre los protones dispersos con las cadenas de las kappa-caseínas, lo que permite mejorar la acidez y/o pH (Rondón et al., 2003).

**Adulteración con azúcar.** La leche contiene principalmente lactosa como su principal azúcar. Si se encuentra sacarosa en la muestra de leche, esto puede ser un indicio de adulteración, ya que a veces se añade sacarosa junto con cloruros para ocultar la dilución de la leche con agua. La sacarosa es un disacárido que se compone de una molécula de fructuosa y una de glucosa. Aunque la leche puede contener pequeñas cantidades de glucosa proveniente de la hidrólisis de la lactosa, no debería contener fructosa (Galindo et al., 2006).

**Adulteración con almidón.** Utilizando principalmente para esconder la adulteración por agua en la leche y así aumentar el contenido de sólidos totales (Galindo et al., 2006).

**Adulteración con suero de quesería.** Es una práctica muy común de adulteración de leche mediante la adición del suero dulce obtenido de la producción de queso, una de los más difíciles

de determinar, al no ser percibido sensorialmente o a través de métodos fisicoquímicos, la detección de esta forma de adulteración es a través de técnicas de electroforesis empleando geles de poliacrilamida, en presencia del detergente aniónico dodecilsulfato sódico (Galindo et al., 2006).

***Adulteración con antibióticos.*** La presencia de antibióticos en la leche es un tipo de adulteración indirecta que se produce cuando son suministrados a las vacas. Esto puede afectar negativamente la calidad de la leche y representar un problema de salud pública (Magariños, 2000). El consumo de leche de animales que han sido tratados con antibióticos puede provocar reacciones alérgicas en algunos consumidores. Además, el uso de estos productos puede contribuir al desarrollo de resistencias bacterianas, lo que puede dificultar el tratamiento de enfermedades. Además, la utilización de antibióticos en la producción de leche puede presentar dificultades técnicas en la elaboración de productos lácteos. Por estas razones, es importante asegurar que la leche que se consume es de alta calidad y se produce de manera sostenible y responsable (Motta et al., 2014).

#### **B. Técnicas de determinación de adulteración en leche fresca.**

***Método crioscópico.*** El método de congelación involucra principalmente el agua, que tiene una presión de 760 mmHg a nivel del mar y su punto de congelación es de 0,000 °C. Al disolver una sustancia (soluto) en el agua, se obtiene una solución con un punto de congelación más bajo que el agua pura. Esta diferencia entre el punto de congelación de la solución y el agua pura se llama caída crioscópica y es directamente proporcional a la concentración de la sustancia en la solución. El punto de congelación de la leche depende principalmente de la lactosa y las sales inorgánicas presentes en su composición, lo que hace que su punto de congelación sea más bajo

que el agua. El valor promedio del punto de congelación de la leche es de  $-0,545\text{ }^{\circ}\text{C}$  y varía dentro del rango de  $-0,535$  a  $-0,550\text{ }^{\circ}\text{C}$  dependiendo de su composición (Artica, 2014).

**Método refractométrico.** El método de refracción se basa en medir el índice de refracción o grado refractométrico de la leche, separando previamente las proteínas y la grasa láctea. Esta separación se logra con reactivos como el sulfato de cobre, el ácido acético y el cloruro de calcio. Al separar las proteínas, también se separan los glóbulos de grasa, dejando un suero con lactosa y minerales que se pueden separar por filtración. Los porcentajes de estos componentes son más constantes y algunas de sus propiedades físicas y químicas, como el índice de refracción, la densidad y el contenido de sólidos totales, permanecerán relativamente inalterados. Una disminución de estos porcentajes puede indicar una posible adulteración de la leche con agua (Artica, 2014).

La leche normal posee un índice refractométrico que varía entre 36,1 y 39,5, este rango puede variar según el porcentaje de agua adicionada de ser menor a 36 podemos deducir que ha sido adulterada con agua. Este método nos permite detectar niveles de adulteración en la leche que van desde un 10% hasta un 15% de agua adicionada (Artica, 2014).

**Método lactométrico.** Este método se basa en medir la densidad de la leche, que generalmente está en un rango de  $1.028$  a  $1.033\text{ g/cm}^3$  o de 28 a 33 grados Quevenne. La incorporación de agua a la leche influye en su densidad de manera proporcional a la cantidad de agua añadida (Artica, 2014). Un inconveniente de este método es que no es capaz de detectar adulteraciones por agua cuando el porcentaje de agua añadida supera el 15%, mediante la medida de la densidad de la leche (corregida a  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Artica, 2014).

**Método mercurimétrico.** El método mercurimétrico se basa en titular una muestra de leche con ácido nítrico, titulado con nitrato mercúrico  $0,1\text{N}$  ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ ) y en presencia de

difenoilcarbazona como indicador. Durante la titulación, el ion mercurio se une con el ion cloro ( $\text{HgCl}$ ) hasta que se agota, y luego el exceso de Hg reacciona con la difenoilcarbazona, provocando un cambio de color a violeta indicando un resultado positivo de la prueba. Este método es utilizado para determinar la presencia de cloro en la leche, lo que puede indicar que ha sido tratado con productos químicos para eliminar bacterias (Artica, 2014).

**Reacción de Seliwanoff.** Se fundamenta en la determinación de fructosa proveniente de la sacarosa utilizada para enmascarar la adulteración por agua, al hidrolizarse la sacarosa se libera una molécula de glucosa más una de fructosa (Artica, 2014). Para determinar la presencia de sacarosa, se prepara una muestra de leche fresca y se utiliza resorcina acida como reactivo, reaccionando con la fructosa para dar un color rojo característico indicando positivo el análisis (Artica, 2014).

**Determinación almidón.** Para determinar si la leche contiene almidón, se prepara una muestra de 5 mL para luego ser expuesta a temperatura de ebullición en un tubo de ensayo. Luego, se enfría la muestra y se introduce dos gotas de solución de yodo al 0,05%. Si la leche contiene almidón, la solución de yodo daría una coloración azulada, lo que indica un resultado positivo del análisis. Este método se emplea para determinar presencia de almidón en la leche, lo que puede ser un indicio de adulteración con productos comestibles como la harina de maíz o la harina de arroz (Walker et al., 2004).

**Determinación de suero de quesería.** Para descubrir y medir la cantidad de suero en la leche, existen varios métodos que se basan en la determinación de ciertos componentes de la leche. Algunos de estos métodos incluyen la separación por electroforesis en gel y la cromatografía líquida de alta resolución de caseinomacropéptido, que es un componente de la kappa-caseína liberada por acción del cuajo. Otro método que nos permite detectar la presencia de proteína de

suero y caseína en la proteína total de la leche es el uso de la cuarta derivada del espectro de absorbancia. Estos métodos son útiles para detectar y estimar la cantidad de suero en la leche, lo que puede ser un indicio de adulteración con productos lácteos de baja calidad (Ram et al., 2009).

### **2.2.3. Espectroscopia dieléctrica**

**A. Fundamentos de la espectroscopia dieléctrica.** La espectroscopia dieléctrica (ED) es una técnica que describe cómo los fotones, o partículas de luz, se comportan al atravesar un medio y cómo interactúan con las propiedades eléctricas del material. Esta técnica se basa en la respuesta del material cuando está sometido a un campo eléctrico. Cuando los fotones interactúan con el material de forma eléctrica y magnética, es posible describir estas interacciones mediante las ecuaciones de Maxwell. La ED es una herramienta útil para analizar la estructura y las propiedades de diferentes materiales (Velásquez, 2014).

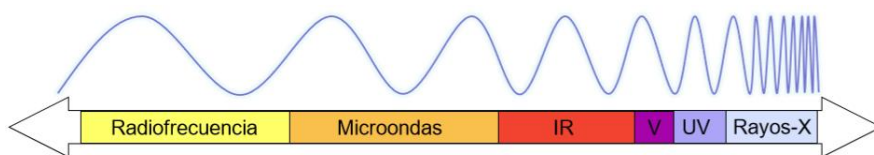
Los fotones son partículas fundamentales que transmiten la energía electromagnética. Esto se debe a las vibraciones transversales (eléctricas) y longitudinales (magnéticas) de los fotones en movimiento. Por tanto, la intensidad de la fuerza eléctrica o magnética de los fotones depende de su trayectoria y cuanto mayor sea la cantidad de energía que posea el flujo de fotones, mayor será su impacto en la materia (Velásquez, 2014).

**B. Rangos de estudio de radio frecuencias y microondas.** La espectroscopia dieléctrica se utiliza para analizar la radiación electromagnética en el rango de longitud de onda que va desde las radiofrecuencias hasta las microondas. Las microondas son un tipo de radiación electromagnética con longitud de onda que va desde 3 metros hasta 3 milímetros, lo que corresponde a un rango de frecuencias que va desde 100 megahercios hasta 100 gigahercios. La espectroscopia dieléctrica es una técnica útil para estudiar la estructura y las propiedades de diferentes materiales utilizando estas longitudes de onda y frecuencias (Castro, 2010).

En el espectro electromagnético la radiación electromagnética se clasifica en diferentes tipos los cuales se distinguen de acuerdo a su longitud de onda y frecuencia (Figura 1) las microondas se encuentran en el rango de las ondas de radio de baja frecuencia y los infrarrojos y la luz visible a alta frecuencia. Donde la energía de las microondas en estas frecuencias no es lo suficientemente alta para romper enlaces químicos o mover electrones. Siendo la espectroscopia dieléctrica es una técnica que examina las propiedades eléctricas de los materiales mediante el uso de radiación electromagnética en el rango de microondas (Castro, 2010).

### Figura 1

#### *Espectro electromagnético*



*Nota.* Tomada de Castro (2010).

Las ondas electromagnéticas consisten en un campo eléctrico y un campo magnético (Figura 2). Cuando las ondas de microondas inciden en un alimento, una parte de esta energía es absorbida por el alimento, lo que aumenta su temperatura. Mediante las ecuaciones de Maxwell se puede determinar la cantidad y distribución de la energía de microondas absorbida por el alimento. La espectroscopia dieléctrica es una técnica que se utiliza para estudiar cómo la radiación electromagnética de microondas que interactúa con las propiedades eléctricas de diferentes materiales (Castro, 2010). Las Ecuaciones (1, 2, 3 y 4) se utilizan para describir cómo las ondas electromagnéticas se propagan a través de diferentes materiales:

$$\nabla \times \mathbf{B} = j\omega \epsilon \mathbf{E} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{B} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\nabla \epsilon E = \rho \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

B: vector del campo magnético.

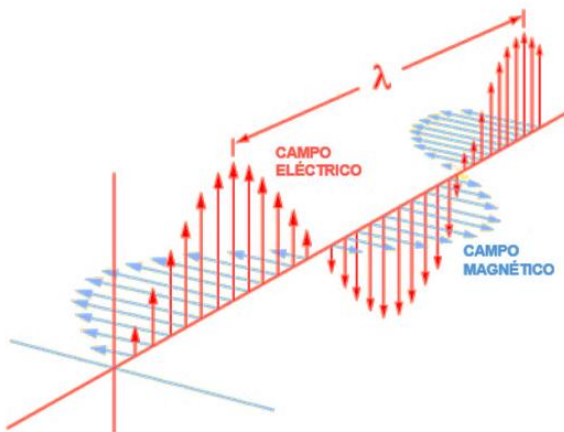
E: vector del campo eléctrico.

$\epsilon$ : permitividad del material (F/m); caracterizando la interacción del campo eléctrico de las microondas con el material.

$\mu$ : permeabilidad del material (H/m); caracterizando la interacción del material con el campo magnético de las microondas.

## Figura 2

### *La onda electromagnética*



*Nota.* Representación de una onda electromagnética mostrando sus componentes eléctricas (rojo) y magnética (azul).

La onda se expande en dirección del eje z. Tomada de Castro (2010).

La permitividad dieléctrica compleja ( $\epsilon_r$ ) es una PD que se utiliza para describir cómo un alimento responde a la influencia de un campo electromagnético (Castro, 2010). Se puede expresar mediante la Ecuación 5:

$$\epsilon_r = e' - j * e'' \quad \text{Ecuación 5}$$



La fracción real de la permitividad dieléctrica compleja, conocida como la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ), es una medida de la habilidad de un material para acumular energía cuando se expone a un campo eléctrico y la parte imaginaria de la permitividad, conocida como el factor de pérdida ( $\epsilon''$ ), se relaciona con la absorción y disipación de energía en diversas formas de energía (Castro, 2010).

Los materiales dieléctricos perfectos sólo tienen una parte real de su permitividad compleja, pero si una onda electromagnética se propaga a través de un material dieléctrico no perfecto, se produce una pérdida de energía y la parte imaginaria de la permitividad obtiene un valor.

El subíndice "r" en la permitividad compleja ( $\epsilon_r$ ) indica que los valores son relativos al vacío, lo cual hace que la variable sea adimensional y se puede expresar mediante la Ecuación 6.

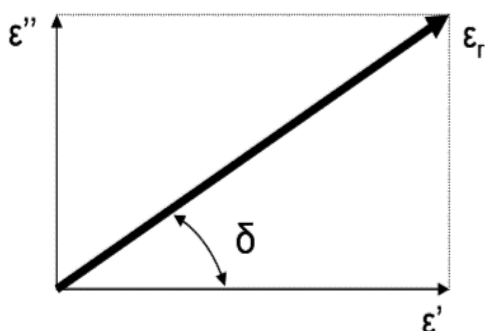
$$\epsilon_r = \epsilon^*/\epsilon_0 \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo la permitividad del vacío  $\epsilon_0 = 8,8542 \times 10^{-12}$  F/m.

La proporción entre la parte real e imaginaria de la permitividad expresa un parámetro importante como la tangente de pérdidas, que se puede calcular mediante la Ecuación 7 (Figura 3). Este vector resulta de la forma de un ángulo  $\delta$  con el eje de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ), que determina la habilidad del alimento para disipar energía (Castro, 2010).

**Figura 3**

*Diagrama del vector permitividad compleja*



*Nota.* Tomada de Castro (2010).

$$\tan \delta = \frac{e''}{e'} = D = \frac{1}{Q} = \frac{\text{Energía Perdida / Ciclo}}{\text{Energía Almacenada / Ciclo}} \quad \text{Ecuación 7}$$

El factor de disipación se denota con la letra D y el factor de calidad se con la letra Q. Algunas veces se utiliza el término "factor de calidad o Q-factor", que es el inverso de la tangente de pérdidas (Castro, 2010).

**C. Factores que afectan a las propiedades dieléctricas.** En un alimento las PD son afectados por diversos factores como, la frecuencia, temperatura, composición del alimento, porcentaje de humedad, densidad, entre otros (Castro et al., 2011).

**Temperatura.** Debe ser estudiada para cada tipo de alimento, porque su composición puede afectar directamente al impacto que la temperatura tiene sobre las PD. Es decir, para no alterar los resultados significativamente para las propiedades dieléctricas, se tiene que trabajar con temperaturas controladas o estable para lograr resultados fiables y comparables (Castro, 2010).

**Composición del alimento.** Los componentes de un alimento están fuertemente vinculados con las propiedades de los alimentos: el contenido de carbohidratos, humedad, sales, proteínas y grasas son los componentes más influyentes (Castro, 2010). Siendo el agua el componente más influyente y visto como el factor más determinante sobre las propiedades dieléctricas, ya que es el

medio donde están disueltas las moléculas de menor tamaño como son las proteínas, sales disueltas, ácidos nucleicos entre otros (Castro, 2010).

**Frecuencia de medida.** La frecuencia de medición tiene una gran influencia en las PD de los alimentos, ya que determina cómo la conductividad iónica y los mecanismos de polarización contribuyen al  $\epsilon''$  por lo que cada mecanismo afecta el  $\epsilon''$  en un rango de frecuencias específico (Castro, 2010).

La técnica de medición de las PD ha tomado gran importancia debido al surgimiento de sistemas de control de calidad de alimentos empleando la radiación electromagnética (Castro, 2010).

**D. Técnicas de obtención de propiedades dieléctricas.** La permitividad no puede medirse directamente, por lo que se determina a partir de la medición de la impedancia, las pérdidas de transmisión, la reflectividad, entre otros parámetros. Los métodos de medición de las PD se dividen en dos categorías: los métodos de reflexión y los métodos de transmisión. Algunos ejemplos de métodos de transmisión incluyen las líneas de transmisión coaxiales, el espacio libre y las sondas coaxiales de terminación abierta (Castro, 2010).

**Sonda coaxial.** Para medir las propiedades dieléctricas de una muestra, se utilizan las ondas reflejadas por la muestra y se sumerge a la sonda en la muestra líquida o semilíquida, o se coloca en contacto con la superficie de un material sólido. Este método no es invasivo y fácil de usar, y no requiere la preparación previa de muestras. Sin embargo, este método tiene algunas desventajas, como la necesidad de que la muestra tenga un espesor determinado y la posibilidad de cometer errores de medición debido a la presencia de aire entre la muestra y la sonda (Castro, 2010).

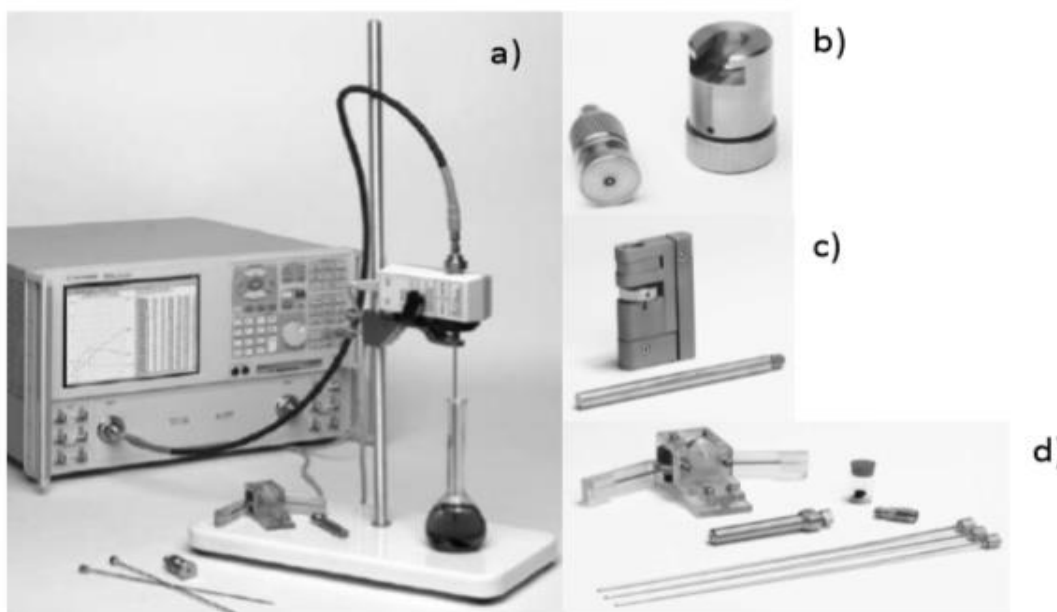
La sonda coaxial es una sección cortada de una línea de transmisión que se utiliza para medir las propiedades dieléctricas de una muestra en un rango de frecuencias desde 0,2 a 50 GHz,

y está conectado a un analizador de redes vectoriales y un portátil para su manejo remoto (Castro, 2010). Los coeficientes de reflexión se determinan utilizando un software que calcula la permitividad a partir de los parámetros medidos, después de que el equipo haya sido calibrado (Castro, 2010).

La técnica sonda coaxial funciona acoplada a un analizador de redes vectoriales (Figura 4), cuenta con diversas sondas que suelen conectarse al analizador de redes vectoriales en la técnica de medida a través de sonda coaxial.

#### Figura 4

##### *Tipos de sondas coaxiales*



*Nota.* (b), (c) y (d) sondas que pueden conectarse a un analizador de redes. Tomada de Agilent Technologies (2008).

**Platos paralelos.** Para medir las propiedades dieléctricas de una muestra utilizando esta técnica, se coloca una lámina delgada de material entre dos electrodos que forman parte de un sensor de platos paralelos, el cual está conectado a un analizador de impedancia (Figura 5). La

señal eléctrica obtenida se determina a partir de la capacitancia y el factor de disipación. A partir de estos parámetros, se calcula la constante dieléctrica y el factor de pérdida (Castro, 2010).

### Figura 5

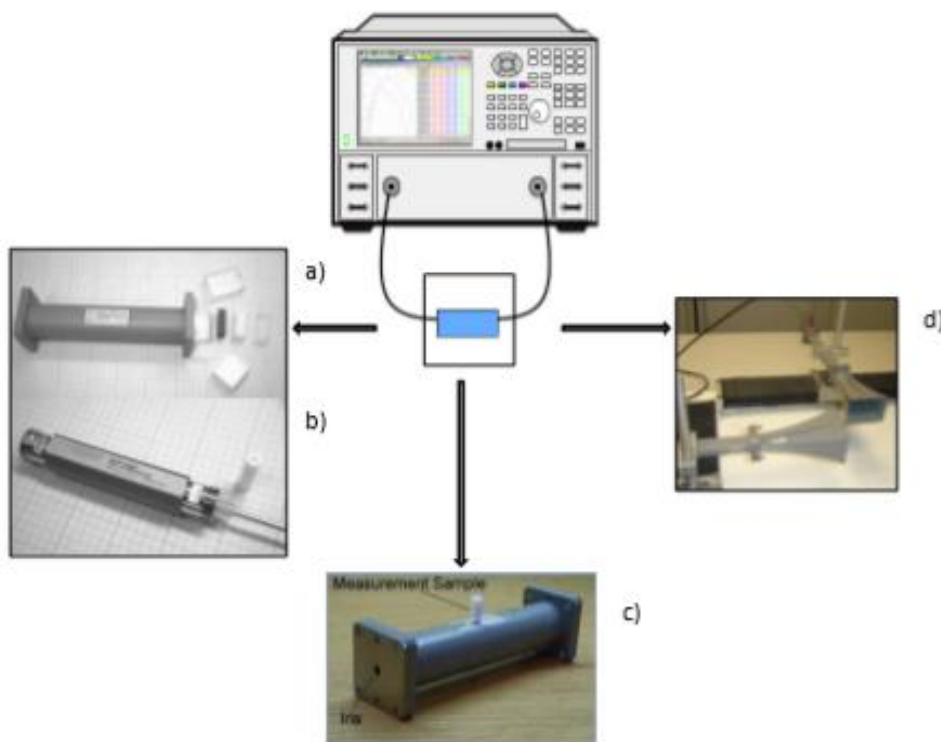
*Equipo analizador de impedancias y sensor de platos paralelos*



**Línea de transmisión.** Este método de medición involucra el uso de una guía de onda y una sonda coaxial en línea, que se conectan a un analizador de redes vectoriales a través de dos puertos (Figura 6) (Castro, 2010). Para la toma de las propiedades dieléctricas mediante esta técnica, es necesario preparar la muestra, dándole formas rectangulares o anulares respectivamente (Castro, 2010). Con esta técnica, se puede determinar la permitividad y la permeabilidad del material que se estudia a partir de la amplitud y la fase de las señales de microondas a través de él (Castro, 2010). Una de las ventajas de este método es que es más preciso que la sonda coaxial, aunque puede presentar dificultades para medir materiales con bajas pérdidas, además de ser un método invasivo y destructivo (Castro, 2010).

**Figura 6**

*Esquema de las diferentes técnicas de medida de propiedades dieléctricas*



*Nota.* a) Guía de onda, b) Línea de transmisión coaxial, c) Cavidad resonante y d) Antenas para la técnica de espacio libre. Tomada de Agilent Technologies (2004).

**Cavidad resonante.** El método de cavidades resonantes utiliza estructuras que tienen un alto factor de calidad ( $Q$ ) y resuenan a determinadas frecuencias. Cuando se coloca una muestra de material dieléctrico dentro de una cavidad resonante, se puede calcular la permitividad compleja o la permeabilidad del material en una frecuencia específica, que es la frecuencia de resonancia de la cavidad (Castro, 2010). Aunque este método es el más exacto para determinar la permitividad, tiene algunas desventajas, como que solo permite trabajar en una sola frecuencia en lugar de un amplio rango de frecuencias y la muestra debe tener una geometría específica (Castro, 2010).

**E. Aplicación de propiedades dieléctricas en alimentos.** Las PD de los alimentos pueden correlacionarse con diferentes parámetros, como el contenido de humedad, las proteínas,

los carbohidratos, el contenido de azúcar, la grasa, la densidad, la frecuencia, la temperatura, el contenido de sal y el estado de agua (congelado, libre o interactuando con la matriz). Estos factores pueden afectar las propiedades dieléctricas de los alimentos y pueden utilizarse para medir y caracterizar eléctricamente estos materiales (Castro, 2010).

La técnica de microondas de señal se ha venido aplicando a muchos productos de la industria alimentaria en el control de calidad, por ejemplo, queso por Everard et al. (2006), yogurt por Guo et al. (2018), mantequilla por Ahmed et al. (2007), también se han realizado estudios en perfiles espectrales dieléctricos para clasificar tubérculos andinos por Chuquizuta et al. (2021), aplicación del aprendizaje automático en la discriminación de zumos de frutas cítricas por Trigos et al. (2020), determinación de las PD de la manzana roja deliciosa y su correlación con los parámetros de calidad por Reyes & Yarlequé (2018), determinación no destructiva de sólidos solubles contenido de caquis mediante el uso de espectroscopia dieléctrica por Liu & Guo (2018), estudio de espectroscopia dieléctrica de microondas del agua dinámica en la leche cruda de bovino normal y contaminada por Agranovich et al. (2017), efectos de la concentración y frescura de la leche sobre las propiedades dieléctricas de microondas por Guo et al. (2010), propiedades dieléctricas dependientes de la frecuencia y la temperatura de leche de cabra adulterada con proteína de soja por Zhu & Kang (2015), determinación cuantitativa del recuento bacteriano total de leche cruda de cabra utilizando espectros dieléctricos por Zhu et al. (2019), entre otros estudios.

### **2.3. Marco conceptual**

**Densidad:** La densidad es una medida de la cantidad de masa que hay en un volumen determinado de una sustancia. Se trata de una magnitud escalar que se utiliza para determinar la cantidad de sólidos totales presentes en un volumen de una sustancia, como el agua.

**Sólidos solubles:** Los sólidos solubles son una medida de la calidad composicional de la leche que incluye la suma de cuatro componentes principales: lactosa, grasa, proteínas y minerales.

**Agua añadida:** Es la incorporación de agua de manera intencional a la leche, la cual altera el punto crioscópico de ésta, al diluirse los solutos presentes en el agua de la leche, en la presente tesis se agregó agua de manera intencional de 0 % a 30 % del total de muestra, la cual se verificó las proporciones de agua añadida mediante un analizador ultrasónico (MILKOTESTER).

**Espectroscopia dieléctrica:** La espectroscopía dieléctrica implica investigar cómo un material responde a un campo eléctrico aplicado. Se mide la corriente eléctrica que fluye a través de una muestra cuando se le somete a un campo eléctrico alterno de diferentes frecuencias. El análisis del espectro dieléctrico obtenido permite obtener información sobre la estructura y el comportamiento de la leche fresca.



## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Ubicación

Este trabajo de investigación se desarrolló en la Universidad Nacional Autónoma de Chota, en el laboratorio del Instituto de Investigación de Mejoramiento Productivo, ubicado en el segundo piso del edificio de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial ubicado en la comunidad de Colpa Huacarís, distrito y Provincia de Chota, Región de Cajamarca.

#### 3.2. Población y muestra

##### 3.2.1. Población

La población del estudio estuvo conformada por leche fresca obtenida de vacas de la raza Brown Swiss del establo "La Lechera", en la comunidad de Cabracancha, distrito de Chota, provincia de Chota, departamento de Cajamarca, Perú.

##### 3.2.2. Muestra

Se utilizó 60 L de leche fresca, obtenida de vacas sanas de la raza Brown Swiss de la comunidad de Cabracancha, Chota, posteriormente se llevó la muestra de leche al laboratorio. El acondicionamiento de muestras (leche/agua) de 200 mL cada una, se realizó en 7 proporciones de (70/30; 75/25; 80/20; 85/15; 90/10; 95/5 y 100/0 %), obteniéndose 350 muestras las cuales fueron calentadas a una temperatura de 25 °C para los análisis.

#### 3.3. Equipos, materiales e insumos

##### 3.3.1. Equipos

- Sonda coaxial de terminación abierta (N1501A-001).
- Analizador de redes vectorial (modelo N 9915A, FieldFox- Keysight Technologies).
- Computador (modelo 15-bs0191a, marca HP)

- Refractómetro (modelo 618.23.001 - ATC, Isolab, Alemania).
- Lactodensímetro (modelo corto LR con rango de 15 a 40 calibrado a 15 °C)
- Termómetro de mercurio (vidrio, rango 0-150 °C)
- Cocina magnética (Velp Scientific f20500421 AM4 X Multi Posición Calefacción Agitador magnético, aluminio placa caliente, 15 L, volumen por posición, temperatura máxima 370 °C).
- Refrigeradora (modelo RT35K5930S8/PE, marca Samsung de 361 L de capacidad).
- Milkotester (modelo Master Eco, MilkoTester, Bulgaria).

### **3.3.2. *Materiales***

- Probetas (vidrio, 250 mL).
- Vaso de precipitación (vidrio, 250 mL).
- Agitador (vidrio).
- Agitadores magnéticos (Tipo C F4 resistencia da alta temperatura PTFE barra agitadora magnética de agitación Bar C5 \* 15mm).
- Tanque de leche (aluminio, 30 Lt).

### **3.3.3. *Insumos***

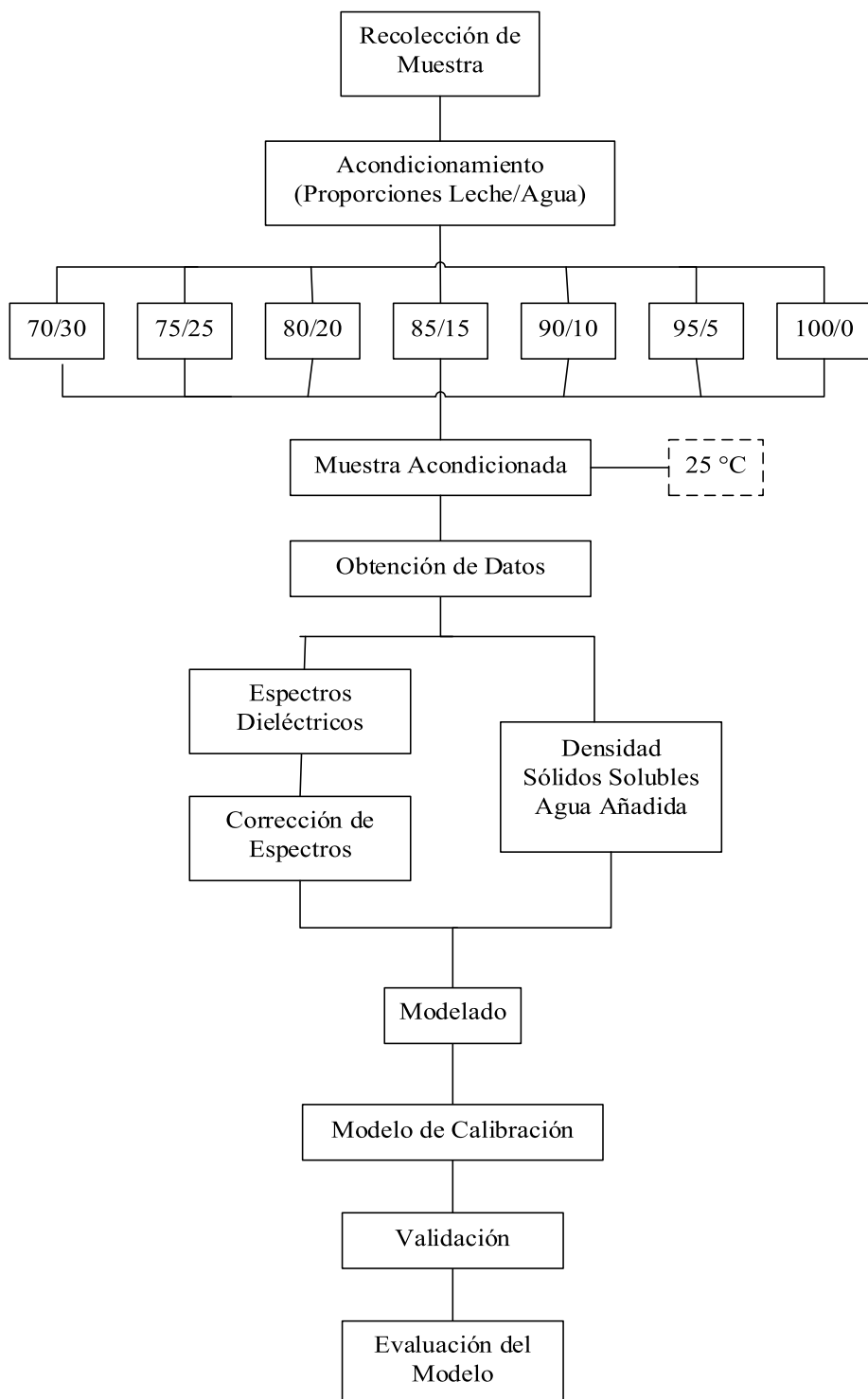
- Agua destilada (Uso Laboratorio, conductividad menor a 1  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , PH 6,5 a 7,5, sólidos totales disueltos menor a 0,5 ppm y carbono orgánico total menor a 50 ppb).

### **3.4. Metodología de la investigación**

#### **3.4.1. *Desarrollo experimental***

En la Figura 7 se muestra el diagrama experimental donde se recogió la materia prima, para luego acondicionarla en 7 proporciones (leche/agua), a continuación, se realizó la obtención de datos de las propiedades dieléctricas propiedades fisicoquímicas, posteriormente se procesaron los datos a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz para desarrollar el modelo de calibración y validación, finalmente se evaluó el modelo.

El procedimiento experimental se detalla en la Figura 7 y los detalles de las muestras y procedimientos para la obtención de resultados se muestran a continuación.

**Figura 7***Diagrama experimental de la investigación*

### 3.4.2. *Diseño experimental*

El diseño de la investigación se basó en un diseño de regresión lineal simple, teniendo como variable independiente el agua añadida a cada proporción y variables dependientes a las características fisicoquímicas (densidad, sólidos solubles y agua añadida). De tal manera establecer la relación las propiedades dieléctricas ( $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ ) y las propiedades fisicoquímicas (densidad, sólidos solubles y agua añadida) a través de un análisis de regresión lineal. En la Tabla 6 se muestra la matriz del diseño experimental de la presente investigación.

**Tabla 6**

*Matriz del diseño experimental de regresión lineal simple*

<b>Tratamientos (leche/agua)</b>	<b>Propiedades Dieléctricas (<math>\epsilon'</math> y <math>\epsilon''</math>)</b>	<b>Densidad</b>	<b>Sólidos solubles</b>	<b>Agua añadida</b>
T1 = 70/30				
T2 = 75/25				
T3 = 80/20				
T4 = 85/15				
T5 = 90/10				
T6 = 95/5				
T7 = 100/0				

### **3.4.3. *Recolección de muestra***

La recolección de muestras de leche fresca, se realizaron a partir de las 07:00 a.m. durante 5 días del establo Santa Rosa (La Lechera) en Cabracancha. En primer lugar, la leche se filtró a través de una tela de algodón para separar las impurezas, luego se trasladó al laboratorio de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial en un tanque de aluminio previamente desinfectado con agua a 92 °C. Luego, las muestras de leche fueron almacenadas en refrigeración a 4 °C para posterior análisis.

### **3.4.4. *Acondicionamiento de las muestras***

Se acondicionaron 350 muestras de leche fresca con adición de agua destilada a base de 200 mL en un vaso de precipitación de 250 mL, en las siguientes proporciones: 70/30; 75/25; 80/20; 85/15; 90/10; 95/5 y 100/0, obteniendo 50 muestras por cada proporción. Seguidamente se procedió a calentar las muestras de leche fresca a 25 °C mediante una placa calefactora magnética; el monitoreo de la temperatura de la leche se llevó a cabo con un termómetro de mercurio de rango de 0 a 150 °C.

### **3.4.5. *Obtención de datos***

**A. Obtención de espectros dieléctricos.** Para adquirir los espectros dieléctricos (propiedades dieléctricas) de la leche, se utilizó una sonda coaxial de terminación abierta (N1501A-001), conectada a un analizador de redes vectorial (modelo N 9915A FieldFox - Keysight Technologies, EEUU). Antes de adquirir las propiedades dieléctricas de la leche, se encendió el equipo por un lapso de media hora a fin de evitar atenuaciones y/o ruido en la obtención de los datos; la calibración del equipo estuvo dado por tres etapas como lo recomendado por el fabricante: aire, cortocircuito y agua destilada a 25 °C (Guo et al., 2010; Jitendra et al., 2017).

Por último, para la obtención de los espectros dieléctricos se utilizó 50 mL de muestra y se realizó a una profundidad de 5 cm desde la superficie de la leche con la sonda coaxial, en un rango de 0,5 a 9 GHz con 401 frecuencias discretas, es decir 401 valores de la constante dieléctrica- $\epsilon'$  y 401 valores del factor de pérdida- $\epsilon''$ . También se tuvo cuidado de eliminar las burbujas entre la sonda y la muestra durante las mediciones, con la finalidad de no alternar los valores de permitividad de la leche. Las mediciones se realizaron por triplicado en las 50 muestras preparadas para cada proporción (leche/agua).

***Pre tratamiento de los espectros dieléctricos.*** Se eliminaron los defectos y/o anomalías (valores atípicos) presenten en los espectros dieléctricos  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  mediante un filtrado de segundo orden de Savitzky-Golay, con 15 frames, en el software Matlab 2020b (Guo et al., 2017; Zhu et al., 2016, 2018; Zhu et al., 2019).

**B. Obtención de propiedades fisicoquímicas.** Luego de la obtención de las propiedades dieléctricas de las muestras de leche fresca adulterada, se procedió a la obtención de la densidad, el contenido de sólidos solubles y agua añadida, los mismo que se detallan a continuación:

***Densidad.*** Se determinó a través de un lactodensímetro de Quevenne – 1,015-1,040: 0,001 (modelo corto LR con rango de 15 a 40 calibrado a 15 °C), la muestra de leche acondicionada a 25 °C se colocó en una probeta de 250 mL posteriormente se introdujo el lactodensímetro para realizar la lectura de la densidad y finalmente se realizó la corrección de densidad empleando la siguiente Ecuación (MINAGRI, 2017).

$$D = Ll + (TM \pm 15 \text{ } ^\circ\text{C}) * 0,0002 \quad \text{Ecuación 8}$$

**Dónde:**

**D:** Densidad corregida.

**LI:** Lectura del lactodensímetro.

**TM:** Temperatura medida.

**Sólidos solubles.** Se determinó mediante el uso de un refractómetro con escala de 0 - 32 °Brix (modelo 618.23.001 - ATC, Isolab, Alemania), agregando de una a tres gotas de leche (25 °C) en la superficie o prisma del refractómetro, seguidamente se obtuvo los resultados de sólidos solubles a través de una lectura de manera directa sobre la escala del porcentaje.

**Agua añadida.** Se determinó mediante el analizador de leche Milko Tester, (modelo Master Eco, Bulgaria) la muestra utilizada fue de 20 mL de leche fresca adulterada a 25 °C, la lectura del equipo tardó entre 40 a 60 segundos para mostrar los resultados de agua añadida en cada análisis. Este análisis se realizó para contrastar la preparación de muestras al adulterar la leche fresca con agua de 0 a 30 % en su composición.

### **3.4.6. Análisis estadístico**

**3.4.6.1. Modelado.** Para la predicción de los sólidos solubles, densidad y agua añadida de leche fresca adulterada con adición de agua mediante espectroscopia dieléctrica, se utilizaron 350 muestras analizadas por triplicado obteniéndose 1050 espectros dieléctricos, a partir de los espectros dieléctricos obtenidos se desarrollaron los modelos de calibración 735 (70%) y validación (30%) sugeridas por, Zhu et al. (2018; 2016) los mismos que se detallan a continuación:

**A. Desarrollo del modelo de calibración.** Para el desarrollo del modelo de calibración, se utilizaron aleatoriamente el 70% (735) de los espectros dieléctricos adquiridos a diferentes concentraciones de leche, logrando identificar y extraer los valores de la constante dieléctrica- $\epsilon'$  y factor de pérdida- $\epsilon''$  a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, tomando como referencia los criterios técnicos otorgados por la Federal Communications Commission (Estados Unidos) para la frecuencia 2450 MHz a partir de la cual se decidió comparar frecuencias en un rango más



amplio. Seguidamente, se construyeron nuevas matrices en una hoja de cálculo (Microsoft. Excel) para obtener los valores promedios de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  para cada proporción y etiquetados con su valor promedio de referencia (densidad, sólidos solubles y agua añadida). Finalmente, se realizó la regresión lineal simple (Ecuación 9) entre los valores promedios de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  y los valores de referencia a diferentes proporciones respectivamente, y mediante el método de mínimo cuadrados parciales se obtuvieron las constantes **a** y **b** de la ecuación lineal y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

$$Y = a X + b \quad \text{Ecuación 9}$$

**Donde:**

**Y** = Densidad, sólidos solubles y agua añadida de la leche.

**X** = Valor de la Constante dieléctrica y factor de pérdidas a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz.

**a y b** = Valores de ajuste.

**B. Validación.** Obtenido los valores de la Ecuación 9, mediante el modelo de calibración, se procedió a realizar la validación del modelo con el 30 % (315) de los espectros dieléctricos restantes por cada proporción. Para ello, los valores promedios de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  por cada proporción fueron reemplazados en “X” de la Ecuación 9, obteniendo los valores de predicción de densidad, sólidos solubles y agua añadida, seguidamente se realizó la correlación lineal entre los valores reales y valores predichos de la densidad, los sólidos solubles y el agua añadida.

### 3.4.7. Evaluación del modelo

Para la evaluación y/o la validación del modelo desarrollado se utilizó la raíz del error cuadrático medio (**RECM**) y raíz del error cuadrático medio normalizado (**NRECM**) a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz respectivamente, tanto RECM y RECMN son indicadores

del rendimiento del modelo sugeridas por Zhu et al. (2019); Guo et al. (2017) y Zhu et al. (2016). Fueron calculadas a través de las Ecuaciones 10 y 11 en el Microsoft Excel, además se calculó el desvío relativo (Dr) con los valores reales y los predichos de (densidad, sólidos solubles y agua añadida) de cada proporción a través de la Ecuación 12.

$$\text{RECM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{M}_{\text{experimental}} - \text{M}_{\text{model}})^2}{n}}$$

Ecuación 10

$$\text{NRECM} = 100 * \frac{\text{RECM}}{(\text{M}_{\text{experimental}})_{\text{maximun}} - (\text{M}_{\text{experimental}})_{\text{minimun}}}$$

Ecuación 11

$$\text{Dr} = \frac{\text{valor real} - \text{valor Predicho}}{\text{valor Real}}$$

Ecuación 12

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### **4.1. Caracterización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida y los espectros dieléctricos de la leche fresca a diferentes proporciones de leche/agua.**

En la Tabla 7 se muestran los valores promedios de: densidad, sólidos solubles y agua añadida de las 350 muestras de leche fresca de vacas - Brown Swiss a diferentes proporciones leche/agua (100/0; 95/5; 90/10; 85/15; 80/20; 75/25 y 70/30). Donde el valor de la densidad vario de 1,028 - 1,019 g/mL esta disminución se dio por la adición de agua, mientras más agua se agregó la densidad de la leche fue disminuyendo contrastando con la Norma Técnica Peruana 202.001 (2003) indicando que la densidad de la leche pura puede variar de 1,028 – 1,0340 g/mL según las condiciones de producción; una densidad menor a 1,028 g/mL indicaría la adulteración de la leche con la adición de agua, concordando con Calderón et al. (2013) quienes reportaron la variación de la densidad en leche variando en el rango de 1,035 a 1,022 g/mL producto de la adulteración con agua. El valor de los sólidos solubles varió de 9,8 - 6,4 y el valor de agua añadida vario de 0 a 29,205 % en leche fresca adulterada con agua. Estos resultados concuerdan con Agudelo & Bedoya (2008) al mencionar que los parámetros fisicoquímicos de la leche adultera puede variar según: composición química, alimentación, raza, etapa de lactancia, condición corporal, estación del año, condiciones del ambientales, y la adición de agua u otros adulterantes agregados de forma intencional a la leche.

En relación a los valores medios de las propiedades dieléctricas ( $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ ) de la leche con diferentes proporciones de agua, se muestra en la Tabla 6 los mismos que varían con el aumento de la frecuencia. Asimismo, los valores de las propiedades dieléctricas de las diferentes proporciones de leche/agua para las frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz se

obtuvieron: los valores de  $\epsilon'$  se encontraron en el rango de 68,116 – 64,695; 64,446 – 60,806 y 56,676 – 53,047 y los valores de  $\epsilon''$  se encontraron en el rango de 12,63 – 13,581; 18,09 - 18,238 y 26,047 – 25,27 respectivamente, siendo estos resultados similares a lo reportado por Guo et al. (2010), quienes reportaron valores a frecuencia de 2450 MHz, que variaron para  $\epsilon'$  de 69,1 - 65,9 y para  $\epsilon''$  los valores variaron de 12,4 – 14,3; también reportaron valores de frecuencia de 4500 MHz los cuales variaron para  $\epsilon'$  de 65,7 – 62,4 y para  $\epsilon''$  variaron de 16,8 – 19,3. Asimismo, Zhu et al. (2016) reportaron valores de frecuencia de 2450 MHz , para  $\epsilon'$  que variaron de 69,87 – 54,55 y para  $\epsilon''$  los valores variaron de 10,8 – 15,85; también reportaron valores a frecuencia de 915 MHz los cuales variaron para  $\epsilon'$  de 72,20 – 56.20 y para  $\epsilon''$  11,37 – 20,31. Este comportamiento se debe a que la gran parte de la leche está compuesto por agua, la cual tiene un valor de  $\epsilon'$  de 78 por ello el valor de  $\epsilon'$  en la leche se acerca a la del agua, mientras más agua tenga la leche en su composición más alta será  $\epsilon'$ .

**Tabla 7***Propiedades fisicoquímicas y dieléctricas de leche fresca*

Proporción Leche / Agua	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Sólidos Solubles (°Brix)	Agua Añadida (%)	Propiedades Dieléctricas					
				2450 MHz		5000 MHz		9000 MHz	
				e'	e''	e'	e''	e'	e''
	1,019	6,4	29,205	68,116	12,630	64,446	18,090	56,676	26,047
70/30	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,216	1,922	2,927	0,678	2,720	0,866	2,386	0,987
	1,020	6,8	22,57	67,569	12,783	63,885	18,139	56,118	25,918
75/25	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0	0,256	2,745	2,485	0,596	2,419	0,762	2,280	0,911
	1,022	7,3	16,56	66,495	13,004	62,755	18,208	54,934	25,886
80/20	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0	0,210	3,311	3,623	0,839	3,404	1,088	2,945	1,298
	1,023	7,8	10,66	66,691	13,288	62,997	18,330	55,262	25,961
85/15	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0	0,264	3,650	3,046	0,764	2,833	0,969	2,420	1,117
	1,025	8,4	5,72	66,738	13,548	62,874	18,595	54,951	26,073
90/10	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0	0,238	4,151	2,918	0,697	2,715	0,840	2,313	0,879
	1,026	9	2,52	66,050	13,582	62,143	18,428	54,354	25,700
95/5	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,001	0,307	2,559	3,191	0,780	2,986	0,990	2,674	1,141
	1,028	9,8	0,0	64,692	13,581	60,806	18,238	53,047	25,270
100/0	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,0	0,312	0,0	3,287	0,882	3,036	1,113	2,606	1,474

*Nota.* Propiedades fisicoquímicas (densidad, sólidos solubles y agua añadida) y propiedades dieléctricas (e' y e'')

(media ± desviación estándar) de la leche fresca a 25 °C a frecuencias puntuales. Se puede observar claramente que, al agregar agua a la leche, las propiedades evaluadas varían proporcionalmente.

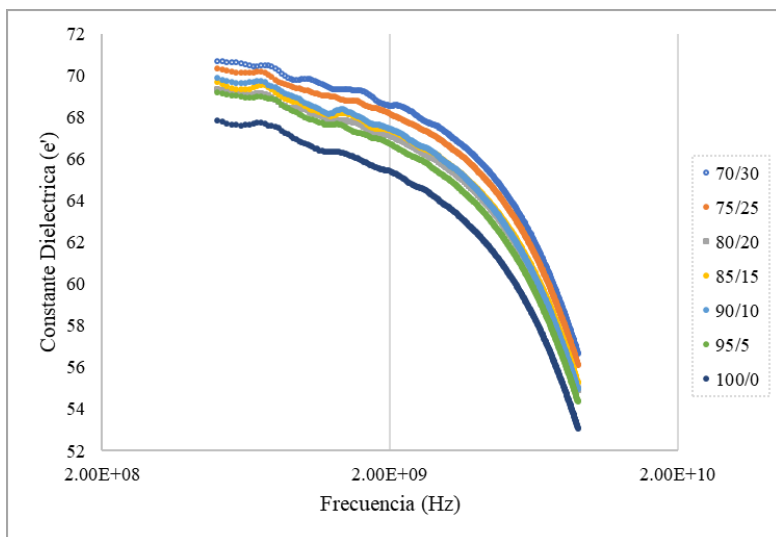
#### 4.1.1. Caracterización espectral de la leche fresca sin pasteurizar a 25 °C.

En la Figura 8 y 9 se muestran los espectros dieléctricos medios de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  de leche fresca no pasteurizada de vacas - Brown Swiss a diferentes proporciones (leche/agua), en un rango de 0,5 a 9 GHz; en la Figura 8 la constante dieléctrica –  $\epsilon'$  de las muestras de leche fresca disminuyeron de 70,677 a 53,047 con el incremento de la frecuencia para las diferentes proporciones de leche/agua, asimismo, los espectros  $\epsilon'$  de las diferentes proporciones leche/agua presentaron valores más altos que la leche pura debido a la mayor cantidad (moléculas) de agua en su composición y a su resonancia o tiempo de relajación dieléctrica, coincidiendo con lo reportado por Agranovich et al. (2017); Guo et al. (2017) y Zhu et al. (2014, 2016).

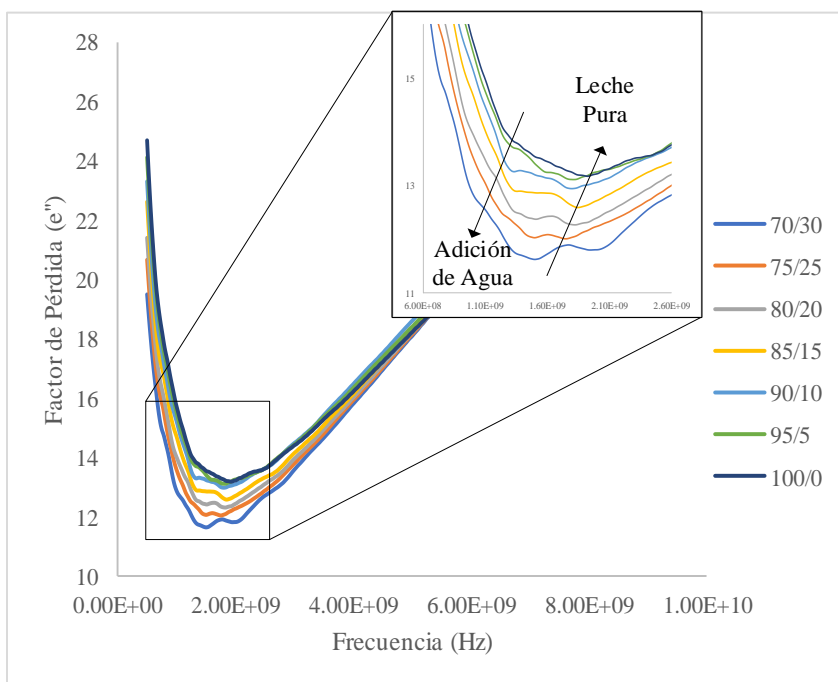
En la Figura 9 se observa a los espectros del factor de pérdida dieléctrica –  $\epsilon''$  de las diferentes proporciones de leche/agua, disminuyeron de 24,677 a 11,627 en el rango de 0,5 a 1,5 GHz y posteriormente aumentaron de 11,627 a 26,073, originando una tendencia en forma de “U” en los espectros de  $\epsilon''$  causado por la conductividad iónica y la polarización dipolar característico de los materiales biológicos – dieléctricos cuyo contenido composicional mayoritario este dado por el agua como lo mencionan Komarov et al. (2005); Agranovich et al. (2017); Guo et al. (2010) y Jitendra et al. (2017), esta tendencia son similares a lo reportado en leche fresca cruda de vaca de la raza Holstein descrito por Agranovich et al. (2017); Guo et al. (2017) y leche de soya por Kataria et al. (2018). Asimismo, la tendencia de “U” en los espectros de  $\epsilon''$  en la presente investigación son similares a otros productos alimentarios y agrícolas en el rango de las microondas, como: estudios realizados en huevo por Soltani et al. (2015), tubérculos andinos por Chuquizuta et al. (2021), zumo de manzana y cítricos por Siguemoto & Gut (2016) y por Trigos et al. (2020), frijol por Torrealba et al. (2016), frutos secos por Wang et al. (2013) y sandía por Guo et al. (2013).

**Figura 8**

*Espectros dieléctricos de  $\epsilon'$  de leche fresca adulterada a diferentes proporciones leche/agua, en el rango de 0,5 - 9 GHz a 25 °*

**Figura 9**

*Espectros dieléctricos de  $\epsilon''$  de leche fresca adulterada a diferentes proporciones leche/agua, en el rango de 0,5 - 9 GHz a 25 °C*



**4.2. Modelización de la densidad, los sólidos solubles, el agua añadida con las propiedades dieléctricas a diferentes proporciones (leche/ agua) a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz.**

El desarrollo de los modelos a partir de las propiedades dieléctricas  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  para determinar la densidad, los sólidos solubles y agua añadida, consta de dos etapas: desarrollo y validación del modelo, la misma que, se detalla a continuación:

**4.2.1. Desarrollo del modelo de calibración**

**A. Constante dieléctrica.** En la Tabla 8 se muestran las ecuaciones de calibración de las regresiones lineales simples de densidad, los sólidos solubles y agua añadida en función de las propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los 735 espectros de  $\epsilon'$  respectivamente. Asimismo, se observan los coeficientes de determinación del conjunto de calibración ( $R_c^2$ ), obteniendo los mejores valores de calibración para la densidad con  $R_c^2 = 0,915$ , sólidos solubles con  $R_c^2 = 0,926$  y agua añadida con  $R_c^2 = 0,831$ , a frecuencias de 9000 MHz, 9000 MHz y 5000MHz respectivamente.



**Tabla 8**

*Modelos de calibración para predicción de la densidad, los sólidos solubles y el agua agregada a partir de constante dieléctrica de leche fresca*

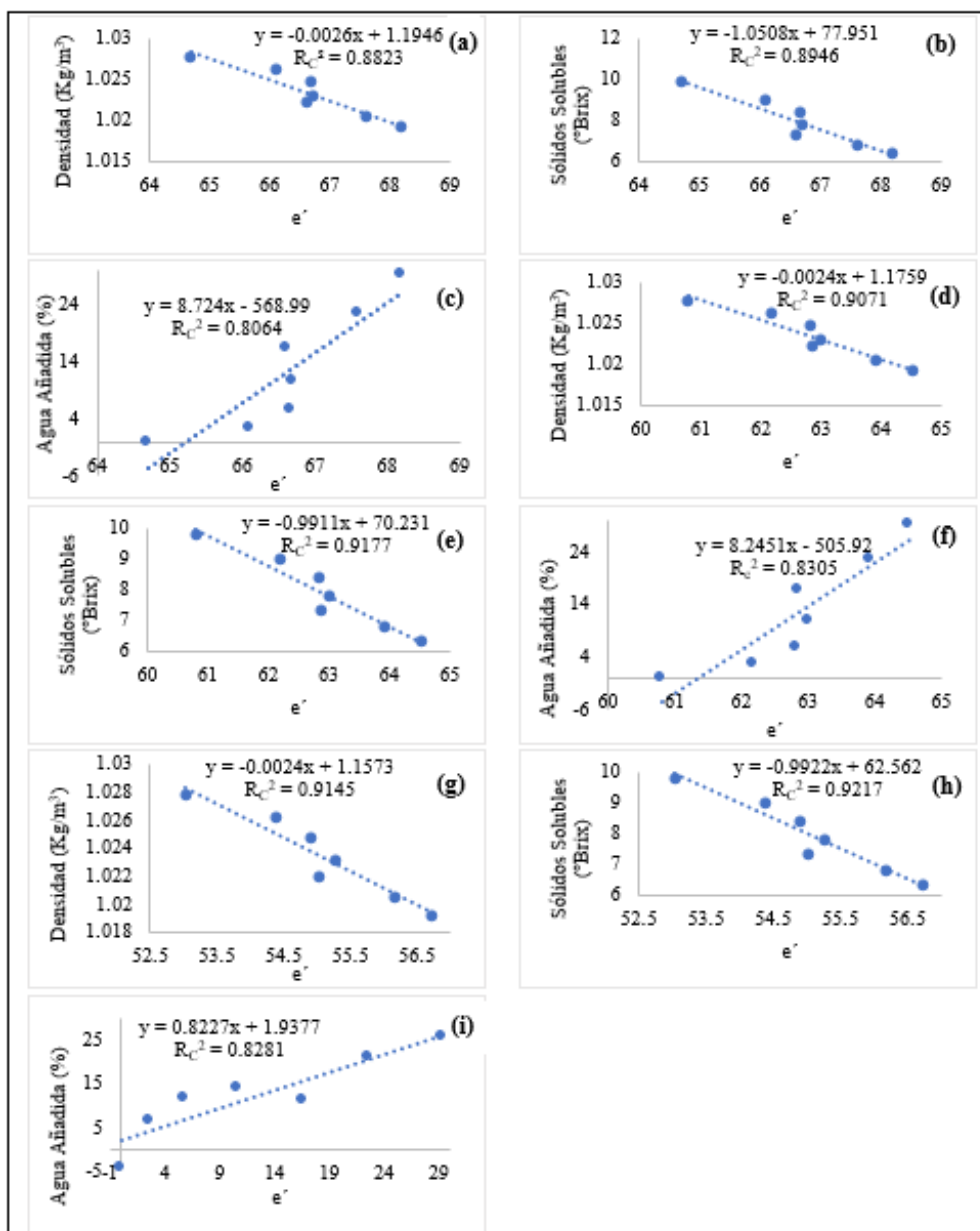
<b>Frecuencia</b>	<b>Densidad</b>	<b>Sólidos solubles</b>	<b>Agua añadida</b>
	$y = -0,0026X + 1,1946$	$y = -1,0508X + 77,951$	$y = 8,724X - 568,99$
2450 (MHz)	$R_c^2 = 0,882$	$R_c^2 = 0,895$	$R_c^2 = 0,806$
	$p = 0,0017$	$p = 0,0013$	$p = 0,0060$
	$y = -0,0024X + 1,1759$	$y = -0,9911 + 70,231$	$y = 8,2451X - 505,92$
5000 (MHz)	$R_c^2 = 0,907$	$R_c^2 = 0,918$	$R_c^2 = 0,831$
	$p = 0,0009$	$p = 0,0007$	$p = 0,0043$
	$y = -0,0024X + 1,1573$	$y = -0,9922X + 62,562$	$y = 0,8227X + 1,9377$
9000 (MHz)	$R_c^2 = 0,915$	$R_c^2 = 0,926$	$R_c^2 = 0,828$
	$p = 0,0008$	$p = 0,0006$	$p = 0,0035$

*Nota.* “y” es el valor a obtener de (densidad, sólidos solubles y agua añadida); “x” es el promedio de la constante dieléctrica- $\epsilon'$  a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz.

En la Figura 10 se muestran los diagramas de dispersión del coeficiente de determinación del conjunto de calibración entre la densidad, los sólidos solubles y agua agregada en función de la constante dieléctrica, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los 735 espectros de  $\epsilon'$  respectivamente.

Figura 10

Diagramas de dispersión de los modelos de calibración de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función de la constante dieléctrica



Nota. Diagramas de dispersión de puntos a frecuencias de 2450 MHz: densidad (a), sólidos solubles (b) y agua añadida (c); 5000 MHz: densidad (d), sólidos solubles (e) y agua añadida (f) y 9000 MHz: densidad (g), sólidos solubles (h) y agua añadida (i).

**B. Factor de pérdida.** En la Tabla 9 se muestran las ecuaciones de calibración del coeficiente de determinación entre la densidad, los sólidos solubles y agua añadida en función de las propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los 735 espectros de  $\epsilon''$  respectivamente. Asimismo, se observan los coeficientes de determinación del conjunto de calibración ( $R_c^2$ ), obteniendo los mejores valores de calibración para la densidad con  $R_c^2 = 0,916$ , sólidos solubles con  $R_c^2 = 0,882$  y agua añadida con  $R_c^2 = 0,977$ , a frecuencia de 2450 MHz respectivamente.

**Tabla 9**

*Modelos de calibración para predicción de la densidad, los sólidos solubles y el agua agregada a partir del factor de pérdida de leche fresca*

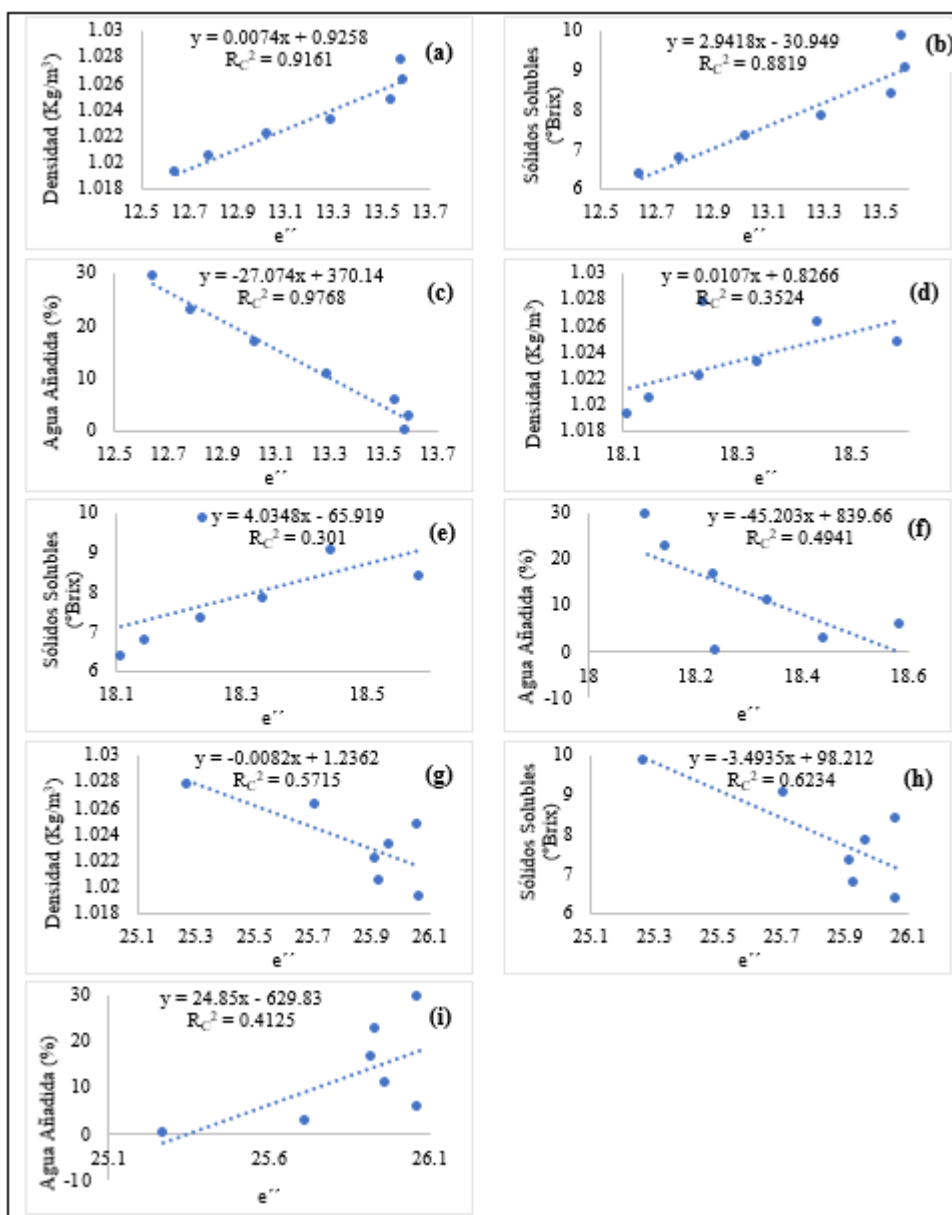
Frecuencia	Densidad	Sólidos Solubles	Agua Añadida
2450 (MHz)	$y = 0,0074X + 0,9258$	$y = 2,9418X - 30,949$	$y = -27,074X + 370,14$
	$R_c^2 = 0,916$	$R_c^2 = 0,882$	$R_c^2 = 0,977$
	$p = 0,0007$	$p = 0,0017$	$p = 0,0000$
5000 (MHz)	$y = 0,0107X + 0,8266$	$y = 4,0348X - 65,919$	$y = -45,203X + 839,66$
	$R_c^2 = 0,352$	$R_c^2 = 0,301$	$R_c^2 = 0,494$
	$p = 0,1599$	$p = 0,2022$	$p = 0,0781$
9000 (MHz)	$y = -0,0082X + 1,2362$	$y = -3,4935X + 98,212$	$y = 24,85X - 629,83$
	$R_c^2 = 0,572$	$R_c^2 = 0,623$	$R_c^2 = 0,413$
	$p = 0,0493$	$p = 0,0347$	$p = 0,1198$

*Nota.* “y” es el valor a obtener de (densidad, sólidos solubles y agua añadida); “x” es el promedio del factor de pérdida- $\epsilon''$  a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz.

En la Figura 11 se muestran los diagramas de dispersión de los coeficientes de determinación de calibración de la densidad, los sólidos solubles y el agua añadida en función de las propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los 735 espectros de  $\epsilon''$  respectivamente.

**Figura 11**

*Diagramas de dispersión de los modelos de calibración de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función del factor de pérdida*



*Nota.* Diagramas de dispersión con frecuencia de 2450 MHz: densidad (a), sólidos solubles (b) y agua añadida (c); 5000 MHz: densidad (d), sólidos solubles (e) y agua añadida (f) y 9000 MHz: densidad (g), sólidos solubles (h) y agua añadida (i).

#### 4.2.2. Validación del modelo

En la Tabla 10 se muestran a los coeficientes de determinación de validación ( $R_V^2$ ) obtenido a partir de la relación los datos reales y los predichos de la constante dieléctrica. Los mejores valores de predicción para la densidad con  $R_V^2 = 0,902$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$ , a frecuencia de 9000 MHz respectivamente. Asimismo, la Tabla 11 muestra los  $R_V^2$  obtenidos a partir de los datos reales y los predichos del factor de pérdida, siendo los mejores valores de predicción para la densidad con  $R_V^2 = 0,915$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,976$ , a frecuencia de 2450 MHz respectivamente. Demostrando que el factor de pérdida a 2450 MHz es una importante variable física de predicción en la densidad y el agua añadida en la adulteración de leche fresca, cuyos valores de  $R_V^2$  han sido superiores a los obtenidos con la constante dieléctrica, siendo esta apreciación similar a lo reportado por Guo et al. (2010) con un  $R_V^2 = 0,995$  en la predicción de leche adulterada con agua.

Además, escasos estudios han venido utilizando modelos de predicción supervisados como los de Machine Learning, destacando su aplicación en la predicción fisicoquímica de la leche fresca mediante espectroscopia dieléctrica, teniendo como ejemplo a los mejores modelos a: regresión de mínimos cuadrados parciales con un  $R_V^2 = 0,924$  en la predicción de grasa por Zhu et al. (2018), máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados con un  $R_V^2 = 0,996$  en la predicción de agua añadida por Guo et al. (2017), máquina de vectores de soporte de mínimos cuadrados  $R_V^2 = 0,865$  para determinar el contenido de proteína por Zhu et al. (2016), todos estos modelos de predicción son robustos, precisos, demandan de algoritmos de programación (lineal y no lineal) – computo paralelo, consumo de tarjeta RAM y una super computadora para su procesamiento, a diferencia de nuestra investigación en la cual se ha utilizado una regresión lineal simple obtenido por el método de mínimos cuadrados parciales, la misma que no demanda de

cómputo paralelo o capacidad de memoria RAM, no obstante ha permitido obtener  $R^2$  similares a otros estudios. Por lo que, esta nueva técnica podría implementarse en línea de producción en las industrias lácteas creando un algoritmo simple y no complejo con la regresión lineal simple y la técnica de ED.

**A. Constante dieléctrica.** En la Tabla 10 se muestran los resultados del coeficiente de determinación obtenidos mediante la utilización de las ecuaciones de calibración para la densidad, los sólidos solubles y el agua añadida en función de las propiedades dieléctricas, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los espectros de  $\epsilon'$  respectivamente. A partir de estas ecuaciones se realizó la validación del modelo, con el promedio de los 315 espectros de  $\epsilon'$  restantes. Así, mismo se muestran a los  $R_V^2$  resultado de la correlación lineal entre los datos reales y los predichos, resultando los mejores valores de predicción para la densidad con  $R_V^2 = 0,902$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$ , a frecuencia de 9000 MHz respectivamente. Además, se muestra el desvío relativo (Dr) de los valores experimentales respecto de los valores predichos por los modelos.

**Tabla 10**

*Coefficiente de determinación  $R^2$ , RECM y Dr de los modelos de predicción de la densidad, sólidos solubles y el agua añadida en función a la constante dieléctrica.*

<b>Frecuencia</b>	<b>Densidad</b>	<b>Sólidos Solubles</b>	<b>Agua Añadida</b>
2450 (MHz)	$R_V^2 = 0,860$	$R_V^2 = 0,872$	$R_V^2 = 0,779$
	RECM = 0,002	RECM = 0,411	RECM = 4,715
	Dr = 0,0019	Dr = 0,0406	Dr = 0,7034
5000 (MHz)	$R_V^2 = 0,890$	$R_V^2 = 0,901$	$R_V^2 = 0,810$
	RECM = 0,002	RECM = 0,363	RECM = 4,375
	Dr = 0,0017	Dr = 0,0339	Dr = 0,6437
9000 (MHz)	$R_V^2 = 0,902$	$R_V^2 = 0,909$	$R_V^2 = 0,843$
	RECM = 0,002	RECM = 0,347	RECM = 4,161
	Dr = 0,0018	Dr = 0,0319	Dr = 0,6232

**B. Factor de pérdida.** En la Tabla 11 se muestran los resultados del coeficiente de determinación obtenidos mediante la utilización de las ecuaciones de calibración para la densidad, los sólidos solubles y agua agregada en función de las propiedades dieléctricas del conjunto de calibración, a frecuencias puntuales de 2450, 5000 y 9000 MHz, a partir del promedio de los 735 espectros de  $\epsilon''$  respectivamente. A partir de estas ecuaciones se realizó la validación del modelo, con el promedio de los 315 espectros de  $\epsilon''$  restantes. Así, mismo se muestran los  $R_V^2$ , resultado de la correlación lineal entre los datos reales y los predichos, obteniendo los mejores valores de predicción para la densidad con  $R_V^2 = 0,915$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,976$ , a frecuencia de 2450 MHz respectivamente. Además, se muestra el desvío relativo (Dr) de los valores reales respecto de los valores predichos por los modelos.

**Tabla 11**

*Coefficiente de determinación  $R^2$ , RECM y Dr de los modelos de predicción de la densidad, sólidos solubles y el agua añadida en función del factor de pérdida.*

<b>Frecuencia</b>	<b>Densidad</b>	<b>Sólidos Solubles</b>	<b>Agua Añadida</b>
2450 (MHz)	$R_V^2 = 0,915$	$R_V^2 = 0,882$	$R_V^2 = 0,976$
	RECM = 0,001	RECM = 0,395	RECM = 1,587
	Dr = 0,00057	Dr = 0,0331	Dr = 0,2374
5000 (MHz)	$R_V^2 = 0,357$	$R_V^2 = 0,307$	$R_V^2 = 0,496$
	RECM = 0,002	RECM = 0,955	RECM = 7,135
	Dr = 0,0016	Dr = 0,0879	Dr = 0,2672
9000 (MHz)	$R_V^2 = 0,535$	$R_V^2 = 0,583$	$R_V^2 = 0,380$
	RECM = 0,002	RECM = 0,741	RECM = 7,891
	Dr = 0,0018	Dr = 0,0756	Dr = 1,0152

#### **4.3. Evaluar los modelos de predicción de la densidad, contenido de sólidos solubles y agua añadida en base a las propiedades dieléctricas utilizando el $R^2$ y RECM.**

En la Tabla 12 se muestra los resultados de evaluación de los modelos obtenidos a partir de las relaciones entre  $e'$  y  $e''$  con sus valores de referencia como son la densidad, sólidos solubles y agua añadida, resultando el mejor modelo para  $e'$  para la densidad con  $R_V^2 = 0,902$ , RECM = 0,002 y NRECM = 24,354, sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$ , RECM = 0,347 y NRECM = 9,977 y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$ , RECM = 4,161 y NRECM = 14,249, a frecuencia de 9000 MHz. Del mismo modo, en la Tabla 13, el mejor modelo para  $e''$  para la densidad con  $R_V^2 = 0,915$ , RECM = 0,001 y NRECM = 9,845, sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$ , RECM = 0,395 y NRECM = 11,378 y agua añadida con  $R_V^2 = 0,976$ , RECM = 1,587 y NRECM = 5,435, a frecuencia 2450 MHz. Asimismo, el rendimiento de los modelos de predicción de fisicoquímica de leche con ED en otras investigaciones, se basaron tomando como criterio al RECM cuyos valores no sobrepasen



el 5%, tales como; Zhu et al. (2018) obtuvieron un  $RECM_{CV} = 0,168$  para la grasa en el rango de 20 a 4500 MHz y Guo et al. (2017) obtuvieron un  $RECM_{CV} = 0,054$  para el agua añadida en el rango de 20 a 4500 MHz, que si bien dicho valores de RECM son bajo, estos son similares a los obtenidos por nuestra investigación, los cuales es indicativo que el modelo matemático estadístico obtenido se aproxima a un pronóstico real. Finalmente, podemos afirmar que  $e''$  presenta los mejores valores de rendimiento del modelo en  $R^2$  y RECM que  $e'$ , a esto se suma que los valores  $e''$  fueron obtenido a una frecuencia comercial de 2450 MHz, pudiendo ser instalado en la industria a través de un sensor dieléctrico o magnetrón de uso industrial. A diferencia de Guo et al. (2010) quienes utilizaron una frecuencia comercial de 915 MHz en la obtención de  $e''$  cuyo rendimiento de su modelo fue de  $R_V^2 = 0,995$  para la determinación de agua en leche.

**Tabla 12**

*Resultados del coeficiente de determinación ( $R_V^2$ ), RECM y NRECM de la constante dieléctrica*

Frecuencia	2450 MHz			5000 MHz			9000 MHz		
	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>
Densidad	0,860	0,002	25,837	0,890	0,002	23,502	0,902	0,002	24,354
Sólidos Solubles	0,872	0,411	11,829	0,901	0,363	10,440	0,909	0,347	9,977
Agua Añadida	0,779	4,715	16,144	0,810	4,375	14,982	0,843	4,161	14,249

**Tabla 13**

*Resultados del coeficiente de determinación ( $R_V^2$ ), RECM y NRECM del factor de pérdida*

Frecuencia	2450 MHz			5000 MHz			9000 MHz		
	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>	$R_V^2$	RECM <sub>v</sub>	NRECM <sub>v</sub>
Densidad	0,915	0,001	9,845	0,357	0,002	29,333	0,535	0,002	25,292
Sólidos Solubles	0,882	0,395	11,378	0,307	0,955	27,476	0,583	0,741	21,317
Agua Añadida	0,976	1,587	5,435	0,496	7,135	24,432	0,380	7,891	27,020

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Se realizó la caracterización dieléctrica para la densidad, sólidos solubles y agua añadida de 350 muestras de leche de vacas – Brown Swiss a diferentes proporciones (leche/agua). Los valores de la densidad, los sólidos solubles y el agua agregada variaron desde la leche fresca a la leche adulterada con 30% de agua de 1,028 - 1,019kg/m<sup>3</sup>, 9,82 - 6,345°Brix y 0 – 29,205% respectivamente. Las propiedades dieléctricas de leche fresca de vaca se midieron a un rango de 500 MHz a 9000 MHz a 25 °C, donde la constante dieléctrica disminuyó de 70,677 a 53,047 con el incremento de la frecuencia, y el factor de pérdida disminuyó de 24,677 a 11,627 en un rango de frecuencia de 0,5 a 1,5 GHz y luego aumento de 11,627 a 26,073, con frecuencia por encima de los 1,5 GHz hasta los 9 GHz, originando una tendencia en forma de “U” en los espectros de e’’ causado por la conductividad iónica y la polarización dipolar característico de los materiales biológicos – dieléctricos cuyo contenido composicional mayoritario este dado por el agua.

La modelización dieléctrica con las diferentes proporciones (leche/agua), obtuvo mejores resultados de predicción para la constante dieléctrica de la densidad con  $R_V^2 = 0,902$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$ , a frecuencia de 9000 MHz; y en el factor de pérdida los mejores resultados de predicción de densidad con  $R_V^2 = 0,915$ , sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$  y agua añadida con  $R_V^2 = 0,976$ , a frecuencia de 2500 MHz.

Se evaluó los modelos de predicción de la densidad, contenido de sólidos solubles y agua añadida en base a las propiedades dieléctricas utilizando el  $R^2$  y RECM para cada frecuencia y proporción, obteniendo mejores resultados para la constante dieléctrica para la densidad con  $R_V^2 = 0,902$ , RECM = 0,002 y NRECM = 24,354, sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,909$ , RECM = 0,347 y

NRECM = 9,977 y agua añadida con  $R_V^2 = 0,843$ , RECM = 4,161 y NRECM = 14,249, a frecuencia de 9000 MHz. Y mejores resultados para el factor de pérdida para la densidad con  $R_V^2 = 0,915$ , RECM = 0,001 y RECMN = 9,845, sólidos solubles con  $R_V^2 = 0,882$ , RECM = 0,395 y RECMN = 11,378 y agua añadida  $R_V^2 = 0,976$ , RECM = 1,587 y RECMN = 5,435, a frecuencia de 2450 MHz.

Concluyendo que el factor de pérdida es la mejor propiedad dieléctrica para predecir la densidad y agua añadida; y los sólidos solubles obtuvo mejor resultado con la constante dieléctrica indicando que esta técnica podría acoplarse para los análisis de leche fresca en líneas de producción de manera rápido y confiable.

## 5.2. Recomendaciones

- Profundizar el estudio en cuanto a otros factores o variables independientes (adulteración con suero líquido y en polvo, almidón) y variables dependientes (sólidos totales, densidad, punto de congelación) que puedan afectar a la composición fisicoquímica de la leche fresca.
- Se recomienda determinar adulteración mediante espectroscopia dieléctrica en productos lácteos como: Quesos y yogurt.
- Se recomienda determinar cuantitativamente el recuento bacteriano total del yogurt natural utilizando espectros dieléctricos.
- Se recomienda determinar cuantitativamente el recuento bacteriano total de queso tipo suizo con yerbas anti bactericidas (orégano) utilizando espectros dieléctricos

## CAPÍTULO VI

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agilent Technologies. (2004). Taller de espectroscopía dieléctrica por microondas. Agilent Technologies, E.E.U.U.
- Agilent Technologies. (2008). Kit de sonda dieléctrica Agilent 85070E de 200MHz a 50 GHz: descripción técnica general. *Agilent Technologies, E.E.U.U.*
- Agranovich, D., Ishai, P. ben, Katz, G., Bezman, D., & Feldman, Y. (2017). Microwave dielectric spectroscopy study of water dynamics in normal and contaminated raw bovine milk. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.03.051>
- Agudelo, D., & Bedoya, O. (2008). Composición nutricional de la leche de ganado vacuno. *Revista Lasallista De Investigación*, 2.
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, V. G. S. (2007). Dielectric properties of butter in the MW frequency range as affected by salt and temperature. *Journal of Food Engineering*, 82(3). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.02.049>
- Artica Mallqui, L. (2014). Métodos para el análisis fisicoquímico de la leche y derivados lácteos. In *SlideShare* (Vol. 12, Issue 11).
- Balan, B., Dhaulaniya, A. S., Jamwal, R., Yadav, A., Kelly, S., Cannavan, A., & Singh, D. K. (2020). Rapid detection and quantification of sucrose adulteration in cow milk using Attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy coupled with multivariate analysis. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118628>

- Bertemes-Filho, P., Valicheski, R., Pereira, R. M., & Paterno, A. S. (2010). Bioelectrical impedance analysis for bovine milk: Preliminary results. *Journal of Physics: Conference Series*, 224(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/224/1/012133>
- Brousett Minaya, M., Torres Jiménez, A., Chambi Rodríguez, A., Mamani Villalba, B., & Gutiérrez Samata, H. (2017). Calidad fisicoquímica, microbiológica y toxicológica de leche cruda en las cuencas ganaderas de la región Puno –Perú. *Revista de Investigación Universitaria*, 4(2). <https://doi.org/10.17162/riu.v4i2.683>
- Calderón - Rangel, A., Rodríguez, V. C., & Martínez- H, N. (2013). Determinación de adulterantes en leches crudas acopiadas en procesadoras de quesos en Montería (Córdoba). *Orinoquia*, 17(2). <https://doi.org/10.22579/20112629.9>
- Castro-Giráldez, M. (2010). Estudio de los espectros dieléctricos para el control de calidad de alimentos. *Universidad politécnica de valencia. España*. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/8550/tesisUPV3351.pdf>
- Castro-Giráldez, M., Dols, L., Toldrá, F., & Fito, P. (2011). Development of a dielectric spectroscopy technique for the determination of key biochemical markers of meat quality. *Food Chemistry*, 127(1). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.089>
- Chuquizuta, T., Oblitas, J., Arteaga, H., Yarleque, M., & Castro, W. (2021). Dielectric Spectral Profiles for Andean Tubers Classification: A Machine Learning Techniques Application. *2021 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, ICEAA 2021*. <https://doi.org/10.1109/ICEAA52647.2021.9539623>
- Colos, A. (2012). Influencia del consumo de ensilado de avena para vacas en producción de leche de la microcuenca morochucos a 3600 m.s.n.m. *universidad nacional de san Cristóbal de Huamanga, Ayacucho*. Tesis.

[http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/handle/UNSCH/2940/TESIS%20MV69\\_Col.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/handle/UNSCH/2940/TESIS%20MV69_Col.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Das, C., Chakraborty, S., Karmakar, A., & Chattopadhyay, S. (2018). On-chip detection and quantification of soap as an adulterant in milk employing electrical impedance spectroscopy. *2018 International Symposium on Devices, Circuits and Systems, ISDCS 2018*. <https://doi.org/10.1109/ISDCS.2018.8379634>
- Das, S., Sivaramakrishna, M., Biswas, K., & Goswami, B. (2011). Performance study of a “constant phase angle based” impedance sensor to detect milk adulteration. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 167(2). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.041>
- Everard, C. D., Fagan, C. C., O'Donnell, C. P., O'Callaghan, D. J., & Lyng, J. G. (2006). Dielectric properties of process cheese from 0.3 to 3 GHz. *Journal of Food Engineering*, 75(3). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.027>
- FAO. (2011). Leche y Productos Lácteos Leche y Productos Lácteos. In *CODEX Alimentarius*.
- FAO. (2018). *Producción y productos lácteos: Composición de la leche*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura.
- Galindo-Amaya, L. M., Valbuena-Colmenares, E., & Rojas-Villaruel, E. (2006). Estandarización de la detección del glicomacropéptido por PAGE-SDS como índice de adulteración de leche. *Revista Científica de La Facultad de Ciencias Veterinarias de La Universidad Del Zulia*, 16(3).
- Guo, C., Xin, L., Dong, Y., Zhang, X., Wang, X., Fu, H., & Wang, Y. (2018). Dielectric Properties of Yogurt for Online Monitoring of Fermentation Process. *Food and Bioprocess Technology*, 11(5). <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2072-y>

- Guo, W., Lin, B., Liu, D., & Zhu, X. (2017). A Novel Technique on Determining Water Content in Milk Using Radio-Frequency/Microwave Dielectric Spectroscopy and Chemometrics. *Food Analytical Methods*, 10(12). <https://doi.org/10.1007/s12161-017-0946-7>
- Guo, W., Zhu, X., Liu, H., Yue, R., & Wang, S. (2010). Effects of milk concentration and freshness on microwave dielectric properties. *Journal of Food Engineering*, 99(3). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.015>
- Guo, W., Zhu, X., & Nelson, S. O. (2013). Permittivities of watermelon pulp and juice and correlation with quality indicators. *International Journal of Food Properties*, 16(3). <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.551306>
- INDECOPI. (2003). Norma Técnica Peruana, leche y productos lácteos. In *Comision de Reglamentos Tecnicos y Comercilaes - INDECOPI*.
- Inga, L., & Cuenca, F. (2017). Control de calidad en la densidad de leche. *Revista Cubana de Enfermería*, 27(3).
- Jitendra Murthy, V., Sai Kiranmai, N., & Kumar, S. (2017). Study of dielectric properties of adulterated milk concentration and freshness. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012285>
- Kamboj, U., Kaushal, N., Mishra, S., & Munjal, N. (2019). Application of Selective Near Infrared Spectroscopy for Qualitative and Quantitative Prediction of Water Adulteration in Milk. *Materials Today: Proceedings*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.775>
- Kataria, T. K., Corona-Chávez, A., Olvera-Cervantes, J. L., Rojas-Laguna, R., & Sosa-Morales, M. E. (2018). Dielectric characterization of raw and packed soy milks from 0.5 to 20 GHz at temperatures from 20 to 70 °C. *Journal of Food Science and Technology*, 55(8). <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3238-3>

- Komarov, V., Wang, S., & Tang, J. (2005). Permittivity and Measurements. In *Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. <https://doi.org/10.1002/0471654507.eme308>
- Liu, D., & Guo, W. (2018). Nondestructive determination of soluble solids content of persimmons by using dielectric spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, 20. <https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1381114>
- Liu, Q., Guo, W., He, H., & Zhu, X. (2018). Effect of solids-not-fat content on dielectric properties of skim milk. *International Journal of Food Science and Technology*, 53(11). <https://doi.org/10.1111/ijfs.13895>
- Magariños, H. (2000). Producción Higiénica de la leche cruda. In *Proyecto OEA/GTZ de Calidad y Productividad en la Pequeña y Mediana Empresa*.
- Minagri, 2020. El agro en cifras. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/minagri/noticias/168070-minagri-452-mil-familias-en-elperu-se-dedican-a-la-produccion-de-leche-y-sus-derivados>.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego). (2017). Decreto Supremo N° 007-2017-MINAGRI. Reglamento de la leche y productos lácteos. *Diario El Peruano*, 6–17.
- Montinel, A. A. (2008). Uso de microondas para el calentamiento de alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 2.
- MOTTA DELGADO, P. A., RIVERA, M. S., DUQUE, J. A., & GUEVARA, F. A. (2014). Factores inherentes a la calidad de la leche en la agroindustria alimentaria. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 6(1). <https://doi.org/10.24188/recia.v6.n1.2014.265>
- Nitika, Kaur, J., & Khanna, R. (2021). Novel monkey-wrench-shaped microstrip patch sensor for food evaluation and analysis. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11478>



- Pereira, E. V. dos S., Fernandes, D. D. de S., de Araújo, M. C. U., Diniz, P. H. G. D., & Maciel, M. I. S. (2020). Simultaneous determination of goat milk adulteration with cow milk and their fat and protein contents using NIR spectroscopy and PLS algorithms. *LWT*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109427>
- Ram, A., Ayala, R. E. Z., Vega, S., Flores, G. P., Guti, R., & Tolentino, R. (2009). Aplicación de tres métodos analíticos para la detección de suero de quesería en leche UHT comercializada en la Ciudad de México. *Interciencia*, 34(6).
- Reyes Riofrio, A. C., & Yarlequé Medina, Dr. M. A. (2018). Determinación de constantes dieléctricas por espectroscopia de microondas para el análisis de calidad de productos hortofrutícolas. In *Lima, noviembre*.
- Rondón, L., Lara, E., & González, I. (2003). Agentes adulterantes y conservadores en leche fluida. *Rev. Fac. Farm. (Merida)*.
- Santos, A. (2005). Leche y sus derivados. *Universidad Nacional de Chapingo- México*. Obtenido de <http://www.fmvz.uat.edu.mx/Libros%20digitales/Leche%20y%20sus%20derivados-Armando%20Santos%20Moreno.pdf>.
- Siguemoto, É. S., & Gut, J. A. W. (2016). Dielectric Properties of Cloudy Apple Juices Relevant to Microwave Pasteurization. *Food and Bioprocess Technology*, 9(8). <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1723-0>
- Soltani, M., Omid, M., & Alimardani, R. (2015). Egg Quality Prediction Using Dielectric and Visual Properties Based on Artificial Neural Network. *Food Analytical Methods*, 8(3). <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9948-x>
- Taverna, M. (2019). Composición química de la leche. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1*.

- Torrealba-Meléndez, R., Sosa-Morales, M. E., Olvera-Cervantes, J. L., & Corona-Chávez, A. (2016). Dielectric Properties of Beans at Different Temperatures and Moisture Content in the Microwave Range. *International Journal of Food Properties*, 19(3). <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1038565>
- Trigoso, T. C., Cruz, J. O., Minano, H. A., & Silupu, W. C. (2020). Application of Machine Learning in the Discrimination of Citrus Fruit Juices: Uses of Dielectric Spectroscopy. *Proceedings of the 2020 IEEE Engineering International Research Conference, EIRCON 2020*. <https://doi.org/10.1109/EIRCON51178.2020.9253756>
- Velásquez, J. (2014). Estudio de los espectros dieléctricos en alimentos con estructura coloidal. *Universidad Politécnica de Valencia. España*. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/37196/Velazquez%20-%20ESTUDIO%20DE%20LOS%20ESPECTROS%20DIELECTRICOS%20EN%20ALIMENTOS%20CON%20ESTRUCTURA%20COLOIDAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Walker, G. P., Dunshea, F. R., & Doyle, P. T. (2004). Effects of nutrition and management on the production and composition of milk fat and protein: A review. In *Australian Journal of Agricultural Research* (Vol. 55, Issue 10). <https://doi.org/10.1071/AR03173>
- Wang, Y., Zhang, L., Gao, M., Tang, J., & Wang, S. (2013). Temperature- and Moisture-Dependent Dielectric Properties of Macadamia Nut Kernels. *Food and Bioprocess Technology*, 6(8). <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0898-2>
- Wondwossen Bekele Beshah. (2014). Calidad de la carne de cerdo, efecto de la congelación y descongelación, uso del calentamiento dieléctrico para la descongelación y la espectroscopia dieléctrica para evaluar la calidad tecnológica. In *SCIENCE*.

- Yang, R., Liu, R., Dong, G., Xu, K., Yang, Y., & Zhang, W. (2016). Two-dimensional hetero-spectral mid-infrared and near-infrared correlation spectroscopy for discrimination adulterated milk. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.12.017>
- Yu, G., Yang, R. J., Lü, A. J., & Tan, E. Z. (2015). Two-dimensional hetero-spectral near-infrared and mid-infrared correlation spectroscopy for discrimination adulterated milk. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis*, 35(8). [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2015\)08-2099-04](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2015)08-2099-04)
- Zagorska, J., & Ciprova, I. (2013). Evaluation of Factors Affecting Freezing Point of Milk. *International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 7(2).
- Zavala, J. (2005). Aspectos Nutricionales y Tecnológicos de la Leche. *Ministério De Agricultura*, I.
- Zhao, K., Liu, Y., & Zhang, Q. (2019). Dielectric behavior of adulterated milk with urea and water. *Journal of Molecular Liquids*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.133>
- Zhu, X., Guo, W., & Jia, Y. (2014). Temperature-Dependent Dielectric Properties of Raw Cow's and Goat's Milk from 10 to 4,500 MHz Relevant to Radio-frequency and Microwave Pasteurization Process. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6). <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1255-4>
- Zhu, X., Guo, W., Kang, F., Kong, F., & Zhu, Q. (2016). Determination of Protein Content of Raw Fresh Cow's Milk Using Dielectric Spectroscopy Combined with Chemometric Methods. *Food and Bioprocess Technology*, 9(12). <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1791-1>

- Zhu, X., Guo, W., Liu, D., & Kang, F. (2018). Determining the Fat Concentration of Fresh Raw Cow Milk Using Dielectric Spectroscopy Combined with Chemometrics. *Food Analytical Methods*, *11*(5). <https://doi.org/10.1007/s12161-017-1140-7>
- Zhu, X., & Kang, F. (2015). Frequency- and Temperature-Dependent Dielectric Properties of Goat's Milk Adulterated with Soy Protein. *Food and Bioprocess Technology*, *8*(11). <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1593-x>
- Zhu, Z., Zhu, X., Kong, F., & Guo, W. (2019). Quantitatively determining the total bacterial count of raw goat milk using dielectric spectra. *Journal of Dairy Science*, *102*(9). <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16666>

## CAPÍTULO VII

### ANEXOS

**Figura 12**

*Recojo de muestras de leche fresca*



**Figura 13**

*Calentamiento de equipo*



Figura 14

## Configuración de equipo de redes vectoriales

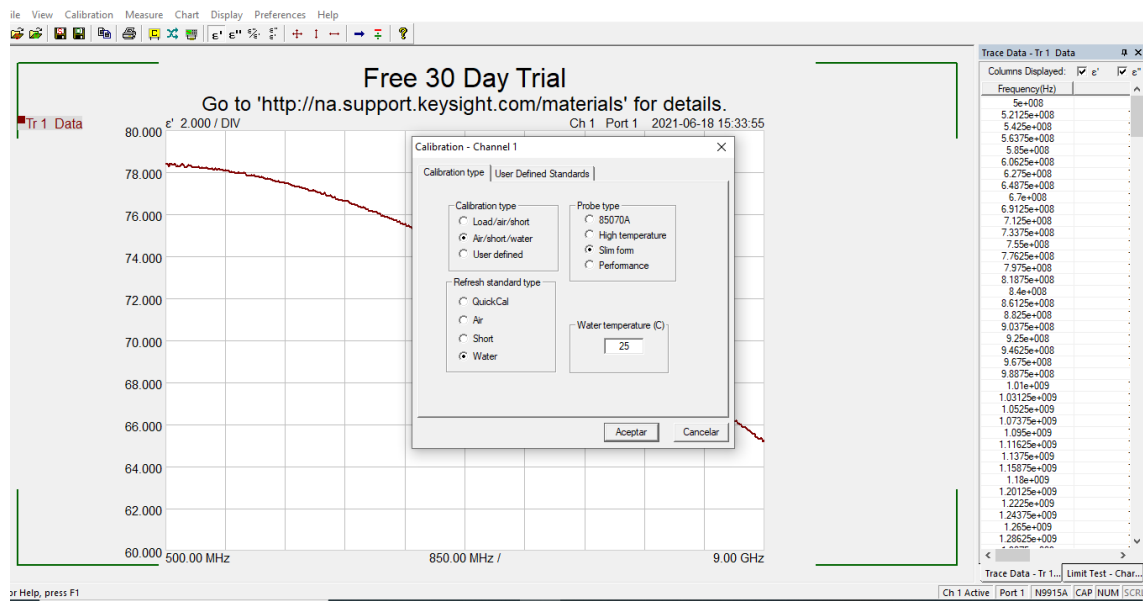


Figura 15

## Calibración del equipo de redes vectoriales con aire

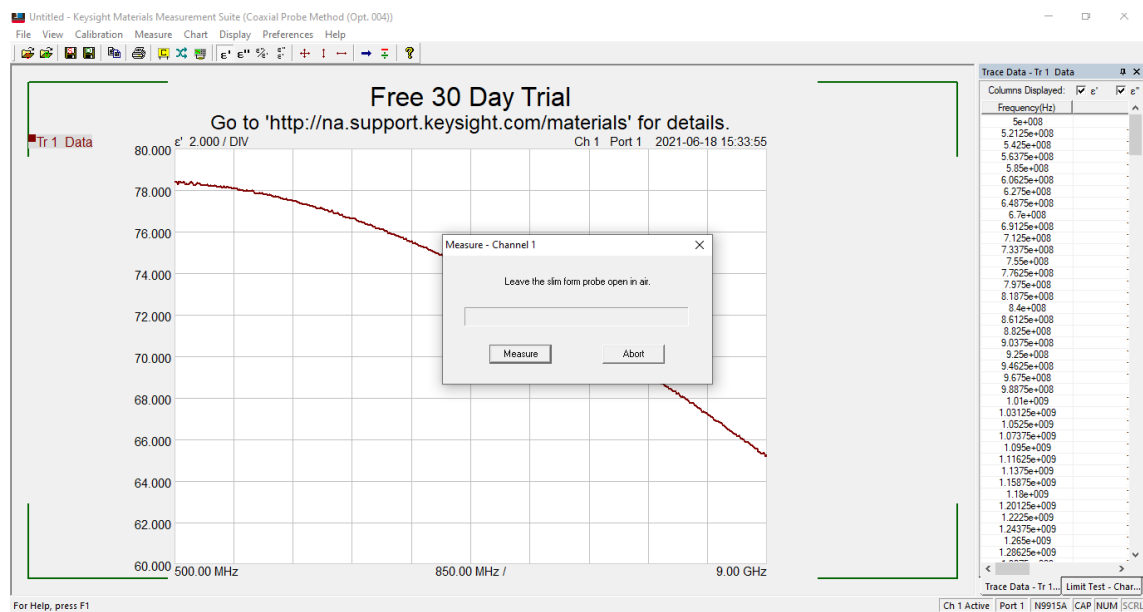


Figura 16

## Calibración del equipo de redes vectoriales mediante corto circuito

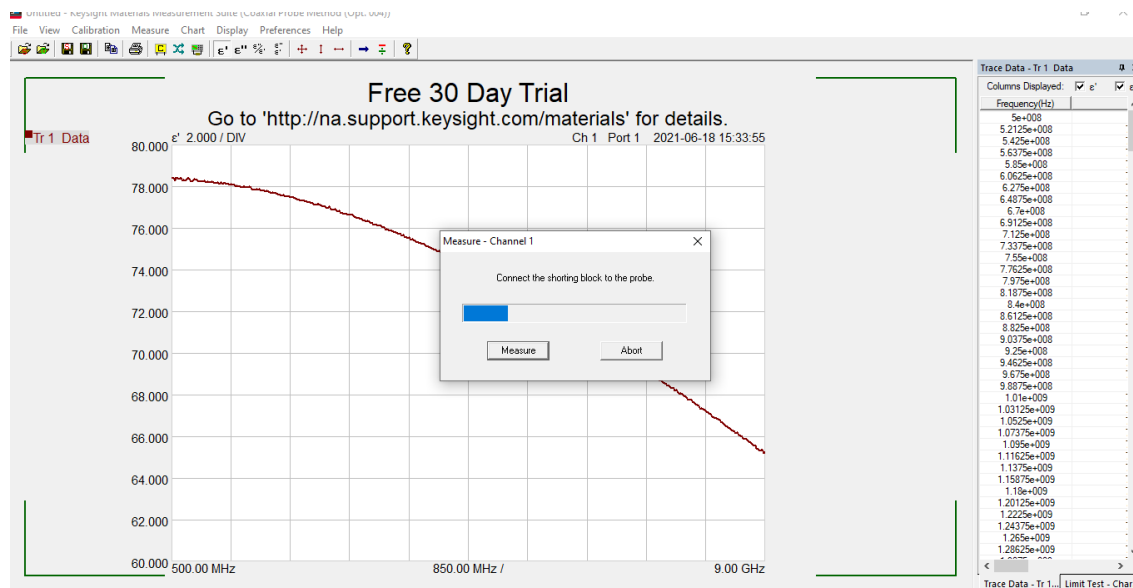
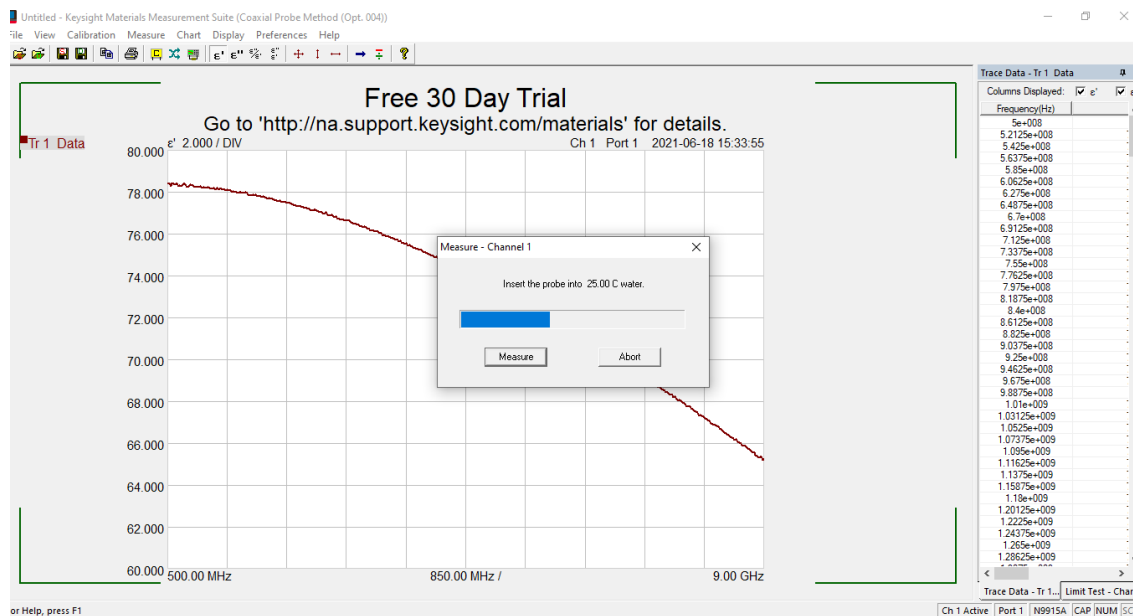


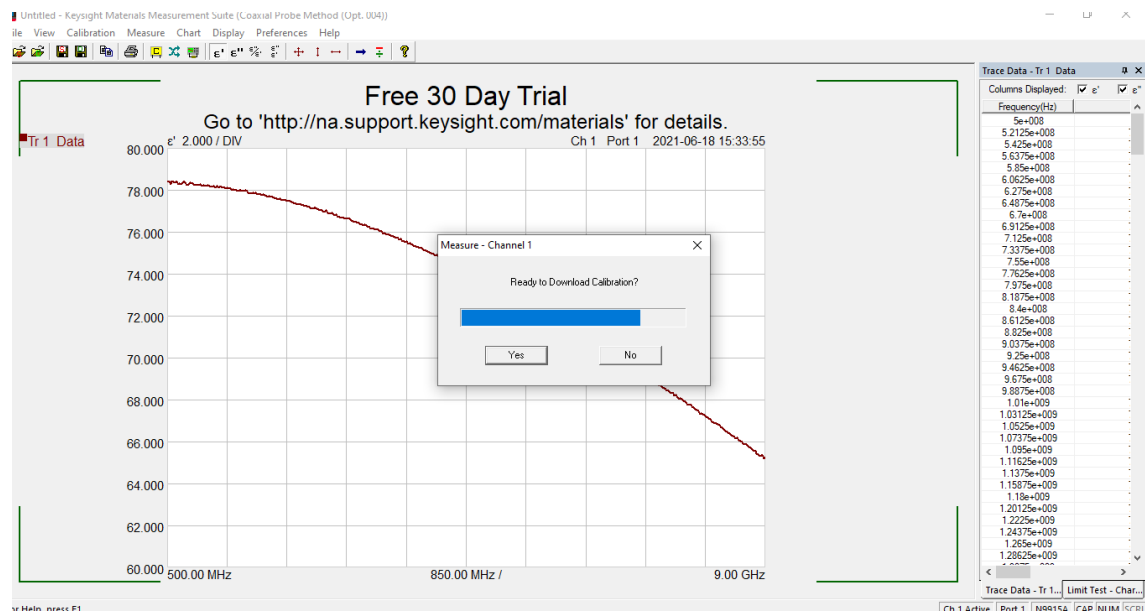
Figura 17

## Calibración del equipo de redes vectoriales con agua desionizada a 25 °C



**Figura 18**

*Calibración del equipo de redes vectoriales completada*



**Figura 19**

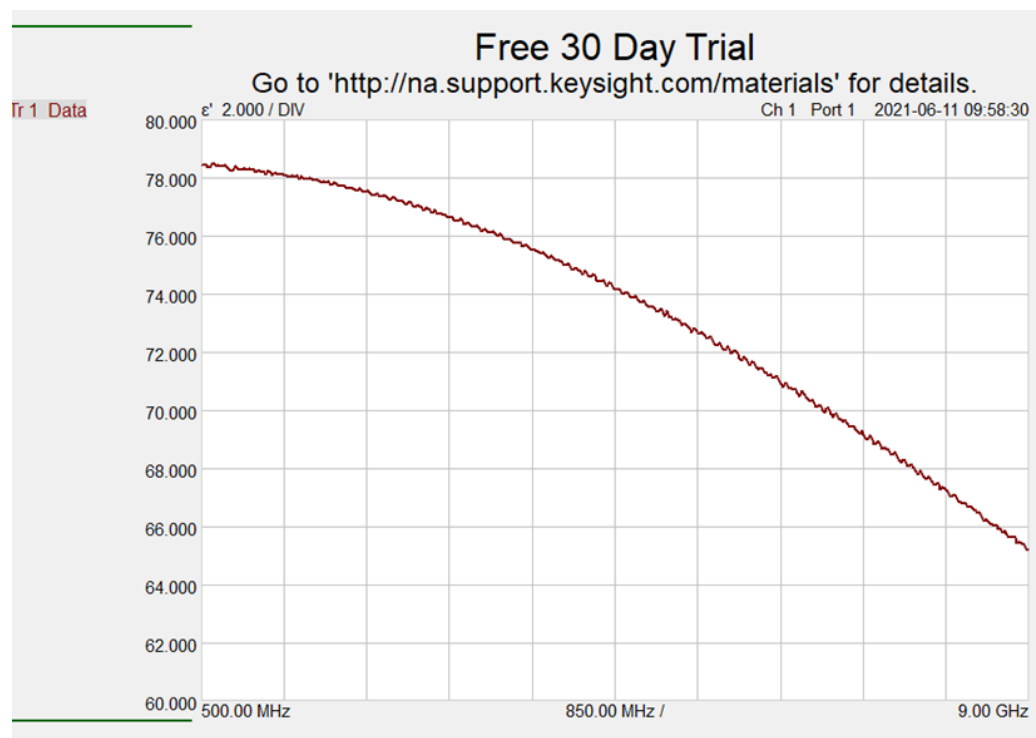
*Analizando las propiedades dieléctricas el agua desionizada a 25 °C*





**Figura 20**

*Propiedades dieléctricas del agua a 25 °C*

**Figura 21**

*Acondicionamiento de muestras de leche fresca*



**Figura 22**

*Homogenización de muestras leche fresca a 25 °C*

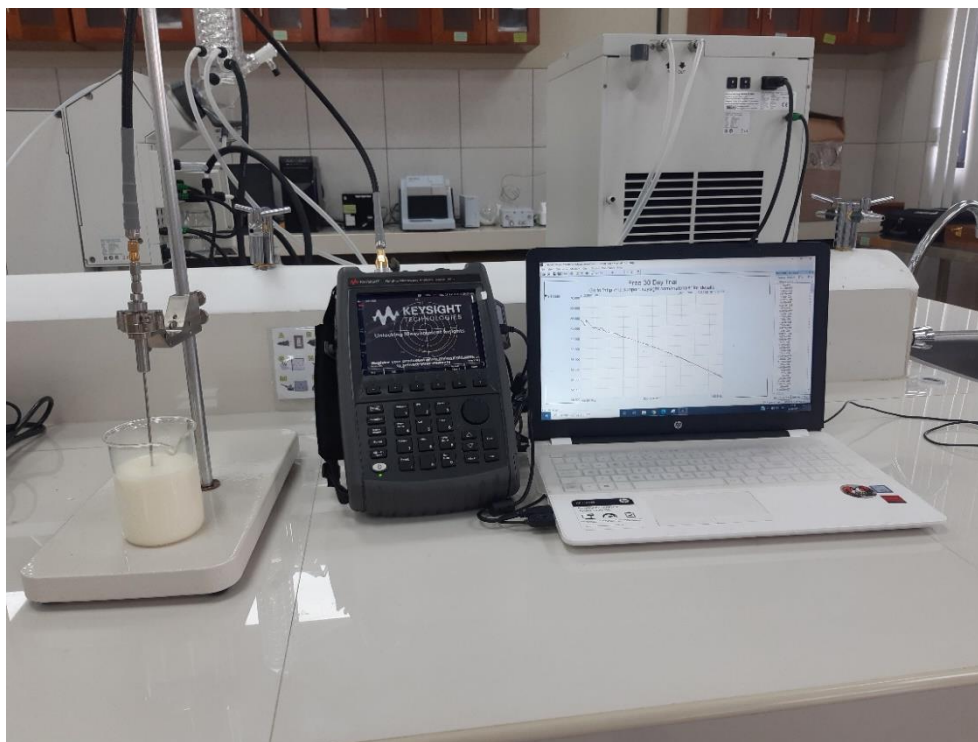
**Figura 23**

*Análisis de propiedades dieléctricas de muestras de leche fresca a 25 °C*



**Figura 24**

*Propiedades dieléctricas de muestras de leche fresca a 25 °C*

**Figura 25**

*Análisis de densidad de muestras de leche fresca a 25 °C*



**Figura 26**

*Análisis de sólidos solubles de muestras de leche fresca a 25 °C*

**Figura 27**

*Análisis de propiedades fisicoquímicas de muestras de leche fresca a 25 °C, mediante el MILKOTESTER*



Anexo. Factor de determinación de las Propiedades dieléctricas (constante dieléctrica) de leche fresca sin pasteurizar a frecuencias puntuales.

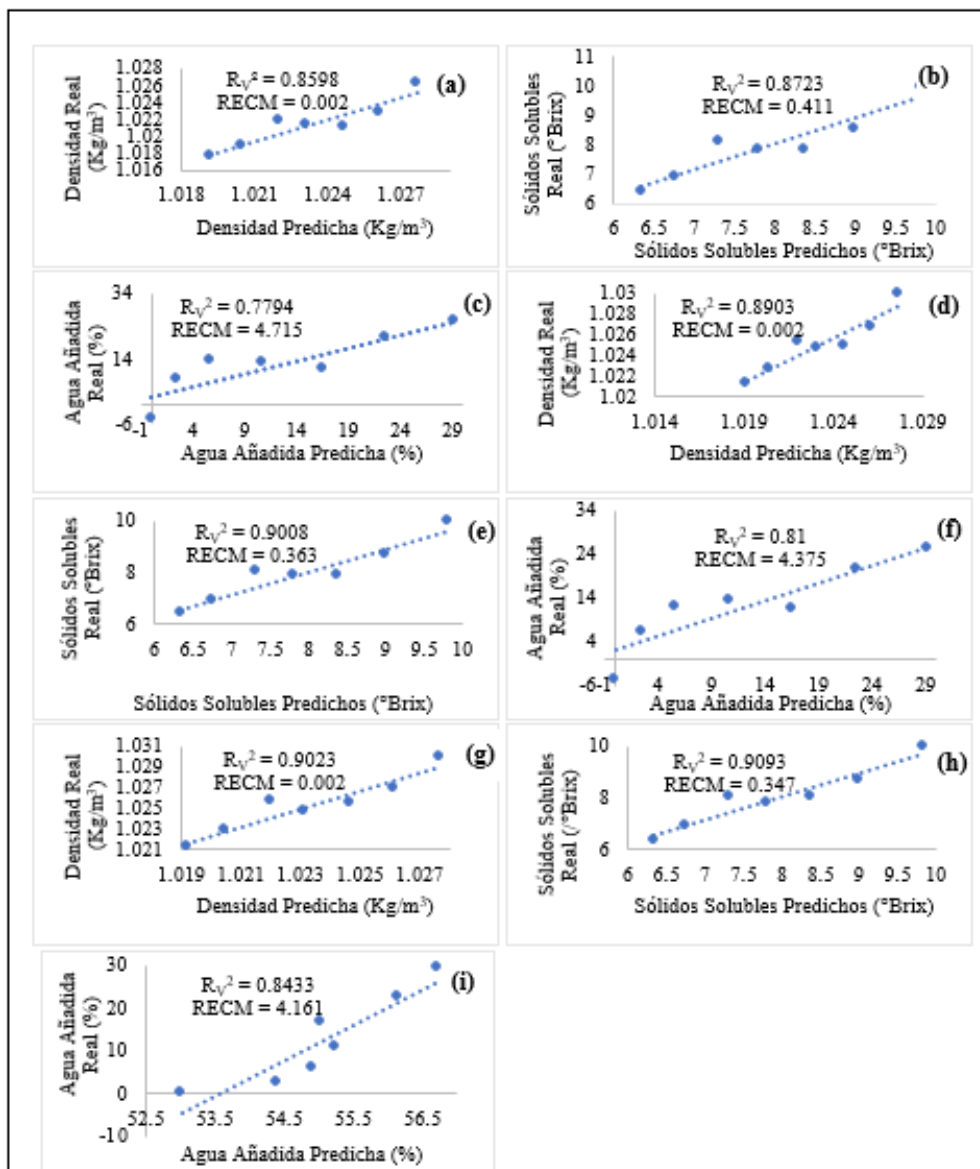
Propiedades Físicoquímicas	Propiedades Dieléctricas no Filtradas						Propiedades Dieléctricas Filtradas											
	Constante Dieléctrica (Calibración)			Constante Dieléctrica (Validación)			Constante Dieléctrica (Calibración)			Constante Dieléctrica (Validación)								
	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz			5000 MHz			9000 MHz		
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
Densidad	0.877	0.904	0.910	0.851	0.885	0.896	0.882	0.907	0.915	0.860	0.002	25.837	0.890	0.002	23.502	0.902	0.002	24.354
Sólidos Solubles	0.869	0.895	0.903	0.842	0.876	0.888	0.895	0.918	0.922	0.872	0.411	11.829	0.901	0.363	10.440	0.909	0.347	9.977
Grasa	0.861	0.884	0.893	0.863	0.881	0.890	0.863	0.881	0.890	0.836	0.136	13.033	0.860	0.125	12.010	0.875	0.119	11.376
Punto de Congelación	0.877	0.904	0.910	0.880	0.901	0.909	0.880	0.901	0.909	0.854	0.023	12.456	0.881	0.021	11.344	0.894	0.020	10.600
Proteína	0.880	0.909	0.911	0.883	0.907	0.909	0.883	0.907	0.909	0.861	0.081	12.485	0.890	0.072	11.090	0.897	0.069	10.699
Lactosa	0.875	0.903	0.909	0.878	0.900	0.907	0.878	0.900	0.907	0.852	0.207	12.584	0.880	0.186	11.312	0.893	0.176	10.705
Sales	0.668	0.699	0.714	0.671	0.693	0.711	0.671	0.693	0.711	0.629	0.032	22.561	0.659	0.030	21.680	0.684	0.029	20.790
Agua Añadida	0.804	0.835	0.846	0.806	0.831	0.843	0.806	0.831	0.843	0.779	4.715	16.144	0.810	4.375	14.982	0.828	4.161	14.249
pH	0.948	0.967	0.975	0.950	0.965	0.975	0.950	0.965	0.975	0.932	0.009	7.973	0.952	0.007	6.668	0.965	0.006	5.655

Anexo. Factor de determinación de las Propiedades dieléctricas (factor de pérdidas) de leche fresca sin pasteurizar a frecuencias puntuales.

Propiedades Físicoquímicas	Propiedades Dieléctricas no Filtradas						Propiedades Dieléctricas Filtradas											
	Factor De Perdida (Calibración)			Factor De Perdidas (Validación)			Factor De Perdida (Calibración)			Factor de Perdidas (Validación)								
	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz	5000 MHz	9000 MHz	2450 MHz			5000 MHz			9000 MHz		
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	NRMSE
Densidad	0.912	0.394	0.569	0.916	0.352	0.572	0.915	0.352	0.572	0.915	0.001	9.845	0.357	0.002	29.333	0.535	0.002	25.292
Solidos Solubles	0.883	0.348	0.614	0.882	0.301	0.623	0.882	0.301	0.623	0.882	0.395	11.378	0.307	0.955	27.476	0.583	0.036	1.043
Grasa	0.945	0.471	0.466	0.944	0.420	0.476	0.944	0.420	0.476	0.944	0.080	7.652	0.425	0.255	24.394	0.440	0.251	24.015
Punto de Congelación	0.935	0.432	0.523	0.934	0.382	0.533	0.934	0.382	0.533	0.934	0.016	8.407	0.387	0.048	25.522	0.416	0.043	23.132
Proteína	0.892	0.358	0.602	0.891	0.311	0.612	0.891	0.311	0.612	0.890	0.071	11.056	0.317	0.178	27.557	0.574	0.140	21.759
Lactosa	0.933	0.426	0.531	0.932	0.377	0.541	0.932	0.377	0.541	0.932	0.141	8.592	0.382	0.422	25.676	0.503	0.379	23.019
Sales	0.958	0.624	0.278	0.952	0.585	0.284	0.952	0.585	0.284	0.959	0.011	7.573	0.604	0.033	23.700	0.240	0.045	32.219
Agua Añadida	0.976	0.545	0.402	0.977	0.494	0.413	0.977	0.494	0.413	0.976	1.587	5.435	0.496	7.135	24.432	0.380	7.891	27.020
pH	0.845	0.331	0.609	0.844	0.281	0.620	0.844	0.281	0.620	0.844	0.013	11.977	0.284	0.028	25.630	0.584	0.021	19.555

Figura 28

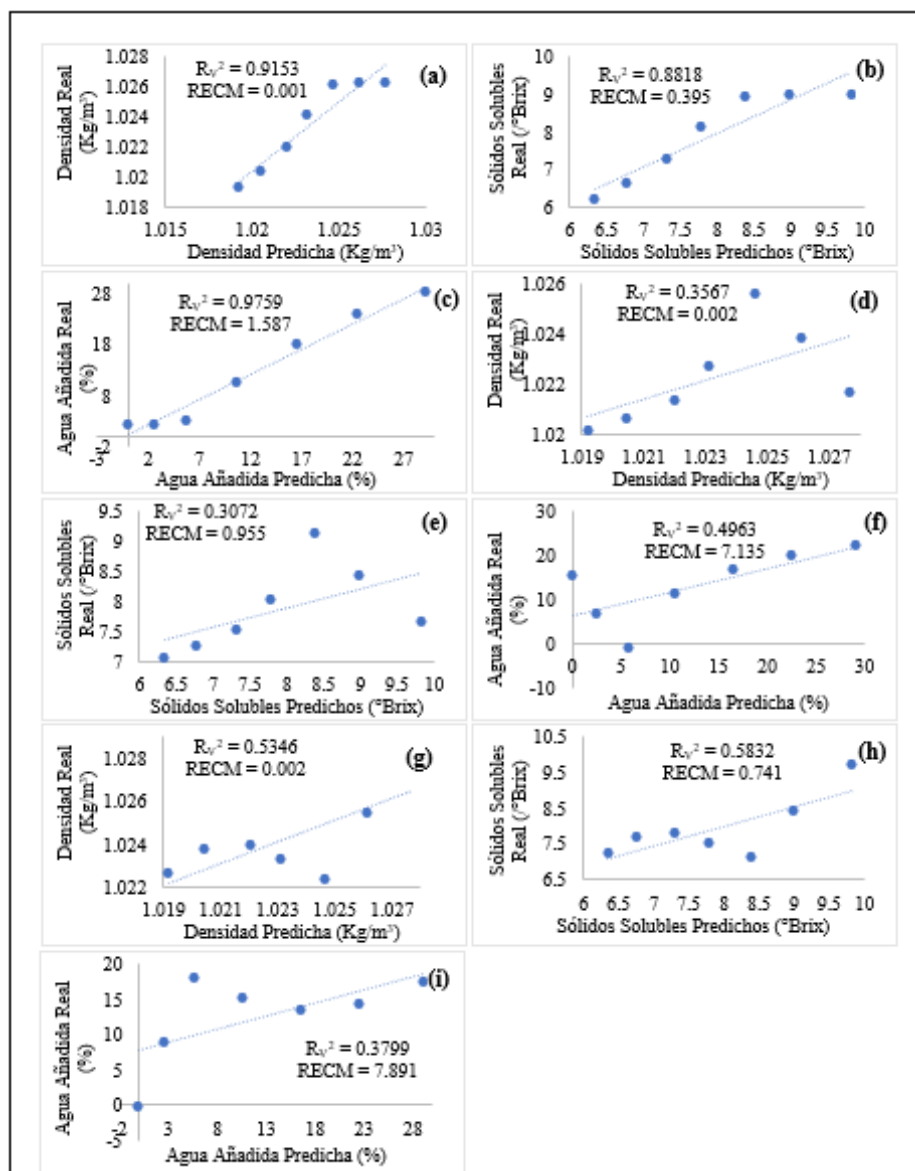
Diagramas de dispersión de los modelos de validación de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función de la constante dieléctrica



Nota. Diagramas de dispersión de puntos a frecuencias de 2450 MHz: densidad (a), sólidos solubles (b) y agua añadida (c); 5000 MHz: densidad (d), sólidos solubles (e) y agua añadida (f) y 9000 MHz: densidad (g), sólidos solubles (h) y agua añadida (i).

Figura 29

Diagramas de dispersión de los modelos de validación de densidad, sólidos solubles y agua añadida en función del factor de pérdida



Nota. Diagramas de dispersión de puntos a frecuencias de 2450 MHz: densidad (a), sólidos solubles (b) y agua añadida (c); 5000 MHz: densidad (d), sólidos solubles (e) y agua añadida (f) y 9000 MHz: densidad (g), sólidos solubles (h) y agua añadida (i).



Figura 30

Análisis estadístico para el valor p en el paquete estadístico Statgraphics Centurión

