



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Uso de la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica  
para Caracterizar el Grado de Maduración de Frutas y  
Vegetales.

presentada por

**Ing. Zuleyma Lorena España Ruiz**

como requisito para la obtención del grado de

**Maestra en Ciencias en Ingeniería  
Electrónica**

Director de tesis

**Dr. José Francisco Gómez Aguilar**

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2023.

Cuernavaca, Mor.,

**23/enero/2023**

No. De Oficio:

**SAC/031/2023**

Asunto:

**Autorización de  
impresión de tesis**

**ZULEYMA LORENA ESPAÑA RUIZ  
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
P R E S E N T E**

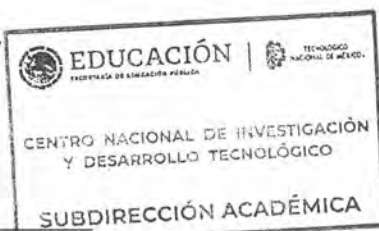
Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis TITULADO **"USO DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN LA CARACTERIZACIÓN DE FRUTAS Y VEGETALES"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**Excelencia en Educación Tecnológica®**

*"Conocimiento y tecnología al servicio de México"*



**CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA  
SUBDIRECTOR ACADÉMICO**

C. c. p. Departamento de Ingeniería Electrónica  
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/RMA



Cuernavaca,  
Mor.,  
No. de Oficio:  
Asunto:

**24/enero/2023**

**DIE/003/2023**

**Aceptación de documentos de  
tesis**

**Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Ing. Zuleyma Lorena España Ruiz, con número de control M19CE022 de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado Uso de la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica en la caracterización de Frutas y Vegetales. y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

**DIRECTOR DE TESIS**

*José Francisco Gómez Aguilar*

Dr. José Francisco Gómez Aguilar  
Doctor Física  
Cédula profesional 9124781

**REVISOR 1**

*Jarniel García Morales*

Dr. Jarniel García Morales  
Doctor en Ciencias en Ciencias en  
Ingeniería Electrónica  
Cédula profesional 11106825

**REVISOR 2**

*Juan Reyes Reyes*

Dr. Juan Reyes Reyes  
Doctor en Ciencias en la Especialidad de  
Control Automático  
Cédula profesional 4214833

C.p. Lic. Silvia del Carmen Ortiz Fuentes- Jefa del Departamento de Servicios Escolares  
Estudiante  
Expediente

HEE/mrsr

**cenidet**  
Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos  
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2224, e-mail: die\_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



2023  
Francisco  
VILLA



**LICENCIA DE USO OTORGADA POR Zuleyma Lorena España Ruiz** de nacionalidad Mexicana mayor de edad, con domicilio ubicado en calle sin nombre sin número, Col. Buenavista, San José Vista Hermosa Municipio de Puente de Ixtla, Morelos. C.P. 62490, en mi calidad de titular de los derechos patrimoniales y morales y autor de la tesis denominada **Uso de la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica en la Caracterización de Frutas y Vegetales** en adelante **"LA OBRA"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **"Zuleyma Lorena España Ruiz O José Francisco Gómez Aguilar"**, a favor del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Tecnológico Nacional de México, la cual se registrá por las clausulas siguientes:

**PRIMERA -OBJETO:** **"EL AUTOR Y/O TITULAR"**, mediante el presente documento otorga al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Tecnológico Nacional de México, licencia de uso gratuita e indefinida respecto de **"LA OBRA"**, para almacenar, preservar, publicar, reproducir y/o divulgar la misma, con fines académicos, por cualquier medio en forma física y a través del repositorio institucional y del repositorio nacional, éste último consultable en la página: (<https://www.repositorionacionalcti.mx/>).

**SEGUNDA - TERRITORIO:** La presente licencia se otorga, de manera no exclusiva, sin limitación geográfica o territorial alguna, de manera gratuita e indefinida.

**TERCERA - ALCANCE:** La presente licencia contempla la autorización para formato uso de **"LA OBRA"** en cualquier formato o soporte material y se extiende a la utilización, de manera enunciativa más no limitativa a los siguientes medios: óptico, magnético, electrónico, virtual (red), mensaje de datos o similar conocido por conocerse en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar, conocido o por conocerse.

**CUARTA - EXCLUSIVIDAD:** La presente licencia de lo aquí establecido no implica exclusividad en favor del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico; por lo tanto, **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** conserva los derechos patrimoniales y morales de **"LA OBRA"**, objeto del presente documento.

**QUINTA - CRÉDITOS:** El Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico y/o el Tecnológico Nacional de México reconoce que el **"AUTOR Y/O TITULAR"** es el único, primigenio y perpetuo titular de los derechos morales sobre **"LA OBRA"**; por lo tanto, siempre deberá otorgarle los créditos correspondientes por la autoría de la misma.

**SEXTA - AUTORÍA:** **"EL AUTOR Y/O TITULAR"** manifiesta ser el único titular de los derechos de autor que derivan de **"LA OBRA"** y declara que el material objeto del presente fue realizado por él, sin violentar o usurpar derechos de propiedad intelectual de terceros; por lo tanto, en caso de controversia sobre los mismos, se obliga a ser el único responsable. Dado en la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, a los 19 días del mes de enero de 2023.

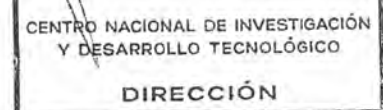
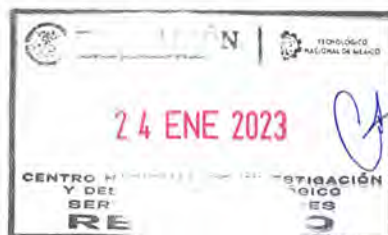
**"EL AUTOR Y/O TITULAR"**

ZULEYMA LORENA ESPAÑA RUIZ

**"EL CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO"**

DR. ARTURO ERNESTO MARES

GARIBAY  
DIRECCIÓN



---

# Agradecimientos

---

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por brindarme el sustento económico necesario para culminar mis estudios de posgrado.*

*Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por darme la oportunidad de estudiar la maestría en sus instalaciones.*

*Al Dr. José Francisco por la paciencia, dedicación, apoyo y su tiempo para poder culminar este trabajo.*

*Al Dr. John Jairo por el apoyo durante la estancia y por brindar la información con la cual se pudo realizar esta investigación.*

*Por último, al Dr. Juan Reyes y al Dr. Jarniel García por sus comentarios y observaciones que fueron de gran ayuda a lo largo de este proceso.*

---

# Resumen

---

En esta tesis se utiliza la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica (EIE) con la finalidad de relacionar las propiedades eléctricas de frutas y verduras con el grado de maduración que posee el fruto. Esta técnica es fácil de usar, no invasiva y de bajo costo económico, lo cual es favorable para utilizar y determinar la madurez de las frutas o verduras en la industria de alimentos. En este caso particular, usamos mediciones EIE para caracterizar la madurez del plátano durante un período de 18 días. Para mejorar el índice de ajuste y consecuentemente la caracterización eléctrica del material biológico, Se proponen modelos de circuitos equivalente de orden fraccionario para ajustar los datos obtenidos de bioimpedancia. Para obtener valores iniciales utilizamos un software EIE y para el ajuste de los parámetros de estos modelos eléctricos fraccionarios (FEMs) a las medidas experimentales de los EIE, se utilizaron algoritmos de optimización de tipo cuckoo search. Como resultado, los modelos eléctricos que mejor representan las propiedades eléctricas del platano fueron el modelo de Cole y el modelo simplificado de Hyden. El cambio de los valores de resistencia y reactancia descritos por los modelos eléctricos de Cole y Hyden nos permiten correlacionar con los cambios fisicoquímicos del fruto conforme se va madurando la fruta.

**Palabras clave:** Espectroscopia de impedancia eléctrica, bioimpedancia, cálculo fraccionario, modelado de circuitos equivalentes de orden fraccionario, diagramas de Nyquist, calidad de los alimentos.

---

# Abstract

---

In the following investigation, the technique of electrical impedance spectroscopy (EIE) is used in order to relate the electrical properties of fruits and vegetables with the degree of maturity that the fruit possesses. This technique is easy to use, non-invasive and of low economic cost, which is favorable to use and determine the maturity of fruits or vegetables in the food industry. In this particular case, we measured the EIE of the banana for a period of 18 days. To improve the fit index and consequently the electrical characterization of the biological material, fractional order equivalent circuit models are proposed to fit the bioimpedance data obtained. To obtain initial values we use an EIE software and to adjust the parameters of these fractional electrical models (FEMs) to the experimental measurements of the EIE, cuckoo search type optimization algorithms were used. As a result, we found that the best electrical models that best represent the banana measurements were the Cole model and the simplified Hyden model. The change in the resistance and reactance values described by the electrical models of Cole and Hyden allow us to correlate with the physicochemical changes of the fruit as the fruit matured.

**Keywords:** Electrical impedance spectroscopy, bioimpedance, fractional calculus, fractional-order equivalent circuit modelling, nyquist plots, food quality.

---

# Índice general

---

<b>Índice de figuras</b>	<b>V</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes. . . . .	1
1.2. Planteamiento del problema. . . . .	3
1.3. Objetivo general. . . . .	3
1.3.1. Objetivos específicos. . . . .	3
1.4. Metas. . . . .	3
1.5. Justificación. . . . .	4
1.6. Alcances. . . . .	4
1.7. Hipótesis. . . . .	4
1.8. Organización del documento. . . . .	4
<b>2. Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Espectroscopia de impedancia eléctrica . . . . .	5
2.2. Bioimpedancia . . . . .	6
2.3. Cálculo Fraccionario . . . . .	8
2.4. Circuitos equivalentes . . . . .	8
<b>3. Estado del arte</b>	<b>12</b>
<b>4. Resultados experimentales y discusión</b>	<b>16</b>
4.1. Prototipo para la mediciones de EIE . . . . .	16
4.2. Analizador de espectros de EIS . . . . .	18
4.3. Algoritmos de optimización . . . . .	19
4.3.1. Cuckoo search . . . . .	20
4.4. Datos experimentales . . . . .	20
4.5. Medición de bioimpedancia . . . . .	21
4.6. Caracterización eléctrica del plátano . . . . .	41
4.7. Estimación paramétrica de los modelos CEM y FEM . . . . .	44
<b>5. Conclusiones</b>	<b>49</b>
5.1. Aportaciones y Trabajos futuros. . . . .	50
<b>Bibliografía</b>	<b>51</b>
<b>Anexo A</b>	<b>55</b>



---

# Índice de figuras

---

2.1. Diagrama en el plano complejo, Nyquist para el espectro de impedancia de un circuito RC paralelo simple, que muestra la frecuencia característica del punto superior $\omega^r = 1/RC$ . . . . .	6
2.2. La región de acumulación de iones en la fruta del sensor interfaz, mientras que el lado derecho representa el flujo de corriente en la región distribuida de carga neutra, a frecuencias altas y bajas [1]. . . . .	7
2.3. Circuito equivalente con sus respectivas funciones de transferencia, lado izquierdo modelos de orden entero, lado derecho modelos de orden fraccionario con sentido de Caputo . . . . .	9
2.4. Modelo de Cole. . . . .	9
2.5. Modelo de Cole de orden fraccionario. . . . .	10
2.6. Relación entre los parámetros de los modelos eléctricos y las propiedades eléctricas de los tejidos vegetales. . . . .	11
4.1. La configuración del dispositivo CoreBioZ-S. En la parte de arriba se muestran las placas de instrumentación y desarrollo (FreeSoC2). . . . .	16
4.2. Placa funcional del dispositivo CoreBioZ-S. . . . .	17
4.3. Diagrama de bloques de la placa de instrumentación del dispositivo CoreBioZ-S. . . . .	17
4.4. Fuente de corriente controlada (CCS) del dispositivo CoreBioZ-S. . . . .	18
4.5. Analizador de espectros EIS, en la interfaz puede verse: 1- Menu, 2- Barra de herramientas, 3- Parámetros del circuito, restricciones y resultados, 4- Espectros de impedancia, 5- Panel de los circuitos equivalentes, 6-Ajustes. . . . .	19
4.6. Función objetivo de error cuadrático medio (RMSE) considerando el modelado de Hyden simplificado (representado en por su función de transferencia) considerando la diferencia de los datos estimados y los datos experimentales. . . . .	20
4.7. Pseudocódigo donde se determina un rango máximo y mínimo de los parámetros involucrados. . . . .	21
4.8. Configuración de electrodos tetrapolares para la adquisición de datos EIE en plátanos. . . . .	21
4.9. Diagrama de Nyquist de los datos obtenidos por impedancia del plátano en 18 días de experimentación. . . . .	22
4.10. Modelo de Cole, Día 1. . . . .	23
4.11. Modelo de Hyden simplificado, Día 1. . . . .	23
4.12. Modelo de Cole, Día 2. . . . .	24
4.13. Modelo de Hyden simplificado, Día 2. . . . .	24
4.14. Modelo de Cole, Día 3. . . . .	25
4.15. Modelo de Hyden simplificado, Día 3. . . . .	25
4.16. Modelo de Cole, Día 4. . . . .	26
4.17. Modelo de Hyden simplificado, Día 4. . . . .	26
4.18. Modelo de Cole, Día 5. . . . .	27

4.19. Modelo de Hyden simplificado, Día 5. . . . .	27
4.20. Modelo de Cole, Día 6. . . . .	28
4.21. Modelo de Hyden simplificado, Día 6. . . . .	28
4.22. Modelo de Cole, Día 7. . . . .	29
4.23. Modelo de Hyden simplificado, Día 7. . . . .	29
4.24. Modelo de Cole, Día 8. . . . .	30
4.25. Modelo de Hyden simplificado, Día 8. . . . .	30
4.26. Modelo de Cole, Día 9. . . . .	31
4.27. Modelo de Hyden simplificado, Día 9. . . . .	31
4.28. Modelo de Cole, Día 10. . . . .	32
4.29. Modelo de Hyden simplificado, Día 10. . . . .	32
4.30. Modelo de Cole, Día 11. . . . .	33
4.31. Modelo de Hyden simplificado, Día 11. . . . .	33
4.32. Modelo de Cole, Día 12. . . . .	34
4.33. Modelo de Hyden simplificado, Día 12. . . . .	34
4.34. Modelo de Cole, Día 13. . . . .	35
4.35. Modelo de Hyden simplificado, Día 13. . . . .	35
4.36. Modelo de Cole, Día 14. . . . .	36
4.37. Modelo de Hyden simplificado, Día 14. . . . .	36
4.38. Modelo de Cole, Día 15. . . . .	37
4.39. Modelo de Hyden simplificado, Día 15. . . . .	37
4.40. Modelo de Cole, Día 16. . . . .	38
4.41. Modelo de Hyden simplificado, Día 16. . . . .	38
4.42. Modelo de Cole, Día 17. . . . .	39
4.43. Modelo de Hyden simplificado, Día 17. . . . .	39
4.44. Modelo de Cole, Día 18. . . . .	40
4.45. Modelo de Hyden simplificado, Día 18. . . . .	40
4.46. Resistencia en paralelo. . . . .	42
4.47. Resistencia en serie. . . . .	42
4.48. Elemento de fase constante. . . . .	43
4.49. Valores de $\alpha$ . . . . .	43
4.50. Valores de los parámetros optimizados del modelo eléctrico de Cole correspondientes al día 1. . . . .	44
4.51. Diagrama de Nyquist de las mediciones experimentales del día 1, para modelos MEE y MEF son los parámetros optimizados del circuito de Cole. . . . .	44
4.52. Valores de los parámetros optimizados mediante los modelos eléctricos Cole, Hyden-S, Hyden y DD-Cole, para el día 1. . . . .	45
4.53. Gráficas de los parámetros $R_0$ , $R_1$ , $C_1$ y $\alpha$ considerando la definición de Caputo. . . . .	46
4.54. Comportamiento de las mediciones de solidos solubles totales del plátano. . . . .	47
4.55. Comportamiento de las mediciones de acidez valorable del plátano. . . . .	47
4.56. Comportamiento de las características cromáticas, escala rojo/verde del plátano. . . . .	48
4.57. Comportamiento de las características cromáticas de claridad $L^*$ y de la escala azul/amarillo del plátano. . . . .	48

---

# Nomenclatura

---

## Componentes eléctricos

C	Capacitancia
L	Inductancia
R	Resistencia
Z	Impedancia
CPE	Capacitor de orden fraccionario

## Abreviaturas de la instrumentación de EIS

<i>BIA</i>	Análisis de Impedancia Bioeléctrica
<i>CCS</i>	Fuente de Corriente Controlada
<i>IS</i>	Etapas de instrumentación
<i>VCCS</i>	Fuente de Corriente Controlada por el Voltaje
<i>DDS</i>	Síntesis Digital Directa

## Abreviatura de bioimpedancia eléctrica

<i>EIE</i>	Espectroscopia de Impedancia Eléctrica
<i>ME</i>	Modelos Eléctricos
<i>MCE</i>	Modelos de Circuitos Equivalentes
<i>MEE</i>	Modelos Eléctricos Orden Entero
<i>MEF</i>	Modelos Eléctricos de orden Fraccionario
<i>FT</i>	Funciones de Transferencias

# Capítulo 1

---

## Introducción

---

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIE) se utiliza para determinar las propiedades eléctricas de frutas y vegetales y con ello correlacionarlas con los cambios fisicoquímicos del fruto conforme se va madurando la fruta. Esta técnica es fácil de usar, no invasiva y de bajo costo económico, lo cual es favorable para determinar la madurez que se presenta en las frutas y vegetales. En la siguiente investigación se presentaran los resultados de las lecturas de impedancia eléctrica de una fruta (plátano) para caracterizar sus propiedades eléctricas y con ellos caracterizar su proceso de maduración. En este caso particular, se obtienen las medidas EIE del plátano durante un período de 18 días. Para mejorar el índice de ajuste y en consecuencia la caracterización eléctrica del material biológico, se describen modelos eléctricos mediante ecuaciones diferenciales de orden fraccionario. Para obtener los valores iniciales se utilizó un software conocido como analizador de espectros EIE y para ajustar los parámetros de los Modelos Eléctricos Fraccionarios (MEF) a los datos experimentales obtenidos, se utilizaron algoritmos de optimización de búsqueda de tipo cuckoo search. Como resultado, se obtuvo que los modelos eléctricos que mejor representan las propiedades eléctrica del plátano, fueron el modelo Cole y el simplificado de Hyden de orden fraccionario.

### 1.1. Antecedentes.

La técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica nos permite correlacionar características eléctricas específicas (resistencia y reactancia) de frutas o verduras y caracterizar su proceso de maduración, esta técnica ha llamado la atención de investigadores en el área de calidad de alimentos, quienes han propuesto diversas metodologías para su estudio.

Mediante la aplicación de la transformada de Laplace a la respuesta transitoria de los circuitos eléctricos, Oliver Heaviside sentó las bases para el estudio de la espectroscopia de impedancia. Heaviside acuñó las palabras inductancia, capacitancia e impedancia e introdujo estos conceptos en el tratamiento de circuitos eléctricos. Sus artículos sobre el tema, publicados en *The Electrician* a partir de 1872, fueron compilados por Heaviside en forma de libro en 1894, sin embargo, desde la perspectiva de la aplicación a los sistemas físicos, la historia de la espectroscopia de impedancia comienza en 1894 con el trabajo de Nernst [2].

La EIE se remonta a 1894 cuando W. Nerst midió la constante dieléctrica de electrolitos acuosos y otros fluidos orgánicos. Sin embargo, fue solo a mediados de la década de 1980 que el interés en la EIE realmente creció sustancialmente, gracias a los instrumentos digitales controlados por computadora que permitieron mediciones rápidas y fáciles, así como un procesamiento y análisis de datos complejos. Según Orazem y Tribollet, el número de artículos científicos sobre aplicaciones de EIE se duplicaba cada 4 o 5 años, con más de 1200 artículos publicados en 2006. Una conferencia dedicada a EIE comenzó en 1989 en Bombannes (Francia) y desde entonces se

han realizado reuniones cada 3 años [3].

La espectroscopia de impedancia eléctrica es definida como un método para la caracterización de las propiedades eléctricas de los materiales y de sus interfaces con los electrodos. La técnica de espectroscopia de impedancia se ha utilizado recientemente en el ámbito alimenticio para la determinación de la calidad de los alimentos y de sus niveles de madurez [4].

En los trabajos de (Grossi, Lecce, Toschi, & Ricco, 2014), los autores utilizan la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica para determinar la acidez de una muestra de aceitunas. Se utilizan dos diferentes tipos que caracterizan la acidez y la conductancia de las emulsiones; el objetivo del estudio era obtener los índices de peróxido y pelofenoles presentes en los aceites [5].

En el siguiente trabajo se utiliza la técnica de EIE para caracterizar el grado de maduración de frutas, ajustando los datos en modelos eléctricos de orden fraccionario, estos modelos son de gran importancia por que nos dan una descripción mas precisa de los procesos físicos que se presentan en la maduración de frutas y vegetales relacionando estos comportamientos con propiedades de memoria propios de los procesos físicos involucrados [6].

En los trabajos de (González Araiza, Ortiz Sánchez, Vargas Luna & Cabrera Sixto, 2017), se realizó un estudio de maduración de fresas aplicando la técnica de bioimpedancia eléctrica. Se evaluaron cuatro variables eléctricas: resistencia de baja frecuencia  $R_0$  (relacionada con las resistencias extracelulares), la resistencia de alta frecuencia  $R_\infty$  (relacionada con las resistencias intracelulares) y un elemento de fase constante. Los resultado indicaron que las fresas en su máxima etapa de madurez tuvieron valores  $CPE - P$  y  $R_0$  significativamente más bajos que en etapas previas de madurez [7].

En los trabajos de (Lopes, Machado, & Ramalho, 2017), se realizó la caracterización de leche entera a partir del uso de espectroscopia de impedancia eléctrica considerando modelos fraccionarios. Los parámetros de impedancia obtenidos se compararon con los valores químicos analíticos, lo cual demostró una fuerte correlación entre ambas descripciones. Los resultados mostraron que la espectroscopia de impedancia eléctrica y el uso del cálculo fraccionario permiten obtener un modelo más preciso en la caracterización de los componentes de la leche entera utilizando un conjunto reducido de parámetros [8].

En el trabajo de (Gómez Aguilar et al., 2016), se realizó un estudio utilizando circuitos eléctricos equivalentes con la espectroscopia de impedancia electroquímica y varias derivadas fraccionarias de tipo Caputo con y sin Kernel singular. Considerando las derivadas de Caputo y Caputo-Fabrizio se obtuvieron las funciones de transferencia fraccionarias de tipo Cole manteniendo las consistencias en los parámetros eléctricos ajustados. El autor también propone una metodología detallada para construir los circuitos equivalentes [9].

Estos trabajos relacionan la aplicación y estudio de la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica, el cálculo fraccionario y el uso de circuitos eléctricos equivalentes para caracterizar materiales orgánicos. En este trabajo de tesis se aplicara la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica y el uso de fractancias (circuitos eléctricos equivalentes de orden fraccionario) para caracterizar frutas y vegetales (en particular estimar el grado de madurez de una muestra de platano).



## 1.2. Planteamiento del problema.

Determinar las propiedades que permitan conocer la calidad y madurez de las frutas y vegetales es de gran importancia tanto para los productores como para los consumidores de estos alimentos. Por ello es conveniente contar con una caracterización adecuada y precisa del fruto o vegetal cuando ocurren sus cambios de maduración.

Hoy en día existen varios métodos para determinar la calidad y madurez del fruto y vegetal, sin embargo la mayoría de ellos son métodos destructivos que dañan al material biológico y suelen ser muy laboriosos. Por consiguiente, el uso de técnicas no destructivas y fáciles de realizar como la espectroscopia de impedancia eléctrica toma una mayor importancia para obtener las propiedades de frutas y vegetales y con ello determinar la calidad y su grado de madurez.

Es por ello que, en este trabajo de investigación, el enfoque principal es la obtención de mediciones de impedancia eléctrica de una muestra de plátano, obtener los modelos eléctricos equivalentes y correlacionar los valores de resistencia y reactancia con el cambio de los parámetros fisicoquímicos conforme se va madurando la fruta.

## 1.3. Objetivo general.

Caracterizar el grado de madurez de frutas y vegetales utilizando técnicas de espectroscopia de impedancia eléctrica y circuitos equivalentes de orden fraccionario.

### 1.3.1. Objetivos específicos.

- Caracterizar muestra de plátano en diferentes etapas de maduración usando técnicas de espectroscopia de impedancia eléctrica.
- Realizar una representación de circuitos equivalentes para la obtención de su función de transferencia fraccionaria.
- Analizar las ventajas y/o desventajas de implementar derivadas fraccionarias.
- Investigar la interrelación entre los parámetros obtenidos con las técnicas de espectroscopia y los valores fisicoquímicos reportados en la literatura.
- Investigar la interrelación entre los datos obtenidos con las técnicas de espectroscopia y los modelos de circuitos equivalentes.

## 1.4. Metas.

- Obtener representaciones mediante circuitos equivalentes y funciones de transferencia de orden fraccionario de las mediciones obtenidas a diferentes muestras de plátano.
- Comparación de la respuesta obtenida al aplicar la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica a muestras de plátano considerando modelos de orden fraccionario y modelos de orden entero.
- Correlacionar el grado de madurez de las muestras de plátano considerando la información obtenida al aplicar la espectroscopia de impedancia eléctrica y los estudios fisicoquímicos.

## 1.5. Justificación.

En la actualidad, existe un gran interés de las empresas de alimentos por asegurar la calidad de las materias primas, procesos y productos terminados. En el caso de los alimentos, se han diseñado técnicas que permiten monitorear en tiempo real las diferentes etapas de madurez y degradación que presentan [10]. Existen varias técnicas para evaluar la descomposición de los alimentos, tales como la cromatografía, espectrofotometría, electroforesis, entre otros. Estos son procedimientos complicados, de lenta respuesta y que precisan diferentes ensayos. Las técnicas empleadas, son elevadamente costosas y protocolarias, por lo cual, no son eficientes para la industria.

La EIE es una técnica que es usada recientemente para la caracterización de tejidos biológicos, la técnica consiste en analizar las propiedades eléctricas que contiene el tejido biológico, ya que se considera que los tejidos biológicos son conductores y sus resistencias varían con la frecuencia [4]. Esta técnica tiene la ventaja de no ser invasiva, evita experimentos de laboratorio complejos y que consumen mucho tiempo. En esta investigación se utilizará dicha técnica para identificar el grado de madurez que tienen muestras de plátano. Con esta aportación se podrá precisar el grado de madurez de los productos, mejorando su calidad y la posibilidad de conservarlos para procesos industriales o exportaciones [11].

## 1.6. Alcances.

Este trabajo se llevará a cabo mediante prácticas del laboratorio, se validará el trabajo realizando la comparación que se obtiene involucrando pruebas fisicoquímicas.

## 1.7. Hipótesis.

Mediante el uso del cálculo fraccionario se obtendrá una mejor estimación de los parámetros obtenidos por medio de la técnica de EIE que permitirán correlacionar los cambios fisicoquímicos que tiene el fruto o vegetal caracterizando la madurez de las muestras.

## 1.8. Organización del documento.

El presente documento está organizado de la siguiente manera. En el capítulo 1, se describe una breve introducción de la investigación realizada, el planteamiento del problema, los objetivos tanto generales como específicos, metas y la justificación que explica la importancia de la investigación. En el capítulo 2, el marco teórico que define aquellos conceptos relevantes para la comprensión del tema. En el capítulo 3, se describe la técnica de EIE, de igual forma los parámetros de los distintos modelos que se utilizaron y como se obtuvieron dichos parámetros. El capítulo 4, los resultados y el análisis de la caracterización del fruto. Por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones, aportaciones y trabajos futuros.

# Capítulo 2

---

## Marco teórico

---

En este capítulo se presentan las definiciones y conceptos que brindan el sustento teórico de este trabajo de investigación.

### 2.1. Espectroscopia de impedancia eléctrica

La impedancia es la relación entre el voltaje y la corriente, la Espectroscopia de Impedancia (EI) es un método muy poderoso para la caracterización de propiedades eléctricas de los materiales y sus interfaces con electrodos de conducción electrónica [10]. La técnica de Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIE) consiste en excitar una muestra (fruta o vegetal) con señales sinusoidales eléctricas de frecuencia variable y registrar la respuesta del sistema. El voltaje  $v(t)$  y la corriente  $i(t)$  a través de la muestra en estado estacionario son funciones sinusoidales de tiempo dadas por

$$v(t) = V \cos(\omega t + \theta_V),$$

$$i(t) = I \cos(\omega t + \theta_I),$$

en el dominio de la frecuencia

$$V(j\omega) = V \cdot e^{j\theta_V},$$

$$I(j\omega) = I \cdot e^{j\theta_I},$$

donde,  $V, I$  son las amplitudes de voltaje y corriente,  $\theta_V, \theta_I$  como en esta ecuación también se denota el cambio de fase,  $\omega = 2\pi f$  representa la frecuencia angular y  $f$  la frecuencia. Para analizar el comportamiento de las funciones de transferencia en el dominio de la frecuencia, se utilizara los diagramas de Bode que demuestran una representación gráfica de la magnitud y fase sobre la frecuencia de la Función de Transferencia (FT). Una forma muy conveniente e informativa de representar el comportamiento de impedancia de los circuitos eléctricos, los cuales son generalmente circuitos Resistivos-Capacitivos (RC) consiste en trazar las componentes imaginarias ( $Z''$ ) versus sus componentes reales ( $Z'$ ) del vector de impedancia ( $Z$ ) por un rango de frecuencia,  $\omega$ , las representaciones reciben el nombre de diagramas de Nyquist y son representados en un plano complejo. Como se muestra en la Figura 2.1, el diagrama de Cole-Cole para un dieléctrico con pérdida tiene la forma de un semicírculo, interceptando el eje de valores reales en dos puntos críticos [10]-[12].

Un procedimiento útil, complementario para trazar componentes reales e imaginarios de impedancia en el plano complejo, es el uso de los llamados gráficos de Bode [13]. Los cuales son representaciones de diferentes parámetros de la impedancia como son: el ángulo de fase ( $\phi$ ) contra logaritmo base 10 de la frecuencia ( $f$ ) y el módulo de la impedancia  $|Z|$  contra logaritmo base 10 de la frecuencia ( $f$ ). Así mismo la impedancia  $Z$  está relacionado con los componentes

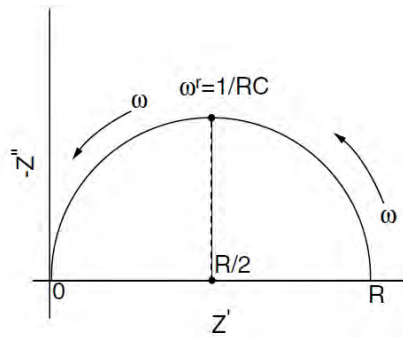


Figura 2.1: Diagrama en el plano complejo, Nyquist para el espectro de impedancia de un circuito RC paralelo simple, que muestra la frecuencia característica del punto superior  $\omega^r = 1/RC$

reales e imaginarios a través de la relación de Pitágoras.

$$Z = \sqrt{(Z'')^2 + (Z')^2},$$

recordando que la parte imaginaria  $Z'' = Z \sin \omega t$  y la parte real  $Z' = Z \cos \omega t$ .

El diagrama de Nyquist o plano e impedancias complejas es un tipo de representación que relaciona la impedancia real  $Z'$  con la imaginaria  $Z''$  de un sistema. Generalmente se representa  $Z'$  en el eje de abscisas y  $Z''$  en el ordenadas, y se dibuja una curva donde cada punto representa a un valor de frecuencia determinado. De esta manera, se caracteriza la impedancia global del sistema [4]. En la Figura 2.1 se presenta un ejemplo de diagrama de impedancia compleja para un circuito RC en paralelo. Se observa la curva en forma de semicírculo, donde el límite de bajas frecuencias ( $\phi \rightarrow 0$ ), la impedancia real tiende hacia el valor  $R$ , siendo nula la componente compleja. Con el aumento de la frecuencia, se incrementa el valor de  $Z'$ , y toma su máximo cuando alcanza la frecuencia característica del sistema [14].

En general, el plano de impedancia compleja permite analizar, a través de la forma de sus curvas, los posibles mecanismos que gobiernan los fenómenos bioeléctricos.

## 2.2. Bioimpedancia

La Bioimpedancia Eléctrica (BE) es una técnica que utiliza las propiedades eléctricas pasivas de los materiales, particularmente para los tejidos biológicos. La técnica de BE es cuando una tensión es aplicada a través de un material, una corriente fluye a través de si mismo encontrando un impedancia eléctrica que puede variar de acuerdo a diferentes características del material biológico, tales como su temperatura, geometría, composición química, entre otras [15]. Estas propiedades del tejido vegetal es utilizado como indicador de madurez, defectos y fisiología del material biológico [16].

La técnica EIE puede usar una configuración de electrodo bipolar o tetra-polar para llevar a cabo las medición de espectro de impedancia invasiva o no invasiva. La selección del tipo y la configuración de los electrodos depende del tipo de material biológico, la aplicación final y el sistema electrónico utilizado para la medición. La mediciones del espectro de impedancia se realizan en un dominio de la frecuencia, aplicando una señal de Corriente Alterna (AC) al material biológico y midiendo la diferencia de la señal de voltaje generada en tal material biológico.

Uno de los modelos ampliamente utilizados para analizar los datos de bioimpedancia eléctrica es el modelo Cole [7]. Los circuitos equivalentes (como el modelo de Cole) son diseñados con el propósito de proporcionar el mejor ajuste de los datos de impedancia mientras minimiza su complejidad (es decir, el número de componentes), al tiempo que simplifica la explicación biológica de la salida de impedancia. Además, se sabe que en las mediciones de un barrido AC de alta frecuencia da como resultado una reducción de la difusión de iones, junto con un aumento de la concentración de iones en la interfaz [17]. Por lo tanto, a bajas frecuencias, la membrana celular, al tener una alta impedancia, actúa como un circuito abierto que obliga a la corriente a pasar alrededor de las células en el fluido extracelular, modelado por una resistencia en paralelo ( $R_p$ ). A altas frecuencias la membrana celular actúa como un corto circuito, dejando que la corriente fluya por todas partes en los fluidos intracelulares, modelado por la resistencia en serie ( $R_s$ ), que presenta una mayor concentración de electrolitos en comparación con el medio extracelular, tal y como se muestra en la Figura 2.2.

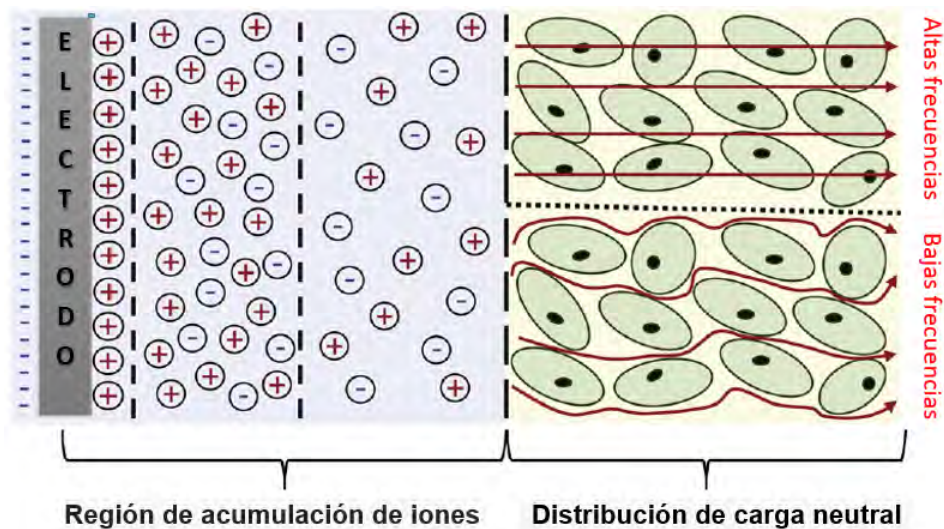


Figura 2.2: La región de acumulación de iones en la fruta del sensor interfaz, mientras que el lado derecho representa el flujo de corriente en la región distribuida de carga neutra, a frecuencias altas y bajas [1].

De esta manera, la interfaz electrodo-fruta se puede comparar con una doble capa eléctrica, que contiene iones contrarios (con carga opuesta a el electrodo) y co-iones (con la misma carga que el electrodo). Esta doble capa eléctrica se caracteriza por un espesor finito, que representa el límite de la influencia electrostática del electrodo en su proximidad y depende en gran medida de la concentración y el tamaño de la especie iónica (la fruta o vegetal) presentes en el medio [18].

La técnica EIE podría usarse como una herramienta de diagnóstico porque su medición proporciona mucha información relevante sobre el tejido. Es la aplicación principal de la técnica de bioimpedancia para determinar el estado del tejido vegetal a partir de las correlaciones que se pueden establecer entre las mediciones de EIE y las propiedades fisiológicas y fisicoquímicas del tejido vegetal. Además, los resultados obtenidos con EIE también se pueden usar para la caracterización eléctrica del tejido vegetal, y así establecer los valores de los parámetros de un circuito eléctrico equivalente de dicho tejido.



### 2.3. Cálculo Fraccionario

El Calculo Fraccionario (CF) describe y representa modelos más precisos de los sistemas físicos que los descritos por el modelados de orden entero, esto debido a que se considera un excelente instrumento para la descripción de la memoria y las propiedades hereditarias de diversos materiales y procesos [19]. El CF es la generalización del calculo ordinario ya que considera propiedades de memoria y características fractales de los sistemas. Debido a las múltiples definiciones existentes en el CF es de suma importancia usar una definición apropiada para el análisis del comportamiento dinámico de un sistema. Para este trabajo de investigación, se empleará la derivada fraccionaria de tipo Caputo  ${}_0^C D_t^\alpha$ .

La definición de Caputo es la más utilizada hoy en día porque, a comparación de las otras definiciones, la derivada de una constante es cero y las condiciones iniciales involucradas en una ecuación diferencial toman valores enteros con significado físico conocido al igual que en una ecuación diferencial ordinaria. La derivada fraccionaria de tipo Caputo (C), está definida como se observa en la ecuación (2.1) [20].

$${}_0^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n - \alpha)} \int_0^t \frac{f^{(n)}(\tau)}{(t - \tau)^{\alpha - n + 1}} d\tau. \quad (2.1)$$

La transformada de Laplace de la derivada de Caputo esta dada de la siguiente forma

$$\mathcal{L} \left\{ {}_0^C D_t^\alpha f(t) \right\} = s^\alpha F(s) - s^{\alpha - 1} f(0), \quad (2.2)$$

donde, se deduce que las condiciones iniciales toman la misma forma que las involucradas en las ecuaciones diferenciales ordinarias, por lo tanto, el problema del valor inicial utiliza condiciones en  $t = 0$  con interpretación física conocida.

### 2.4. Circuitos equivalentes

Para la caracterización eléctrica de tejidos vegetales utilizando la técnica EIS, de la literatura, podemos encontrar que los modelos eléctricos simplificados por Hayden (Hayden-S) y Cole son los circuitos equivalentes más comunes. Estos modelos se presentan en la Figura 2.3, así como los modelos de Hyden y Doble Dispersión de Cole (DD-Cole).

Estos modelos son ampliamente utilizados para la caracterización eléctrica. Generalmente, la Función de Transferencia (FT) de cada modelo esta descrito por ecuaciones diferenciales ordinarias que se puede obtener aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito analizado.

#### Obtención de impedancia del modelo de Cole.

**Método clasico** La Figura 2.4 ilustra un ejemplo de un circuito RC, el cual consiste en una resistencia  $R_S$  conectada en serie con una resistencia  $R_1$ , que a su vez, está conectada en paralelo con un capacitor  $C_1$ .

Para determinar la ecuación equivalente, la impedancia se puede obtener por la ley de Ohm por la siguiente ecuación:

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)}. \quad (2.3)$$

Aplicando las leyes de Kirchhoff para el circuito de la Figura 2.4, se tiene:

$$V = R_0 i + V_{c_1}, \quad (2.4)$$

Modelos eléctricos	Función de transferencia	FO modelo eléctricos	FO Función de transferencia $CZ(s)$
<b>Cole</b> 	$Z(s) = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p C_p s}$		$Z(s) = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p C_p s^\alpha}$
<b>Hyden Simplificado</b> 	$Z(s) = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0 C_1 s}{1 + R_1 C_1 s}}$		$Z(s) = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0 C_1 s^\alpha}{1 + R_1 C_1 s^\alpha}}$
<b>Doble dispersión de Cole</b> 	$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s}$		$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s^\alpha} + \frac{R_2}{1 + R_2 C_2 s^\alpha}$
<b>Hyden</b> 	$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + R_2 C_1 s}}}$		$Z(s) = \frac{1}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + R_2 C_1 s^\alpha}}}$

Figura 2.3: Circuito equivalente con sus respectivas funciones de transferencia, lado izquierdo modelos de orden entero, lado derecho modelos de orden fraccionario con sentido de Caputo

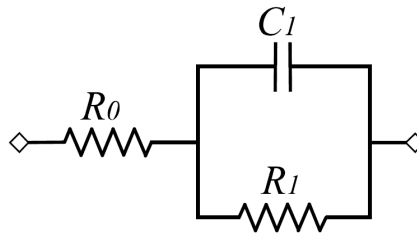


Figura 2.4: Modelo de Cole.

$$i = i_R + i_c, \tag{2.5}$$

considerando lo siguiente,

$$i_R = \frac{V_{c_1}}{R_1}, \tag{2.6}$$

$$i_c = C_1 \frac{dV_{c_1}}{dt}, \tag{2.7}$$

sustituyendo las ecuaciones (2.6) y (2.7) en la ecuación (2.5), se obtiene:

$$i = \frac{V_{c_1}}{R_1} + C_1 \frac{dV_{c_1}}{dt}. \tag{2.8}$$

Aplicando la transformada de Laplace en las ecuaciones (2.4) y (2.8)

$$V(s) = R_0 I(s) + V_{c_1}(s), \tag{2.9}$$

$$I(s) = \frac{V_{c_1}(s)}{R_1} + C_1 s V_{c_1}(s). \tag{2.10}$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.9) y (2.10) en la ecuación (2.3), se obtiene:

$$Z(s) = \frac{R_0 I(s) + V_{c_1}(s)}{\frac{V_{c_1}(s)}{R_1} + C_1 s V_{c_1}(s)}, \tag{2.11}$$

finalmente tenemos la función de transferencia del modelo de Cole dado por la ecuación (2.12)

$$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s}. \quad (2.12)$$

Los modelos de orden fraccionario están representados por ecuaciones diferenciales de orden arbitrario, y en términos generales debido a sus propiedades poseen una mayor capacidad de describir el comportamiento dinámico de la impedancia de frutas y vegetales [21].

El modelo de Cole de orden fraccionario está formado por tres elementos hipotéticos del circuito. Una resistencia  $R_0$ , una resistencia  $R_1$ , y un CPE (elemento de fase constante).

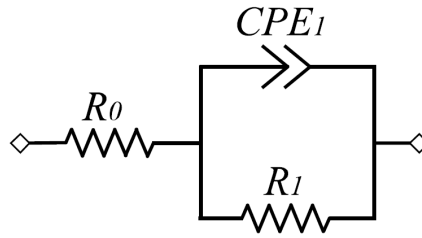


Figura 2.5: Modelo de Cole de orden fraccionario.

El modelo del CPE, el cual involucra el exponente  $s^\alpha$  puede describirse considerando la definición de Caputo donde los valores de  $\alpha$  están considerados en el intervalo de  $0 < \alpha < 1$ , en este caso la corriente del capacitor (o en su forma generalizada el CPE) esta definida por la siguiente relación

$$i_{CPE} = C_{cpe} \frac{d^\alpha V_{cpe}}{dt^\alpha}, \quad (2.13)$$

obteniendo lo siguiente:

$$V = R_0 i + V_{cpe}, \quad (2.14)$$

$$i = \frac{V_{cpe}}{R_1} + C_{cpe} \frac{d^\alpha V_{cpe}}{dt^\alpha}, \quad (2.15)$$

aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones (2.14) y (2.15), y sustituyendo en la ecuación (2.3), se obtiene lo siguiente

$$Z(s) = R_0 + \frac{R_1}{1 + R_1 C_1 s^\alpha}. \quad (2.16)$$

Obteniendo la función de transferencia generalizada y mostrada en la Figura 2.3. En términos generales, los parámetros de los modelos eléctricos presentados en la Figura 2.3 representan las respuestas eléctricas del tejido vegetal. Por ejemplo, considerando los modelos de Hyden Simplificado cada elemento del circuito puede representar la escala micro (celular) o macroscópica (fruta o verdura), estos parámetros pueden ser asociados y describir características propias de los tejidos vegetales tal y como se describen en la Figura 2.6.

Los parámetros eléctricos descritos en la Figura 2.3 pueden correlacionarse y describir propiedades del tejido vegetal. Por ejemplo, considerando escala micro o macro celulares puede relacionarse el parámetro  $R_0$  con la resistencia extracelular o con la resistencia de la cáscara del tejido en cuestión, y así con los demás parámetros pueden caracterizarse distintas propiedades de los tejidos y con ello determinar el estado fisiológico y fisicoquímico de los tejidos vegetales [22].

Parámetro del circuito eléctrico	Propiedades eléctricas de los tejidos vegetales	
	Escala celular	Escala macro
$R_0$	Resistencia extracelular	Resistencia de la cáscara
$R_1$	Resistencia intracelular	Resistencia del segmento de la pared
$C_1$	Capacitancia de la pared celular	Capacitancia del exocarpio
$R_2$	Resistencia de la vacuola	Resistencia de segmento
$C_2$	Capacitancia de la vacuola	Capacitancia del albedo
$R_3$	Resistencia de los orgánulos celulares	Resistencia de semillas
$C_3$	Capacitancia de los orgánulos celulares	Capacitancia de segmento

Figura 2.6: Relación entre los parámetros de los modelos eléctricos y las propiedades eléctricas de los tejidos vegetales.

# Capítulo 3

---

## Estado del arte

---

Uno de los factores que influye de manera decisiva en la calidad y conservación de la fruta es el grado de maduración en el momento de su recolección. Para predecir el tiempo de madurez que tiene la fruta o el vegetal se requiere nuevas tecnologías no invasivas como es el método EIE. Para esta investigación se realizó una búsqueda general de los estudios recientes y avances obtenidos en los últimos años sobre la técnica de EIE, muchos de los avances encontrados están enfocados en la mejora de la calidad de los alimentos pero de igual manera se encuentran en el sector de salud, donde esta misma tecnología de EIE se está utilizando en biomedicina teniendo avances increíbles.

En la mayoría de los artículos de revisión se describe la caracterización de tejido biológico utilizando la espectroscopia de impedancia eléctrica, estos artículos describen el circuito equivalente más usado que es el modelo de impedancia de Cole, el cual describe mejor los datos de bioimpedancia obtenidos.

- En el trabajo de **Cabrera-López et al.** [23] 2019, cuyo nombre fue *Structured Approach and Impedance Spectroscopy Microsystem for Fractional-Order Electrical Characterization of Vegetable Tissues*. El Objetivo del trabajo fue desarrollar modelos eléctricos equivalentes (EEM) para la caracterización de materiales biológicos (BM), para ello se desarrolló un diseño basado en circuitos equivalentes y una señal mixta programable. Tomando en cuenta el algoritmo "*simplex*" de Nelder-Mead en conjunto con cinco EEMs basadas en ecuaciones diferenciales ordinarias de orden entero y orden fraccionario se desarrolló la optimización paramétrica de los modelos de BM. De acuerdo con mediciones experimentales y resultados preliminares en simulación, se demuestra el potencial de este tipo de metodologías para la medición de bioimpedancia en espectros extendidos.
- En el trabajo de **Gonzalez-Correa et al.** [24] 2019, nombrado: *Simplified geometrical adjustment of bioimpedance measured data to the complex plane with just three parameters*, el objetivo fue explorar el uso de un enfoque geométrico para el ajuste de datos obtenidos en la parametrización de los modelos de Cole. Los autores desarrollaron una nueva metodología basada en un enfoque geométrico, donde solamente es necesario contar con las coordenadas del centro en el plano cartesiano (abscisa y ordenada) y la longitud del radio. La presente metodología resulta ser una herramienta de fácil acceso para el desarrollo y parametrización de los modelos de Cole, siendo una alternativa que presenta una mayor robustez ante las técnicas comúnmente utilizadas como lo son los mínimos cuadrados.
- En el trabajo de **Ibba et al.** [1] 2020, nombrado *Bio-impedance and circuit parameters: An*



*analysis for tracking fruit ripening*, el objetivo fue obtener una correlación entre el proceso de maduración de las frutas (manzanas y plátanos) y la Espectroscopia de Impedancia Eléctrica durante un periodo de 13 días de experimentación bajo condiciones de temperatura controladas. Se reportó el análisis de los cambios en la bioimpedancia de la BM ante la influencia de la variación de frecuencias aplicadas a la BM. El análisis fue sustentado en la generación de EEM, caracterizando los parámetros respecto a la BM y comparándolos con lo establecido en la literatura logrando describir las necesidades existentes en el desarrollo de alternativas de solución capaces de generar una clasificación de la calidad de BM obteniendo una herramienta viable en los diversos sectores productivos. Esto permite concluir que es posible correlacionar la evolución fisicoquímica del proceso de maduración de la fruta con respecto a la variación paramétrica de los EEM.

- En el trabajo de **Caicedo-Eraso et al.** [25] 2020, cuyo nombre es *Espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada al control de la calidad en la industria alimentaria*. Se tiene como objetivo desarrollar una revisión sobre las características y utilidades de la EIS en los diversos sectores productores, la revisión consta de una búsqueda bibliográfica de 52 artículos acotados al periodo de 2018 a 2021. Los autores concluyen que la EIS es una técnica no invasiva y rápida que permite determinar diversas características de la BM, como lo son propiedades fisicoquímicas, tiempos de envejecimiento y microorganismos presentes en la BM, dando la posibilidad de ser esta técnica ampliamente considerada para el monitoreo, conservación y control de calidad de alimentos.
- En el trabajo de **Herencsar et al.** [26] 2020, llamado *A comparative study of two fractional-order equivalent electrical circuits for modeling the electrical impedance of dental tissues*, el objetivo fue desarrollar y aplicar diferentes topologías de EEM de orden fraccionario para la modelar la bioimpedancia eléctrica de los tejidos dentales, para ello se presenta un circuito equivalente generalizado para la evaluar la dinámica de la impedancia en el tejido dental. Los resultados presentados muestran la ventana de posibilidades existente en la mejora de las técnicas de EIS para la evaluación de los tejidos dentales considerando la representación de orden fraccionario.
- **Prasad et al.** [27] 2021, en su trabajo *Fractional impedance of supercapacitor: an extended investigation*, propone un método de identificación para modelar el comportamiento de respuesta temporal de un supercapacitor. El método propuesto para modelar el supercapacitor simplifica la derivada fraccionaria en un álgebra simple en lugar de una función compleja directa como la función Mittag-Leffler. La experimentación realizada presenta los distintos cambios en las condiciones nominales de los parámetros debido a la duración y caracterización de los ciclos completos de carga y descarga del capacitor.
- En el trabajo de **Ghita et al.** [28] 2021, *Lung cancer dynamics using fractional order impedance modeling on a mimicked lung tumor setup*. El objetivo: fue determinar la variación paramétrica existente en modelos del sistema respiratorio involucrando mediciones de impedancia y generalizando los modelos con operadores de orden fraccionario. Como casos de estudio consideraron degradación a nivel pulmonar derivado del cáncer de pulmón. Los modelos fueron parametrizados considerando el uso de metodologías de orden fraccionario y correlacionadas con las propiedades mecánicas de pulmón sano y tumoral. De esta

manera, mediante la técnica de oscilaciones forzadas se realizó una evaluación de baja frecuencia del modelo de impedancia respiratoria y del índice de no linealidad. Debido a las propiedades viscoelásticas en los tejidos del pulmón, existe una variación paramétrica en los EEM para la detección de tumores en los pulmones, concluyendo que es de suma importancia el desarrollo y avance en las técnicas de optimización para la estimación paramétrica.

- **Kapoulea et al.** [29] 2021, en su trabajo titulado: *Simple implementations of fractional-order driving-point impedances: Application to biological tissue models*, desarrollan una emulación directa de la impedancia total de modelos de orden fraccionario evitando el desarrollar una emulación por separado de cada elemento de orden fraccionario. La generación de una función de impedancia total reduce el número de componentes activos y pasivos del modelo generando así una representación de orden mínimo que permite emular de manera adecuada la dinámica del modelo analizado.
- En el trabajo de **Ruan et al.** [30] 2021, llamado: *A modified-electrochemical impedance spectroscopy-based multi-time-scale fractional-order model for lithium-ion batteries*, el objetivo fue desarrollar un EEM a escala de orden fraccionario para mejorar la eficacia de en la predicción de las dinámicas de una batería ante diferentes condiciones de operación, para ello se considera el uso de la espectroscopia de impedancia electroquímica modificada. La generación del modelo propuesto presenta un alto desempeño en la predicción y de igual manera es adaptable a diferentes cambios de frecuencia. Lo antes mencionado es corroborado por medio del contraste del modelo con los resultados experimentales, finalmente el modelo de orden fraccionario permite tener un alto grado de fidelidad de la dinámica de la batería ante diferentes escalas multitemporales.
- **Kapoulea et al.** [31] 2021, en su investigación titulada: *Passive approximations of double-exponent fractional-order impedance functions*, demostraron la viabilidad de desarrollar una aproximación de orden entero-basada en funciones de tipo Havriliak-Negami capaces de aplicarse en redes resistor-condensador (RC) de tipo Cauer/Foster. La aplicación de la aproximación de Padé en este tipo de funciones permite derivar directamente una aproximación polinómica racional de orden entero la cual es aplicable mediante redes RC y comprobada en la emulación de la dinámica de la impedancia de cuatro diferentes tipos de vegetales estudiados. La función de impedancia basada en el modelo Havriliak-Negami es capaz de describir una amplia gama de modelos físicos siendo una alternativa de fácil aplicación en comparación con las metodologías existentes en la literatura.
- En el trabajo de **Freeborn et al.** [32] 2021, llamado: *Cole-impedance model representations of right-side segmental arm, leg, and full-body bioimpedances of healthy adults: Comparison of fractional-order*, el objetivo fue identificar si existen diferencias representadas en el orden fraccionario ( $\alpha$ ) de los parámetros del modelo de Cole para la impedancia obtenida de la segmentación del cuerpo humano considerando brazos y piernas de participantes adultos. De acuerdo con la EIS, existen diferencias entre las condiciones geométricas, fisicoquímicas y de los fluidos presentes en el organismo que permiten diferenciar entre diferentes secciones del cuerpo, generando diferentes condiciones paramétricas del modelo ante distintas condiciones de evaluación. La optimización por enjambre de partículas es una metodología de identificación paramétrica apta para describir escenarios donde existe una variabilidad derivada de diferentes condiciones de operación de los modelos de Cole.

- **Mohsen et al.** [33] 2021, *Fractional-order bio-impedance modeling for interdisciplinary applications: A review* en su trabajo realizan una revisión bibliográfica comparando el desempeño de diferentes métodos de identificación paramétrica considerando modelos de circuito eléctrico equivalente de orden fraccionario, ante diferentes BM y condiciones exógenas. La variación paramétrica de los modelos de circuito equivalente en tejidos de BM es un fenómeno de alto interés debido a las notorias condiciones de operación en los que puede operar el modelo, siendo la temperatura de la BM una condición que favorece la variabilidad paramétrica en cada condición analizada. Los autores comentan en su revisión que tomando en cuenta las necesidades en los diferentes sectores agrícolas y biomédicos, la EIS es un método capaz de solventar y proponer diversos problemas derivados en la evolución de condiciones fisiológicas BM. Siendo un ejemplo de ello, la optimización de los procesos de cultivo respecto a los procesos de maduración de frutas y verduras.
  
- En el trabajo de **Abdelrahman et al.** [34] 2021, cuyo nombre fue: *Memristive Bio-Impedance Modeling of Fruits and Vegetables*. EL objetivo de los autores fue proponer un modelo de bioimpedancia memristiva de orden fraccionario generalizando el modelo de bioimpedancia de Hayden. Este trabajo presenta por primera vez el comportamiento de la histéresis de tipo *pinched* (pinzamiento) en siete diferentes tipos de frutas y vegetales, demostrando como los puntos de pinzamiento varían respecto al BM analizado. El desarrollo tecnológico de los modelos de bioimpedancia en BM ha estado enfocado en el estudio de sistemas lineales que modelan las propiedades eléctricas de los tejidos biológicos, sin tomar en cuenta los modelos no lineales. Dadas las condiciones dinámicas de este tipo de sistema biológicos, existe un amplio campo de oportunidades para la generación de representaciones matemáticas que describan de una manera detallada las no linealidades de este tipo de sistema.
  
- **Ghita et al.** [35] 2022, en su trabajo: *Impedance Spectroscopy Sensing Material Properties for Self-Tuning Ratio Control in Pharmaceutical Industry*, generan una solución continua para la detección de cambios en los cambios de las propiedades de los materiales farmacéuticos basado en un algoritmo de control enfocado en minimizar el riesgo en la línea de producción final de productos farmacéuticos. Esto se realiza desarrollando una metodología de detección de distintos cambios en los compuestos farmacológicos basada en técnicas de espectroscopia de impedancia y realizando la identificación en línea de modelos paramétricos de orden fraccionario, los coeficientes están correlacionados con los cambios en las propiedades de los materiales. La solución propuesta presenta un importante valor añadido al estado actual de las tecnologías de fabricación de productos farmacéuticos, siendo su principal ventaja la facilidad de implementación de la misma.
  
- En el trabajo de **Müfit Şan et al.** [36] 2022, *A Preliminary Exploration of the Placental Position Influence on Uterine Electromyography Using Fractional Modelling*, el objetivo fue proponer un método de exploración preliminar utilizando las señales eléctricas generadas por la contracción uterina. Se utilizó un modelo de impedancia de Cole de triple dispersión para obtener la curva de impedancia uterina en una banda de frecuencia comprendida entre 0,1 y 1 Hz, como principal resultado se tiene que es posible recolectar información sobre el monitoreo de riesgos en el desarrollo del feto en el embarazo.

# Capítulo 4

---

## Resultados experimentales y discusión

---

### 4.1. Prototipo para la mediciones de EIE

El dispositivo de medición de impedancia eléctrica que se utilizó para obtener los datos experimentales del plátano (fruta seleccionada para el estudio de este trabajo) CoreBioZ-S que se muestra en la Figura 4.1, el dispositivo está compuesto por dos bloques funcionales tal y como se muestra en la Figura 4.2. El primer bloque es una placa de instrumentación para la generación y adquisición de las señales, y el segundo es una placa de desarrollo para la implementación del sistema embebido que controla el primer bloque y la ejecución del algoritmo propuesto para el cálculo de la impedancia.

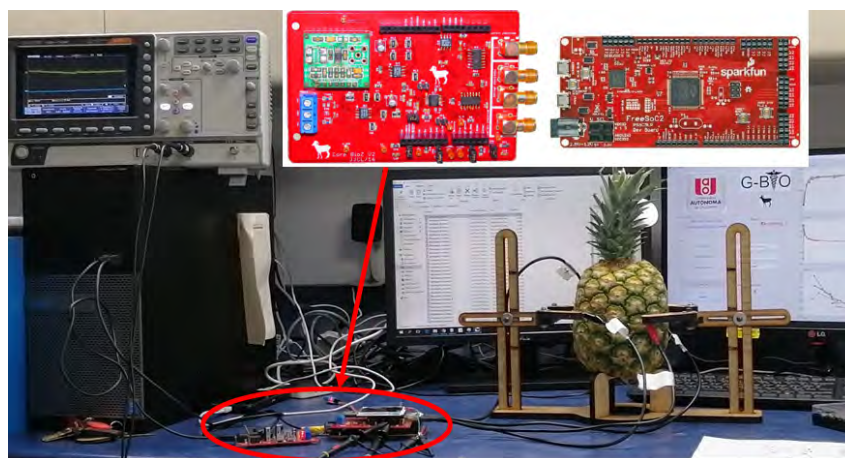


Figura 4.1: La configuración del dispositivo CoreBioZ-S. En la parte de arriba se muestran las placas de instrumentación y desarrollo (FreeSoC2).

La placa de instrumentación se diseñó para el uso de las aplicaciones de EIE, específicamente en la evaluación de la calidad de los alimentos. Asimismo, las especificaciones técnicas de la placa permiten que el dispositivo pueda ser utilizado en otras aplicaciones de EIE y Análisis de Impedancia Bioeléctrica (AIB), como la caracterización eléctrica de materiales biológicos como tejidos, órganos y células animales. Esta placa está compuesta por dos bloques funcionales: una fuente de corriente controlada (CCS, por sus siglas en inglés) y una etapa de instrumentación (IS), como se muestra en la Figura 4.3. En este caso, los circuitos se diseñan utilizando una fuente de corriente y dos amplificadores en paralelo, respectivamente. Estos circuitos han sido diseñados para un ancho de banda de 100 Hz a 100 kHz, y con una corriente mono-frecuencia de  $100 \mu\text{A}$ , por lo que la placa se puede utilizar sin problema en aplicaciones EIE.

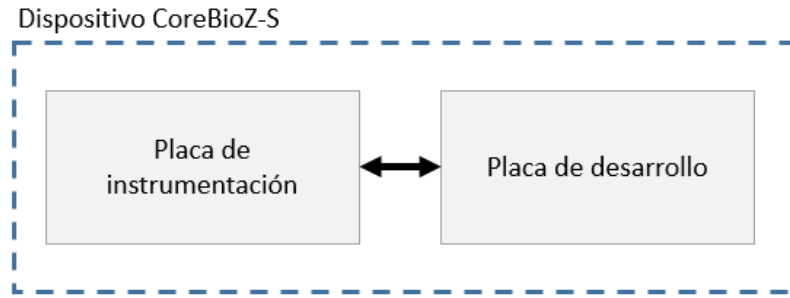


Figura 4.2: Placa funcional del dispositivo CoreBioZ-S.

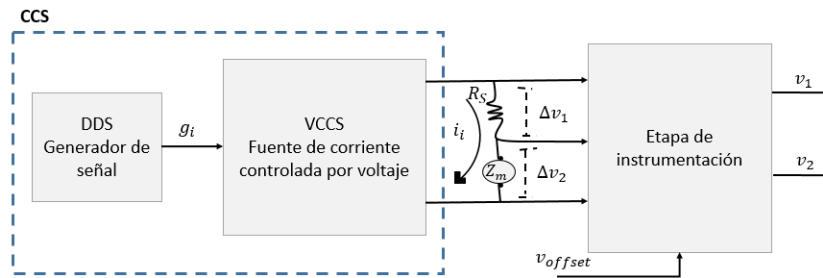


Figura 4.3: Diagrama de bloques de la placa de instrumentación del dispositivo CoreBioZ-S.

En este caso, el primer bloque funcional, la CCS, se implementó utilizando un generador de señal de voltaje y una fuente de corriente controlada por voltaje (VCCS). El generador de señal de voltaje se implementó usando un circuito de Síntesis Digital Directa (DDS) AD9833, y su señal de salida  $g_i$  está conectado a la fuente de corriente controlada por voltaje (VCCS). El diseño VCCS es una fuente de corriente de tipo Howland mejorada [37]-[38] y se implementa utilizando un AD8022 OpAmp. Como se muestra en la Figura 4.4, la VCCS genera la señal de corriente  $i_i$  descrita por la ecuación (4.1), donde  $Z_2$  se define como la impedancia en serie formada entre  $R_2$  y  $C_2$ , y  $R^* \approx R_1 + Z_2$ . VCCS genera  $\approx 115 \mu A$ , pero es importante tener en cuenta que, en la práctica, la impedancia de salida y el ancho de banda de un VCCS son limitados y su rendimiento depende de la precisión de los componentes discretos utilizados para su implementación [37]. Las ecuaciones que describen el voltaje y la corriente están dadas a continuación

$$i_i = \frac{g_i}{Z_2}, \quad (4.1)$$

$$\Delta v_1 = Z_m \cdot i_i, \quad (4.2)$$

$$\Delta v_2 = Z_{R_s} \cdot i_i. \quad (4.3)$$

El segundo bloque funcional, del IS, fue diseñado utilizando dos canales paralelos para la adquisición de señales de voltaje diferencial  $\Delta v_x$  donde  $x = \{1, 2\}$ . Las señales  $\Delta v_1$  y  $\Delta v_2$ , se generan cuando la corriente  $i_i$  fluye a través de un circuito en serie formado por el tejido vegetal bajo prueba y la resistencia  $R_s$ , cuyas impedancias son  $Z_m$  y  $Z_{R_s}$ , respectivamente. Las señales de voltaje  $\Delta v_1$  y  $\Delta v_2$ , se describen mediante las ecuaciones (4.2) y (4.3). En este caso,  $R_s$  es una resistencia en derivación que se utiliza para medir la corriente  $i_i$  que genera el CCS diseñado, con el fin de garantizar resultados fiables [23].



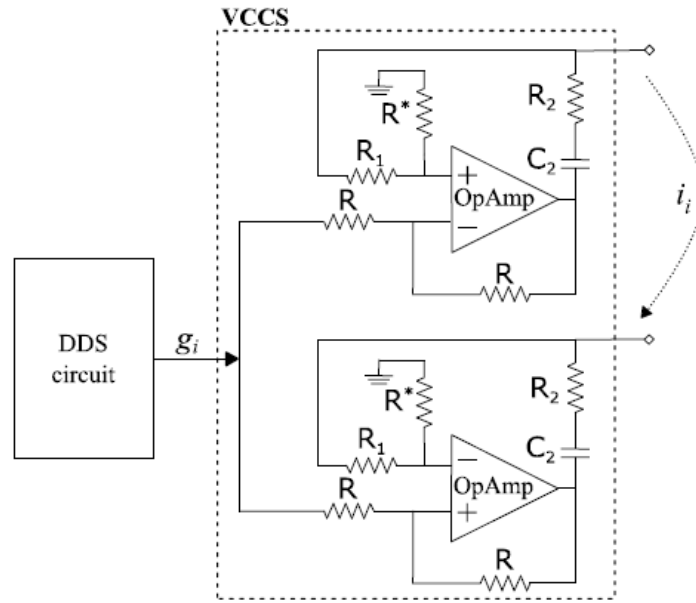


Figura 4.4: Fuente de corriente controlada (CCS) del dispositivo CoreBioZ-S.

#### 4.2. Analizador de espectros de EIS

El analizador de espectros EIS, el cual se muestra en la Figura 4.5, es un programa para análisis y simulación de espectros de impedancia. El funcionamiento del analizador se basa en la caracterización de los datos obtenidos de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica potencio-dinámica. Este programa se ha adaptado para resolver una amplia gama de trabajos en la espectroscopia de impedancia. Además realiza el ajuste de datos a circuitos equivalentes con resistencias, capacitores, inductores, elementos de fase constante, Warburg (3 tipos), elementos definidos por el usuario y de tipo Gerischer. El analizador de espectro EIS proporciona varias pruebas para los datos y la calidad del ajuste. También tiene una rutina de simulación de espectros de impedancia incorporada, herramientas para el procesamiento de datos de impedancia, sustracción de elementos y sub-circuitos, normalización del área de la superficie del electrodo y trazado en varios formatos.

Los pasos a seguir para realizar un ajuste de datos en la plataforma del analizador de espectro EIS, son los siguientes: El primer paso es descargar los datos obtenidos experimentalmente a la plataforma (estos datos deben estar ordenados). Segundo es ensamblar un circuito equivalente, tal y como se muestra en la parte cinco que muestra el panel de los circuitos equivalentes, ver Figura 4.5. El tercer paso es elegir un algoritmo de minimización que se encuentra en la ventana seis y que muestra los posibles ajustes, ver Figura 4.5, el algoritmo de Newton es el más utilizado para poder minimizar la función objetivo. En el cuarto paso se especifican los límites de los parámetros y en la sección tres llamada “Parámetros del circuito” se presentan en forma de tabla. En el quinto paso se selecciona el tipo de función a minimizarse utilizando la función no ponderado que se muestra en la ecuación (4.4)

$$r_u(\omega, P_1 \dots P_M) = r_c^2 / (N - M), \quad (4.4)$$

donde  $N$  es el número de puntos,  $M$  es el número de parámetros,  $\omega$  es la frecuencia angular,  $P_1 \dots P_M$  son los parámetros,  $i$  corresponde a los valores medidos de impedancia e  $i_{calc}$  corresponde

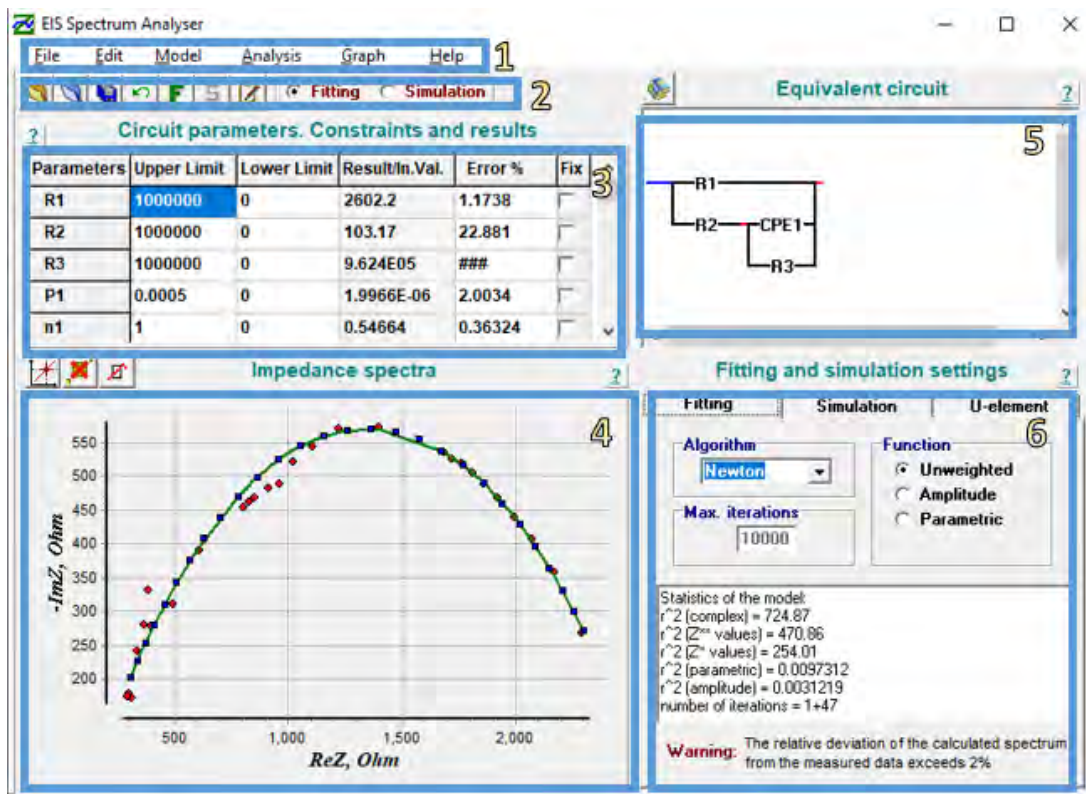


Figura 4.5: Analizador de espectros EIS, en la interfaz puede verse: 1- Menu, 2- Barra de herramientas, 3- Parámetros del circuito, restricciones y resultados, 4- Espectros de impedancia, 5- Panel de los circuitos equivalentes, 6-Ajustes.

a los valores calculados dados la siguiente ecuación (4.5)

$$r_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \left( Z'_i - Z'_{i_{calc}} \right)^2 + \left( Z''_i - Z''_{i_{calc}} \right)^2 \right]. \quad (4.5)$$

Finalmente se presiona el botón  $F$  que se encuentra en la sección dos "Barra de herramientas", ver Figura 4.5.

Como resultado del ajuste, se observa en la sección tres la tabla con los parámetros calculados del circuito, donde se tiene la columna del porcentaje de error % con los valores de los errores estimados relativos de los parámetros calculado y visualmente se puede ver en la ventana cuatro- El ajuste en el espectro de impedancia mostrado en la Figura 4.5, donde los puntos rojos son los veinte y ocho puntos obtenidos de los datos experimentales.

Este analizador de espectro EIS, nos permite obtener los valores de los parámetros de los circuitos equivalentes modelados, tomando estos parámetros como los iniciales calculados a partir de los datos experimentales.

### 4.3. Algoritmos de optimización

Los algoritmos de optimización nos ayudan a solucionar problemas de aproximaciones numéricas. En esta investigación se eligió trabajar el algoritmo de optimización cuckoo search para obtener una minimización del error existente entre la aproximación y los datos reales.

### 4.3.1. Cuckoo search

Cuckoo Search es un algoritmo de optimización propuesto por Xin-She Yang y Suash Deb en 2009. Se basa en el comportamiento reproductivo de algunas especies de Cuckoos que depositan sus huevos en nidos de otras especies. Este algoritmo ha sido utilizado para resolver múltiples problemas de optimización debido a su versatilidad, rapidez y facilidad de implementación [39].

En la Figura 4.6, se muestra el código elaborado para la función objetivo que se utilizó en el algoritmo de optimización de Cuckoo search. La función objetivo es la ecuación del error cuadrático medio (RMSE) en el cual se intenta minimizar el error de los datos obtenidos por los modelos estimados y por los datos experimentales obtenidos por el prototipo EIE (CoreBioZ-S). Con la finalidad que el algoritmo no presente problemas al encontrar los parámetros que minimicen el error a los datos experimentales, se propone una primera aproximación considerando los datos obtenidos del analizador de espectro EIS y con ello especificar un límite mínimo y máximo en el cual los parámetros sean más óptimos tal y como se puede ver en la Figura 4.7.

```

1 function error = RC_parameters(u)
2     load exp_nyquist.mat
3     re1=exp_nyquist(:,1);     re7=exp_nyquist(:,13);     re13=exp_nyquist(:,25);
4     im1=exp_nyquist(:,2);     im7=exp_nyquist(:,14);     im13=exp_nyquist(:,26);
5     re2=exp_nyquist(:,3);     re8=exp_nyquist(:,15);     re14=exp_nyquist(:,27);
6     im2=exp_nyquist(:,4);     im8=exp_nyquist(:,16);     im14=exp_nyquist(:,28);
7     re3=exp_nyquist(:,5);     re9=exp_nyquist(:,17);     re15=exp_nyquist(:,29);
8     im3=exp_nyquist(:,6);     im9=exp_nyquist(:,18);     im15=exp_nyquist(:,30);
9     re4=exp_nyquist(:,7);     re10=exp_nyquist(:,19);    re16=exp_nyquist(:,31);
10    im4=exp_nyquist(:,8);     im10=exp_nyquist(:,20);    im16=exp_nyquist(:,32);
11    re5=exp_nyquist(:,9);     re11=exp_nyquist(:,21);    re17=exp_nyquist(:,33);
12    im5=exp_nyquist(:,10);    im11=exp_nyquist(:,22);    im17=exp_nyquist(:,34);
13    re6=exp_nyquist(:,11);    re12=exp_nyquist(:,23);    re18=exp_nyquist(:,35);
14    im6=exp_nyquist(:,12);    im12=exp_nyquist(:,24);    im18=exp_nyquist(:,36);
15    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CLASICO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16    R0c= u(1:1);
17    R1c= u(2:2);
18    C1c= u(3:3);
19    Mu= u(4:4); %Orden de la Derivada
20    W=[628.31853;1256.63706;1884.95559;2513.27412;3141.59265;3769.91118;4398.22971;5026.54824;5654.86677;...
21      6283.1853;12566.3706;18849.5559;25132.7412;31415.9265;37699.1118;43982.2971;50265.4824;56548.6677;...
22      62831.853;125663.706;188495.559;251327.412;314159.265;376991.118;439822.971;502654.824;565486.677;628318.53];
23    %%Modelo de Hyden Simplificado para nyquist con caputo%%
24    A1=R0c;
25    B=1+((R1c.*C1c)+(A1.*C1c)).*((1/s).*W).^Mu);
26    B2=1+((R1c.*C1c).*((1/s).*W).^Mu);
27    A=(A1.*B2);
28    Z=(A./B);
29
30    h1=csape(real(Z),-imag(Z));
31    H2=fnplst(h1);
32
33    hlex=csape(re18,im18);
34    H2ex=fnplst(hlex);
35
36    error = RMSE(H2ex(1,:),H2(1,:)) + RMSE(H2ex(2,:),H2(2,:));

```

Figura 4.6: Función objetivo de error cuadrático medio (RMSE) considerando el modelado de Hyden simplificado (representado en por su función de transferencia) considerando la diferencia de los datos estimados y los datos experimentales.

## 4.4. Datos experimentales

Para la obtención de los datos de impedancia, se realizó una estancia en la universidad autónoma de occidente (UAO) de Cali, Colombia, del 6 de Julio al 31 de Julio del 2019. Estos datos experimentales se obtuvieron utilizando el dispositivo CoreBioZ-S y considerando el protocolo de medición desarrollado para la medición de cada material vegetal [23]. Para esta caracterización, los modelos eléctricos equivalentes considerados están descritos en la Figura 2.3, estos modelos consideran una representación considerando operadores diferenciales de orden entero (clásico)

```
function [bestsol,fmin] = anneal_search(nPop,MaxIt)
%% Problem Definition

CostFunction=@(u) RC_parameters(u); % Cost Function

% nVar = 1; % Number of Decision (Unkwn) Variables

% VarSize = [1 nVar]; % Decision Variables Matrix Size

VarMin = [6766*ones(1,1) 262.98*ones(1,1) 3.96E-07*ones(1,1) 0*ones(1,1)]; % Lower Bound of Decision Variables
VarMax = [7029*ones(1,1) 273.2*ones(1,1) 4.27E-07*ones(1,1) 1*ones(1,1)]; % Upper Bound of Decision Variables

nVar = length(VarMin);
```

Figura 4.7: Pseudocódigo donde se determina un rango máximo y mínimo de los parámetros involucrados.

y orden fraccionario (sentido de Caputo). En este caso, se utilizó un algoritmo de optimización para ajustar los parámetros obtenidos de las mediciones de EIE.

### 4.5. Medición de bioimpedancia

Como caso de estudio en esta investigación se eligió el plátano. Estos plátanos se cosecharon durante la semana 14 después de la floración y se compraron directamente de una granja local (La Villanueva, Palmira, Valle del Cauca, Colombia). Se seleccionaron los racimos, se lavaron con agua corriente y se etiquetaron al azar, y luego se almacenaron bajo condiciones controladas en una cámara ambiental a una temperatura de  $20 \pm 0.15$  °C y  $75 \pm 2$  % humedad relativa. Posteriormente, se seleccionó un subconjunto de 10 plátanos para llevar a cabo las mediciones EIE durante 18 días consecutivos de las pruebas experimentales.

Las mediciones de EIE de los 10 plátanos se realizaron con el dispositivo CoreBioZ-S, y en cada prueba se adquirieron cinco espectros con 10 puntos por década dentro del ancho de banda de 100 Hz a 100 kHz. Un total de 4 electrodos fueron colocados sobre la fruta a una distancia de 3 cm entre sí. Los cuatro electrodos  $Ag - Ag/Cl$  no invasivos se encuentran en la superficie del plátano siguiendo la configuración tetrapolar, y se muestra en el esquema de Figura 4.8. La corriente  $i_i$  se inyecta en el plátano y fluye a través de los electrodos marcados  $I^{(+)}$  y  $I^{(-)}$ , el diferencial de voltaje  $\Delta v_{e1}$  generado por esta corriente se adquiere a través de los electrodos marcados como  $V^{(+)}$  y  $V^{(-)}$ .

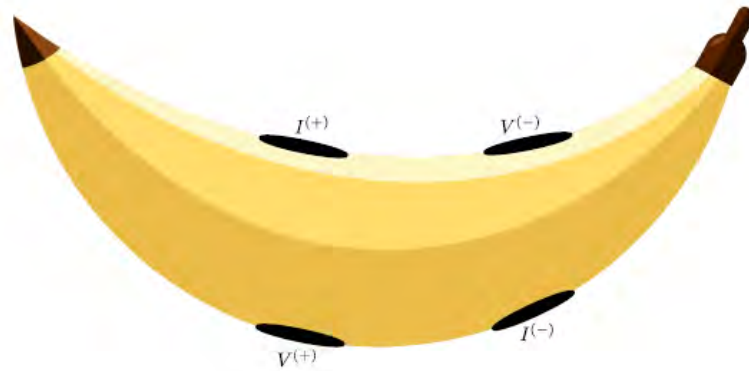


Figura 4.8: Configuración de electrodos tetrapolares para la adquisición de datos EIE en plátanos.

Teniendo en cuenta el protocolo mencionado anteriormente, los diagramas de Nyquist obtenidos durante 18 días de pruebas experimentales utilizando los datos de EIE en plátanos se muestran en la Figura 4.9. Estas curvas muestran la evolución de la impedancia obtenida cada día. Se puede observar, que los cambios en los parámetros presentan tendencias similares uno a uno durante los días de la prueba experimental.

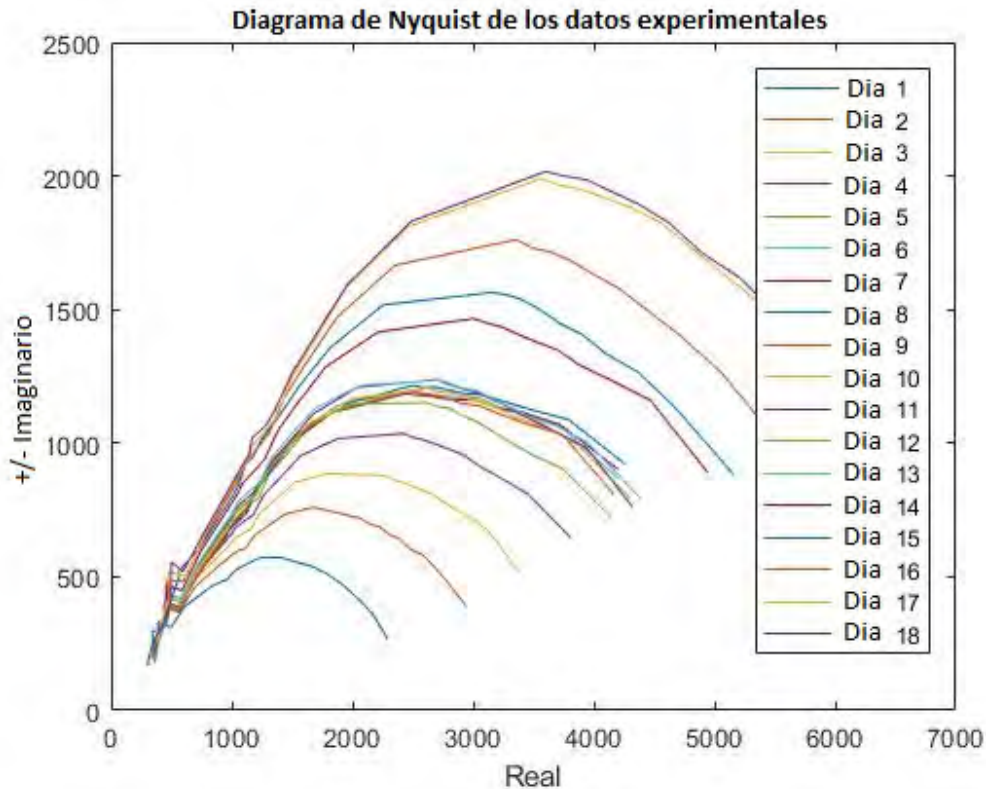


Figura 4.9: Diagrama de Nyquist de los datos obtenidos por impedancia del plátano en 18 días de experimentación.

La estimación paramétrica de los modelos eléctricos se realiza utilizando un analizador de espectros EIS, el cual nos proporciona datos iniciales. Para mejorar el ajuste de los datos experimentales se utilizó un algoritmo de optimización llamado Cuckoo search. Estos algoritmos permiten obtener los valores de los parámetros de los modelos de orden entero y fraccionarios.

Con el fin de establecer correlaciones entre los valores de los parámetros de los modelos de Cole y Hyden simplificado se obtuvieron los datos de impedancia por 18 días y se ajustaron utilizando estos modelos con la finalidad de correlacionarlos con las propiedades fisicoquímicas de los plátanos, las Figuras 4.10-4.45 muestran los diagramas de impedancia. Al considerar el operador de orden fraccionario en el sentido de Caputo, los Modelos Eléctricos de orden Fraccionario (MEF) presentan un mejor ajuste a las mediciones de EIE que las obtenidas con los Modelos Eléctricos de orden Entero (MEE), por lo tanto los valores obtenidos con estos modelos permiten describir de mejor manera el comportamiento bioeléctrico de esta fruta.

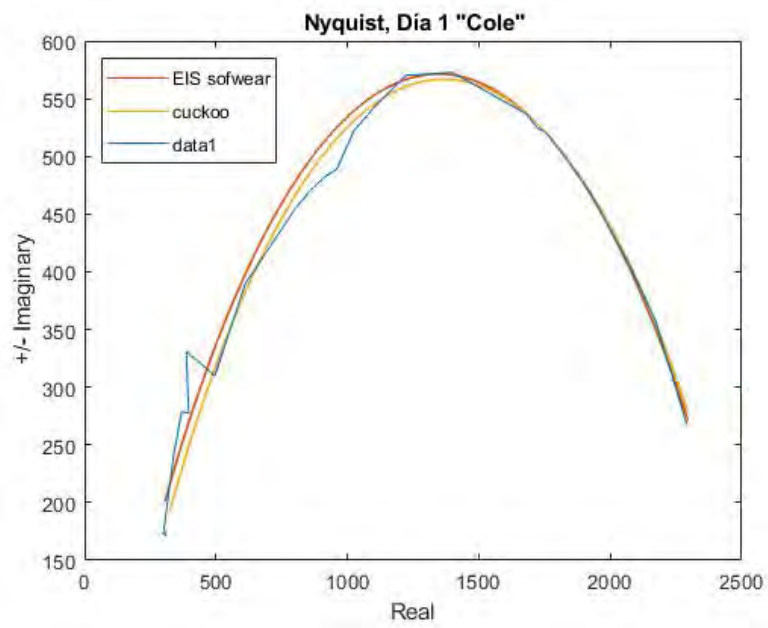


Figura 4.10: Modelo de Cole, Día 1.

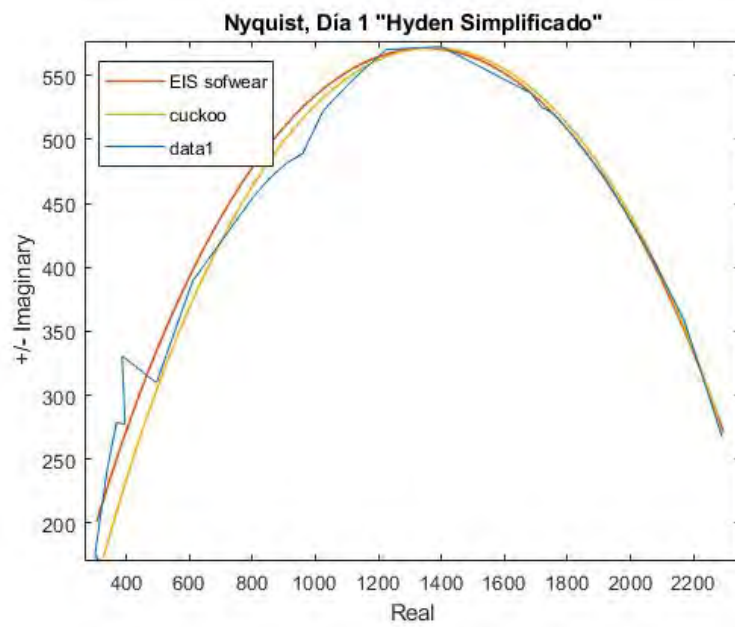


Figura 4.11: Modelo de Hyden simplificado, Día 1.



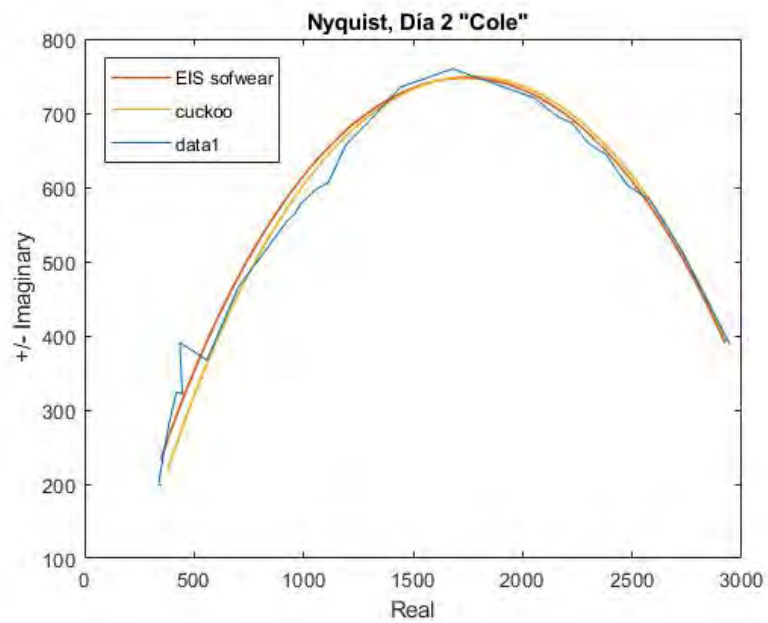


Figura 4.12: Modelo de Cole, Día 2.

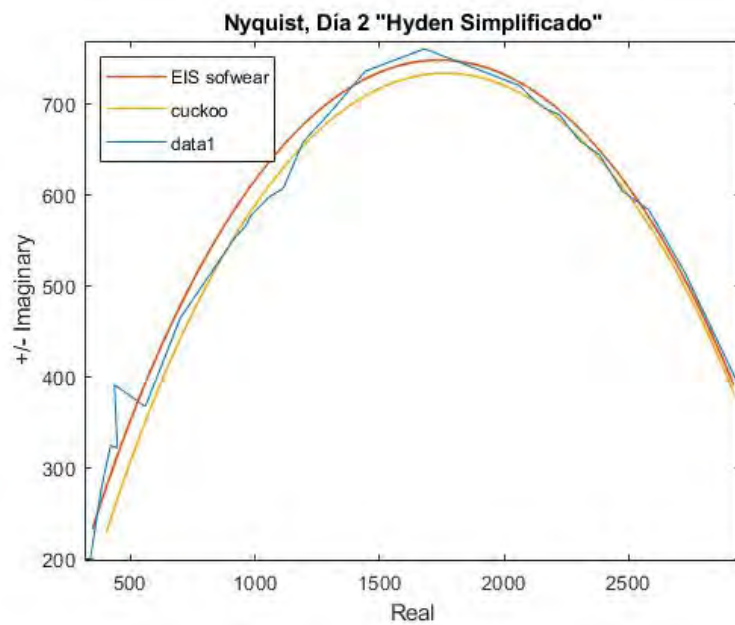


Figura 4.13: Modelo de Hyden simplificado, Día 2.

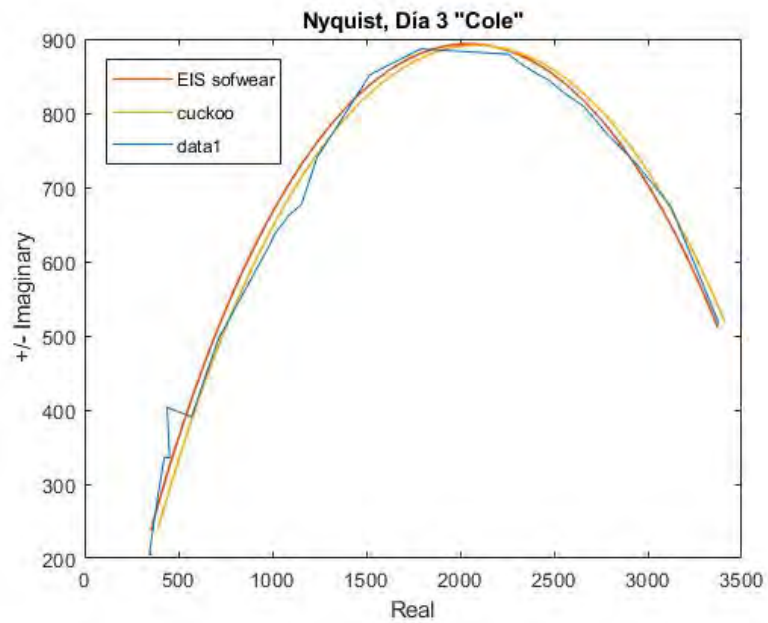


Figura 4.14: Modelo de Cole, Día 3.

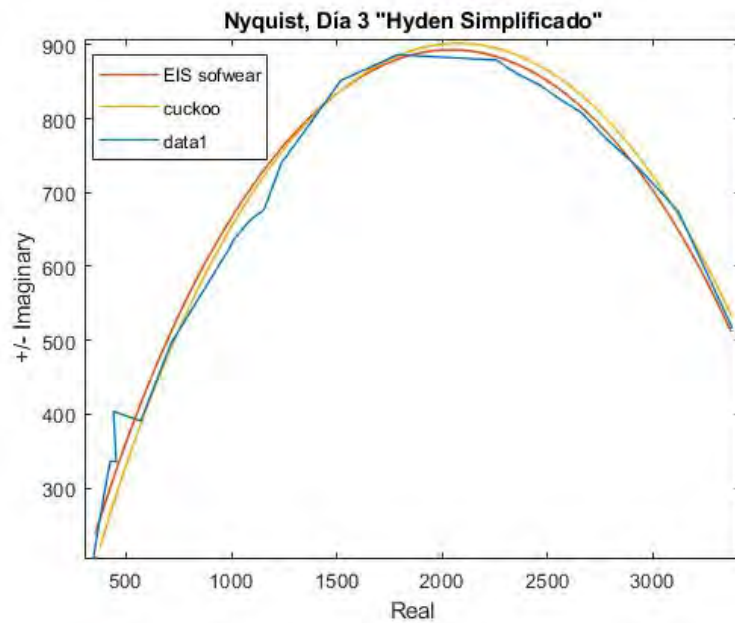


Figura 4.15: Modelo de Hyden simplificado, Día 3.



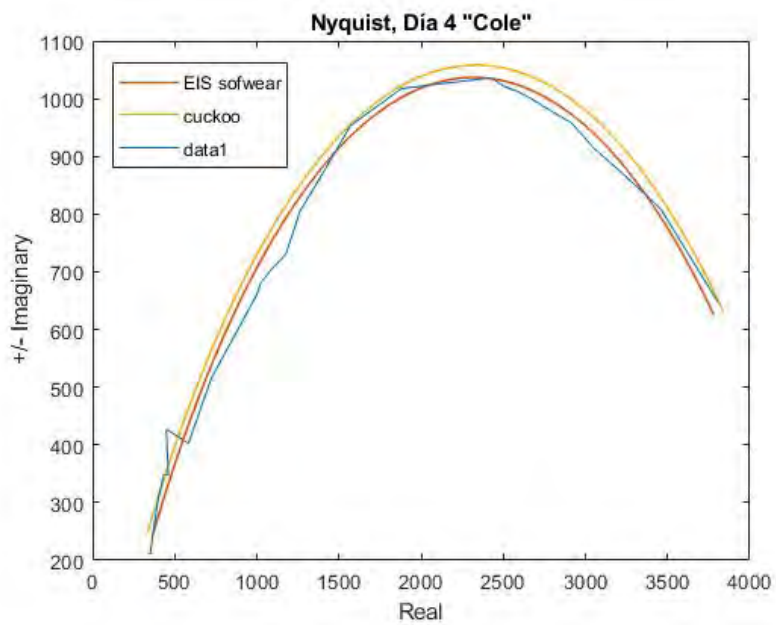


Figura 4.16: Modelo de Cole, Día 4.

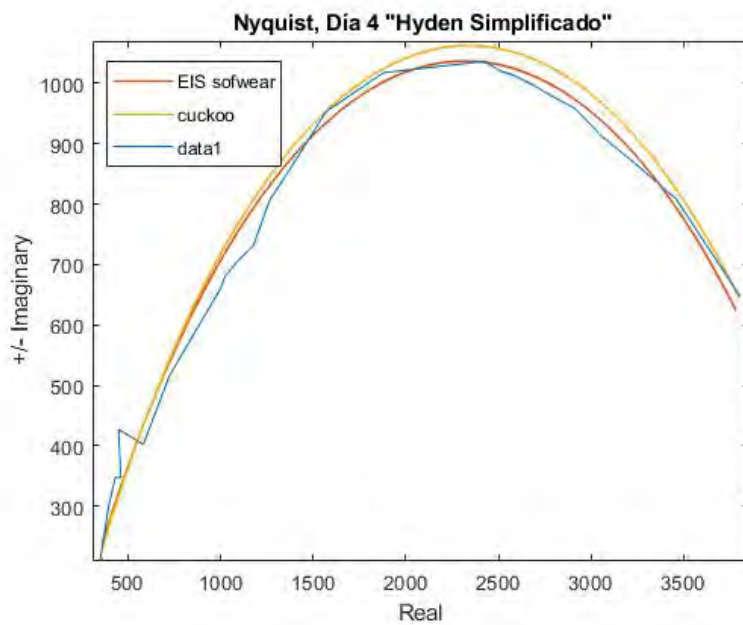


Figura 4.17: Modelo de Hyden simplificado, Día 4.

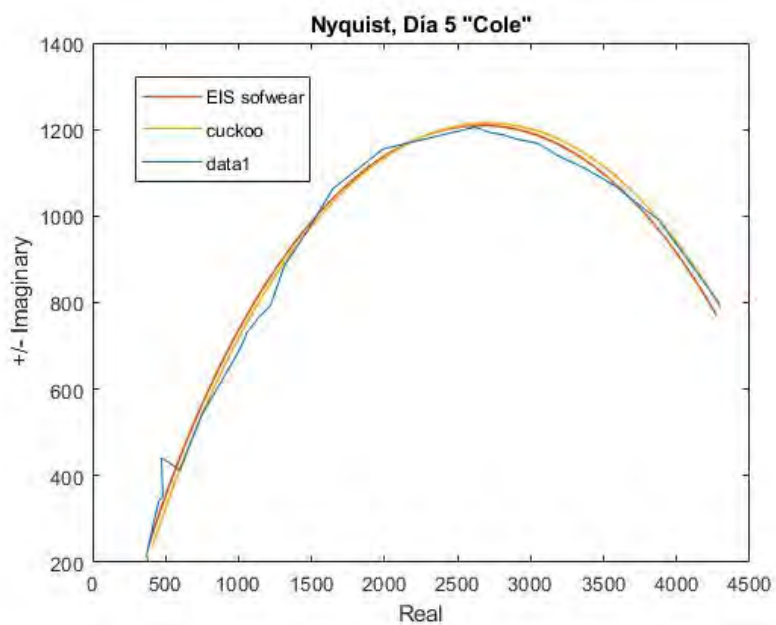


Figura 4.18: Modelo de Cole, Día 5.

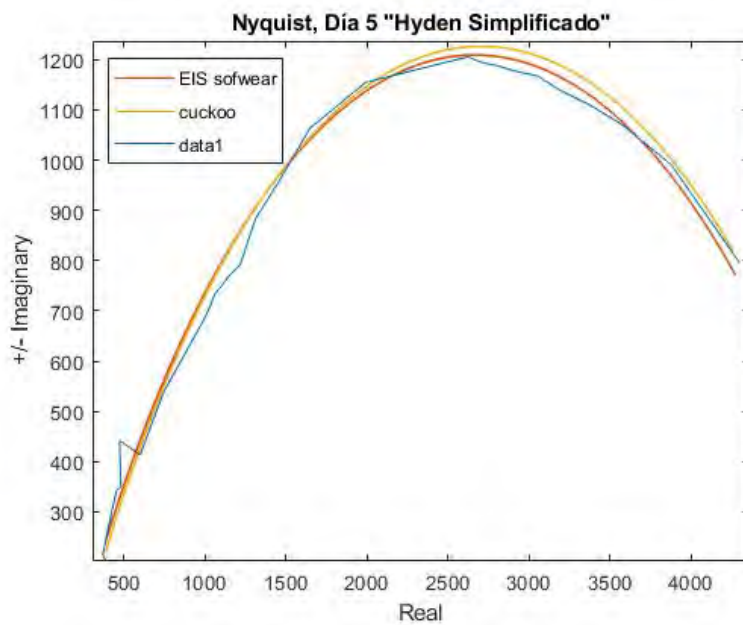


Figura 4.19: Modelo de Hyden simplificado, Día 5.

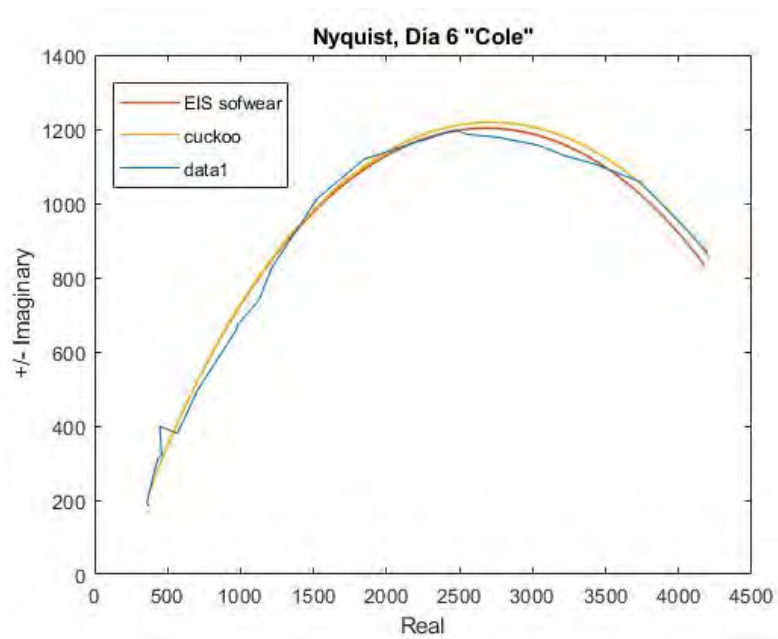


Figura 4.20: Modelo de Cole, Día 6.

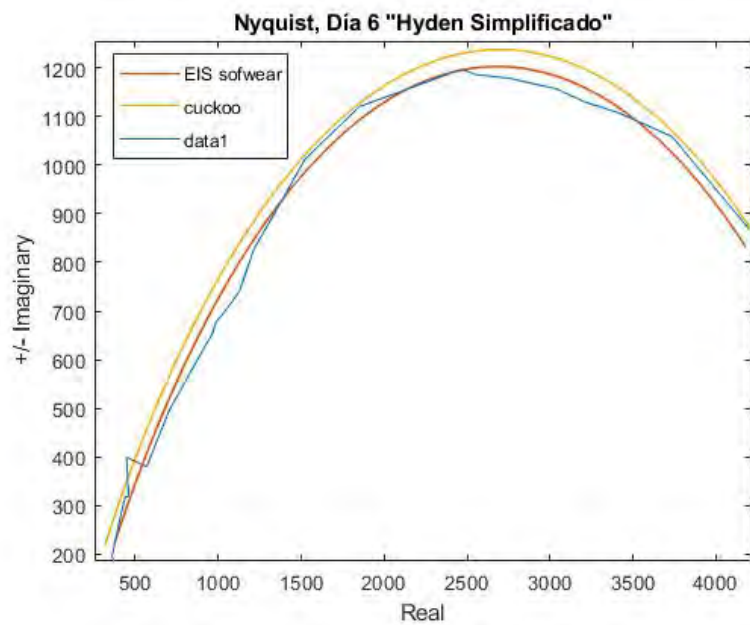


Figura 4.21: Modelo de Hyden simplificado, Día 6.

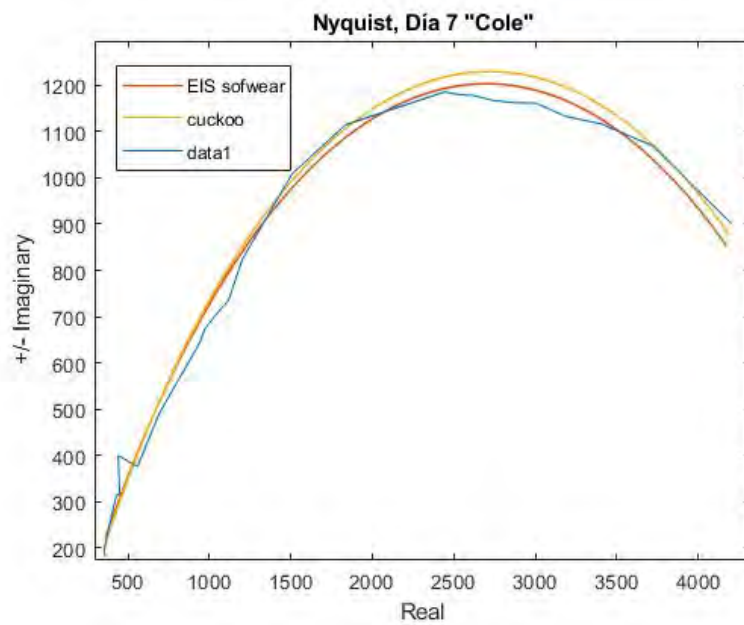


Figura 4.22: Modelo de Cole, Día 7.

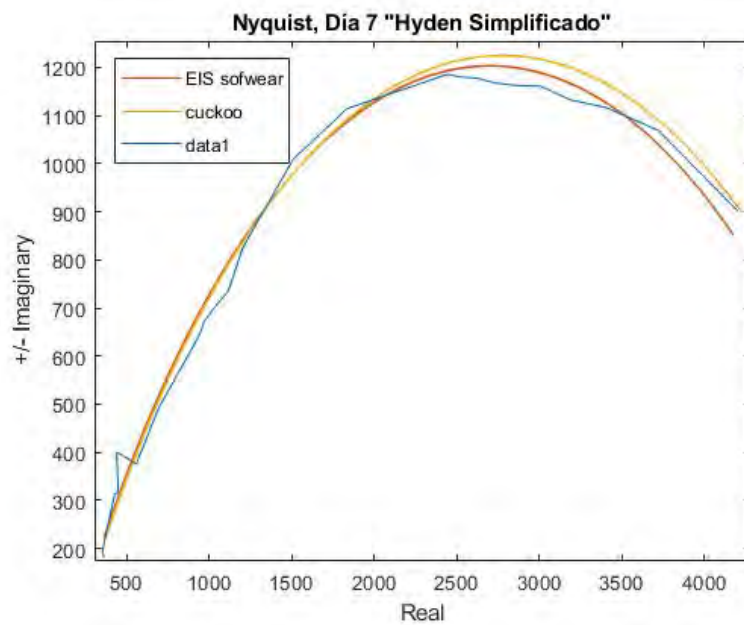


Figura 4.23: Modelo de Hyden simplificado, Día 7.

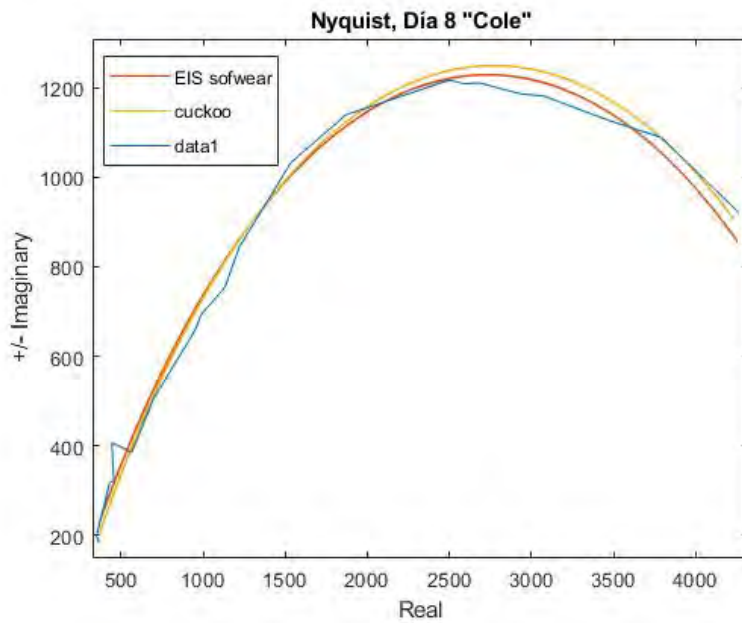


Figura 4.24: Modelo de Cole, Día 8.

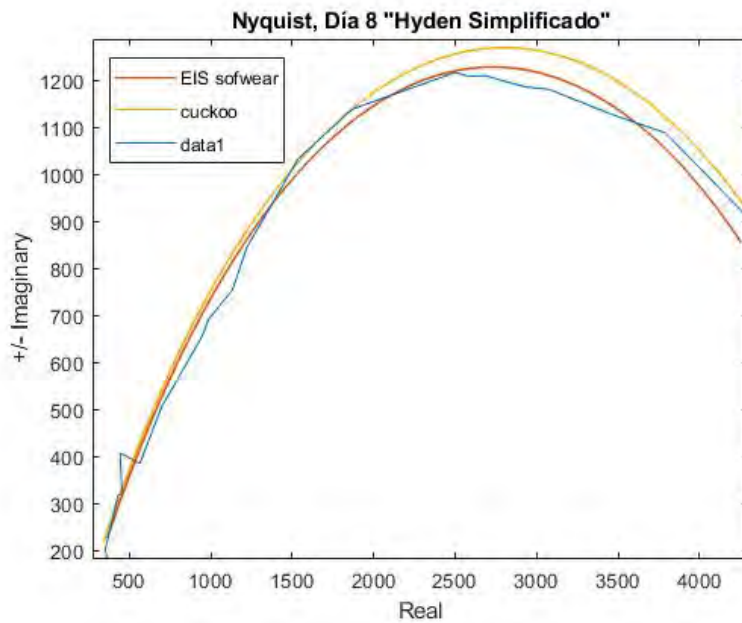


Figura 4.25: Modelo de Hyden simplificado, Día 8.

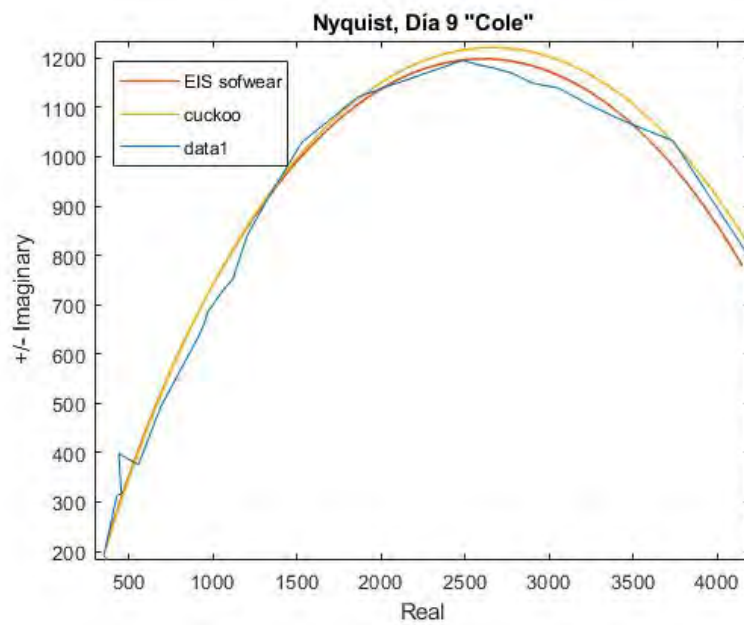


Figura 4.26: Modelo de Cole, Día 9.

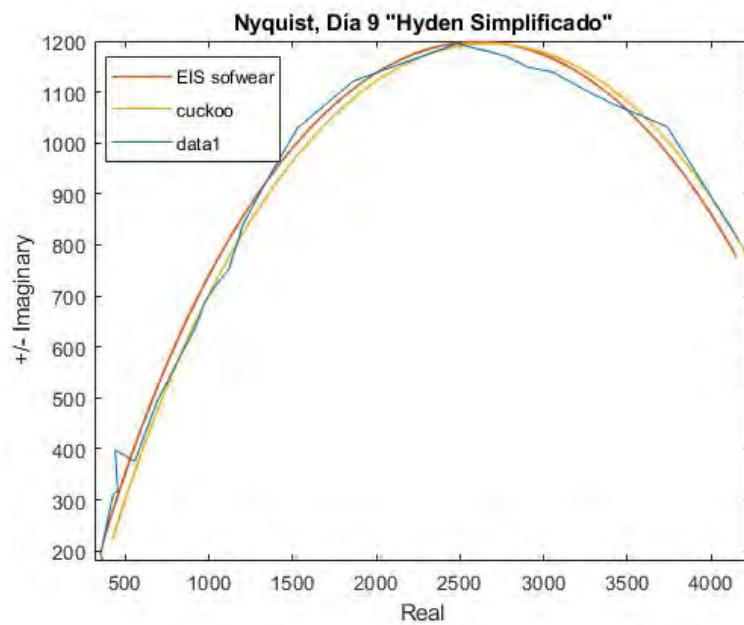


Figura 4.27: Modelo de Hyden simplificado, Día 9.

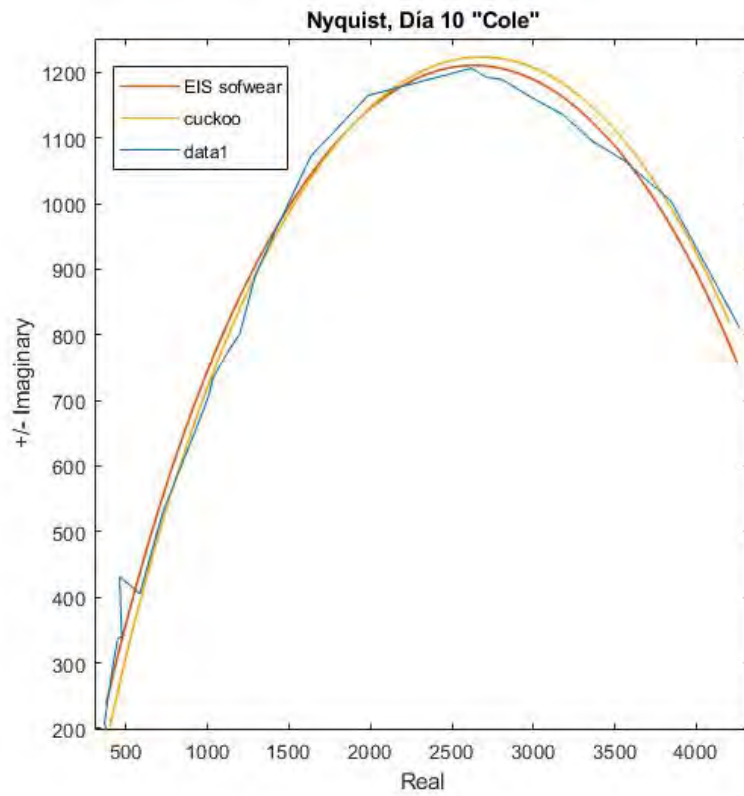


Figura 4.28: Modelo de Cole, Día 10.

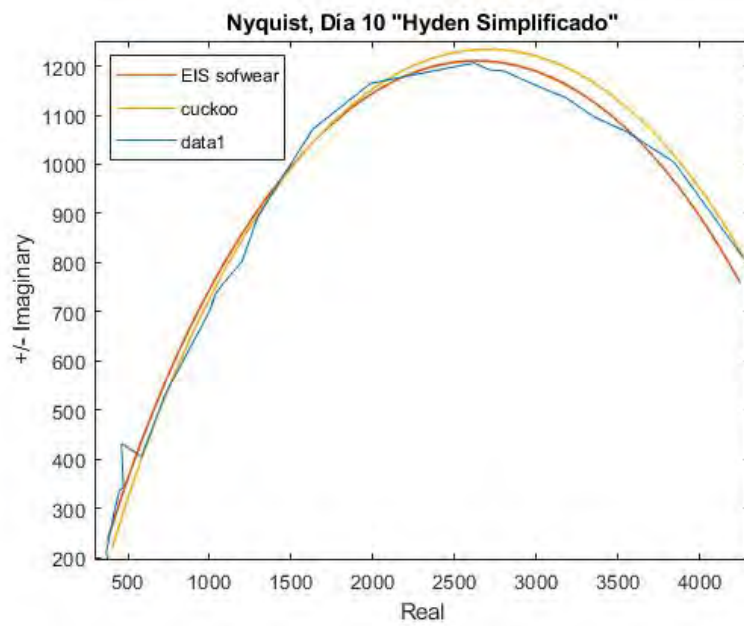


Figura 4.29: Modelo de Hyden simplificado, Día 10.



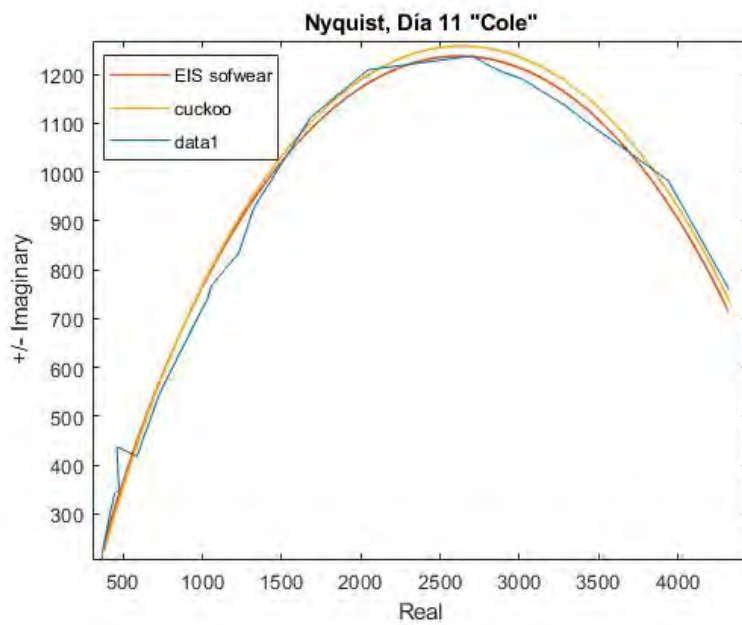


Figura 4.30: Modelo de Cole, Día 11.

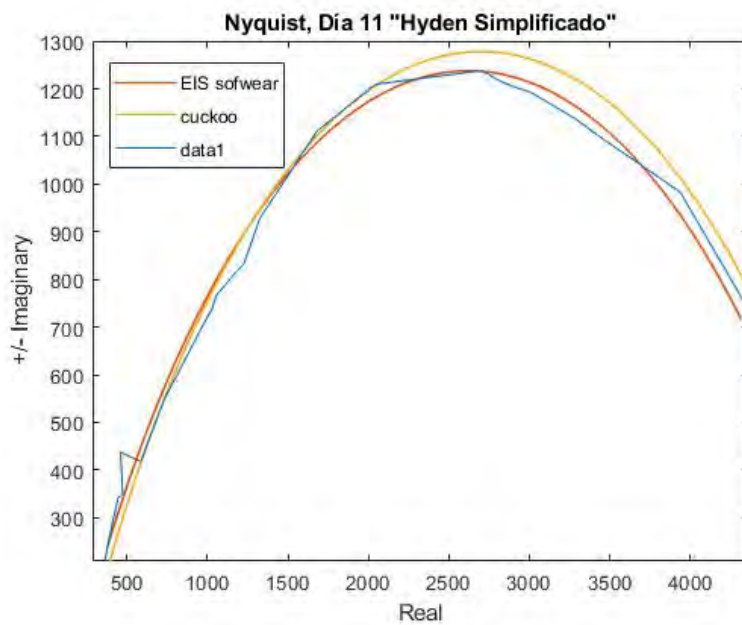


Figura 4.31: Modelo de Hyden simplificado, Día 11.



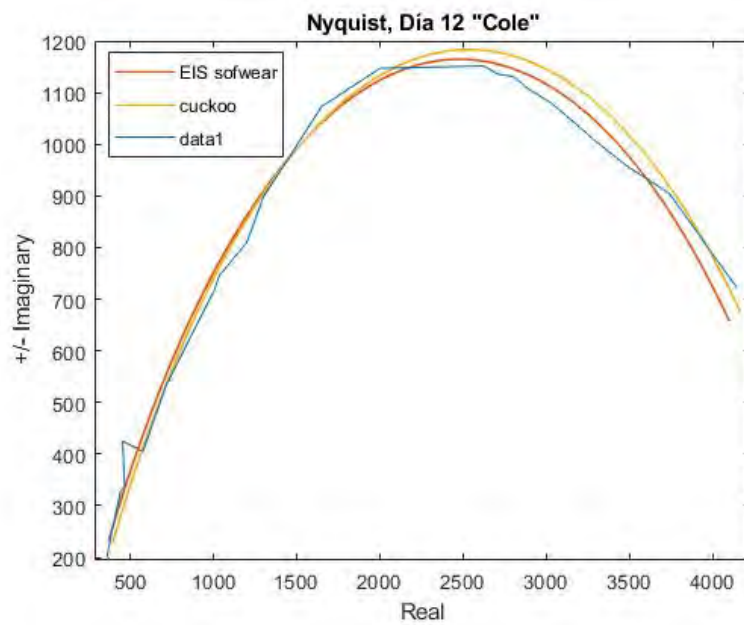


Figura 4.32: Modelo de Cole, Día 12.

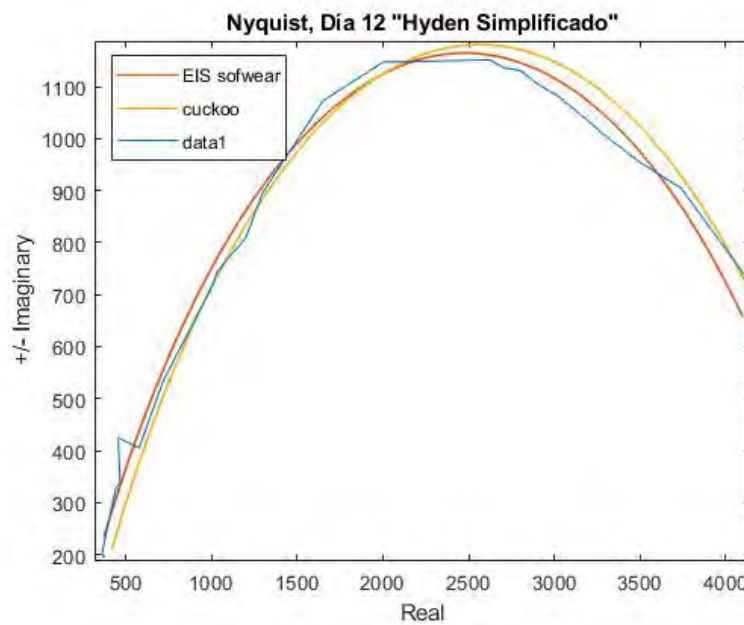


Figura 4.33: Modelo de Hyden simplificado, Día 12.

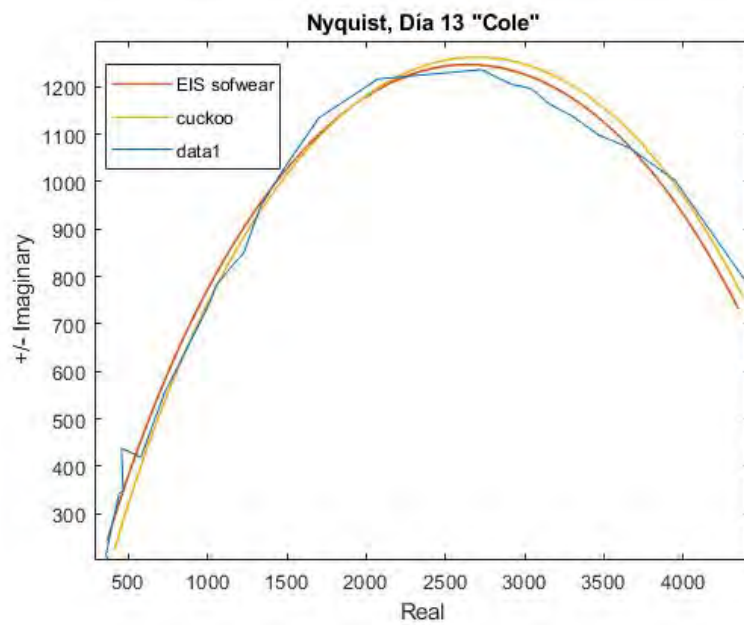


Figura 4.34: Modelo de Cole, Día 13.

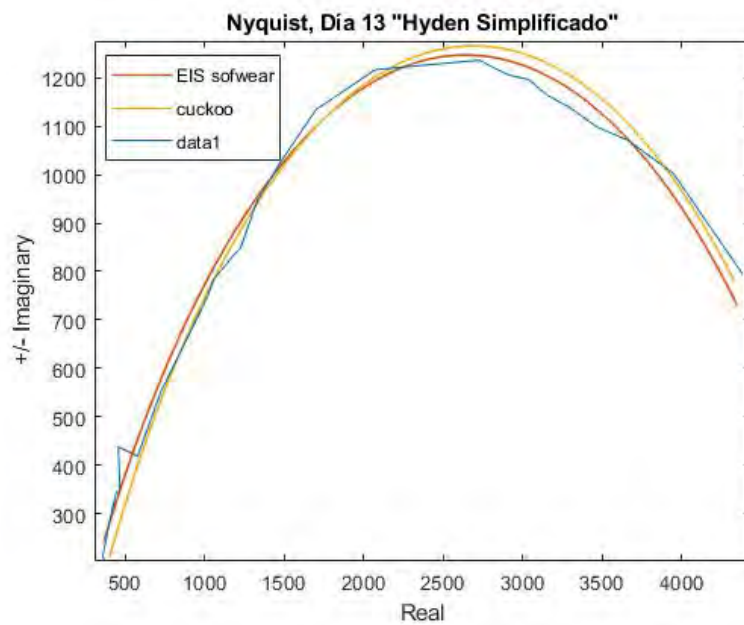


Figura 4.35: Modelo de Hyden simplificado, Día 13.

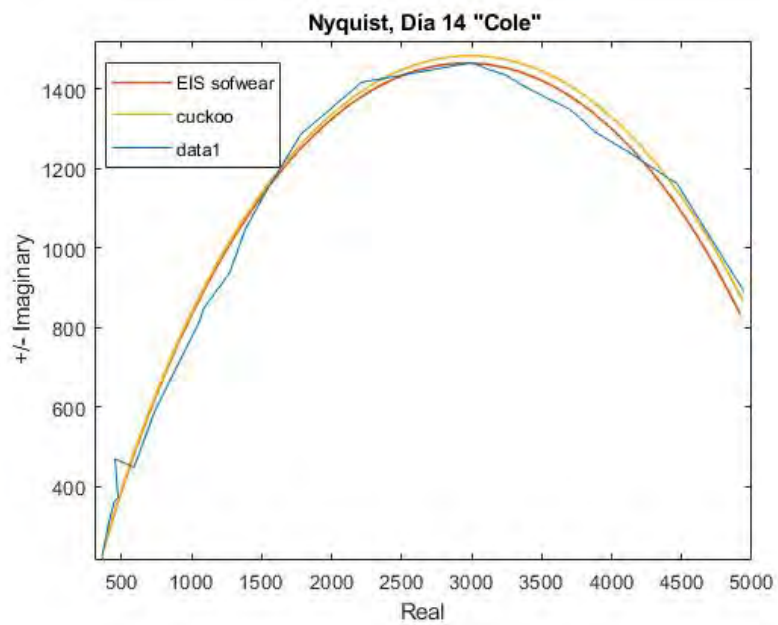


Figura 4.36: Modelo de Cole, Día 14.

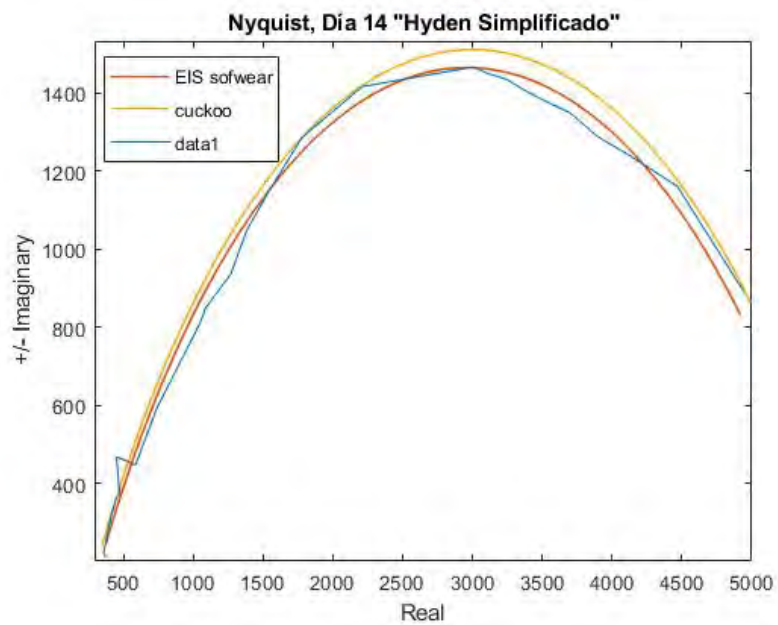


Figura 4.37: Modelo de Hyden simplificado, Día 14.

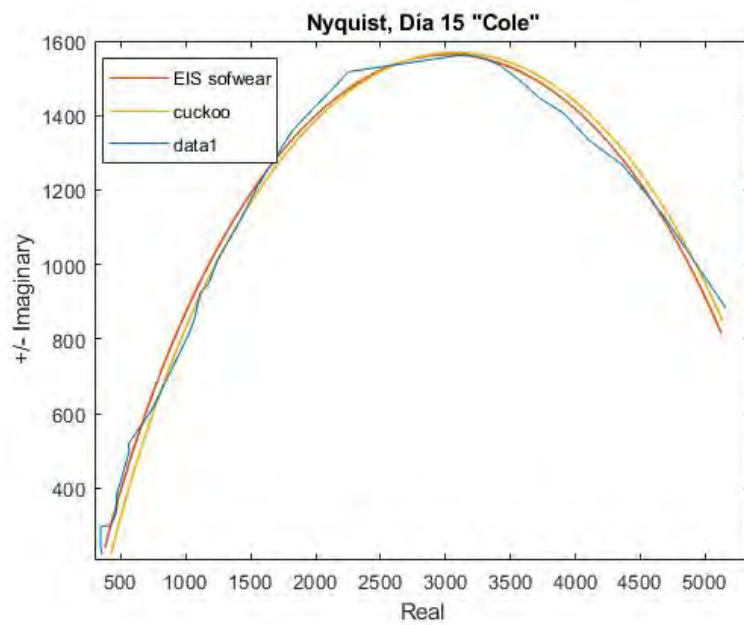


Figura 4.38: Modelo de Cole, Día 15.

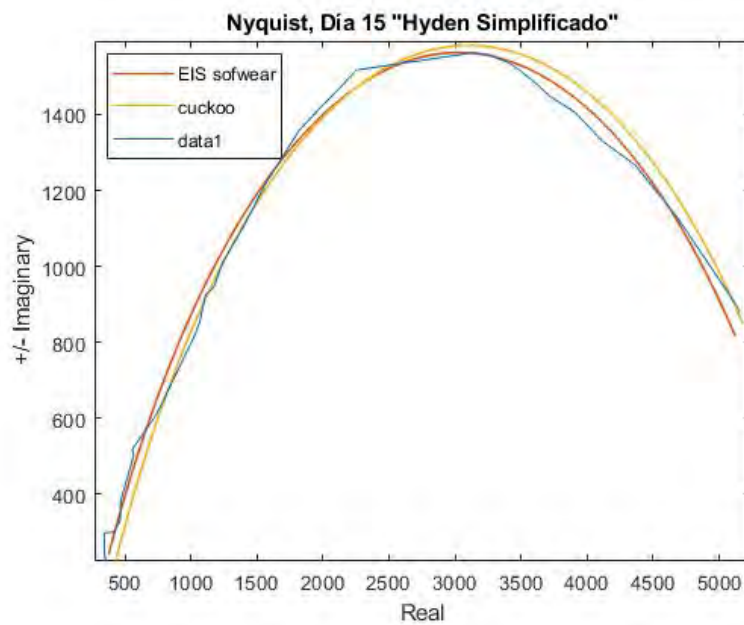


Figura 4.39: Modelo de Hyden simplificado, Día 15.

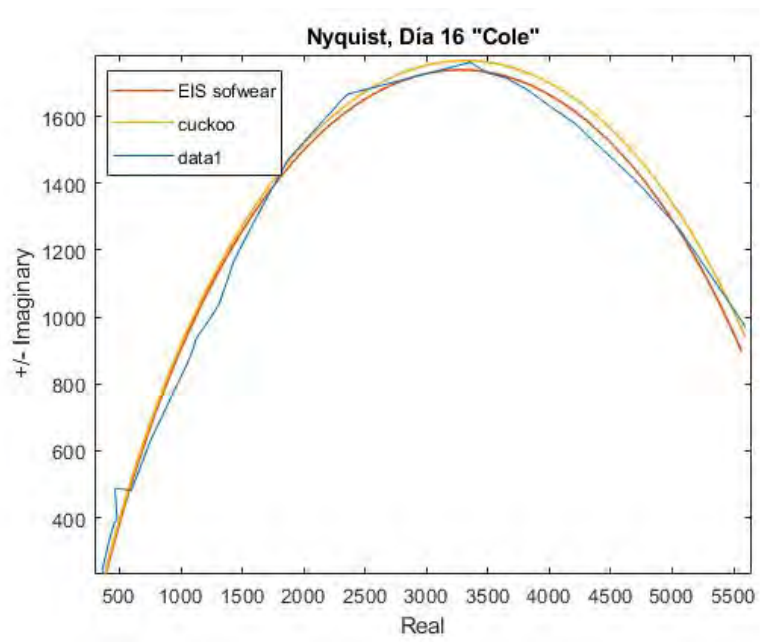


Figura 4.40: Modelo de Cole, Día 16.

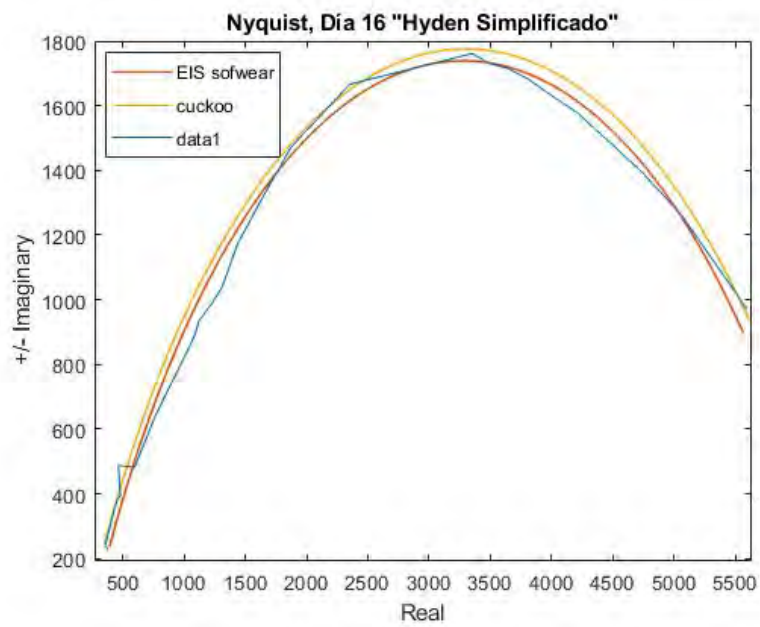


Figura 4.41: Modelo de Hyden simplificado, Día 16.

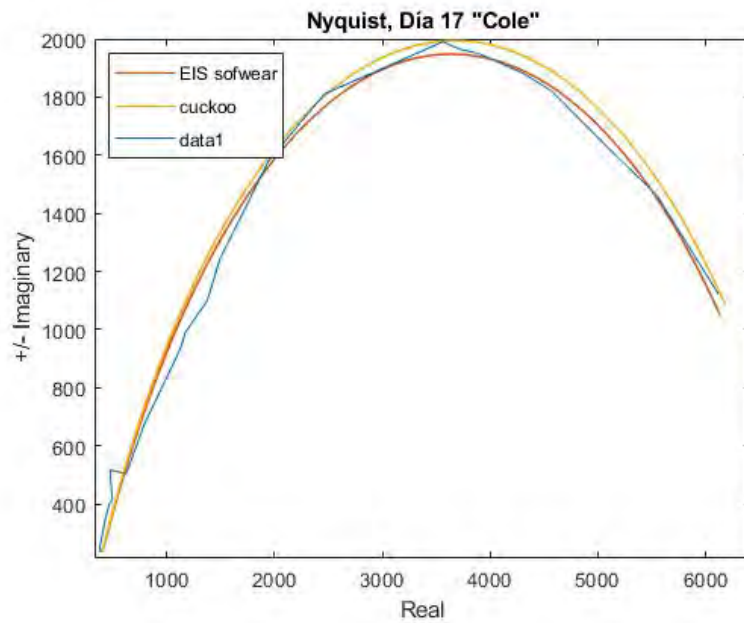


Figura 4.42: Modelo de Cole, Día 17.

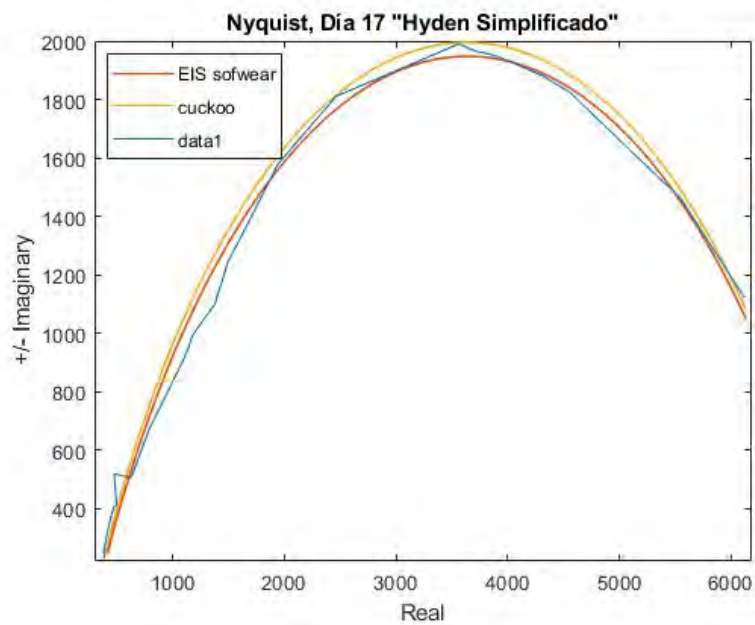


Figura 4.43: Modelo de Hyden simplificado, Día 17.

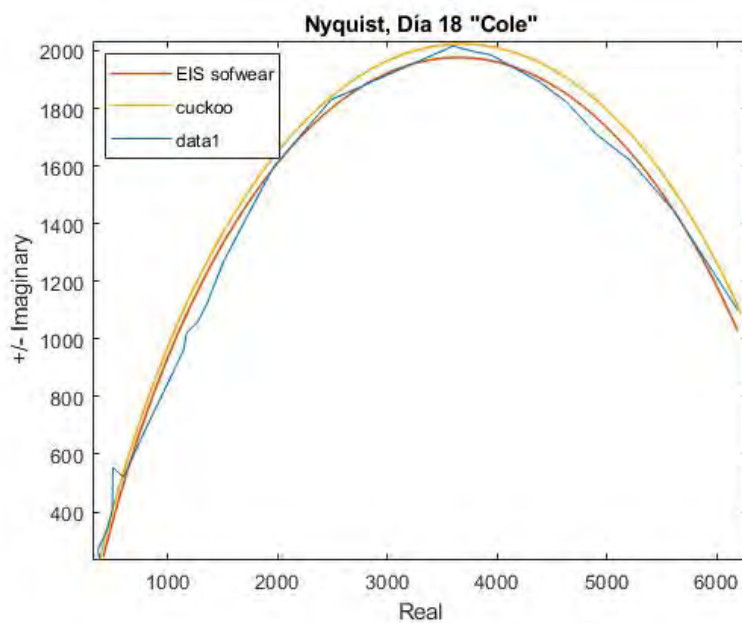


Figura 4.44: Modelo de Cole, Día 18.

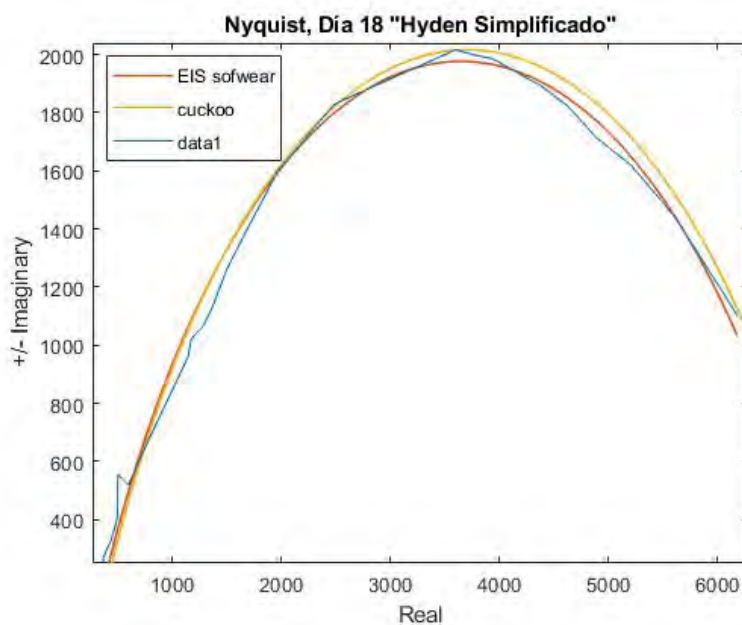


Figura 4.45: Modelo de Hyden simplificado, Día 18.

En las Figuras 4.46 y 4.47, se muestran los distintos valores de las resistencias obtenidas por la aplicación de los modelos de Cole y Hyden simplificado, mientras que las Figuras 4.48 y 4.49, presentan los distintos valores que toma el elemento de fase constante con su respectivo exponente  $\alpha$  obtenidos por medio del modelo de Cole y Hyden simplificado obtenidos por la espectroscopia y el optimizado por medio del algoritmo de Cuckoo.

De los resultados presentados en los gráficos anteriores, se observa en general que los diferentes parámetros que componen cada función de transferencia generalizada en sentido de Caputo, exhibe curvas con las mismas tendencias durante cada día del experimento. Asimismo, también se observa que los valores de los parámetros resistivos  $R_s$  y  $R_p$ , aumentan de manera proporcional entre ellos y se observa que los valores para el modelo de Cole presentan distintas escalas.

Para los gráficos de los valores de los parámetros  $CPE$  y  $\alpha$  dados en la Figura 4.48 y 4.49, los valores optimizados de  $CPE$  y  $\alpha$  tienen un comportamiento similar independientemente de la función de transferencia. Los dos parámetros que modelan el elemento de fase constante fraccionario  $CPE$  describen las heterogeneidades o no linealidades de los materiales biológicos.

Se puede concluir que los parámetros  $CPE$  y  $\alpha$  describen el comportamiento de la estructura macroscópica del material biológico, relacionado con interacciones no locales y no lineales del material. Además, estudios a diferentes escalas determinan que estos parámetros también están relacionados con algunas propiedades fisicoquímicas de la muestra.

#### 4.6. Caracterización eléctrica del plátano

Esta caracterización consiste en la cuantificación de los parámetros del modelo eléctrico de orden entero (MEE) o de orden fraccionario (MEF) utilizando datos EIE y el algoritmo de optimización de Cuckoo search. Como se mencionó, MEE o MEF se describen mediante el uso de ecuaciones diferenciales de orden entero o de orden fraccionario, respectivamente, y en el caso de MEF, se utiliza la definición de Caputo. Finalmente, con los valores obtenidos para los parámetros, se establecen correlaciones entre los valores y las propiedades fisicoquímicas del tejido del plátano.

Los modelos considerados para la caracterización eléctrica de tejidos vegetales son los modelos MEE y MEF presentados en la Figura 2.3.

Utilizando el conjunto de valores, se realiza la estimación de los parámetros del circuito de Cole a partir de las datos experimentales del EIE del plátano del primer día. Los resultados de esta estimación se muestran en la Figura 4.51 y son representados mediante diagramas de Nyquist. La Figura 4.50 presenta los valores de los parámetros para los MEE y MEF del modelo de Cole. En este caso, con el fin de estimar el error que existe entre los datos experimentales caracterizados por los modelos de orden fraccionario y los de orden entero, se calculó el índice del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE, por sus siglas en inglés) entre los datos experimentales obtenidos por la espectroscopia y los datos obtenidos después de evaluar los FT de los MEE y MEF considerando los parámetros optimizados.

En base a los valores de NRMSE mostrados en la Figura 4.50 y los diagramas de Nyquist mostrados en la Figura 4.51, se concluye que la optimización de los parámetros para el MEE del modelo de Cole no presenta un buen ajuste con las medidas experimentales del EIE. Es decir, los valores de los parámetros obtenidos para el modelo MEE mediante el modelo de Cole



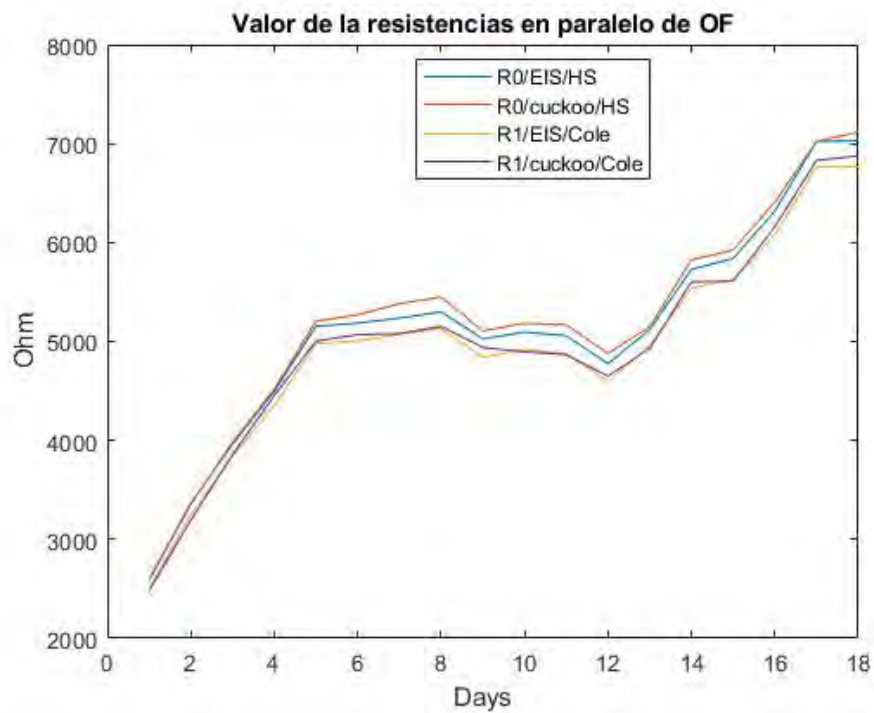


Figura 4.46: Resistencia en paralelo.

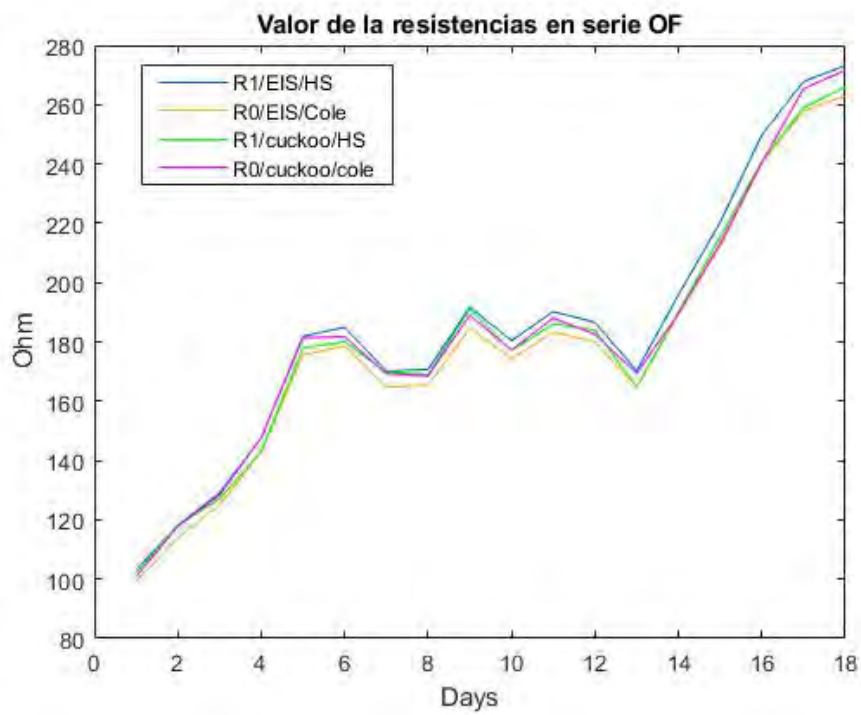


Figura 4.47: Resistencia en serie.

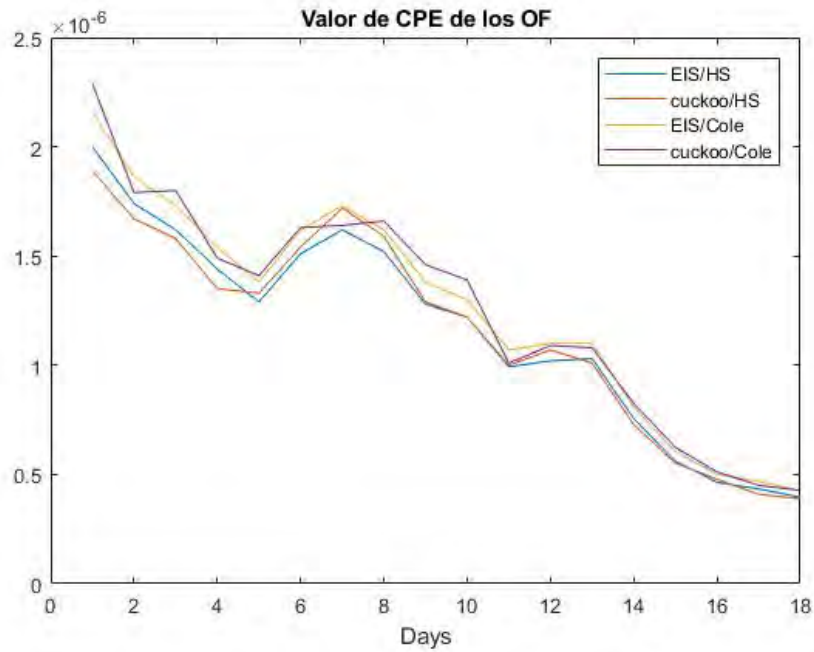


Figura 4.48: Elemento de fase constante.

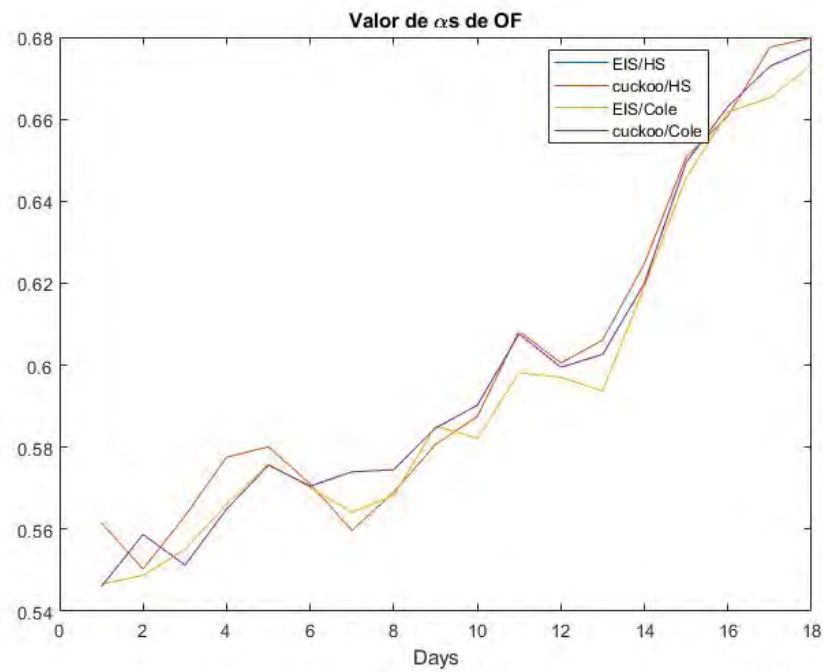


Figura 4.49: Valores de  $\alpha$ .

Modelos	$R_0[\Omega]$	$R_1[\Omega]$	$C_1[F]$	$\alpha$	NMRSE (real)	NMRSE (imag)
MEE	495.56	1527.6	3.79E-08	N/A	0.765	0.309
MEF	99.238	2495.9	2.16E-06	0.54664	0.987	0.849

Figura 4.50: Valores de los parámetros optimizados del modelo eléctrico de Cole correspondientes al día 1.

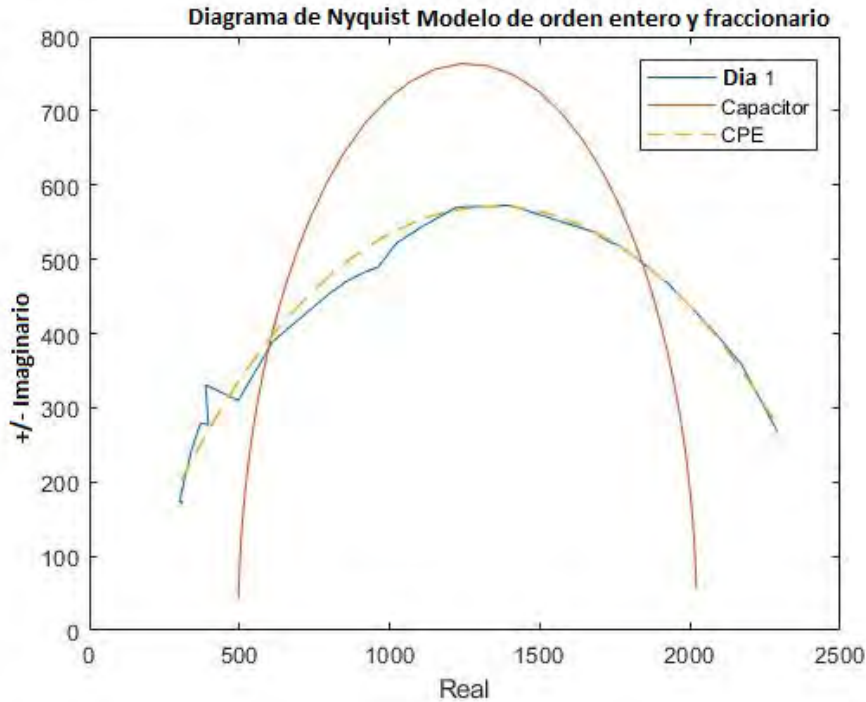


Figura 4.51: Diagrama de Nyquist de las mediciones experimentales del día 1, para modelos MEE y MEF son los parámetros optimizados del circuito de Cole.

no describen adecuadamente el comportamiento eléctrico del plátano en el ancho de banda considerado. Este es un resultado esperado ya que se sabe por la literatura que los MEE no describen completamente la dinámica de los sistemas no lineales, como un material biológico o tejido vegetal. Por otro lado, en la Figura 4.52 se observa que la mejor optimización la cual se ajusta a los datos de las medidas experimentales se presenta para los modelos eléctricos de orden fraccionario mediante el uso del modelo de Cole con la definición de Caputo, logrando un  $NRMSE > 0.9$ , además se incluyen otros modelos: el de Hyden, Hyden simplificado y Doble dispersión de Cole. Otra observación importante en los resultados se presenta en el valor del parámetro fraccionario  $\alpha$ , el cual se encuentra que el mejor valor es ( $\alpha \approx 0.55$ ) para el elemento de fase constante, o también conocido como impedancia de Warburg [19].

#### 4.7. Estimación paramétrica de los modelos CEM y FEM

En este caso, los modelos de orden fraccionarios considerando la definición de Caputo mostraron los mejores resultados comparándolos con los de orden entero, esto puede verse en la Figura 4.53. La figura muestra los valores de los parámetros  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  y  $\alpha$ , que son comunes en

Modelo Eléctrico	Tipo de modelo	Métodos de optimización	$R_0[\Omega]$	$R_1[\Omega]$	$C_1[F]$	$\alpha$	$R_2[\Omega]$	$C_2[F]$	$\alpha_2$	NMRSE (real)	NMRSE (imag)
Cole	MEE		495.56	1527.6	3.79E-08					0.765	0.309
	MEF	EIS software	99.238	2495.9	2.16E-06	0.54664				0.987	0.849
		cuckoo	99.98	2479.4881	2.29E-06	0.54601325				0.989	0.852
Hayden-S	MEE		2023.1	656.33	2.16E-08					0.763	0.308
	MEF	EIS software	2595.2	103.18	2.00E-06	0.54664				0.9836	0.842
		cuckoo	2583.5792	101.509	1.89E-06	0.56153773				0.9821	0.848
Hyden	MEE		4798.1	552.64	3.05E-08		2945.5			0.762	0.303
	MEF	EIS software	2602.1	103.17	2.00E-06	0.54664	9.66E+05			0.953	0.8216
		cuckoo	2568.2727	108.596742	2.13E-06	0.55153789	9.99E+05			0.9783	0.862
DD-Cole	MEE		302.88	818.97	1.48E-08		1079.9	1.52E-07		0.7478	0.313
	MEF	EIS software	99.238	2495.9	2.16E-06	0.54664	4.24E-05	0.00048682	0.40464	0.9291	0.8432
		cuckoo	97.947906	2576.01839	2.03E-06	0.5424582	4.18E-05	0.0005003	0.40780428	0.9294	0.8369

Figura 4.52: Valores de los parámetros optimizados mediante los modelos eléctricos Cole, Hyden-S, Hyden y DD-Cole, para el día 1.

todos los modelos MEF mencionados. Se puede ver que los valores presentan comportamientos similares. Es decir, los valores de los parámetros  $R_0$  y  $R_1$  obtenidos para los modelos de orden fraccionario presentan una relación directa y proporcional con los valores de la amplitud  $|Z|$ , la resistencia  $R$  y la reactancia  $X$  obtenidos de las pruebas de bioimpedancia del plátano.

Por ejemplo, en la Figura 4.53 se puede observar que los valores de  $R_0$  para el modelo Hayden-S de orden fraccionario presentan comportamientos similares considerando una frecuencia de 100 Hz. Asimismo, se puede observar la misma relación para los valores de la resistencia en paralelo  $R_1$  y la reactancia de los datos obtenidos para los plátanos a una frecuencia de 5000 Hz. Debido a esto podemos concluir que tanto,  $R_0$  y  $R_1$  pueden utilizarse para determinar los valores de ciertas propiedades fisicoquímicas, como los sólidos solubles totales y la acidez titulable de los plátanos, que son indicadores que determinan el estado de madurez de este fruto [40].

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos por las técnicas de bioimpedancia eléctrica, se obtuvieron resultados experimentales de tres propiedades fisicoquímicas que fueron tomadas durante los 18 días, las pruebas permitieron obtener indicadores para los sólidos solubles totales (TSS), la acidez titulable (TA) y el color del plátano, los comportamientos de estos datos se muestran en la Figura 4.54. De estos comportamientos se puede observar que las curvas para los TSS y TA del plátano muestran un comportamiento ascendente conforme los días empiezan a transcurrir, denotando un aumento considerable en el valor de cada propiedad a partir del día 13. El aumento de TSS y TA se debe a que los almidones se hidrolizan en azúcares solubles y la actividad enzimática aumenta durante la maduración del plátano [41].

A partir de estos resultados, podemos deducir una relación proporcional entre las datos obtenidos mediante la espectroscopia de impedancia eléctrica y las propiedades fisicoquímicas anteriores. Relacionando un aumento en los valores de resistencia tanto en serie como en paralelo y el aumento gradual de los TSS y TA del plátano conforme avanzan los días. Esto considerando

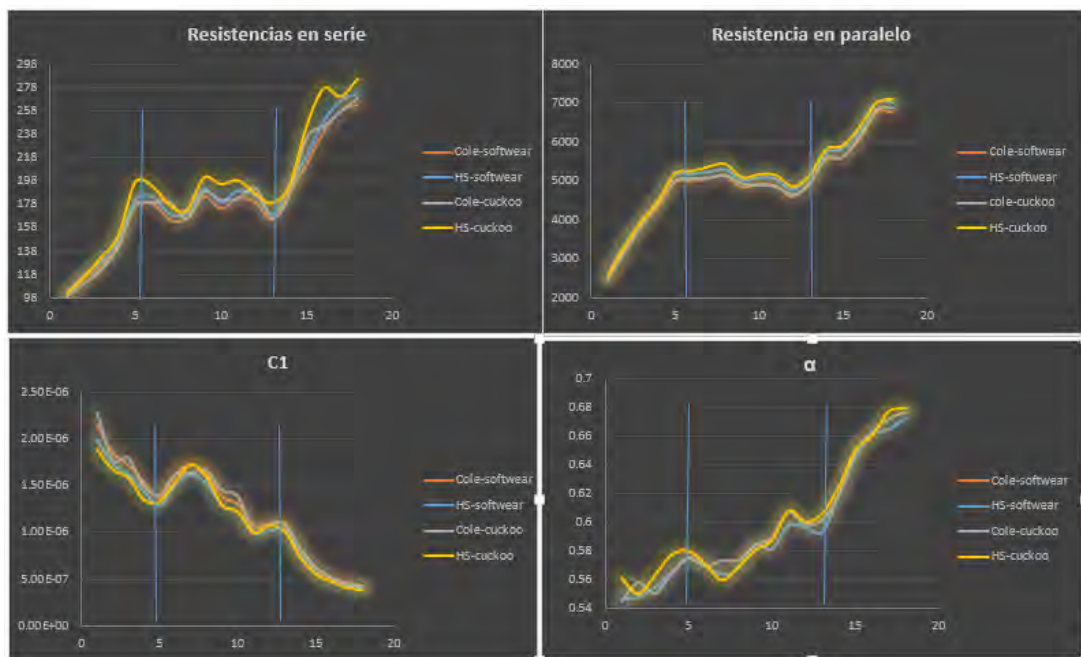


Figura 4.53: Gráficas de los parámetros  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $C_1$  y  $\alpha$  considerando la definición de Caputo.

que TSS y TA del plátano son propiedades clave para indicar su madurez y calidad, por lo tanto podemos concluir que los datos obtenidos mediante la espectroscopia también pueden usarse y correlacionarse estas propiedades del fruto.

Para la propiedad del color de la cáscara del plátano, las gráficas de las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  del espacio de color CIELab se muestran en las Figuras 4.54-4.57. Como puede verse en los gráficos, al igual que los comportamientos de las resistencias en serie y en paralelo obtenidos por medio de la espectroscopia de impedancia eléctrica, los valores de las coordenadas cromáticas presentan tendencias a aumentar a partir del día 13, especialmente para el caso de la coordenada  $a^*$ . Estos cambios ocurren como consecuencia de la degradación de la clorofila, lo que hace que los carotenoides sean más visibles [42], y es considerado un indicador importante para la madurez del plátano. Por lo tanto, a partir de los resultados de las coordenadas cromáticas, también se puede concluir que las mediciones de espectroscopia de impedancia eléctrica pueden usarse como un indicador de la maduración del plátano. En general, se observa que durante la maduración del plátano, los valores de las propiedades fisicoquímicas se incrementan provocando un incremento en los valores de la magnitud de la bioimpedancia, lo que provoca que la resistencia al flujo de corriente aumente debido a que hay un mayor contenido de sólidos disueltos en el plátano.

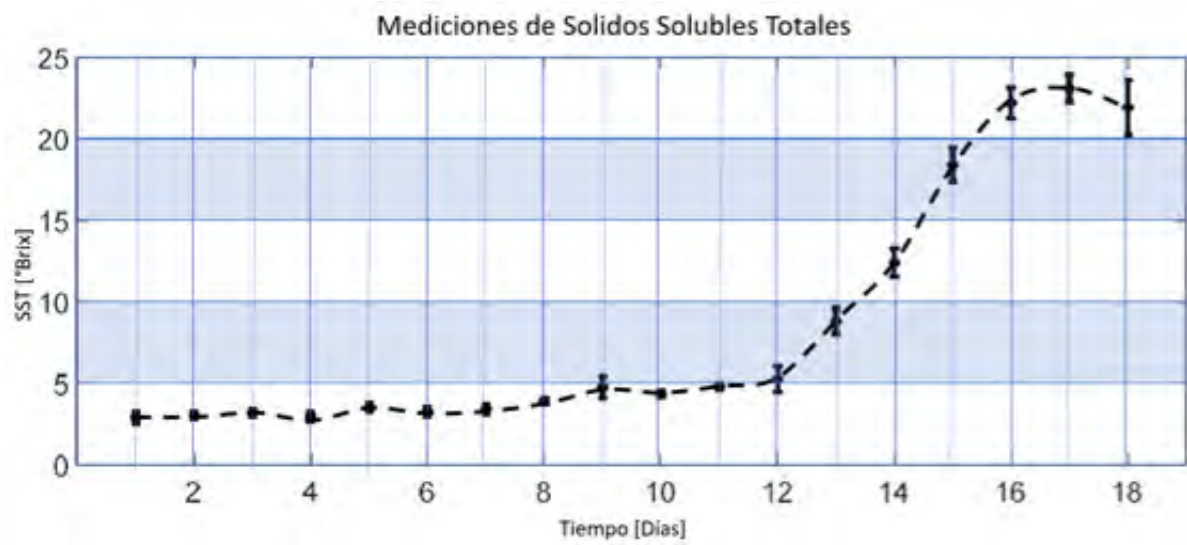


Figura 4.54: Comportamiento de las mediciones de solidos solubles totales del plátano.

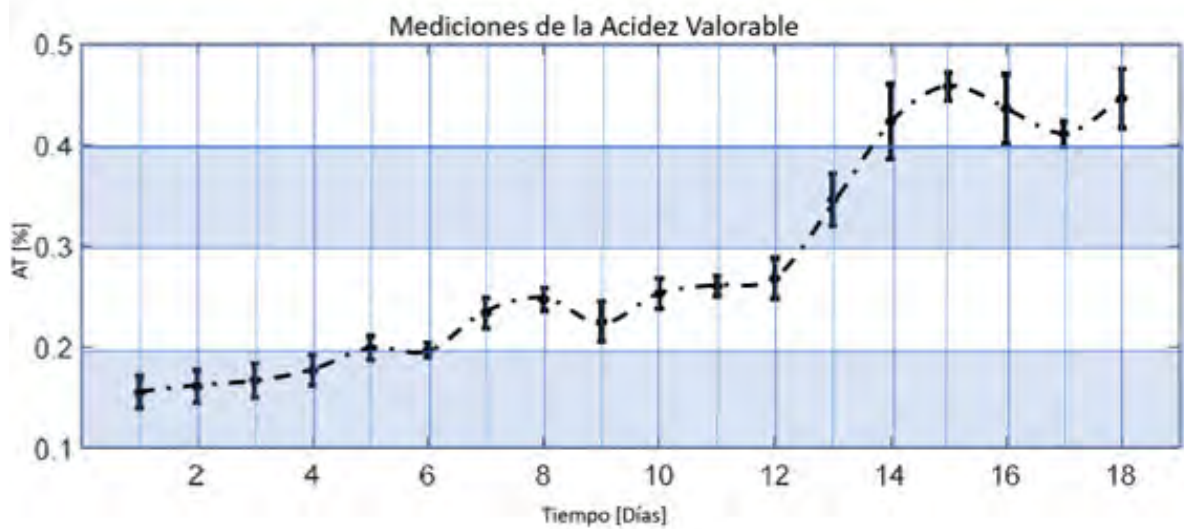


Figura 4.55: Comportamiento de las mediciones de acidez valorable del plátano.



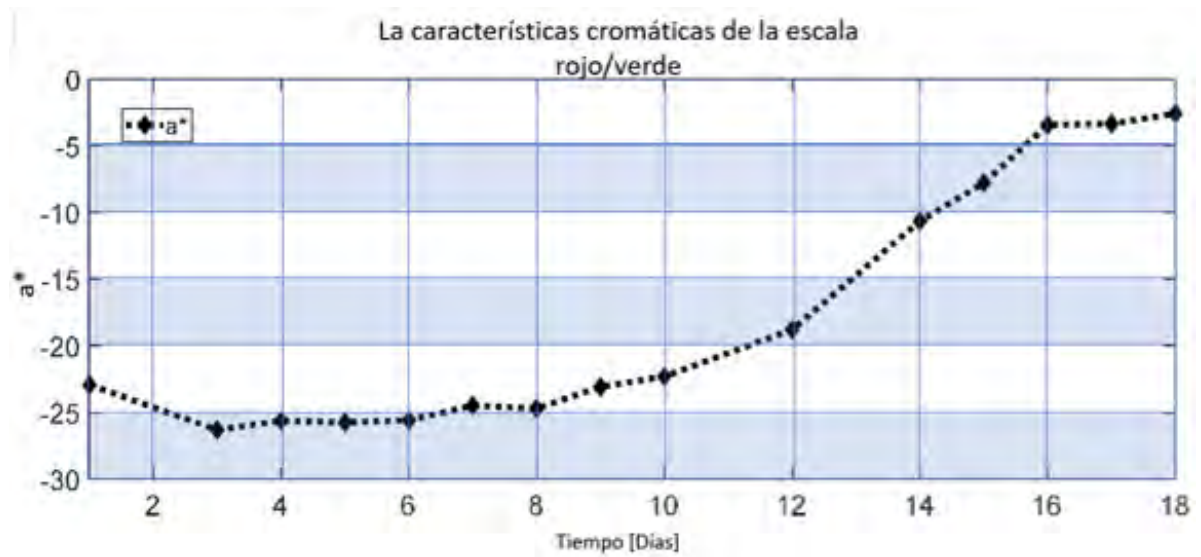


Figura 4.56: Comportamiento de las características cromáticas, escala rojo/verde del plátano.

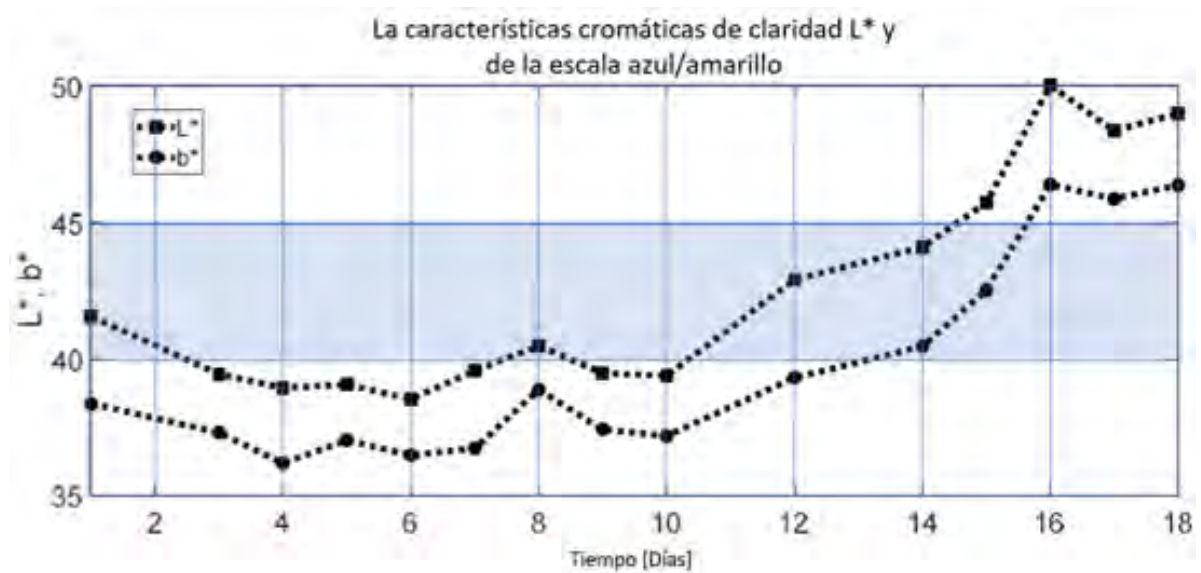


Figura 4.57: Comportamiento de las características cromáticas de claridad L\* y de la escala azul/amarillo del plátano.

# Capítulo 5

---

## Conclusiones

---

Los sistemas biológicos tienen fundamentos basados en ecuaciones diferenciales fraccionarias. Debido a esto, es de esperarse que la representación eléctrica de modelos equivalentes en circuitos celulares así como en potenciales de acción sea más precisa de la que se podría obtener con la modelización considerando ecuaciones diferenciales de orden entero.

La técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica se considera una técnica de obtención de propiedades intrínsecas de materiales biológicos de bajo costo y fácil de implementar, y puede usarse en el campo de la ingeniería alimentaria; últimamente, se han realizado trabajos relevantes en laboratorios de investigación especializados utilizando equipos comerciales de varios miles de dólares. En cambio el dispositivo CoreBioZ-S reportado en [23] permite diseñar un dispositivo portátil, confiable y fácil de usar, y su fabricación no supera los 250 dolares americanos.

Los resultados obtenidos mediante la caracterización eléctrica utilizando la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica proporcionan valores que tienen una correlación directa entre la bioimpedancia y las propiedades y estimaciones fisicoquímicas del plátano, y por lo tanto, estos valores podrían utilizarse para determinar el estado de madurez de esta fruta. Considerando distintas frecuencias de acuerdo a las propiedades y características de los frutos a explorar podemos concluir que la técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica permite obtener resultados confiables que se pueden utilizar para caracterizar eléctricamente otros frutos y poder determinar sus propiedades fisicoquímica y fisiológicas.

Se obtuvieron cuatro circuitos equivalentes de orden entero (MEE) y cuatro de orden fraccionario (MEF), logrando un  $\text{NRMSE} > 0.9$  para los modelos de orden fraccionario considerando la derivada fraccionaria de tipo Caputo, mientras que para los modelos de orden entero se obtuvo un aproximado de  $\text{NRMSE} < 0.76$ , por tanto, se concluye que los modelos de orden fraccionarios generalizados con la definición de Caputo son más adecuados para ajustar los datos obtenidos de manera experimental, estos modelos permiten cuantificar y correlacionar de manera exitosa las propiedades fisicoquímicas y fisiológicas como las mediciones de sólidos solubles totales y la acidez valorable del plátano.

El análisis de respuesta en frecuencia a la función de transferencia de un circuito eléctrico equivalente muestra que se puede aprovechar la sensibilidad de los espectros de Bode y Nyquist en la caracterización de muestras biológicas (en este caso el plátano), donde de acuerdo a las mediciones obtenidos se forman familias de curvas con parámetros similares (R y C), no obstante que se habían obtenido en días diferentes. Esta capacidad experimental puede ser aprovechada con fines de caracterización, estudio e investigación de tejidos vegetales en la medida en la que sean desarrolladas metodologías teóricas eficaces y rigurosas. Al introducir el operador fraccionario de tipo Caputo y resolver el circuito eléctrico fraccionario equivalente se tiene de manera



natural un grado de libertad adicional, el cual con fines de caracterización permite mejorar la correlación en el ajuste a los datos experimentales.

Los modelos de orden fraccionario descritos por la derivada de Caputo permiten correlacionar de mejor manera los parámetros  $R_0$  y  $R_1$  obtenidos de manera experimental y ajustarse al comportamiento de la impedancia que se presentaba a lo largo de los 18 días de estudio. Estos cambios podían relacionarse con las propiedades fisicoquímicas del plátano tales como los sólidos solubles totales, acidez titulable y el color de la cascara.

El modelado considerando otros modelos equivalentes mas complejos involucrando la definición de Caputo, tales como los modelos de Hyden y de doble dispersión de Cole no son de gran ayuda al menos para esta fruta, sin embargo podrían ayudar a caracterizar frutos o vegetales mas complejos tales como la piña, semillas o el aguacate.

Los protocolos considerados para obtener las medidas de bioimpedancia y la posterior estimación del estado de maduración de una fruta o verdura no son muy restrictivos, por tanto, estas mediciones se pueden realizar en el laboratorio o directamente donde se encuentre el tejido vegetal (granja, cultivo, supermercado) aplicando estas pruebas que no son destructivas, que no generan residuos y que por consecuencia son ecológicamente amigables.

### 5.1. Aportaciones y Trabajos futuros.

Se obtuvo una relación entre la madurez de la fruta o vegetal con la impedancia obtenida con un equipo no invasivo, de bajo costo y fácil de utilizar.

Considerar modelos eléctricos con varios elementos de fase constante (es decir, que involucren una doble y/o triple capa) que pueden mejorar aún más la caracterización eléctrica de tejidos biológicos complejos tales como el pepino, manzanas, jitomates, melones, sandías o jícamas.

De acuerdo a los resultados obtenidos y a la fácil implementación en hardware del dispositivo utilizado podemos considerar el estudio de otros tejidos biológicos para la detección de cáncer de mama, cáncer de cuello uterino, tejido sanguíneo considerando personas sanas y otras con algunas patologías de naturaleza hematológica como a leucemia, anemia, la parasitosis hematológica, entre otras y la validación de los modelos matemáticos resultantes usando datos clínicos reales.

Diferentes definiciones del cálculo de orden fraccionario (fractales, conformables, fractales-fraccionarias, entre otras) pueden ser consideradas con la finalidad de tener una mejor caracterización eléctrica de tejidos vegetales considerando diferentes topologías de circuitos eléctricos dependiendo del nivel de descripción requerido.

También, se pueden estimar otras propiedades de los tejidos vegetales caracterizando comportamientos macroscópicos, esto considerando que las derivadas fraccionarias son no locales y permiten describir heterogeneidades y estructuras de los materiales a diferentes escalas.

---

# Bibliografía

---

- [1] Pietro Ibba, Aniello Falco, Biresaw Demelash Abera, Giuseppe Cantarella, Luisa Petti, and Paolo Lugli. Bio-impedance and circuit parameters: An analysis for tracking fruit ripening. *Postharvest Biology and Technology*, 159:110978, 2020.
- [2] Mark E Orazem and Bernard Tribollet. Electrochemical impedance spectroscopy. *New Jersey*, pages xxv–xxvi, 2008.
- [3] Marco Grossi and Bruno Riccò. Electrical impedance spectroscopy (eis) for biological analysis and food characterization: A review. *Journal of sensors and sensor systems*, 6(2):303–325, 2017.
- [4] Yevgen Barsukov and J Ross Macdonald. Electrochemical impedance spectroscopy. *Characterization of materials*, pages 1–17, 2002.
- [5] Marco Grossi, Giuseppe Di Lecce, Tullia Gallina Toschi, and Bruno Riccò. Fast and accurate determination of olive oil acidity by electrochemical impedance spectroscopy. *IEEE Sensors Journal*, 14(9):2947–2954, 2014.
- [6] Isabel S Jesus, JA Tenreiro Machado, and J Boaventure Cunha. Fractional electrical impedances in botanical elements. *Journal of Vibration and Control*, 14(9-10):1389–1402, 2008.
- [7] José Raymundo González-Araiza, María Coral Ortiz-Sánchez, Francisco Miguel Vargas-Luna, and José Manuel Cabrera-Sixto. Application of electrical bio-impedance for the evaluation of strawberry ripeness. *International Journal of Food Properties*, 20(5):1044–1050, 2017.
- [8] António M Lopes, JA Tenreiro Machado, Elisa Ramalho, and Vânia Silva. Milk characterization using electrical impedance spectroscopy and fractional models. *Food analytical methods*, 11(3):901–912, 2018.
- [9] JF Gómez-Aguilar, T Córdova-Fraga, JE Escalante-Martínez, C Calderón-Ramón, and RF Escobar-Jiménez. Electrical circuits described by a fractional derivative with regular kernel. *Revista mexicana de física*, 62(2):144–154, 2016.
- [10] Andrzej Lasia. Electrochemical impedance spectroscopy and its applications. In *Modern aspects of electrochemistry*, pages 143–248. Springer, 2002.
- [11] António M Lopes, JA Tenreiro Machado, and Elisa Ramalho. On the fractional-order modeling of wine. *European Food Research and Technology*, 243(6):921–929, 2017.
- [12] GP de Loor. Dielectric properties of heterogeneous mixtures containing water. *Journal of Microwave Power*, 3(2):67–73, 1968.

- [13] François Dion and Andrzej Lasia. The use of regularization methods in the deconvolution of underlying distributions in electrochemical processes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 475(1):28–37, 1999.
- [14] Rubén Martín Saavedra. Simulación mediante circuitos equivalentes de la impedancia electroquímica de armaduras de acero inoxidable en mortero. Master's thesis, 2014.
- [15] Sverre Grimnes and Orjan G Martinsen. *Bioimpedance and bioelectricity basics*. Academic press, 2011.
- [16] Dalia El Khaled, Nuria Novas, Jose A Gazquez, Rosa M Garcia, and Francisco Manzano-Agugliaro. Fruit and vegetable quality assessment via dielectric sensing. *Sensors*, 15(7):15363–15397, 2015.
- [17] Alberto Yúfera, Alberto Olmo, Paula Daza, and Daniel Cañete. Cell biometrics based on bio-impedance measurements. *Advanced biometric technologies*, 17:343–66, 2011.
- [18] Klemen Bohinc, Veronika Kralj-Iglič, and Aleš Iglič. Thickness of electrical double layer. effect of ion size. *Electrochimica Acta*, 46(19):3033–3040, 2001.
- [19] JF Gómez-Aguilar, JE Escalante-Martínez, C Calderón-Ramón, LJ Morales-Mendoza, M Benavidez-Cruz, and M Gonzalez-Lee. Equivalent circuits applied in electrochemical impedance spectroscopy and fractional derivatives with and without singular kernel. *Advances in Mathematical Physics*, 2016, 2016.
- [20] Igor Podlubny. Fractional differential equations, vol. 198 of mathematics in science and engineering, 1999.
- [21] Iván Gregorio Rodríguez de Tembleque. Introducción al cálculo fraccionario ya los modelos de crecimiento tumoral clásicos y fraccionarios: simulaciones numéricas en el entorno del cálculo fraccionario. 2020.
- [22] Ahmed AboBakr, Lobna A Said, Ahmed H Madian, Ahmed S Elwakil, and Ahmed G Radwan. Experimental comparison of integer/fractional-order electrical models of plant. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 80:1–9, 2017.
- [23] John-Jairo Cabrera-López and Jaime Velasco-Medina. Structured approach and impedance spectroscopy microsystem for fractional-order electrical characterization of vegetable tissues. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019.
- [24] CA Gonzalez-Correa. Simplified geometrical adjustment of bioimpedance measured data to the complex plane with just three parameters. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 1272, page 012018. IOP Publishing, 2019.
- [25] Julio César Caicedo-Eraso, Félix Octavio Díaz-Arango, and Andrea Osorio-Alturo. Espectroscopia de impedancia eléctrica aplicada al control de la calidad en la industria alimentaria. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1):1–20, 2020.
- [26] Norbert Herencsar, Todd J Freeborn, Aslihan Kartci, and Oguzhan Cicekoglu. A comparative study of two fractional-order equivalent electrical circuits for modeling the electrical impedance of dental tissues. *Entropy*, 22(10):1117, 2020.
- [27] Ravneel Prasad, Utkal Mehta, and Kajal Kothari. Fractional impedance of supercapacitor: an extended investigation. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(3):1277–1284, 2021.

- [28] Maria Ghita, Dana Copot, and Clara M Ionescu. Lung cancer dynamics using fractional order impedance modeling on a mimicked lung tumor setup. *Journal of Advanced Research*, 32:61–71, 2021.
- [29] Stavroula Kapoulea, Costas Psychalinos, and Ahmed S Elwakil. Simple implementations of fractional-order driving-point impedances: Application to biological tissue models. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 137:153784, 2021.
- [30] Haijun Ruan, Bingxiang Sun, Jiuchun Jiang, Weige Zhang, Xitian He, Xiaojia Su, Jingji Bian, and Wenzhong Gao. A modified-electrochemical impedance spectroscopy-based multi-time-scale fractional-order model for lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 394:139066, 2021.
- [31] Stavroula Kapoulea, Costas Psychalinos, and Ahmed S Elwakil. Passive approximations of double-exponent fractional-order impedance functions. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(5):1274–1284, 2021.
- [32] Todd J Freeborn and Shelby Critcher. Cole-impedance model representations of right-side segmental arm, leg, and full-body bioimpedances of healthy adults: Comparison of fractional-order. *Fractal and Fractional*, 5(1):13, 2021.
- [33] Menna Mohsen, Lobna A Said, Ahmed H Madian, Ahmed G Radwan, and Ahmed S Elwakil. Fractional-order bio-impedance modeling for interdisciplinary applications: A review. *IEEE Access*, 9:33158–33168, 2021.
- [34] Doaa K Abdelrahman, Rawan Mohammed, Mohammed E Fouda, Lobna A Said, and Ahmed G Radwan. Memristive bio-impedance modeling of fruits and vegetables. *IEEE Access*, 9:21498–21506, 2021.
- [35] Mihaela Ghita, Isabela Birs, Dana Copot, Ioana Nascu, and Clara M Ionescu. Impedance spectroscopy sensing material properties for self-tuning ratio control in pharmaceutical industry. *Applied Sciences*, 12(1):509, 2022.
- [36] Müfit Şan, Arnaldo Batista, Sara Russo, Filipa Esgalhado, Catarina R Palma Dos Reis, Fátima Serrano, and Manuel Ortigueira. A preliminary exploration of the placental position influence on uterine electromyography using fractional modelling. *Sensors*, 22(5):1704, 2022.
- [37] Peter J Langlois, Nazanin Neshatvar, and Andreas Demosthenous. A sinusoidal current driver with an extended frequency range and multifrequency operation for bioimpedance applications. *IEEE transactions on biomedical circuits and systems*, 9(3):401–411, 2014.
- [38] Dhouha Bouchaala, Olfa Kanoun, and Nabil Derbel. High accurate and wideband current excitation for bioimpedance health monitoring systems. *Measurement*, 79:339–348, 2016.
- [39] Javier Eduardo Flores Vilches. *Diseño e implementación de algoritmo de búsqueda cuckoo para ajuste de funciones de selección*. PhD thesis, Ph. D. Dissertation, Faculty of Engineering, Computer Civil Engineering . . . , 2015.
- [40] María Cristina Quiceno, Germán Antonio Giraldo, and Rafael Humberto Villamizar. Caracterización fisicoquímica del plátano (*musa paradisiaca* sp. aab, simmonds) para la industrialización. *UGciencia*, 20(1):48–54, 2014.
- [41] Rahul Thakur, Penta Pristijono, Michael Bowyer, Sukhvinder P Singh, Christopher J Scarlett, Costas E Stathopoulos, and Quan V Vuong. A starch edible surface coating delays banana fruit ripening. *Lwt*, 100:341–347, 2019.

- 
- [42] Mahmoud Soltani, Reza Alimardani, and Mahmoud Omid. Comparison of some chromatic, mechanical and chemical properties of banana fruit at different stages of ripeness. *Modern Applied Science*, 4(7):34, 2010.

---

# Anexo A

---

Artículo publicado en la 8a Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada.

## Uso de la espectroscopia de impedancia eléctrica para determinar la madurez del plátano

Zuleyma.-L España-Ruiz\* John.-J Cabrera-Lopez\*  
José.-F Gómez-Aguilar\*

\* *Tecnológico Nacional de México/CENIDET, Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, Cuernavaca, Mor. México.*

\*\* *La Universidad Autónoma de Occidente, Calle 25, Vía Cali-Puerto Tejada #115-85Km 2, Jamundí, Cali, Valle del Cauca, Colombia.*

**Abstract:** La técnica de espectroscopia de impedancia eléctrica (EIS) se utilizó para determinar las propiedades eléctricas del plátano. Esta técnica es fácil de usar, no invasiva y de bajo costo económico, lo cual es favorable para determinar la madurez que se presenta en el plátano. En este caso particular, se utiliza medidas EIS del plátano durante un período de 18 días. Para mejorar el índice de ajuste y en consecuencia la caracterización eléctrica del material biológico, se describen modelos eléctricos mediante ecuaciones diferenciales de orden no entero y fraccionario. Para obtener los valores iniciales se utilizaron un software EIS. Para ajustar los parámetros de los modelos eléctricos fraccionarios (FEM) a las medidas experimentales del EIS, se utilizaron algoritmos de optimización de búsqueda de cuco y recocido simulado. Como resultado, se obtuvo que los modelos eléctricos que mejor representan las medidas del plátano, fueron el modelo Cole y el simplificado de Hyden de orden fraccionario.

**Keywords:** bio-impedancia, caracterización, estimación de parámetros, diagramas de Nyquist.

### 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un gran interés de las empresas de alimentos por asegurar la calidad de las materias primas, procesos y productos terminados. En el caso de los alimentos, se han diseñado técnicas que permiten monitorear en tiempo real las diferentes etapas de madurez y degradación que presentan (Lasía, 2002). Existen varias técnicas para evaluar la descomposición de los alimentos, tales como la cromatografía, espectrofotometría, electroforesis, entre otros. Estos son procedimientos complicados, de lenta respuesta y que precisan diferentes ensayos. Las técnicas empleadas, son elevadamente costosas y protocolarias, por lo cual, no son eficientes para la industria.

La Espectroscopia de Impedancia Eléctrica (EIS, por sus siglas en inglés) es una técnica que es usada recientemente para la caracterización de tejidos biológicos. Consta de analizar las propiedades eléctricas que contiene el tejido biológico, ya que se considera que los tejidos biológicos son conductores y sus resistencias varían con la frecuencia (Barsukov and Macdonald, 2002). Esta técnica tiene la ventaja de no ser invasiva, evita experimentos de laboratorio complejos y que no consumen mucho tiempo. En esta investigación se utilizará dicha técnica para identificar el grado de madurez que tiene el plátano. Con esta aportación se podrá precisar el grado de madurez de los productos, mejorando su calidad y será posible conservarlos para procesos industriales o exportaciones (Lopes et al., 2017).

Uno de los factores que influye de manera decisiva en la calidad y conservación de la fruta, es el grado de maduración en el momento de su recolección. Para predecir el tiempo de madurez que tiene la fruta o el vegetal, se requiere, nuevas tecnologías no invasivas como es el método EIS.

En las investigaciones recientes (Cabrera-López, Velasco-Medina, 2019) se propone un acercamiento hacia la caracterización eléctrica del tejido vegetal, basado en estructuras algorítmicas, un micro sistema de Espectroscopia de Impedancia (IS, por sus siglas en inglés) y modelos de orden fraccionario. Se trabajó con cinco modelos fractales en tres distintos frutos: manzana, plátano y pepino. Su prototipo de algoritmo BioZ-s, permite las lecturas de bio-impedancia correctamente sobre un espectro ensanchado, para lo cual se utilizaron modelos de orden entero y fraccionario (Cabrera-López and Velasco-Medina, 2019). Para esta investigación se trabajó con cuatro modelos eléctricos, entre ellos los modelos eléctricos de Hayden simplificado (Hayden-S) y Cole que son los circuitos equivalentes más comunes. Estos modelos se presentan en la Fig. (5), así como los modelos de doble dispersión de Cole y Hyden.

Estos modelos son ampliamente utilizados para las caracterizaciones eléctricas. Generalmente, la Función de Transferencia (TF, por sus siglas en inglés) de cada modelo utiliza ecuaciones diferenciales de orden entero eso se puede obtener aplicando las leyes de Kirchhoff al circuito analizado o el concepto de impedancia.





**TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO**

---

***cenidet***<sup>®</sup>  
*Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico*