

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DETERMINACIÓN DE CONSTANTES DIELECTRICAS POR
ESPECTROSCOPIA DE MICROONDAS PARA EL ANÁLISIS DE
CALIDAD DE PRODUCTOS HORTOFRUTÍCULAS**

Tesis para optar el Título de Ingeniera de las Telecomunicaciones, que presenta la
bachiller:

Alexandra Celina Reyes Riofrio

ASESOR: Dr. Manuel Augusto Yarlequé Medina

Lima, Noviembre del 2018

DEDICATORIA

Para aquellas personas que siempre me apoyaron.



RESUMEN

En el trabajo realizado en la presente tesis consiste en determinar la constante dieléctrica de productos hortofrutícolas a través de espectroscopia de microondas para su posterior análisis de calidad de alimentos.

El primer capítulo presenta brevemente la problemática actual de la industria de alimentos y los retos que deberá enfrentar en el futuro, especialmente sobre las diferentes tecnologías que permitan agilizar el proceso de control de calidad de alimentos. Además, se muestra la importancia de la calidad de alimentos sobre el consumidor y cuál es su tendencia de consumo hoy en día. Posteriormente, una breve justificación de la elección del tema de tesis con hipótesis y objetivos; y, finalmente, se presenta el estado del arte del proyecto de tesis.

En el segundo capítulo se presenta la teoría para la medición de las propiedades fisicoquímicas y propiedades dieléctricas centrándose, principalmente, en las diferentes técnicas de medición de la permitividad y la elección de la sonda coaxial como método de medición.

En el tercer capítulo se describe la implementación de la sonda coaxial de terminal abierto para la medición de la constante dieléctrica y factor de pérdidas, por el cual se debe adaptar un conector de tipo SMA macho, calibrar los instrumentos de medición, modelar la sonda coaxial a través de un software como el *Advanced Design System* para su posterior de-embebedo y calibración del modelo capacitivo.

En el capítulo cuatro se explica cómo es el proceso para la toma de datos, ya que se debe seguir una secuencia específica para una adecuada medición de los parámetros fisicoquímicos y dieléctricos.

En el capítulo cinco se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de los parámetros dieléctricos al utilizar espectroscopia de microondas y las características fisicoquímicas, y su análisis de predicción de estas características para el control de calidad de alimentos.

Por último, se muestran las conclusiones y recomendaciones que se logran obtener después de finalizar la tesis.

INDICE

Introducción	1
Capítulo 1	2
Contexto y Visión	2
1.1 Planteamiento del Problema	2
1.1.1 Nuevo perfil de consumidor	4
1.2 Justificación	8
1.3 Hipótesis	9
1.4 Objetivos	9
1.5 Estado del arte	10
Capítulo 2	13
Marco Teórico	13
2.1 Métodos para obtener las propiedades físico-químicas	13
2.1.1 Determinación de humedad	14
2.1.2 Determinación de pH	14
2.1.3 Determinación de color	15
2.1.4 Determinación de sólidos solubles	16
2.1.5 Propiedades dieléctricas	16
2.2 Definición del método para la medición de propiedades dieléctricas	17
2.3 Método de línea coaxial con terminal abierto	20
2.3.1 Modelo capacitivo	21
2.3.2 Modelo de antena	23
2.3.3 Modelo de línea virtual	25
2.3.4 Modelo de función racional	28
2.4 Modelo de predicción de datos	29
2.5 La relación de Kramers-Kronig	30
2.6 Impacto social, económico y ambiental de la solución propuesta	31
Capítulo 3	33
Implementación	33
3.1 Adaptación de la sonda coaxial	33
3.2 Calibración del instrumento de medición	34

3.3	Medición del parámetro S11	35
3.4	Modelamiento de la sonda coaxial de terminal abierto	36
3.5	De-embebido	38
3.5.1	De-embebido con ADS.....	38
3.6.	Calibración del modelo capacitivo.....	39
Capítulo 4		42
Recolección de datos.....		42
4.1	Secuencia del modelo predictivo	42
4.2	Mediciones	44
4.2.1	Medición del color	45
4.2.2	Medición de las propiedades dieléctricas	45
4.2.3	Medición de las propiedades fisicoquímicas	47
Capítulo 5		48
Resultados		48
5.1	Resultado de las mediciones del VNA	48
5.2	Resultados del de-embebido del parámetro S11	49
5.3	Resultados de la calibración del modelo capacitivo	50
5.3.1	Validación de resultados del modelo capacitivo	52
5.4	Resultados de las mediciones realizadas para las manzanas y los camotes	53
5.4.1	Resultados de las propiedades dieléctricas	53
5.4.1.1	Resultados de la relación del Kramers-Kronig.....	54
5.4.2	Resultados de las características físico-químicas	56
5.5	Correlación de las propiedades dieléctricas y las propiedades físico-químicas.....	57
5.6	Evaluación de presupuesto del sistema de medición de permitividad.....	62
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		64
BIBLIOGRAFÍA		66

Lista de Figuras

Figura 1.1. Población proyectada para el año 2100.	4
Figura 1.2. Pirámide de población por grupos de edad.	5
Figura 2.1. Propiedades físico-químicas de alimentos	14
Figura 2.2. Espacio de color CIELab.....	15
Figura 2.3. Sensor de cable coaxial con terminación abierta.	21
Figura 2.4 Circuito equivalente del modelo capacitivo.	21
Figura 2.5. Circuito equivalente para el modelo de antena	25
Figura 2.6. Modelo de línea virtual.	27
Figura 2.7. Modelo de sonda coaxial.....	29
Figura 3.1. Conexión de los instrumentos para la sustracción de los coeficientes de reflexión en una muestra.	34
Figura 3.2. Adaptación de los conectores (a) tipo N y (b) SMA.....	34
Figura 3.3. Colocación de la sonda dependiendo del tipo de muestra.	35
Figura 3.4. (a) Sonda coaxial de terminal abierto de conector tipo SMA. Modelamiento de la sonda coaxial terminal abiertos: (b) Modelamiento con líneas de transmisión y (c) Modelamiento con componentes reactivos.	36
Figura 3.5. Resultados del modelamiento de la sonda coaxial a través de líneas de transmisión: (1) Gráficas de Carta Smith, (2) magnitud y (3) fase del parámetro S11.	37
Figura 3.6. Resultados del modelamiento de la sonda coaxial a través de componentes reactivos: (1) Gráficas de Carta Smith, (2) magnitud y (3) fase del parámetro S11.	37
Figura 3.7. Ilustración de los planos antes y después del de-embebido.	38
Figura 3.8. De-embebido en ADS.....	39
Figura 3.9. Valores de las propiedades dieléctricas del agua desionizada.....	40
Figura 3.10. Valores de las propiedades dieléctricas del agua desionizada y de la mezcla salina (NaCl [0.5 M]).	41
Figura 4.1. Secuencia lógica para el desarrollo del modelo predictivo.....	43
Figura 4.2. Secuencia lógica de las mediciones por cada muestra.	44
Figura 4.3. Módulo para la toma fotográfica.	45
Figura 4.4. Secuencia para la obtención de la permitividad de una muestra.	46
Figura 4.5. División de la manzana en forma equivalente para la toma de datos.	46

Figura 5.1. (a) Medición de la manzana a través de espectroscopia de microondas y (b) parámetro S11 en una Carta Smith de una manzana.	49
Figura 5.2. Resultados del de-embebido parámetro S11 en una Carta Smith del agua desionizada.	50
Figura 5.3. (a) Constante dieléctrica y (b) factor de pérdidas del agua desionizada.	51
Figura 5.4. Permitividad del agua desionizada.....	52
Figura 5.5. Constante dieléctrica ($\epsilon r'$) y factor de pérdidas ($\epsilon r''$) del promedio de las ciento cuarenta manzanas.....	53
Figura 5.6. Constante dieléctrica ($\epsilon r'$) y factor de pérdidas ($\epsilon r''$) del promedio de los ochenta camotes morados.	54
Figura 5.7. Permitividad de la manzana obtenido a partir de espectroscopia de microondas ($\epsilon r'$ y $\epsilon r''$) y factor de pérdidas obtenido a partir de la relación de Kramers-Kronig ($\epsilon r''$ KKR).....	55
Figura 5.8. Permitividad del camote obtenido a partir de espectroscopia de microondas ($\epsilon r'$ y $\epsilon r''$) y factor de pérdidas obtenido a partir de la relación de Kramers-Kronig ($\epsilon r''$ KKR).....	56
Figura 5.9. Resultado del modelo PLSR para el SSC de la manzana.	57
Figura 5.10. Resultado del modelo PLSR para la humedad del camote.	58
Figura 5.11. Número de variables latentes vs (a) el porcentaje de exactitud de Y y (b) RMSE para SSC en el caso de la manzana.	59
Figura 5.12. Número de variables latentes vs el porcentaje de exactitud de Y y vs RMSE para SSC en el caso del camote.	59
Figura 5.13. Coeficientes- $ \beta $ para el SSC y el L* para el modelo PLSR para la manzana	60
Figura 5.14. Coeficientes- $ \beta $ para el pH para el modelo humedad para el camote.	60
Figura 5.15. Resultado del modelo PLSR optimizado para el parámetro SSC de la manzana.....	61
Figura 5.16. Resultado del modelo PLSR optimizado para el parámetro de humedad del camote.....	61

Lista de tablas

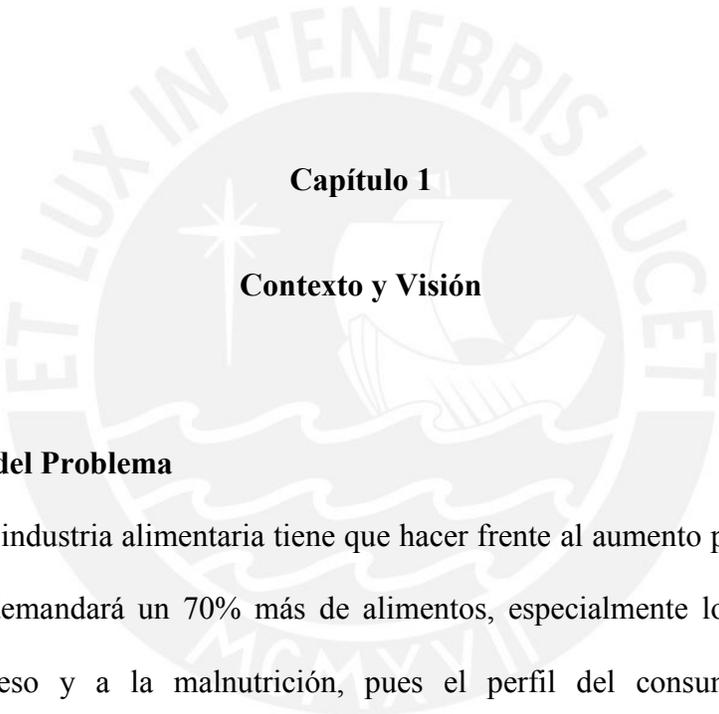
Tabla 2.1. Técnicas de la medición de propiedades dieléctricas	18
Tabla 2.2. Técnicas de medición sobre el material	19
Tabla 5.1. Resultados del modelo PLSR optimizado para la manzana	62
Tabla 5.2. Resultados del modelo PLSR optimizado para el camote	62
Tabla 5.3. Tabla del presupuesto para la implementación del sistema de medición de la permitividad.	63



Introducción

En la actualidad, la industria de alimentos enfrenta grandes cambios debido a los altos estándares de calidad e inocuidad que los consumidores exigen, especialmente de los países desarrollados. Para ello, las mediciones de calidad de métodos invasivos están siendo reemplazados por nuevos métodos no invasivos, ya que los primeros representan una pérdida de tiempo y dinero para las grandes industrias alimentarias, pues las muestras utilizados para la evaluación de calidad no son recuperables; además, del tiempo de procesamiento de estos valores y el margen de error cometidos por las personas que ejecutaban estas pruebas. Por lo tanto, las pruebas no invasivas pueden ser realizadas de forma más rápida y proporcionar mejoras en las operaciones de clasificación y manipulación de los alimentos, y también podrían ser de utilidad para los consumidores, ya que se les podría proporcionar las características deseadas por estos.

En esta tesis se plantea implementar un sensor de propiedades dieléctricas, el cual permitirá observar la constante dieléctrica y factor de pérdidas característicos de cada producto para asegurar que estos productos se encuentren en buen estado y predecir sus características antes de su futura venta. Para ello, se tendrá en cuenta estudios previos para comparar la data obtenida; además, se tomarán muestras de un producto específico para realizar el estudio, en este caso se utilizará 140 manzanas *Red Delicious* y 80 camotes de la variedad Jonathan, pues el primero es un producto generado en el Perú que no abastece el mercado peruano y que es mayormente importado, y el porcentaje de exportación del segundo producto está en aumento. Asimismo, se comparará la información obtenida del sensor de permitividad con otros estudios fisicoquímicos como pH, humedad, color y concentración del azúcar para corroborar el análisis del sensor y así generar la predicción de las características de estos alimentos.



Capítulo 1

Contexto y Visión

1.1 Planteamiento del Problema

En el siglo XXI, la industria alimentaria tiene que hacer frente al aumento poblacional existente y que en el 2050 demandará un 70% más de alimentos, especialmente los que brindan una solución al sobrepeso y a la malnutrición, pues el perfil del consumidor ha cambiado notablemente y eso lo ha hecho notar con su poder adquisitivo de frutas y hortalizas frescas. Además, los habitantes de los países desarrollados muestran gran interés por la calidad e inocuidad de los alimentos y los impactos de estos a la salud. Este interés ha aumentado radicalmente en los últimos 20 años como se explicará posteriormente con más detalle. En la actualidad, de la totalidad de alimentos que hay en el mercado aproximadamente 85% son productos procesados, mientras que el porcentaje restante se vende como producto fresco [1]. Estos productos frescos, en países como Japón, son considerados más que un alimento un

producto de lujo, los cuales pueden llegar a tener un gran valor monetario, por ejemplo, el costo de un racimo de uvas es 262 dólares aproximadamente [2].

El Perú cuenta con una gran diversidad ecológica, la cual es considerada una de las más diversas del mundo, y este alto potencial se debe principalmente a que el territorio peruano alberga tres regiones topográficas: la costa del Pacífico, la sierra del altiplano andino (la sierra), y la selva tropical (la cuenca amazónica). Cada una de ellas presenta condiciones geográficas diferentes, formándose micro-regiones que favorecen la gran diversidad de flora y fauna en el país. Sin embargo, a pesar de contar con un gran potencial ecológico para producir sus propios productos alimenticios, la realidad aún muestra que se sigue importando gran parte de estos productos del exterior como es el caso del maíz amarillo duro, manzanas frescas, arroz, cebada, entre otros [3]-[4].

Un ejemplo de ello es que en Perú, la importación de manzanas representó el 1.2% del total de los productos agropecuarios importados en el año 2016 [4], mientras que en el primer trimestre del año 2017 este producto de importación representó un 0.9% del total de importaciones agropecuarias, del cual 80% proviene de Chile y el 20% restante proviene de USA [5]. Esto demuestra que el mercado nacional no se abastece con lo producido al interior del país y requiere de la importación de productos hortofrutícola, como la manzana, con altos estándares de calidad. Por otro lado, en el caso de los vegetales, el camote muestra un aumento del 7% en sus exportaciones respecto al año 2016, siendo Estados Unidos el país al que más se exportó [6]. Según el consultor en Agronegocios de PromPerú, Víctor Sarabia, la demanda de este producto está en aumento ya que se utiliza para preparar snacks y harina, como se observa en Japón, país en el que se utiliza el camote para la preparación de una bebida [7] por lo que se debe asegurar la calidad del alimento mientras no se procese el producto en el Perú.

La producción y venta de estos alimentos no sólo depende de los grandes empresarios y su afán de llenar los mercados con sus productos si no, también, depende de la tendencia del consumidor como se explica a continuación.

1.1.1 Nuevo perfil de consumidor

Para el año 2050, como antes mencionado, significará un reto para las industrias alimentarias en términos de suministro de alimentos, puesto para esta fecha se estima que la población mundial sea alrededor de 10 mil millones de personas, de las cuales 87% del total habitarán en países en vía de desarrollo; y para el 2100 esta cifra aumentará en un 15% respecto al 2050 como se aprecia en la figura 1.1 [8].



Figura 1.1. Población proyectada para el año 2100.
Fuente: [8]

Adicionalmente, la figura 1.2 muestra que la población mayor a 60 años se duplicará en el año 2050 respecto al año 2000, de un 11% a un 22% (605 millones a 2 mil millones). Este cambio demográfico se verá de manera más significativa en los países de ingresos bajos y medios [9]. Además, el incremento de población adulta se deberá principalmente al desarrollo de la ciencia

médica, aumento en la accesibilidad de los servicios de salud, mejor alimentación, entre otros factores [10].

De este grupo de población, se puede decir que es más responsable y cuidadosa con su salud, por lo que buscan alimentos más sanos, principalmente en los países desarrollados. Los alimentos exigidos por estos son aquellos que permitan prevenir enfermedades.

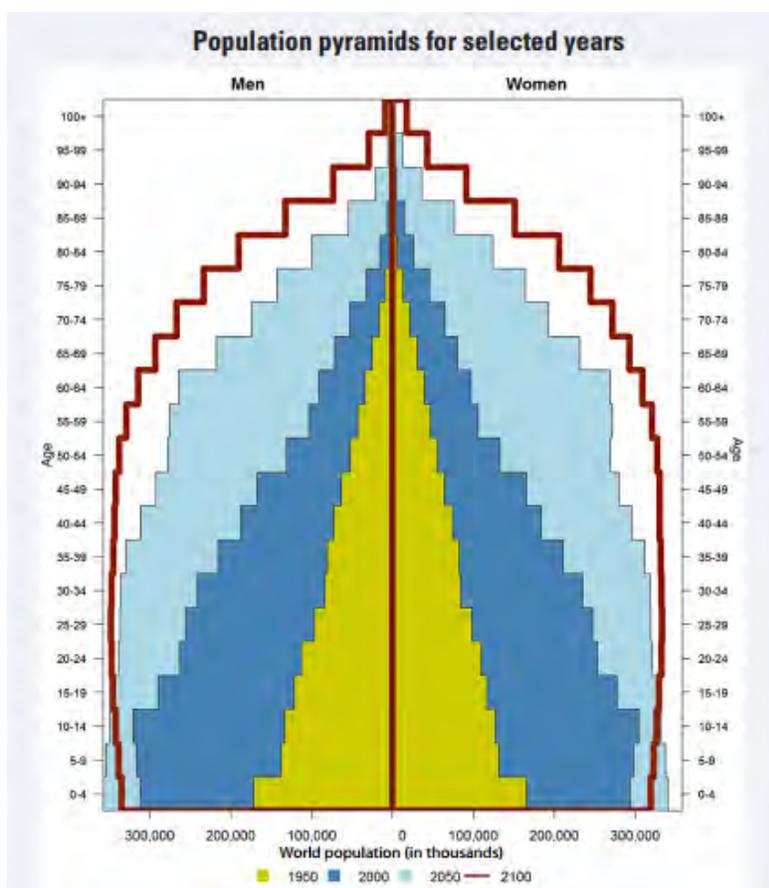


Figura 1.2. Pirámide de población por grupos de edad.
Fuente: [11]

Por otro lado, la OMS (Organización Mundial de la Salud), en el 2014, estimó a nivel mundial que el 39% (1.9 mil millones) de las personas adultas, a partir de los 18 años, poseen sobrepeso, y el 13% (650 millones) eran obesas. Además, más de 40 millones de niños con edades

inferiores a los 5 años contaban con sobrepeso o eran obesos. Si bien estas afecciones la sufren en mayor parte los países con ingresos altos; en la actualidad, los países con bajos ingresos están que incrementan su tasa de obesidad y sobrepeso [12].

La OMS [13] también indica que a nivel mundial mueren aproximadamente 2.8 millones de personas debido a enfermedades generadas debido a estos trastornos alimenticios. Entre las enfermedades generadas se encuentran la hipertensión arterial, algunos tipos de cáncer, diabetes tipo 2, problemas cardiovasculares, entre otros. Por ello, la OMS [12] recomienda en plan individual optar las siguientes soluciones:

- Limitar el consumo de comida energética cuyo contenido está basado grasas y azúcares;
- Incrementar el consumo de hortalizas frescas, también de legumbres, cereales integrales y frutos secos.
- Efectuar una actividad física periódicamente (una hora diaria para los jóvenes y dos horas y media semanales para los adultos) para prevenir el sobrepeso y obesidad.

Por otro lado, la industria alimentaria puede aportar con esta causa con la promoción de las dietas sanas de las siguientes formas:

- Disminuyendo el contenido de grasa, azúcar y sal de los alimentos procesados.
- Cerciorando que las opciones saludables y nutritivas se encuentren disponibles y sean accesible para todos los clientes;
- Restringiendo la distribución de alimentos con grandes cantidades de azúcar, sal y grasas, en especial aquellos alimentos destinados a los niños y los adolescentes; y asegurando la

disponibilidad de las diferentes alternativas de alimentos saludables y estimulando la práctica de actividades físicas periódicas en los centros de labores [12].

Además, en algunos países como Francia, Hungría, Polonia y México han implementado políticas que aporten a combatir el sobrepeso y obesidad orientándolos a optar por alimentos más sanos, las cuales son las siguientes:

- Regulación en el etiquetado, para mostrar a los consumidores la información nutricional de cada alimento;
- Campañas de concientización, para fomentar una dieta más sana; por ejemplo, programas nutricionales orientados a niños;
- Fomentar el consumo de frutas y vegetales;
- Proyectos de repartición de frutas y vegetales en los centros educativos, principalmente colegios [10].

En resumen, los patrones de los consumidores de alimentos se concentrarán principalmente en el consumo de comidas que provean mayor contenido nutricional, mayor calidad e inocuidad con tendencia al consumo de hortalizas, cuya elaboración no dañe al medio ambiente y que incluyan información nutricional detallada en el etiquetado, que el consumidor pueda entender. Debido a un aumento de la comercialización de productos hortofrutícolas frescos, se viene generando entre empresas privadas una competencia, un posicionamiento de mercados e una innovación constante en la cadena de producción bajo estándares de calidad, los cuales conllevan a una demanda tecnológica en sus sistemas de producción y de control de calidad [14].

En la actualidad existen diferentes tecnologías para el control de calidad de los productos alimenticios como: Espectroscopia de Infrarrojo cercano (NIR), Imágenes hiper espectrales

(HSI), Espectroscopia dieléctrica (ED). etc., los cuales reemplazan la tecnología de control de calidad con parámetros fisicoquímicos como: pH, acidez, color, densidad, etc., pues estas técnicas, si bien aseguran una medida exacta y proporcionan un adecuado control de calidad, poseen ciertas desventajas ya que dificultan los procesos de control de calidad en línea y demandan tiempo. De las tecnologías antes mencionadas, la espectroscopia dieléctrica (ED) es una buena alternativa para el control y monitoreo de calidad de productos frescos y procesados [14]. Además, a partir de los resultados obtenidos con el método de espectroscopia dieléctrica se pueden realizar análisis para el desarrollo de la predicción de datos, pues se comparan los resultados obtenidos por este método con los métodos para extraer las propiedades fisicoquímicas.

1.2 Justificación

La industria agroalimentaria es una de las bases más importantes de la economía mundial, el cual cuenta con un volumen significativo de ventas de alrededor de 900 mil millones de euros y brinda trabajo a más de 4 millones de personas [13]. En el Perú, la industria de alimentos representó más del 30% del Producto Bruto Interno (PBI) industrial en el año 2015, por lo cual se considera uno de los sectores más representativo del país; no obstante, esta industria no se encuentra desarrollada a nivel de producción, dentro del cual se encuentra el desarrollo de control de calidad de alimentos [15]. Si bien la industria agroalimentaria del Perú ha logrado llegar a mercados extranjeros, esta tiene que estar en constante mejora, debido a que los estándares de calidad exigidos son cada vez más altos, sin aumentar los costos de mano de obra [16]. Por este motivo, los sistemas actuales de control y/o monitorización de calidad en línea que son destructivos se tienen que reemplazar por un sistema nuevo que permita obtener la información de manera precisa y rápida sin dañar los productos, pues esto implica un costo extra

de producción. En este contexto, el empleo de la técnica de la espectroscopia dieléctrica para el control y/o monitorización de determinados procesos de la industria de alimentos representa un gran potencial [14].

Por todos estos factores, el trabajo presentado determinará la probabilidad de predicción de las características fisicoquímicas de los alimentos a través del análisis de las constantes dieléctricas que se conseguirán con una sonda coaxial de terminación abierta colocada en un Vector Network Analyzer.

1.3 Hipótesis

Mediante el método de sonda de cable coaxial, se medirá las constantes dieléctricas a un grupo de muestras de productos hortofrutícolas que permita realizar la predicción de las características fisicoquímicas de estas.

1.4 Objetivos

El objetivo general de esta tesis es determinar las constantes dieléctricas por espectroscopia de microondas de productos hortofrutícolas a través de un sensor coaxial de terminación abierta. Los valores de la constante dieléctrica se correlacionarán con las propiedades fisicoquímicas del producto, de tal forma de predecir la calidad del mismo solo basado en la información de la constante dieléctrica

Los objetivos específicos necesarios para lograr el objetivo general son los siguientes:

- Elaborar una sonda coaxial de terminación abierta apropiada para la evaluación de productos hortofrutícolas.

- Determinación de un proceso de de-embido y/o calibración para mover el plano de medición desde el instrumento hasta la superficie del producto hortofrutícola
- Correlación de las propiedades fisicoquímicas con los valores de permitividad dieléctrica de los productos. Extracción del rango de frecuencias o frecuencias características asociadas a la calidad.

1.5 Estado del arte

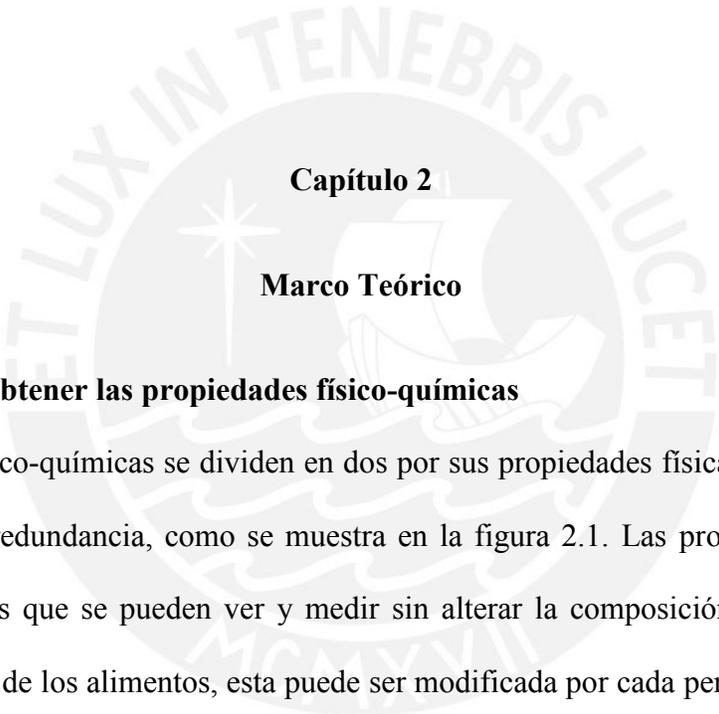
El análisis fisicoquímico de los productos alimenticios es una técnica objetiva que frecuentemente otorga resultados confiables, aunque estos resultados dependen, sobre todo, de la correcta representación del lote por las muestras escogidas para su posterior medición. No obstante, existen algunos inconvenientes en el proceso de medición, ya que se requiere de expertos para la calibración de los equipos y para su posterior análisis; además, como se mencionó anteriormente, el proceso de análisis sólo se realiza a un grupo de muestras en particular, las más representativas de todo el lote, por lo que no se puede obtener el valor exacto de cada uno de los productos. Cabe mencionar que este tipo de medición de calidad de alimentos es invasivo por lo que las muestras empleadas en el proceso de medición son destruidas (cortadas, extracción de zumo, comprimidas, deformadas, etc.), lo que genera una pérdida económica para las empresas agroindustriales; y, finalmente, su proceso de medición es lento y consume mucho tiempo para procesos de control en línea a comparación de los nuevos procesos de medición [17].

En la actualidad, existen diversos estudios relacionados a métodos utilizados para la medición de la calidad de un producto agroalimentario, como la radiación de visible e infrarrojo, las cuales pueden ser útiles en muchos casos para detectar las características asociadas a la calidad superficial de un alimento [18]. En el caso de la utilización del infrarrojo, una tecnología

desarrollada en los últimos años es la espectroscopia de infrarrojo cercano, por sus siglas en inglés NIR, ya que es particularmente potente y no invasivo, ni destructivo, con una rápida velocidad de análisis, flexibilidad en la adaptación a diferentes estados de la muestra. Sin embargo, esta espectroscopia NIR requiere una forma única de extraer la información relevante de los parámetros fisicoquímicos de la muestra por lo que se necesita un experto que manipule la medición de datos; además, los modelos estadísticos y matemáticos no están generalizados, por lo que se requiere ajustar a nuevas condiciones y a los diferentes productos a medir [19]. Por otra parte, los rayos X son usados mayormente para la esterilización de los alimentos, lo que genera que estos se puedan almacenar por más tiempo; además, esta técnica puede ser utilizada para la estimación de los parámetros de calidad de los alimentos. Sin embargo, varios métodos basados en esta técnica no son estudiados [20].

En el caso de las propiedades dieléctricas para la caracterización de frutas y vegetales, existen diversas investigaciones que, en las últimas dos décadas, han ido experimentando sobre estas. Entre las diversas investigaciones se encuentra la investigación realizada por el departamento de agricultura de la universidad de Georgia de los Estados Unidos de América en el año 2008. En esta investigación fue realizada en cultivos de manzana y melón, cuyas mediciones fueron hechas con un Impedance/Material Analyzer en el rango de frecuencias de 10 MHz a 1.8 GHz a una temperatura de 24°C con un sonda de cable coaxial con terminación abierta, la cual fue calibrada con un agua destilada a 25°C. Los resultados de esta investigación de las constantes dieléctricas y factor de pérdidas fueron presentados en un gráfico, en el cual se aprecia la diferencia entre la medida del tejido interno y el tejido externo. Además hace una observación sobre las mediciones internas, las cuales marcan una influencia de la conducción iónica y pérdidas dipolares para frecuencias bajas y frecuencias altas, respectivamente. Por otra parte, en

este estudio se realizó la correlación de las propiedades dieléctricas con el contenido de sólidos solubles para el caso del melón; y para el caso de la manzana, la correlación de las propiedades dieléctricas con la firmeza del tejido; sin embargo, para el caso de la manzana no se obtuvieron los resultados favorecedores; al igual que con el camote no se obtuvieron resultados favorecedores a la frecuencia de 2.45 GHz para la distinción del grado de madurez del producto [21]-[23]. Posteriormente, en el 2011, este grupo de investigación realizó una comparación de las propiedades dieléctricas obtenidas de investigaciones previas para la medida de la humedad en granos y semillas, en las que se puede observar que existe una buena correlación en las medidas para la obtención de la humedad en estos tipos de alimentos. Asimismo, en el año 2012, se realizó una investigación sobre las propiedades dieléctricas de la carne del pollo, en el cual se trabajó con un Vector Network Analyzer (VNA) que opera en un rango de frecuencia de 200 MHz a 20 GHz con una sonda de cable coaxial de terminal abierto, la cual también fue calibrada con agua destilada; para esta investigación lo que se quiso comprobar era el efecto de la pérdida de agua en la carne del pollo por medio de las constantes dieléctricas. Esto iba a ser posible al comparar estos resultados con los resultados obtenidos de pruebas del pH y capacidad de retención del agua y el contenido de humedad del pollo [24].



Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Métodos para obtener las propiedades físico-químicas

Las propiedades físico-químicas se dividen en dos por sus propiedades físicas y sus propiedades químicas, valga la redundancia, como se muestra en la figura 2.1. Las propiedades físicas son aquellas propiedades que se pueden ver y medir sin alterar la composición de la materia. Sin embargo, en el caso de los alimentos, esta puede ser modificada por cada persona al momento de cortarlos, exprimirlos, aplastarlos. En el caso de las propiedades químicas, la materia sufre cambios en su composición. Estas propiedades se determinan por ensayos químicos y están relacionadas con sus reacciones ante sustancias químicas; en los alimentos estas pueden ser la humedad, grasas, enzimas [25].

Para la determinación de las características físico-químicas de un producto hortofrutícola, en este proyecto se procederán a realizar las siguientes pruebas:

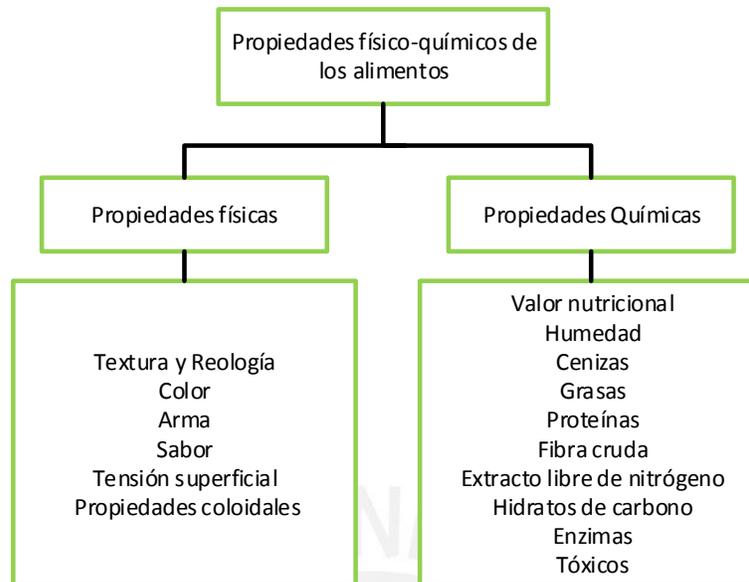


Figura 2.1. Propiedades físico-químicas de alimentos
Fuente: [26]

2.1.1 Determinación de humedad

Los niveles del agua varían entre un 60% y 95% en los alimentos naturales y se requiere de su conocimiento para aquel comprador de materias primas que no desea adquirir alimentos con exceso de agua, debido a que la cantidad de agua presente en las muestras puede afectar su textura, entre otros [27]. En este caso, para la determinación de la humedad en muestras de frutas frescas, se empleará una balanza de humedad electrónica modelo PCE-MB C, con temperatura de trabajo a 105 °C hasta alcanzar el peso constante.

2.1.2 Determinación de pH

El pH es una unidad de medida que es utilizada para determinar el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia y es de gran importancia en la industria de alimentos debido a que se puede controlar los microorganismos y enzimas presentes; clarificar y estabilizar los jugos de frutas y vegetales; entre otros [28]. La medida del pH de las muestras, para este caso, se realizará mediante un pH-metro portátil CRISON PH25®.

2.1.3 Determinación de color

Una de las propiedades físicas más importantes es el color del alimento, pues existen opiniones en la que aseguran que si un producto no contase con buena apariencia colorimétrica, el consumidor no optaría por juzgar los otros aspectos [29]. La determinación de color en el sistema CIELab se llevará a cabo mediante la técnica de análisis de imágenes propuesta por [14]. Esta propiedad se puede determinar mediante el sistema cromático CIELab, el cual permite identificar exactamente cada color por medio de sus colores a^* y b^* , y su brillo L^* , el cual se construye en base a tres ejes. La coordenada L^* representa la ‘claridad’ y puede tomar valores entre el 0 y 100, siendo L^* igual a cero representación del negro perfecto y el L^* , cien representación de un blanco perfecto. Las coordenadas colorimétricas a^* y b^* forman un plano perpendicular a la ‘claridad’ como se muestra en la figura 2.2. La coordenada a^* tiende hacia el rojo si $a^* > 0$, hacia el verde si $a^* < 0$. De igual manera, la coordenada b^* tiende al amarillo si $b^* > 0$, hacia el azul si $b^* < 0$ [30].

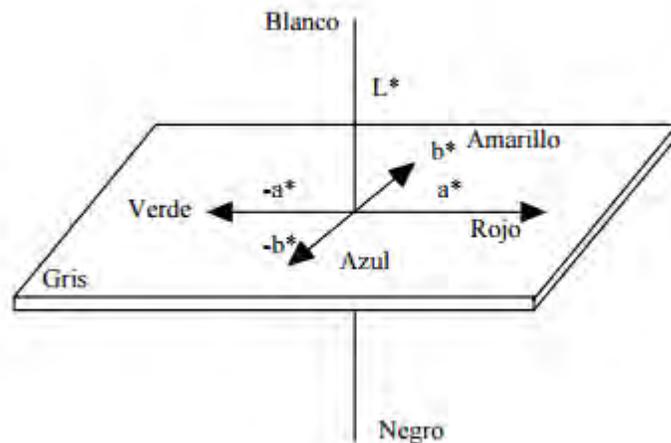


Figura 2.2. Espacio de color CIELab
Fuente: [30]

2.1.4 Determinación de sólidos solubles

Los grados Brix, en el sector de alimentos, sirven para medir la cantidad total de sacarosa disuelta en un líquido (zumo de frutas, vino o líquidos procesados). Dentro de los sólidos solubles, SSC por sus siglas en inglés, el componente más abundante son los azúcares y los ácidos orgánicos. Esta propiedad del alimento se puede medir a través de un refractómetro, el cual cuantifica el fenómeno físico de refracción [31]. En este proyecto, la determinación de los sólidos solubles se realizará mediante un brix-metro portátil (o refractómetro) modelo ABBE ATAGO 3-T.

2.1.5 Propiedades dieléctricas

Las propiedades dieléctricas, también conocidas como permitividad compleja, es una propiedad física que explica la interacción que se produce entre la materia y los campos electromagnéticos que está vinculada a las propiedades físico-químicas, como es el caso de sólidos solubles [32]. La permitividad es un número complejo que es usualmente usada para la descripción de las propiedades dieléctricas. Una de las maneras en las que los procesos físicos en un material pueden afectar el campo eléctrico de la onda se describe a través de la permitividad compleja (ϵ), como se observa en la ecuación (1) [33]:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

donde ϵ' es la constante dieléctrica; ϵ'' , el factor de pérdidas; y j posee el valor de $\sqrt{-1}$. La constante dieléctrica es la capacidad que posee un material para almacenar energía cuando está expuesta a un campo electromagnético. El factor de pérdidas es la capacidad que tiene un material para disipar la energía de un campo electromagnético aplicado sobre esta, que en muchos casos es a través de calor [32].

La medida y el análisis de las propiedades dieléctricas se llevarán a cabo mediante la utilización una sonda coaxial, conectada a un analizador de redes vectorial Anritsu MS4622.

2.2 Definición del método para la medición de propiedades dieléctricas

Existen diferentes técnicas que han sido desarrolladas para la medición de las propiedades dieléctricas de un material, estas dependen de la frecuencia de interés, su naturaleza física y eléctrica de los materiales a ser medidos, y también el grado de exactitud requerida en los resultados. Las diferentes técnicas de medición de las propiedades dieléctricas están resumidas en las Tabla 1 y Tabla 2 [32].

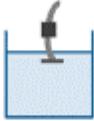
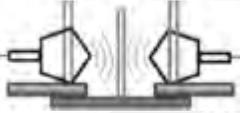
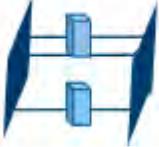
Por las ventajas encontradas con la sonda coaxial de terminal abierto y por los instrumentos de medición que se poseen dentro de la Pontificia Universidad Católica del Perú, como es el VNA, se escogió la sonda coaxial de terminal abierto para realizar las mediciones de las propiedades dieléctricas.

Tabla 2.1. Técnicas de la medición de propiedades dieléctricas

Fuente: [32]

	Descripción	Materiales recomendados	Rango de frecuencias	Ventajas	Desventajas
Platos paralelos	Un material debe colocarse entre dos electrodos para formar un capacitor	Material con capacidad de transformarse en una hoja fina y suave	< 100 MHz	Barato, y medidas de gran exactitud	Rango de frecuencias limitado, la muestra adaptada en forma de hoja debe ser muy delgada
Circuitos reactivos	La muestra es parte del aislador en un circuito reactivo	Todos los materiales con excepción de los gases	< 100 MHz	Materiales que son líquidos y sólidos pueden ser medidos	Rango de frecuencia limitado, no es apropiado para materiales con bajas pérdidas
Sonda coaxial	Utiliza una terminación abierta de una pieza de cable coaxial que se coloca sobre un material para medir las propiedades dieléctricas	Líquidos y semi-sólidos	200 MHz - 20 GHz, incluso >100 GHz	Fácil de usar, mediciones no destructivas para la mayoría de muestras	Las muestras deben poseer una superficie plana.
Líneas de transmisión	La muestra en forma de ladrillo llena la sección transversal de una línea de transmisión cerrada, causando un cambio de impedancia	Líquidos y sólidos	< 100 MHz	Más exacto y sensible que el método de la sonda coaxial	Menos exacta que la cavidad resonadora, la preparación de la muestra para ser medida es difícil y requiere bastante tiempo
Cavidad resonadora	La muestra es introducida en una cavidad que afecta la frecuencia central y el factor de calidad de la cavidad	Sólidos	1 MHz - 100 GHz	Simple de desarrollar y adaptable a grandes rangos de temperaturas	Análisis complejo de la toma de datos
Espacio libre	Antenas son usadas para direccionar un beam de microondas a través del material. Un Vector Network Analyzer mide los coeficientes de reflexión y transmisión del sólido medido.	Sólidos	Rango de microondas	Medición no destructiva, puede usarse a grandes temperaturas	Las muestras a ser medidas deben ser grandes, delgadas y se necesita de una calibración especial
Espectroscopia en el dominio del tiempo	Pulsos cortos de radiación THz, se envían sobre el material. Esta técnica se basa en la absorción selectiva de frecuencias de estos pulsos electromagnéticos de amplio espectro	Homogéneos	10 MHz - 10 GHz	Mediciones rápidas y de gran exactitud, muestras pequeñas pueden ser medidas	Muy caro de desarrollar

Tabla 2.2. Técnicas de medición sobre el material
Fuente: Adaptada de [32]

	Ilustración	Material a prueba	Rango de Frecuencias	Comentarios extras
Sonda coaxial		Materiales con pérdidas (líquidos y semi-líquidos)	200 MHz a 2 GHz	No destructivo
Línea de transmisión		Materiales con pérdidas (sólidos moldeables)	< 100 GHz	-
Espacio libre		Buenos para hojas planas y partículas a elevadas temperaturas	< 100 GHz	-
Platos paralelos		Materiales con bajas pérdidas y muestras pequeñas	< 100 GHz	Exacto Una sola frecuencia
Platos paralelos		Hojas planas	< 100 GHz	Delgado Frecuencias bajas
Medición por inductancia		Se requiere estructuras toroidales	<10 MHz	Exacto y de fácil medición

2.3 Método de línea coaxial con terminal abierto

Este método utiliza una pieza de cable coaxial de terminación abierta que es colocada de forma inmersa en un material para medir las propiedades dieléctricas.

- La sonda coaxial de terminación abierta es la encargada de traducir los cambios de impedancia de cada material en coeficientes de reflexión.
- El analizador de red o equipo similar es usado para grabar la información del coeficiente de reflexión del material a prueba.
- El cable coaxial colocado en contacto total con la muestra de prueba, como se aprecia en la Fig. 2.3, es usado como un sensor, por lo que la muestra debe ser homogénea dentro de un volumen suficientemente grande para simular un bloque eléctricamente infinito en tamaño.

Debido a que la variación de la señal puede ser pequeña, para obtener medidas exactas, los errores del sistema deben ser eliminados mediante la calibración. Por otro lado, una muestra sólida debe ser visualmente plana para obtener valores adecuados; además, las pequeñas burbujas de aire entre la muestra y la sonda podrían causar errores considerables [34].

Este método es más confiable para valores grandes de constantes dieléctricas y un medio con un alto factor de pérdidas, como es el caso de materiales líquidos o semi-líquidos [34].

Para modelar este sistema de sonda coaxial de terminal abierto, han sido construidos varios modelos. Existen cuatro modelos: modelo capacitivo, modelo de antena, modelo de línea virtual y modelo de función racional [34].

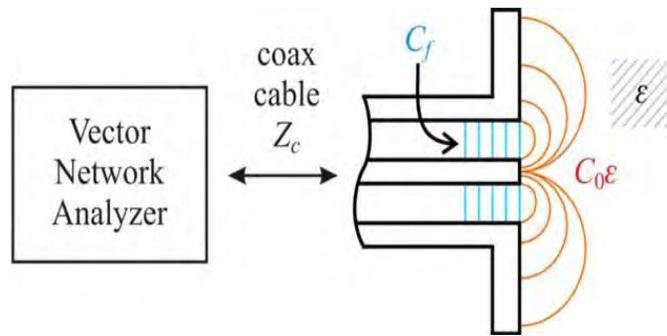


Figura 2.3. Sensor de cable coaxial con terminación abierta.
Fuente: Adaptado de [35]

2.3.1 Modelo capacitivo

Una medida típica de la configuración del cable coaxial de terminación abierta es mostrada en la figura 2.4. El circuito equivalente del sensor consiste en dos elementos básicos: un capacitor con pérdidas $C(\hat{E})$, relacionado con la propiedades dieléctricas de la muestra ($C(\epsilon_r) = C_0\epsilon_r$, donde C_0 es la capacitancia cuando la sonda está en el aire), y C_f , el cual es la capacitancia que considera la líneas del campo eléctrico irradiado dentro de la sonda coaxial. Este modelo es válido para frecuencias donde la dimensión del cable sea pequeña comparada con la longitud de onda para que la terminación abierta de la línea concentre el campo cercano reactivo dentro de esta y que nada se irradie al exterior. Además, a altas frecuencias el valor de la capacitancia C_0 varía, ya que se incrementa con la frecuencia [34][36].

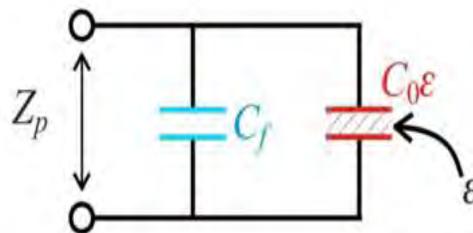


Figura 2.4 Circuito equivalente del modelo capacitivo.

Fuente: Adaptado de [35]

Cuando la sonda coaxial esté conectada a una muestra dieléctrica, cuyo permitividad relativa (ϵ_r), el capacitor equivalente cambiará ($C(\epsilon_r)$) y el coeficiente de reflexión (Γ) en la punta de la sonda del conector con terminación abierta podrá ser obtenido empleando siguiente fórmula (2):

$$\Gamma = \Gamma e^{j\phi} = \frac{1 - j\omega Z_0 [C(\epsilon_r) + C_f]}{1 + j\omega Z_0 [C(\epsilon_r) + C_f]} \quad (2)$$

donde, ω es la medida de la frecuencia angular, Z_0 es la impedancia característica del cable coaxial conectada al terminal abierto de la sonda, C_0 la capacitancia cuando la sonda está en el aire y C_f , el cual es la capacitancia que considera la líneas del campo eléctrico irradiado dentro de la sonda coaxial [34][36].

De la ecuación (2) se obtiene

$$\epsilon_r = \frac{1 - \Gamma}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (3)$$

Para calcular la permitividad relativa ϵ_r a partir del coeficiente de reflexión Γ , se deben conocer los valores de C_0 y C_f . Estos dos parámetros son usados usualmente para la calibración de la sonda de terminal abierto conectada con una muestra en particular, la cual posee una permitividad conocida, como por ejemplo el agua desionizada y mezclas salinas [34].

Como primera aproximación C_f puede ser asumido como cero para determinar C_0 . Las relaciones (4) y (5) pueden ser empleadas, la primera para ϵ_r' y la segunda para ϵ_r'' :

$$C_0 = \frac{(-2|\Gamma|\sin\phi)}{\omega Z_0 \epsilon_r' (1 + 2|\Gamma|\cos\phi + |\Gamma|^2)} \quad (4)$$

o

$$C_0 = \frac{(1-2|\Gamma|)}{\omega z_0 \epsilon_r'' (1+2|\Gamma|\cos\phi+|\Gamma|^2)} \quad (5)$$

donde,

$|\Gamma|$ es la magnitud del coeficiente de reflexión de entrada en el VNA;

ϕ es la fase del coeficiente de reflexión de entrada en el VNA; y

ϵ_r' y ϵ_r'' son las constantes dieléctricas y factor de pérdidas, respectivamente, de la muestra utilizada para la calibración [36].

En el caso de C_f , hallar su valor es más complicado por lo que se tiene la relación (6), ya que materiales con valores bajos de constantes dieléctricas deben ser utilizados, por lo que el valor hallado no es de gran exactitud [37].

$$C_f = \frac{(-2|\Gamma|\sin\phi)}{\omega z_0 (1+2|\Gamma|\cos\phi+|\Gamma|^2)} - \epsilon_r' C_0 \quad (6)$$

El proceso para determinar el valor de C_0 y C_f requiere de varias mediciones con muestras conocidas.

2.3.2 Modelo de antena

La sonda coaxial puede ser considerada como fuente de radiación, y el circuito equivalente del modelo sería como se muestra en la figura 2.5. La capacitancia C_1 es determinado principalmente por la estructura de la sonda coaxial y es independiente del material a prueba. Este material a prueba puede ser modelado como una capacitancia $\epsilon_r C_2$ y una resistencia R ($1/G$) conectada en paralelo a las capacitancias, la cual es relacionada a la radiación de la apertura del coaxial. Entonces, la admitancia normalizada está indicada en la ecuación (7) [34]

$$\frac{Y}{Y_0} = j\omega C_1 Z_0 + j\omega C_2 + Z_0 G(\omega, \epsilon_r) \quad (7)$$

donde Z_0 es la impedancia característica del cable coaxial, Y_0 es la admitancia característica del cable coaxial ($Y_0 = \frac{1}{Z_0}$), ω es la frecuencia angular y ϵ_r es la permitividad compleja del material a prueba.

Por otra parte, ha sido demostrado que para antenas muy pequeñas, la conductancia de radiación puede ser expresada como:

$$G(\omega, \epsilon_r) = \epsilon_r^{\frac{5}{2}} G(\omega, \epsilon_0) \quad (8)$$

Es entonces que de la ecuación (7) y (8) se obtiene

$$\frac{Y}{Y_0} = j\omega C_1 Z_0 + j\omega C_2 + Z_0 \epsilon_r^{\frac{5}{2}} G(\omega, \epsilon_0) \quad (9)$$

La ecuación (9) puede ser incluso modificada a

$$\frac{Y}{Y_0} = K_1 + K_2 + K_3 \epsilon_r^{\frac{5}{2}} \quad (10)$$

Los factores K_1 , K_2 y K_3 son generalmente complejos. Para determinar estos tres factores, se debe realizar calibraciones con tres diferentes materiales, los cuales poseen una permitividad conocida [34].

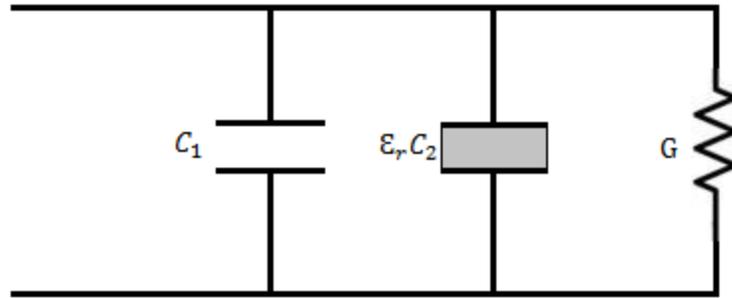


Figura 2.5. Circuito equivalente para el modelo de antena

Fuente: Adaptado de [34]

2.3.3 Modelo de línea virtual

Este modelo ha sido desarrollado a fines de los años 80s, el cual consiste en modelar el medio dieléctrico por un línea de transmisión virtual de longitud L . Esta longitud L ha sido dimensionado como una línea física. La línea de transmisión virtual está terminada por un circuito abierto, como se aprecia en la figura 2.6. La admitancia compleja en el plano $A - A'$ está dada por la relación (11) [38]:

$$Y_L = Y_d \frac{Y_E + jY_d \tan(\beta_d L)}{Y_d + jY_E \tan(\beta_d L)} \quad (11)$$

donde,

Y_L es la admitancia en la entrada de la línea de transmisión virtual;

Y_d es la admitancia característica de la línea de transmisión virtual;

Y_E es la admitancia al final de la línea de transmisión virtual;

β_d is la constante de propagación en el medio de prueba, y

L es la longitud de la línea de transmisión virtual.

La línea virtual posee una terminación en circuito abierto, por lo que $Y_E = 0$, entonces la relación se reduce de la siguiente manera

$$Y_L = j Y_d \tan(\beta_d L) \quad (12)$$

La línea virtual es coaxial, por lo que su admitancia característica está dada por

$$Y_d = \frac{\sqrt{\epsilon_d}}{60 \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (13)$$

donde,

b es el diámetro externo de la línea;

a es el diámetro interno de la línea, y

ϵ_d es la permitividad compleja de medio de prueba.

Por otra parte, la admitancia característica en la entrada de la sonda puede ser determinada a la entrada de la línea virtual por la siguiente ecuación [38]:

$$Y_L = \frac{1 - \Gamma_m e^{2j\beta_t D}}{1 + \Gamma_m e^{2j\beta_t D}} Y_t \quad (14)$$

donde,

Y_t es la admitancia de la sonda coaxial;

β_t es la constante de propagación de la sonda coaxial; y

Γ_m es la medida del coeficiente de reflexión en el plano B – B'.

Al juntar las ecuaciones (12), (13) y (14) y al despejar la permitividad de un medio a prueba, se obtiene:

$$\epsilon_d = \frac{-jc\sqrt{\epsilon_t}}{2\pi fL} \cdot \frac{1-\Gamma_m e^{2j\beta_t D}}{1+\Gamma_m e^{2j\beta_t D}} \cot\left(\frac{2\pi fL\sqrt{\epsilon_d}}{c}\right) \quad (15)$$

donde,

ϵ_t es la permitividad de la sonda coaxial.

En esta ecuación existen dos variables desconocidas, una de ellas es la longitud de la línea física (D) y la otra variable es la longitud de la línea virtual (L), la cual no puede ser directamente medido, ya que su misma existencia depende de valores hipotéticos. Estos dos valores serán obtenidos a partir de los coeficientes de reflexión medidos a dos materiales que poseen permitividades conocidas [37].

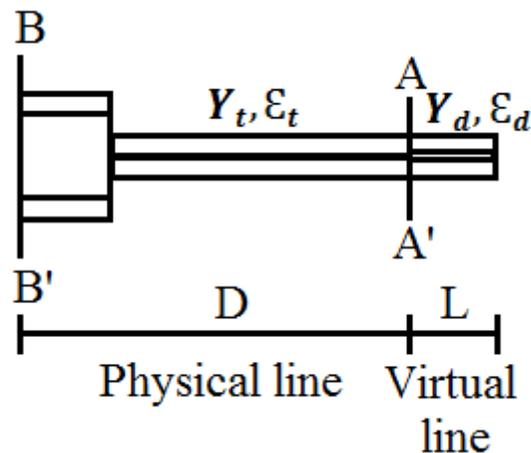


Figura 2.6. Modelo de línea virtual.
Fuente: Adaptado de [38]

2.3.4 Modelo de función racional

Este modelo fue desarrollado en los años 90s. La admitancia compleja de una sonda coaxial de 50Ω que está inmersa dentro de un medio dieléctrico ha sido estimada con el método de momento. Los resultados que se obtienen de este método incluyen al efecto de radiación, energía almacenada en la región del campo cercano. Este método se aprecia en a figura 2.7 y está descrito por la ecuación (16):

$$\frac{Y}{Y_0} = \frac{\sum_{n=1}^4 \sum_{p=1}^8 \alpha_{np} (\sqrt{\epsilon^*})^p (j\omega a)^n}{1 + \sum_{n=1}^4 \sum_{p=1}^8 \beta_{mp} (\sqrt{\epsilon^*})^q (j\omega a)^m} \quad (16)$$

donde,

α_{np} y β_{mp} son los coeficientes del modelo;

ϵ^* es la permitividad compleja del dieléctrico de prueba;

a es el radio del conductor interno de la línea;

Y es la admitancia al final de la sonda coaxial; y

Y_0 es la admitancia característica de la sonda coaxial.

Para que este método pueda ser válido, la permitividad del medio de prueba y la frecuencia deben estar en los siguientes rangos: $(1 \leq \epsilon_r' \leq 80)$, $(-80 \leq \epsilon_r'' \leq 0)$ y $(1 \leq f \leq 20 \text{ GHz})$ [38].

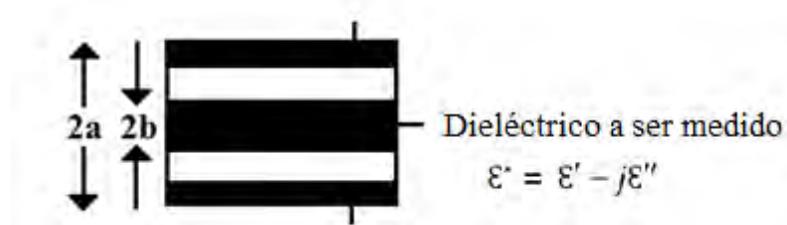


Figura 2.7. Modelo de sonda coaxial
Fuente: Adaptado de [38]

2.4 Modelo de predicción de datos

Para la modelización entre los parámetros dieléctricos y cada una de las características físico-químicas, se utilizó una Regresión de mínimos cuadrados parciales, por sus siglas en inglés (PLSR), siendo más específico se utilizó el modelo PLSR- β . Este tipo de modelo estadístico tiene el propósito de generar un modelo lineal que permite predecir una variable de respuesta dependiente, Y, de un gran conjunto de variables, X, como se muestra en la ecuación (17) [39].

$$Y = \beta X + E \quad (17)$$

Donde X es una matriz con tamaño (n x m), n es el número de muestras, en este caso número de ϵ' (constante dieléctrica) y m es el número de frecuencias; Y es la información de referencia (n x 1) que necesita ser predicho de X, en este caso las características físico-químicas; E representa los errores en X; y β es el vector que contiene a los coeficientes de regresión (m x 1) obtenidos del modelo de calibración del PLSR [39].

Los coeficientes β obtenidos son usados para seleccionar las frecuencias más relevantes. Las frecuencias que correspondan al valor absoluto más alto de los coeficientes β son seleccionados como las frecuencias más importantes, ya que estos valores miden el nivel de relación entre las variables X y Y [39].

2.5 La relación de Kramers-Kronig

La relación de Kramers-Kronig permite encontrar la parte real de la respuesta de un sistema pasivo lineal si se conoce la parte imaginaria de la respuesta en un rango infinito de frecuencias y viceversa a partir de $\mathcal{E}(\omega) = \mathcal{E}_1(\omega) + i\mathcal{E}_2(\omega)$ [40]. La relación de Kramers-Kronig puede tomar la forma de la integral de la ecuación (18) [41]

$$I = P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(x)}{x-a} dx \quad (18)$$

Donde P muestra el valor principal de la integral, ya que en algunos casos la integral impropia no estaría definida sin este valor. Para obtener la relación de Kramers-Kronig, se cambia los parámetros de la ecuación (18) por $x \rightarrow \omega'$ y $f(x) \rightarrow \chi(\omega')$. Donde ω' representa la frecuencia angular compleja ($\omega' = \omega'_1 + i\omega'_2$) y $\chi(\omega')$ muestra la susceptibilidad dieléctrica expresada por $\mathcal{E} = 1 + \chi$. Por otro lado, también se reemplaza a con una constante ω ($\omega > 0$). De los cambios se obtiene la ecuación (19).

$$I = P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\chi(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega' \quad (19)$$

Según el documento I está dado por la ecuación (20)

$$I = i\pi\chi(\omega) \quad (20)$$

Usando $\chi = \chi_1 + i\chi_2$ y $\mathcal{E} = 1 + \chi$, se obtiene la ecuación (21)

$$\chi_1 = \mathcal{E}_1 - 1 \quad \chi_2 = \mathcal{E}_2 \quad (21)$$

Sustituyendo (21) en (20) se obtiene

$$I = -\pi\mathcal{E}_2(\omega) + i\{\pi[\mathcal{E}_1(\omega) - 1]\} \quad (22)$$

De $\chi = \chi_1 + i\chi_2$ y la ecuación (21), por otro lado, ecuación (19) se puede transformar en la ecuación (23)

$$I = [P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon_1(\omega')-1}{\omega'-\omega} d\omega'] + i[P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon_2(\omega')}{\omega'-\omega} d\omega'] \quad (23)$$

Al hacer una comparación entre (22) y (23) se obtiene (24) y (25) [41]

$$\varepsilon'(\omega) - 1 = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon''(\omega')}{\omega'-\omega} d\omega' = \frac{2P}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (24)$$

$$\varepsilon''(\omega) = -\frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\varepsilon'(\omega')-1}{\omega'-\omega} d\omega' = -\frac{2\omega P}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\varepsilon'(\omega')-1}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (25)$$

Esto nos permitirá demostrar si los valores obtenidos del modelo capacitivo (ε' y ε'') poseen relación entre sí. El código en MatLab de la relación de Kramers-Kronig realizada por T. TuGuang [42], solo requirió variar la frecuencia y la cantidad de puntos a ser evaluados que dependían de esta (resolución) para poder hallar el factor de pérdidas a partir de la constante dieléctrica hallada con el modelo capacitivo y viceversa.

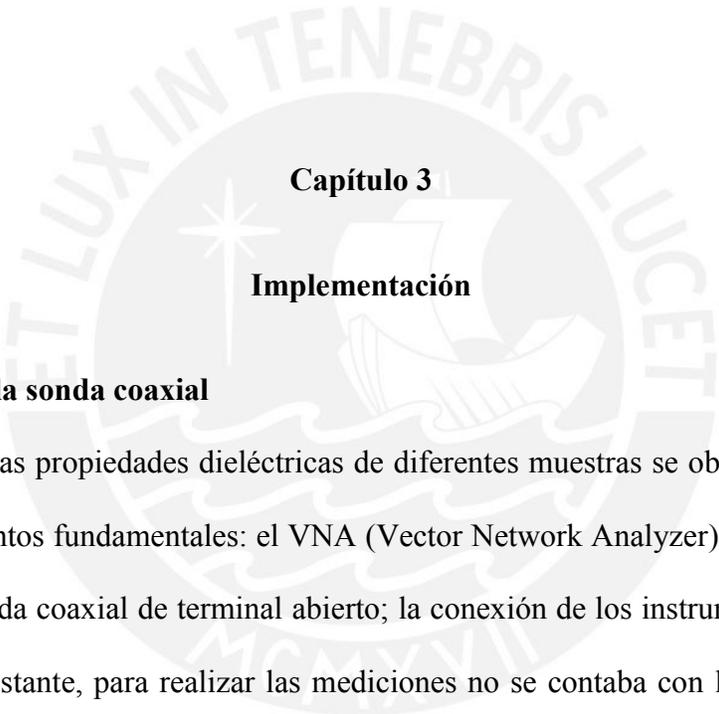
2.6 Impacto social, económico y ambiental de la solución propuesta

Hoy en día, según un estudio de la FAO [43]-[45], más de un tercio de los alimentos de la producción total se pierde o desperdicia antes de que sean vendidas al consumidor final.

Las pérdidas son generadas principalmente en los procesos de recolección y transporte, cuando los productos sobrepasan la etapa de madurez y llegan malogradas a su destino; otros casos de pérdidas son cuando el producto no logra ser vendido a tiempo y tienen que ser desperdiciados por el comerciante porque no cuenta con la calidad esperada por el cliente.

Actualmente existen diversos métodos para evitar que se produzcan estos casos de pérdidas o desperdicios, uno de ellos es, principalmente, invertir en la infraestructura y equipos usados en los procesos de control de calidad del alimento. Puesto que, con la información adecuada los productores podrán conocer las características principales con las que deben contar sus productos y así cumplir con los estándares de calidad esperados por sus clientes. Por ejemplo, conociendo los grados de madurez de los alimentos y los parámetros como acidez, pH, entre otros; podrá cosechar los alimentos en el tiempo adecuado para evitar que alcance el grado de madurez antes de que llegue al cliente final.

Además, si en el proceso de control de calidad se cambia la técnica invasiva por una técnica no invasiva disminuiría la cantidad de pérdidas generadas por desperdicio, mejorando el nivel económico de muchas empresas de productos alimenticios; así como también, se optimizaría la cantidad de productos desechados favoreciendo el medio ambiente y a la sociedad pues supone menor emisión de CO₂ [42]-[46].



Capítulo 3

Implementación

3.1 Adaptación de la sonda coaxial

Las mediciones de las propiedades dieléctricas de diferentes muestras se obtienen, básicamente, gracias a tres elementos fundamentales: el VNA (Vector Network Analyzer), el cable coaxial de alta calidad y la sonda coaxial de terminal abierto; la conexión de los instrumentos se aprecia en la figura 3.1. No obstante, para realizar las mediciones no se contaba con la sonda de terminal abierto por lo que se tuvo que adaptar dos tipos de conectores (conector tipo N y conector SMA, ambos macho). Esta adaptación se basó en el retiro del pin externo de estos conectores para obtener una superficie plana, como se muestra en la figura 3.2, semejante a la sonda de terminal abierto.



Figura 3.1. Conexión de los instrumentos para la sustracción de los coeficientes de reflexión en una muestra.
Fuente: Elaboración propia

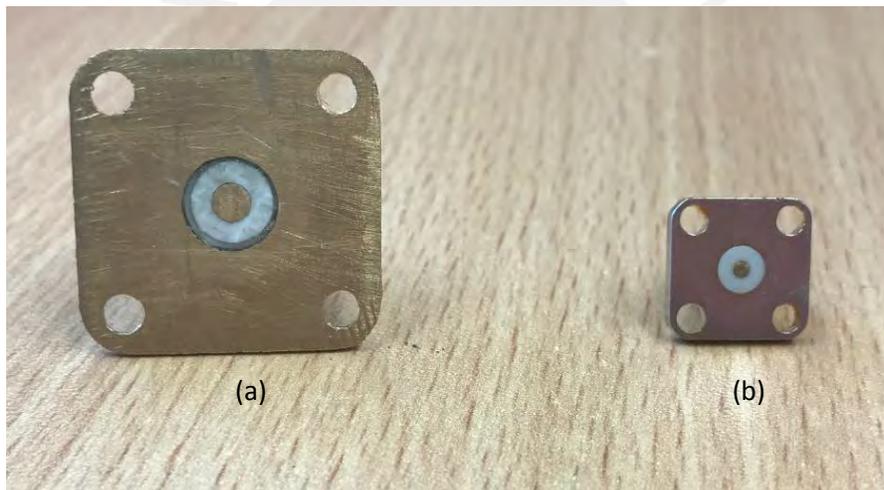


Figura 3.2. Adaptación de los conectores (a) tipo N y (b) SMA.
Fuente: Elaboración propia

3.2 Calibración del instrumento de medición

Antes de realizar la medición de los coeficientes de reflexión a cualquier muestra se debe calibrar el instrumento de medición (VNA), pues mediante este proceso se logran resultados con un margen de error mínimo. La calibración del VNA se lleva a cabo a través del método de calibración SOL cuyas siglas en inglés provienen de Short, Open y Load, el cual se basa en la conexión al extremo final del cable coaxial con estándares de calibración de circuito abierto,

circuito cerrado y una carga de 50Ω . Este último posee ese valor de carga debido a que la impedancia de salida del VNA y al cable es de 50Ω ; además, depende del tipo de conector el kit de calibración que se utilizará. Finalmente, dentro de la calibración se debe ingresar cuáles son los coeficientes que se desea obtener (S11: coeficiente de reflexión), tipo de conector a utilizar (tipo N o SMA), el rango de frecuencia (10 MHz – 3 GHz), y la cantidad de muestras que se obtendrán (1601 puntos en el rango de frecuencia establecido).

3.3 Medición del parámetro S11

Al terminar el proceso de calibración del VNA se procede a medir el parámetro S11 de las muestras. Estas dependiendo de su estado (líquido o sólido) se miden como se aprecia en la figura 3.3. Para la medición de coeficiente de reflexión (parámetro S11) la superficie plana de la sonda debe estar en contacto total con la muestra en caso de que estas estén en estado sólido y, en el caso de muestras en estado líquido, la sonda se sumerge en su totalidad, ya que se debe evitar que la generación de burbujas de aire en la toma de datos, puesto que esto produce un error de medición.

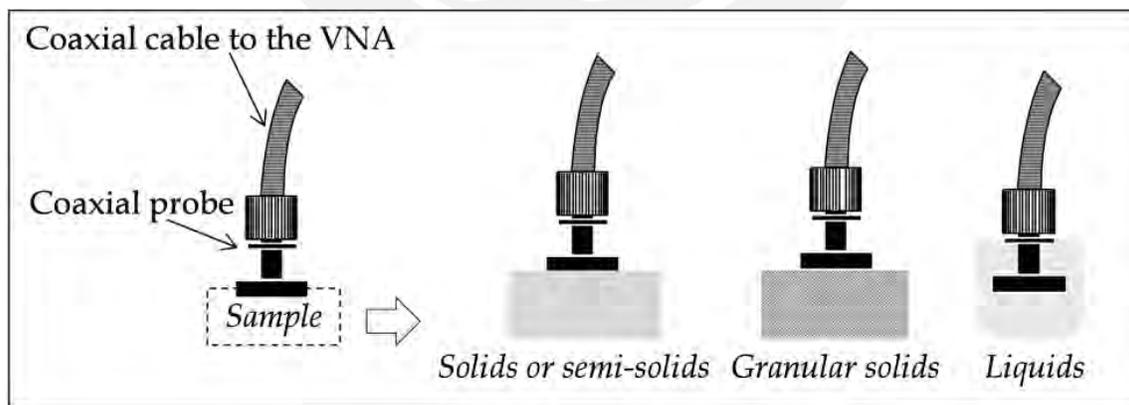


Figura 3.3. Colocación de la sonda dependiendo del tipo de muestra.

Fuente: [46]

3.4 Modelamiento de la sonda coaxial de terminal abierto

Una vez obtenidos los valores del coeficiente de reflexión del VNA se utiliza el Advanced Design System (ADS) software para modelar la sonda coaxial de terminal abierto. En la figura 3.4 (a) se observa la sonda conectada al cable coaxial, la cual se modelará a través de dos tipos de modelamientos con los que se obtendrá un circuito equivalente: el primero, a través de líneas de transmisión y el segundo, a través de componentes reactivos. En la figura 3.4 (b) y (c) se observan el modelamiento de la sonda del cable coaxial, a través de líneas de transmisión y componentes reactivos.

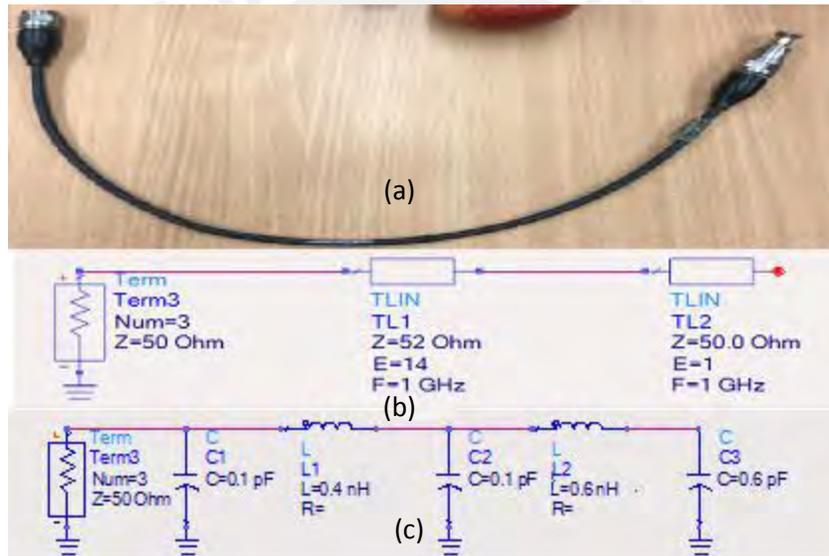


Figura 3.4. (a) Sonda coaxial de terminal abierto de conector tipo SMA. Modelamiento de la sonda coaxial terminal abiertos: (b) Modelamiento con líneas de transmisión y (c) Modelamiento con componentes reactivos.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en las figuras 3.5 y 3.6 se observa que para que el modelamiento sea correcto, los valores de la magnitud y fase del parámetro S11 obtenido del VNA y del circuito equivalente deben de coincidir o ser lo más próximos posibles para el uso adecuado de esta. Luego de comparar los valores se selecciona el modelamiento más adecuado y se almacenan sus

parámetros S. Los cuales serán utilizados para el de-embudo (punto 3.5) de los datos obtenidos del VNA de las diferentes muestras.

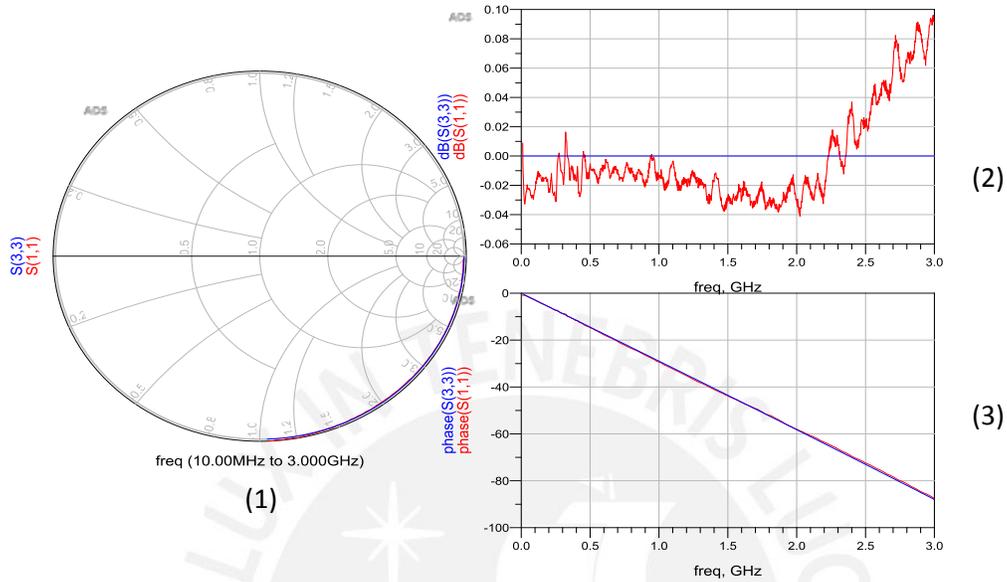


Figura 3.5. Resultados del modelamiento de la sonda coaxial a través de líneas de transmisión: (1) Gráficas de Carta Smith, (2) magnitud y (3) fase del parámetro S11.

Fuente: Elaboración propia

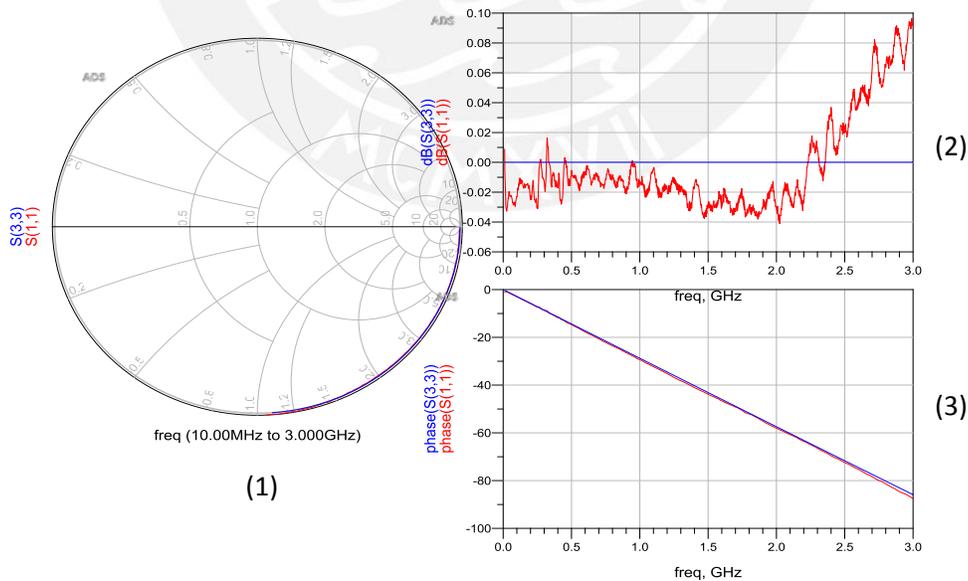


Figura 3.6. Resultados del modelamiento de la sonda coaxial a través de componentes reactivos: (1) Gráficas de Carta Smith, (2) magnitud y (3) fase del parámetro S11.

Fuente: Elaboración propia

3.5 De-embebido

El proceso de de-embebido del parámetro S11 es usado para trasladar el plano de medición, en este caso, del plano coaxial a la sonda. De esta manera, a los valores del S11 se les sustrae los valores generados por la sonda coaxial, obteniendo resultados similares a una medición directa, ver figura 3.7. La ventaja que proporciona este procedimiento para el modelo de predicción es que disminuye el número de errores del sistema.

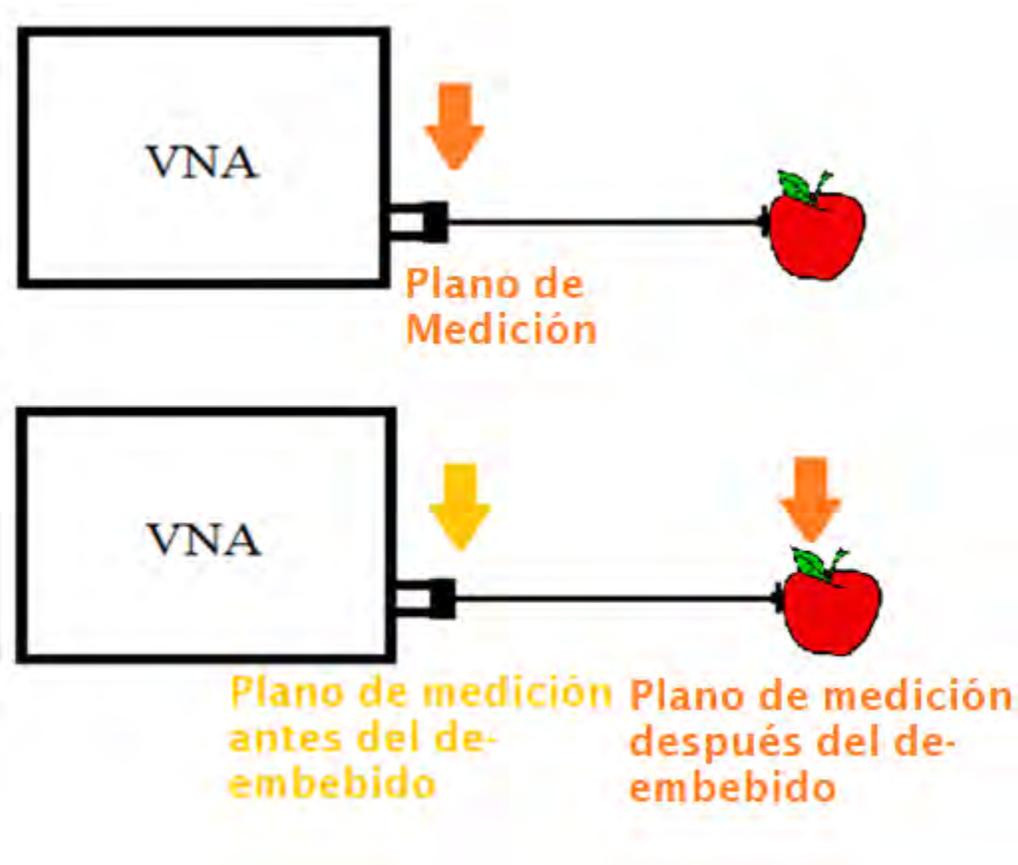


Figura 3.7. Ilustración de los planos antes y después del de-embebido.
Fuente: Elaboración propia

3.5.1 De-embebido con ADS

Para el de-embebido en el ADS se modela la sonda coaxial, como ya se mencionó en el punto 3.4. Este proceso sirve para obtener los parámetros S de la sonda coaxial, cuyos valores después

de ser almacenados son colocados en el módulo del Data Item De Embd. A continuación de este se coloca el Data Item S, el cual lee la información extraída de la muestra medida por el VNA, que es de formato Touchstone de tipo S (SnP) como se muestra en la figura 3.8. Asimismo, se debe colocar a qué frecuencias se desea procesar la información. En este caso el rango de frecuencia usado fue de 10 MHz a 3 GHz con paso de 1.9 MHz, ya que se quiso asemejar a la cantidad de datos obtenidos del VNA.

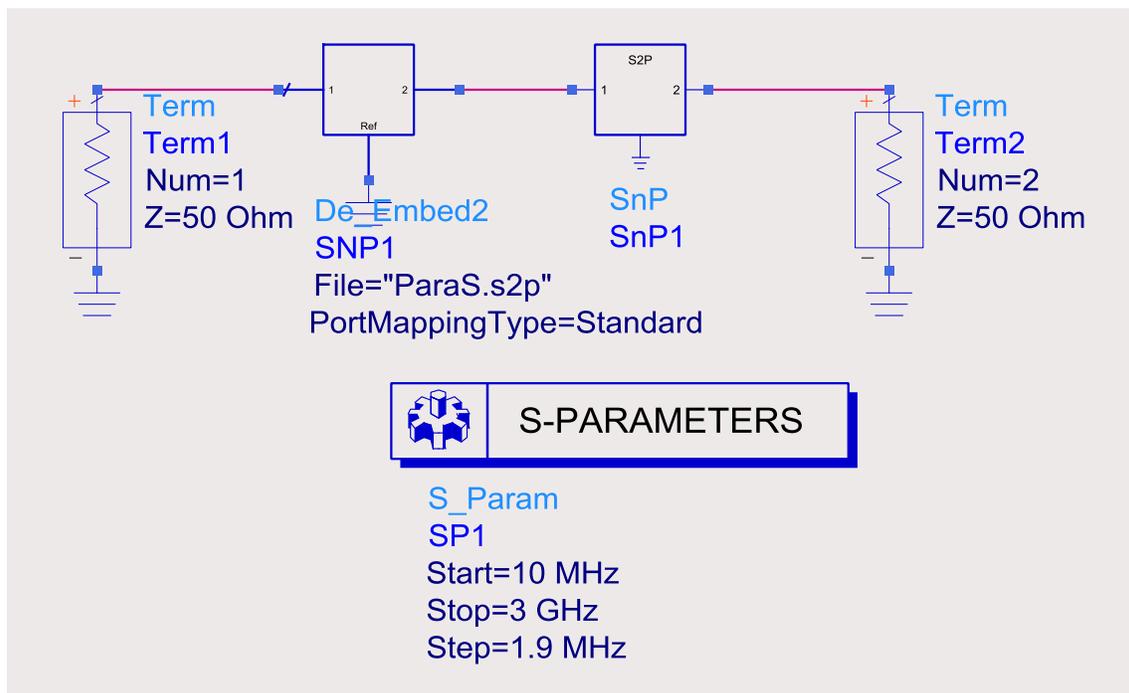


Figura 3.8. De-embido en ADS
Fuente: Elaboración propia

3.6. Calibración del modelo capacitivo

Finalmente, el paso previo a la toma de datos de la permitividad es la calibración del modelo capacitivo, el cual se requiere dos muestras como mínimo las cuales poseen permitividades conocidas. En este caso se utilizará el agua desionizada, cuyo valor de constante dielectrica y

factor de pérdidas están graficados en la figura 3.9 y figura 3.10, en esta última se aprecia la permitividad de la mezcla salina (NaCl 0.5 M).

Para la obtención de las propiedades dieléctricas de estos dos compuestos se deben medir los coeficientes de reflexión tanto del agua desionizada como el de la mezcla salina con la ayuda del VNA como se menciona en el punto 3.3. Debido a que son materiales en estado líquido, la sonda del cable coaxial en terminal abierto se sumerge dentro de ambos. Cabe recalcar que antes de realizar la toma de mediciones, el VNA debe que ser debidamente calibrado como se ha menciona en el punto 3.2.

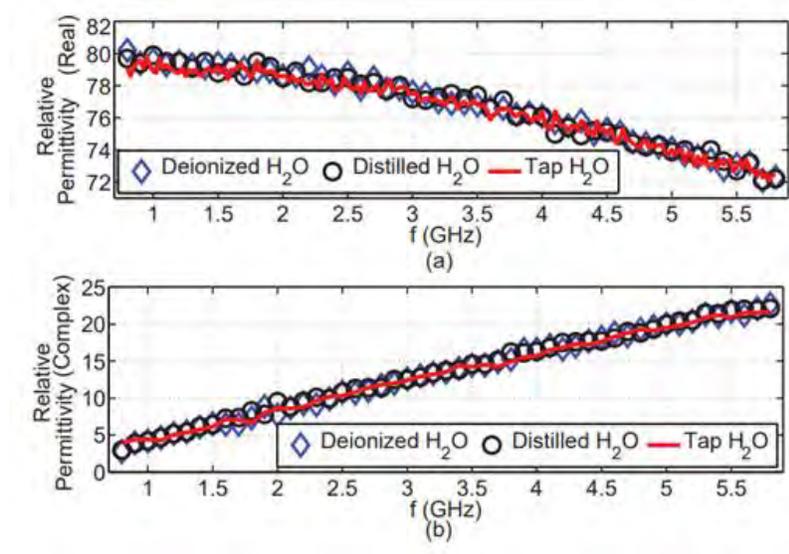


Figura 3.9. Valores de las propiedades dieléctricas del agua desionizada.
Fuente: [47]

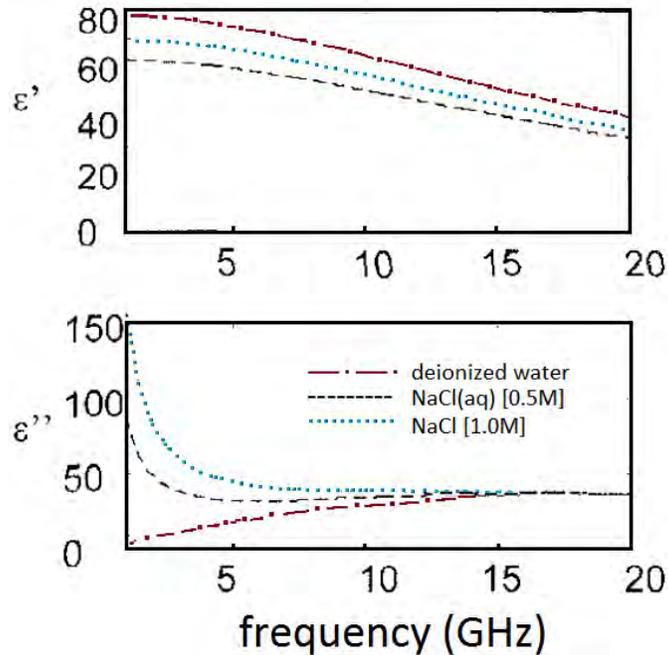


Figura 3.10. Valores de las propiedades dieléctricas del agua desionizada y de la mezcla salina (NaCl [0.5 M]). Fuente: Adaptación de [38]

Posteriormente, se procede a de-embiber las muestras del agua desionizada y la mezcla salina, como se menciona en el punto 3.5. Una vez de-embibido se procede a realizar la calibración del modelo capacitivo, pues se debe conocer la constante C_0 , la cual es obtenida a partir del nuevo S_{11} generado por el de-embibido de las muestras cuyo valor de constante dieléctrica se introduce en la ecuación (4). Un dato importante es que para realizar una buena calibración de la sonda coaxial se debe recolectar varias tomas a la muestra, pues de esta manera se podrá generar un promedio y, por ende, tener en cuenta cuanto es la desviación estándar que se genera en cada toma de datos.

Después de obtener el valor de C_0 , se comparan los valores de permitividad obtenidos de investigaciones pasadas con los valores obtenidos de la adaptación de sonda, pues si estos valores coinciden la calibración se realizó correctamente.

Capítulo 4

Recolección de datos

4.1 Secuencia del modelo predictivo

Para la toma de datos se realizó una secuencia lógica, como se aprecia en la figura 4.1. El primer paso es la compra de las muestras frescas a utilizar en el proyecto, en este caso fueron ciento cuarenta manzanas de la variedad *Red Delicious* y ochenta camotes morados de la variedad Jonathan del valle de Cañete. Para el buen desarrollo del proyecto y del modelo predictivo se buscó en los productos una homogeneidad en cuanto al tamaño, color y peso; rechazando los frutos con defectos superficiales como cortes, magulladuras o con presencia de hongos u otro tipo de deterioro, especialmente para el caso de las manzanas. Considerando además, las características propias del alimento en estado de madurez en cuanto a su color, aroma y textura.

Posteriormente, se procede a la preparación de las mismas, la cual consiste en el lavado, desinfección, enjuagado, secado y almacenamiento de cada una de las muestras. La etapa de

lavado sirve para eliminar las impurezas superficiales presentes en la fruta como tierra, ceras, entre otros. Luego del lavado se procede a la desinfección, la cual consiste en eliminar las bacterias que no se lograron eliminar durante el proceso de lavado, sumergiendo las frutas en una solución de hipoclorito de sodio a 50ppm por un lapso de 5 min, siendo seguidamente enjuagadas y secadas con papel toalla. Al finalizar este proceso, se almacena el producto en jabas de plástico a temperatura ambiente. En el caso de las manzanas se siguió con este proceso; sin embargo, para los camotes sólo se lavaron debido a su tejido externo es blando y se descascara con facilidad.

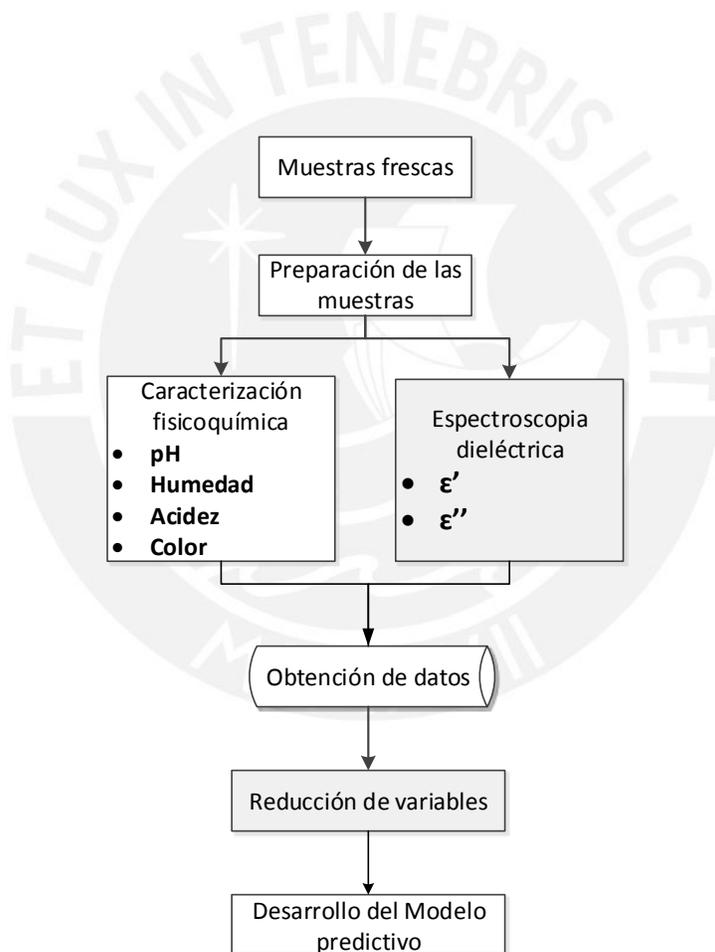


Figura 4.1. Secuencia lógica para el desarrollo del modelo predictivo.
Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso es la recolección de datos tanto de las propiedades físico-químicas (pH, acidez, color y cantidad de sólidos solubles) como de las propiedades dieléctricas (constante dieléctrica

y factor de pérdidas). Estas características se obtuvieron según el orden que muestra la figura 4.2. Primero se determina las características del color, el cual no es un procedimiento invasivo, debido a que en el proceso de medición del parámetro S11 de la muestra genera un poco de presión sobre esta, la cual posiblemente dañe la parte superficial de la fruta. Por otro lado, las mediciones de las características fisicoquímicas restantes, por poseer un procedimiento invasivo, como el extracto de la fruta, se miden después de haber obtenido los parámetros S11 de todas las muestras. Al finalizar esta etapa, se recopila toda la información y se prosigue a evaluar los datos para obtener la información más relevante y después desarrollar el modelo predictivo.

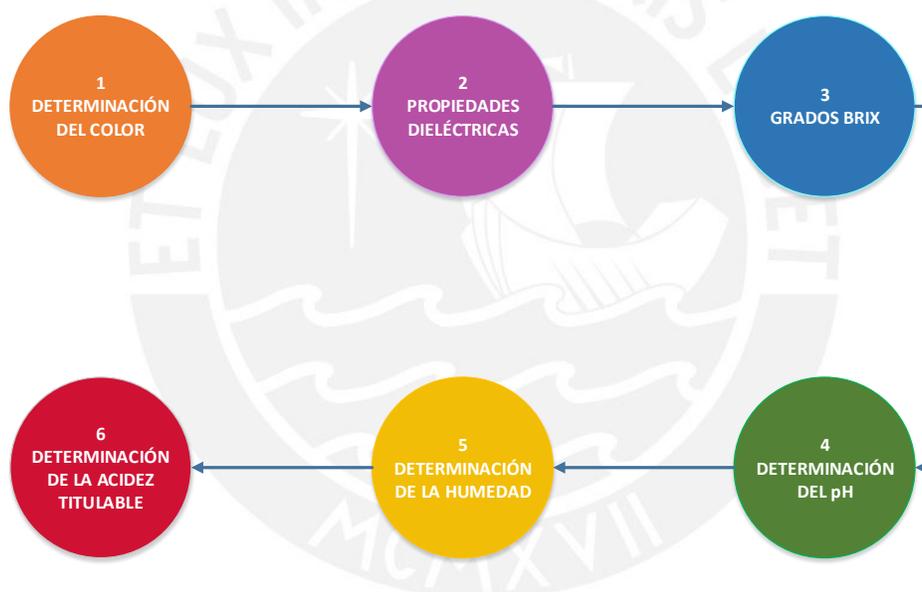


Figura 4.2. Secuencia lógica de las mediciones por cada muestra.
Fuente: Elaboración propia

4.2 Mediciones

Las pruebas físico-químicas de las manzanas se realizaron en el laboratorio de Procesos Industriales que se encuentra ubicado en la planta baja del pabellón O de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) mientras que las pruebas físico-químicas del camote se realizaron en el laboratorio de Química Analítica de la USMP, con excepción de la

determinación de color. La determinación del color externo de los productos y la medición de las propiedades dieléctricas se evaluaron en el laboratorio de Tecnologías Inalámbricas de la PUCP ubicado en el V304.

4.2.1 Medición del color

Para la recolección de imágenes, se debió construir un módulo de fotografías, ver figura 4.3, cuya fabricación duró 2 días. Al tener listo el módulo se procedió a la toma de fotografías, la cual tardó un día, pues se debió tomar dos fotos por muestra, ya que se debía asegurar los 360° de la muestra, a través de una cámara semi-profesional, la cual debía mantener una misma calibración para todas las tomas fotográficas.



Figura 4.3. Módulo para la toma fotográfica.
Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Medición de las propiedades dieléctricas

Después de las tomas fotográficas, se procedió a obtener la permitividad de las muestras, para ello se debe seguir la secuencia de la figura 4.4 que fue explicada en el capítulo 3.

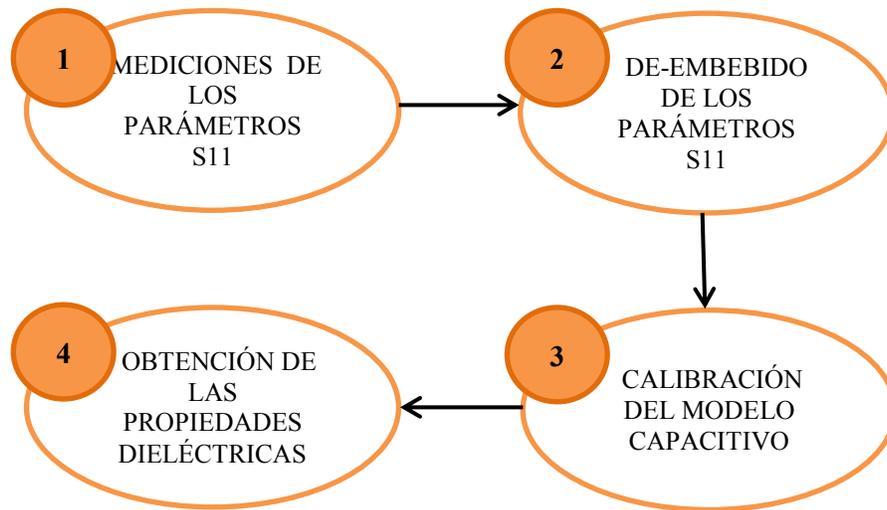


Figura 4.4. Secuencia para la obtención de la permitividad de una muestra.
Fuente: Elaboración propia

Posteriormente a la calibración del VNA, se debe extraer los parámetros S11 de cada muestra y por cada una se tuvo que realizar tres tomas de resultados en un sector dentro de un ángulo aproximado de 120° como se observa en la figura 4.5. De esta forma, se obtiene un resultado promedio de la información, pues un alimento no es homogéneo en toda su área, logrando así reducir el error en el resultado final de la muestra.

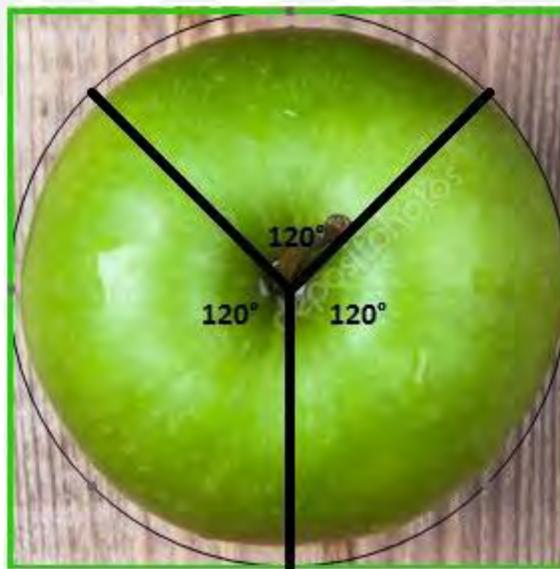


Figura 4.5. División de la manzana en forma equivalente para la toma de datos.
Fuente: Elaboración propia

Las tomas se realizaron en dos días, tomando alrededor de 30 horas para la recolección de las tres tomas para aplicadas a las 140 manzanas y 80 camotes. Por cada muestra se puede tardar aproximadamente entre 7 u 8 minutos. Si bien los parámetros S11 son obtenidos, falta el de-embibido y procesamiento de los datos a través del modelo capacitivo.

4.2.3 Medición de las propiedades fisicoquímicas

Finalmente, las pruebas fisicoquímicas se realizaron en el laboratorio de Procesos Industriales del departamento de Ingeniería Industrial, donde se extrajo el zumo, por separado, de cada una de las manzanas mediante una extractora de zumos Philips (modelo HR1861/100) cuya capacidad es de 2L. Para evitar que la muestra se contamine por los residuos de las previas extracciones se tuvo que lavar el extractor después de cada proceso.

El tiempo que duró el proceso de extracción del zumo y en el cual se realizaron las mediciones de pH, humedad, acidez y la cantidad de sólidos solubles (°Brix) fue de 4 días. Durante cada día se trabajó 3 horas, alrededor de 5 minutos por cada muestra; sin embargo, este tiempo varió debido de la disponibilidad el laboratorio y de los equipos mencionados en el capítulo 2. Por otra parte, los análisis realizados al camote se realizaron en el laboratorio de Química Analítica de otra universidad, debido a que no se contó con los permisos para realizar las pruebas del camote dentro del laboratorio de Procesos Industriales de la PUCP.

Capítulo 5

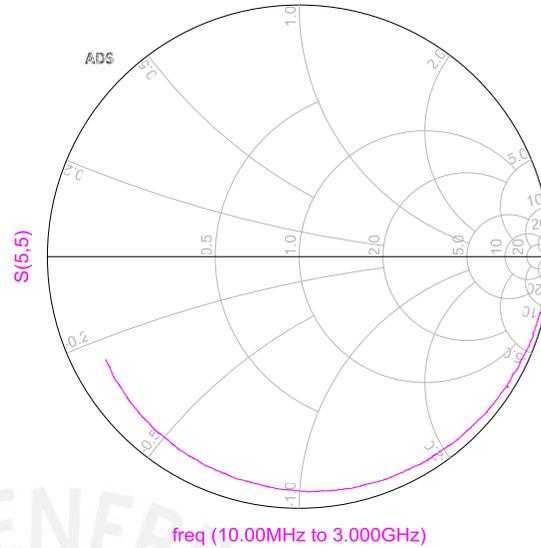
Resultados

5.1 Resultado de las mediciones del VNA

En el capítulo 4 se menciona que el primer paso para la obtención de la permitividad es la medición del parámetro S11 de cada muestra. Esta medición se realizó como se explica en el capítulo 3, colocando la sonda coaxial de terminal abierto en su totalidad en la parte externa de la muestra como se aprecia en la figura 5.1 (a), evitando la generación de burbujas de aire entre la sonda y la muestra, para ello se trata de localizar una zona plana en la muestra. Por otro lado, se puede observar también el valor del parámetro S11 obtenido con el VNA y que es mejor apreciada en la figura 5.1 (b), que es la imagen de los valores del coeficiente de reflexión presentados en una Carta Smith.



(a)



(b)

**Figura 5.1. (a) Medición de la manzana a través de espectroscopia de microondas y (b) parámetro S11 en una Carta Smith de una manzana.
Fuente: Elaboración propia**

5.2 Resultados del de-embebido del parámetro S11

El de-embebido que se realiza al parámetro S11 sirve para mover el plano de medición, del plano coaxial a la sonda. Este proceso de de-embebido con el ADS software, que se detalla a profundidad en el capítulo 3, es de la siguiente manera: se modela la sonda y el cable coaxial en el programa ADS para obtener los valores de sus parámetros S, los cuales se extraen a los valores de a cada una de las muestras medidas por el VNA. El resultado que se obtiene al final de este proceso se aprecia en la figura 5.2.

En esta figura, se observa el resultado de la medición de una muestra antes de realizar el de-embebido, que es la curva de color azul, y la medición de la muestra después del de-embebido, que es la curva el de color rojo. Como se aprecia en esta imagen, los valores de ambos resultados son diferentes entre sí, ya que al mover el plano de medición los valores son desfasados [38].

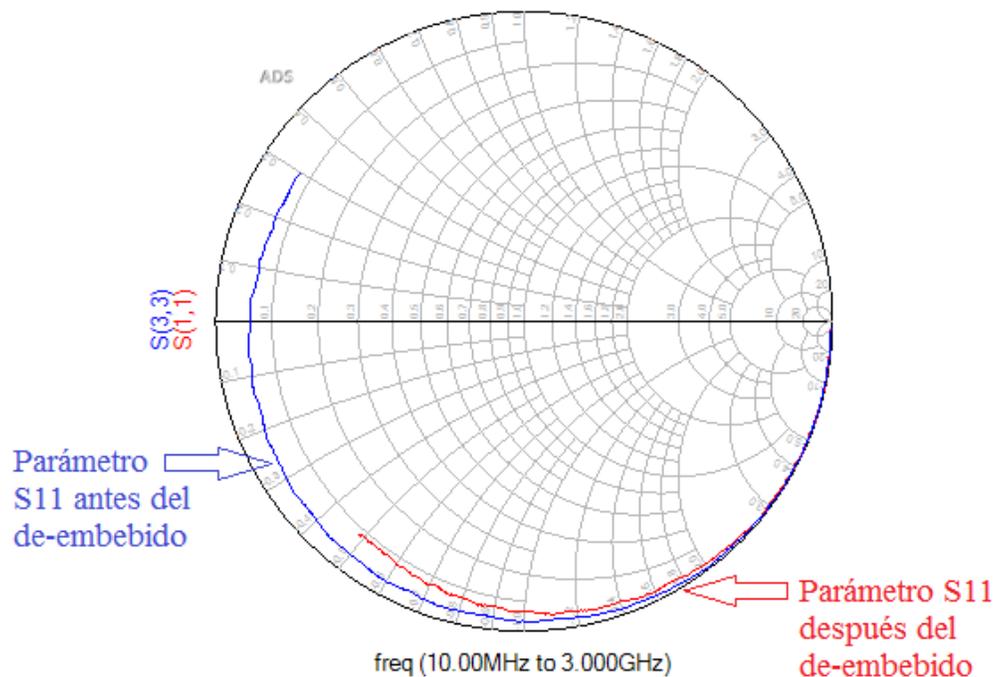


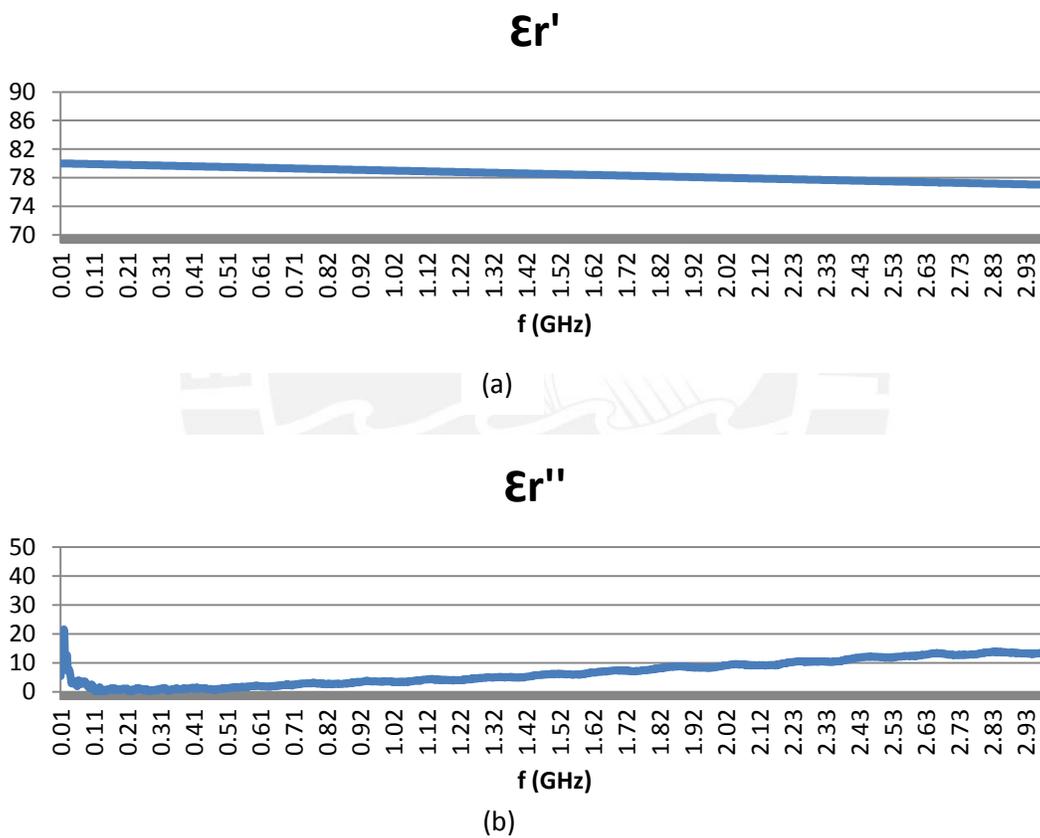
Figura 5.2. Resultados del de-embecido parámetro S11 en una Carta Smith del agua desionizada.
Fuente: Elaboración propia

5.3 Resultados de la calibración del modelo capacitivo

En el capítulo 4 se mencionó también que el tercer paso para hallar la permitividad era la calibración del modelo capacitivo. Por otro lado, en el capítulo 3 se observó las propiedades dieléctricas del elemento que se utilizó para, posteriormente, compararlas con los resultados obtenidos por la medición con la sonda coaxial de terminal abierto que se modeló en la PUCP. Para el caso de este proyecto, uno de los elementos principales fue el agua desionizada, pues posee propiedad dieléctrica bien caracterizada.

La constante dieléctrica del agua desionizada fluctúa entre los valores de 80 y 78 siendo estos valores equivalentes a un rango de 10 MHz a 3 GHz (rango de frecuencia de trabajo del VNA que posee la PUCP). Para el factor de pérdidas los valores varían entre 2 y 14, siendo 2 el valor equivalente a 1 Hz y 14 el valor equivalente a 3 GHz, [46].

El resultado de las mediciones realizadas al interior de la universidad, el cual se puede observar en la figura 5.3, resultó con valores similares a los presentados en el capítulo 3, pues se toma como referencia la constante dieléctrica para hallar el factor de pérdidas y el C_0 . Para la determinación del factor de pérdidas, a la constante dieléctrica en el rango de 10 MHz a 3 GHz se le introducen los valores de 80 a 78, obteniendo resultados con valores entre 0 a 14 en el rango de 12 MHz a 3 GHz, siendo similar al valor de [46].



**Figura 5.3. (a) Constante dieléctrica y (b) factor de pérdidas del agua desionizada.
Fuente: Elaboración propia**

Por otro lado, el valor hallado de C_0 se utiliza con el otro elemento con características bien definidas que es una solución de agua con NaCl de 0.5 moles. Al comparar los resultados obtenidos con los valores ya dados se debe obtener valores similares, pues si es así, la calibración

es viable y puede ser utilizado para la obtención de las permitividades de los alimentos. Estos valores se pueden validar a partir de la relación de Kramers-Kronig.

5.3.1 Validación de resultados del modelo capacitivo

La comparación de los valores se hizo a través de la obtención de la curva de la permitividad del agua desionizada de 100 MHz hasta 100 GHz a partir de la ecuación de Debye y la obtención de dos pruebas de agua desionizada en el rango de 50 MHz hasta 16 GHz. En la figura 5.4 se aprecia las curvas de estas dos pruebas del agua desionizada y la curva característica del agua desionizada a partir de Debye. En este caso, los valores obtenidos son similares hasta la frecuencia aproximada de 2 GHz por lo que se procede al siguiente paso, ya que se puede trabajar con el rango de frecuencias entre 50 MHz a 2 GHz, como se explicará posteriormente.

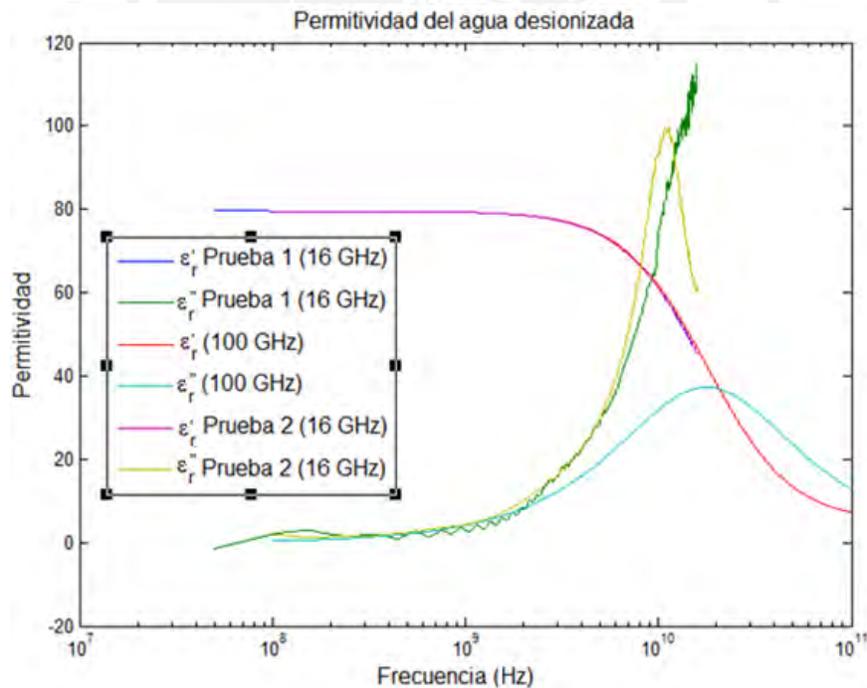


Figura 5.4. Permitividad del agua desionizada.
Fuente: Elaboración propia

5.4 Resultados de las mediciones realizadas para las manzanas y los camotes

5.4.1 Resultados de las propiedades dieléctricas

La permitividad de cada una de las manzanas y los camotes fue hallada después del de-embido de estos. Con el valor de ϵ_r obtenido a partir de la ecuación (2) se procede a conseguir la constante dieléctrica y el factor de pérdidas. El valor promedio de ϵ_r' y ϵ_r'' de las ciento cuarenta manzanas vs frecuencia se muestra en la figura 5.5 y el valor promedio de los ochenta camotes vs frecuencia se muestra en la figura 5.6. Como se aprecian en estas figuras el valor de ϵ_r' para la manzana es de 24 y para el camote 35 aproximadamente en el rango de frecuencias de 500 MHz a 3 GHz, en cuanto el valor de ϵ_r'' tiende a 4 para el caso de la manzana y 11 para el caso del camote.

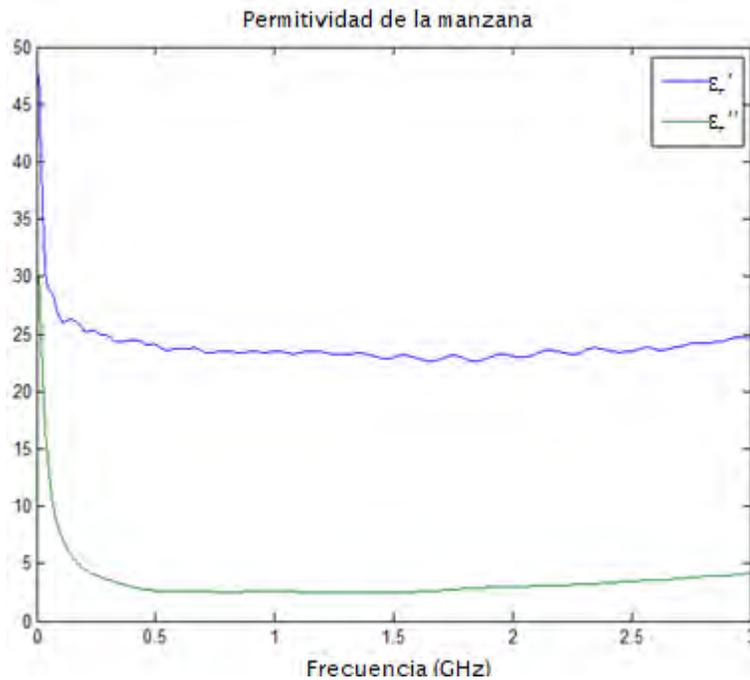


Figura 5.5. Constante dieléctrica (ϵ_r') y factor de pérdidas (ϵ_r'') del promedio de las ciento cuarenta manzanas.

Fuente: Elaboración propia

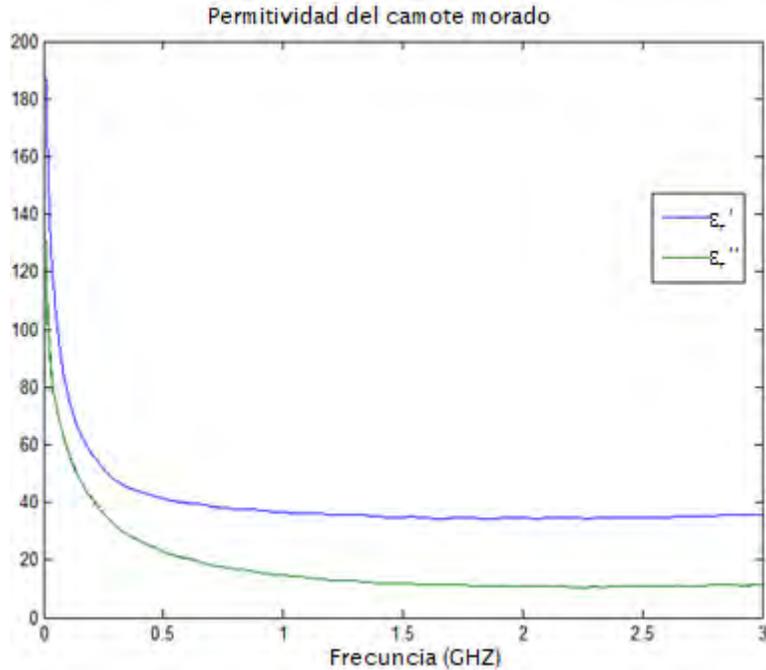


Figura 5.6. Constante dieléctrica (ϵ_r') y factor de pérdidas (ϵ_r'') del promedio de los ochenta camotes morados.

Fuente: Elaboración propia

5.4.1.1 Resultados de la relación del Kramers-Kronig

La validación de los valores obtenidos de la permitividad de la manzana y del camote se realizó a través de la relación de Kramers Kronig (KKR por sus siglas en inglés). Para usar este método se necesita tener los valores de permitividad en un rango de frecuencias casi infinito; sin embargo, los resultados obtenidos por la sonda coaxial de terminación abierta sólo abarca un rango frecuencias de 10 MHz a 3 GHz, por lo que se adapta la curva de la manzana y del camote teniendo en cuenta el trabajo de M. Castro-Giráldez [14] a partir de la frecuencia de 2 GHz, pues como se comprobó anteriormente a frecuencias mayores que esta, el modelo no posee buenos resultados, con lo que se obtiene los valores mostrados en la figura 5.7 y 5.8 para el caso de la manzana y del camote respectivamente. En esas imágenes se puede validar que la curva presenta características similares en ambos casos. Sin embargo, para el caso del camote existe una

desviación mayor respecto a la manzana que podría ser causada por la superficie externa del camote.

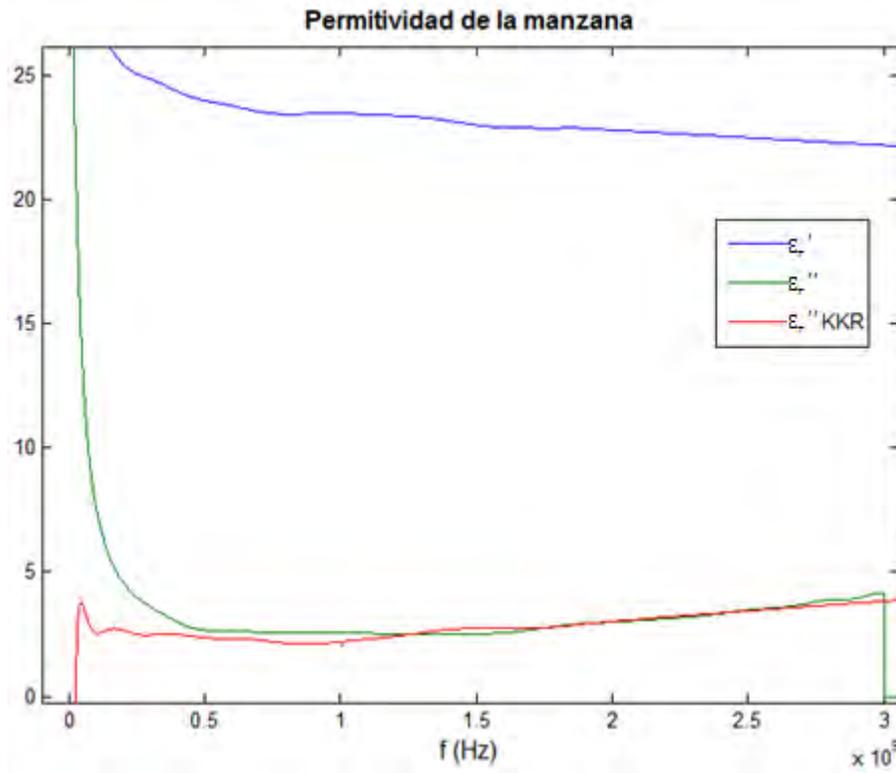


Figura 5.7. Permitividad de la manzana obtenido a partir de espectroscopia de microondas (ϵ_r' y ϵ_r'') y factor de pérdidas obtenido a partir de la relación de Kramers-Kronig (ϵ_r'' KKR).
Fuente: Elaboración propia

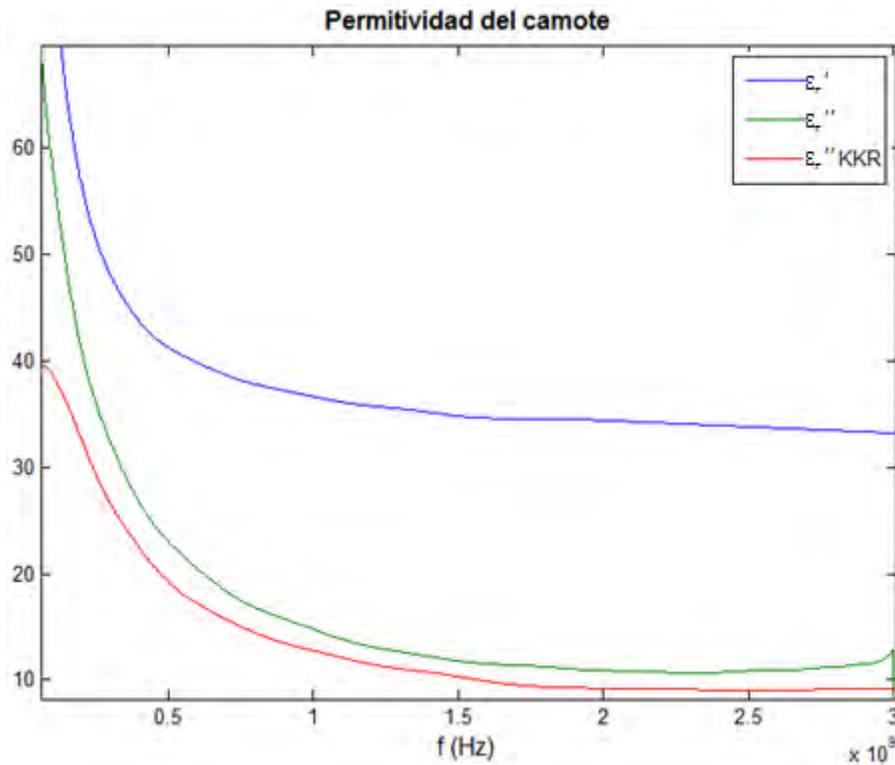


Figura 5.8. Permitividad del camote obtenido a partir de espectroscopia de microondas (ϵ_r' y ϵ_r'') y factor de pérdidas obtenido a partir de la relación de Kramers-Kronig (ϵ_r'' KKR).
Fuente: Elaboración propia

5.4.2 Resultados de las características físico-químicas

En este proyecto se realizaron cuatro mediciones diferentes a cada una de las muestras para observar sus características físico-químicas, las cuales fueron pH, cantidad de sólidos solubles (°Brix), Humedad y Color. Para el caso de la manzana sólo se obtuvieron los valores para el pH, SSC y color. El valor del pH está entre los valores de [83 – 90]; el valor de cantidad de sólidos solubles, [11.7 – 17]; y el color, [78 - 92] para la luminosidad, [-8 - -32] para a^* y [-15 - 45] para b^* . Por otro lado, en el caso del camote se sólo se obtuvieron valores para el pH, SSC y humedad cuyos valores se encuentran en el rango de [5.95 – 6.7], [3.4 – 7.9] y [48.1% – 66.61%] respectivamente.

5.5 Correlación de las propiedades dieléctricas y las propiedades físico-químicas

Antes de realizar el análisis multivariable, en este caso PLSR, se realiza la reducción del rango de frecuencia de [0.1 – 3] GHz a [0.1 – 1] GHz, basándose en las investigaciones realizadas por W. Guo [48] y debido a que la calibración del modelo capacitivo utilizando agua desionizada y solución salina es más exacta a este rango de frecuencias pues a mayores frecuencias el C_0 aumenta en función a esta [36]; después, se procede a suavizar los resultados con un filtro de segundo orden, ya que la curva de la permitividad presenta irregularidades como se aprecia en la figura 5.5 y figura 5.6. El tercer paso, es el agrupamiento de las propiedades físico-químicas de acuerdo a las frecuencias más cercanas para la reducción de procesamiento de información, ya que los valores alrededor son muy semejantes, en total se obtuvo 20 grupos. Estos resultados son guardados para modelarlos con PLSR.

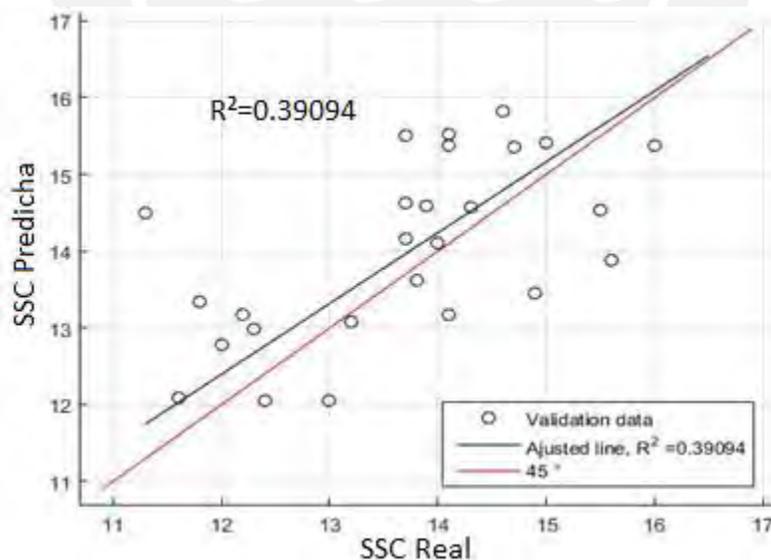


Figura 5.9. Resultado del modelo PLSR para el SSC de la manzana.
Fuente: Elaboración propia

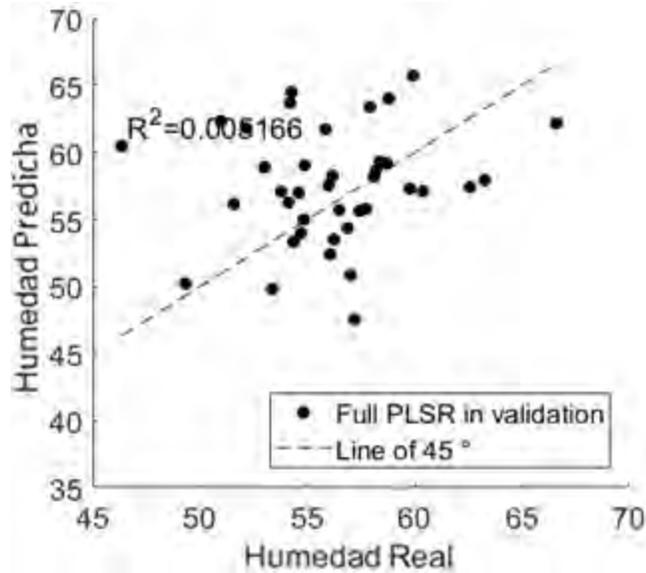


Figura 5.10. Resultado del modelo PLSR para la humedad del camote.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 5.9 y figura 5.10 se aprecia el valor del ajuste lineal para el caso de la manzana y camote respectivamente. Este valor no se acerca al valor ideal de 1, el cual significa que existe buena correlación, ni a valores mayores a 0.75 que son deseables para una buena predicción según S. Nelson [21]. Por lo que, para optimizar el modelo se reduce la cantidad de frecuencias o variables latentes, lo que incrementa el porcentaje de la variación que explica Y, el cual significa que a partir de X se puede explicar o tener valores exactos de Y, y disminuye el error cuadrático medio, RMSE por sus siglas en ingles. En la figura 5.11 y 5.12, se muestran la cantidad de variables latentes que son necesarias para obtener un Y cercano al 100% de exactitud; además, este valor debe de ser contrastado con el valor el RMSE. En este caso mientras mayor sea el RMSE es mayor la cantidad de errores para la predicción de parámetros físico-químicos por lo que se escogió el valor de 10 frecuencias más relevantes para modelar el PLSR en el caso de las manzanas y 14 frecuencias más relevantes para el caso de los camotes, con excepción de la humedad que se contó con 16 variables latentes.

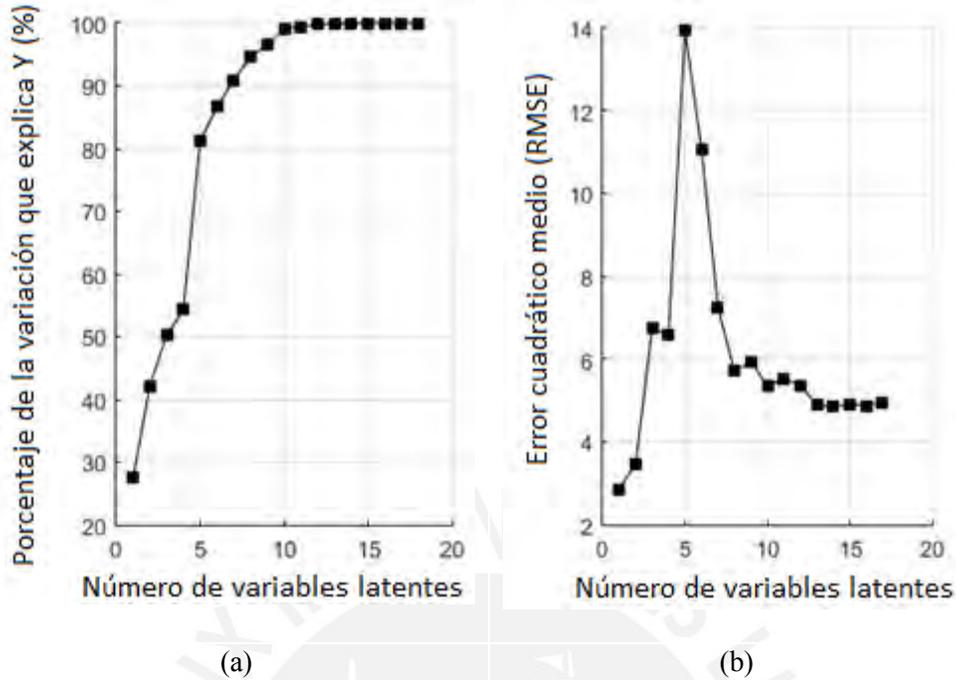


Figura 5.11. Número de variables latentes vs (a) el porcentaje de exactitud de Y y (b) RMSE para SSC en el caso de la manzana.
Fuente: Elaboración propia

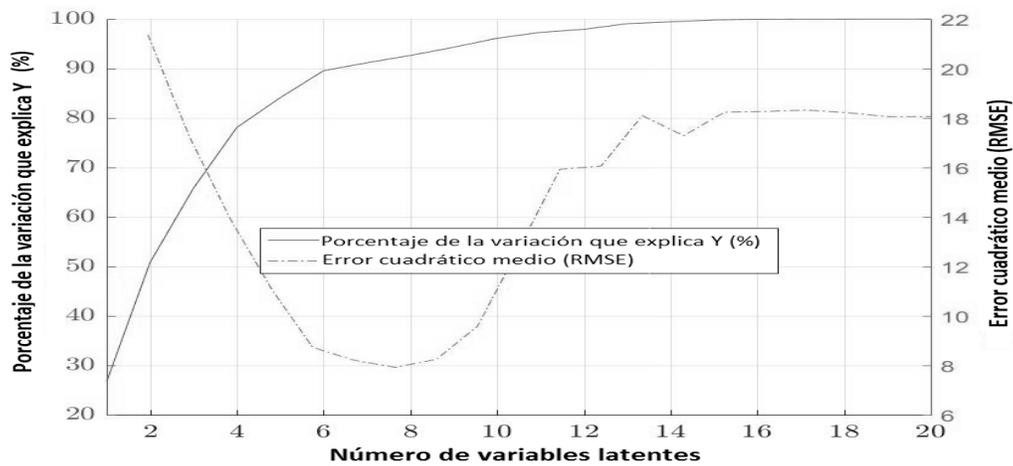


Figura 5.12. Número de variables latentes vs el porcentaje de exactitud de Y y vs RMSE para SSC en el caso del camote.
Fuente: Elaboración propia

Las variables más relevantes fueron identificadas y se pueden observar en la figura 5.13 y figura 5.14. El método basado en los coeficientes- β es explicado en el trabajo D. Liu [39]. Para el caso de SSC y L^* de las manzanas las frecuencias relevantes se encuentran alrededor de 0.15 GHz y

0.55 GHz, mientras que para el camote, para el caso de humedad, las frecuencias más relevantes se encuentran alrededor de 0.5 GHz.

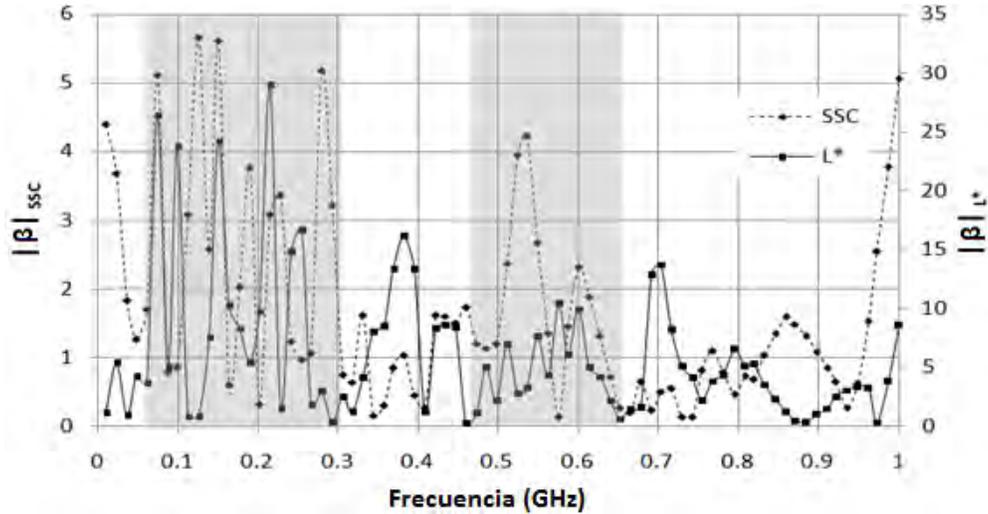


Figura 5.13. Coeficientes- $|\beta|$ para el SSC y el L^* para el modelo PLSR para la manzana
Fuente: Elaboración propia

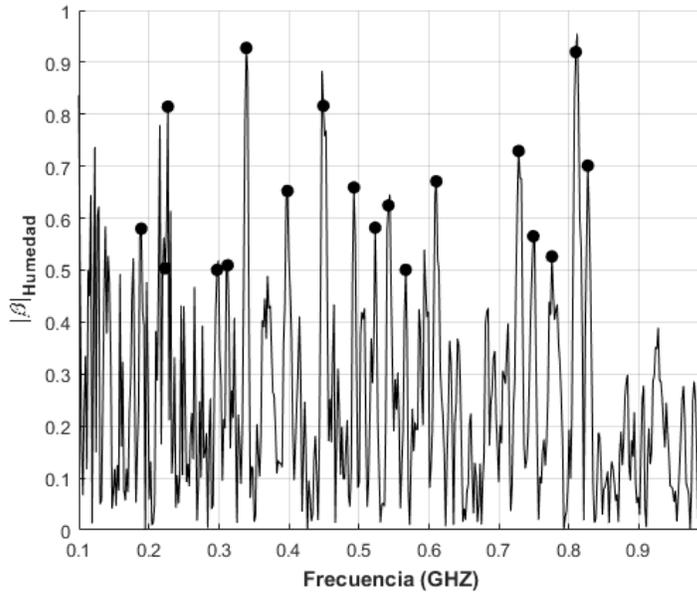


Figura 5.14. Coeficientes- $|\beta|$ para el pH para el modelo humedad para el camote.
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al usar las variables latentes encontradas con los coeficientes- β se obtiene los valores de la tabla 5.1 y 5.2 para el caso de la manzana y camote respectivamente. En la figura 5.15 se muestra la gráfica del ajuste lineal del parámetro SSC para el caso de la manzana y en la figura 5.16 se observa el ajuste lineal de la humedad del camote.

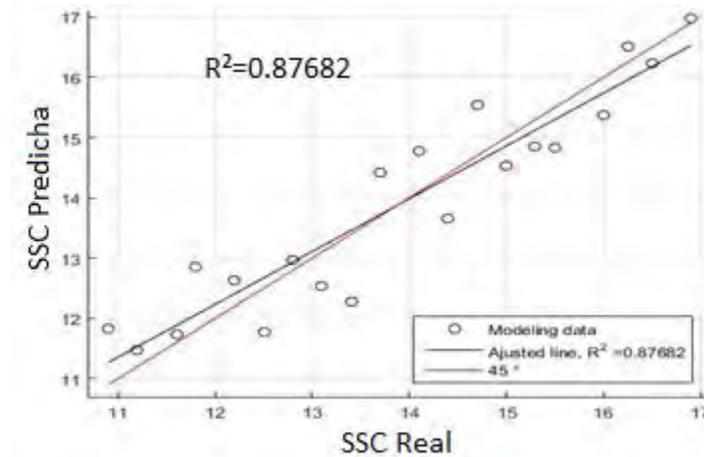


Figura 5.15. Resultado del modelo PLSR optimizado para el parámetro SSC de la manzana.
Fuente: Elaboración propia

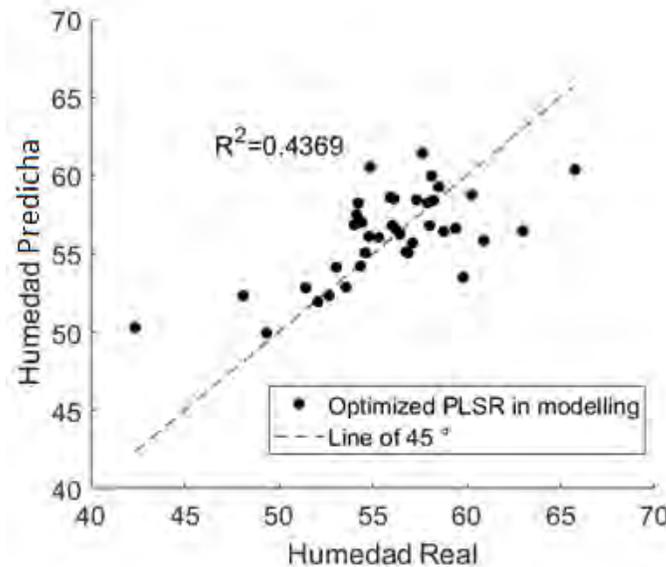


Figura 5.16. Resultado del modelo PLSR optimizado para el parámetro de humedad del camote.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1. Resultados del modelo PLSR optimizado para la manzana

Modelo PLSR	SSC	pH	L*	a*	b*
Modelo Optimizado	0.8768	0.8402	0.8266	0.8362	0.8434

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.2. Resultados del modelo PLSR optimizado para el camote

Modelo PLSR	SSC	pH	Humedad
Modelo Optimizado	0.3616	0.4135	0.4369

Fuente: Elaboración propia

5.6 Evaluación de presupuesto del sistema de medición de permitividad

El desarrollo de este proyecto requirió diversos instrumentos y de una mano de obra especializada. Enfocándose especialmente en los instrumentos necesarios para la medición de la permitividad, se hizo uso de los elementos mencionados en la tabla 5.3. Entre ellos se encuentran: el VNA, en este caso de un solo puerto, conocido como reflectómetro, que sirve para la medición del parámetro S11 y que posee un tamaño compacto; el Kit de calibración SMA para el VNA; el cable de 50 Ω , ya que la salida del VNA posee una impedancia de 50 Ω ; el adaptador de conector tipo N a conector SMA, puesto que el VNA posee un terminal tipo N; una computadora portátil para la visualización de la medición y almacenamiento del parámetro S11; el agua desionizada y el NaCl (solución salina) para la calibración del modelo capacitivo; el conector SMA para la adaptación de la sonda coaxial de terminal abierto y la mano de obra del ingeniero a cargo que se mide a partir de las horas netas trabajadas durante el tiempo de investigación y desarrollo de este proyecto. La inversión total incluyendo IGV sería de 26,380.00 soles.

Tabla 5.3. Tabla del presupuesto para la implementación del sistema de medición de la permitividad.

Producto	Costo unitario	Cantidad	Costo
1-port VNA (Reflectometro)	S/. 11,628.00	1	S/. 11,628.00
Kit de calibración	S/. 2,203.00	1	S/. 2,203.00
Cable de 50 Ω	S/. 1,917.00	1	S/. 1,917.00
Conector SMA	S/. 10.00	1	S/. 10.00
Adaptador de conector Tipo N a conector SMA	S/. 475.00	1	S/. 475.00
NaCl (154 gr.)	S/. 100.00	1	S/. 100.00
Agua desionizada (1 Galón)	S/. 7.00	1	S/. 7.00
Computadora portátil	S/. 3,000.00	1	S/. 3,000.00
Labor del ingeniero por hora	S/. 22.00	320	S/. 7,040.00
Total			S/. 26,380.00

Fuente: Elaboración propia

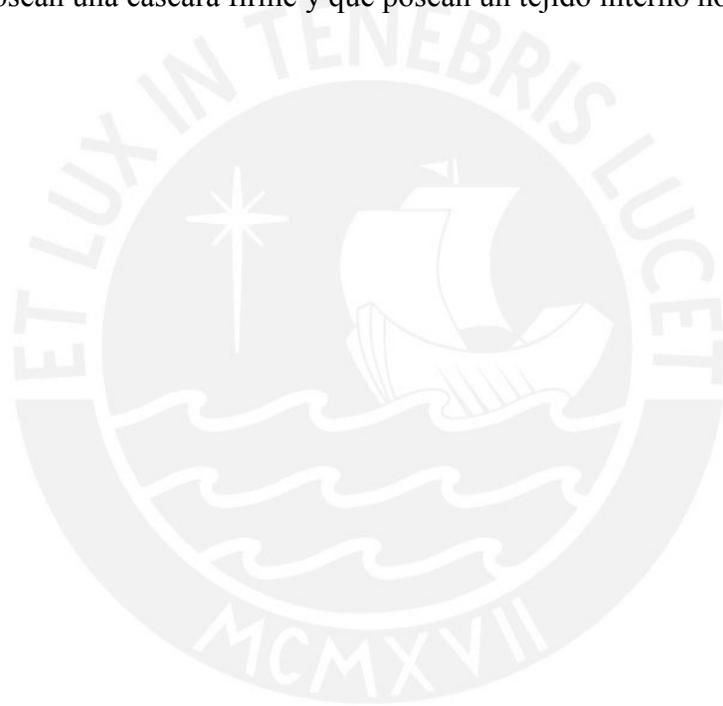
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La adaptación del conector SMA macho, como una sonda coaxial de terminal abierto, puede ser usada para obtener los valores de permitividad de frutas y vegetales en el rango de frecuencias de [10 MHz – 2 GHz]. Específicamente, en este trabajo se ha obtenido que los valores de la constante dieléctrica relativa de la manzana es de 24 y para el camote 35 en promedio en el rango de frecuencias de 500 MHz a 3 GHz, mientras que el factor de pérdidas tiende a 4 para el caso de la manzana y 11 para el caso del camote.
- Los resultados han demostrado que existe una alta correlación, alrededor de 0.84 siendo el máximo uno, entre las propiedades dieléctricas y las propiedades fisicoquímicas de la manzana del tipo *Red Delicious*. Sin embargo, los valores de correlación obtenidos del camote son menores a 0.5 por lo que las propiedades fisico-químicas no se podrían predecir a partir de las propiedades dieléctricas.
- La predicción de los parámetros de calidad usando espectroscopia de microondas es una opción viable si se considera las frecuencias alrededor de 0.15 GHz y 0.55 GHz para el caso de la manzana. Por otra lado, los valores obtenidos de la correlación del camote no son aceptables por poseer un valor menor a 0.5; sin embargo, las variables latentes se encuentran alrededor de 0.5 MHz para el caso de humedad; y 0.2 GHz para el caso de SSC y pH.
- El modelo capacitivo para la obtención de la permitividad no es válida para frecuencias mayores de 2 GHz según la validación considerando la relación Kramers-Kornig.

Recomendaciones

- Durante las mediciones de la permitividad de los alimentos se debería mantener fijo el cable coaxial que conecta la sonda al VNA para que se reduzcan las variaciones de fase.
- En el proceso de medición, la sonda coaxial de terminal abierto debe tener un contacto superficial completo con el alimento para evitar la medición de burbujas de aire.
- Para el propósito de usar la técnica descrita en esta tesis, se recomienda usar frutas y vegetales que posean una cascara firme y que posean un tejido interno homogéneo.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] LA INFORMACION, «Lainformacion,» ECONOMÍA, NEGOCIOS Y FINANZAS - ECONOMÍA (GENERAL), 23 Julio 2014. [En línea]. Disponible: http://www.lainformacion.com/economia-negocios-y-finanzas/alimentos/industria-alimentaria-afrenta-retos-en-un-mundo-de-excesos-y-escasez-comida_OOa7EV7BuAwfEkrHhQ3BE1/. [Último acceso: 25 Mayo 2018].
- [2] EL COMERCIO, «EL COMERCIO,» GASTRONOMÍA, 28 Agosto 2012. [En línea]. Disponible: <http://archivo.elcomercio.pe/gastronomia/peruana/japon-frutas-son-consideradas-verdaderas-joyas-noticia-1461930>. [Último acceso: 25 Mayo 2018].
- [3] D. d. P. B. y. Comercio, «ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN,» 2004. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/3/a-y4632s/y4632s00.htm#Contents>. [Último acceso: 24 Mayo 2018].
- [4] W. Koo, Importaciones productos agropecuarios Perú 2017, 24 Abril 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.agrodataperu.com/2017/04/importaciones-productos-agropecuarios-peru-2017-marzo.html>. [Último acceso: 24 Mayo 2018].
- [5] W. Koo, Manzanas frescas Perú importación 2017, 23 Abril 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.agrodataperu.com/2017/04/manzanas-frescas-peru-importacion-2017.html>. [Último acceso: 26 Mayo 2018].
- [6] W. Koo, Camote Perú Exportación 2017 Octubre, 20 Noviembre 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.agrodataperu.com/2017/11/camote-peru-exportacion-2017->

- octubre.html. [Último acceso: 1 Noviembre 2018].
- [7] Perú21, «El camote atrapa doce mercados», 18 Mayo 2013. [En línea]. Disponible: <https://peru21.pe/emprendedores/camote-atrapa-doce-mercados-107022>. [Último acceso: 01 Setiembre 2018].
- [8] Naciones Unidas, «Población», [En línea]. Disponible: <http://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [9] Organización Mundial de la Salud, «Envejecimiento y ciclo de vida,» [En línea]. Disponible: <http://www.who.int/ageing/about/facts/es/>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [10] SAGARPA, «Retos y oportunidades del sistema agroalimentario de México en los próximos 20 años,» Octubre 2010.
- [11] NACIONES UNIDAS, “World Population 2015”, December 2015. [En línea]. Disponible: https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/World_Population_2015_Wallchart.pdf. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [12] NACIONES UNIDAS, “Obesidad y sobrepeso”, Junio 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/es/>. [Último acceso: 10 Junio 2018].
- [13] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2014). *World*. Obtenido de http://faostat.fao.org/static/syb/syb_5000.pdf [Último acceso: 10 Junio 2018].

- [14] M. Castro-Giráldez, «Estudio de los espectros dieléctricos para el control de calidad de alimentos. (Tesis de doctorado),» Universidad Politécnica de Valencia., Valencia. España, 2010.
- [15] E. Bardales, «Gestión,» 13 Mayo 2015. [En línea]. Disponible: <http://gestion.pe/economia/utec-diversificacion-productiva-industria-alimentaria-peru-demorara-hasta-cinco-anos-2131672>. [Último acceso: 26 Mayo 2018].
- [16] D. B. A. W. S. C. J. y. S. M. d. C. Carlos A. da Silva, «ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA,» 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/3/a-i3125s.pdf>. [Último acceso: 25 Mayo 2018].
- [17] J. T. Alander, V. Bochko, B. Martinkauppi, S. Saranwong, and T. Mantere, "A Review of Optical Nondestructive Visual and Near-Infrared Methods for Food Quality and Safety," *International Journal of Spectroscopy*, vol. 2013, Article ID 341402, 36 pages, 2013.
- [18] S. O. Nelson, W. Guo and S. Trabelsi, "Investigation of dielectric sensing for fruit quality determination," 2008 IEEE Sensors Applications Symposium, Atlanta, GA, 2008, pp. 54-56.
- [19] C. Kumaravelu and A. Gopal, "A review on the applications of Near-Infrared spectrometer and Chemometrics for the agro-food processing industries," 2015 IEEE Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), Chennai, 2015, pp. 8-12.
- [20] Xiaolei Jiang, Li Zhang, Ran Zhang and Xiaohua Zhu, "Nondestructive soluble solids content estimation with quantitative x-ray radiography using the grating

- interferometry," *2014 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, Seattle, WA, 2014, pp. 1-4.
- [21] S. O. Nelson, W. Guo and S. Trabelsi, "Study of Fruit Permittivity Measurements for Quality Detection," *2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Victoria, BC, 2008, pp. 1009-1011.
- [22] S. O. Nelson, S. Trabelsi and S. J. Kays, "Dielectric Spectroscopy of Honeydew Melons for Quality Sensing," *2006 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Sorrento, 2006, pp. 180-182.
- [23] S. O. Nelson, "Dielectric Spectroscopy of Fresh Fruits and Vegetables," *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Ottawa, Ont., 2005, pp. 360-364.
- [24] S. Trabelsi, "Investigating effects of aging on radiofrequency dielectric properties of chicken meat," *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Minneapolis, MN, 2013, pp. 1685-1688.
- [25] R. Suárez, "Propiedades Físicas y Químicas de la Materia", 2 Julio 2014. Disponible: <https://es.slideshare.net/RoxanaSurezCampos/propiedades-fsicas-y-qumicas-de-la-materia>. [Último acceso: 23 Julio 2018].
- [26] Mindomo, "Propiedades Físicas Químicas de los alimentos". Disponible: <https://www.mindomo.com/es/mindmap/propiedades-fisico-quimicas-de-los-alimentos-d98085014e3741ee875ec412f2131bde>. [Último acceso: 23 Julio 2018].

- [27] Facultad de Química, UNAM, “Fundamentos y técnicas de análisis de alimentos”, 2007.
[En línea]. Disponible
http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/FUNDAMENTOSYTECNICASDEANALISISDEALIMENTOS_12286.pdf. [Último acceso: 21 Julio 2018].
- [28] Universidad Central de Venezuela - Facultad de Ciencias, «Determinación de acidez total titulable, acidez volátil, acidez fija y pH. Preparación de soluciones amortiguadoras.» [En línea]. Disponible:
<http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/sites/mmedina/archivos/Practica10%20acidez%20titulable.pdf>. [Último acceso: 23 Julio 2018].
- [29] Grupo Cooperativo Cajamar, “Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria”, Mayo 2014. [En línea]. Disponible:
<http://www.fundacioncajamar.es/pdf/bd/comun/transferencia/003-calidad-externa-1401191044.pdf>. [Último acceso: 2 Octubre 2018].
- [30] Universidad de la Rioja . (s.f.). Color de vino.
Obtenido de: http://www.unirioja.es/cu/fede/color_de_vino/capitulo04.pdf
- [31] Grupo Cooperativo Cajamar, “Parámetros de Calidad Interna de Hortalizas y Frutas en la Industria Agroalimentaria”, Septiembre 2014. Disponible:
<http://www.fundacioncajamar.es/pdf/bd/comun/transferencia/005-calidad-interna-1410512030.pdf>. [Último acceso: 2 Octubre 2018].
- [32] D. El Khaled, N. Novas, J. A. Gazquez, R. M. Garcia and F. Manzano-Agugliaro, “Fruit

and Vegetable Quality Assessment via Dielectric Sensing”, in *Sensors* pp. 15368-15372, Jun. 2015

- [33] W. H. Hayt, J. A. Buck, “*Teoría electromagnética*”, México: Mc Graw Hill, 2006, p.406.
- [34] L. F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan and V. K. Varadan, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*, West Sussex: John Wiley and Sons, 2004.
- [35] W. Skierucha and A. Wilczek. “A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10-500 MHz Frequency Range”. *Sensors* (Basel, Switzerland). 10. 3314-29, 2010
- [36] T. W. Athey, M. A. Stuchly and S. S. Stuchly, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part I," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 82-86, Jan. 1982.
- [37] M. A. Stuchly, T. W. Athey, G. M. Samaras and G. E. Taylor, "Measurement of Radio Frequency Permittivity of Biological Tissues with an Open-Ended Coaxial Line: Part II - Experimental Results," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 1, pp. 87-92, Jan. 1982.
- [38] D. Berube, F. M. Ghannouchi and P. Savard, "A comparative study of four open-ended coaxial probe models for permittivity measurements of lossy dielectric/biological materials at microwave frequencies," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 10, pp. 1928-1934, Oct 1996.

- [39] D. Liu, D. Sun, X. Zeng, “Recent Advances in Wavelength Selection Techniques for Hyperspectral Image Processing in the Food Industry”, *Food Bioprocess Technol*, Oct. 2013
- [40] C. Kittel, “Introducción a la Física del Estado Sólido”, no. 3, Ed. Sevilla: Reverté, 1997, pp. 351.
- [41] H. Fujiwara, “Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications”, Ed. Wiley & Sons, 2007, pp. 357-360.
- [42] T. Tu Guang, “Experimental limitations in the Kramers-Kronig transformation and the importance of interface effects in spectroscopic ellipsometry of MoS₂ on STO”. Tesis para el grado de bachiller, Departamento de Física, National University of Singapore, Singapur, 2016.
- [43] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Pérdida y desperdicio de alimentos [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/es/> [Último acceso: 2 Octubre 2018].
- [44] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Pérdida y desperdicio de alimentos en el mundo [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/docrep/016/i2697s/i2697s03.pdf>. [Último acceso: 2 Octubre 2018].
- [45] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Objetivo: acabar con las pérdidas y desperdicios de alimentos en la cadena de producción [En línea]. Disponible: <http://www.fao.org/in-action/seeking-end-to-loss-and-waste-of-food-along->

production-chain/es/ [Último acceso: 2 Octubre 2018].

- [46] A. Barba and M. d'Amore. Relevance of Dielectric Properties in Microwave Assisted Processes, 2012, Microwave Materials Characterization, Prof. Sandra Costanzo (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/51098. Disponible de: <https://www.intechopen.com/books/microwave-materials-characterization/relevance-of-dielectric-properties-in-microwave-assisted-processes>. [Último acceso: 2 Octubre 2018].
- [47] S. Asif, B. Braaten and A. Iftikhar, "Effectiveness of a dielectric probe calibration using deionized, distilled and tap water," *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 893-894.
- [48] W. Guo, X. Zhu, R. Yue, H. Liu, & Y. Lui. "Dielectric properties of funji apples from 10 to 4500 MHz during storage". *Journal of Food Processing and Preservation*, pp.884 – 890, 2011.