

**CARACTERIZACIÓN DE TEJIDO VEGETAL DE FRUTOS DE PLÁTANO  
MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA Y ANÁLISIS  
BROMATOLÓGICO**

**JOSÉ JESÚS ALZATE LOAIZA**

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES  
ARMENIA, 2014**

**CARACTERIZACIÓN DE TEJIDO VEGETAL DE FRUTOS DE PLÁTANO  
MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA Y ANÁLISIS  
BROMATOLÓGICO**

**JOSÉ JESÚS ALZATE LOAIZA**

**Director PhD. HERNANDO CORREA GALLEGO**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Magíster en Ciencias de los Materiales**

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES  
ARMENIA, 2014**

**UNIVERSIDAD DEL QUINDÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS Y TECNOLÓGICAS  
INSTITUTO INTERDISCIPLINARIO DE LAS CIENCIAS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN  
PROYECTO TRABAJO DE INVESTIGACIÓN  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

**Estudiante:** JOSÉ JESÚS ALZATE LOAIZA

**Título del Proyecto:** CARACTERIZACIÓN DE TEJIDO VEGETAL DE FRUTOS DE PLÁTANO MEDIANTE LAS TÉCNICAS DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA Y ANÁLISIS BROMATOLÓGICO

**Fecha y Hora:**

**Director:** PhD. Hernando Correa

**Jurados:**

**RESULTADO DE LA EVALUACIÓN**

**APROBADA**                       **MERITORIA**                       **LAUREADA**

Si la nota es Meritoria o Laureada, el jurado deberá sustentarla en hoja separada con la firma de todos ellos y anexarla al acta.

**REPROBADA**    El estudiante debe matricularse nuevamente en esta actividad

**PENDIENTE**    El estudiante debe acoger las recomendaciones del jurado y presentar nuevamente el documento ante el Director de la Tesis ( )  
Requiere ( ) No requiere nueva sustentación.

El plazo para nueva sustentación y/o para presentación del documento final es de \_\_\_\_\_

Armenia Quindío, Marzo de 2014

\_\_\_\_\_  
DIRECTOR PROGRAMA DE MAESTRÍA  
EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES

\_\_\_\_\_  
DIRECTOR TESIS

\_\_\_\_\_  
JURADO

\_\_\_\_\_  
JURADO

\_\_\_\_\_  
JURADO

# *DEDICATORIAS*

*A mis padres José y Fabiola*

*Por su gran Visión y legado de vida.*

*A mi Esposa Alba Lucia*

*Por su amor incondicional e invaluable apoyo.*

*A mis preciosas hijas Nate y Vivi*

*Por ser nuestro amor y proyección de vida.*

*A mi preciosa Nieta Luciana*

*Por ser nuestra alegría y referente de cada día.*

# *AGRADECIMIENTOS*

Al Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, por el apoyo brindado durante mis estudios de maestría.

A mi **familia** por la solidaridad en este proceso de formación.

A mi director de tesis el **PhD. Hernando Correa Gallego**, por su gran don de maestro, por todo su tiempo, apoyo y colaboración dedicados en estos años de estudio.

Al **PhD. Hernando Ariza Calderón**, por su invaluable colaboración durante la realización de mis estudios de Maestría.

A Lorena Arteaga por su paciencia y aportes durante mis estudios de maestría.

A todos mis compañeros del laboratorio, por acogerme en un ambiente familiar y por apoyarme siempre.

Al **Dr. José Castillo** por su ayuda desinteresada para la realización de este trabajo y por el apoyo y la asesoría que me brindó.

A la Vicerrectoría de investigaciones por su aporte, para desarrollar el presente trabajo.

## RESUMEN

El departamento del Quindío, anualmente aporta más de 300.000 toneladas de plátano a la producción nacional, constituyéndose en el 15% de la actividad económica local. En este trabajo se estudió el proceso de maduración de frutos de plátano y su incidencia sobre la movilidad de las especies iónicas presentes en el medio celular. Para ello se tomaron muestras, las cuales fueron cosechadas y situadas para realizar medidas de impedancia eléctrica a temperatura ambiente y atmósfera de aire, como función del tiempo de maduración. Se realizaron medidas de impedancia sobre las muestras a intervalos de tiempo de un día, tiempo que consideramos suficiente para minimizar el esfuerzo mecánico debido a efectos electroquímicos por la introducción de los electrodos en ellas. En las muestras se efectuó análisis bromatológico, colorimetría, respiración y se dispusieron muestras en cámaras de desecado para evidenciar el proceso de maduración como función del tiempo, en atmósfera rica en CO<sub>2</sub>. Con base en los análisis de la conductividad, se evidencia que durante el proceso de maduración del plátano se producen sustancias iónicas cuya concentración aumenta con el tiempo; diagramas de Nyquist contruidos a partir de mediciones de impedancia detallan que la resistencia eléctrica cambia como función del tiempo al cambiar la concentración de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), gas carbónico y de los sólidos solubles (°Brix). Se evidencia que los restringidos niveles de oxígeno en la cámara, debido al proceso natural de respiración que enrarece la atmósfera con CO<sub>2</sub>, inhiben la producción de etileno, retardando la maduración hasta en cuatro semanas. Los datos experimentales manifiestan que el tiempo de maduración es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, se infiere que los resultados podrían utilizarse para desarrollar una técnica que permita evaluar el estado de madurez midiendo la resistencia eléctrica.

## ABSTRACT

The department of Quindío annually provides more than 300,000 tons of bananas in domestic production, constituting 15% of the local economy. In this work, the effect of ionic mobility on the ripening process in fruit and banana has been studied. For this study, were necessary to take samples which were harvested and prepared for taking electrical impedance measurements at room temperature and air atmosphere as a function of time. Impedance measurements were done over samples at time intervals of a day, enough time to minimize stress due to the presence of the electrodes. Compositional and colorimetric analysis was made in the samples and breath samples were placed in a drying chamber in air atmosphere to show the process of maturation at the time to rich CO<sub>2</sub> in the atmosphere. Experimental evidence shows that during the banana ripening process occurring ionic substances whose concentration varies with time; Nyquist Diagrams were constructed from impedance measurements, it shows that the electrical resistance changes systematically with time due to the ethylene concentration (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), carbon dioxide and soluble solids (degrees Brix) change, thus it is the evidence restricted oxygen levels in the chamber, caused by the natural process of breathing that rarefied atmosphere with CO<sub>2</sub>, inhibiting ethylene production and delaying maturation up to four weeks. Experimental data shows that the aging time is inversely proportional to the electrical resistance. This provides a technique for evaluating the state of bananas' maturity by measuring the electrical resistance.

## ÍNDICE GENERAL

	pág.
Dedicatorias	4
Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
1. Introducción	14
1.1 Ecología del cultivo	17
1.2 El suelo	18
1.3 Cosecha y poscosecha del plátano	19
1.4 Fisiología poscosecha y factores precosecha que afectan la calidad	20
1.4.1 La respiración	20
1.4.2 La transpiración	20
1.4.3 Técnicas de medición	23
2. Objetivos	24
2.1 Objetivo general	25
2.2 Objetivos particulares	25
3. Aspectos teóricos	27
3.1 Características físicas de los Bio-materiales	28
3.2 Espectroscopia por impedancia eléctrica	30
3.2.1 La impedancia Eléctrica	31
3.2.2 Medida de la impedancia	33
3.3 Conceptos básicos de Bio – impedancia	36
3.4. Propiedades dieléctricas de las células	37
3.4.1 Pared celular	38
3.4.2 El citoplasma	38
3.4.3 La membrana plasmática	39



3.5	Poscosecha de frutos de plátano	45
3.6		
4.	Metodología	50
4.1	Obtención de las muestras	51
4.2	Fabricación de electrodos	52
4.2.1	Medidas de impedancia	53
4.3	Toma de medidas	55
5.	Resultados	57
5.1	Resultados de las pruebas piloto	58
5.2	Resultados de las pruebas piloto con electrodos de acero	61
5.3	Resultados de las medidas con electrodos de oro	64
5.4	Resultados de mediciones en atmósfera controlada	69
5.5	Resultados de los análisis físico-químicos. Índice de respiración	71
5.6	Resultados de los análisis físico-químicos	73
6.	Conclusiones	79
7.	Publicaciones y participación en eventos	81
8.	Referencias y bibliografía	83
9.	Anexos	90

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Condiciones ecológicas favorables para el desarrollo de las variedades más cultivadas	19
Tabla 2. Valor nutricional del plátano fresco por 100 gramos de sustancia comestible	48
Tabla 3. Contenido por kg en comercio (32% de desecho)	49
Tabla 4. Datos obtenidos de los ajustes a circuitos equivalentes	67
Tabla 5. Índice de respiración para plátano en estado 2 (verde) y 5 (maduro)	71
Tabla 6. Resultados de las mediciones de pH, actividad acuosa $a_w$ , Concentración de sólidos solubles, en muestras de plátano en atmósfera controlada	73

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Cultivo del plátano	16
Figura 2. Clasificación de los frutos de plátano	17
Figura 3. Esquema que ilustra la medida de impedancia	34
Figura 4. Evolución temporal de las señales de tensión y corriente	34
Figura 5. Diagrama de Nyquist	35
Figura 6. Diagramas de Bode representando el módulo y la fase de un espectro de Impedancias	36
Figura 7. Diagrama de la célula y su circuito equivalente	37
Figura 8. La membrana plasmática	38
Figura 9. Estructura de la membrana plasmática	40
Figura 10. Transporte activo y pasivo en las células	41
Figura 11. Vista al microscopio de la membrana celular separando ambos Medios	41
Figura 12. Maduración fisiológica del plátano	47
Figura 13. Aspectos climáticos del sector de recolección de las Muestras	51
Figura 14. Electrodo plano paralelo en acero	52
Figura 15. Electrodo plano paralelo en oro	53
Figura 16. Muestras en cámara de desecado	54
Figura 17. Muestras en Atmósfera rica en Oxígeno	55
Figura 18. Muestras en cámaras de desecado en atmósfera controlada	56
Figura 19. Equipo de medida HIOKY 3532-50	58
Figura 20. Electrodo de acero	62
Figura 21. Muestras plátano verde en cámara de desecado	69
Figura 22. Muestras en cámara de desecado en atmósfera rica en oxígeno	70

## LISTA DE GRAFICAS

	pág.
Gráfica 1. Gráfica de la permitividad y de la conductividad de tejidos biológicos en función de la frecuencia	44
Gráfica 2. Gráfica donde se muestran medidas preliminares con electrodos cilíndricos de plata	59
Gráfica 3. Muestra el comportamiento de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia usando electrodos Ag	60
Gráfica 4. Muestra el comportamiento de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia usando electrodos Au	60
Gráfica 5. Medidas de impedancia en muestras diferentes usando electrodos plano-paralelos de Acero al aire libre	63
Gráfica 6. Curvas de impedancia eléctrica usando electrodos de oro	65
Gráfica 7. Curvas de impedancia y ajustes	66
Gráfica 8. Razón entre la impedancia como función de la frecuencia	67
Gráfica 9. Pérdidas dieléctricas en función del tiempo de maduración	68
Gráfica 10. Índice de respiración para plátano en O <sub>2</sub> y plátano control	72
Gráfica 11. Sólidos solubles en función del tiempo de maduración	74
Gráfica 12. Resistencia eléctrica en función del tiempo de maduración	75
Gráfica 13. Resistencia eléctrica en función de los sólidos solubles	76
Gráfica 14. Sólidos solubles en función del tiempo de maduración reporte teórico	77
Gráfica 15. Sólidos solubles en función del estado de maduración, de frutos de diferentes fincas	78

## ANEXOS

### Participación en eventos y artículos de investigación

	pág.
Anexo 1. Estudio del proceso de maduración del plátano usando la técnica de impedancia eléctrica	91
Anexo 2. Caracterización poscosecha de frutos de plátano mediante la técnica de impedancia eléctrica y análisis bromatológico	92
Anexo 3. Certificado XXV Congreso Nacional de Física	93
Anexo 4. Constancia II Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Alimentos	94
Anexo 5. Estudio del proceso de maduración del plátano dominico hartón por la técnica de impedancia eléctrica	90
Anexo 6. Certificación II Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería.	97
Anexo 7. Acumulación de azúcares registrada por medida del índice de refracción durante la maduración de bananos y plátanos.	99
Anexo 8. Estudio de la maduración de plátano dominico hartón por la técnica de impedancia eléctrica	100

# *1. INTRODUCCIÓN*

El plátano es el cuarto cultivo más importante del mundo, es considerado un producto básico y de exportación, fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo. El producto que entra en el comercio internacional es el procedente de los países latinoamericanos y del Caribe, entre los cuales se encuentra Colombia. Pertenece al sector tradicional de la producción campesina y ocupa áreas poco significativas en predios familiares para consumo doméstico. Hace parte fundamental de la dieta de los colombianos [1].

La producción de plátano está localizada principalmente en la región andina e interandina (58%), seguida por la Orinoquia (15%) y el Caribe. Los principales departamentos productores son Quindío, Meta y Antioquia. La oferta de plátano es permanente a lo largo de todo el año, con marcadas variaciones estacionales en regiones como la Andina, en la cual hay incrementos entre mayo-junio y octubre-enero; en la Costa Atlántica, la oferta se concentra entre abril-septiembre y en los Llanos Orientales, entre mayo-septiembre y diciembre-febrero [2].

Actualmente un 80% de las exportaciones de plátano en Colombia son provenientes de pequeños productores y un 15% son de productores medianos; el sistema predominante de producción es el de cultivo asociado con café, yuca y frutales (85%), y en menor escala el de monocultivo tecnificado (15%), especialmente en las zonas de Urabá, Quindío y eje Cafetero. Las diferencias en los cultivos son de orden económico, en especial por el costo de los insumos y mano de obra, entre otras, las cuales se reflejan en la producción por hectárea. [3].

El plátano (*Musa acuminata*) es una hierba tropical de la familia de las musáceas; hoy la mayoría de los ejemplares plantados para obtener fruto proceden de una variedad cultivada y obtenida por hibridación de *M. acuminata* y *M. balbisiana*, pero ésta última se cultiva aún. Es una planta monocotiledónea y pertenece al

orden *Escitaminales*, a la familia *Musaceae*, subfamilia *Musoideae* y al género *Musa*. El género *Musa* contiene entre 30 y 40 especies diploides.

En la actualidad, solo dos especies tienen importancia comercial: *Musa acuminata* (plátano) y *Musa balbisiana* (banano) [4].

En Colombia, se cultivan cinco variedades de plátano: dominico, dominico-hartón, hartón, cachaco y pelipita. El plátano hartón se cultiva principalmente en los Llanos Orientales y en la Costa Atlántica y es el de mayor aceptación en los Mercados nacional e internacional. En la zona central cafetera se cultiva el dominico-hartón, que se adapta fácilmente a zonas de altitud superiores a los 1.000 msnm y se demanda en las ciudades intermedias.

Las variedades de cachaco y pelipita son cultivadas en los Llanos Orientales y se destinan principalmente al consumo local. [5]



**Figura 1.** Cultivo de plátano

En el país e incluso en el interior de cada una de las regiones productoras, la calidad del plátano producido es muy variable, por la diversidad de tecnologías y de sistemas de producción. El manejo de cosecha y poscosecha es uno de los aspectos que más incide en la calidad del plátano cuyo destino es el consumidor



final. El mal manejo en el corte, acopio inadecuado en la finca, transporte inapropiado a los centros de distribución o e inexistencia de tecnologías de manejo y conservación, se han identificado como las causas de las pérdidas en la producción, las cuales se podrían disminuir en la medida en que se cuente con tecnologías apropiadas.

CLASIFICACIÓN SEGÚN MERCADOS ESPECIALIZADOS				
	CALIDAD	PESO	LONGITUD	DIÁMETRO
		> 500 gramos	> 25 cm	> 6 cm
		400 – 499 gramos	22 – 25 cm	5 – 6 cm
		350 – 399 gramos	20 – 21.9 cm	4.5 – 5 cm
		< 350 gramos	< 20 cm	< 4.5 cm

*Figura 2. Clasificación de los frutos de plátano*

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas, ICONTEC, creó la norma técnica NTC 1190 [6], en la cual se definen los criterios para la clasificación del plátano con destino al mercado nacional y para exportación.

### 1.1 ECOLOGÍA DEL CULTIVO

- **Clima:** Las zonas tropicales son óptimas para el desarrollo del cultivo de plátano, ya que son húmedas y cálidas. Las condiciones climáticas donde se encuentran ubicadas las zonas de producción, afectan el crecimiento y desarrollo del cultivo.

- **Altitud:** La altitud influye sobre la duración del período vegetativo. Sin embargo, la altitud adecuada para la siembra de plátano está desde el nivel del mar hasta los 2000 msnm. Para las condiciones ecológicas de Colombia, el período vegetativo del plátano se prolonga 10 días por cada 100 metros de altura sobre el nivel del mar.
- **Temperatura:** La temperatura óptima para el cultivo de plátano es de 26°C. Este factor es el que más afecta la frecuencia de nacimiento de las hojas y puede alargar o acortar el ciclo vegetativo. ▫ **Precipitación:** El cultivo de plátano requiere para su normal crecimiento y buena producción de 120 a 150 mm de lluvia mensual o 1800 mm anuales, bien distribuidos. Las raíces del plátano son superficiales, por lo cual la planta se afecta con el más leve déficit de agua. No obstante, el fenómeno de inundación puede ser más grave que el mínimo déficit de agua, dado que se destruyen las raíces y se reduce el número de hojas y la actividad floral.
- **Humedad relativa:** Afecta al cultivo en forma indirecta porque favorece la aparición de enfermedades foliares en especial las de origen fungoso; el valor promedio ideal para los cultivos es de 70%.

## 1.2 EL SUELO

El suelo a través de sus características físicas tiene una gran influencia sobre el cultivo de plátano, de éste deriva el suministro oportuno y balanceado de los elementos minerales esenciales requeridos para el metabolismo, crecimiento y producción de las plantas. No obstante el plátano se adapta a una variedad amplia de suelos. Esto no significa que todos los suelos sean aptos para su desarrollo equilibrado. Para el crecimiento y desarrollo adecuado de los cultivos de plátano es necesario que el suelo tenga disponibles, en cantidades óptimas y balanceadas, ciertos elementos nutritivos como Nitrógeno, Fosforo, Azufre, Zinc

entre otros; de lo contrario se deben suministrar a partir de fuentes alternativas orgánicas y químicas. [7]

Las condiciones generales de la ecología del cultivo del plátano encontradas para las 3 variedades de plátano más comunes se muestran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Condiciones ecológicas favorables para el desarrollo de las variedades más cultivadas.

<b>Variedad</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Precipitación (mm anuales)</b>	<b>Altitud (msnm)</b>	<b>pH del suelo</b>
<b>Hartón</b>	24 – 27	1500 – 2000	0 – 800	5.5 – 6.5
<b>Dominico</b>	20 – 30	1500 – 2000	0 – 1400	5.5 – 6.5
<b>Dominico Hartón</b>	25 – 32	1500 – 2000	0 – 2200	5.5 – 6.5

### 1.3 COSECHA Y POSCOSECHA DEL PLÁTANO

La cosecha es la actividad de recolectar los racimos que han completado su madurez fisiológica. Se considera que el racimo de plátano está desarrollado totalmente entre los 70 y los 100 días después de aparecer la flor. El racimo se corta cuando todavía está verde.

El corte se inicia con la puya del seudotallo por la mitad para que la planta doble lentamente y el racimo no golpee el suelo. Posteriormente se separa el racimo del seudotallo y se transporta al lugar de acopio. En la región el sistema tradicional de venta es por racimo y el precio de venta lo definen la oferta y la demanda, la cual varía según el mercado; a su vez, los costos para la formación del precio están condicionados por la distancia entre la zona de producción y el lugar de venta, así como por la facilidad de acceso [8].

## 1.4 FISIOLÓGÍA POSCOSECHA Y FACTORES PRECOSECHA QUE AFECTAN LA CALIDAD

El plátano es un fruto que contiene un 61% de agua; luego de ser cosechado continua viviendo, es decir, internamente siguen ocurriendo fenómenos como son la respiración y la transpiración:

1.4.1 **La respiración:** La respiración es un proceso mediante el cual la fruta toma reservas (carbohidratos) con el oxígeno del aire y produce una reacción interna que libera al medio externo agua, gas carbónico y energía en forma de calor. Por lo tanto el fruto para poder vivir consume el alimento que tiene almacenado y que es el utilizado en la alimentación humana. Como consecuencia de esto el fruto pierde peso y por lo tanto pierde también su valor comercial. En el plátano la respiración se incrementa a medida que se va dando la maduración; por lo tanto este es un fruto climatérico. Los frutos climatéricos liberan etileno el cual es el responsable de que se produzca la maduración de otros plátanos rápidamente.

1.4.2 **La transpiración:** Este fenómeno se produce simultáneamente con la respiración. La transpiración consiste en que el fruto por los poros de la cascara pierde agua y por lo tanto también pierde peso. Existen varios factores que afectan la respiración y la transpiración de la fruta; por ejemplo, las altas temperaturas hacen que éste proceso se acelere causando que el fruto pierda peso rápidamente. También los golpes o magulladuras hacen que la fruta respire más perdiendo una mayor cantidad de peso [9].

En Colombia los sistemas de administración de posproducción de los diferentes frutos climatéricos han venido cobrando relevancia dada la vocación agroindustrial del país, esta necesidad es más sentida en el departamento del Quindío, dado que anualmente aporta un altísimo porcentaje en toneladas de plátano a la producción nacional, constituyéndose en el 15% de la actividad económica local. En particular

el gremio del plátano del departamento y del país, requieren de trabajos de investigación que les permita estandarizar el proceso de manejo y maduración de sus frutos, que los haga más competitivos y puedan enfrentar los retos de nuevos tratados comerciales que los obliga a innovar para que estén presentes con excelentes cosechas para el usuario final.

En las últimas décadas el cultivo de plátano en el eje cafetero ha tenido un gran auge y por ende ha venido convirtiéndose en un importante renglón en la economía local. En el Departamento del Quindío, las extensiones de las plantaciones de este perecedero ascienden a 24.618 hectáreas [9] que generan 221.914 toneladas de plátano según la secretaria de agricultura y en el país la producción asciende a 2.846.308 toneladas según reportes de la asociación de plataneros de Colombia y del Ministerio de agricultura. De las variedades de este producto la que más se ha intensificado en la región es la variedad dominico hartón, híbrido que presenta un fruto de mayor tamaño y de mejor aceptación entre los consumidores y para los finqueros de mayor rendimiento por área cultivada.

El cultivo de plátano ha sido objeto de múltiples estudios no solo a nivel regional sino nacional e internacional, la comunidad científica ha dedicado ingentes esfuerzos para determinar qué tipo de plagas lo afectan y se ha detallado en gran medida su manejo fitosanitario y de poscosecha. Con respecto al fruto y sus múltiples usos se pueden encontrar suficientes referencias [10] [11] [12], en las que cobra especial atención el tiempo de comercialización, debido a que después de cosechado su vida útil corta. Es por esta razón que durante el desarrollo de este trabajo, se ha emprendido la búsqueda de un método que permita obtener información sobre el tiempo de maduración, utilizando técnicas convencionales de medición de propiedades eléctricas, como por ejemplo la medición de la resistencia eléctrica, como función del tiempo de manejo poscosecha. En síntesis, se hicieron mediciones de impedancia, análisis eléctrico y fisicoquímico, los cuales

han involucrado el estudio del fruto y en menor medida del raquis o vástago del plátano.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas (ICONTEC) diseñó la norma técnica colombiana NTC 1190, en la cual se definen los aspectos requeridos para la clasificación del plátano destinado al mercado nacional y para exportación. Para mejorar estos procesos es importante fomentar e implementar buenas prácticas agrícolas integradas a la tecnología y en especial la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica, que permita determinar las variaciones en la resistencia eléctrica y poder monitorear la maduración de los frutos, así, esta integración permitirá tecnificar y ante todo proporcionar un mejor producto final.

La implementación de nuevas tecnologías en el sector agropecuario además del uso de unas buenas prácticas agrícolas en la región, no solo benefician a la región sino también al mismo campesino, permitiéndole mejorar la calidad de sus cultivos, ajustarse de una manera más óptima y apropiada a las nuevas tendencias o estándares requeridos tanto para exportación como para consumo interno.

Gran parte del sector agroindustrial utiliza las tecnologías de información y más aún las aplica a la tecnificación de los cultivos propios de la región, lo que permite una contribución al desarrollo sistemático por medio de nuevas prácticas tecnológicas pensadas y adaptadas a la medida de las necesidades. Por esta razón lo que se pretende con este trabajo es el estudio del comportamiento de la resistencia eléctrica del raquis y de los frutos del plátano y complementarlo con herramientas de análisis fisicoquímico de alimentos (análisis bromatológicos), que permitan la recolección y procesamiento de datos de las plantaciones y por medio de sistemas de información, hacer posible que los agricultores controlen el proceso de maduración de sus productos manera eficiente.

**1.4.3 Técnicas de medición:** En la actualidad no se conocen trabajos en los cuales se haya utilizado la técnica de impedancia eléctrica para el estudio del comportamiento poscosecha del plátano. En esta investigación se realizó la caracterización por impedancia eléctrica del vástago o raquis y frutos de plátano, en un rango de frecuencia entre 50 Hz y 5 MHz, utilizando un impedancímetro HIOKI 3532-50, para lo cual se utilizaron electrodos de oro, acero y plata, con el propósito de determinar el cambio en la resistencia eléctrica asociada al movimiento de las especies iónicas en este sistema biológico en función del tiempo de maduración.

De otra parte, también se efectuó un análisis bromatológico a las muestras para determinar la concentración de sólidos solubles, la movilidad acuosa, la producción de etileno y en general la degradación de los carbohidratos, en función de la respiración. Particularmente se estudió la incidencia de la concentración de etileno por día en el proceso de maduración de los frutos y su relación con la resistencia eléctrica. Los resultados de estas mediciones eléctricas y fisicoquímicas muestran que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional a la producción de sólidos solubles, la cual a su vez es directamente proporcional al tiempo de maduración. Por lo tanto se podría disponer entonces de una técnica para evaluar el estado de maduración conociendo el valor de la resistencia eléctrica de los frutos.

## *2. OBJETIVOS*



## **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar mediciones de Impedancia eléctrica en un rango de frecuencia entre 50 Hz y 5 MHz y análisis bromatológico en frutos de plátano en diferentes tiempos de maduración, con el propósito de determinar propiedades termo – físicas, e inferir posibles métodos de estandarización de procesos de manejo pos cosecha con base en los cambios de los espectros obtenidos en las mediciones hechas en este sistema biológico.

## **2.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

Diseñar y construir una celda para medir impedancia eléctrica compleja en un sistema biológico.

- Realizar medidas de impedancia eléctrica en el vástago y el fruto de plátano cosechados en fincas del Municipio de Tebaida Quindío, en función del tiempo de cosechado, y se correlacionaron las mediciones con el proceso de maduración.
- Efectuar estudios de procesos físico-químicos de alimentos tomando análisis bromatológico a las muestras, con lo cual se evidenciaron cambios en el proceso de maduración en función del tiempo de cosechado.
- Analizar las curvas de impedancia eléctrica tomados en el vástago del plátano mediante circuitos equivalentes, con el propósito de comprender la dinámica del transporte de iones y correlacionar la respuesta eléctrica con el proceso de maduración de los frutos de plátano.

- Disponer muestras de plátano en cámaras de desecado en atmósfera de aire para evidenciar la incidencia de su rarificación por CO<sub>2</sub> en el proceso propio de maduración.
- Correlacionar los resultados de las diferentes técnicas (análisis bromatológico e impedancia eléctrica) para determinar comportamientos experimentales que se puedan utilizar para controlar o evaluar el proceso de maduración.
- Divulgar los resultados participando en eventos científicos de orden nacional e internacional.

### 3. *ASPECTOS TEÓRICOS*

### 3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS BIOMATERIALES [13]

Los sistemas dieléctricos en general y entre ellos los tejidos biológicos, poseen cargas eléctricas en su interior y debido a esto presentan algún nivel de conducción. Sin embargo, cuando estos sistemas son sometidos a la acción de campos eléctricos, la distribución interna de cargas eléctricas tratará de seguir la dinámica del campo aplicado. Las cargas libres pueden migrar a lo largo de la estructura del material.

$$\sigma = \sum_{i=1}^N n_i q_i \mu_i \quad (\text{Ec. 1})$$

La conductividad eléctrica  $\sigma$  resultante queda descrita por la (Ec. 1), siendo  $n_i$  el número de portadores de carga de la especie  $i$ ,  $q_i$  la carga eléctrica,  $\mu_i$  la movilidad, donde  $\mu_i = v_i/E$ , donde  $v_i$  representa la velocidad y  $E$  el campo eléctrico aplicado.

Para realizar el estudio de las propiedades eléctricas de un material, considere que éste está constituido por un material dieléctrico formado por dipolos constituidos por dos cargas puntuales de igual magnitud y carga eléctrica de signo opuesto separado por una cierta distancia.

La principal magnitud que caracteriza un dipolo es su momento dipolar eléctrico  $\vec{p}$  el cual se define como:

$$\vec{p} = \int \rho(r_i) dV \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo  $\rho$  la densidad de carga eléctrica y  $\vec{r}$  el vector de posición dirigido en el sentido de la carga.

Una magnitud macroscópica que da una idea de la cantidad de dipolos orientados en una misma dirección dentro del dieléctrico es el vector polarización  $\vec{P}$ , el cual se define de la siguiente forma:

$$\vec{p} = \frac{d\vec{P}}{dV} \quad (\text{Ec. 3})$$

Este vector polarización es una magnitud que se determina macroscópicamente, no obstante, se deben buscar a nivel microscópico los distintos mecanismos que generan movilidad iónica como la Polarización de orientación y la Polarización inducida (Polarización iónica y electrónica), que son los responsables de la orientación de los dipolos, cuando se les aplica un campo eléctrico.

La relación existente entre el campo eléctrico macroscópico y el vector de polarización para un material lineal y homogéneo es la siguiente:

$$\vec{p} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad dieléctrica del vacío y  $\chi_e$  es la susceptibilidad eléctrica. Por otra parte, se define el vector desplazamiento eléctrico de la forma:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (\text{Ec. 5})$$

Al remplazar (Ec.3) en (Ec.4) se obtiene una relación entre el campo externo y el vector desplazamiento:

$$\vec{D} = \varepsilon_0(1 + X_e)\vec{E} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde la constante dieléctrica absoluta o permitividad dieléctrica del medio se define mediante la expresión

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + X_e) \quad (\text{Ec. 7})$$

De modo que, la relación existente entre el vector desplazamiento y el campo eléctrico vendrá dada por:

$$\vec{D} = \varepsilon\vec{E} \quad (\text{Ec. 8})$$

### 3.2 ESPECTROSCOPIA POR IMPEDANCIA ELÉCTRICA COMPLEJA

La espectroscopía por impedancia eléctrica provee información acerca de las características eléctricas de un material. La impedancia representa una medida de la oposición que encuentra la corriente alterna (AC) al atravesar un medio. Esta propiedad está dada en función de la frecuencia del potencial aplicado y es una característica de cada sistema. Al medir una propiedad física de un material bajo estudio (grado de cristalización, esfuerzo interno, composición, etc.) varía también rápida y heterogéneamente la distribución de carga eléctrica, reduciendo o aumentando la conductividad del sistema [14] En materiales biológicos, por ejemplo, las bicapas dieléctricas de las células (membrana) y sus inherentes reactancias capacitivas son caracterizadas por la distribución de sus tiempos de relajación [15]. La respuesta dieléctrica de una célula heterogénea puede variar sustancialmente dependiendo del tipo de iones presentes en ella y de las características y naturaleza de los electrodos que se usen.

En el proceso de medida de impedancia eléctrica, el impedancímetro envía un voltaje sinusoidal de amplitud constante y frecuencia variable a los electrodos. Los cambios de la frecuencia del campo eléctrico aplicado aceleran las moléculas en dirección al campo. Se asume que las propiedades del sistema electrodo-muestra son invariantes en el tiempo y el sistema está en equilibrio; es decir, no hay procesos de reactividad química en esta interface a baja frecuencia.

### 3.2.1 La impedancia Eléctrica

La impedancia se simboliza por  $Z$  y es un concepto más general que el de resistencia eléctrica porque toma en cuenta la diferencia de fase de la señal aplicada para el proceso de medida. Por ejemplo, se sabe que un voltaje que este en función de la frecuencia puede representarse como

$$V(t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde  $V_m$  es la amplitud de la señal y  $\omega$  es su frecuencia angular.

Cuando esta señal se aplica a un circuito se establece una corriente también armónica pero con un ángulo de desfase

$$I(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{Ec. 10})$$

Aquí  $\theta$  es la diferencia de fase entre el voltaje y la corriente, que es cero si el circuito es puramente resistivo. En caso contrario la impedancia total se define como:

$$Z_{total} = \frac{V_m}{I_m} \quad (\text{Ec.11})$$

Y posee un ángulo de fase  $\theta (\omega)$ .

En un circuito eléctrico puede tener resistencias y capacitancias en diversas combinaciones de arreglos en serie y paralelo. Por ejemplo, el caso más simple es cuando un circuito tiene un capacitor en serie con una resistencia, en otro caso podemos tener una resistencia en paralelo con un capacitor. Así podemos considerar un número muy grande de posibles arreglos, pero cada elemento eléctrico tiene una impedancia definida.

Para la resistencia pura el valor de impedancia, está dada por la expresión:

$$Z_R = R \quad (\text{Ec.12})$$

Y para un capacitor su impedancia, que es imaginaria negativa está dada por la

expresión:

$$Z_C = -j \frac{1}{\omega C} \quad (\text{Ec.13})$$

Siendo  $j = \sqrt{-1}$ .

Si se tiene un circuito con más de un elemento de los mencionados anteriormente, es posible hacer un análisis de él aplicando simplificación de circuitos eléctricos, donde se establece que la impedancia equivalente de elementos en serie; se obtiene como la suma de las impedancias de estos. Por lo tanto el comportamiento eléctrico entre los diversos sistemas iónicos presentes en un medio celular con todas sus interrelaciones, puede ser modelado por circuitos equivalentes, compuestos por resistencias y condensadores sencillos y de fase constante [16].



Las expresiones anteriores (Ec. 12 y Ec. 13) se componen de una parte real  $Z'$  y una parte imaginaria  $Z''$  y se constituyen una solución para obtener la impedancia total del sistema y que tiene la forma:

$$Z_{total} = R - j \frac{1}{\omega C} \quad (\text{Ec.14})$$

Que podemos escribir así:

$$Z_{total} = Z' - jZ'' \quad (\text{Ec.15})$$

### 3.2.2 Medida de la impedancia

El procedimiento experimental utilizado en espectroscopia de impedancia es el de aplicar una pequeña señal eléctrica senoidal (tensión o corriente) entre un par de electrodos y medir su respuesta (corriente o tensión) a diferentes frecuencias obteniendo como resultado un valor de impedancia (Figura 3) para cada frecuencia (espectro de impedancia).

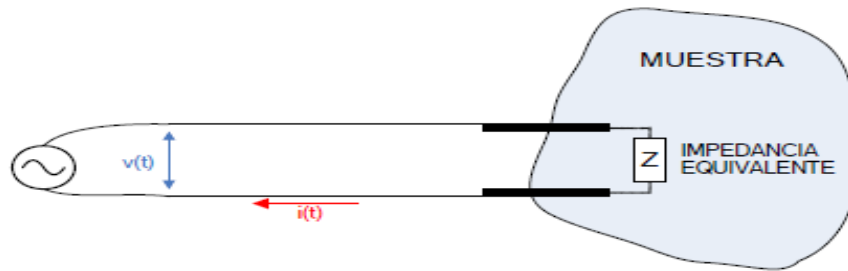


Figura 3. Esquema que ilustra la medida de impedancia [17].

La relación entre la perturbación y la respuesta (Figura 4) caracteriza la Impedancia eléctrica del material.

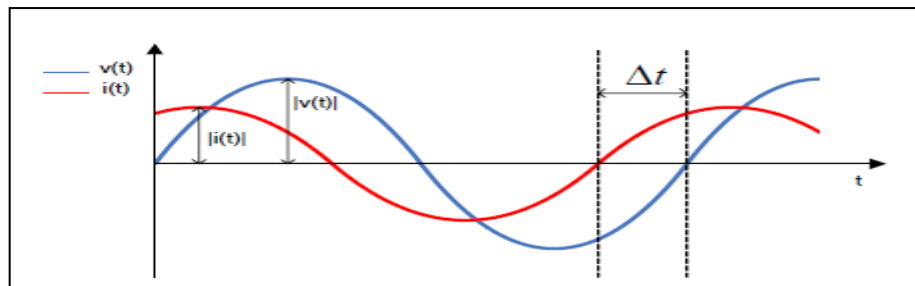


Figura 4. Evolución temporal de las señales de tensión y corriente. [17.]

Debido a las componentes capacitivas de los materiales se produce un desfase  $\phi$  entre las señales, siendo por tanto la impedancia un valor complejo (Ec. 13). La parte real de dicho valor corresponde a los componentes resistivos de las muestras mientras que la parte imaginaria está relacionada con los componentes reactivos.

$$Z = |Z|e^{j\varphi} \left\{ \left| Z \frac{|v(t)|}{|i(t)|} \right\} \text{Módulo} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde,  $\varphi = 2\pi f\Delta t$

La impedancia tiene dos formas básicas de representación [18] a saber: Mediante diagramas de Nyquist y Diagramas de Bode.

- Diagrama de Nyquist (Figura 5) donde en el eje de las abscisas se sitúan los valores de la parte real de la impedancia y en el eje de las ordenadas los valores de la parte imaginaria.

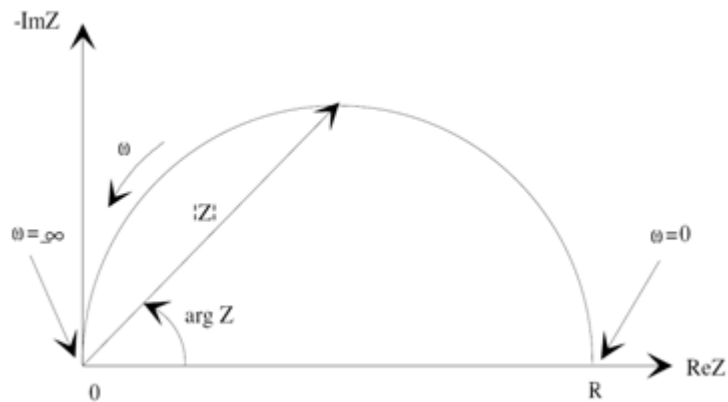


Figura 5. Diagrama de Nyquist. Representación de un espectro de impedancias. El semicírculo es característico de una constante de tiempo.

- Diagramas de Bode (Figura 6) donde se representa el módulo y la fase en función de la frecuencia.

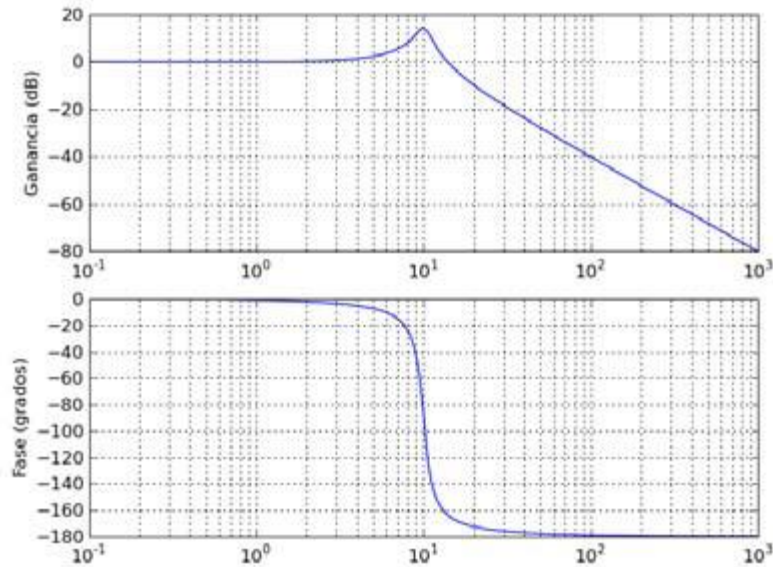


Figura 6. Diagramas de Bode representando el módulo y la fase de una medida de Impedancia.

### 3.3 CONCEPTOS BÁSICOS DE BIO IMPEDANCIA.

Un tejido biológico puede modelarse desde un punto de vista estructural, como la agrupación de una serie de elementos denominados células, que están inmersas en un medio iónico denominado medio extracelular. Así mismo, en el interior de la célula existe también una concentración de fluidos, tejidos e iones que constituyen el medio intracelular que es donde tienen lugar los procesos metabólicos del sistema biológico. La frontera entre ambos es la membrana celular, encargada del control osmótico y de difusión entre los dos medios. Las alteraciones más usuales sobre los medios intracelular y extracelular son aquellas en las que uno de los dos experimenta una variación en su concentración, ya sea debido a un aumento o disminución de la cantidad de fluido, o bien al aumento o disminución de la concentración de iones disueltos en él.

Las características eléctricas de los tejidos biológicos están determinadas por tres efectos diferentes. Por una parte, por las propiedades de las células, ya sean sus propias características eléctricas, o la integridad y normalidad de las mismas. Por otra parte, la variación de las concentraciones iónicas de los medios intracelular y extracelular. El último punto a considerar son los efectos de doble capa fosfolipídica establecidas en la membrana celular.

Se ha observado que si se aplica un campo eléctrico de alta frecuencia se produce un efecto de cortocircuito en la membrana celular, circulando dicha corriente tanto por el medio intra como por el extracelular [19]. Sin embargo, si la frecuencia de la excitación es baja, sólo atraviesa el medio extracelular. Es por tanto necesario que exista algún mecanismo de relajación, como en los materiales dieléctricos, que permita modelar este comportamiento de las regiones intra y extracelular [20].

### 3.4 ANÁLISIS BROMATOLÓGICO

La refracción de la luz en la interfase entre dos medios que tienen distintos índices de refracción [21], es definida por:

$$v_1 / v_2 = \text{sen}\theta_1 / \text{sen}\theta_2 \quad (\text{Ec. 17})$$

La ecuación anterior se escribe generalmente en términos de los índices de refracción, en lugar de las velocidades. Como  $v_1 = c/n_1$ , y  $v_2 = c/n_2$ ; siendo  $c$  la velocidad de la luz, al reemplazar se simplifica  $c$  y la ley de Snell toma la forma de:

$$n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2 \quad (\text{Ec. 18})$$

En consecuencia, el índice de refracción puede ser definido como la relación entre la velocidad de una luz monocromática en el aire y su velocidad en la sustancia considerada, y es la división entre los senos de los ángulos de incidencia y de refracción ( $\theta$ ) cuando la luz pasa del aire a la sustancia.

El ángulo entre el rayo en el primer medio y la perpendicular en la superficie divisoria, se llama ángulo de incidencia; el ángulo correspondiente en el segundo medio, se llama ángulo de refracción. La división entre los senos de estos dos ángulos, es directamente proporcional a la velocidad de la luz en los dos medios. Si el rayo incidente está en el medio más denso, ( $n$ ) será menor que uno; si está en el menos denso, ( $n$ ) será mayor que uno.

Bajo condiciones definidas de prueba, el índice de refracción es una constante característica para un medio particular, y se usa para identificar o determinar la pureza de una sustancia; también se emplea para determinar la composición de mezclas binarias de constituyentes conocidos. En industrias alimentarias que trabajan con azúcares, su uso es generalizado para determinar la cantidad de sólidos solubles.

El refractómetro es un instrumento importante y muy útil, se usa en el control y análisis de productos alimentarios comerciales y en la identificación de sustancias desconocidas; también se utiliza para distinguir sustancias con un mismo punto de ebullición, y compuestos de naturaleza similar. La medición se basa en la propiedad observada de que cuando un rayo de luz pasa de forma oblicua desde un medio a otro con diferente densidad, la dirección de la luz cambia al llegar a la superficie. Esta propiedad de refracción es el fundamento de los instrumentos de medida, denominados refractómetros. Reconocen tres tipos generales de refractómetros: Abbé, inmersión o goteo y Pulfrich. Este último utiliza luz monocromática y requiere mayor cantidad de muestra que el de Abbé, el cual requiere apenas de una gota de líquido.

Posiblemente el refractómetro más difundido y utilizado es el de Abbé, que utiliza luz blanca porque está provisto de un prisma que elimina las interferencias de color y reduce los resultados a la línea del espectro de sodio. Este refractómetro consta de un par de prismas con tubos amplificadores dobles, cuya misión es facilitar el montaje del instrumento y leer la escala del índice de refracción. Sobre el prisma inferior se extiende una fina capa de muestra y, después de cerrar, se hace pasar la luz a través de ella, mediante un espejo debidamente orientado. La luz reflejada aparece formando un campo oscuro. Antes de hacer la lectura es preciso ajustar el instrumento con el compensador de luz, ubicado en la parte frontal del aparato. Esta operación reduce al mínimo la banda con los colores del arco iris, la cual aparece sobre la línea oscura divisoria y aumenta por tanto la capacidad para hacer un ajuste más fino al poner a punto el instrumento. Seguidamente se mueven los tubos telescópicos con los tornillos ubicados en la parte lateral, hasta que la sombra negra coincida con la intersección de los filamentos indicadores, en el centro del campo de observación. Inmediatamente se hace la lectura, accionando el botón que ilumina las escalas del índice de refracción con sus correspondientes grados °Brix [21].

En general, el refractómetro mide la concentración de soluciones con mayor seguridad que cuando se utilizan hidrómetros. Los refractómetros pueden ser instalados en líneas de producción, como es el caso de leche condensada para obtener lecturas continuas del grado de concentración del producto, o sirven como instrumento de control. Las industrias de alimentos han encontrado muchos usos para los refractómetros en el análisis de productos líquidos y en el control de las operaciones durante el procesamiento de alimentos.

Entre los constituyentes más importantes de las frutas están los azúcares, principalmente sacarosa, fructosa y glucosa. El método refractométrico es uno de los métodos generales para la determinación de azúcares, se fundamenta en la relación entre el índice de refracción y la concentración de las soluciones

sacarinas o grado sacarométrico. Cuando el grado sacarométrico se expresa referido al peso [g de azúcar por 100 g de solución o porcentaje en peso], corresponde a los grados de Balling o Brix, a menudo se aplica el método refractométrico para determinar, en líquidos que contienen azúcares, las sustancias sólidas en conjunto (sólidos solubles, sustancia seca, extracto), consideradas como si estuviesen enteramente formadas de azúcar. Señala que en tales casos los resultados tienen un carácter meramente convencional.

Los refractómetros de Abbé poseen escalas para la lectura simultánea del índice de refracción y de °Brix. Los refractómetros manuales, ampliamente utilizados en las industrias que procesan frutas y vegetales porque dan resultados de suficiente exactitud para la práctica corriente, poseen escalas para lectura de °Brix o salinidad. Por esto, y dada la facilidad de la medida, el uso de refractómetros es generalizado en las industrias que trabajan con frutas y legumbres.

En el caso de frutas frescas el proceso de maduración, antes de la madurez en la planta o durante su almacenamiento después del corte, puede ser controlado por medidas refractométricas, realizadas en el jugo obtenido por expresión directa del fruto, es decir, mediante valores de grados °Brix por refractometría.

### **3.5 PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LAS CÉLULAS.**

Un paso necesario para la correcta interpretación de la respuesta dieléctrica de los materiales biológicos es el conocimiento de las distintas estructuras celulares, que permiten describir sus propiedades a través de modelos dieléctricos. Por ello se realiza una breve descripción de las componentes más distintivas en el comportamiento celular frente a la presencia de un campo eléctrico que cambie en función de la frecuencia.



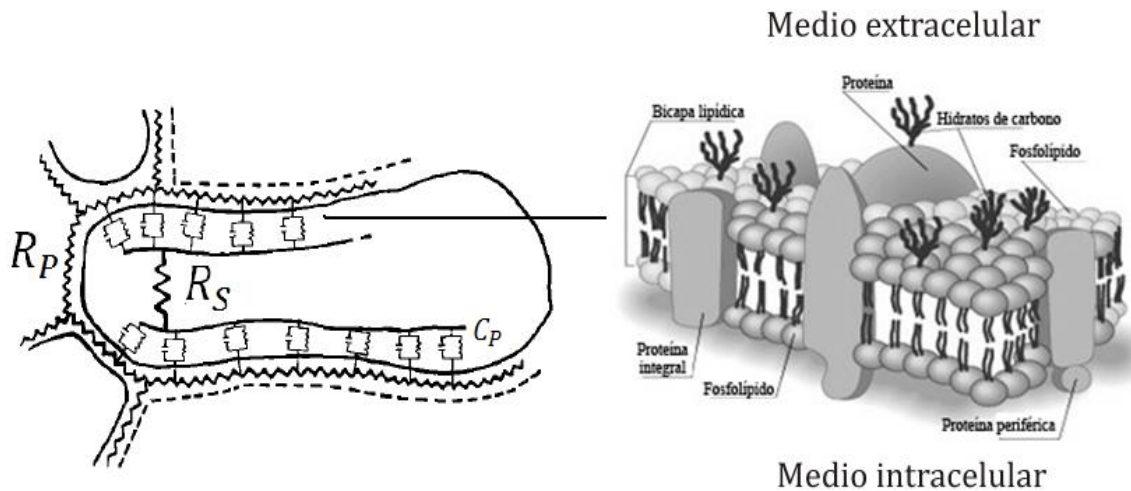


Figura 7. Diagrama de la célula y su circuito equivalente. Resistencia extracelular  $R_P$ , resistencia intracelular  $R_S$  [22].

**3.5.1 Pared celular:** Esta envoltura es característica de las células vegetales y de algunos microorganismos y es responsable de la rigidez de estas células. Presenta una diversificada y elaborada estructura que varía entre las distintas células. La composición principal consiste en largas cadenas de polisacáridos, aminoácidos y otros polímeros. Los grupos cargados de la pared hacen que ésta actúe como intercambiador iónico, por lo que sus propiedades eléctricas cambiarán en función de la concentración iónica del medio circundante. Experimentalmente se ha observado que la conductividad de la pared permanece relativamente constante cuando dicha concentración es baja, pero que aumenta rápidamente si la concentración iónica del medio excede a la propia de la pared celular [23].

**3.5.2 El citoplasma:** El interior celular está compuesto por una solución electrolítica en la que se hallan proteínas, moléculas de agua libres o ligadas a proteínas, ácidos nucleicos, pequeñas moléculas, además orgánulos intracelulares como el núcleo y la vacuola, que afectan también las características dieléctricas de la célula. El citoplasma puede considerarse como una solución salina altamente conductora con una gran concentración de material orgánico. El citoplasma se

halla delimitado por la membrana celular la cual comunica el medio interno de la célula con el externo. En él se realizan prácticamente todas las reacciones químicas realizadas por la célula y las dispersiones sólo pueden ocurrir una vez que la barrera membranosa ha sido superada por el campo eléctrico.

### 3.5.3 La membrana plasmática:

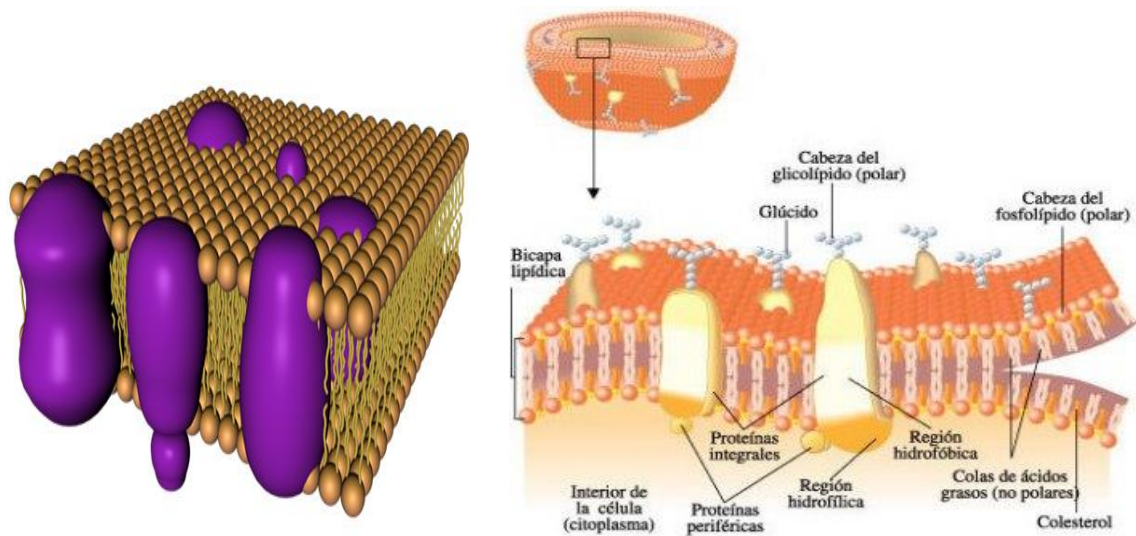
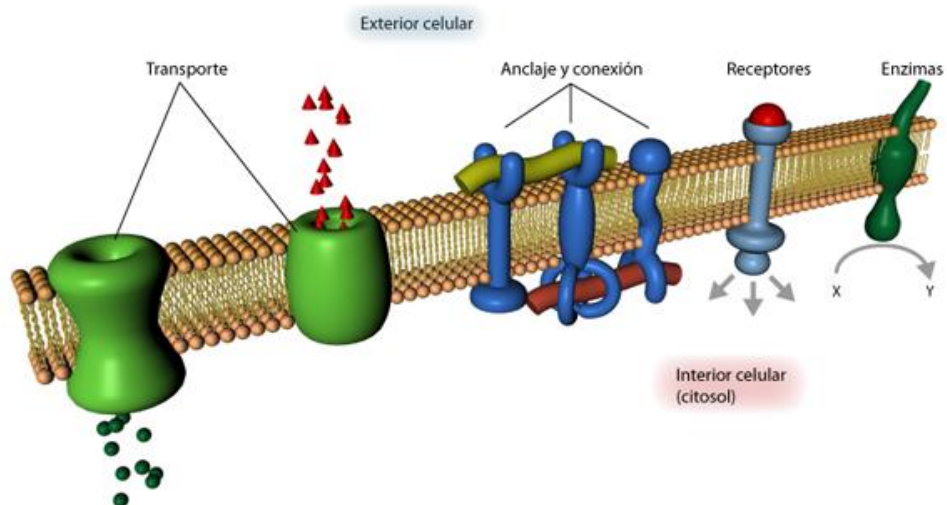


Figura 8. La membrana plasmática [24]

La membrana plasmática es uno de los componentes principales de las células, consiste en una bicapa lipídica (figura 8) en la que se disponen diversas proteínas, formando canales transmembranales, encargados de regular el transporte de nutrientes entre el exterior y el interior de la célula. En condiciones normales, la membrana presenta baja permeabilidad iónica, por lo que es considerada como una capa de baja conductividad, permitiendo a la célula mantener una diferencia de potencial con el medio externo. Esta diferencia de potencial es la que mantiene el interior de la célula con carga negativa respecto al exterior y juega un importante papel energético y de transporte en la actividad metabólica celular, por tanto revela el buen estado fisiológico de la célula [25]. Mientras que la capacitancia que presenta una membrana plasmática dependerá de la presencia de las proteínas

de transporte, además de la frecuencia del campo eléctrico aplicado [26]. De ello se deduce la importancia de describir esta estructura celular de la forma más detallada posible, para el modelo que apoye la caracterización dieléctrica de la célula.

Dado el comportamiento y la estructura de la membrana celular, esta bicapa lipídica se ha comparado en múltiples ocasiones con el espacio entre las dos placas de un condensador, debido a las interfaces entre los medios conductores intra y extracelular, y la membrana aislante, de allí que la difusión pasiva y la difusión facilitada no requieren el consumo de energía, ya que se realiza a favor del gradiente de concentración electroquímico [27]; cuando las sustancias están cargadas la dirección y magnitud del flujo de iones a través de una membrana depende tanto de la diferencia en la concentración electroquímica como de la diferencia de potencial eléctrico a través de ella. Estas dos fuerzas son por ello colectivamente conocidas como **gradiente electroquímico**.



*Figura 9. Estructura de la membrana plasmática. Diferentes tipos de función adscritas a distintos tipos de proteínas de membrana transmembranales: transporte, de anclaje y conexión, receptores y enzimas [14]*

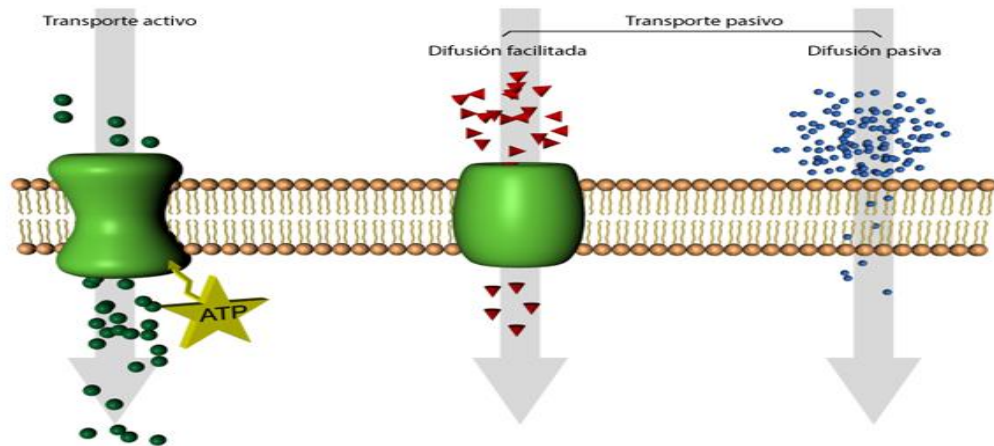


Figura 10. Transporte activo y pasivo en las células. Una misma proteína transmembrana puede realizar más de una función, por ejemplo ser un receptor y tener actividad enzimática [14][27].

De igual forma, en la membrana celular se encuentran distribuidas proteínas encargadas de la formación de canales para un intercambio iónico con el exterior. Por tanto la membrana actúa como una interfase dieléctrica similar al modelo eléctrico de las placas de un condensador plano-paralelo. De allí que sea la membrana celular la que se encarga de generar las mayores respuestas a las estimulaciones eléctricas en la célula a altas frecuencias (Figura 11) [18].

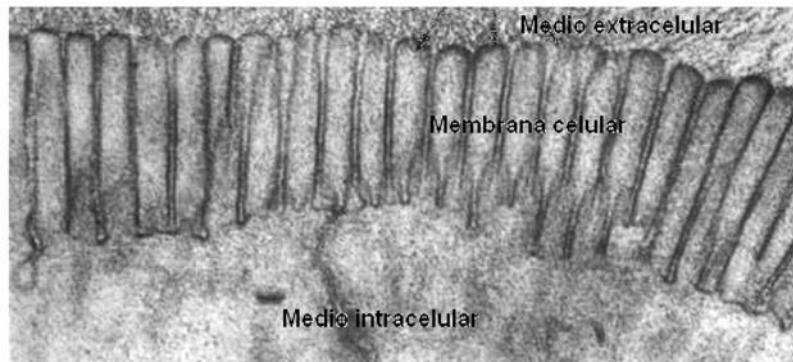


Figura 11. Vista al microscopio de la membrana celular separando ambos medios [14].

El líquido intracelular está compuesto por agua, sales, proteínas, etc., mientras que el fluido extracelular está compuesto por agua y por productos metabólicos. Ambos medios se consideran soluciones electrolíticas, por tanto contienen

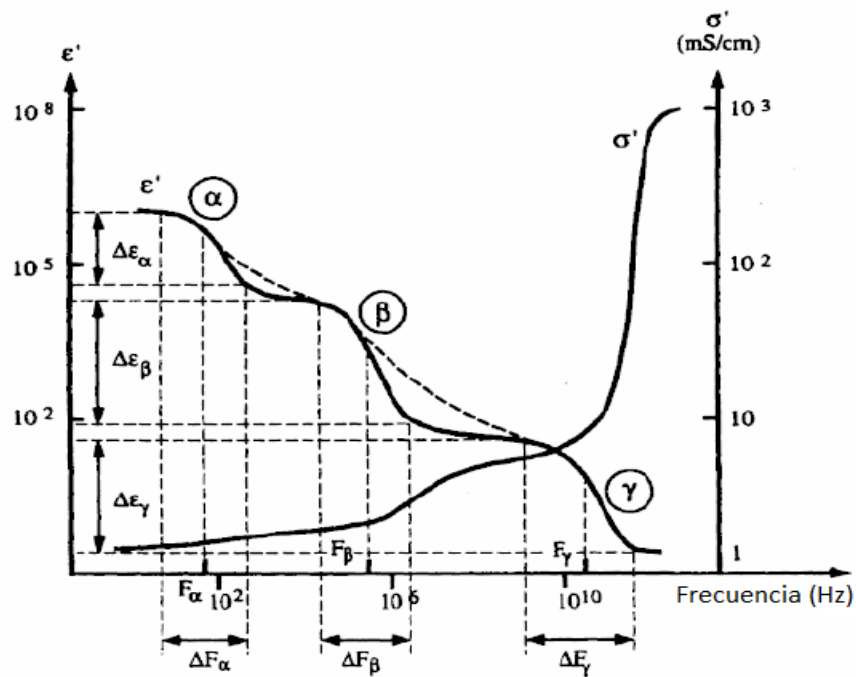
iones libres que pueden migrar ante la presencia de un campo eléctrico. La conductividad en estos medios está relacionada con la presencia de sales en disolución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico, A estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos.

Los diferentes valores de impedancia que se observan a lo largo de todo el rango de frecuencia en los frutos [15], son atribuidos principalmente a los cambios en la conductividad de la membrana, a sus propiedades resistivas en los medios intra y extra celular y a la polarización interfacial, movilidad de los iones y moléculas con carga (principalmente iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) y a los fenómenos de relajación producidos por la rotación dipolar y la rotación de partes de las macromoléculas [28], de tal manera que a altas frecuencias la componente capacitiva de la impedancia, da una idea directa del estado de la membrana celular. Al aplicar a la suspensión celular una señal de baja frecuencia, los iones tienen tiempo de polarizar la membrana, creando una fuerte oposición al paso de corriente. Esto da como resultado una circulación de corriente por el exterior de la célula y por tanto un valor en la resistencia externa. En cambio cuando la medida se hace a más altas frecuencias, los iones no tienen tiempo de polarizar la membrana plasmática, perdiendo así sus propiedades aislantes y ésta no ofrece tanta resistencia al paso de la corriente, obteniendo una impedancia menor, que hace posible manifestar su aspecto capacitivo. Así, se puede asociar una frecuencia característica para cada mecanismo que genere dinámica de carga en el tejido [29]. Particularmente en el plátano, la formación de sólidos solubles (Grados Brix) en función del tiempo de maduración, conlleva a que la resistencia eléctrica disminuya al aumentar el tiempo de maduración, como consecuencia del incremento de la movilidad iónica. Dicho de otro modo, la reactancia capacitiva decrece gradualmente con el incremento de la frecuencia. La reducción del valor de la impedancia del tejido es notable cuando la frecuencia alcanza un determinado valor. Si la frecuencia es suficientemente alta el efecto de la

capacitancia de la membrana puede ser despreciado y la impedancia se vuelve independiente de la frecuencia.

Este comportamiento diferente en frecuencia se refleja en una variación en las curvas de impedancia del conjunto celular. Por ejemplo, el fenómeno de relajación en los tejidos es el resultado de la polarización de los dipolos y del movimiento de las cargas, que inducen un fenómeno de conducción. Los portadores de cargas son principalmente iones y la fuente principal de los dipolos son las moléculas polares del agua; de otro lado, a bajas frecuencias, el valor total de la impedancia corresponde a la suma de todos los procesos de polarización en el medio extra celular. A medida que la frecuencia de excitación aumenta, los procesos de polarización más rápidos dejan de ser capaces de seguir al campo, y por tanto, dejan de contribuir al valor total de la impedancia. A altas frecuencias, sólo los procesos con una dinámica muy rápida responden a la estimulación externa del campo aplicado.

P. Schwan [15] definió tres regiones de frecuencia en las que la permitividad y conductividad del tejido cambian significativamente de valor. Estas tres regiones o dispersiones se conocen como  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . La mayoría de los tejidos biológicos se ajustan a este patrón espectral, que se muestra en la Figura 9. Las tres bandas no siempre se pueden vincular a fenómenos biofísicos o procesos electroquímicos. No obstante, la dispersión de los iones depende de la dinámica de excitación-relajación. Se le llama *dispersión* a la dependencia de la impedancia con la frecuencia.



Gráfica 1. Gráfica de la permitividad y de la conductividad de tejidos biológicos en función de la frecuencia [15].

Dispersión “ $\alpha$ ” (<10kHz) asociada a rasgos macroscópicos; es debida a fenómenos de difusión/conducción iónica de los iones que envuelven a la membrana. Expresa la relajación de los dipolos no permanentes que se forman durante el flujo iónico a través del exterior de las células. La célula es poco conductora comparada con el medio extracelular [28].

Dispersión “ $\beta$ ” (1KHz-10MHz) asociada a la estructura del tejido también llamada *relajación estructural*, es una medida directa del comportamiento capacitivo de la membrana. Está estrechamente ligada a las propiedades de la membrana celular y a la forma de agrupación para la formación de tejidos. Estos fenómenos de relajación son causados por el efecto Maxwell-Wagner que provocan la polarización de la interfase. Es la relajación de la cual se puede extraer mayor información de la superficie celular [30].

Dispersión  $\gamma$  (>1MHz) asociada a la estructura intracelular. Derivada de los

fenómenos de relajación de las moléculas dipolares permanentes, como las moléculas de agua predominantes en los tejidos biológicos [31].

### **3.6 POSCOSECHA DE FRUTOS DE PLÁTANO**

En el manejo poscosecha del plátano Dominico- Hartón se hace indispensable tener en cuenta los cambios fisicoquímicos del fruto, los cuales permiten evidenciar cambios estructurales, bioquímicos y físicos específicos para cada fruto, cambios que se hacen más evidentes a medida que transcurre el periodo de maduración y conservan una estrecha relación con las características eléctricas y de calidad del mismo [32].

Es importante destacar que las transformaciones que se producen en las frutas debido a la maduración son: Degradación de la clorofila y aparición de pigmentos amarillos llamados carotenos y rojos denominados antocianos, degradación de la pectina que forma la estructura, transformación del almidón en azúcares y disminución de la acidez, así como pérdida de la astringencia [33].

Estas transformaciones pueden seguir evolucionando hasta el deterioro del fruto; donde la metionina (aminoácido presente en el plátano) es transformada en etileno, compuesto químico que producen los frutos para realizar el proceso de maduración, esta presencia de etileno en las frutas determina el momento de la maduración y si la presencia de este compuesto químico no es controlada se intensificará el proceso de maduración, por lo que el control de los procesos pos cosecha, serán clave para su conservación. La manipulación de la maduración se puede hacer modificando los niveles de: Oxígeno, dióxido de carbono, etileno y la temperatura [34].

Según como se dé la maduración de la fruta, se produce un proceso acelerado de respiración dependiente de la concentración de oxígeno. Esta respiración



acelerada se denomina subida climatérica y sirve para clasificar a las frutas en dos grandes grupos: Climatéricas y no climatéricas:

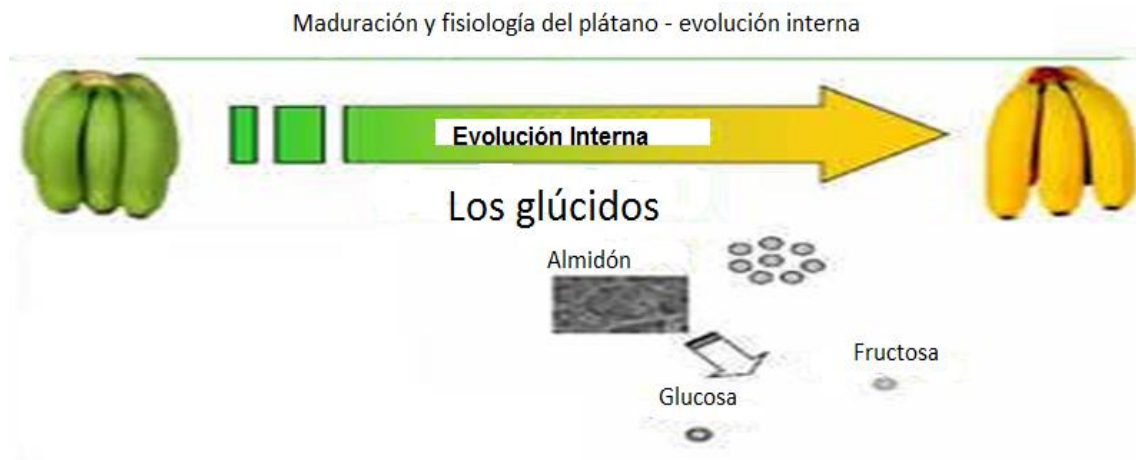
- ✓ **Frutas climatéricas:** son las que experimentan un brusco incremento en la concentración de etileno. Entre las frutas climatéricas tenemos: manzana, pera, *plátano*, melocotón, albaricoque y chirimoya. Estas frutas sufren una maduración brusca y grandes cambios de color, textura y composición. Normalmente se recolectan en estado pre climatérico, y se almacenan en condiciones controladas para que la maduración no tenga lugar hasta el momento de sacarlas al mercado.
- ✓ **Frutas no climatéricas:** son las que presentan un lento incremento en la concentración de etileno. Entre las no climatéricas tenemos: naranja, limón, mandarina, piña, uva, melón y fresa. Estas frutas maduran de forma lenta y no tienen cambios bruscos en su aspecto y composición. Presentan mayor contenido de almidón. La recolección se hace después de la maduración porque si se hace cuando están verdes luego no maduran, solo se ponen blandas.

La dinámica del proceso de maduración difiere significativamente entre las especies de frutas y los diversos ambientes de poscosecha. Sin embargo, es posible identificar ciertos fenómenos generales en relación al comportamiento de la maduración para cada fruto y así determinar parámetros de estandarización en los procesos de cosecha y poscosecha [35]. Estos parámetros están directamente relacionados con el índice de maduración del fruto y permiten determinar el tiempo adecuado de cosecha mediante análisis físicos-químicos o bromatológicos como color, textura, acidez (*pH*), grados Brix (*°Brix*) [36].

La vida de almacenamiento es el tiempo que el producto puede estar guardado sin degradarse. Durante la vida de almacenamiento se da un aumento de la

concentración de etileno, e incide en la respiración y desarrollo de los aromas, etc. A mayor tiempo de recolección disminuirá la vida de almacenamiento pero a la vez se produce un aumento de peso del producto, hasta un 1% diario.

La maduración del plátano Dominico-Hartón es un proceso natural a través del cual los glúcidos (almidón) se transforman en glucosa, fructosa y aromas, permitiendo que el producto sea apto para el consumo; es decir, el plátano recién recolectado contiene almidón (es duro, sin sabor y astringente) y es de color verde porque la clorofila no se ha degradado. A través del proceso de maduración el almidón evoluciona a azúcares (glucosa, fructosa y aromas) y la clorofila se degrada apareciendo pigmentos amarillos como de mencionó, llamados carotenos. Los grados de maduración condicionan el estado de dulzor y textura y en general, las condiciones organolépticas del producto que es lo que lo hará más o menos agradable para el consumo [37].



*Figura 12. Maduración fisiológica del plátano [34]*

En el plátano como fruto climatérico se da una disminución de clorofila, pero aumentan los carotenos y xantofilas. La cantidad de materia seca, el almidón y la hemicelulosa disminuyen, por el contrario aumenta el contenido en los sólidos solubles (°Brix) [36].

Tabla 2. Valor nutricional del plátano fresco por 100 gramos de sustancia comestible [38].

Agua		75.70
Proteínas (g)		1.10
Lípidos (g)		0.20
Carbohidratos	Total (g)	22.20
	Fibras (g)	0.60
Vitaminas	A (UI)	190.00
	B1 (mg)	0.05
	B2 (mg)	0.06
	B6 (mg)	0.32
	Acido nicotínico (mg)	0.60
	Acido patogénico (mg)	0.20
	C (mg)	10.00
Otros componentes orgánicos	Acido málico (mg)	500.00
	Acido cítrico (mg)	150.00
Sales minerales	Acido oxálico (mg)	6.40
	Sodio (mg)	1.00
	Potasio (mg)	420.00
	Calcio (mg)	8.00
	Magnesio (mg)	31.00
	Manganeso (mg)	0.64
	Hierro (mg)	0.70
	Cobre (mg)	0.20
	Fósforo (mg)	28.00
	Azufre (mg)	12.00
	Cloro (mg)	125.00
Calorías (kcal)		85.00

Tabla 3. Contenido por kg en comercio (32% de desecho)

Agua (g)		514.80
Proteínas (g)		7.50
Lípidos (g)		1.40
Carbohidratos	Total (g)	151.00
	Fibras (g)	4.10
Vitaminas	A (UI)	1292.00
	B1 (mg)	0.34
	B2 (mg)	0.40
	B6 (mg)	2.18
	Acido nicotínico (mg)	4.10
	Ácido patogénico (mg)	1.40
	C (mg)	68.00
Otros componentes orgánicos	Acido málico (mg)	3400.00
	Ácido cítrico (mg)	1020.00
Sales minerales	Acido oxálico (mg)	42.20
	Sodio (mg)	7.00
	Potasio (mg)	2856.00
	Calcio (mg)	54.00
	Magnesio (mg)	211.00
	Manganeso (mg)	4.35
	Hierro (mg)	4.80
	Cobre (mg)	1.36
	Fósforo (mg)	190.00
	Azufre (mg)	82.00
	Cloro (mg)	850.00
Calorías (kcal)		578.00

## 4. *METODOLOGÍA*

#### 4.1 OBTENCIÓN DE LAS MUESTRAS

Para realizar la selección de las muestras se hizo un estudio previo tomando como base las características de los diferentes pisos térmicos del Departamento del Quindío, en especial lo concerniente a luminosidad en los cultivos, pluviosidad de la zona, verificación de las condiciones topográficas, tipologías del suelo y área cultivada por Municipio. Una vez escogida la zona, se determinó el predio de donde tomar las muestras, teniendo en cuenta además la sanidad de los cultivos debido a la posible presencia de enfermedades propias de éstos.

Con muestras previamente cosechados en fincas del Municipio de la Tebaida Quindío, que tiene una temperatura promedio de 24 °C y una humedad relativa del 70%, se realizaron mediciones piloto de impedancia eléctrica en el vástago de plátano como función del tiempo de manejo poscosecha.



Figura 13. Aspectos Climáticos del sector de recolección de las Muestras. [39]

Las medidas piloto se tomaron con un Impedancímetro HIOKI 3532-50 y en primera instancia, se usaron electrodos cilíndricos de plata y en condiciones de temperatura ambiente. Estas medidas de impedancia se hicieron a diferentes distancias de los gajos de frutos e inclusive en forma perimetral, pero las curvas de impedancia obtenidas no mostraron reproducibilidad.

## 4.2 FABRICACIÓN DE ELECTRODOS

Se diseñó un par de electrodos plano paralelos de acero (figura 14) en los cuales se podía variar la distancia entre las placas, buscando con ello la formación de un campo eléctrico uniforme.



*Figura 14. Electrodo plano paralelo en acero.*

Se procedió a la toma de medidas con estos electrodos con muestras del sector previamente seleccionado y a temperatura ambiente, encontrándose que los datos una vez graficados mostraban una alta actividad electroquímica [Gráfica 5] entre los electrodos y la muestra. Por lo tanto se decidió tomar medidas de impedancia con un par de electrodos en otro material, preferiblemente en oro, para evitar procesos de reacción con la muestra.

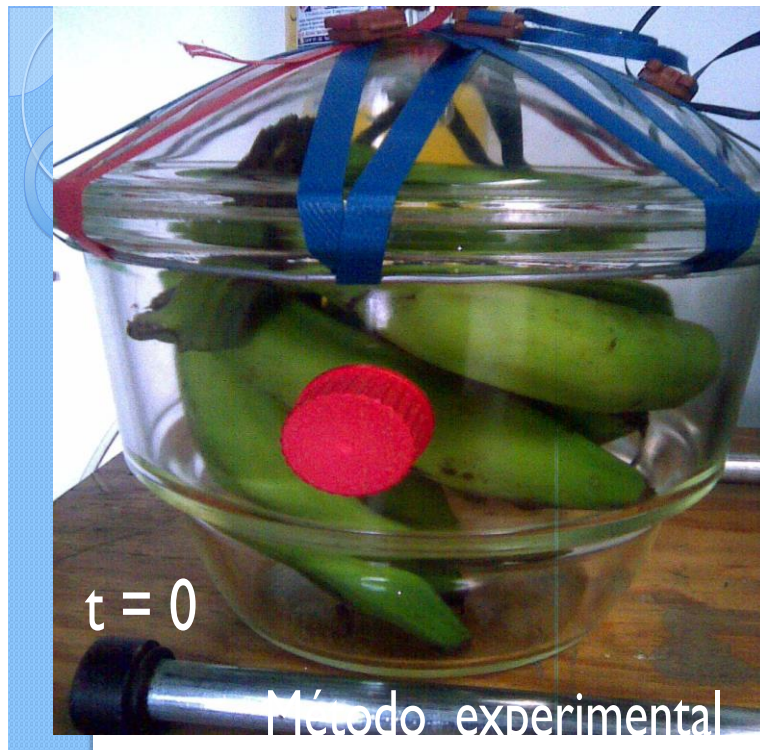
**4.2.1 Medidas de impedancia:** Dado que las medidas de impedancia mostraban una fuerte dependencia respecto del material de los electrodos, se procedió a construir un par de electrodos plano-paralelos de oro en forma de **T**, que permitieran variar la distancia entre las placas de oro y lograr así un campo eléctrico de estimulación más uniforme.



*Figura 15. Electrodos plano paralelos de oro.*

Las curvas de las medidas de impedancia eléctrica obtenidas con estos electrodos mostraron consistencia y reproducibilidad y una actividad electroquímica casi nula. Luego se decidió efectuar estudios de los procesos físico-químicos de alimentos a las muestras, tomando análisis bromatológico de éstas y así evidenciar los cambios en el proceso de maduración como función del tiempo de cosechado, comprender la dinámica del transporte de iones y poder correlacionar la respuesta eléctrica con el proceso de maduración de los frutos de plátano.





*Figura 16. Muestras en cámara de desecado.*

De forma paralela se dispusieron muestras en cámaras de desecado, primero en una atmósfera rica en oxígeno para observar la incidencia de este elemento en los procesos de respiración y de maduración bajo estas condiciones. Segundo, se colocaron muestras en atmósfera rarificada por el  $\text{CO}_2$  generado en el proceso propio de respiración del sistema; a estas muestras también se les hizo análisis bromatológico para determinar comportamientos experimentales que se pudieran utilizar para controlar o evaluar el proceso de maduración.



*Figura 17. Muestras de plátano en Atmósfera rica en Oxígeno*

#### **4.3 TOMA DE MEDIDAS**

Para la toma de medidas de impedancia, se dispuso de muestras cosechadas en la zona previamente escogida y usando un impedancímetro HIOKI 3532-50 con disponibilidad de barrido en frecuencia desde 50 Hertz hasta 5 Mega Hertz y con un voltaje de 100 milivoltios y una separación entre las placas de los electrodos de 0.1 milímetro. Se tomaron los datos de impedancia a intervalos de tiempo de un día, este parámetro de tiempo fue tomado como estándar, después de las pruebas iniciales, al observar que a intervalos de tiempo más pequeños las muestras presentaban un alto estrés debido a que los electrodos perforaban notablemente las muestras. Los espectros de impedancia obtenidos y sus datos de respaldo fueron guardados, para su posterior análisis utilizando la aplicación Zview2.

De una misma muestra (un racimo de plátanos) se tomaron gajos para ser enviados al laboratorio de análisis fisicoquímico de poscosecha en la Universidad del Quindío, para que fuesen sometidos a diferentes estudios de bromatología como son: pH, humedad, actividad acuosa, colorimetría y medida de sólidos solubles, de igual forma se dispusieron muestras en atmósfera controlada rica en oxígeno, otra muestra testigo se dejó en una cámara de desecado para observar el proceso propio de respiración y su incidencia en la maduración de los frutos.



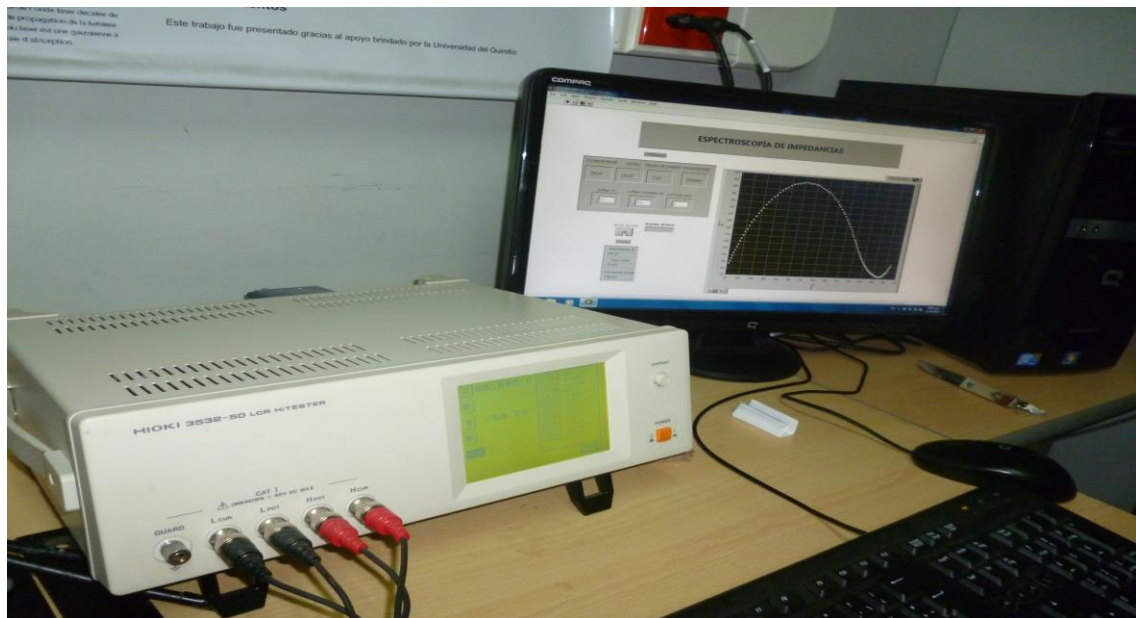
*Figura 18. Muestras en cámaras de Desecado en atmósfera controlada.*

Una vez tomados los datos, se graficaron y se ajustaron usando las aplicaciones ORIGIN versión 8.0 y Zview2. El análisis de las curvas se realizó utilizando los formalismos comúnmente aceptados, como el ajuste a circuitos equivalentes.

## 5. *RESULTADOS*

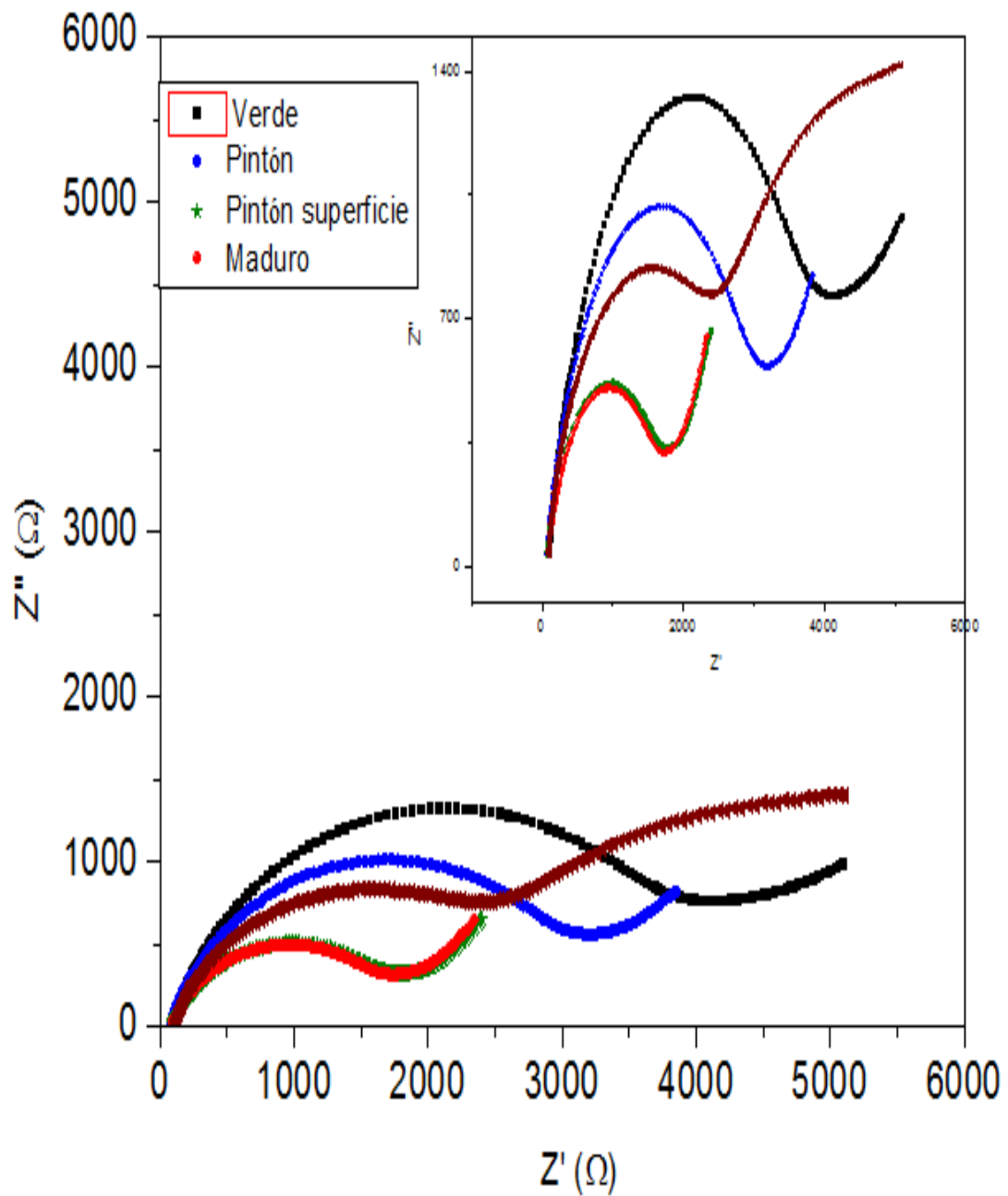
## 5.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO

Utilizando muestras previamente cosechadas y dispuestas en los laboratorios, se realizaron mediciones piloto de impedancia eléctrica usando en primera instancia electrodos de plata y un impedancímetro HIOKI 3532-50 a temperatura ambiente, como se observa en la figura 19.



*Figura 19. Equipo de medida HIOKI 3532 - 50.*

Las curvas de impedancia obtenidas proporcionaron información acerca de la movilidad iónica en de los componentes del vástago y de los frutos de plátano y se planteó la necesidad de cambiar los electrodos, dado que al aplicar el voltaje no se podían controlar variables como la distancia entre los electrodos y la uniformidad del campo eléctrico aplicado.

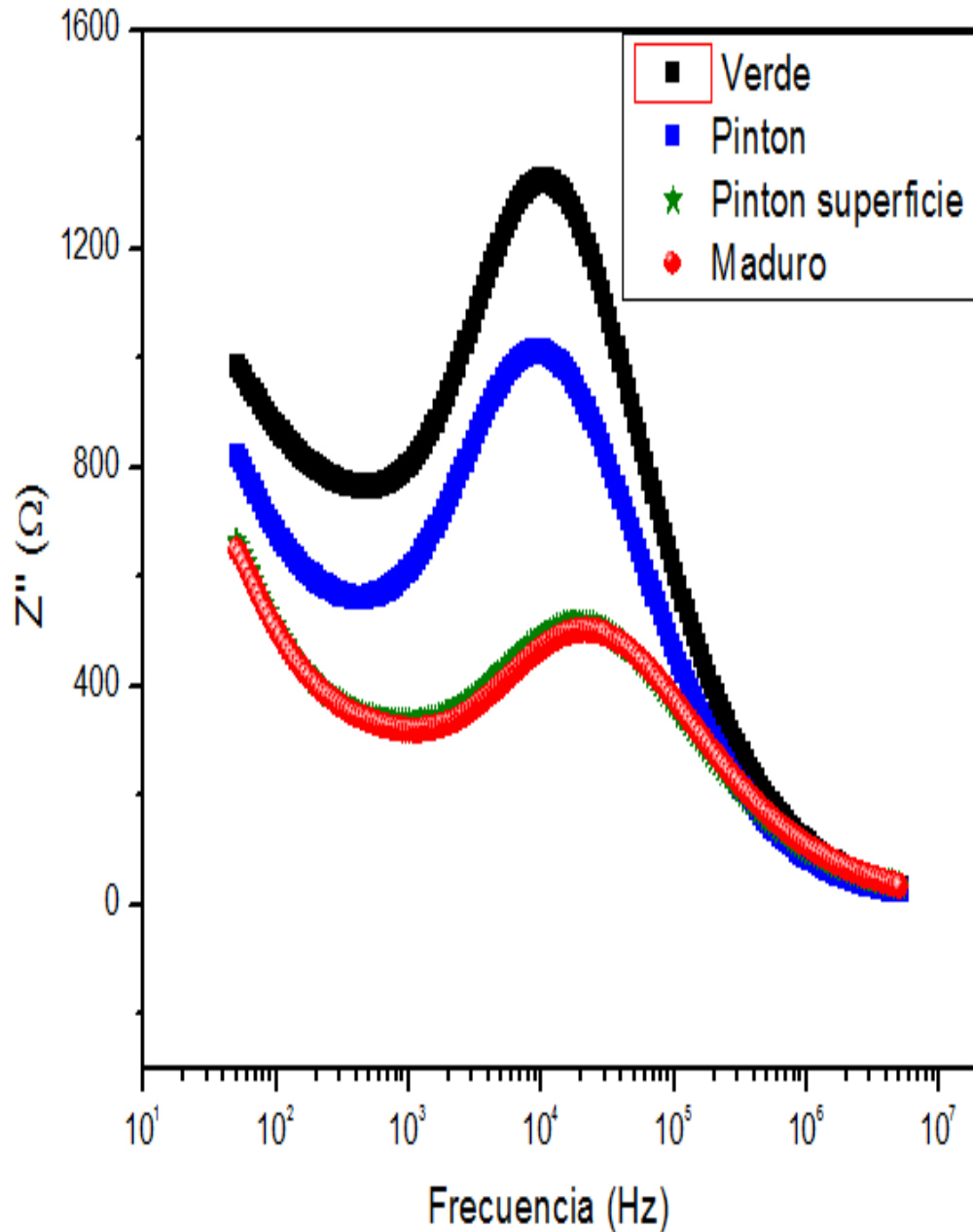


Gráfica 2. Se muestran medidas preliminares de impedancia con electrodos cilíndricos de plata.

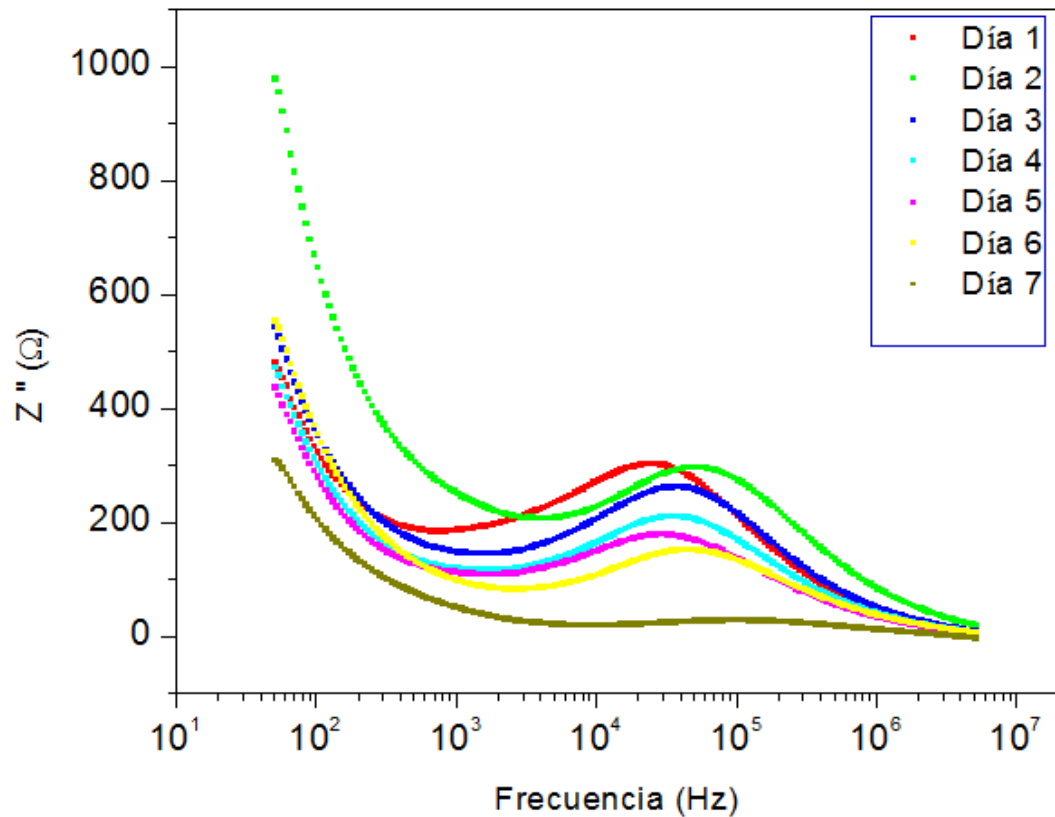
La Gráfica 2, muestra la variación de la componente imaginaria en función de la parte real de la impedancia, usando electrodos cilíndricos de plata. Se refleja una inconsistencia en los espectros, pues se esperaría una disminución sistemática de



la resistencia del sistema con el tiempo debido al incremento en la movilidad iónica. También se observaron cambios en las pendientes correspondientes a los “ramales” de baja frecuencia, que dan evidencia de reactividad química en la muestras.



Gráfica 3. Muestra el comportamiento de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia usando electrodos de Ag.



Gráfica 4. Muestra el comportamiento de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia usando Electroodos de Au.

En la gráfica 3, de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia, se observa una disminución de la amplitud de los máximos como función del tiempo, mostrando que la respuesta máxima en frecuencia de la parte imaginaria de  $Z$  está relacionada con el desdoblamiento de almidones en azúcares en una relación inversa. Se evidencia además un corrimiento en los picos de la impedancia hacia altas frecuencias, notándose además que la parte imaginaria se hace independiente de la frecuencia, estableciendo que las contribuciones a fenómenos capacitivos de alta frecuencia se hacen como es de esperar pequeños, con lo cual para su estudio se requeriría de un equipo de alta frecuencia. Nótese que la diferencia en las amplitudes en la parte imaginaria de  $Z$  usando electrodos de plata con respecto a los electrodos de oro.



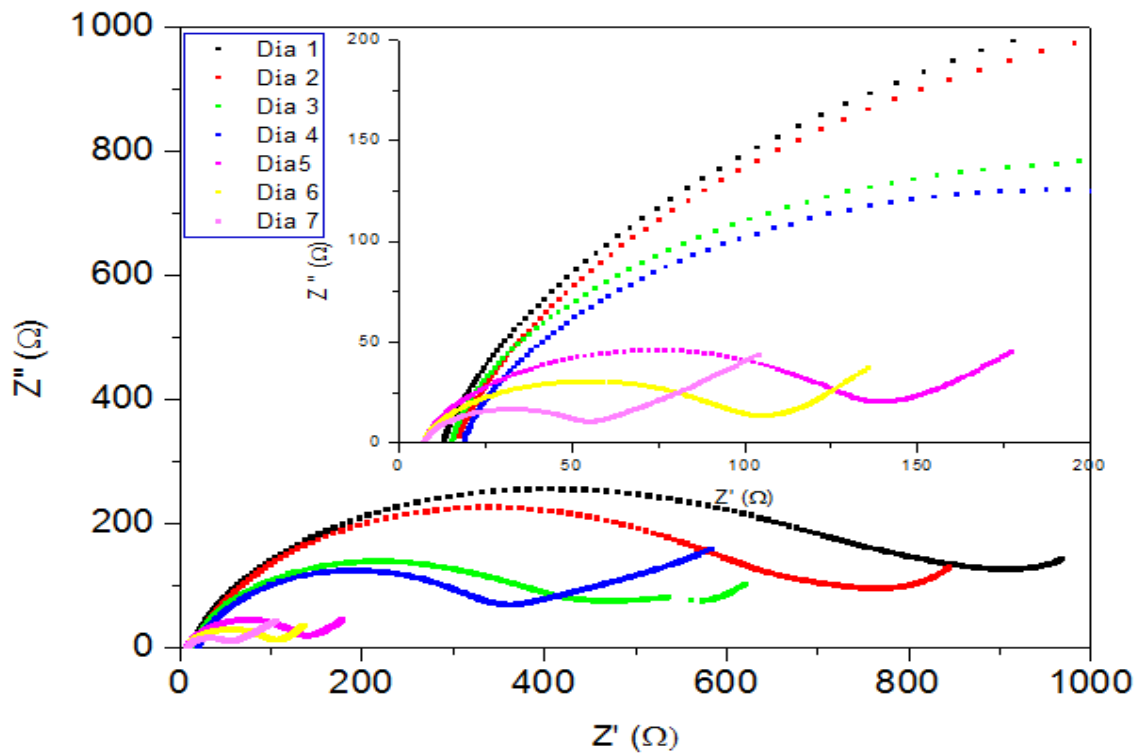
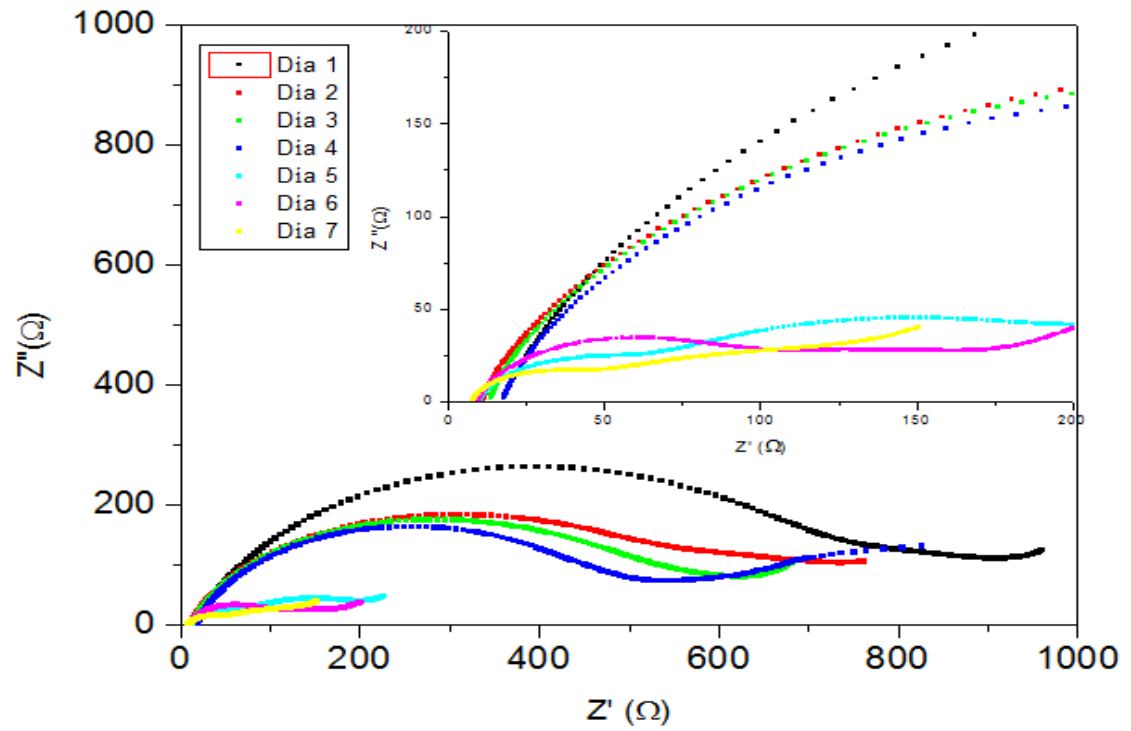
## 5.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PILOTO CON ELECTRODOS DE ACERO

Posteriormente se construyeron un par de electrodos plano paralelos de acero y de nuevo se realizaron mediadas de impedancia eléctrica, los resultados aunque fueron un poco más consistentes no presentaron reproducibilidad en las curvas, pues a medida que transcurría el tiempo de maduración de los frutos, las curvas de impedancia mostraron una alta interacción electroquímica entre estos y las muestras. Figura 20.



*Figura 20. Electrodos plano paralelos de acero.*

En la figura 20, se muestran los electrodos de acero que se utilizaron en las medidas preliminares y con los que no hubo buena reproducibilidad de los datos como lo evidencia la gráfica 5.

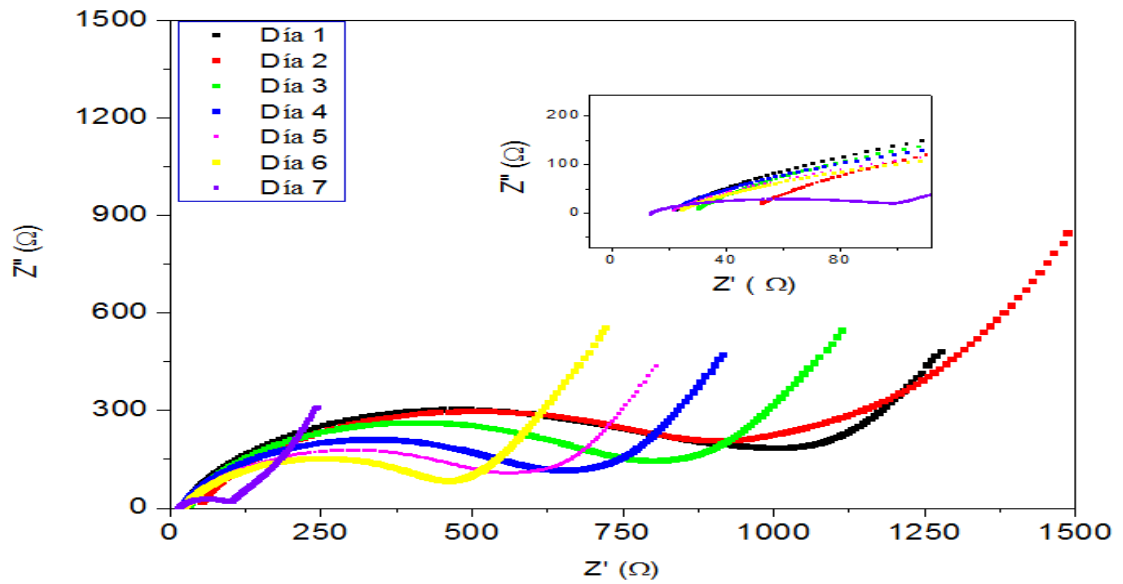


Gráfica 5. Medidas de impedancia en dos muestras diferentes usando electrodos plano-paralelos de Acero al aire libre.

Nótese que en las curvas de la gráfica 5, hay una tendencia a la disminución de la resistencia externa a medida que el tiempo de maduración aumenta, es decir, la respuesta exhibida por las muestras aunque fue un poco más consistente, muestra poca reproducibilidad, en especial porque la reactividad de los electrodos con las especies químicas y el estrés generado en la muestra modifican sustancialmente los valores de resistencia como función del tiempo. Como se puede observar en la gráfica 6. La reactividad química de los electrodos con la muestra se manifestó por el cambio de color de los electrodos de acero antes y después de las mediciones.

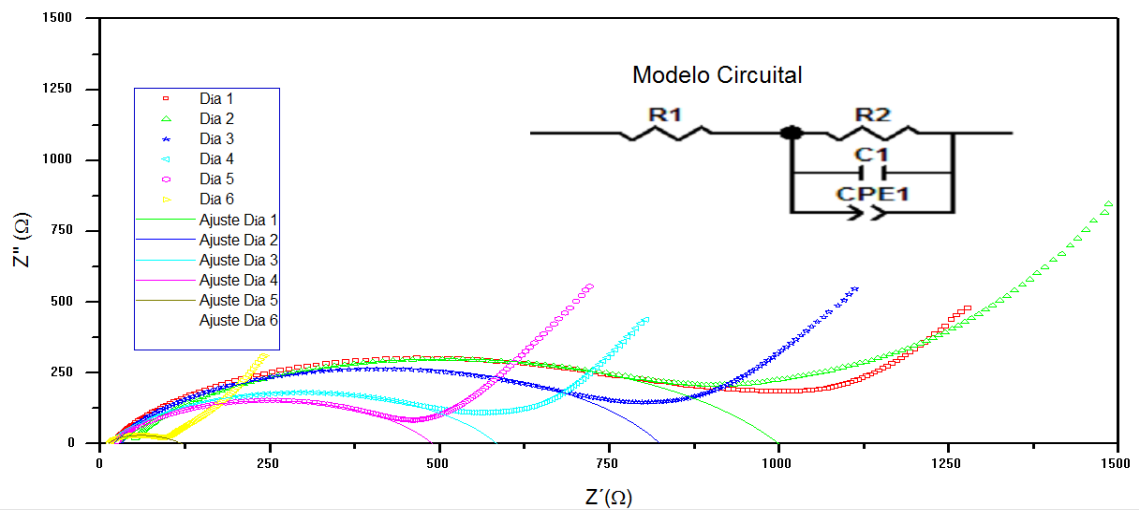
### **5.3 RESULTADOS DE LAS MEDIDAS CON ELECTRODOS DE ORO**

Las curvas de las mediciones de impedancia eléctrica, usando electrodos de oro en atmósfera de aire, con una distancia de 0.1mm entre electrodos. Los resultados fueron completamente consistentes con lo que se esperaría que ocurriera al transcurrir el tiempo, es decir, una sistemática disminución de la resistencia con el tiempo, como se muestra en la gráfica 7. Los espectros obtenidos fueron ajustados usando la aplicación ZVIEW y se pudieron obtener valores de la resistencia eléctrica con respecto al tiempo de maduración y a la frecuencia de excitación del campo eléctrico, como se puede verificar en la gráfica.



Gráfica 6. Curvas de impedancia eléctrica usando electrodos de oro.

En la gráfica 6, se muestra las medidas de la parte imaginaria en función de la parte real de la impedancia usando un par de electrodos plano paralelos en oro y aplicando un campo eléctrico uniforme. Con estos electrodos la resistencia eléctrica medida está dada en el orden de los ohmios ( $\Omega$ ) cuando la frecuencia es baja, notándose una disminución en esta con respecto al tiempo de maduración de los frutos y de la toma de los datos.

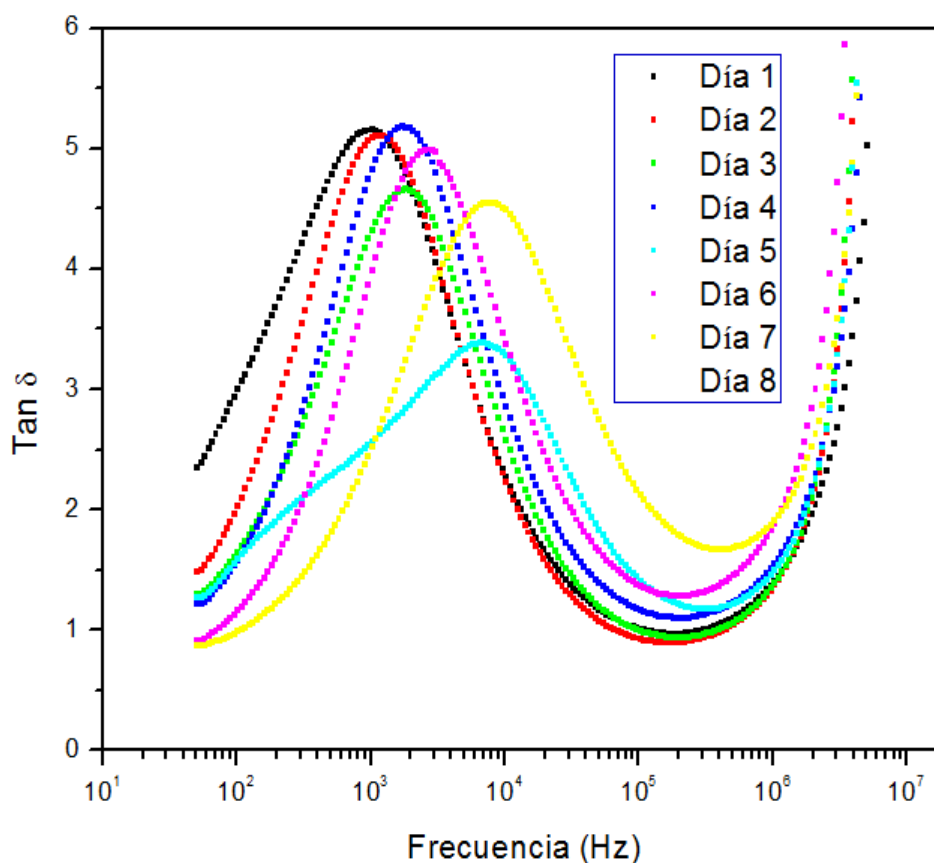


Gráfica 7. Curvas de impedancia y ajustes.

En la gráfica 7, de la parte imaginaria de la impedancia en función de la frecuencia, se esquematizan las medidas de la parte imaginaria en función de la parte real de la impedancia y los ajustes a las curvas usando la aplicación ZVIEW, para determinar el valor de la resistencia eléctrica, de igual forma se presenta el modelo circuital con el que se realizaron los mencionados ajustes, notándose que hay una resistencia inicial  $R_1$  en serie con un circuito formado por una resistencia  $R_2$  en paralelo con un condensador C1 y elemento de fase constante.

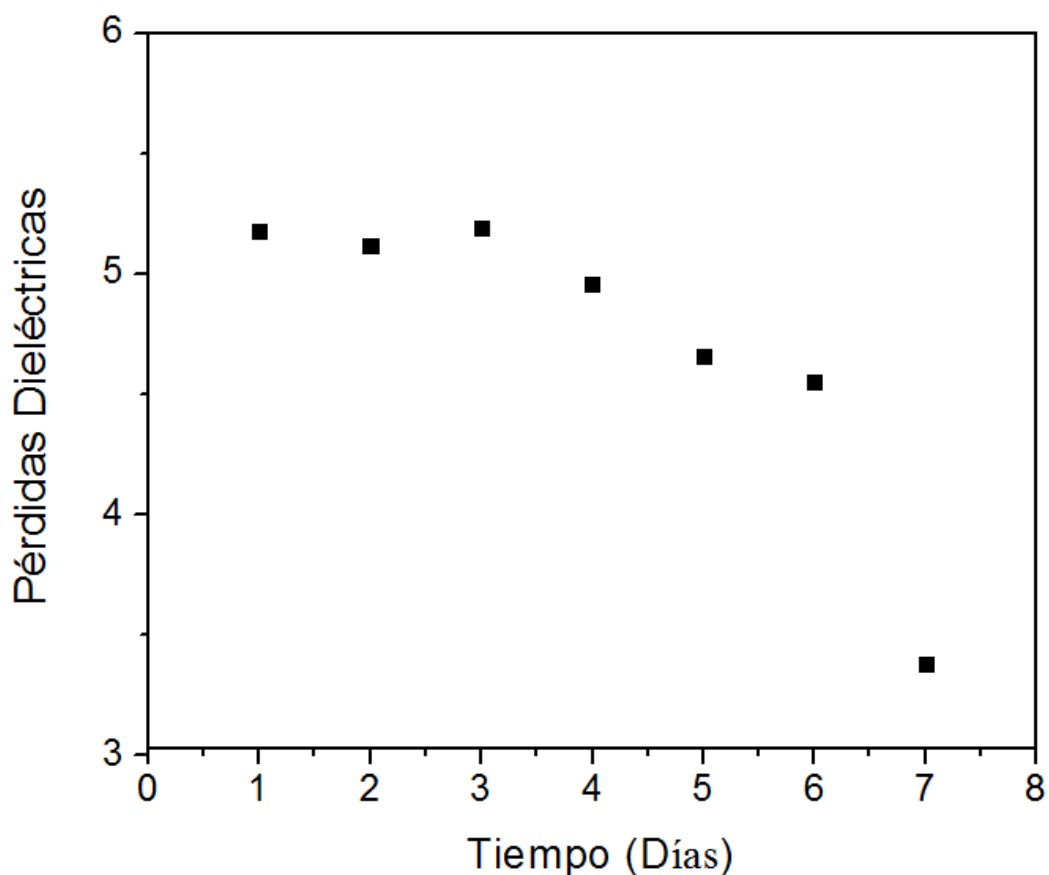
Tabla 4 Datos obtenidos de los ajustes a circuitos equivalentes

	R1( $\Omega$ )	R2( $\Omega$ )	C1 (F)	CPE1-T	CPE1-P
Día 1	38	880	$9 * 10^{-7}$	$2.97*10^{-5}$	0.63
Día 2	20	570	$8 * 10^{-6}$	$9.99*10^{-5}$	0.60
Día 3	25	445	$6*10^{-6}$	$9.99*10^{-5}$	0.60
Día 4	25	490	$6*10^{-5}$	$9.9*10^{-4}$	0.68
Día 5	30	190	$6*10^{-5}$	$9.9*10^{-4}$	0,68
Día 6	30	180	$6*10^{-5}$	$9.9*10^{-4}$	0,68



Gráfica 8. Razón entre la impedancia como función de la frecuencia

En La gráfica 8, donde se representa la tangente de pérdidas  $\delta$  en función de la frecuencia, muestra las pérdidas dieléctricas que se presentan debido a efectos de polarización producidos presumiblemente por dipolos, moléculas y movimiento de carga. Se observa que hay un máximo de pérdidas para cada día, el cual decrece con el tiempo, evidenciando que posiblemente el sistema al desdoblarse más harinas en sólidos solubles, favorece el desplazamiento de especies iónicas, las cuales estarían menos correlacionadas con el medio extracelular, manifestando que si bien la conductividad crece por el aumento en el número de portadores (ver Ec. 1), la polarización disminuye. Note como los máximos de pérdidas disminuyen a partir del pico de producción de etileno, el cual se presenta entre el tercer y cuarto día de maduración.



Gráfica 9 Pérdidas dieléctricas en función del tiempo de maduración

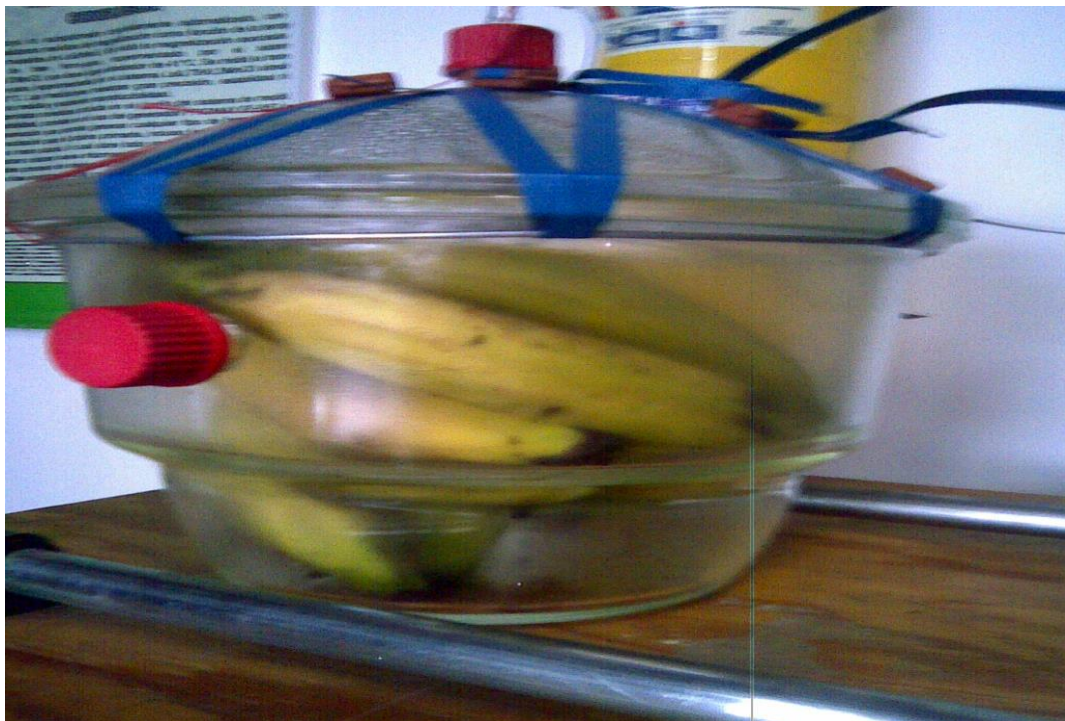
#### 5.4 RESULTADOS DE MEDICIONES EN ATMÓSFERA CONTROLADA

Paralelo a los procedimientos de medición de impedancia se dispusieron muestras de plátano en cámaras de desecado, en atmosfera de aire y para evidenciar el proceso de maduración en el tiempo, en atmósfera rica en CO<sub>2</sub>. Se evidenció que los restringidos niveles de oxígeno en la cámara debidos al proceso natural de respiración que enrarece la atmósfera con CO<sub>2</sub>, inhiben la producción de etileno, retardando la maduración de los frutos hasta en cuatro semanas de haber sido cosechados.





*Figura 21. Muestras de plátano en cámara de desecado.*



*Figura 22. Muestras de plátano en cámara de desecado con atmósfera rica en oxígeno después de dos días de cosechado.*



Adicionalmente, se realizaron medidas de impedancia eléctrica y análisis bromatológico a las muestras, tanto de las que se confinaron en atmósfera rica en oxígeno, como de las que se dejaron en la cámara de desecado sin modificación alguna.

La figura 22, muestra la segunda prueba en atmósfera controlada que se hizo utilizando oxígeno, para evidenciar la aceleración del proceso de maduración de los frutos el tiempo estimado fue de dos (2) días después de cosechados. La atmósfera enriquecida en oxígeno, favorece la reacción química que libera etileno y CO<sub>2</sub> acelerando el proceso de maduración, como se explicó en el capítulo de aspectos teóricos.

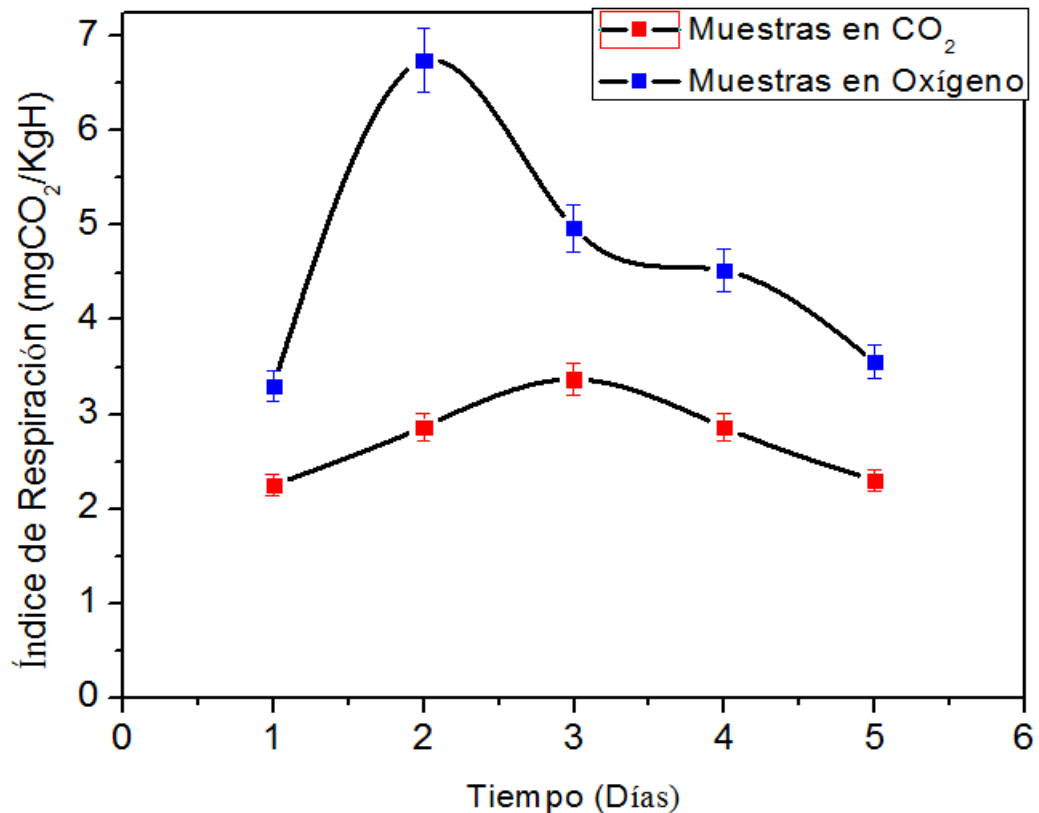
Para determinar la concentración de sólidos solubles, que inicialmente se presumió proporcional al número de portadores de carga, se optó por realizar a las muestras los siguientes procedimientos de análisis físico-químicos: medición de grados °Brix o concentración de sólidos solubles, pH, actividad acuosa, colorimetría e índice de respiración.

## 5.5 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS: Índice de Respiración

Fecha de Análisis: 17 de Diciembre – 21 de Diciembre de 2012

*Tabla 5. Índice de respiración para plátano en estado 2 (verde) y 5 (maduro)*

Día	INDICE DE RESPIRACION (IR) PLATANO EN O <sub>2</sub> (mgCO <sub>2</sub> /kgxh) ± 0.05	INDICE DE RESPIRACION (IR) PLATANO CONTROL (mgCO <sub>2</sub> /kgxh) ± 0.05
1	3,30	2,25
2	6,74	2,87
3	4,97	3,37
4	4,52	2,86
5	3,55	2,30



Gráfica 10. Índice de respiración para plátano en O<sub>2</sub> y plátano control.

En la gráfica 10, del índice de respiración para muestras de plátano en atmósfera rica en Oxígeno y CO<sub>2</sub> en función del tiempo de maduración, los cuadrados oscuros pequeños muestran los resultados del índice de respiración en atmósfera de oxígeno. Los cuadrados grandes claros muestran los resultados del índice de respiración en atmósfera de aire enriquecida con CO<sub>2</sub>. El tamaño de los cuadros es superior al de las barras de error, el cual para el equipo en el cual se realizaron las mediciones es de +/- 0.05.

Los resultados evidencian el papel del etileno en el proceso de maduración y senescencia de los productos frutihortícolas, ya que su control permite acelerar o retardar el proceso de maduración y consiguientemente, el mejoramiento

de la capacidad de comercializar los productos fuera de su época natural de producción y acceder a mejores condiciones de mercado. Así, sus efectos se pueden considerar perjudiciales o beneficiosos según el objetivo. Se consideran perjudiciales cuando al acelerar la senescencia, se reduce la vida en estante del fruto, y beneficiosos cuando se necesita promover una madurez rápida y pareja antes de la comercialización. Se puede observar que el pico de la producción de etileno en frutos con atmósfera rica en oxígeno se da en el segundo día de cosecha. De igual forma bloquear la producción de etileno para prevenir la inducción de la madurez, se tomó un día más según la curva de índice de respiración, aunque la cantidad de oxígeno presente en la atmósfera en este tiempo, no es suficiente para inducir el proceso de maduración de los frutos.

## 5.6 RESULTADOS DE LOS ANALISIS FISICOQUIMICOS

pH, Actividad de agua, °Brix, Humedad, Grasa, Proteína por Kjeldhal

**Fecha de Análisis:** 17 de Diciembre – 21 de Diciembre de 2012

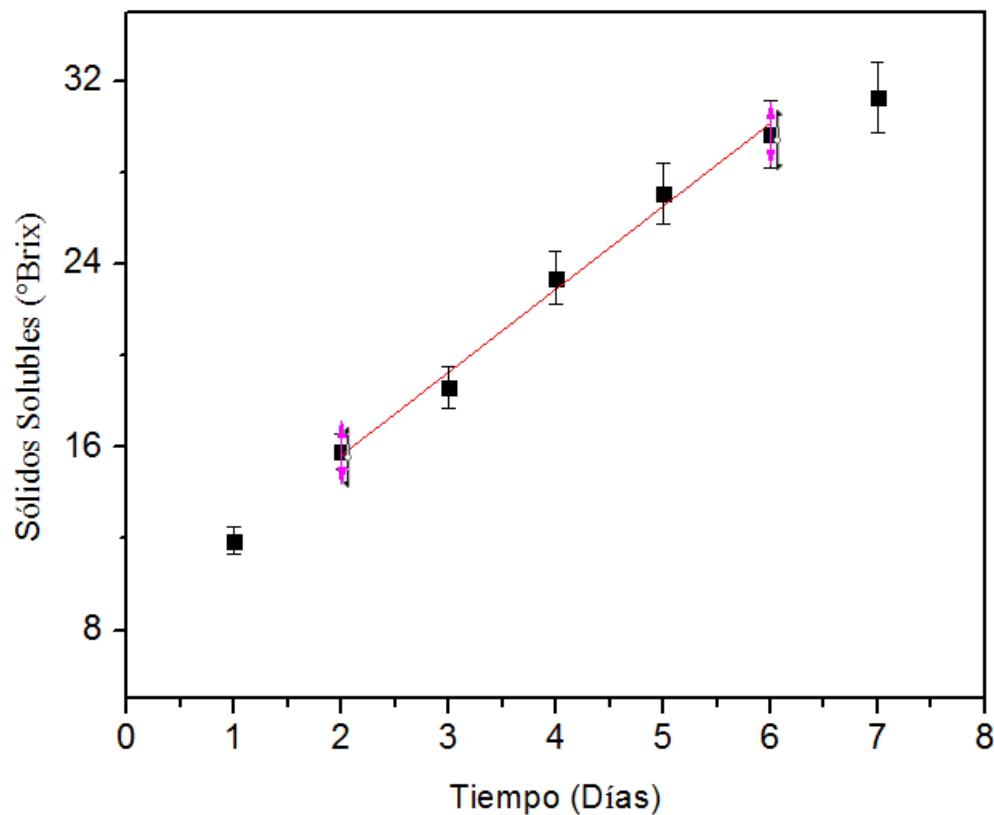
*Tabla 6. Resultados de las mediciones de pH, actividad acuosa  $a_w$ , Concentración de sólidos solubles, en muestras de plátano en atmósfera controlada.*

ANÁLISIS	PLÁTANO EN O <sub>2</sub>	PLÁTANO CONTROL	MÉTODO
	RESULTADO ± 0.05	RESULTADO ± 0.05	
<b>Ph</b>	5.63	5.32	AOAC 10.041/84
<b>a<sub>w</sub></b>	0.90	0.90	Método Instrumental
<b>°Brix</b>	20.2%	30.1%	Método Refractométrico
<b>Grasa</b>	0.1%	0.06%	NTC 668
<b>Humedad</b>	60.96%	60.13%	AOAC 969.38 B
<b>Proteína*</b>	2.80 %	2.80%	AOAC 978.04

\*El porcentaje de proteína se tomó en base seca, el factor utilizado fue de 6.25, el cual se toma para todos los otros alimentos similares.

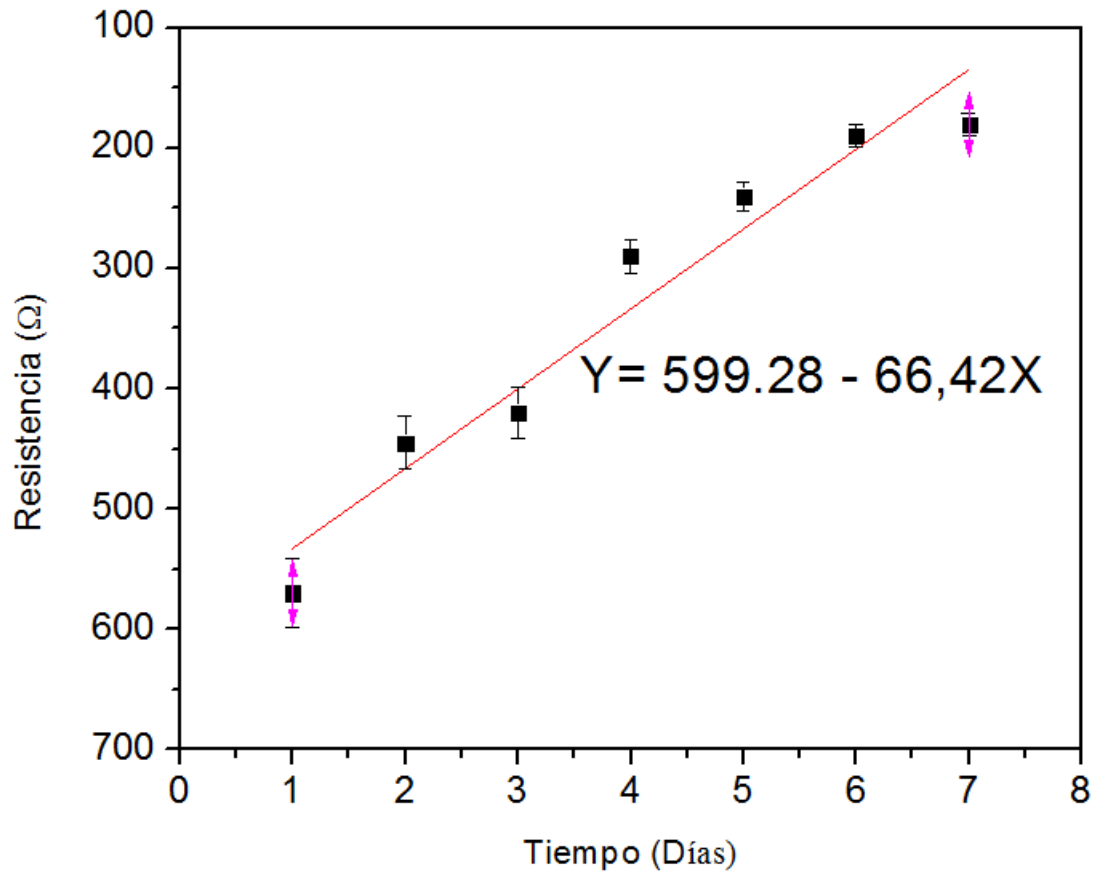
La determinación de sólidos solubles (°Brix) se hizo según el método 932.12/90 de la norma internacional A.O.A.C (1995). Para tal efecto, se realizó un macerado de la pulpa del plátano, que fue filtrado para medir el contenido de sólidos solubles totales (S.S.T.), con refractómetro en una escala de 0 - 30% y corrección por temperatura y acidez (Icontec-NTC4086, 1996), de acuerdo con la relación:  $S.S.T. \text{ corregido} = 0.194 * A + S.S.T.$ , donde  $A$  es el porcentaje de ácido málico.

A medida que incrementó el estado de maduración del fruto igualmente aumentó el contenido de sólidos solubles (°Brix). Este incremento se explica por la degradación del almidón, que se desdobra en azúcares, principalmente glucosa, fructosa y sacarosa [33], que son los constituyentes principales de los sólidos solubles.



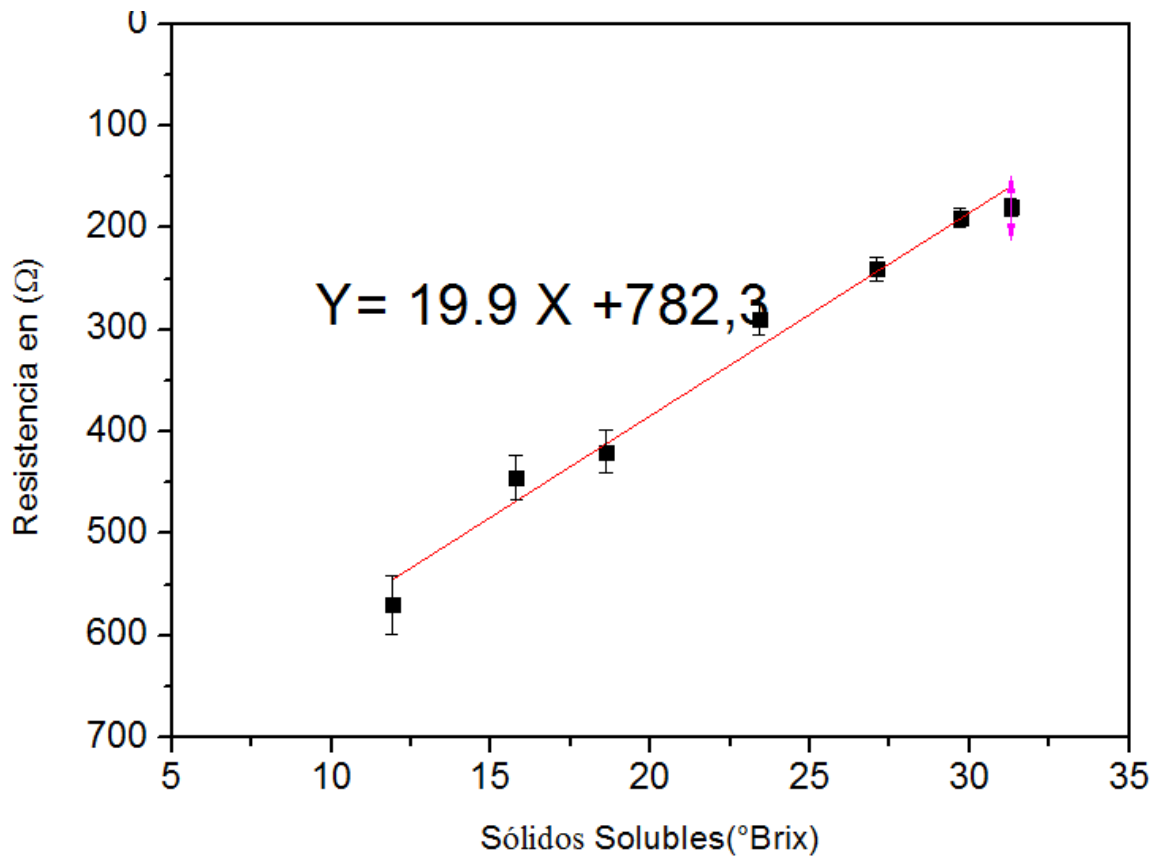
Gráfica 11. Sólidos solubles en función del tiempo de maduración.

En la gráfica 11, se muestra el comportamiento de la concentración de sólidos solubles en función del tiempo de maduración de los frutos de plátano, evidenciando un comportamiento lineal entre el tercer y sexto día, aproximadamente.



Gráfica 12. Resistencia eléctrica en función del tiempo de maduración.

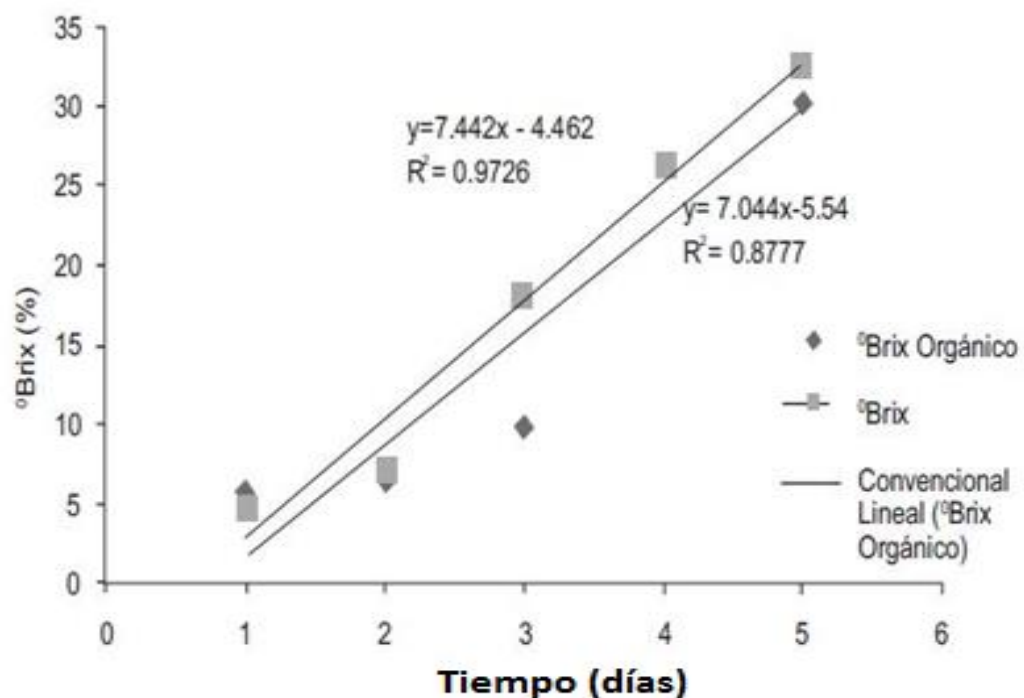
En la gráfica 12, se puede observar la sistemática disminución de la resistencia eléctrica en función del tiempo de maduración de las muestras de plátano, originada por la oposición que ofrece el medio celular al flujo de las diferentes especies iónicas que pueden desplazarse respecto de posiciones de equilibrio o migrar a través de la estructura celular.



Gráfica13. Resistencia eléctrica en función de los sólidos solubles

En la gráfica 13, se presenta el comportamiento de la resistencia eléctrica en función de la concentración de sólidos solubles, el cual como se espera según las gráficas 11, 12, resulta ser lineal. El análisis de los datos sugiere que durante el proceso de maduración del plátano se producen sustancias iónicas cuya concentración cambia con el tiempo, encontrándose que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional a la concentración de sólidos solubles totales (grados °Brix) que se producen en función del tiempo de maduración de las muestras. La hipótesis que se presenta es que al aumentar el tiempo de maduración, el desdoblamiento de almidones en azúcares favorece el movimiento de las especies iónicas en el medio celular, posiblemente debido a la interacción electrostática entre dichas especies, las cuales presumiblemente incrementan su número con el tiempo de maduración.

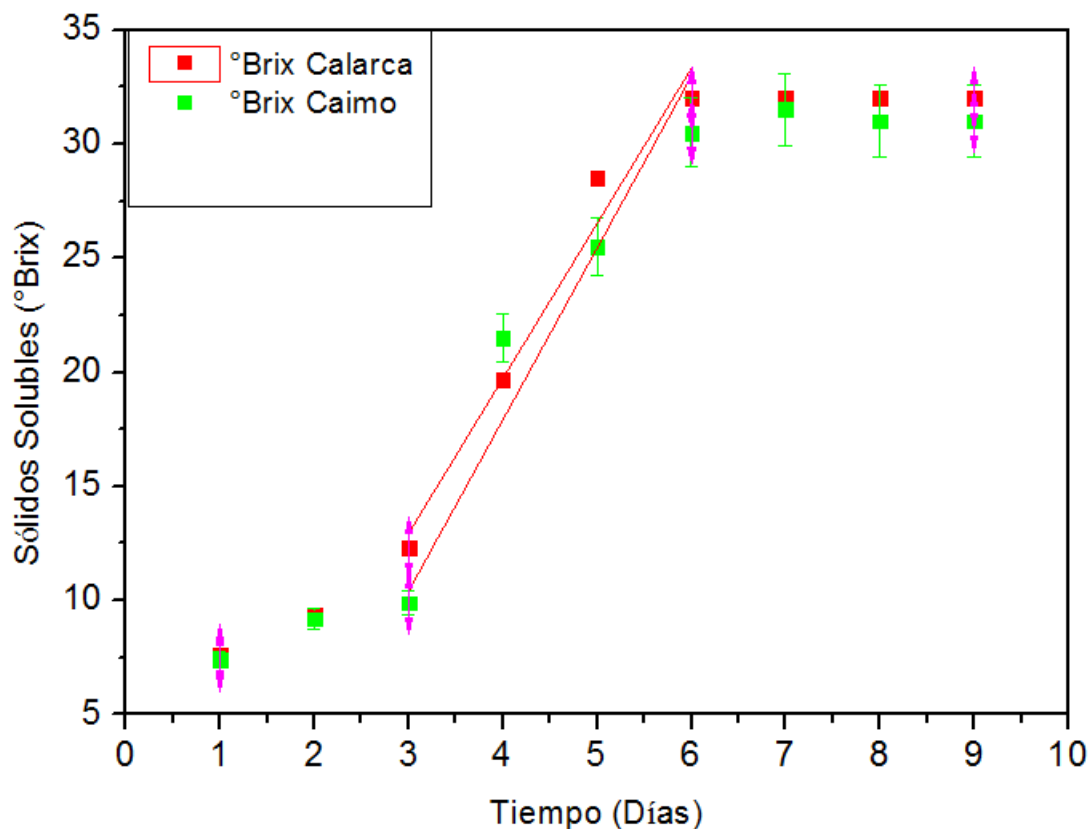
Los valores de impedancia eléctrica fueron obtenidos de los diagramas de Nyquist (ver gráfica 7). Nótese que al igual que para la obtención de los grados °Brix, las mediciones de resistencia corresponden también a un valor para cada día. Al graficar la resistencia eléctrica como función sólidos solubles (Gráfica 13), las líneas continuas corresponden a ajustes lineales efectuados con la aplicación Origin V 8.0. El eje de la resistencia eléctrica se ha invertido para mostrar la similitud de las pendientes con respecto a los reportes experimentales (gráfica 14).



Gráfica 14. Sólidos solubles en función del tiempo de maduración reporte teórico

La gráfica 14, muestra el comparativo de los reportes experimentales de la concentración de los sólidos solubles totales en función del tiempo de maduración, para dos clases de cultivo: una muestra convencional la cual fue abonada con químicos convencionales (Urea, Potasio, Nitrógeno) y una segunda muestra, la cual fue cultivada utilizando abono natural orgánico. Se presentan también las expresiones  $Y = 7,442X - 4.462$  y  $Y = 7.004X - 5.54$  que describen la función de maduración de los frutos, en el intervalo de tiempo comprendido entre el tercer y el

sexto día, además presenta un factor de calidad denominado  $R^2$  que indica la desviación de los datos en un intervalo de (0- 1), siendo de mayor precisión cuanto más próximo sea el factor a 1.



Gráfica 15. Sólidos solubles en función del estado de maduración, de frutos de diferentes fincas.

En la gráfica 15, se muestra la concentración de sólidos solubles (°Brix) en función del tiempo de maduración en días, de muestras cosechadas en dos fincas de la región de diferentes pisos térmicos. Como se puede observar teniendo en cuenta los márgenes de error (5%) en la toma de medidas, las pendientes de las líneas son aproximadamente iguales y Las expresiones  $Y = 7,76 + 6,58X$  y  $Y = 7,4 + 6,7X$ , corresponden a las funciones de maduración de los frutos en el intervalo (3-6) días donde como se mencionó, se presenta el comportamiento lineal en la gráfica.



## 6. *CONCLUSIONES*

- Los procedimientos a que fueron sometidas las muestras evidenciaron que la mejor manera de obtener información de las propiedades eléctricas de estos sistemas, fue al utilizar electrodos de oro en una disposición bien definida para la aplicación del campo eléctrico.
- Las respuestas bioquímicas de las muestras ante los cambios en la concentración de etileno, pueden controlarse regulando su producción o inhibiendo su acción, favoreciendo o retardando el proceso de maduración.
- Los resultados de las pruebas en la campana de desecado donde las muestras estuvieron sometidas al natural proceso de respiración, evidencian que se genera una mayor concentración de CO<sub>2</sub> en la campana, lo que conduce a que la maduración de los frutos se retarde hasta en 22 días.
- Se encontró que la resistencia eléctrica en los frutos de plátano, es inversamente proporcional a la concentración de sólidos solubles totales (grados °Brix), que se producen en el sistema en función del tiempo de maduración.
- Como resultado de la observación y del análisis de los datos, mediante éste proyecto, se ha desarrollado una técnica experimental que permite evaluar o controlar el estado de maduración del plátano midiendo la resistencia eléctrica.

## *7. PUBLICACIONES Y PARTICIPACIÓN EN EVENTOS*

- Escuela Nacional de Espectroscopia de Impedancia Compleja, Septiembre de 2012. Proceso de Maduración del Plátano usando la Técnica de Impedancia Eléctrica. J.J. Álzate Loaiza Autor<sup>2</sup> H. Correa<sup>1</sup>
- Escuela de Materia Condensada, Octubre de 2012. Estudio del Proceso de Maduración del Plátano usando la técnica de impedancia eléctrica. J.J. Álzate Loaiza Autor<sup>2</sup> H. Correa<sup>1</sup>
- XXV Congreso Nacional de Física, Agosto de 2013. Caracterización poscosecha de frutos de plátano mediante la técnica de impedancia eléctrica y análisis bromatológico.
- II congreso Internacional de investigación e innovación en ingeniería ciencia y tecnología de alimentos, Mayo 27 -30 de 2014 Medellín.

## 8. *REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA*

- [1] El cultivo del plátano en altas densidades de siembra, una nueva concepción tecnológica de producción. <http://www.ica.gov.co/eventos-memorias/institucionales/2012/documentos/conferencia-dr--sylvio-belalcazar-carvajal.aspx>. (Visitado julio 6 de 2013).
- [2] Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006) “La cadena de plátano en Colombia”. Observatorio Agrocadenas Colombia. Documento de trabajo. (102), 2.
- [3] Guía Exportación Plátanos para el Mercado de Estados Unidos. [http://www.iica.int.ni/Estudios\\_PDF/Export\\_Platano.pdf](http://www.iica.int.ni/Estudios_PDF/Export_Platano.pdf) (Visitado julio 9 de 2013).
- [4] Arcila, M.; Giraldo, G.; y Duarte, J. (2000). Influencia de las condiciones ambientales sobre las propiedades físicas y químicas durante la maduración del fruto de plátano Dominico-Hartón (Mussa ABB Simonds) en la zona cafetera central. En: Cayón, G. (ed.). Poscosecha y agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Comité de Cafeteros del Quindío. Universidad del Quindío. Asiplat-Colciencias, Fudesco. Armenia (Colombia). p. 101-124.
- [5] Manejo pos-cosecha del plátano, programa nacional de transferencia de tecnología agropecuaria. <http://www.agronet.gov.co/www/docssi2/Manejo%20poscosecha%20del%20platano.pdf> (visitado julio 9 de 2013).
- [6] Icontec (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación) (1996). Bogotá D.C. Normas Técnicas Colombianas NTC 1190.

- [7] Arcila M. I., Giraldo G, Belarcazar S, Cayón G. y Méndez J C. "Comportamiento pos-cosecha de los plátanos dominico Hartón y FHIA 21 en diferentes presentaciones". Memorias del seminario internacional sobre la producción de plátano. Armenia, Quindío, Colombia, del 4 al 8 de mayo de 1998. p. 256 – 260.
- [8] Germán Giraldo Giraldo, Claudia L García W, Hernando Hurtado, Carlos Mendivil (2006). "Cinética enzimática de la polifenol oxidasa del banano GrosMichel en diferentes estados de maduración". En: Colombia Vitae *ISSN: 0121-4004 ed: Editorial Universidad de Antioquia v.13 fasc.2 p. 13 - 19.*
- [9] Germán Giraldo Giraldo, María Isabel Arcila, Gerardo Cayón Salinas (2000). "Cambios físicos durante la maduración del fruto de plátano dominico hartón (Musa AAB Simmonds) asociados con el clima de la región cafetera central colombiana segunda parte". En: Costa Rica Corbana *ISSN: 1409-0031 ed: v.26 fasc.53 p. 21 – 33.*
- [10] Secretaria de Agricultura, Gobernación del Quindío, Nov 2013., Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), (2002). Acuerdo de competitividad de la cadena del plátano en la región centro occidente de Colombia, Documento Fondo Nacional del fomento Hortofrutícola, Armenia, p. 9-6.
- [11] Giraldo Giraldo, Germán; Duque, Alba Lucia, Jiménez, Martha Lucía (2003). "Comportamiento fisicoquímico y enzimático en la poscosecha del plátano dominico hartón (musa AAB Simmonds) en estado verde". En: Colombia Revista De Investigaciones Universidad del Quindío *ISSN: 1794-631X ed: Editorial Universidad Del Quindio v.4 fasc.13 p.139 - 146.*

- [12] Giraldo Giraldo, Germán; J A Gutiérrez Gómez A. (2007). "Tratamiento de Conservación del Banano (Gross Michel) por el Método Combinado de Impregnación a Vacío y Secado con Aire Caliente". En: Colombia Revista De Investigaciones Universidad del Quindío *ISSN: 1794-631X* ed: Editorial Universidad del Quindío v. 17 *fasc.* p. 9 - 17.
- [13] Estudio y medición In-Vivo de las características dieléctricas mediante espectroscopia de impedancia compleja en frutos de pitahaya amarilla, por: Henry Andrés Cortés Páez Universidad del Quindío, programa de física. Armenia Quindío, p. 7-20.
- [14] Aránzazu Sanchis Otero (2009). Aplicación de la Dielectroforesis a la Caracterización Dieléctrica de Células, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense, Madrid España.
- [15] H.P. Schwan (1994). Electrical properties of tissues and cell suspensions. *Adv Biol. Medphys* 5.
- [16] G.P. Drago, S. Ridella (1982). Evaluation of electrical fields inside a biological structure. *Br. J. Cancer*.
- [17] Cole KS y Cole RH (1941). Dispersion and Absorption in Dielectrics. 1. Alternating Current Characteristics. *Journal of Chemical Physics* 9: 341.
- [18] W.D. Hurt. Multiterm Debye (1985). Dispersion Relations for permittivity of muscle. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*. p. 60-64.
- [19] R. Pething (1994). Dielectric properties of tissues. *Clinical physics and physiological measurement*. p. 147 – 209.



- [20] Foster, K. and Schwan (1996). Dielectric Properties of tissues. In Polk, C.A.P, E (Ed) Handbook of Biological Effects of Electromagnetics Fields. Boca Raton: CRC Press, p. 25-102.
- [21] Alvarado, Juan de Dios; Aguilera, José Miguel. Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. Edit. Acribia S.A., p. 347-353.
- [22] L. Wu Y. Ogawa. Tagawa. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing – freezing treatments on its impedance characteristics.
- [23] Sverres Grimes and Orjan Grottnens. (2008) Bioimpedance and bioelectricity basics, 2<sup>nd</sup> edition, p. 57-64.
- [24] [https://www.google.com.co/search?espv=210&es\\_sm=93&site=img&source=hp&biw=1366&bih=659&q=membrana+plasmatica&oq](https://www.google.com.co/search?espv=210&es_sm=93&site=img&source=hp&biw=1366&bih=659&q=membrana+plasmatica&oq).
- [25] Bourne, J.R. Morucci, J.P. Valentinuzzi . M.E., Rigaud B. Felice, C.J. Cahauveau, N., Marsili, P.M. (1996); Bioelectrical Impedance techniques in Medicine, Critical reviews in Biomedical Engineering, Vol. 24 Issue 4-6.
- [26] G.P. Drago, M. Marchesi, S. Ridelle. (1984). The frequency dependence of an analytical model F and electrically simulated biological structures. Bioelectromagnetics.
- [27] J. R. Scully, D. C, Silverman, M.W. Kending (1999) (editions) electrochemical Impedance Analysis and Interpretation, ASTM, STP, 1188. USA.

- [28] Bord A. J. Faulkner L. (1980). *Electrochemical Methods, fundamentals and application*, John Wiley and Sons; Singapore.
- [29] Masot P. Rafael (2010). *Desarrollo de un sistema de medida basado en espectroscopia para determinación de parámetros fisicoquímicos en alimentos*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia España.
- [30] L. A. Geddes, L. E. Baker. (1989) *Principles of applied biomedical instrumentation*. Wiley – Inter science.
- [31] E. García – Breija. (2004) *Diseño de un sistema multisensor en tecnología THICK – FILM; fabricación, caracterización y estudio de su aplicabilidad a parámetros químicos*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.
- [32] Duque A., Bohórquez Y., (2000). *Modelo para la determinación de pérdidas pos-cosecha del plátano Dominico-Hartón (Musa ABB Simmonds) Producido en el Departamento del Quindío. Pos-cosecha y Agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia*. Corpoica, Universidad del Quindío, ASIPLAT, Comité Departamental de cafeteros del Quindío, COLCIENCIAS, Fudesco, Armenia, p. 153-158.
- [33] Villamizar F. (2001) “*Manejo tecnológico postcosecha de frutas y hortalizas*”. Manual de prácticas. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, p. 16-22.
- [34] Gallo F. (1997) “*Manual de fisiología, patología poscosecha y control de calidad en frutas y hortalizas*”. Armenia, Colombia, SENA.
- [35] Giraldo Giraldo Germán, María I Arcila P, Francisco Torres, Gerardo Cayón Salinas. (1998) “*Cambios físicos durante la maduración del fruto de plátano*”

dominico hartón (Musa AAB Simmonds) asociados con el clima de la región cafetera central colombiana primera parte". En: Colombia Corbana ISSN: 1409-0031 Ed: v.23 fasc.49 p.57 – 68.

- [36] Giraldo Giraldo Germán; Claudia L García W, Hernando Hurtado, Carlos Mendivil. (2006) "Cinética enzimática de la polifenol oxidasa del banano GrosMichel en diferentes estados de maduración". En: Colombia Vitae ISSN: 0121-4004, Editorial Universidad de Antioquia. v.13 fasc.2, p. 13 –19.
- [37] Arrieta A J. Ubaldo M. Barrera J L. (2006) "Caracterización físico-química del proceso de maduración del plátano 'Popocho'(Musa ABB Simmonds) 24(1), 48-53.
- [38] Comisión Veracruzana de Comercialización Agropecuaria. Monografía del plátano. p. 8-9.
- [39] <http://www.accuweather.com/es/co/la-tebaida/111212/weather-forecast/111212>

## 9. *ANEXOS*

Anexo 1.  
**ESTUDIO DEL PROCESO DE MADURACIÓN DEL PLÁTANO USANDO LA  
TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA.**

J.J. Alzate Loaiza Autor<sup>2</sup> H. Correa

*Universidad del Quindío  
Instituto Interdisciplinario de las Ciencias  
Grupo de Propiedades Térmicas y Eléctricas*

*Autor correspondiente:josejalzate@gmail.com*

En Colombia los sistemas de administración post cosecha de los diferentes frutos, han venido cobrando relevancia dada la vocación agrícola de la nación y especialmente en lo referente al manejo y comercialización del plátano, actividad económica de primer renglón en varios Departamentos del país lo cual necesita de una estandarización en el proceso de maduración que le permita ser más competitivo debido al corto tiempo de disponibilidad de excelentes productos para el usuario final.

En el presente trabajo se estudió la incidencia de la movilidad iónica en un sistema biológico como lo es el vástago del plátano, en su proceso de maduración. Para ello se tomaron varias muestras las cuales fueron cosechadas y dispuestas para realizar las mediciones en condiciones óptimas en cuanto al manejo de la temperatura y la humedad, tomando estos parámetros como variables de gran incidencia en la caracterización y tratamiento post cosecha de los frutos. Se realizaron mediciones de impedancia eléctrica sobre las muestras a intervalos de tiempo que permitieran minimizar el estrés de estas debido a la presencia de los electrodos.

La evidencia experimental muestra que durante el proceso de maduración del plátano se producen sustancias iónicas cuya concentración varía con el tiempo; diagramas de Nyquist construidos a partir de mediciones de impedancia muestran que la resistencia eléctrica cambia sistemáticamente con el tiempo al cambiar la concentración de etileno ( $C_2H_4$ ).

Palabras clave: Impedancia, Maduración del plátano, Etileno

Modalidad de la presentación Poster.

Anexo 2.  
Certificación X Escuela Nacional de Física



**Certifican que:**

*José Jesús Alzate Loaiza*

C.C. 7.541.680

Asistió a la

**X ESCUELA NACIONAL DE FÍSICA DE LA MATERIA CONDENSADA**

Realizada en la ciudad de Manizales del 10 al 12 de Octubre de 2012

Manizales, 12 de octubre de 2012

CARLOS VARGAS HERNÁNDEZ  
DIRECTOR DEL EVENTO

HERNANDO ARIZA CALDERÓN  
VICEPRESIDENTE SCF

Anexo 3.

**CARACTERIZACIÓN POS-COSECHA DE FRUTOS DE PLÁTANO MEDIANTE LA TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA Y ANÁLISIS BROMATOLÓGICO**

JJ Alzate L.<sup>1</sup>, Germán Giraldo G.<sup>3</sup>, Ángela Viviana Alzate C.<sup>2</sup>, H. Correa<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratorio de Propiedades Térmicas y Eléctricas, Instituto Interdisciplinario de las Ciencias, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

<sup>2</sup>Programa de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

<sup>3</sup>Laboratorio de Investigación de Diseño de Nuevos productos, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.

El departamento del Quindío, anualmente aporta más de 300.000 toneladas de plátano a la producción nacional, constituyéndose en el 15% de la actividad económica local. En este trabajo se estudió la incidencia de la movilidad iónica sobre el proceso de maduración en el fruto y el vástago del plátano. Se realizaron medidas de impedancia sobre muestras de frutos de plátano verde a intervalos de tiempo de un día, en atmósfera de aire a temperatura ambiente. En las muestras se realizó análisis bromatológico, colorimetría, respiración y se dispusieron en cámaras de desecado en atmosfera de aire para evidenciar el proceso de maduración en el tiempo a medida que la atmósfera de la cámara se enriquece con CO<sub>2</sub>. La evidencia experimental muestra que durante el proceso de maduración del plátano se producen sustancias iónicas cuya concentración varía con el tiempo; diagramas de Nyquist construidos a partir de mediciones de impedancia muestran que la resistencia eléctrica cambia sistemáticamente con el tiempo al cambiar la concentración de etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), gas carbónico y de los sólidos solubles (° Brix). Se evidencia que los restringidos niveles de oxígeno en la cámara, debido al proceso natural de respiración que enrarece la atmósfera con CO<sub>2</sub>, inhiben la producción de etileno, retardando la maduración hasta en cuatro semanas. Los datos experimentales muestran que el tiempo de maduración es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica, por lo tanto se dispone de una técnica para evaluar el estado de madurez midiendo la resistencia eléctrica.

Palabras claves: Impedancia eléctrica, análisis bromatológico, Maduración del plátano.

Modalidad: Poster.

Anexo 4.  
Certificación XXV Congreso Nacional de Física



Certifica que:

**JOSÉ JESÚS ALZATE LOAIZA**

participó en el XXV Congreso Nacional de Física realizado del 25 al 29 de agosto de 2013 en el Centro de Convenciones, Armenia - Quindío.



HERNANDO ARIZA CALDERÓN  
Director



Universidad  
Tecnológica  
de Pereira





Anexo 5.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

II CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN  
INGENIERÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS  
IICTA - 2014

IICTA 225-2014

Medellín, 6 de abril de 2014

AUTORES

JJ ALZATE L

GERMÁN GIRALDO G

ÁNGELA VIVIANA ALZATE C.

H. CORREA

**Asunto:** Aceptación artículo IICTA 2014.

Estimados autores, cordial saludo.

A través de la presente, agradecemos su interés en participar en el II Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Alimentos, IICTA 2014, que se llevará a cabo en el Jardín Botánico de Medellín, Colombia, del 27 al 30 de mayo de 2014.

Me permito informarle que el comité científico del IICTA 2014 aceptó el artículo identificado con código **AT4-GiraldoGA2**, "*DETERMINACION DEL TIEMPO DE MADURACION DEL PLÁTANO DOMINICO HARTON POR LA TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA*". Debido a la gran afluencia de artículos presentados, al finalizar todo el proceso de evaluación se informará la modalidad de presentación.

Agradeciendo su atención,

**MISAEAL CORTÉS RODRÍGUEZ**

Presidente IICTA 2014

Teléfono: 57 (4) 430 9070,

E-mail: [iicta2014\\_med@unal.edu.co](mailto:iicta2014_med@unal.edu.co) [mcortesro@unal.edu.co](mailto:mcortesro@unal.edu.co)

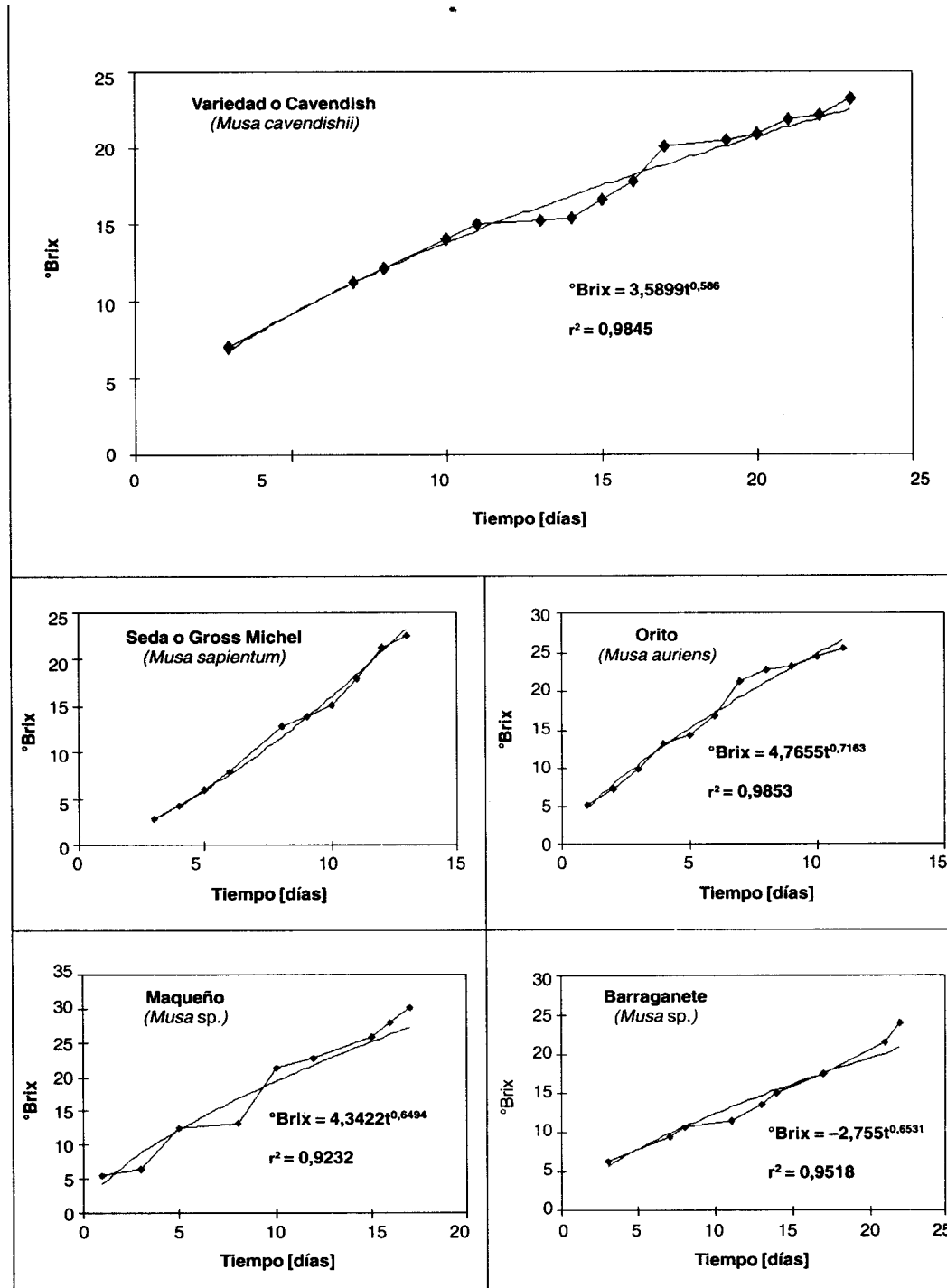
**INNOVACIÓN, DESARROLLO Y BIENESTAR: DESAFÍOS DEL SECTOR ALIMENTARIO**

Calle 59A No. 63 - 20, Autopista Norte, Bloque 52, piso 3, oficina 304  
**Teléfono:** (57-4) 430 90 70 **Fax:** (57-4) 430 91 47 **Conmutador:** (57-4) 430 90 00 Ext: 49147  
**Correo electrónico:** [iicta2014\\_med@unalmed.edu.co](mailto:iicta2014_med@unalmed.edu.co)  
Medellín, Colombia, Suramérica

Anexo 6.  
Certificación II Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería



## Anexo 7.



Acumulación de azúcares registrada por medida del índice de refracción durante la maduración de bananos y plátanos.

## Anexo 8.

### **ESTUDIO DE LA MADURACIÓN DE PLÁTANO DOMINICO HARTÓN POR LA TÉCNICA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA**

JJ Alzate L.<sup>1</sup>, Germán Giraldo G.<sup>3</sup>, Ángela Viviana Alzate C.<sup>2</sup>, H. Correa<sup>1</sup>

#### **Resumen**

En este trabajo se estudió la incidencia del proceso de maduración en el fruto y el vástago del plátano sobre la movilidad de las especies iónicas presentes. Para ello se tomaron muestras, las cuales fueron cosechadas y dispuestas para realizar medidas de impedancia eléctrica a temperatura ambiente y atmósfera de aire, como función del tiempo. Se realizaron medidas de impedancia eléctrica sobre las muestras a intervalos de tiempo de un día, tiempo suficiente para minimizar el estrés, debido a la presencia de los electrodos. En las muestras se realizó análisis bromatológico, para establecer la concentración de sólidos solubles. La evidencia experimental muestra que durante el proceso de maduración de plátano, se producen sustancias iónicas cuya concentración varía con el tiempo; diagramas de Nyquist contruidos a partir de mediciones de impedancia muestran que la resistencia eléctrica es inversa a la concentración de sólidos solubles, mientras que la concentración de éstos cambia linealmente con el tiempo al variar la concentración de etileno ( $C_2H_4$ ) y gas carbónico. Los resultados sugieren que el estado de maduración de los frutos en el tiempo, puede ser determinado por la simple medición de la resistencia eléctrica.

**Palabras Clave: Maduración, Plátano, Grados Brix, Impedancia eléctrica.**

#### **Abstract**

In this study the incidence of maturation in the fruit and banana stem on the mobility of the ionic species present was studied. To this end samples were taken, which were harvested and prepared for electrical impedance measurements at room temperature and atmospheric air temperature as a function of time. Electrical impedance measurements on the samples at time intervals of a day, sufficient time to minimize stress due to the presence of the electrodes. In samples compositional analysis was performed to establish the concentration of soluble solids. Experimental evidence shows that during the ripening process of banana, ionic substances are produced whose concentration varies with time; Nyquist constructed from impedance measurements show that the electrical resistance is the inverse of the concentration of soluble solids, whereas the concentration of these changes linearly with time to vary the concentration of ethylene ( $C_2H_4$ ) and carbon dioxide. The results suggest that the state of ripening of fruits in her time, can be determined by simply measuring the electrical resistance.

Keywords: Maturation, Banana, Brix, Electrical impedance.

## **Introducción**

El plátano es el cuarto cultivo más importante del mundo, es considerado un producto básico y de exportación, fuente de empleo e ingresos en numerosos países en desarrollo. El plátano Dominico-Hartón al recolectarse contiene almidón (textura fuerte, es insaboro y astringente), su color verde se debe a la clorofila, durante la maduración esta se degrada y el almidón se transforman en glucosa, fructosa y aromas, [1]. [2]. Estos parámetros permiten determinar el tiempo adecuado de cosecha mediante análisis físicos-químicos y/o bromatológicos [3]. Mediante este trabajo se ha determinado que el estado de maduración e incremento de sólidos solubles, está correlacionado con los valores de resistencia eléctrica que cambian con el tiempo de maduración. La impedancia eléctrica es una medida de la oposición que encuentra la corriente eléctrica alterna (AC) al atravesar un medio. Esta propiedad está dada en función de la frecuencia del potencial aplicado y es una característica de cada sistema. En materiales biológicos, por ejemplo, las bicapas dieléctricas de las células (membrana) y sus inherentes reactancias capacitivas son caracterizadas por la distribución de sus tiempos de relajación eléctrica. La respuesta dieléctrica de una célula heterogénea puede variar sustancialmente dependiendo del tipo de iones presente, y de las características y naturaleza de los electrodos. Un tejido biológico puede modelarse, desde un punto de vista estructural, como la agrupación de una serie de elementos denominados células, que están inmersas en un medio iónico denominado medio extracelular. Así mismo, en el interior de la célula, medio intracelular donde tienen lugar los procesos metabólicos del sistema biológico existe una concentración de fluidos, tejidos e iones.

## **Metodología**

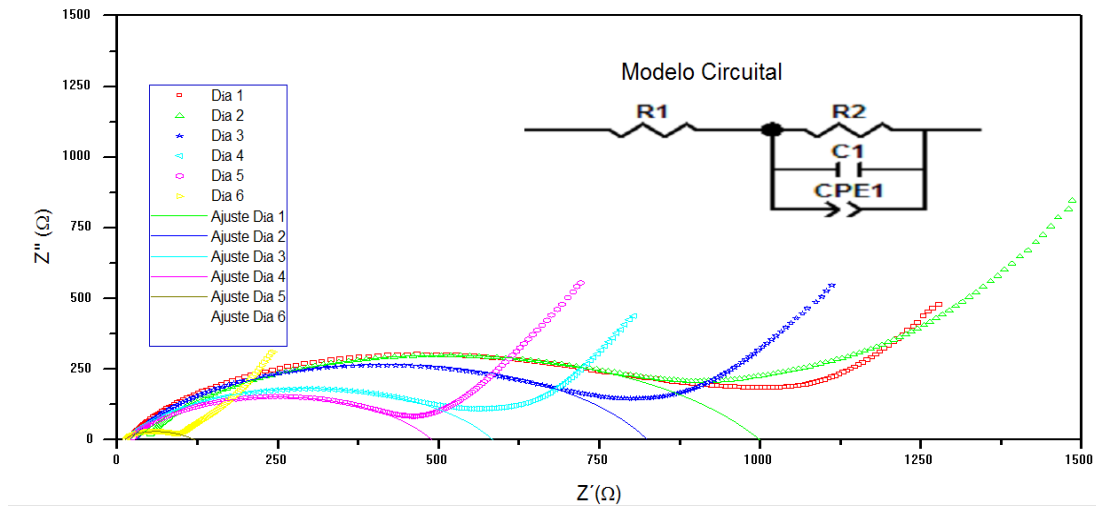
La selección de las muestras se realizó con base en las características de luminosidad, pluviosidad, condiciones topográficas y tipologías del suelo. Las muestras seleccionadas se les efectuaron medidas de impedancia eléctrica utilizando electrodos plano-paralelos de oro, en atmósfera de aire. Los espectros de las medidas obtenidos, mostraron consistencia y reproducibilidad y una actividad electroquímica casi nula. Simultáneamente se efectuaron estudios de los procesos físico-químicos de las muestras, tomando análisis bromatológico de éstas, con lo cual se evidenciaron cambios en la concentración de los sólidos solubles como función del tiempo de cosechado.

Para la toma de medidas de impedancia, se colocaron las muestras en un multifrecuencimetro HIOKY con disponibilidad de barrido en frecuencia de hasta cinco Mega Hertz y con un voltaje de 100 milivoltios y una separación entre las placas de los electrodos de 1 mm. Se censó la impedancia eléctrica a intervalos de tiempo de un día, este parámetro de tiempo fue tomado como estándar, después de las pruebas iniciales, al observar que a intervalos de tiempo más pequeño se presentaba un alto estrés, debido a que los electrodos perforaban notablemente las muestras. Los espectros de impedancia

obtenidos se modelaron a través de circuitos equivalentes y fueron analizados utilizando la aplicación Zview2 y ajustados usando la aplicación Origin 8.0.

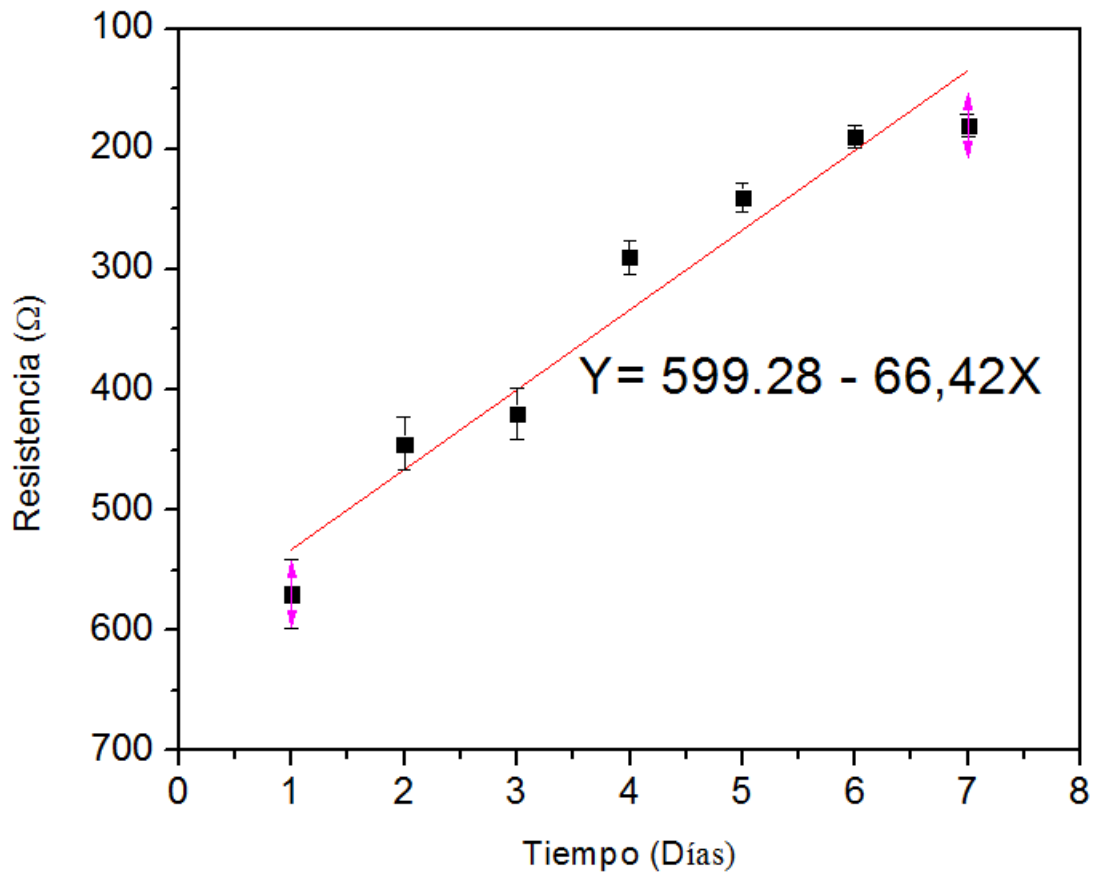
## Resultados

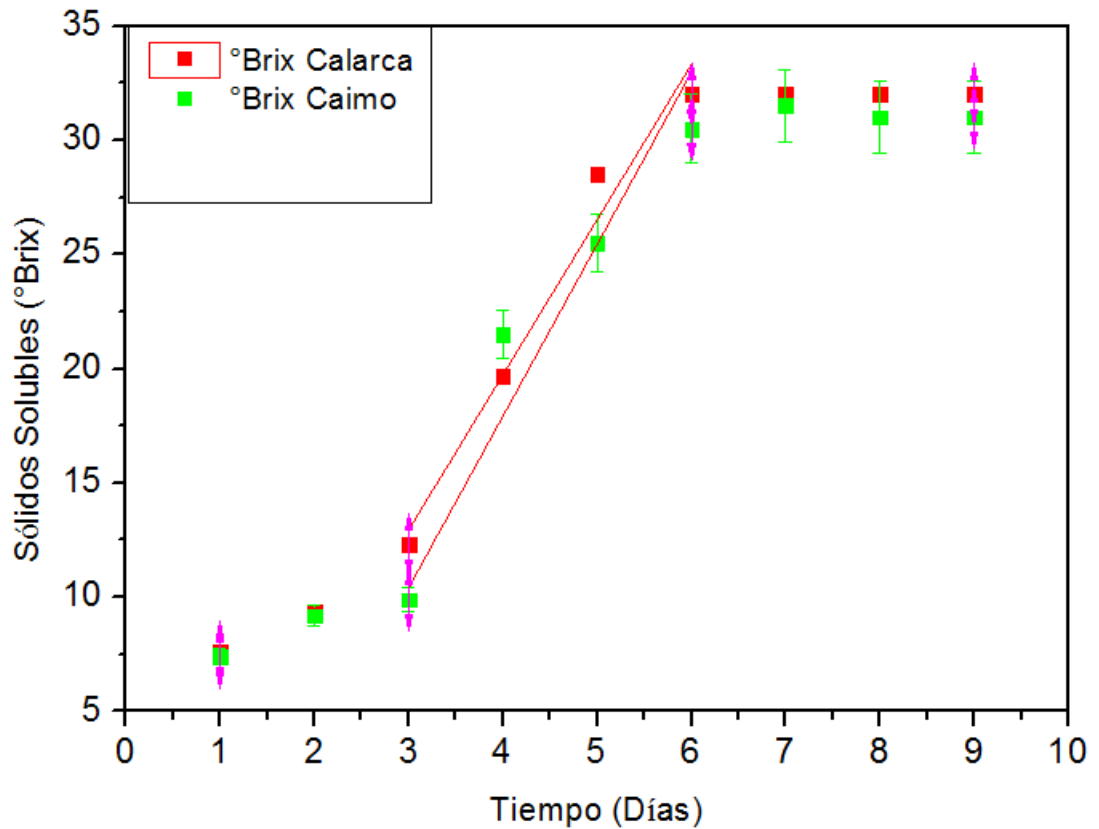
En la gráfica 1, se muestran los espectros de las mediciones de impedancia eléctrica,



Se observa una sistemática disminución de la resistencia con el tiempo y con el aumento en la concentración de sólidos solubles. De los espectros se obtuvieron los valores de resistencia eléctrica con respecto al tiempo de maduración y a la frecuencia de excitación del campo eléctrico. Se aprecia que a bajas frecuencias hay una tendencia al aumento en la componente imaginaria de la impedancia, la cual se asocia con bloqueo de las especies iónicas en los electrodos. Se presenta también un achatamiento de las curvas, que se atribuye a procesos de difusión dispersiva de las especies iónicas en el volumen de la muestra. La intersección de las líneas sólidas con el eje real, que corresponden a las curvas de ajuste, proporcionan los valores de resistencia eléctrica que cambian sistemáticamente con el tiempo de toma de los espectros, y por tanto con el tiempo de maduración. Para determinar el valor de la resistencia eléctrica, se utiliza el modelo circuital con el que se realizaron los mencionados ajustes, notándose que hay una resistencia R1 en serie con otra resistencia R2, la cual está en paralelo con un par de condensadores C1 y CP1, el último de fase constante. Como puede observarse a bajas frecuencias, la resistencia eléctrica medida, está dada en el orden de los ohmios ( $\Omega$ ), notándose una disminución en sus valores con respecto al tiempo de maduración de los frutos.

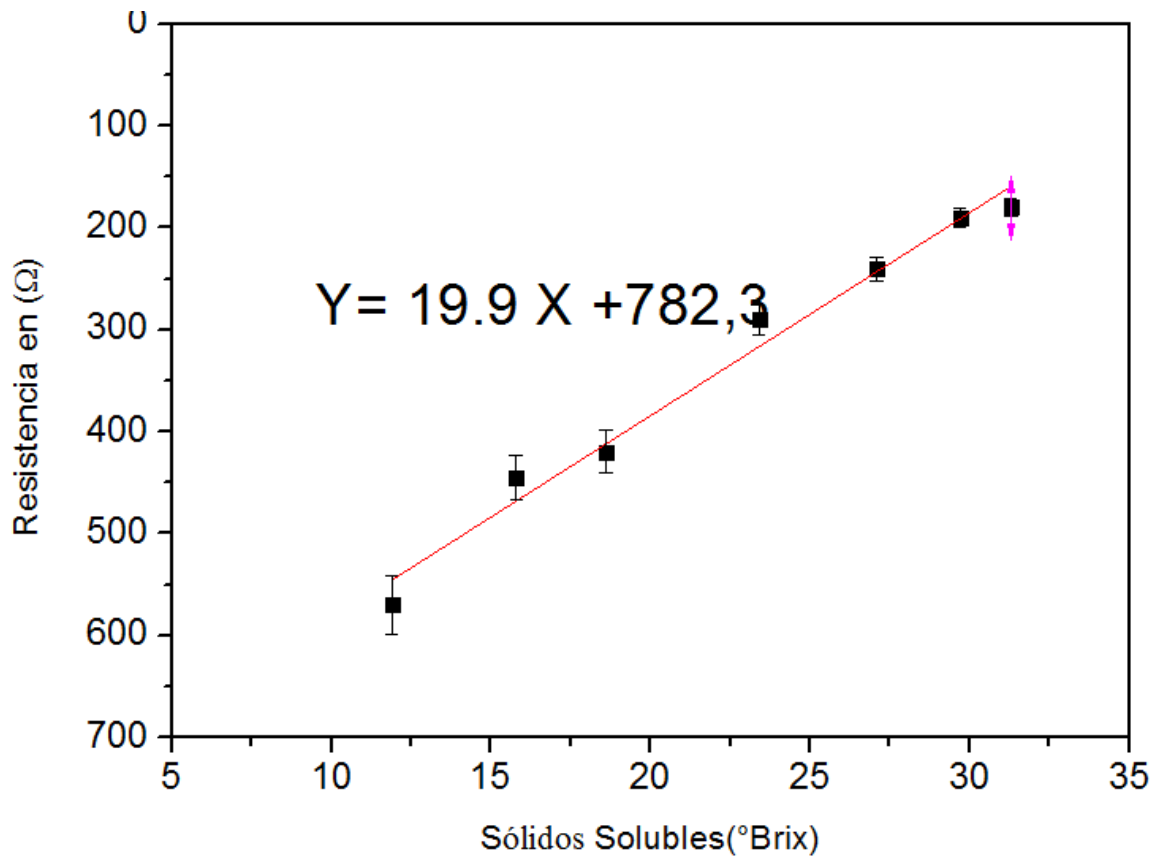
Gráfica 2a. Comportamiento de la resistencia eléctrica en función del tiempo de maduración.





La línea continúa corresponde a ajustes efectuados con la aplicación Origin V 8.0. Los valores experimentales de resistencia eléctrica fueron obtenidos de los ajustes realizados a los espectros de impedancia. La Gráfica 2b presenta la relación de los sólidos solubles en función del tiempo, Los análisis físico-químicos muestran que los sólidos solubles (°Brix) en función del tiempo de maduración no presentan diferencias en muestras cosechadas en dos fincas de la región, a diferentes pisos térmicos. Lo cual sugiere que los procesos bioquímicos asociados con la maduración son independientes del lugar geográfico del cultivo.





Gráfica 3. Resistencia eléctrica en función de los sólidos solubles (Grados °Brix)

En la gráfica 3, se muestran valores de la resistencia eléctrica relacionados con los sólidos solubles. Se presenta una sistemática disminución de la resistencia eléctrica a medida que los sólidos solubles (°Brix) aumentan.

El análisis de los datos muestra que durante el proceso de maduración del plátano se producen sustancias iónicas cuya concentración cambia con el tiempo, encontrándose que la resistencia eléctrica, es inversamente proporcional a la concentración de sólidos solubles totales (grados °Brix) que se producen en función del tiempo. Se presenta la ecuación  $Y = 19X + 782.38$  que determina en procesos no destructivos los sólidos solubles de la muestra analizada.

## Conclusiones

Medidas de impedancia eléctrica en frutos de plátano, muestran que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional al tiempo de cosechado de las muestras y los análisis de sólidos solubles (grados Brix), son directamente proporcional al tiempo de maduración, con lo cual se infiere que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional a la concentración de sólidos solubles. Mediante éste proyecto, se ha desarrollado una técnica no destructiva para evaluar el estado de maduración a través de la resistencia eléctrica de los frutos.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de investigaciones de la Universidad del Quindío (proyecto 626), por su apoyo económico, al Laboratorio de pos-cosecha por la realización de los análisis bromatológicos y al laboratorio de nanoestructuras y materiales magnéticos, por la toma de medidas de impedancia eléctrica.

## Referencias.

- [1] Arcila, M.; Giraldo, G.; y Duarte, J. (2000). Influencia de las condiciones ambientales sobre las propiedades físicas y químicas durante la maduración del fruto de plátano Dominico-Hartón (Mussa ABB Simonds) en la zona cafetera central. En: Cayón, G. (ed.). Poscosecha y agroindustria del plátano en el eje cafetero de Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica). Comité de Cafeteros del Quindío. Universidad del Quindío. Asiplat-Colciencias, Fudesco. Armenia (Colombia). p. 101-124.
- [2] G. GIRALDO GIRALDO, M.I. ARCILA, G. CAYON SALINAS, (2000): "Cambios físicos durante la maduración del fruto de plátano dominico hartón (Musa AAB Simmonds) asociados con el clima de la región cafetera central colombiana segunda parte. En Costa Rica Corbana ISSN: 1409-0031 Ed: v. 26 fas. 53, p. 21-33.
- [3] G. GIRALDO GIRALDO, A.L. DUQUE, M. L. JIMENEZ, (2003): "Comportamiento fisicoquímico y enzimático en la poscosecha del plátano dominico hartón (musa ABB Simonds) en estado verde". En Colombia Revista de Investigaciones Universidad del Quindío. ISSN: 1794-631X ed. Editorial Universidad del Quindío v. 4 fasc. 13 p. 139 – 146.
- [4] G. GIRALDO GIRALDO, M. I. ARCILA P, F. TORRES, G. CAYON SALINAS (1998): "Cambios físicos durante la maduración del fruto de plátano dominico hartón (Musa AAB Simonds) asociados con el clima de la región cafetera central

colombiana primera parte". En Colombia Corbana ISSN: 1409-0031 ed. V. 23 fasc. 49, p. 57-68.

- [5] Foster, K. and Schwan (1996). Dielectric Properties of tissues. In Polk, C.A.P,E (ed) Handbook of Biological Effects of Electromagnetics Fields. Boca Raton: CRC Press, p. 25-102.
- [6] GUTIÉRREZ AMADOR, P. (2001): Propiedades Eléctricas y Magnéticas de Fronteras de Grano en Ferritas, Tesis de doctorado en Química Inorgánica, UNAM, México.