



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Identificación nutricional de soluciones de suelo por correlación de conductividad eléctrica**

**Joan Sebastian Bustos Miranda**

Universidad Nacional de Colombia  
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación  
Maestría en Ingeniería Automatización Industrial  
Manizales Caldas, Colombia  
2022



# Identificación nutricional de soluciones de suelo por correlación de conductividad eléctrica

**Joan Sebastian Bustos Miranda**

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería Automatización Industrial**

Director (a):

Doctor, Nicolás Toro García

Línea de Investigación:

Automatización Industrial

Grupos de Investigación:

GIRE Grupo de Investigación en Recursos Energéticos

Universidad Nacional de Colombia

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación

Maestría en Ingeniería Automatización Industrial

Manizales Caldas, Colombia

2022



## **Agradecimientos**

Al Dr. Nicolás Toro García, por dirigir este proyecto de investigación, por el apoyo incondicional, el tiempo e interés prestado en el desarrollo de la misma, así como al Dr. José Israel Cárdenas Jiménez por compartir su conocimiento y su dedicación para orientarme y de esa manera culminar este proyecto.

A Leidy Rodríguez, mi compañera de vida, quien me ha apoyado en todo momento y ha estado en los momentos más difíciles de mi vida.



# Identificación nutricional en soluciones de suelo por correlación de conductividad eléctrica

## Resumen

En este proyecto de investigación se procesaron 270.000 datos, en los cuales se caracterizó el comportamiento de la conductividad eléctrica para nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), disueltos en agua destilada a concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL. En el preprocesamiento de las señales se eliminaron datos espurios y erróneos con el uso de filtros digitales de media móvil. Mediante la identificación de sistemas por el método autoregresivo de variables exógenas (ARX) se encontró el modelo matemático para cada una de las concentraciones, logrando estimaciones al 90%. También se desarrolló un programa computacional que identifica el nutriente y su concentración en la solución acuosa mediante métodos de interpolación lineal. El objetivo es la identificación de nutrientes esenciales con el fin de mejorar la productividad en cultivos agrícolas.

**Palabras clave:** Conductividad Eléctrica, Identificación Nutricional, Concentraciones Electrolíticas, Instrumentación, Sistemas de Identificación.

# Nutritional identification of soil solutions by electrical conductivity correlation

## Abstract

In this research project 270.000 data were processed, in which the behavior of electrical conductivity for Nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K) nutrients dissolved in distilled water. Concentrations of 4 mg/mL, 8 mg/mL, 16 mg/mL and 20 mg/mL. was characterized. In the preprocessing of the signals, spurious and erroneous data were eliminated with the use of moving average digital filters. Through the identification of systems by the autoregressive method of exogenous variables (ARX), the mathematical model was found for each of the concentrations, achieving estimates at 90%. A computer program identifies the nutrient and its concentration in the aqueous solution using linear interpolation methods was also developed. The objective is the identification of essential nutrients in order to improve productivity in agricultural crops.

**Keywords:** Electrical Conductivity, Nutritional Identification, Electrolytic Concentrations, Instrumentation, Identification Systems.

# Contenido

Resumen.....	VII
Lista de figuras .....	XI
Lista de tablas .....	XII
Lista de Símbolos y abreviaturas .....	XIII
Objetivos .....	15
Introducción.....	16
Metodología empelada para la ejecución de los objetivos .....	18
<b>1. Capítulo. Antecedentes y marco teórico. ....</b>	<b>20</b>
1.1 Realidad del sector agrícola colombiano. ....	20
1.2 Estudios del suelo.....	21
1.3 Métodos de preparación de una solución de suelo para la medición de su conductividad eléctrica.....	22
1.3.1 Método de preparación para la medición en el extracto saturación. ....	22
1.3.2 Método de preparación para la medición en suspensión suelo/agua. 23	
1.4 Potencial genético de una planta vegetal. ....	23
1.5 Sondas comerciales de conductividad eléctrica. ....	23
1.6 Sistemas de supervisión de cultivos vegetales .....	24
1.7 Línea del tiempo en el conocimiento de la nutrición vegetal. ....	25
1.8 Transporte de materia al electrodo en disoluciones. ....	26
1.9 Tipos de transporte y propiedades transportadas .....	27
1.10 Ecuación de flujo de Nernst- Planck .....	29
1.11 Conducción eléctrica. ....	31
1.11.1 Conducción iónica.....	32
1.12 Método potenciométrico para la medición de la conductividad eléctrica del suelo....	33

1.12.1	Polarización del electrodo .....	36
1.12.2	Polarización en una celda electroquímica.....	37
1.12.3	Polarización de concentración.....	38
1.13	Modelos de series temporales .....	39
1.13.1	Proceso estocástico.....	42
1.13.2	Procesos estocásticos estacionarios .....	42
1.13.3	Estacionariedad estricta.....	43
1.13.4	Estacionalidad de segundo orden o en covarianza. ....	43
1.13.5	Estimación de los momentos.....	44
1.14	Modelo de auto regresión ARX .....	45
2.	<b>Capítulo. Medición y análisis de la conductividad eléctrica en una solución para nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).....</b>	<b>47</b>
2.1	Equipos e insumos para la medición de datos experimentales. ....	47
2.2	Preparación de la disolución. ....	49
2.3	Análisis del nutriente Nitrógeno (N).....	53
2.4	Análisis del nutriente Fósforo (P). ....	54
2.5	Análisis del nutriente Potasio (K). ....	56
3.	<b>Capítulo. Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K).....</b>	<b>58</b>
3.1	Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Nitrógeno (N).....	58
3.2	Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Fósforo (P) .....	61
3.3	Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Potasio (K) .....	64
3.4	Identificación de nutrientes en una solución por medio de la conductividad eléctrica y la temperatura .....	67
4.	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>69</b>
4.1	Conclusiones .....	69
4.2	Recomendaciones .....	71
A.	<b>Anexo: Programa de identificación de nutrientes y concentración. ....</b>	<b>73</b>
B.	<b>Anexo: Programa de estimación modelo computacional. ....</b>	<b>81</b>
C.	<b>Bibliografía .....</b>	<b>83</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1-1:</b> Evolución del conocimiento en la nutrición vegetal [13].	25
<b>Figura 1-2:</b> Comportamiento grupal e individual de los iones en una disolución.	27
<b>Figura 1-3:</b> Conducción eléctrica, tipos de conductores y el transporte de materia.	32
<b>Figura 1-4:</b> Celda para el análisis potenciométrico [29].	34
<b>Figura 1-5:</b> Tipos de electrodos de ion selectivo.	35
<b>Figura 1-6:</b> a) Curvas corriente-voltaje para un electrodo polarizado ideal y b) Curvas corriente-voltaje para un electrodo no polarizado ideal. Las líneas punteadas muestran la desviación del comportamiento ideal que sufren los electrodos reales.[29]	36
<b>Figura 1-7:</b> Curva corriente-voltaje para una celda con un comportamiento no polarizado ideal entre A y B y un comportamiento polarizado. [29]	37
<b>Figura 1-8:</b> Etapas de la reacción en un electrodo. [29]	38
<b>Figura 2-1:</b> Montaje experimental para la estimación de conductividad eléctrica en una disolución.	47
<b>Figura 2-2:</b> Montaje experimental del agitador mecánico.	48
<b>Figura 2-3:</b> Software Multilab y Datalogger Fourier System.	49
<b>Figura 2-4:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura del agua destilada.	50
<b>Figura 2-5:</b> Clasificación de nutrientes del fertilizante triple 15.	51
<b>Figura 2-6:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio(K).	52
<b>Figura 2-7:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno.	53
<b>Figura 2-8:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Fósforo.	55
<b>Figura 2-9:</b> Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Potasio.	56
<b>Figura 3-1:</b> Comportamiento del modelo matemático discreto para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno (N).	60
<b>Figura 3-2:</b> Comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Fósforo (P).	63
<b>Figura 3-3:</b> Comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Potasio (K).	66
<b>Figura 3-4:</b> Programa computacional de identificación y estimación del nutriente en una solución.	68

## Lista de tablas

<b>Tabla 1-1:</b> Equipos comerciales utilizados en la medición de la conductividad eléctrica [11]. .....	24
<b>Tabla 1-2:</b> Resumen de los diferentes tipos de fenómenos de transporte [16]. .....	28
<b>Tabla 2-1:</b> Rangos de pH y CE para la preparación de disoluciones NTC5596. ....	50

## Lista de Símbolos y abreviaturas

$T$	Temperatura
$P$	Presión
$f_e$	Efecto de campo eléctrico en el fluido
$e$	Carga elemental
$E$	Campo eléctrico
$f_g$	Efecto de campo electromagnético
$g$	Constante de la gravedad

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
$\sigma$	Conductividad eléctrica aparente del suelo
$\theta$	Contenido de humedad
$\sigma_w$	Conductividad de la solución del suelo
$\varepsilon$	Permitividad
$\varepsilon'_b$	Permitividad obtenida por un sensor de capacitancia
$\rho$	Es la densidad del fluido
$\phi$	Potencial electrostático
$\varepsilon$	Constante dieléctrica
$\rho_0$	Valor promedio de concentración

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

---

<i>TDR</i>	Time Domain Reflectometry
<i>FD</i>	Frequency Domain
<i>CEss</i>	Conductividad eléctrica en la solución de suelo

## **Objetivos**

A continuación, se indican los objetivos generales y específicos en el desarrollo del proyecto de investigación:

### **Objetivo General:**

- Estimar el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de suelo para fines agronómicos.

### **Objetivos Específicos:**

- Analizar la metodología potenciométrica para la medición de la Conductividad Eléctrica en soluciones de suelos.
- Modelar el comportamiento de la conductividad eléctrica en concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) aplicando sistemas de identificación.
- Identificar nutrientes en una solución de suelo por medio de la conductividad eléctrica y la temperatura.

## Introducción

La agricultura sostenible presenta un desafío mundial, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) indica que los altos costos y la poca asequibilidad dificulta que miles de personas tengan una alimentación saludable. Es conocido que a nivel global se hacen esfuerzos tecnológicos para lograr una mayor eficiencia en la producción de cultivos vegetales por área sembrada, la transformación y la transferencia tecnológica no es uniforme en todos los países. En Colombia se adelantan procesos de desarrollo e innovación tecnológica en agricultura, sin embargo esos procesos son inferiores comparados con países desarrollados. El tratamiento del suelo produce conocimientos, para lograr una mayor eficiencia en su uso, es ahí donde la variable de conductividad eléctrica presenta relevancia ya que ésta permite relacionar las propiedades del suelo y las propiedades de las plantas vegetales para absorber nutrientes, incluso hay modelos que estiman la producción agrícola, de acuerdo a la conductividad eléctrica. Para el desarrollo de este proyecto de investigación se empleó una metodología experimental, en la cual mediante un sensor potenciométrico de conductividad eléctrica, se tomaron 270.000 datos correspondientes a disoluciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) disueltas en agua destilada. Lo anterior con la finalidad de caracterizar su comportamiento y encontrar un modelo matemático que lo represente y de esa manera estimar una concentración y sus nutrientes en una disolución. La aplicación y la transferencia tecnológica al campo agrícola, de la metodología desarrollada es fácil de lograr, ya que para hacer mediciones en campo solamente se requiere de un sensor de conductividad eléctrica, medición que es menos costosa comparado con un análisis de suelos. Este proyecto de investigación tuvo divulgación científica en el Congreso Internacional de Física y Tecnologías Emergentes, desarrollado en Colombia en el año 2021, mediante la ponencia titulada “Estimación de un modelo experimental de conductividad eléctrica en una solución de cloruro de potasio KCL por medio de ARIMA y PID tuner de Matlab”. También se realizó divulgación científica en el Congreso Internacional de Investigación e Innovación

Multidisciplinario desarrollado en México en el año 2022, mediante la ponencia titulada “Modelación computacional de la conductividad eléctrica del suelo con aplicación a la agricultura”.

En el primer capítulo se hace una revisión del estado del arte y el marco teórico, llevando a cabo la descripción y análisis de las diferentes metodologías, para la medición de la conductividad eléctrica, seleccionando el método potenciométrico, como el más adecuado para las mediciones de iones en soluciones acuosas.

Los capítulos 2 y 3, están basados en el desarrollo de los objetivos específicos que hacen relación al Análisis, Medición, Modelación e Identificación de nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) a través de la cuantificación de la conductividad eléctrica y la temperatura. Finalmente, el cuarto capítulo presenta las conclusiones del proyecto y recomendaciones para el trabajo futuro.

## **Metodología empelada para la ejecución de los objetivos**

El desarrollo metodológico de la presente tesis, está basada en el objetivo general “Estimar el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de suelo para fines agronómicos”. Análogamente, el documento cuenta con tres capítulos que hacen relación a los objetivos específicos. A continuación, se describe la metodología empleada para el desarrollo de cada objetivo:

- **Metodología empleada en el objetivo específico “Analizar la metodología potenciométrica para la medición de la Conductividad Eléctrica en soluciones de suelos”.**

En el primer capítulo se hace una revisión del estado del arte y el marco teórico, llevando a cabo la descripción y análisis del método potenciométrico para la medición de la conductividad eléctrica en soluciones de suelo, relacionando los métodos de suspensión suelo agua, y extracto de saturación que indica la norma técnica colombiana, NTC 5596 Calidad del suelo, para la preparación de las muestras de suelo y su posterior medición de conductividad eléctrica. De tal manera que el comportamiento de iones presentes en una disolución, se pueda representar mediante la ecuación de flujo de Nernst Planck.

- **Metodología empleada en el objetivo específico “Modelar el comportamiento de la conductividad eléctrica en concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) aplicando sistemas de identificación”.**

Partiendo de la ecuación de flujo de Nernst Planck, en la cual se garantiza una disolución homogénea por medio de un agitador mecánico, y también garantizando

concentraciones constantes de los nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), mediante el método de preparación de disoluciones, suspensión suelo agua de la NTC 5596, se somete a una variación térmica la disolución, en el rango de 12°C a 40°C por medio de un baño de maría. Los datos experimentales son registrados por un datalogger, logrando cuantificar y visualizar la variación de las variables analizadas. Mediante la aplicación de filtros digitales de media móvil se eliminaron datos espurios y por medio de sistemas de identificación se logró estimar al 90% el comportamiento de la conductividad eléctrica, para los nutrientes analizados, mediante un modelo autorregresivo de variables exógenas [4 4 1]. La implementación metodológica para el logro de este objetivo, se desarrolla en los capítulos 2 y 3.

- **Metodología empleada en el objetivo específico “Identificar nutrientes en una solución de suelo por medio de la conductividad eléctrica y la temperatura”.**

La identificación de nutrientes se realizó por medio de un programa computacional desarrollado en Matlab (Licencia 40877016 Versión 2020a), en el cual un usuario ingresa valores de temperatura y conductividad, el programa computacional estima el nutriente y el soluto presente en la disolución. Se caracterizó el comportamiento de la conductividad eléctrica en diferentes concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K). Mediante programación se recorrió cada uno de los valores vectorizados de la conductividad eléctrica y por interpolación lineal se calculó e identificó el valor del soluto y del nutriente, a partir de valores de temperatura y conductividad. En el capítulo 3 y en el Anexo A, se muestran los resultados de la implementación del programa.

# **1.Capítulo. Antecedentes y marco teórico.**

## **1.1 Realidad del sector agrícola colombiano.**

Actualmente el sector agrícola colombiano presenta un rezago científico y tecnológico por lo menos de 20 años en investigación tecnológica, frente a los niveles alcanzados por las naciones desarrolladas. En Estados Unidos se produce 8,2 toneladas de arroz por hectárea con un costo de producción de 364 dólares, mientras que en Colombia se producen 5.5 toneladas de arroz por hectárea con un costo de producción de 483 dólares[1].

Israel un país cuya mitad de su superficie es desierto, y por lo tanto tiene problemas de recursos hídricos y tierra cultivable, ha logrado desarrollar una agricultura que permite aprovechar al máximo los recursos limitados. Alcanzando producir el 95% de las necesidades alimenticias internas del país. Hoy en día la mitad de los ingresos de los agricultores de dicha nación provienen de la exportación, es por esto que la agricultura tiene un papel fundamental en la economía de Israel. Siendo potencia en agricultura debido a la constante investigación y desarrollo (I+D), orientada a las técnicas de aplicación para encontrar solución a problemas y enfrentar nuevos desafíos. Las tecnologías científicas desarrolladas han logrado incrementos en la calidad y cantidad de los productos del agro [2].

Es importante recalcar que Colombia es estos momentos, no tiene la capacidad productiva para competir con otras naciones y es necesario reconocer que la dinámica mercantil global, exige la constante innovación en productos y servicios, más ahora con los tratados de libre comercio.

Los análisis de estructuras de costos de producción en el país, al ser comparados con los de naciones como Estados Unidos, llevan a concluir que la mayor parte de los problemas de competitividad de la agricultura colombiana están asociados con aspectos tecnológicos [3].

## 1.2 Estudios del suelo.

El estudio del suelo es un factor determinante a la hora de establecer estrategias en la nutrición de cultivos vegetales, por ello se han desarrollado diferentes herramientas para la medición de algunas características que éste presenta. Uno de los parámetros más analizados en el estudio de los suelos es la resistividad, que se obtiene hallando el valor de la conductividad eléctrica de éste, la cual permite múltiples relaciones que se pueden extraer con la textura, el contenido del agua, el contenido de materia orgánica y los nutrientes orgánicos, permitiendo con ello orientar decisiones de manejo de la fertilización, riego y preparación de suelo entre otras [4] [5] [6] [7] [8]. Al poder monitorear los parámetros mencionados, se podría optimizar el uso de agua y fertilizantes de acuerdo a las necesidades nutricionales de la planta, logrando de esta manera una correcta nutrición de la misma, aumentando la calidad y la productividad de un cultivo. Conociendo la información nutricional de la planta vegetal se podría acercarse al máximo potencial genético y de esa manera lograr una mayor producción [9].

En una solución acuosa de suelo, la conductividad eléctrica es un parámetro muy importante para quienes se dedican al estudio, la caracterización de suelos y al manejo de la fertirrigación de cultivos. La conductividad eléctrica del suelo, varía dependiendo de la distribución de las sales disueltas, es decir; de los elementos nutritivos presentes en el suelo como lo son: los fertilizantes, la mineralización de la materia orgánica, entre otras [10] [11].

La acumulación de sales en el suelo genera problemas para el crecimiento de las plantas vegetales, como consecuencia del incremento en la presión osmótica, lo que les impide extraer los nutrientes, llevando a la planta vegetal a generar esfuerzos energéticos adicionales para la extracción, dejando de lado el crecimiento; esto puede traer repercusiones de consideración para el agricultor, debido a que los problemas de salinidad generan gastos adicionales (de mitigación, adaptación o compensación), haciendo que éste pierda competitividad, arrastrando con él impactos económicos y sociales [4].

Las mediciones de conductividad eléctrica son usadas para determinar la calidad de los suelos y determinar su saturación, existen diferentes modelos estadísticos que utilizan parámetros eléctricos e hidráulicos (K-EC) relacionados con modelos de tubos capilares para determinar la saturación de un suelo [12].

Estudios teórico experimentales de la interacción de campo electromagnético, empleando modelación mediante elementos finitos, han podido determinar la influencia de la frecuencia de excitación sobre la respuesta del suelo a la acción de un campo electromagnético variable, encontrando que en los rangos de 10000Hz y 15000 Hz es posible discriminar los diferentes valores de la conductividad eléctrica del suelo [13].

La humedad del suelo y su estado de compactación influyen sobre la conductividad eléctrica, logrando un incremento de la misma. A través de la densidad aparente del suelo, se correlaciona incrementos de la conductividad eléctrica y el voltaje del inducido del receptor para diferentes niveles de humedad de suelo [14].

La implementación de sensores dieléctricos, determinan de forma simultánea la conductividad eléctrica y el contenido de humedad del suelo, implementando dos tipos de sensores dieléctricos, un TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo) y un sensor FD (Dominio de la frecuencia) de tipo capacitivo. Logrando estimar la conductividad eléctrica aparente del suelo, a partir de las lecturas independientes de  $\sigma$ ,  $\theta$ , y de  $\sigma_w$ , donde la solución del suelo es  $\sigma_w$ , el contenido de humedad  $\theta$  y la conductividad  $\sigma$ . Igualmente se identifica el modelo más adecuado para los suelos estudiados, que permite estimar  $\sigma_w$  conociendo  $\sigma$  y  $\theta$ . Para hallar  $\theta$  a partir de la lectura de permitividad  $\epsilon$ , se logran estimaciones precisas cuando se utiliza un TDR calibrado para cada suelo [15].

### **1.3 Métodos de preparación de una solución de suelo para la medición de su conductividad eléctrica.**

Actualmente existen dos métodos de preparación de la solución de una muestra de suelo, para la determinación de la conductividad eléctrica por métodos conductimétricos. Un método es la medición en el extracto de la saturación y el otro método es la medición en suspensión suelo/agua. Métodos que describe la norma técnica colombiana NTC 5596, Calidad del Agua. Determinación de la Conductividad Eléctrica [16].

#### **1.3.1 Método de preparación para la medición en el extracto saturación.**

El método de preparación para la medición en el extracto de saturación consiste en tomar 100 g de suelo, no se requiere tamizar ni secar. Se adiciona agua, con la finalidad de

obtener una pasta de contextura homogénea. En el proceso de mezclado se debe eliminar el aire de los poros. Cuando la pasta está demasiado húmeda se agrega suelo seco y cuando está demasiado seca se agrega agua. La pasta saturada apropiada para la medición se obtiene cuando el material saturado de agua tiene un brillo metálico. La pasta saturada se deja reposar por 12 horas y se transfiere a un embudo Buchner con papel filtro, se aplica vacío y se recoge el filtrado en tubos de ensayo [16].

### **1.3.2 Método de preparación para la medición en suspensión suelo/agua.**

En el método de suspensión suelo/agua, se utilizan muestras de suelo secadas a una temperatura no mayor de 40°C y deben pasar a través de un tamiz de 2 mm de abertura. Para la extracción, se pesan 20g de una muestra de suelo y se transfieren a un recipiente. Se adiciona 100 mL de agua con una temperatura de 20°C ± 1°C. La muestra se debe agitar por 30 min y se debe filtrar directamente utilizando papel de filtro. La relación de extracción 1:5 (masa/volumen) se realiza con la finalidad de obtener un extracto para todo tipo de suelos [16].

### **1.4 Potencial genético de una planta vegetal.**

El potencial genético es la máxima producción que se puede obtener de una planta vegetal en condiciones óptimas. Actualmente, la producción en Colombia de tomates para los mejores agricultores está en 12 Kg/mt<sup>2</sup>, mientras que la mayoría de los agricultores producen entre 1 y 3 Kg/mt<sup>2</sup>. Comparado con otras naciones que producen 70 Kg/mt<sup>2</sup> [17].

### **1.5 Sondas comerciales de conductividad eléctrica.**

En el mercado actual, existe gran variedad de sensores para la medición de la conductividad eléctrica, en la tabla 1-1, se indica algunos sensores, su principio de funcionamiento y algunas de sus características, como es; el volumen de exploración en el suelo, medición de humedad, temperatura, estimación de conductividad en la solución de suelo CEss y su costo.

**Tabla 1-1:** Equipos comerciales utilizados en la medición de la conductividad eléctrica [11].

Modelo de Sonda	Fabricante	Tipo	Volumen exploración de suelo	Mide Humedad	Mide Temperatura	Estima CEss	Costo (€)
<b>EM38</b>	Geonics Ltd.	Inductiva	≈ 1 m <sup>3</sup>	NO	NO	NO	> 10000
<b>Dualem 1S</b>	Dualem Inc.	Inductiva	≈ 1 m <sup>3</sup>	NO	NO	NO	> 10000
<b>ECH20-TE</b>	DecagonDevices Inc.	Resistiva	≈ 100 cm <sup>3</sup>	SI	SI	NO	Retirada
<b>5TE</b>	DecagonDevices Inc.	Resistiva	≈ 100 cm <sup>3</sup>	SI	SI	NO	< 1000
<b>GS3</b>	DecagonDevices Inc.	Resistiva	≈ 100 cm <sup>3</sup>	SI	SI	NO	< 1000
<b>Martek-SCT</b>	Martek Instruments Inc.	Resistiva	≈ 2 dm <sup>3</sup>	NO	SI	NO	Retirada
<b>WET</b>	Delta-T Devices Ltd.	FDR	≈ 100 cm <sup>3</sup>	SI	SI	SI	> 1000
<b>CS650</b>	Campbell Scientific	TDR	0.1 - 2 dm <sup>3</sup>	SI	SI	NO	< 1000
<b>CS655</b>	Campbell Scientific	TDR	0.1 - 2 dm <sup>3</sup>	SI	SI	NO	< 1000
<b>Cuatro electrodos en geometría</b>	Varios	Resistiva	1 - 1000 dm <sup>3</sup>	NO	NO	NO	< 1000

## 1.6 Sistemas de supervisión de cultivos vegetales

Actualmente existen sistemas de supervisión de cultivos vegetales de alta tecnología, los cuales permiten monitorear hasta 8 parámetros, un ejemplo de ello es el sistema Autoagronom y el sistema Phyttec.

El sistema Autoagronom permite monitorear los siguientes parámetros:

- Tensiómetro - Medición de la tensión del suelo.
- Sensor de O<sub>2</sub> - Medición del oxígeno disuelto en el agua.
- Sensor de temperatura - Temperatura exterior e interior del invernadero.
- Sensor de Humedad relativa.
- Composición química del suelo, acidez, Nitrato (NO<sub>3</sub>).
- Análisis químico del agua con el cual se regará el cultivo.
- Radiación solar.
- Cantidad de agua que consume el cultivo en cualquier momento (diario e histórico) [18].

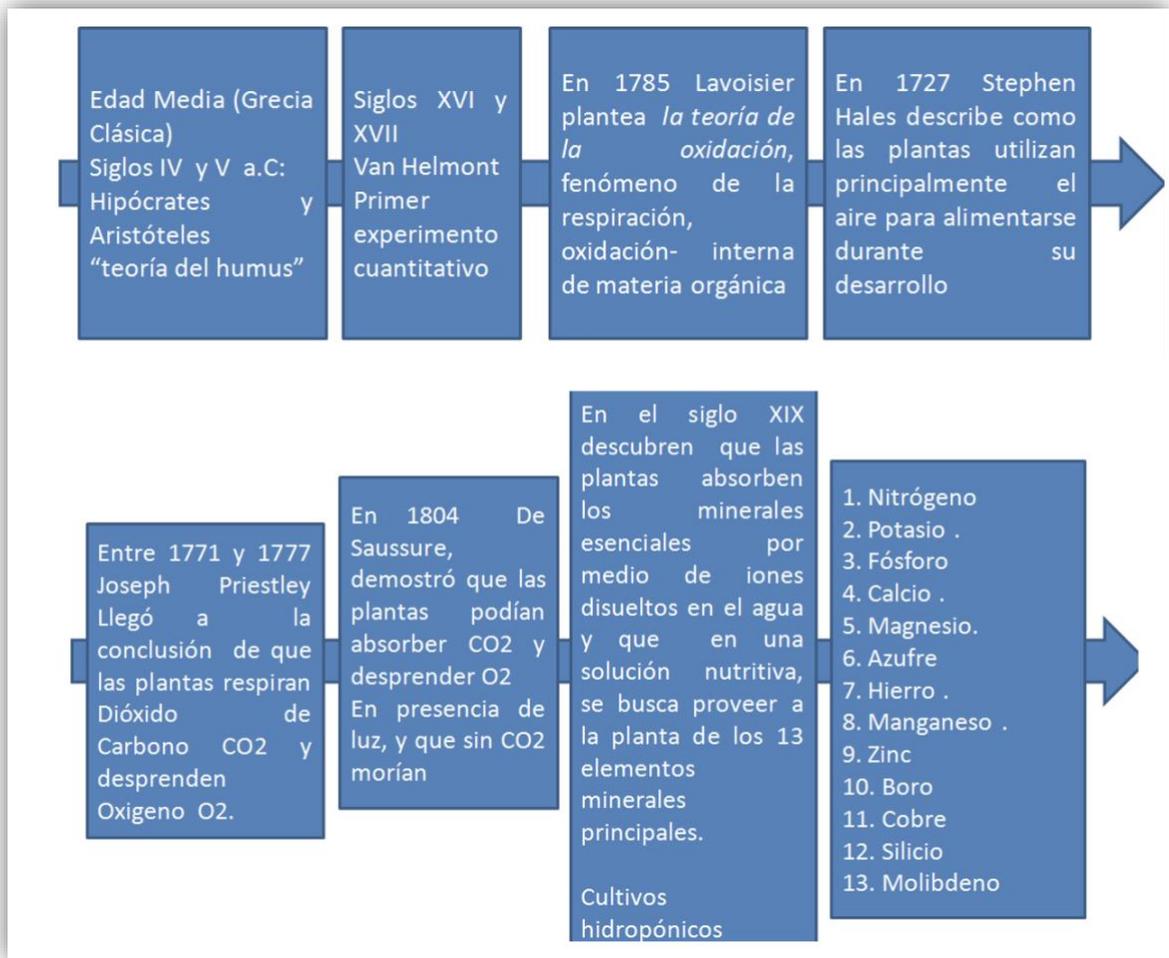
Y el sistema de supervisión de cultivos PHYTEC permite monitorear los siguientes parámetros:

- Sensores ambientales (medidores de velocidad y dirección del viento, lluvias, radiación solar, temperatura y humedad del aire).
- Sensores para las plantas (medidores de variación de tallo, crecimiento de fruto, temperatura y humedad de la Hoja, flujo de savia y humedad del suelo). [18].

## 1.7 Línea del tiempo en el conocimiento de la nutrición vegetal.

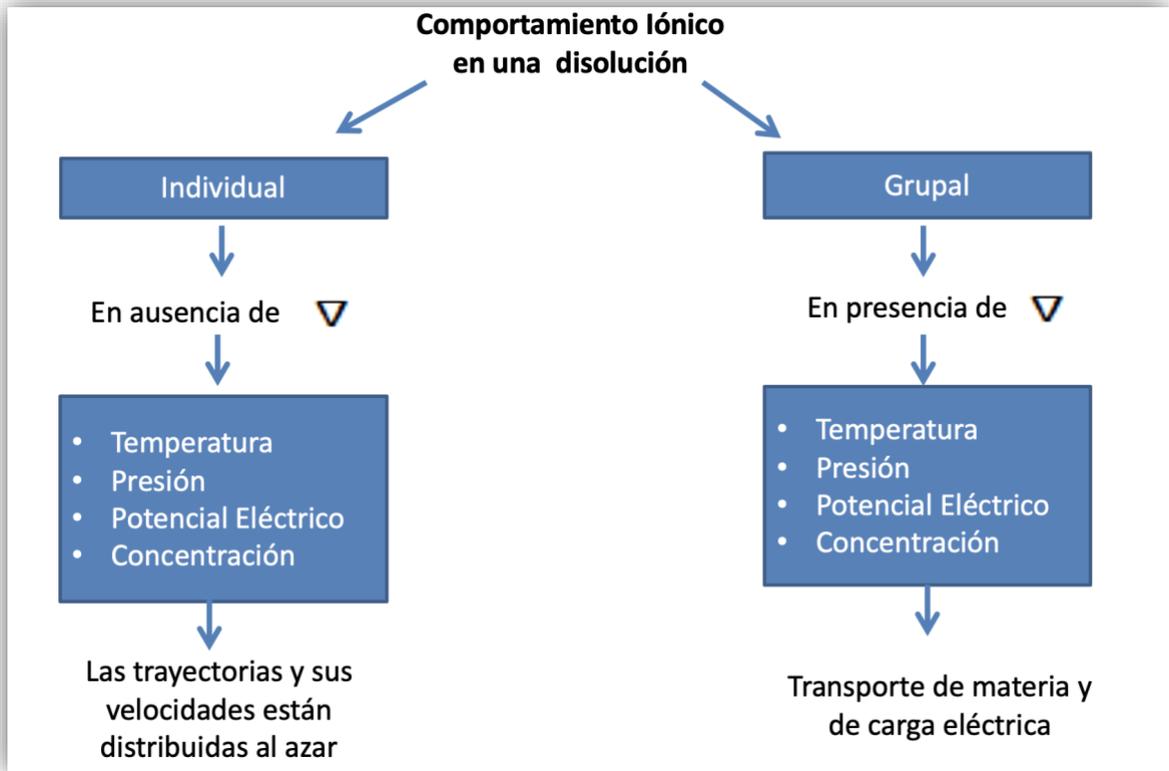
El conocimiento en la nutrición vegetal ha evolucionado en el tiempo, investigaciones han demostrado, que las plantas vegetales absorben los minerales esenciales por medio de iones inorgánicos disueltos en el agua. Los minerales principales de una solución nutritiva son los siguientes: nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio, azufre, hierro, manganeso, zinc, boro, cobre, silicio y molibdeno [19]. La Figura 1-1 indica la evolución desde la teoría del humus hasta descubrimientos del siglo XIX de absorción de minerales.

**Figura 1-1: Evolución del conocimiento en la nutrición vegetal [13].**



## 1.8 Transporte de materia al electrodo en disoluciones.

El desplazamiento de los iones, en una solución acuosa se puede analizar de dos maneras. La primera referente al comportamiento individual, teniendo en cuenta que en ausencia de gradiente de presión, temperatura, potencial eléctrico y concentración las trayectorias de los iones y sus velocidades están distribuidas al azar. La segunda en cuanto al comportamiento grupal, los desplazamientos de los iones en ciertas direcciones en presencia de los gradientes anteriormente descritos, lo cual permite un transporte de materia y de carga eléctrica en la solución acuosa [20] [21]. "Las propiedades de las magnitudes físicas asociadas a los iones, aunque no estén rigurosamente definidas, son realidades físicas que permiten explicar numerosos problemas concretos relativos al proceso de transporte iónico en disoluciones electrolíticas" [22].

**Figura 1-2:** Comportamiento grupal e individual de los iones en una disolución.

El mapa conceptual de la figura 1-2, indica las principales características del comportamiento de los iones, cuando hay presencia o ausencia de gradientes de temperatura, presión, potencial eléctrico y concentración en una disolución.

## 1.9 Tipos de transporte y propiedades transportadas

Las variables macroscópicas de un sistema que no está en equilibrio pueden cambiar su valor de un punto a otro en el transcurso del tiempo (variación espacio-temporal). El gradiente de una función escalar es un vector, con dirección y sentido hacia el aumento más rápido de la función, y cuya magnitud es la derivada respecto a la distancia en esa dirección [23].

El gradiente de temperatura se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{\nabla}T = i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (1.1)$$

Dónde  $i, j$  y  $k$  son los vectores unitarios en las direcciones cartesianas  $x, y, z$ .

La concentración de la sustancia se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{\nabla}c_i = i \frac{\partial c_i}{\partial x} + j \frac{\partial c_i}{\partial y} + k \frac{\partial c_i}{\partial z} \tag{1.2}$$

El gradiente de la velocidad del flujo es un tensor de nueve componentes.

$$\vec{\nabla}v_x = i \frac{\partial v_x}{\partial x} + j \frac{\partial v_x}{\partial y} + k \frac{\partial v_x}{\partial z} \tag{1.3}$$

$$\vec{\nabla}v_y = i \frac{\partial v_y}{\partial x} + j \frac{\partial v_y}{\partial y} + k \frac{\partial v_y}{\partial z} \tag{1.4}$$

$$\vec{\nabla}v_z = i \frac{\partial v_z}{\partial x} + j \frac{\partial v_z}{\partial y} + k \frac{\partial v_z}{\partial z} \tag{1.5}$$

En la evolución de un sistema, se produce el transporte de una propiedad física, la cual se cuantifica mediante la magnitud de flujo.

El flujo es proporcional al gradiente de la variable asociada.

$$J = -L\vec{\nabla}Y \tag{1.6}$$

Dónde  $L$  es el coeficiente de proporcionalidad de transporte, el cual es independiente del gradiente de la variable asociada,  $\vec{\nabla}Y$ , denominado fuerza impulsora. El signo menos (-) indica que la propiedad física fluye desde los puntos de mayor variable a puntos de menor variable, es decir, indica pérdida.

En ausencia de reacciones químicas, los principales tipos de procesos irreversibles que tienen lugar en sistemas que no están en equilibrio, son la conducción térmica, la viscosidad, la difusión y la conducción eléctrica. Estos procesos reciben el nombre de fenómenos de transporte ya que implican el transporte de alguna magnitud física. Ver tabla 1-2

**Tabla 1-2:** Resumen de los diferentes tipos de fenómenos de transporte [16].

Proceso de transporte	Propiedad transportada	Fuerza impulsora	Ley	Expresión	Coefficiente de transporte
Conducción eléctrica	Carga	Gradiente de potencial eléctrico, $\nabla\phi$	Ohm	$\frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = -\sigma \frac{d\phi}{dz}$	Conductividad eléctrica, $\sigma$

Conducción térmica	Energía	Gradiente de temperatura, $\nabla T$	Fourier	$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -\kappa \frac{dT}{dz}$	Conductividad térmica, $\kappa$
Difusión	Masa	Gradiente de concentración, $\nabla c_j$	Fick	$\frac{1}{A} \frac{dn_j}{dt} = -D \frac{dc_j}{dz}$	Coefficiente de difusión, $D$
Viscosidad	Cantidad de movimiento	Gradiente de velocidad, $\nabla v$	Newton	$\frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = -\eta \frac{dv}{dz}$	Viscosidad, $\eta$

Los iones se mueven a través de un fluido debido a tres procesos denominados modos de transporte.

**Migración:** Es la transferencia de masa, que se produce cuando la solución acuosa se somete a un campo eléctrico, de tal manera que las fuerzas eléctricas actúan en los iones [24] [25] [23].

**Convección:** Se define como la transferencia de masa, la cual ocurre por comportamientos hidrodinámicos en el fluido, por ejemplo la agitación [25].

**Difusión:** Es el movimiento aleatorio de moléculas con el que se produce un flujo neto de materia por medio de un gradiente de potencial químico, desde una región de mayor concentración a una de menor concentración [25].

### 1.10 Ecuación de flujo de Nernst- Planck

La ecuación Nernst-Planck, es una ecuación de conservación de masa que describe la influencia iónica en un gradiente de concentración y el campo eléctrico de un flujo de iones, permite cuantificar el flujo de iones a través de medios acuosos [26] [27] [22] [28] [29] [23] [30] [31].

En una disolución con temperatura constante y uniforme, despreciando los cambios a consecuencia de los movimientos iónicos. Y teniendo en cuenta que la disolución tiene una superficie de área unidad, perpendicular a la dirección del desplazamiento de los iones, el flujo es igual a:

$$J_i = -D_i \nabla C_i - \mu_i C_i \nabla \Phi + C_i v \tag{1.7}$$

De la ecuación anteriormente descrita  $J_i$  es el flujo,  $\phi$  es el potencial electrostático,  $V$  la velocidad del fluido,  $D_i$  la constante de difusión,  $C_i$  es la concentración y  $\mu\mu_i$  la movilidad iónica.

La expresión modela la constante de difusión. "Cuándo la concentración es homogénea en dos puntos vecinos, el gradiente es nulo y por lo tanto no hay transporte difusivo de materia", la expresión hace relación al transporte por migración, es decir debido al efecto de las fuerzas eléctricas y finalmente la expresión modela las velocidades del fluido [27].

En el análisis unidimensional, la ecuación de flujo de Nernst-Planck se plantea de la siguiente manera:

$$J_i(x) = -D_i \frac{\delta C_i(x)}{\delta x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\delta \phi(x)}{\delta x} + C_i V(x) \quad (1.8)$$

Donde  $z_i$  es la carga de ion,  $F$  es la constante de Faraday,  $R$  es la constante de los gases y  $T$  es la temperatura.

Los cambios del potencial eléctrico están relacionado por la ecuación de Poisson.

$$\nabla^2 \phi = -\frac{F}{\epsilon} \sum_i z_i C_i \quad (1.9)$$

En la cual  $\epsilon$  es la constante dieléctrica del medio y  $z_i$  la carga de la especie.

La velocidad del fluido se calcula con la ecuación de Naviers-Stokes, la cual se utiliza en mecánica de fluidos incomprensibles.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \nabla^2 v + \frac{f_e}{\rho_0} + \frac{f_g}{\rho_0} \quad (1.10)$$

Donde  $P$  es la presión,  $\nu$  la viscosidad cinemática,  $f_e$  y  $f_g$  son las fuerzas externas sobre el sistema y  $\rho_0$  es el valor promedio de la concentración.

El término  $f_e$  es el efecto del campo eléctrico en el fluido.

$$f_e = eE \sum_i z_i C_i \quad (1.11)$$

Donde  $e$  es la carga elemental, y  $E$  es el campo eléctrico.

La acción del campo gravitatorio se denota como  $f_g$

$$f_g = -\rho g \quad (1.12)$$

Donde  $g$  es la constante de la gravedad y  $\rho$  es la densidad del fluido.

Para  $\rho$  se realiza una aproximación Boussinesq dando como resultado una función de concentración iónica y un valor promedio  $\rho_o$ .

$$\rho = \rho_o(1 + \sum_i \alpha_i \Delta C_i) \quad (1.13)$$

$$\alpha_i = \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \rho}{\partial C_i} \quad (1.14)$$

Donde  $\rho_o$  es el valor promedio de la concentración.

“Solamente en el límite de disoluciones muy diluidas tendrá pleno sentido relacionar movilidades y coeficientes de difusión por medio de la ecuación anteriormente descrita. También existe un límite de aplicabilidad de la escala temporal, la ecuación de Nernst-Planck es válida para tiempos superiores a segundos. Por debajo de ese límite existen fluctuaciones de inercia de los iones y no puede suponerse, como se ha hecho, que existe proporcionalidad entre la velocidad de los iones y la fuerza que actúa sobre ellos. Éste orden de magnitud de los tiempos se encuentra muy lejos de las situaciones experimentales ordinarias en las que se emplea la ecuación de Nernst Planck” [22].

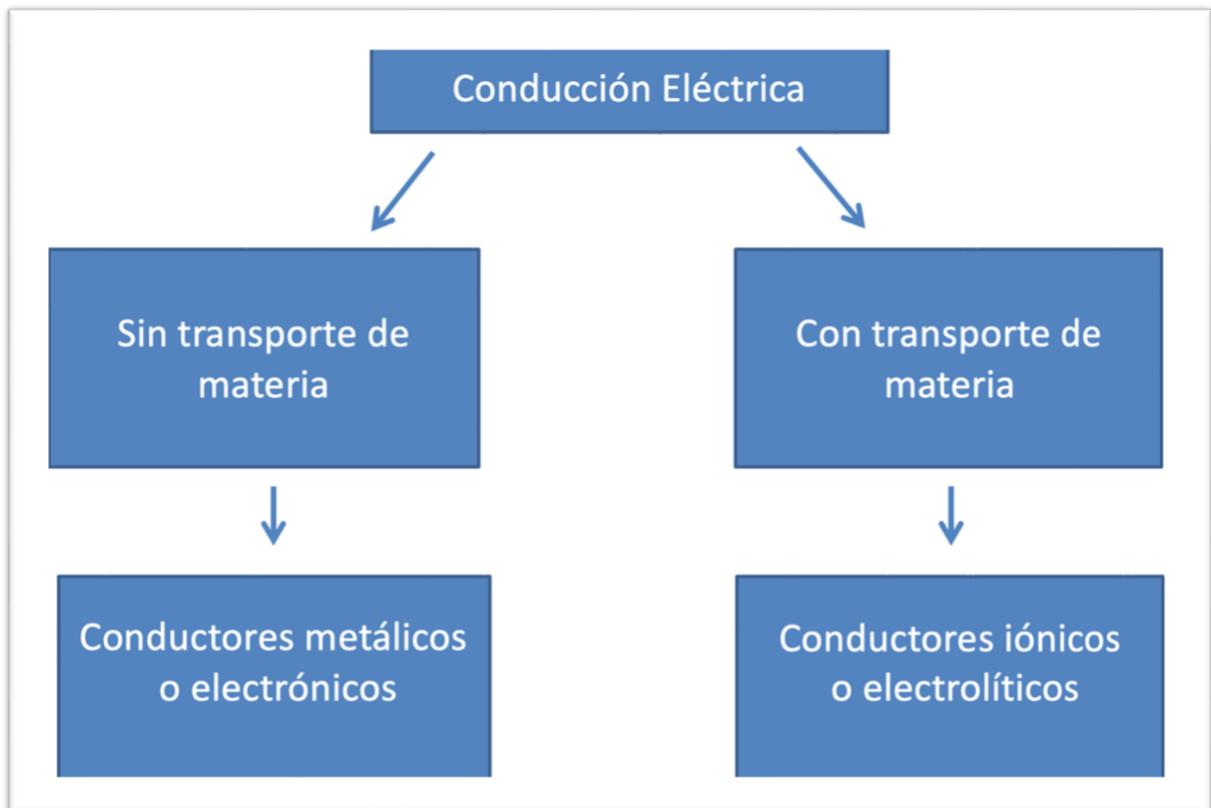
## 1.11 Conducción eléctrica.

Un conductor se caracteriza por tener electrones libres, los cuales pueden moverse en el interior del conductor. Para que los electrones puedan salir del conductor, requieren de la energía necesaria para vencer las fuerzas de atracción de los átomos, energía que en condiciones normales no poseen. “En ausencia de un campo eléctrico aplicado al conductor, los electrones se mueven aleatoriamente. La energía necesaria para realizar ese movimiento la obtienen de la llamada energía térmica que tiene un cuerpo en función de su temperatura” [32]. La conductividad eléctrica puede estar presente en los tres estados de la materia, sólidos, gases y líquidos. En la materia sólida la unidad transportada es el electrón, en gases y en los líquidos la unidad transportada son los iones [32].

### 1.11.1 Conducción iónica.

En las disoluciones electrolíticas, la corriente es transportada por los iones de la disolución. En ausencia de un campo eléctrico, los iones constituyen un conductor iónico y se encuentran en constante movimiento aleatorio, debido a la acción de fuerzas térmicas y de convección. Una vez los iones son sometidos a una acción de un campo eléctrico, estos se mueven en un sentido u otro de acuerdo a su carga, fenómeno que se conoce como migración iónica. En estas condiciones se considera la disolución como un conductor electrónico homogéneo que sigue la ley de ohm [33] [34].

**Figura 1-3:** Conducción eléctrica, tipos de conductores y el transporte de materia.



El mapa conceptual de la figura 1-3 representa los tipos de conductores eléctricos y el transporte de materia, asociados a cada uno de ellos.

La conducción eléctrica se define como un fenómeno de transporte, en el cual la carga eléctrica (en forma de electrones), se mueve a través del sistema. Existen conductores metálicos o electrónicos sin transporte de materia y conductores iónicos o electrolíticos con transporte de materia. La corriente eléctrica, es la velocidad del flujo de carga eléctrica,

que circula por medio de un conductor, donde la carga eléctrica pasa a través de una sección transversal de área, en el tiempo. La carga fluye debido a una fuerza eléctrica, y a la presencia de un campo eléctrico [fuerza por unidad de carga], en un conductor que transporta corriente eléctrica. Teniendo en cuenta que la definición de potencial eléctrico, es la energía potencial, por unidad de carga. El campo eléctrico, es el gradiente de potencial eléctrico con signo contrario. La densidad de flujo de carga o la densidad de corriente eléctrica, es la cantidad de carga que circula por un conductor por unidad de área y tiempo. Se asimila como una intensidad eléctrica por unidad de área y su unidad de medida es el amperio dividido por metro cuadrado [23] [35].

En una dimensión se expresaría de la siguiente manera:

$$J_x = \frac{I}{A} = \frac{1}{A} \frac{dq}{dt} = -\sigma \frac{d\phi}{dx} = \sigma E_x \quad (1.15)$$

Cuando hay un gradiente de potencial eléctrico, la corriente eléctrica fluye en un conductor. El coeficiente de proporcionalidad  $\sigma$ , se denomina conductividad eléctrica o conductancia específica, relaciona el transporte de la carga entre dos puntos en los que se ha establecido un gradiente de potencial. La unidad de medida es el siemens dividido por metro. Cuanto mayor sea la conductividad eléctrica de una sustancia, mayor será la densidad de corriente que fluye para un campo. La conductividad es el inverso de la resistividad [23] [33][36].

En un conductor que transporta corriente de composición homogénea y sección transversal de área constante, la densidad de corriente es constante en cada punto de conductor (régimen estacionario).

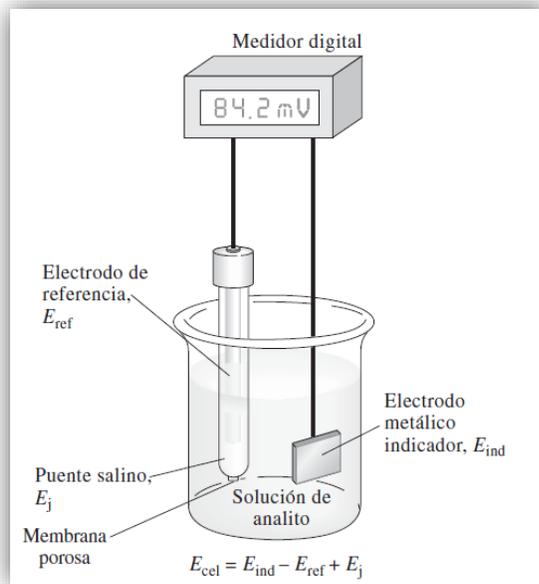
## 1.12 Método potenciométrico para la medición de la conductividad eléctrica del suelo.

La conductividad eléctrica, se puede calcular en todos los estados de la materia, sólidos, gases y líquidos. Teniendo en cuenta que la conductividad específica es una propiedad del medio y se aplica en estados sólidos de la materia, para estos casos son utilizados los métodos amperimétricos, y de reflectrometría. Para las mediciones de conductividad equivalente, las cuales se hacen en disoluciones electrolíticas, se suelen emplear sensores inductivos y potenciométricos. En el desarrollo de este proyecto se utilizó un sensor potenciométrico, con un agitador mecánico acoplado alrededor de su celda. Con la

finalidad de garantizar la homogeneidad de la disolución para la posterior medición de las conductividades eléctricas de las diferentes muestras.

Los métodos potenciométricos se basan en la medición de potencial eléctrico, respecto a dos electrodos sumergidos en una disolución, el montaje de los electrodos, el medidor y la solución a medir se reconoce como una celda para análisis potenciométrico. Ver Figura 1-4. Actualmente la identificación de nutrientes se realiza por medio de electrodos de ion selectivo, la metodología que permite detectar los iones en una disolución se conoce como técnicas potenciométricas [37], en las cuales una membrana selectiva se encarga de detectar un ion específico. De acuerdo al tipo de construcción de la membrana, se clasifica la potenciometría como clásica y moderna. En la potenciometría clásica la membrana selectiva es de unión líquida, mientras que en la potenciometría moderna, la membrana es de estado sólido y en ella utilizan nanotubos de carbono y polímeros. Ver figura 1-5. Los sensores mas especializados de estado solido para detectar iones se conocen como Isfet [38] [39] [40] [41][42] .

**Figura 1-4:** Celda para el análisis potenciométrico [29].



El electrodo de referencia  $E_{ref}$  de la figura 1-4 es una semicelda, cuyo potencial de electrodo es conocido y es independiente a la concentración que se encuentran en la solución para analizar. El electrodo metálico indicador  $E_{ind}$ , está sumergido en

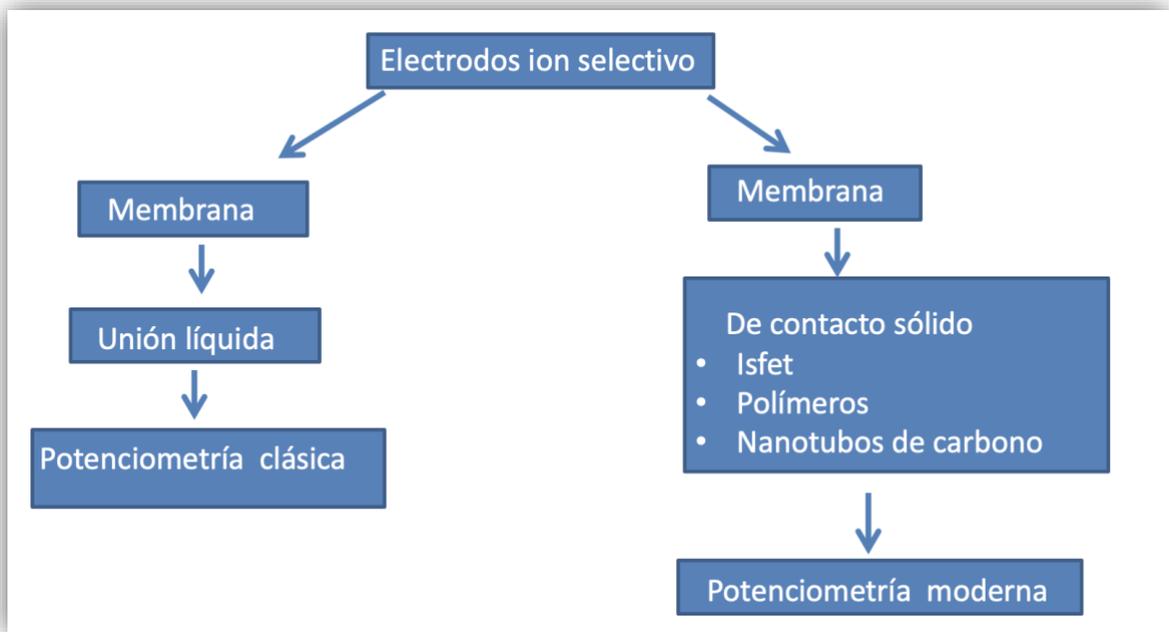
la solución y genera un potencial que depende de la actividad del analito. La función del puente salino  $E_j$ , es impedir que los componentes de la solución de analito se mezclen con los del electrodo de referencia.

El potencial de celda, se calcula mediante a siguiente ecuación:

$$E_{cel} = (E_{ind} - E_{ref}) + E_j \quad (1.16)$$

El potencial de una celda, está relacionado con la actividad de la solución, con una calibración adecuada de los electrodos, por medio de soluciones calibradoras es posible determinar la concentración del analito [37].

**Figura 1-5:** Tipos de electrodos de ion selectivo.



El mapa conceptual de figura 1.5, muestra como la estructura física de la membrana del electrodo, divide las técnicas de potenciometría en clásica y en moderna.

Los electrodos de ion selectivo están fundamentados en la ecuación de Nernst y como respuesta al contacto con la solución, se generará un voltaje que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} + Ln \frac{\text{aceptor}}{\text{donador}} \quad (1.17)$$

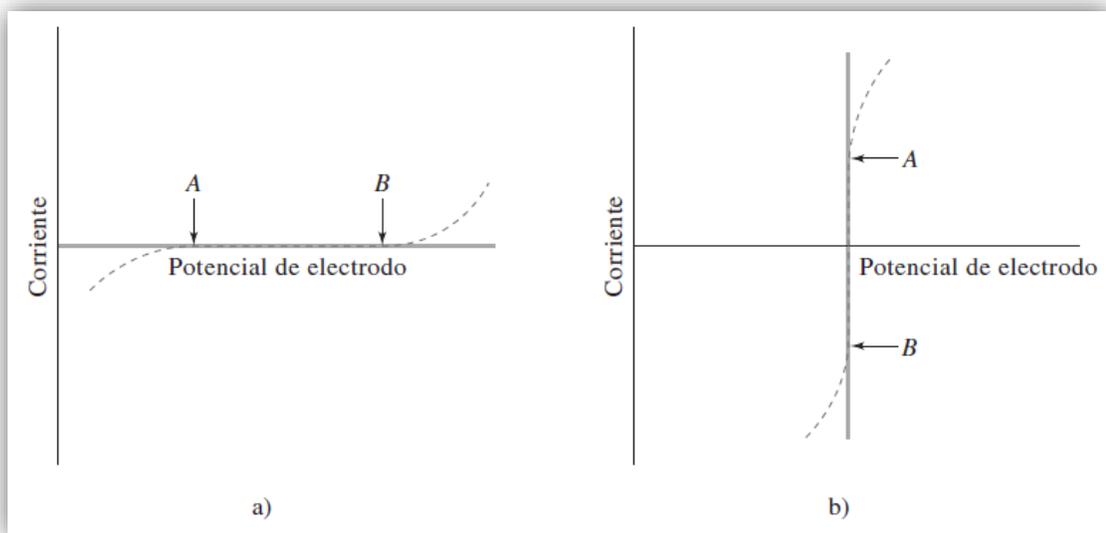
Dónde  $E^{\circ}$  es el potencial redox,  $R$  es la constante de los gases.  $R=8.314 \text{ J/molK}$ .  $E$  es el potencial corregido del electrodo,  $T$  es la temperatura absoluta en  $^{\circ}\text{K}$ ,  $n$  es el número de  $e^{-}$  transferidos y  $F$  es la constante de Faraday [43].

De acuerdo con la ecuación de Nernst el potencial de equilibrio varía linealmente con la temperatura absoluta y logarítmicamente con la concentración iónica [44].

### 1.12.1 Polarización del electrodo

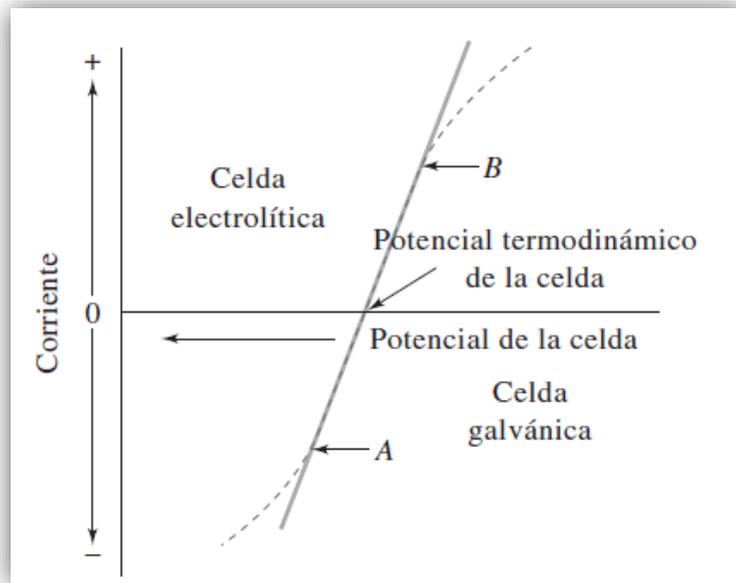
Es posible medir la corriente en una celda en función del voltaje, y la corriente frente a curvas de voltaje a partir de los datos. Las curvas de las gráficas corriente-voltaje son frecuentemente no lineales en los extremos, lo cual indica que la celda está polarizada.

**Figura 1-6:** a) Curvas corriente-voltaje para un electrodo polarizado ideal y b) Curvas corriente-voltaje para un electrodo no polarizado ideal. Las líneas punteadas muestran la desviación del comportamiento ideal que sufren los electrodos reales [29].



En la figura 1-6. a) corresponde a un electrodo polarizado ideal en el cual la corriente permanece constante en el intervalo A y B. b) representa un electrodo no polarizado ideal, en el intervalo A y B el voltaje es independiente de la corriente.

**Figura 1-7:** Curva corriente-voltaje para una celda con un comportamiento no polarizado ideal entre A y B . [29]



La curva corriente-voltaje de la figura 1-7 representa una celda que tiene electrodos con un comportamiento no polarizado ideal entre los puntos A y B. La pendiente finita se debe a la resistencia interna de la celda, después de los puntos A y B (línea punteada), tiene lugar la polarización de uno o de ambos electrodos.

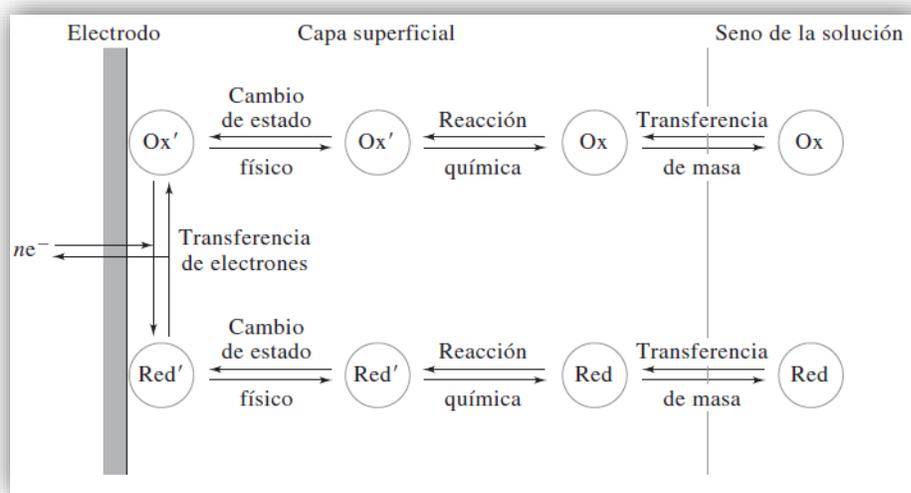
La mitad superior de la curva corriente-voltaje indica que la celda tiene un comportamiento electrolítico y la mitad inferior describe su comportamiento galvánico.

### 1.12.2 Polarización en una celda electroquímica.

En la reacción de transferencia de masa, que involucra el movimiento de Ox y Red desde el seno de la solución hasta la capa superficial, se limita la velocidad de la reacción global y la intensidad de corriente, por lo anterior se obtiene polarización de concentración.

Algunas reacciones son precedidas por una reacción química, en la cual se forman especies de Ox' o Red' este producto es el participante en el proceso de transferencia de electrones. Cuando se limita la intensidad de corriente debido a la velocidad de formación o de descomposición de tales productos, ocurre una polarización de reacción. "Cuando la intensidad de corriente está limitada por una lenta velocidad de transferencia de electrones desde el electrodo hacia las especies oxidadas en la capa superficial o desde las especies reducidas hacia el electrodo se tiene entonces polarización de transferencia de carga".

**Figura 1-8:** Etapas de la reacción en un electrodo. [29]



La figura 1-8 describe las tres regiones de una semicelda en las que se puede tener una polarización, las regiones incluyen el electrodo, una capa superficial de la solución adyacente al electrodo y el seno de la solución. La velocidad a la cual transcurre la reacción global y la magnitud de la corriente podría limitarse en cualquiera de las etapas intermedias.

### 1.12.3 Polarización de concentración

La polarización de concentración se observa cuando la difusión, la convección y la migración no son suficientes para transportar el reactivo hacia la superficie del

electrodo, debido a la polarización de concentración, se tiene que aplicar un potencial más alto a la celda electrolítica, dicho potencial debe ser más alto que el valor indicado con base al potencial termodinámico y en la caída  $IR$ . La polarización de concentración se aplica en varios métodos electroanalíticos, en algunos casos se trata de eliminarlo y en algunos otros de aplicarlo. Los siguientes son factores que influyen experimentalmente en el grado de polarización de concentración:

- La concentración de los reactivos, la polarización es más notoria a bajas concentraciones.
- La concentración total de electrolito, la polarización se vuelve más fuerte a elevadas concentraciones.
- La agitación mecánica, la polarización disminuye en soluciones muy bien agitadas.
- Los efectos de la polarización disminuyen a medida que aumenta el área superficial del electrodo. [37]

### 1.13 Modelos de series temporales

Las series temporales se pueden encontrar en cualquier campo de la ciencia, una serie temporal es una secuencia de observaciones ordenadas y asociadas a un momento de tiempo, para analizar series temporales se utilizan modelos univariantes y modelos multivariantes. Los modelos univariantes analizan una serie temporal en función de su propio pasado y los modelos multivariantes analizan varias series temporales de manera simultánea. Analizar una serie temporal permite: Describir las características de la serie, por ejemplo la tendencia, comportamiento estacional y desestacionalizar. También permite predecir valores futuros de las variables. Una serie temporal univariante se modela en términos de los valores pasados, o de su posición respecto al tiempo, las predicciones obtenidas son extrapolaciones de datos observados hasta el momento [45].

En la agricultura se puede predecir variables meteorológicas para determinar el consumo de agua en un cultivo, los algoritmos de predicción más utilizados son los autorregresivos integrados de medida móvil (ARIMA), estos modelos predicen series simples de una sola variable, basados en valores pasados de la variable a predecir, se utilizan en predicciones a corto plazo debido a que hace énfasis en el pasado reciente más que en el pasado distante. Tiene aplicabilidad a variables discretas y continuas, teniendo en cuenta que el tiempo debe ser espaciado y en intervalos discretos [46]. La metodología que se emplea en series de tiempo para generar modelos como el autorregresivo de media móvil (ARMA) o el modelo ARIMA para obtener predicciones fueron desarrollados por [47] [7].

El modelo paramétrico ARIMA “caracteriza las series como sumas o diferencias, ponderadas o no, de variables aleatorias o de las series resultantes” [45]. Predice series de datos que contienen variación estacional, también patrones estacionales cambiantes, requiere como mínimo 50 observaciones. Las series de tiempo estacionarias tienen una media, varianza y función de correlación constantes a través del tiempo. Por medio de una transformación denominada “diferenciar”, es posible diferenciar varias veces para obtener una serie estacionaria [27].

La interrelación temporal de los términos de una serie, se denomina como el coeficiente de autocorrelación y cuantifica el grado de asociación lineal entre observaciones separadas por periodos. La información de correlación entre diferentes observaciones de una serie temporal permite construir un modelo apropiado para los datos [45].

El grado de asociación lineal  $\rho_{xy}$  entre dos variables es definida como:

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sqrt{V(x)V(y)}} \quad (1.18)$$

Donde  $-1 \leq \rho_{xy} \leq 1$ .

Si ,  $\rho_{xy} = 0$  no hay relación lineal entre  $x$  e  $y$ .

Si ,  $\rho_{xy} = 1$  existe una relación lineal perfecta y positiva entre  $x$  e  $y$ .

Si ,  $\rho_{xy} = -1$  existe una relación lineal perfecta y negativa entre  $x$  e  $y$  .

El coeficiente de correlación entre las observaciones de una serie temporal, se define de la siguiente manera:

$$r_{Y_t Y_{t+1}} = r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y}_{(1)})(Y_{t+1} - \bar{Y}_{(2)})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y}_{(1)})^2 \sum_{t=1}^{T-1} (Y_{t+1} - \bar{Y}_{(2)})^2}} \quad (1.19)$$

Donde  $\bar{Y}_{(1)}$  es la medida muestral de las  $T - 1$  primeras observaciones,  $\bar{Y}_{(2)}$  es la medida muestral de las  $T - 1$  últimas observaciones. La fórmula aproximada de correlación se define así:

$$r_1 = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+1} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (1.20)$$

Donde  $r_1$  mide la correlación o el grado de asociación lineal entre observaciones sucesivas.

La correlación entre observaciones separadas por intervalos o el coeficiente de auto correlación de orden  $k$ , se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{T-k} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (1.21)$$

### 1.13.1 Proceso estocástico

Es una familia de variables aleatorias relacionadas entre sí, las cuales siguen una ley de distribución conjunta definida, un proceso estocástico se puede caracterizar por su función de distribución o por sus momentos del proceso. La función de distribución de un proceso estocástico incluye todas las funciones de distribución para cualquier subconjunto finito de variables aleatorias.

El conjunto de las medias de las variables aleatorias del proceso, determinan el primer momento del proceso estocástico.

$$E(Y_t) = \mu_t < \infty, t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.22)$$

El conjunto de las varianzas de todas las variables aleatorias y por las covarianzas entre todo par de variables aleatorias, determinan el segundo momento centrado del proceso:

$$V(Y_t) = E[Y_t - \mu_t]^2 = \sigma_t^2, < \infty t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1.23)$$

$$\text{cov}(Y_t Y_s) = E[Y_t - \mu_t][Y_s - \mu_s] = \gamma_{t,s}, \forall t, s (t \neq s) \quad (1.24)$$

Cuándo “la distribución del proceso es normal y se conocen sus dos primeros momentos (Medias, varianzas y covarianzas), el proceso está perfectamente caracterizado y se conoce su función de distribución” [45].

### 1.13.2 Procesos estocásticos estacionarios

El objetivo de analizar una serie temporal en los procesos estocásticos, es poder caracterizar el comportamiento de la serie y predecir en el futuro. Para lograr una predicción consistente es necesario que la estructura

probabilística sea estable en el tiempo. Si una serie presenta un comportamiento diferente o inestable en cada momento, esta no se puede utilizar para predecir. La estacionariedad son condiciones que se imponen a los procesos estocásticos para que sean estables para predecir.

La estacionariedad se puede caracterizar en términos de la función de distribución, para este caso se denomina estacionariedad estricta. Y cuando la estacionalidad se aplica a los momentos del proceso, se denomina estacionariedad de segundo orden o en covarianza [45].

### 1.13.3 Estacionariedad estricta.

Un proceso estocástico  $Y_t$  es estacionario, si la función de distribución de cualquier conjunto finito de variables aleatorias del proceso, no se altera si se desplaza  $k$  periodos en el tiempo.

$$F[Y_{t_1}, Y_{t_2}, \dots, Y_{t_n}] = F[Y_{t_1+k}, Y_{t_2+k}, \dots, Y_{t_n+k}] \forall (t_1, t_2, \dots, t_n) \text{ y } k \quad (1.25)$$

### 1.13.4 Estacionalidad de segundo orden o en covarianza.

Un proceso estocástico,  $Y_t$  es estacionario en covarianza si:

- Todas las variables aleatorias del proceso tienen la misma media y es finita, es decir es estacionario en media.
- La dispersión en torno a la media constante, a lo largo del tiempo es la misma para todas las variables del proceso, es decir las variables aleatorias tienen la misma varianza y es finita.
- La covarianza lineal entre dos variables aleatorias del proceso que tengan una distancia  $k$  periodos de tiempo, es la misma que existe entre otras dos variables que estén separadas también  $k$  periodos, independiente del tiempo al que están referidas, es decir las auto

covarianzas sólo dependen del número de periodos de separación entre las variables y no del tiempo.

Entonces, un proceso estocástico es estacionario en covarianza si:

$$(1) \quad E(Y_t) = \mu < \infty$$

$$(2) \quad \text{Cov}(Y_t Y_s) = \begin{cases} V(Y_t) = \sigma_Y^2 < \infty & t = s \\ \gamma_{|t-s|} < \infty & t \neq s \end{cases} \quad (1.26)$$

### 1.13.5 Estimación de los momentos

Los momentos poblacionales de un proceso estocástico estacionario se estiman a través de los correspondientes momentos muestrales [45].

- Media:

$$\hat{\mu} = \bar{Y} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Y_t \quad (1.27)$$

- Varianza:

$$\hat{\gamma}_0 = \hat{V}(Y) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2 \quad (1.28)$$

- Función de autocovarianzas:

$$\hat{\gamma}_k = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T-k} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+k} - \bar{Y}), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (1.29)$$

- Función de autocorrelación:

$$\hat{\rho}_k = \frac{\hat{\gamma}_k}{\hat{\gamma}_0}, k = 1, 2, \dots, K \quad (1.30)$$

## 1.14 Modelo de auto regresión ARX

Los modelos ARX son modelos matemáticos dinámicos, derivados de la teoría de identificación de sistemas, un modelo general con una entrada y una salida se describe con la ecuación en diferencias lineales [48][49] [50][51][52].

$$\begin{aligned}
 y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_nay(t-na) = \\
 b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots \\
 + b_nbu(t-nk-nb+1) + e(t)
 \end{aligned} \tag{1.31}$$

Donde  $y(t)$  es la salida para  $t = t, t-1, \dots, t-na$ ;  $u(t)$  es la entrada para  $t = t-nk, t-nk-1, \dots, t-nk-nb+1$ ;  $na$  es el número de pasos de tiempo de la salida en el pasado;  $nb$  es el número de pasos de tiempo de la entrada en el pasado;  $nk$  es el retardo de la entrada  $u(t)$  respecto a la salida  $y(t)$ ;  $e(t)$  es el ruido blanco asociado a la variable de salida.

Un modelo ARX con múltiples entradas y múltiples salidas, se indica de la siguiente manera:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \tag{1.32}$$

Donde  $A(q)$  es una matriz de dimensiones  $ny \times ny$ ; cuyos elementos son polinomios en el operador de retraso  $q^{-1}y(t) = y(t-1)$

$ny$  es la matriz identidad. Expresado matricialmente:

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11}(q) & a_{12}(q) & \dots & a_{1ny}(q) \\ a_{21}(q) & a_{22}(q) & \dots & a_{2ny}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{ny1}(q) & a_{ny2}(q) & \dots & a_{nyny}(q) \end{bmatrix} \tag{1.33}$$

Donde los elementos  $a_{kj}$  son polinomios en el operador  $q^{-1}$

$$a_{kj}(q) = \delta_{kj} + a_{kj}^1 q^{-1} + \dots + a_{kj}^{na_{kj}} q^{-na_{kj}} \tag{1.34}$$

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

La matriz  $B(q)$  se forma como  $A(q)$  con dimensiones  $ny \times nu$ ,  $B(q) = B_0 + B_1q^{-1} + \dots + B_n bq^{-nb}$

$$B(q) = \begin{bmatrix} b_{11}(q) & b_{12}(q) & \dots & b_{1nu}(q) \\ b_{21}(q) & b_{22}(q) & \dots & b_{2nu}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{ny1}(q) & b_{ny2}(q) & \dots & b_{nynu}(q) \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

$$b_{kj}(q) = b_{kj}^1 q^{-nk_{kj}} + \dots + b_{kj}^{nb_{kj}} q^{-nk_{kj} - nb_{kj} + 1} \quad (1.36)$$

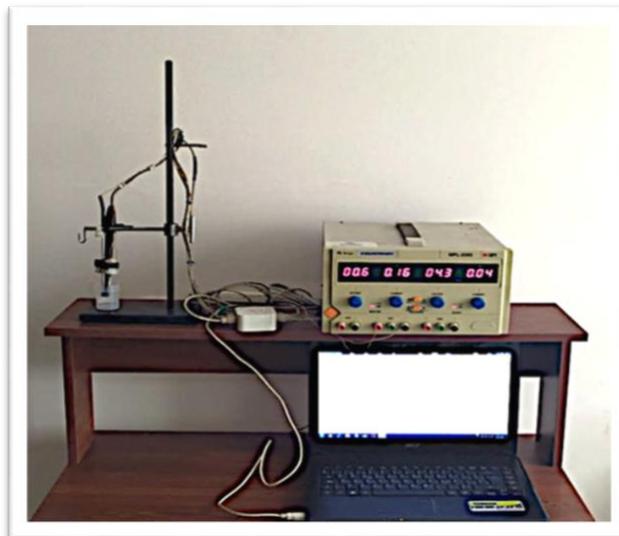
La estructura del modelo ARX, requiere determinar los coeficientes  $a_{11}, a_{12}, a_{ny1}, \dots, a_{ny2}, \dots, a_{nyny}$  y  $b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1nu}, \dots, b_{ny1}, b_{ny2}, \dots, b_{nyny}$ . También el orden del modelo dado por los parámetros  $na, bn$  y  $nk$ , por medio de la información de las variables de entrada y salida, con la finalidad de lograr un ajuste adecuado entre la estimación del modelo y la variable de salida medida [48].

## 2. Capítulo. Medición y análisis de la conductividad eléctrica en una solución para nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)

### 2.1 Equipos e insumos para la medición de datos experimentales.

En la medición de la conductividad eléctrica de una disolución, se tiene en cuenta las variables de temperatura, agitación de la solución, cantidad de soluto y cantidad de solvente. El montaje de la figura 2-1, permitió realizar mediciones experimentales según las normas técnicas colombianas NTC5596 y NTC4531, en las cuales se encontró relación entre soluto y solvente, relación que permitió observar cambios en la conductividad eléctrica al aumentar la temperatura.

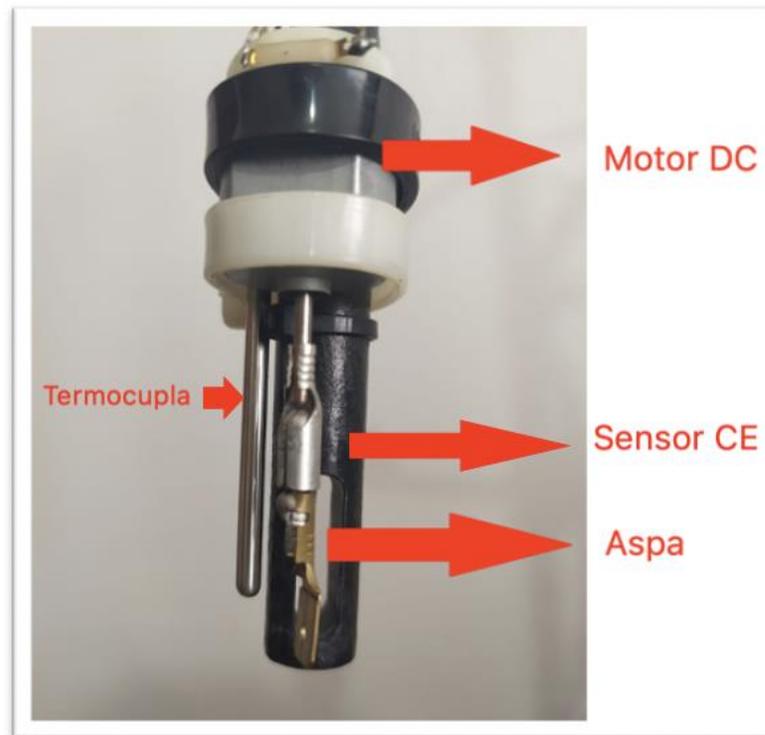
**Figura 2-1:** Montaje experimental para la estimación de conductividad eléctrica en una disolución.



El agua destilada, presentó una variación en la medición de conductividad eléctrica de 0.222 ms/m, variaciones que también se presentaron en diferentes solventes como el agua potable y en diferentes disoluciones con nutrientes. Debido a lo anterior, se acopló un agitador mecánico al sensor potenciométrico de conductividad eléctrica con el propósito de garantizar disoluciones homogéneas y mediciones constantes.

El agitador mecánico, se ensambló por medio de un motor eléctrico de voltaje continuo y en su eje se acopló un aspa. Ver figura 2-2. La temperatura en la disolución se cuantificó por medio de una termocupla y en la medición de la conductividad eléctrica se utilizó un sensor potenciométrico.

**Figura 2-2:** Montaje experimental del agitador mecánico.

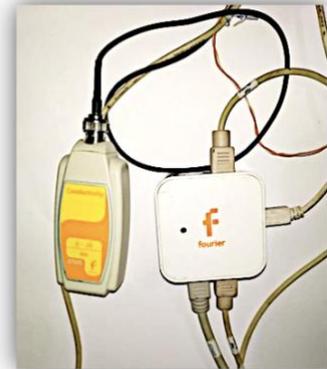
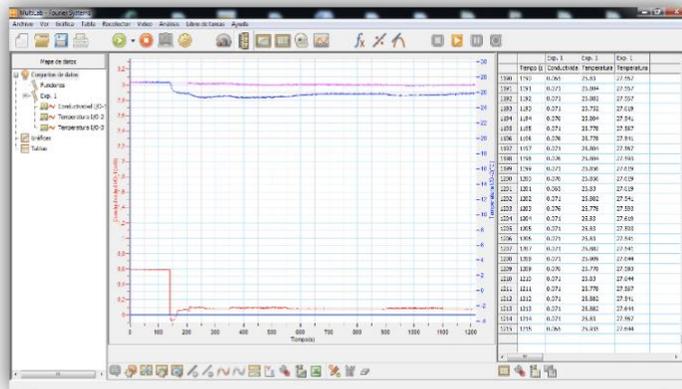


Para la disolución, se emplearon solutos de Nitrógeno, Potasio y Fosforo, provenientes del fertilizante granulado triple 15. El fertilizante triple 15 tiene la siguiente composición: Nitrógeno (N) total 15%, Fósforo (F) asimilable 15% y Potasio (P) soluble 15%. Como solvente se utilizó agua destilada.

La adquisición de datos se realizó mediante un datalogger Fourier System y el software Multilab. Ver Figura 2-3. Para el procesamiento de datos y la estimación del modelo se utilizó el software Matlab y las funciones de identificación de sistemas.

En el procesamiento de datos se utilizó un computador. MacBook Pro. Procesador 1,4 GHz Intel Core i5 de 4 núcleos y Memoria 8GB.

**Figura 2-3:** Software Multilab y Datalogger Fourier System.



a) Software Multilab

b) Datalogger

El software Multilab (a), permite adquirir información, procesar, graficar y exportar información. Al igual que guardar los experimentos y los datos en una grabación de audio y video. El datalogger (b), permite conectar hasta cuatro sensores con la finalidad de cuantificar variables experimentales.

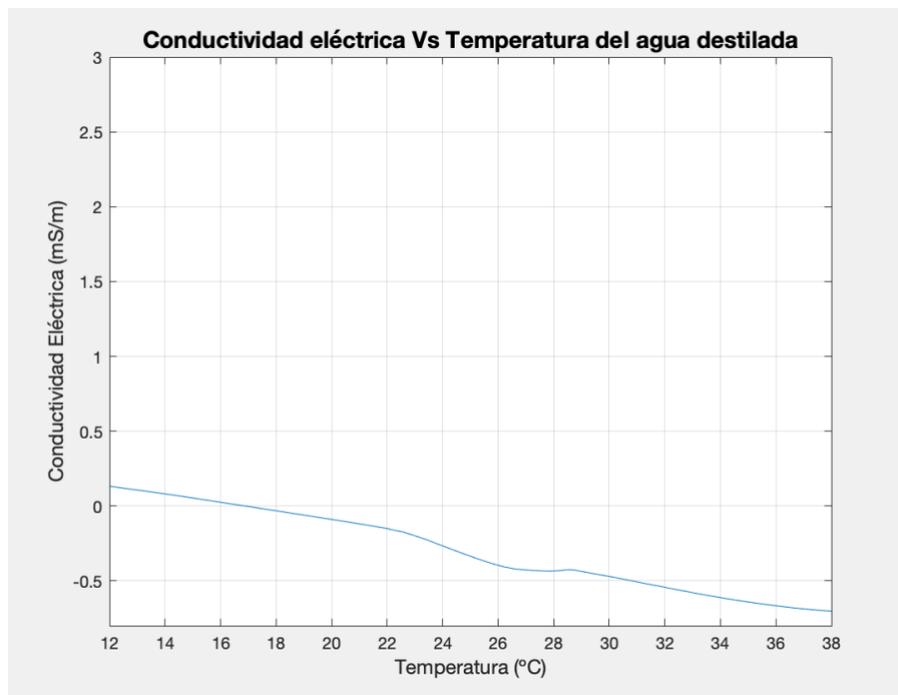
## 2.2 Preparación de la disolución.

Los nutrientes del fertilizante granulado triple 15, se clasificaron de acuerdo a su color, identificando el grano de color rojo con el nutriente de Potasio, el grano de color blanco con el nutriente de Nitrógeno y el grano de color Beige con el nutriente de Fósforo. Ver Figura 2-5. En base a la norma técnica colombiana NTC 5596 Calidad del Suelo, se tomaron datos de referencia para preparar la disolución e identificar que el agua destilada utilizada como solvente se encontrara dentro de los rangos para la preparación de las disoluciones. Ver Tabla 2-1.

**Tabla 2-1:** Rangos de pH y CE para la preparación de disoluciones NTC5596.

Rangos pH y CE en agua destilada. NTC 5596	Rangos pH y CE en agua destilada utilizada en la disolución
pH>5.6	pH=7.1
CE <0.2mS/m @ 25°C	CE= -0.3mS/m @ 25°C

**Figura 2-4:** Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura del agua destilada.



En el agua destilada para temperaturas que varían entre 12°C y 38°C, se observa que la conductividad eléctrica varía entre 0.1314 ms/m y -0.6993 ms/m. De tal manera que se observa una relación inversamente proporcional entre la conductividad eléctrica y la temperatura del agua. A mayor temperatura en el agua, menor es su conductividad eléctrica.

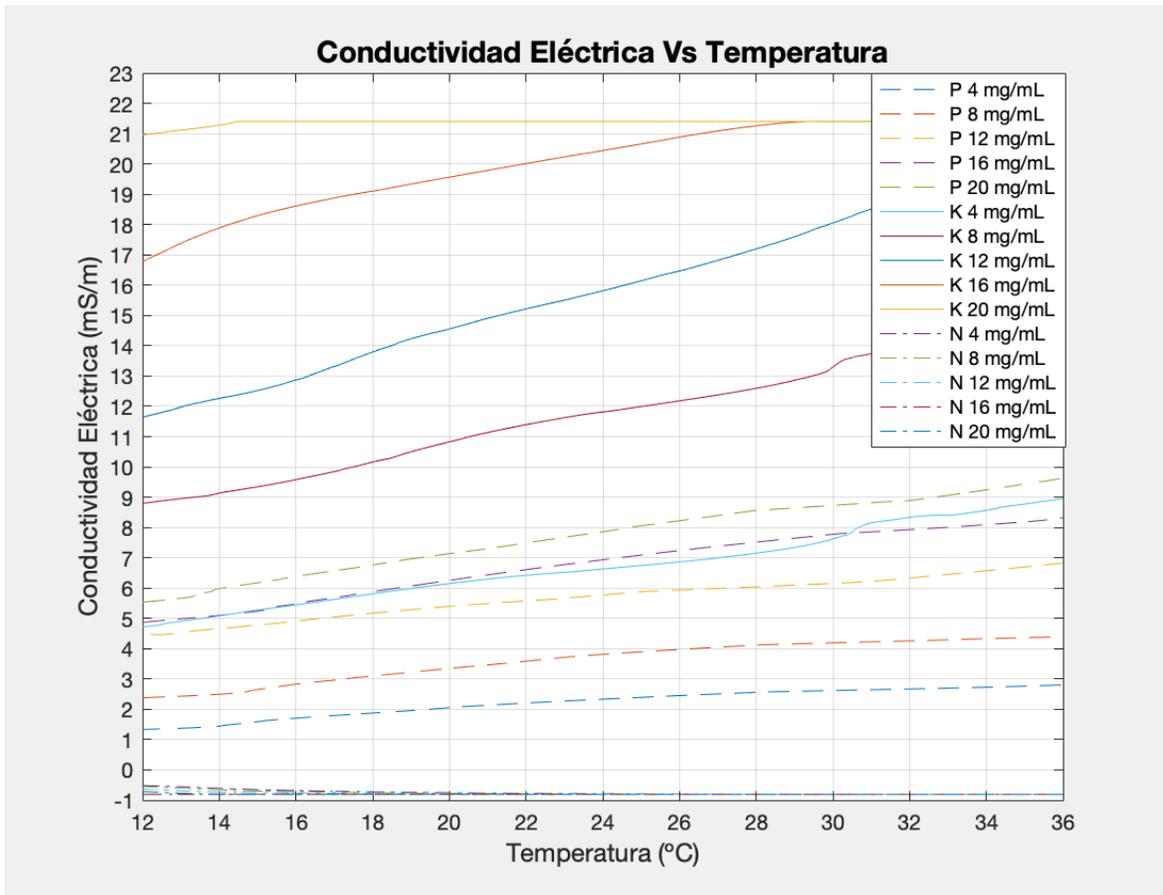
**Figura 2-5:** Clasificación de nutrientes del fertilizante triple 15.



Nota: El grano rojo corresponde al nutriente de Potasio (K), el grano blanco es el nutriente de Nitrógeno (N) y el grano beige es el nutriente de Fósforo (P).

Como punto de partida, se inicia con el método de preparación para la medición en suspensión suelo/agua, con la dilución indicada en la NTC 5596, a 5 g de soluto se adicionan 25 ml de agua destilada, se agita por 30 minutos a 8000 RPM y se procede hacer la medición por medio del montaje experimental de la figura 2-1. Se realizan pruebas experimentales hasta encontrar una relación soluto-solvente en la cual se encuentre una relación entre la temperatura de la disolución y la conductividad eléctrica. Después de múltiples pruebas variando valores de masa en el soluto y cantidad de solvente, se encontró que los nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), disueltos en agua destilada a concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL permitían observar la variación de la conductividad eléctrica en un rango de temperatura de 12°C a 36°C. Ver Figura 2-6.

**Figura 2-6:** Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio(K).



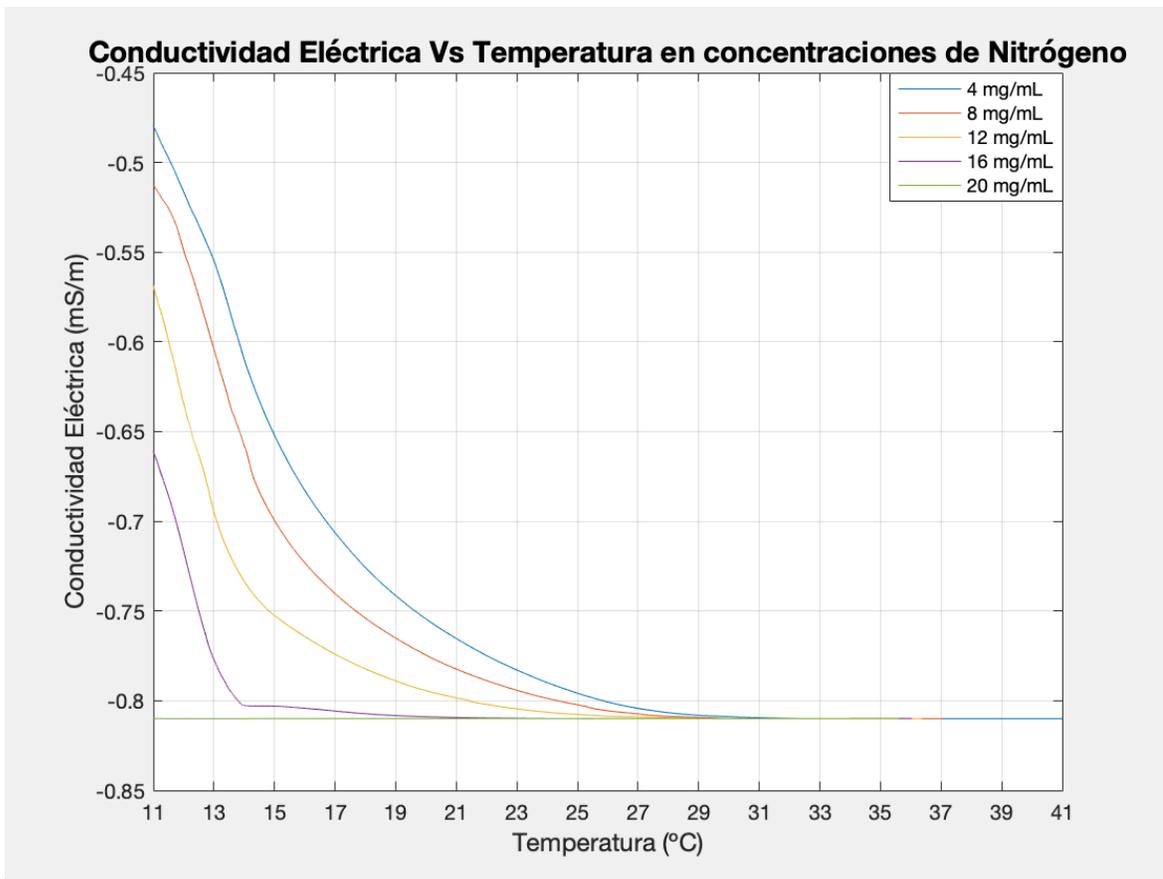
Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de los nutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) asociada a un color y estilo de señal.

En la figura 2-6 se observa el comportamiento de la conductividad eléctrica para nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) a diferentes concentraciones, permitiendo relacionar la medición de conductividad eléctrica con la temperatura de la disolución.

## 2.3 Análisis del nutriente Nitrógeno (N).

Se procesaron muestras de conductividad eléctrica a concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL de Nitrógeno (N). Las disoluciones se sometieron a cambios térmicos de 11°C a 41°C por medio de un baño de maría. Lo cual permitió generar la gráfica de la figura 2-7.

**Figura 2- 7:** Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno.



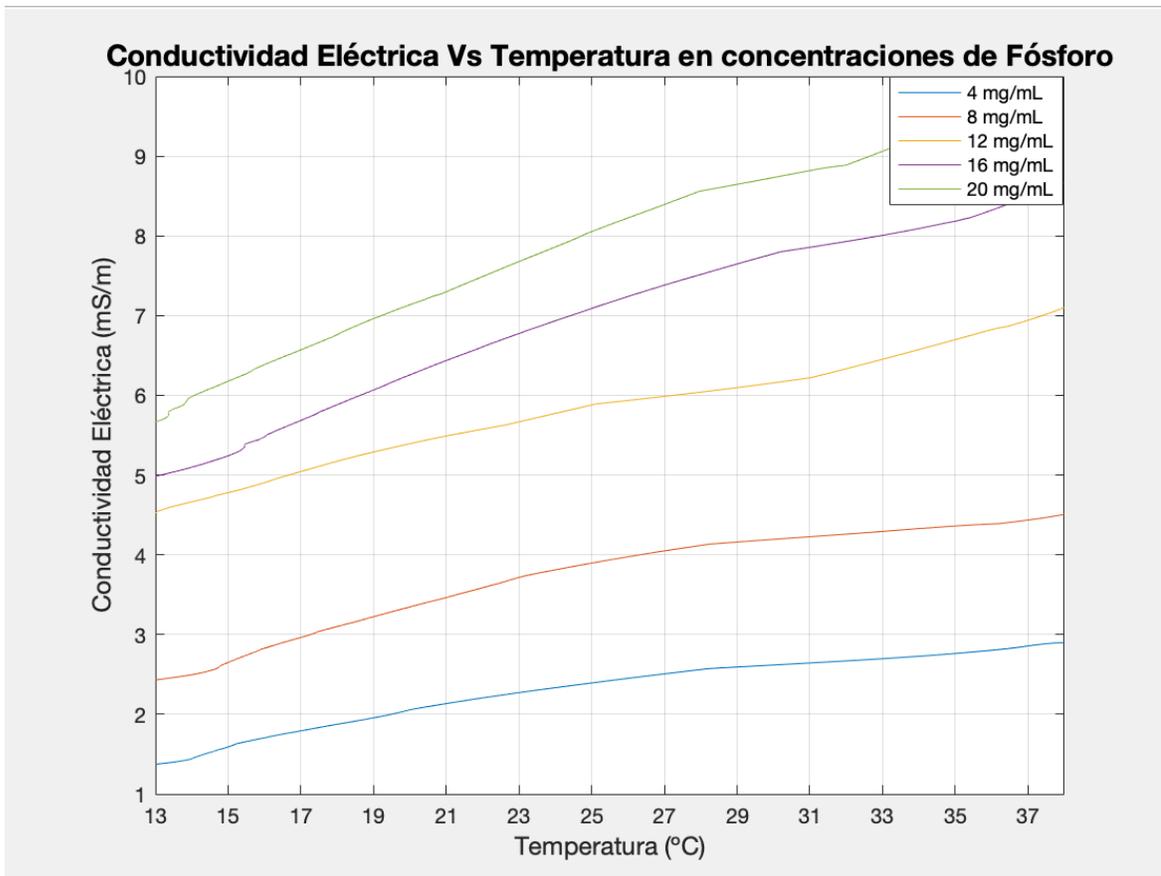
Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Nitrógeno asociada a un color.

En el rango de temperatura de 11°C a 41°C, se aprecia un comportamiento de la conductividad eléctrica inversamente proporcional con respecto a la temperatura de la disolución. A mayor temperatura es menor la conductividad eléctrica y a mayor masa también es menor la conductividad eléctrica. El valor máximo de conductividad eléctrica fue -0.48 ms/m a una temperatura de 11°C para una concentración de 4 mg/mL. A partir de 31°C en adelante, la conductividad eléctrica se vuelve constante para las concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL. La conductividad eléctrica para concentración de 20 mg/mL permaneció constante con un valor de -0.81 mS/m, sin verse afectada por la variación de temperatura. También es importante recalcar que aunque el instrumento de medida de conductividad eléctrica tiene un rango de 0 ms/m a 20 ms/m, se presentó un patrón de comportamiento similar en la conductividad eléctrica para las concentraciones analizadas.

## **2.4 Análisis del nutriente Fósforo (P).**

Se estudiaron muestras de conductividad eléctrica a concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL de Fósforo (P). Las disoluciones se sometieron a cambios térmicos de 13°C a 38°C por medio de un baño de maría. Lo cual permitió generar la gráfica de la figura 2-8

**Figura 2-8:** Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Fósforo.



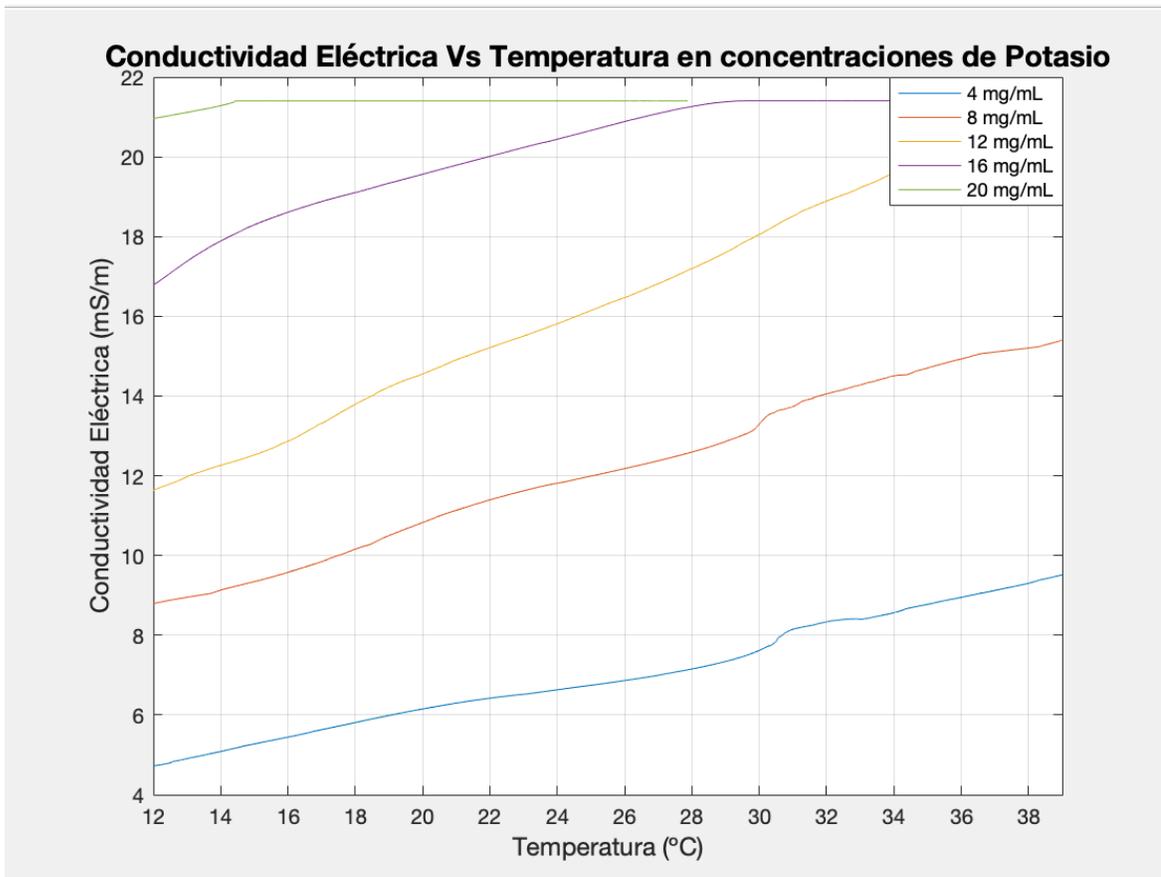
Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Fósforo asociada a un color.

En la gráfica 2-8 se aprecia una relación directa entre el aumento de la conductividad eléctrica y la temperatura, teniendo en cuenta el aumento en las concentraciones del nutriente presente, esta relación es directa ya que aumenta la cantidad de los electrolitos presentes, teniendo un efecto directo sobre los diferentes valores de conductividad eléctrica en incremento. El valor máximo de conductividad eléctrica fue 9.5 ms/m para una concentración de 20 mg/mL a una temperatura de 36.14°C.

## 2.5 Análisis del nutriente Potasio (K).

Se analizaron muestras de conductividad eléctrica a concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL de Potasio (K). Las disoluciones se sometieron a cambios térmicos de 12°C a 39°C por medio de un baño de maría. Lo cual permitió generar la gráfica de la figura 2-9.

**Figura 2-9:** Comportamiento de la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Potasio.



Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Potasio, cada una de ellas está asociada a un color.

---

En el rango de temperatura de 12°C a 39°C, se aprecia un comportamiento en la conductividad eléctrica directamente proporcional con respecto a la temperatura de la disolución y la masa. A mayor temperatura es mayor la conductividad eléctrica y a mayor masa también es mayor la conductividad eléctrica. El valor máximo de conductividad eléctrica fue 21.4 ms/m para una concentración de 12 mg/mL a una temperatura de 40.4°C, la concentración de 16 mg/mL alcanzó la máxima conductividad eléctrica a una temperatura de 29.3°C y la concentración de 20 mg/mL alcanzó la máxima conductividad eléctrica a una temperatura de 14.47°C. La conductividad eléctrica es constante a partir del valor de 21.4 ms/m, debido al rango de medición del equipo ya que el mismo tiene un rango de 0 a 20 ms/m.

### **3. Capítulo. Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K)**

Por medio de las funciones de identificación de sistemas de Matlab, se ingresaron datos experimentales con las variables de conductividad eléctrica y temperatura, logrando estimar modelos discretos autoregresivos con variables exógenas ARX [4 4 1] para diferentes concentraciones. Ver Anexo B.

#### **3.1 Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Nitrógeno (N)**

El comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno (N) se aprecia en la Figura 3-1. A continuación, se indican las diferentes ecuaciones polinómicas discretas para concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Nitrógeno (N) a 4 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.462z^{-1} + 0.2353z^{-2} - 0.06681z^{-3} + 0.2937z^{-4}$$

$$B(z) = 0.0006137z^{-1} - 0.002052z^{-2} + 0.001872z^{-3} - 0.000431z^{-4} \quad (3.1)$$

El modelo matemático descrito, proporciona una estimación de 90.54% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 4 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Nitrógeno (N) a 8 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.438z^{-1} + 0.276z^{-2} - 0.1657z^{-3} + 0.3277z^{-4}$$

$$B(z) = -0.001366z^{-1} + 0.0005259z^{-2} + 0.002836z^{-3} - 0.001995z^{-4} \quad (3. 2)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 89.32% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 8 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Nitrógeno (N) a 12 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.505z^{-1} + 0.3755z^{-2} - 0.1556z^{-3} + 0.2854z^{-4}$$

$$B(z) = -0.002716 + 0.004154z^{-2} - 0.001265z^{-3} - 0.0001678z^{-4} \quad (3. 3)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 89.87% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 12 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Nitrógeno (N) a 16 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.401z^{-1} + 0.1574z^{-2} - 0.02596z^{-3} + 0.2691z^{-4}$$

$$B(z) = -0.008837z^{-1} + 0.01084z^{-2} - 0.001535z^{-3} - 0.000461z^{-4} \quad (3. 4)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 93.44% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 16 mg/mL.

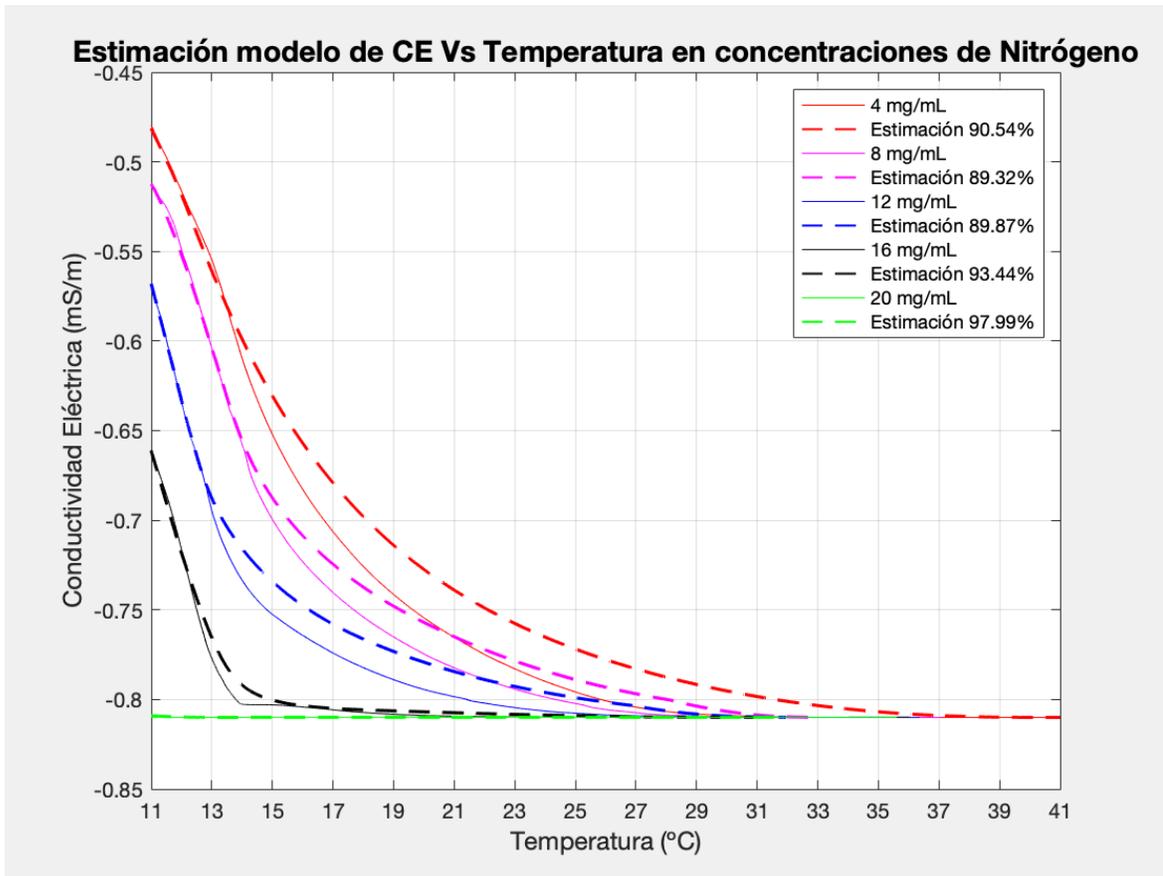
- Modelo ARX para una concentración de Nitrógeno (N) a 20 mg/mL

$$A(z) = 1 - 0.5433z^{-1} + 0.0763z^{-2} + 0.04214z^{-3} - 0.5754z^{-4}$$

$$B(z) = -0.00447z^{-1} + 0.0009531z^{-2} - 0.0002558z^{-3} + 0.003798z^{-4} \quad (3. 5)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 97.99% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 16 mg/mL.

**Figura 3-1:** Comportamiento del modelo matemático discreto para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Nitrógeno (N).



Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Nitrógeno (N). Los datos experimentales se representan con la señal continua y la estimación del modelo matemático está representado por la señal discontinua. Cada concentración está representada con un color.

El modelo matemático ARX estima el comportamiento de la conductividad eléctrica para las concentraciones de la Figura 3-1 por encima del 89.3%.

### 3.2 Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Fósforo (P)

El comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Fósforo (P) se aprecia en la Figura 3-2. A continuación, se indican las diferentes ecuaciones polinómicas discretas para concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Fósforo (P) a 4 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.492z^{-1} + 0.2314z^{-2} + 0.01005z^{-3} + 0.2503z^{-4}$$

$$B(z) = -1.165e - 05z^{-1} + 2.693e - 06z^{-2} + 3.951e - 05z^{-3} - 3.011e - 05z^{-4} \quad (3.6)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 92.64% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 4 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Fósforo (P) a 8 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.798z^{-1} + 0.63874z^{-2} + 0.1202z^{-3} + 0.03923z^{-4}$$

$$B(z) = 0.001355z^{-1} - 0.001608z^{-2} - 0.0008795z^{-3} - 0.001133z^{-4} \quad (3.7)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 52.71% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 8 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Fósforo (P) a 12 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.893z^{-1} + 0.8034z^{-2} + 0.08164z^{-3} + 0.008004z^{-4}$$

$$B(z) = -0.001165z^{-1} + 0.0070358z^{-2} - 0.01032z^{-3} + 0.00445z^{-4} \quad (3.8)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 90.49% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 12 mg/mL.

- Modelo ARX para una concentración de Fósforo (P) a 16 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.981z^{-1} + 0.9959z^{-2} - 0.04673z^{-3} + 0.03134z^{-4}$$

$$B(z) = 0.002399z^{-1} - 0.004511z^{-2} + 0.002069z^{-3} + 4.284e - 05z^{-4} \quad (3.9)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 81.17% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 16 mg/mL.

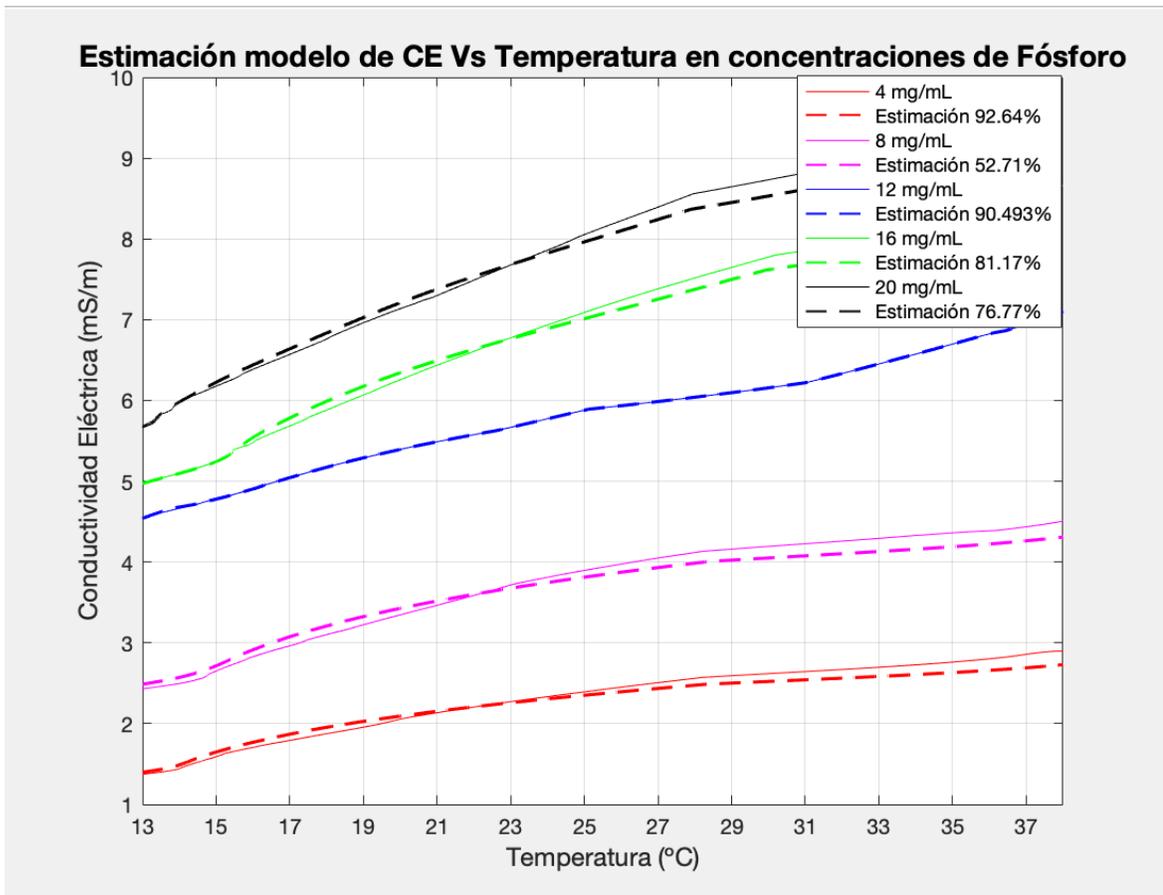
- Modelo ARX para una concentración de Fósforo (P) a 20 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.755z^{-1} + 0.5016z^{-2} + 0.2657z^{-3} - 0.01253z^{-4}$$

$$B(z) = 0.0004756z^{-1} - 0.002767z^{-2} + 0.006407z^{-3} - 0.003115z^{-4} \quad (3.10)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 76.77% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 20 mg/mL.

**Figura 3-2:** Comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Fósforo (P).



Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Fósforo (P). Los datos experimentales se representan con la señal continua y la estimación del modelo matemático está representado por la señal discontinua. Cada concentración está representada con un color.

El modelo matemático ARX estima el comportamiento de la conductividad eléctrica para las concentraciones de la Figura 3-2 por encima del 52.71% para una concentración de 12 mg/mL y la máxima estimación se logró para la concentración de 4 mg/mL con un porcentaje de 92.64%

### 3.3 Modelación computacional de la conductividad eléctrica para diferentes concentraciones de Potasio (K)

El comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Potasio (K) se aprecia en la Figura 3-3. A continuación, se indican las diferentes ecuaciones polinómicas discretas para concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL.

- Modelo polinomial de concentración de Potasio (K) a 4 mg/mL

$$\begin{aligned}
 A(z) &= 1 - 1.939z^{-1} + 0.923z^{-2} - 0.02043z^{-3} + 0.03664z^{-4} \\
 B(z) &= 0.0033146z^{-1} - 0.005336z^{-2} + 0.001844z^{-3} + 0.0001771z^{-4} \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 94% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 4 mg/mL.

- Modelo polinomial de concentración de Potasio (K) a 8 mg/mL

$$\begin{aligned}
 A(z) &= 1 - 1.835z^{-1} + 0.8443z^{-2} - 0.1756z^{-3} + 0.1666z^{-4} \\
 B(z) &= 0.0004042z^{-1} - 0.0002393z^{-2} + 0.0003105z^{-3} - 0.0004764z^{-4} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 93.48% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 8 mg/mL.

- Modelo polinomial de concentración de Potasio (K) a 12 mg/mL

$$\begin{aligned}
 A(z) &= 1 - 1.873z^{-1} + 0.8054z^{-2} + 0.01561z^{-3} + 0.05206z^{-4} \\
 B(z) &= -0.003459z^{-1} + 0.007336z^{-2} - 0.002215z^{-3} - 0.001662z^{-4} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 94.03% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 12 mg/mL.

- Modelo polinomial de concentración de Potasio (K) a 16 mg/mL

$$A(z) = 1 - 2.004z^{-1} + 1.038z^{-2} - 0.0624z^{-3} + 0.02829z^{-4}$$

$$B(z) = 0.005979z^{-1} - 0.002207z^{-2} - 0.01312z^{-3} + 0.009348z^{-4} \quad (3.14)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 92.62% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 16 mg/mL.

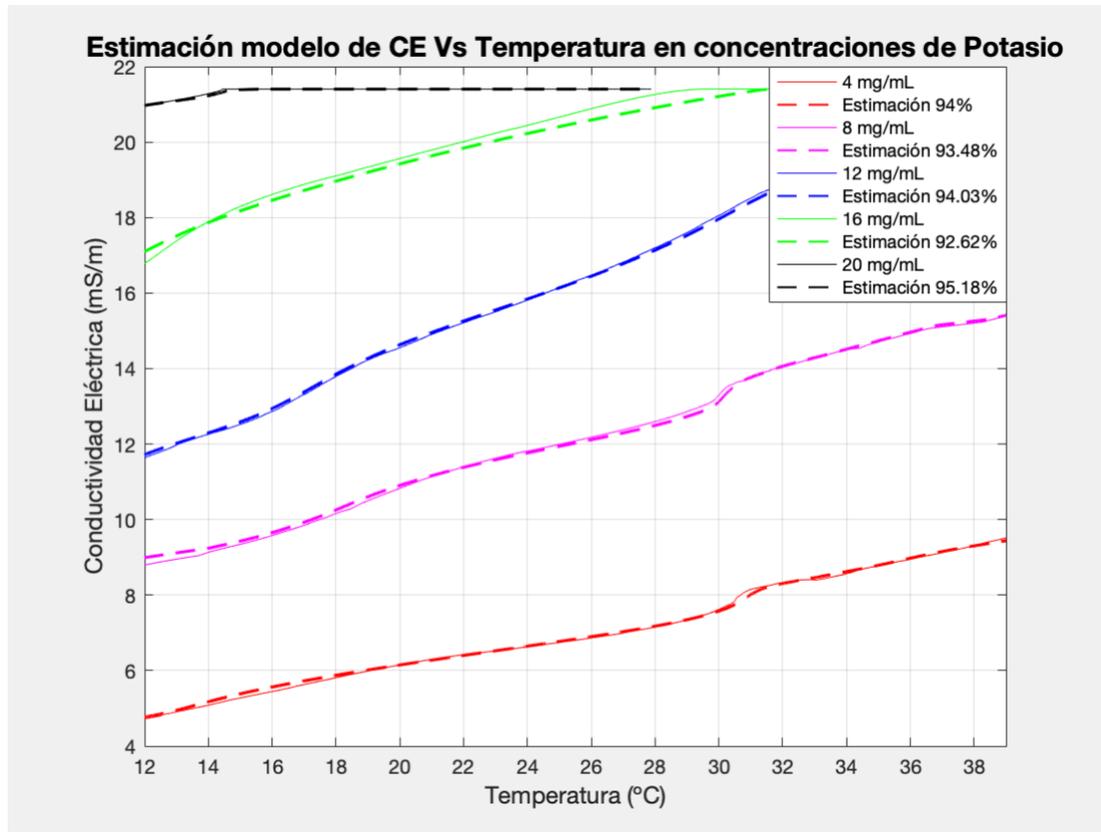
- Modelo polinomial de concentración de Potasio (K) a 20 mg/mL

$$A(z) = 1 - 1.8794z^{-1} + 0.8036z^{-2} + 0.05374z^{-3} + 0.02176z^{-4}$$

$$B(z) = 0.002664z^{-1} - 0.003412z^{-2} - 0.001216z^{-3} - 0.000469z^{-4} \quad (3.15)$$

El modelo matemático, proporciona una estimación de 95.18% en el comportamiento de la conductividad eléctrica en una solución de nitrógeno de 20 mg/mL.

**Figura 3-3:** Comportamiento del modelo matemático para la conductividad eléctrica versus temperatura a diferentes concentraciones de Potasio (K).



Nota: En la parte superior del lado derecho de la figura, se indican las diferentes concentraciones de Potasio (K). Los datos experimentales se representan con la señal continua y la estimación del modelo matemático está representado por la señal discontinua. Cada concentración está representada con un color.

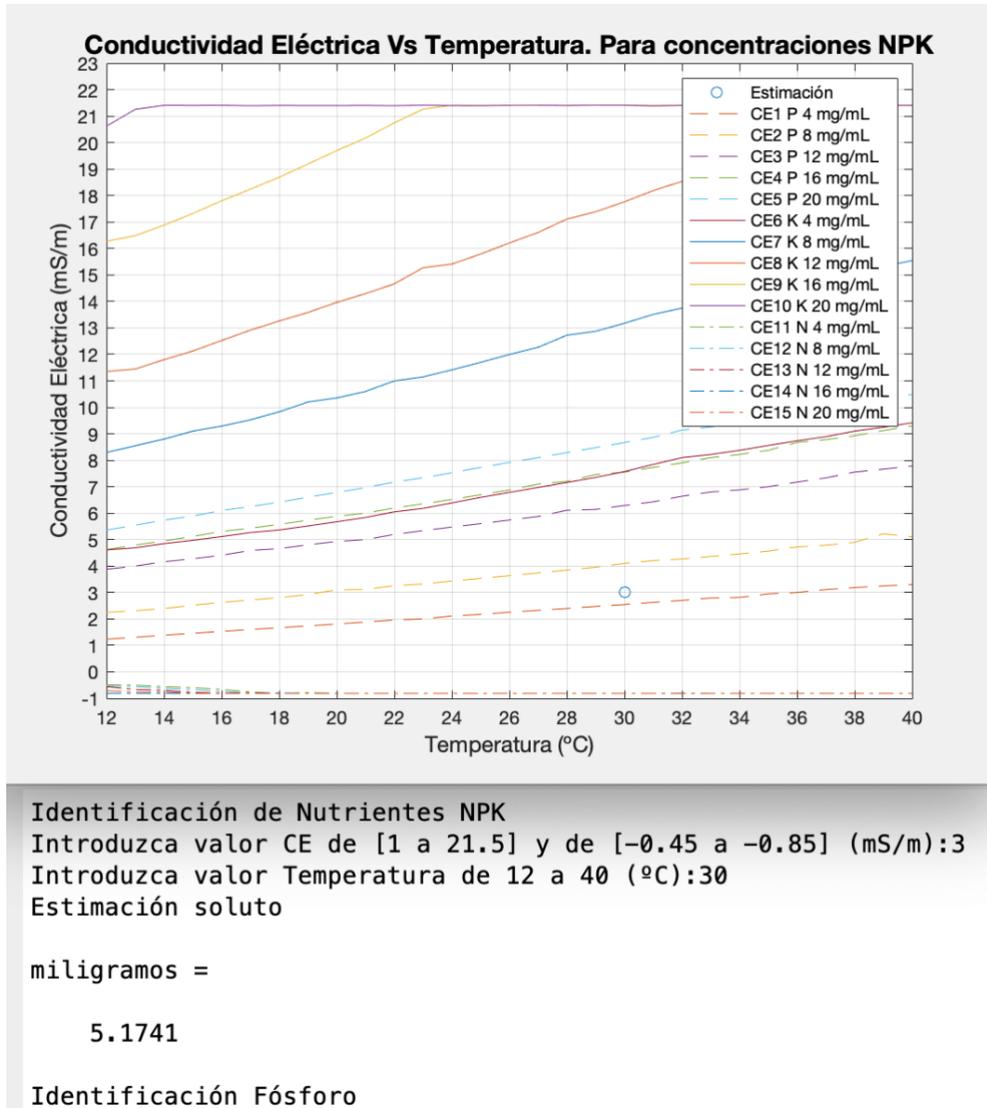
El modelo matemático ARX estima el comportamiento de la conductividad eléctrica para las concentraciones de la Figura 3-3 por encima del 92.62%.

### **3.4 Identificación de nutrientes en una solución por medio de la conductividad eléctrica y la temperatura**

La identificación de nutrientes en la solución, se realizó por medio de la caracterización de cada una de las concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL para nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) diluidos en agua destilada, los datos experimentales de conductividad eléctrica se exportaron del software de adquisición de datos Multilab, se descartaron datos espurios y se aplicaron filtros de medias móviles. Se realizó un programa en Matlab que permitió graficar de manera autocontenida el comportamiento de la conductividad eléctrica respecto a la temperatura de la disolución en un rango de 12°C a 40°C. Se identificó el nutriente y la cantidad de soluto, de acuerdo a los datos de conductividad eléctrica y temperatura ingresados por el usuario.

La caracterización del comportamiento de la conductividad eléctrica se realizó mediante la vectorización de cada valor de conductividad eléctrica respecto al rango de temperatura de la concentración. Mediante programación se recorrió cada una de las matrices y por interpolación lineal fue posible calcular la estimación de soluto y la identificación del nutriente. Ver Anexo A.

**Figura 3-4:** Programa computacional de identificación y estimación del nutriente en una solución.



La figura 3-4 indica la estimación de un soluto y su identificación de nutrientes, mediante los datos de conductividad eléctrica y temperatura ingresados por un usuario. Para este ejemplo el usuario ingreso el valor de conductividad eléctrica CE de 3 ms/m y el valor de temperatura de 30°C. El programa computacional identifico el nutriente de Fósforo (P) a una concentración de 5.1741 mg/mL.

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Teniendo en cuenta el primer objetivo específico planteado en el presente trabajo, se encontraron diferentes metodologías en la literatura para determinar la conductividad eléctrica en soluciones acuosas, siendo el método potenciométrico el más adecuado, debido a que relaciona la ecuación de flujo de Nernst Planck, de esa manera se logró estimar concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) al variar la temperatura en una disolución.

En la ecuación de Nernst Planck, al plantear el fenómeno de convección constante, mediante el acoplamiento de un agitador mecánico a la celda potenciométrica, se obtuvo disoluciones homogéneas, lo cual garantizó la reproducibilidad en las mediciones de conductividad eléctrica.

Por medio de una metodología experimental y basado en la norma técnica colombiana NTC 5596 Calidad del Suelo, se logró establecer que la mejor condición inicial, para las mediciones de los nutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), son las disoluciones mayores a 4 mg/mL a diferentes valores de temperatura, ya que a concentraciones inferiores, no se observa variación en las medidas de conductividad eléctrica.

El comportamiento del Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K), logró ser caracterizado, sometiendo los nutrientes a diferentes cambios de temperatura entre los 12°C y 40 °C, en disoluciones homogéneas a concentraciones constantes. Resultados que se pueden apreciar en la figura 2-6.

El modelamiento computacional, logró estimaciones superiores al 90% en el comportamiento de la conductividad eléctrica, para concentraciones de Potasio (K), Nitrógeno (N) y Fósforo (P). Mediante el modelo autorregresivo con variables exógenas ARX [4 4 1]. Estimaciones reflejadas gráficamente en las figuras 3-1, 3-2 y 3-3.

Se determinó que la conductividad eléctrica en el Nitrógeno (N), es inversamente proporcional a la temperatura de la disolución y la masa, debido a que a mayor temperatura y a mayor concentración, es menor la conductividad eléctrica. Resultados que se pueden apreciar en la gráfica de la Figura 3-5.

En el Fósforo (P) y el Potasio (K), el comportamiento de la conductividad eléctrica es directamente proporcional. A mayor temperatura y a mayor masa, aumenta el valor de la conductividad eléctrica. A mayor masa en una disolución de Fósforo (P) y de Potasio (K), su velocidad de respuesta de conductividad es más rápida. Comportamientos observables en la figura 3-6 y en la figura 2-10.

La caracterización de las conductividades eléctricas, para los nutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) con concentraciones de 4 mg/mL, 8 mg/mL, 12 mg/mL, 16 mg/mL y 20 mg/mL y temperatura variable, permitió generar gráficas autocontenidas y discriminantes. A través del diseño e implementación de un programa de simulación computacional en Matlab, se procesaron doscientos setenta mil (270.000) datos y por interpolación lineal se logró identificar la estimación de concentración y nutrientes de acuerdo a la conductividad eléctrica y la temperatura de una disolución.

Por medio del programa computacional implementado y al analizar las gráficas autocontenidas, se observa que el nutriente que presenta mayor conductividad eléctrica es el Potasio (K), comparado con el Fósforo (P) y el Nitrógeno (N). Lo anterior debido a que el Potasio (K) tiene un (1) electrón en su última capa de valencia, su radio atómico es de 243 pm y tiene la propiedad de ser un elemento electropositivo generando así el catión en solución con propiedades conductivas. Aunque el Fósforo (P) y el Nitrógeno (N) tienen cinco (5) electrones en su última capa de valencia, el Fósforo (P) tiene un radio atómico de 98 pm, el cual es mayor que el radio atómico del Nitrógeno (N), el cual es de 65 pm. Por lo tanto el Fósforo (P) tiene mayor conductividad eléctrica que el Nitrógeno (N). Por consiguiente, el orden de nutrientes de mayor a menor conductividad es el siguiente: Potasio (K), Fósforo (P) y Nitrógeno (N). La figura 2-6 muestra los valores y el comportamiento de la conductividad para todas las concentraciones.

## 4.2 Recomendaciones

Se proyecta como trabajo futuro, replicar la metodología empleada en este trabajo de investigación con el objetivo de medir y caracterizar el comportamiento de la conductividad eléctrica, para los nutrientes de Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Potasio (K) a un rango de concentraciones con incremento de 1 mg/mL, lo anterior con la finalidad de caracterizar un sistema más preciso que permita estimar concentraciones mixtas de nutrientes.



## A. Anexo: Programa de identificación de nutrientes y concentración.

```
%Programa para Identificar Nutrientes NPK

%Joan Sebastian Bustos
clear all;
close all;
clc;
disp('Identificación de Nutrientes NPK')

d1 = 'p28-Fósforo-200mg.xlsx';
FiltroCE1 = 900;
FiltroTsoll=200;
FiltroTamb1=150;
CE1=xlsread(d1,4,'O2:O12000');
FCE1= movmean(CE1,FiltroCE1);
Tsoll=xlsread(d1,4,'P2:P12000');
FTsoll= movmean(Tsoll,FiltroTsoll);
Tamb1=xlsread(d1,4,'Q2:Q12000');
FTamb1= movmean(Tamb1,FiltroTamb1);
TimeCE1=xlsread(d1,4,'N2:N12000');
a1=[TimeCE1,FTsoll];

d2 = 'p29-Fósforo-400mg.xlsx';
FiltroCE2 = 900;
FiltroTsol2=200;
FiltroTamb2=150;
CE2=xlsread(d2,4,'O2:O12000');
FCE2= movmean(CE2,FiltroCE2);
Tsol2=xlsread(d2,4,'P2:P12000');
FTsol2= movmean(Tsol2,FiltroTsol2);
Tamb2=xlsread(d2,4,'Q2:Q12000');
FTamb2= movmean(Tamb2,FiltroTamb2);
TimeCE2=xlsread(d2,4,'N2:N12000');
a2=[TimeCE2,FTsol2];

d3 = 'p30-Fósforo-600mg.xlsx';
FiltroCE3 = 900;
FiltroTsol3=600;
FiltroTamb3=150;
CE3=xlsread(d3,4,'O2:O12000');
FCE3= movmean(CE3,FiltroCE3);
Tsol3=xlsread(d3,4,'P2:P12000');
FTsol3= movmean(Tsol3,FiltroTsol3);
```

```
Tamb3=xlsread(d3,4,'Q2:Q12000');
FTamb3= movmean(Tamb3,FiltroTamb3);
TimeCE3=xlsread(d3,4,'N2:N12000');
a3=[TimeCE3,FTsol3];
```

```
d4 = 'p31-FoÅsforo-800mg.xlsx';
FiltroCE4 = 900;
FiltroTsol4=600;
FiltroTamb4=150;
CE4=xlsread(d4,4,'O2:O12000');
FCE4= movmean(CE4,FiltroCE4);
Tsol4=xlsread(d4,4,'P2:P12000');
FTsol4= movmean(Tsol4,FiltroTsol4);
Tamb4=xlsread(d4,4,'Q2:Q12000');
FTamb4= movmean(Tamb4,FiltroTamb4);
TimeCE4=xlsread(d4,4,'N2:N12000');
```

```
d5 = 'p32-FoÅsforo-1000mg.xlsx';
FiltroCE5 = 900;
FiltroTsol5=600;
FiltroTamb5=150;
CE5=xlsread(d5,4,'O2:O12000');
FCE5= movmean(CE5,FiltroCE5);
Tsol5=xlsread(d5,4,'P2:P12000');
FTsol5= movmean(Tsol5,FiltroTsol5);
Tamb5=xlsread(d5,4,'Q2:Q12000');
FTamb5= movmean(Tamb5,FiltroTamb5);
TimeCE5=xlsread(d5,4,'N2:N12000');
```

```
d6 = 'p19-Potasio-200mg.xlsx';
FiltroCE6 = 900;
FiltroTsol6=400;
FiltroTamb6=150;
CE6=xlsread(d6,4,'O2:O6000');
FCE6= movmean(CE6,FiltroCE6);
Tsol6=xlsread(d6,4,'P2:P6000');
FTsol6= movmean(Tsol6,FiltroTsol6);
Tamb6=xlsread(d6,4,'Q2:Q6000');
FTamb6= movmean(Tamb6,FiltroTamb6);
TimeCE6=xlsread(d6,4,'N2:N6000');
```

```
d7 = 'p22-Potasio-400mg.xlsx';
FiltroCE7 = 900;
FiltroTsol7=400;
FiltroTamb7=150;
CE7=xlsread(d7,4,'O2:O6000');
FCE7= movmean(CE7,FiltroCE7);
Tsol7=xlsread(d7,4,'P2:P6000');
FTsol7= movmean(Tsol7,FiltroTsol7);
Tamb7=xlsread(d7,4,'Q2:Q6000');
FTamb7= movmean(Tamb7,FiltroTamb7);
TimeCE7=xlsread(d7,4,'N2:N6000');
```

```
d8 = 'p20-Potasio-600mg.xlsx';
```

```
FiltroCE8 =900;
FiltroTsol8=400;
FiltroTamb8=150;
CE8=xlsread(d8,4,'O2:O6000');
FCE8= movmean(CE8,FiltroCE3);
Tsol8=xlsread(d8,4,'P2:P6000');
FTsol8= movmean(Tsol8,FiltroTsol8);
Tamb8=xlsread(d8,4,'Q2:Q6000');
FTamb8= movmean(Tamb8,FiltroTamb8);
TimeCE8=xlsread(d8,4,'N2:N6000');

d9 = 'p21-Potasio-800mg.xlsx';
FiltroCE9 = 900;
FiltroTsol9=400;
FiltroTamb9=150;
CE9=xlsread(d9,4,'O2:O6000');
FCE9= movmean(CE9,FiltroCE9);
Tsol9=xlsread(d9,4,'P2:P6000');
FTsol9= movmean(Tsol9,FiltroTsol9);
Tamb9=xlsread(d9,4,'Q2:Q6000');
FTamb9= movmean(Tamb9,FiltroTamb9);
TimeCE9=xlsread(d9,4,'N2:N6000');

d10 = 'p18-Potasio-1000mg.xlsx';
FiltroCE10 = 900;
FiltroTsol10=400;
FiltroTamb10=500;
CE10=xlsread(d10,4,'O2:O6000');
FCE10= movmean(CE10,FiltroCE10);
Tsol10=xlsread(d10,4,'P2:P6000');
FTsol10= movmean(Tsol10,FiltroTsol10);
Tamb10=xlsread(d10,4,'Q2:Q6000');
FTamb10= movmean(Tamb10,FiltroTamb10);
TimeCE10=xlsread(d10,4,'N2:N6000');

d11 = 'p23-Nitr√≥geno-200mg.xlsx';
FiltroCE11 = 900;
FiltroTsol11=900;
FiltroTamb11=900;
CE11=xlsread(d11,4,'O2:O6000');
FCE11= movmean(CE11,FiltroCE11);
Tsol11=xlsread(d11,4,'P2:P6000');
FTsol11= movmean(Tsol11,FiltroTsol11);
Tamb11=xlsread(d11,4,'Q2:Q6000');
FTamb11= movmean(Tamb11,FiltroTamb11);
TimeCE11=xlsread(d11,4,'N2:N6000');

d12 = 'p24-Nitr√≥geno-400mg.xlsx';
FiltroCE12 = 900;
FiltroTsol12=900;
FiltroTamb12=150;
CE12=xlsread(d12,4,'O2:O6000');
FCE12= movmean(CE12,FiltroCE12);
Tsol12=xlsread(d12,4,'P2:P6000');
FTsol12= movmean(Tsol12,FiltroTsol12);
Tamb12=xlsread(d12,4,'Q2:Q6000');
```

```

FTamb12= movmean(Tamb12,FiltroTamb12);
TimeCE12=xlsread(d12,3,'N2:N6000');

d13 = 'p25-Nitr√≥geno-600mg.xlsx';
FiltroCE13 = 900;
FiltroTsol13=900;
FiltroTamb13=150;
CE13=xlsread(d13,4,'O2:O6000');
FCE13= movmean(CE13,FiltroCE13);
Tsol13=xlsread(d13,4,'P2:P6000');
FTsol13= movmean(Tsol13,FiltroTsol13);
Tamb13=xlsread(d13,4,'Q2:Q6000');
FTamb13= movmean(Tamb13,FiltroTamb13);
TimeCE13=xlsread(d13,4,'N2:N6000');

d14 = 'p26-Nitr√≥geno-800mg.xlsx';
FiltroCE14 = 900;
FiltroTsol14=900;
FiltroTamb14=150;
CE14=xlsread(d14,4,'O2:O6000');
FCE14= movmean(CE14,FiltroCE14);
Tsol14=xlsread(d14,4,'P2:P6000');
FTsol14= movmean(Tsol14,FiltroTsol14);
Tamb14=xlsread(d14,4,'Q2:Q6000');
FTamb14= movmean(Tamb14,FiltroTamb14);
TimeCE4=xlsread(d14,4,'N2:N6000');

d15 = 'p27-Nitr√≥geno-1000mg.xlsx';
FiltroCE15 = 900;
FiltroTsol15=900;
FiltroTamb15=150;
CE15=xlsread(d15,4,'O2:O6000');
FCE15= movmean(CE15,FiltroCE15);
Tsol15=xlsread(d15,4,'P2:P6000');
FTsol15= movmean(Tsol15,FiltroTsol15);
Tamb15=xlsread(d15,4,'Q2:Q6000');
FTamb15= movmean(Tamb15,FiltroTamb15);
TimeCE15=xlsread(d15,4,'N2:N6000');

CE=input('Introduzca valor CE de [1 a 21.5] y de [-0.45 a -0.85]
(mS/m):');
TCE=input('Introduzca valor Temperatura de 12 a 40 (°C):');

pos_vectorTsol1= find(Tsol1==TCE);
pos_vectorTsol2= find(Tsol2==TCE);
pos_vectorTsol3= find(Tsol3==TCE);
pos_vectorTsol4= find(Tsol4==TCE);
pos_vectorTsol5= find(Tsol5==TCE);
pos_vectorTsol6= find(Tsol6==TCE);
pos_vectorTsol7= find(Tsol7==TCE);
pos_vectorTsol8= find(Tsol8==TCE);
pos_vectorTsol9= find(Tsol9==TCE);
pos_vectorTsol10= find(Tsol10==TCE);
pos_vectorTsol11= find(Tsol11==TCE);
pos_vectorTsol12= find(Tsol12==TCE);

```

```

pos_vectorTsol13= find(Tsol13==TCE);
pos_vectorTsol14= find(Tsol14==TCE);
pos_vectorTsol15= find(Tsol15==TCE);

valorTsol1= Tsol1(pos_vectorTsol1);
valorTsol2= Tsol2(pos_vectorTsol2);
valorTsol3= Tsol3(pos_vectorTsol3);
valorTsol4= Tsol4(pos_vectorTsol4);
valorTsol5= Tsol5(pos_vectorTsol5);
valorTsol6= Tsol6(pos_vectorTsol6);
valorTsol7= Tsol7(pos_vectorTsol7);
valorTsol8= Tsol8(pos_vectorTsol8);
valorTsol9= Tsol9(pos_vectorTsol9);
valorTsol10= Tsol10(pos_vectorTsol10);
valorTsol11= Tsol11(pos_vectorTsol11);
valorTsol12= Tsol12(pos_vectorTsol12);
valorTsol13= Tsol13(pos_vectorTsol13);
valorTsol14= Tsol14(pos_vectorTsol14);
valorTsol15= Tsol15(pos_vectorTsol15);

valorCE1= CE1 (pos_vectorTsol1);
valorCE2= CE2 (pos_vectorTsol2);
valorCE3= CE3 (pos_vectorTsol3);
valorCE4= CE4 (pos_vectorTsol4);
valorCE5= CE5 (pos_vectorTsol5);
valorCE6= CE6 (pos_vectorTsol6);
valorCE7= CE7 (pos_vectorTsol7);
valorCE8= CE8 (pos_vectorTsol8);
valorCE9= CE9 (pos_vectorTsol9);
valorCE10= CE10 (pos_vectorTsol10);
valorCE11= CE11 (pos_vectorTsol11);
valorCE12= CE12 (pos_vectorTsol12);
valorCE13= CE13 (pos_vectorTsol13);
valorCE14= CE14 (pos_vectorTsol14);
valorCE15= CE15 (pos_vectorTsol15);

if CE<=valorCE11 & CE>=valorCE15
    incrsalto= valorCE15-valorCE11;%incremento ...salto 200
    incre=CE-valorCE11;
    regladetres= (incre*200)/incrsalto;
    Estimacion_miligramos= regladetres+200 %el número es el limite
inferior
    disp('Identificaci√n de Nitr√geno')
elseif CE<valorCE1 & CE>=0
    disp('Rango sin caracterizar')
elseif CE>=valorCE1 & CE<=valorCE2
    incrsalto= valorCE2-valorCE1;%incremento ...salto 200
    incre=CE-valorCE1;
    regladetres= (incre*200)/incrsalto;
    disp('Estimaci√n soluto')
    miligramos = regladetres+200 %el número es el limite inferior
    disp('Identificaci√n FV√sforo')
elseif CE>=valorCE2 & CE<=valorCE3
    incrsalto= valorCE3-valorCE2;%incremento ...salto 200
    incre=CE-valorCE2;
    regladetres= (incre*200)/incrsalto;

```

```

disp('Estimación soluto')
miligramos = regladetres+400
disp('Identificación FV≥sforo')
elseif CE>=valorCE3 & CE<=valorCE4 %Mixto
incrsalto= valorCE4-valorCE3;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE3;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
disp('Identificación de Potasio y FV≥sforo')
elseif CE>=valorCE4 & CE<=valorCE5
incrsalto= valorCE4-valorCE5;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE4;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
% miligramos = regladetres+800 %el número es el limite inferior
disp('Identificación de Potasio y FV≥sforo')
elseif CE>=valorCE6 & CE<=valorCE7 %Mixto
incrsalto= valorCE7-valorCE6;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE6;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
% miligramos_potasio = regladetres+200 %el número es el limite
inferior
disp('Identificación de Potasio y FV≥sforo')
elseif CE>valorCE7 & CE<=valorCE8
incrsalto= valorCE8-valorCE7;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE7;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
miligramos = regladetres+400 %el número es el limite inferior
disp('Identificación de Potasio')
elseif CE>valorCE8 & CE<=valorCE9
incrsalto= valorCE9-valorCE8;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE8;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
miligramos = regladetres+600 %el número es el limite inferior
disp('Identificación de Potasio')
elseif CE>valorCE9 & CE<=valorCE10
incrsalto= valorCE10-valorCE9;%incremento ...salto 200
incre=CE-valorCE9;
regladetres= (incre*200)/incrsalto;
disp('Estimación soluto')
miligramos = regladetres+800 %el número es el limite inferior
disp('Identificación de Potasio')
else
disp('Valores fuera del rango')
end

plot(TCE,CE,'o');
hold on
plot(Tsol1,CE1,'--');
plot(Tsol2,CE2,'--');
plot(Tsol3,CE3,'--');
plot(Tsol4,CE4,'--');
plot(Tsol5,CE5,'--');

```

```
plot(Tsol6,CE6,'-');
plot(Tsol7,CE7,'-');
plot(Tsol8,CE8,'-');
plot(Tsol9,CE9,'-');
plot(Tsol10,CE10,'-');
plot(Tsol11,CE11,'-.');
plot(Tsol12,CE12,'-.');
plot(Tsol13,CE13,'-.');
plot(Tsol14,CE14,'-.');
plot(Tsol15,CE15,'-.');
hold off
legend('Estimaci√≥n','CE1 P 200mg',' CE2 P 400mg','CE3 P 600mg', 'CE4 P
800mg', 'CE5 P 1000mg','CE6 K 200mg','CE7 K 400mg','CE8 K 600mg', 'CE9 K
800mg', 'CE10 K 1000mg','CE11 N 200mg','CE12 N 400mg','CE13 N
600mg','CE14 N 800mg','CE15 N 1000mg')
grid on
title('Conductividad El√©ctrica Vs Identificaci√≥n NPK','FontSize',14)
xlabel('Temperatura (√°C)','FontSize',12)
ylabel('Conductividad El√©ctrica (mS/m)','FontSize',12)
ylim([-1 23]);
yticks([-1:1:24]);
xlim([12 40]);
xticks([12:2:40]);
```



## B. Anexo: Programa de estimación modelo computacional.

```
clear all;
close all;
clc;
d1 = 'p19-Potasio-200mg.xlsx';
FiltroCE1 = 90;
FiltroTsoll=40;
FiltroTamb1=15;
CE1=xlsread(d1,3,'O2:O4255');
FCE1= movmean(CE1,FiltroCE1);
Tsoll=xlsread(d1,3,'P2:P4255');
FTsoll= movmean(Tsoll,FiltroTsoll);
Tamb1=xlsread(d1,3,'Q2:Q4255');
FTamb1= movmean(Tamb1,FiltroTamb1);
TimeCE1=xlsread(d1,3,'N2:N4255');
datos=[FTsoll];
tam=length(FTsoll)
datos_ident=[FCE1(1:4254) FTsoll(1:4254)];
tamident=length(datos_ident)
datos_val=[FCE1(32:4254) FTsoll(32:4254)];
tamval=length(datos_val)
idplot(datos_ident); % Visualiza los datos de identificaci√n sin
tendencia lineal.
idplot(datos_val); % Visualiza los datos de validaci√n sin tendencia
linea
th=arx(datos_ident,[4 4 1])% Aplicaci√n del modelo posible
thn=sett(th,1); % Representaci√n del modelo en t√rminos de q-1, con el
tiempo de muestreo del sistema
present(thn); %Presenta el modelo obtenido en q-1.
[numd1,dend1]=th2tf(thn); % Transforma los polinomios en format q-1 en
expresiones numerador y denominador. Presenta cada coeficiente de los
polinomios obtenido
roots(dend1); % Se encuentran las ra√ces del polinomio denominador para
ubicaci√n de los polos
compare(datos_val,thn) % Compara los datos de validaci√n con el modelo
obtenido. En la gr√fica obtenida se muestra una comparaci√n entre las
salidas de los modelos simulados y la salida medida cuando son aplicados
los datos de validaci√n
```

```
writematrix(datos_val, 'p19-Potasio-  
200mg.xlsx', 'sheet', 'hoja5', 'Range', 'O2')
```

## C. Bibliografía

- [1] Portafolio.co, “El problema de agro no es el costo de insumos,” 2013. <http://m.portafolio.co/negocios/fedearroz-afirma-que-problema-agro-no-es-costo-insumos/?tamano=grande> (accessed Nov. 23, 2015).
- [2] Ocean Business, “Agro tecnologías de Israel para solventar los retos de la agricultura global,” 2014. <http://oceanbusiness.com.es/agro-tecnologias-de-israel-para-solventar-los-retos-de-la-agricultura-global/> (accessed Nov. 24, 2015).
- [3] Acuña John Fabio, “UNPeriodico: El agro también debe cultivar la innovación,” *El agro también debe cultivar la innovación*, 2013. <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/el-agro-tambien-debe-cultivar-la-innovacion.html> (accessed Nov. 18, 2015).
- [4] Alzate Ramírez Jorge A., “Evaluación general de la salinidad y modelación de los riesgos de salinización en suelos del Valle del Cauca. Uso práctico del modelo PLA para evaluar el riesgo de salinización en tierras bajo riego en la parte plana del Valle del Cauca (Colombia),” *Fac. Ciencias Agropecu.*, vol. Magister e, 2011.
- [5] A. R. Canales and J. M. M. Martínez, *Automatización y telecontrol de sistemas de riego*. Marcombo, 2010.
- [6] Gat Fertilíquidos, “Salinidad En Cultivos Agrícolas.” 2010, [Online]. Available: [http://www.gatfertiliquidados.com/salinidad\\_cultivos.pdf](http://www.gatfertiliquidados.com/salinidad_cultivos.pdf).
- [7] B. G. E. and G. M. J. George, “Time Series Analysis, Forecasting and Control,” *A Very Br. Aff.*, pp. 469–471, 1976, doi: 10.1057/9781137291264\_6.
- [8] J. Park, W. woo Jeon, and H. Choo, “Effects of pore fluid type and ionic concentration on electrical conductivity of granular mixtures of electrically conductive graphite and nonconductive sand,” *Powder Technol.*, vol. 392, pp. 286–295, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.060.
- [9] M. Simón, N. Peralta, and J. Costa, “Relación entre la conductividad eléctrica aparente con propiedades del suelo y nutrientes,” 2013, Accessed: Apr. 30, 2019. [Online]. Available: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/3323>.

- [10] J. Kijne, *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement. Water Productivity under Saline Conditions*. CABI, 2013.
- [11] K. Malek, K. Malek, and F. Khanmohammadi, "Response of soil thermal conductivity to various soil properties," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 127, no. August, p. 105516, 2021, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105516.
- [12] Q. Niu, D. Fratta, and Y.-H. Wang, "The use of electrical conductivity measurements in the prediction of hydraulic conductivity of unsaturated soils," *J. Hydrol.*, vol. 522, pp. 475–487, 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.055.
- [13] A. M. Rodríguez, R. R. Pérez, and A. P. Sendín, "Influencia de la frecuencia de excitación y la distancia entre enrollados durante el sensoramiento de la conductividad eléctrica del suelo mediante un campo magnético variable Influence of the excitement frequency and the distance among coils during sensi," vol. 19, no. 4, pp. 17–23, 2010.
- [14] A. M. Rodríguez, R. Rodríguez, and A. Pérez, "Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable Sensing of soil compaction by means of a variable magnetic field," *Ciencias Técnicas Agropecu.*, vol. 20, no. 1, pp. 25–30, 2011.
- [15] R. M. R. González, "ESTIMACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN SUELOS VOLCÁNICOS MEDIANTE MÉTODOS DIELECTRICOS," pp. 1–4, 2005.
- [16] NTC 5596, "Calidad del Agua. Determinación de la Conductividad Eléctrica," in *NTC 5596*, 1998th-10th–28th ed., 1998, pp. 1–14.
- [17] Polanco Manuel Francisco, "Presentacion\_CIAB-Quibdo-25-03-14." 2014.
- [18] UNAD-CIAB, "UNAD CIAB - Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología," 2014. <http://estudios.unad.edu.co/ciab-centro-de-investigacion-de-agricultura-y-biotecnologia?showall=1&limitstart=> (accessed Nov. 24, 2015).
- [19] C. G. Rodríguez, C. M. Losada, and S. G. Barros, "El modelo de nutrición vegetal a través de la historia y su importancia para la enseñanza," vol. 11, no. 1, pp. 2–12, 2014.
- [20] T. J. Lewis, "The basic processes of conduction in dielectric liquids," 1993.
- [21] L. Hernández, "Formas de transporte al electrodo," *Electroquímica Apl. al análisis compuestos y reacciones.*, 2009, [Online]. Available: [https://www.uam.es/personal\\_pdi/ciencias/lhh345a/](https://www.uam.es/personal_pdi/ciencias/lhh345a/).
- [22] V. M. Aguilera, S. Mafé, and J. Pellicer, *Descripción de los procesos de transporte en disoluciones de electrolitos: modelo fenomenológico basado*

- en las ecuaciones de Nerst-Planck*. EDITUM, 1989.
- [23] Universidad de Valencia, “Fenomenos de Transporte,” in *Tema 4*, p. 464.
- [24] R. F. Probstein, “Solutions of Electrolytes,” in *Physicochemical Hydrodynamics*, Elsevier, 1989, pp. 161–200.
- [25] A. Baeza and A. García, “Principios de electroquímica analítica,” in *Principios de Electroquímica Analítica*, Mexico: Universidad Nacional Autónoma de Mexico, 2011, pp. 1–77.
- [26] M. González, “Estudio de las Ecuaciones de Poisson-Nernst-Planck y algunas de sus aplicaciones,” Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, 2011.
- [27] S. Gutman, “Simulación del transporte iónico en electrodeposición de celda delgada en medios altamente viscosos,” Universidad de Buenos Aires, 2007.
- [28] M. Bazant, “V . Electrostatics Lecture 24 : Diffuse Charge in Electrolytes,” Massachusetts Institute of Technology, Ed. 2011, pp. 1–9.
- [29] M. kato, “Numerical Analysis of the Nernst-Planck-Poisson System,” *J. theor. Biol*, pp. 299–304, 1995.
- [30] S. Coco, D. Gazzo, A. Laudani, and G. Pollicino, “A 3-D Finite Element Poisson – Nernst – Planck Model for the Analysis of Ion Transport Across Ionic Channels,” vol. 43, no. 4, pp. 1461–1464, 2007.
- [31] Q. Zhang, S. Gui, H. Li, and B. Lu, “Model reduction-based initialization methods for solving the Poisson-Nernst-Planck equations in three-dimensional ion channel simulations,” *J. Comput. Phys.*, vol. 419, p. 109627, 2020, doi: 10.1016/j.jcp.2020.109627.
- [32] L. M. San Miguel, “3 . 5 : Modelo de Conducción Eléctrica . Gas de Electrones,” in *Fundamentos físicos de la informática y las comunicaciones*, Madrid, 2001, p. 87.
- [33] C. Gómez, R. González, and R. Viruela, “Conductividad De Las Disoluciones Electrolíticas,” *Conductividad-electrolitos*, no. 3, pp. 1–8, 2009, [Online]. Available: [ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo\\_conductividad\\_nuevo.pdf](http://ocw.uv.es/ciencias/1-1/teo_conductividad_nuevo.pdf).
- [34] H. Choo, J. Park, T. T. Do, and C. Lee, “Estimating the electrical conductivity of clayey soils with varying mineralogy using the index properties of soils,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 217, no. December 2021, p. 106388, 2022, doi: 10.1016/j.clay.2021.106388.
- [35] C. Hering, “Electrolytic Conduction without Electrodes,” pp. 309–315, 1902.
- [36] Bazant, “Lecture 24 : Diffuse Charge in Electrolytes,” *MIT OpenCourseWare*, pp. 1–9, 2011, [Online]. Available:

- <http://ocw.mit.edu/courses/chemical-engineering/10-626-electrochemical-energy-systems-spring-2011/lecture-notes/>.
- [37] D. A. Skoog, F. J. Holler, and T. A. Nieman, *Principios de análisis instrumental*, Sexta. McGraw-Hill, 2008.
- [38] W. Chaisrirattanakua *et al.*, “Modification of polyvinyl chloride ion-selective membrane for nitrate ISFET sensors,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 512, no. October 2019, p. 145664, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145664.
- [39] U. Lehmann and A. Grisel, “Miniature multisensor probe for soil nutrient monitoring,” *Procedia Eng.*, vol. 87, pp. 1429–1432, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.713.
- [40] M. Joly, L. Mazenq, M. Marlet, P. Temple-Boyer, C. Durieu, and J. Launay, “All-solid-state multimodal probe based on ISFET electrochemical microsensors for in-situ soil nutrients monitoring in agriculture,” *TRANSDUCERS 2017 - 19th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, pp. 222–225, 2017, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2017.7994028.
- [41] J. F. V. Pérez, M. M. M. Velasco, M. E. M. Rosas, and H. L. M. Reyes, “ISFET sensor characterization,” *Procedia Eng.*, vol. 35, pp. 270–275, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.04.190.
- [42] J. V. Sinfield, D. Fagerman, and O. Colic, “Evaluation of sensing technologies for on-the-go detection of macro-nutrients in cultivated soils,” *Comput. Electron. Agric.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–18, 2010, doi: 10.1016/j.compag.2009.09.017.
- [43] J. O. Bockris and A. K. N. Reddy, *Electroquímica moderna, Volume 2*. Reverte, 1979.
- [44] B. Hille, “Ion Channel Excitable Membranes,” *Sunderland Massachusetts USA*. pp. 1–37, 2001, doi: 10.1007/3-540-29623-9\_5640.
- [45] M. P. González-Casimiro, *Análisis de series temporales: Modelos ARIMA*. 2009.
- [46] G. J. Aguado-Rodríguez, A. Quevedo-Nolasco, M. Castro-Popoca, R. Arteaga-Ramírez, M. A. Vázquez-Peña, and B. P. Zamora-Morales, “Predicción de variables meteorológicas por medio de modelos ARIMA,” *Agrociencia*, vol. 50, no. 1, pp. 1–13, 2016.
- [47] Rob J. Hyndman and Yeasmin Khandakar, “Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R,” *J. Stat. Softw.*, vol. 27, no. 3, p. 22, 2008, [Online]. Available: <http://www.jstatsoft.org/v27/i03/paper>.
- [48] A. Rojano-aguilar and W. Ojeda-bustamante, “Modelos arx para predecir la

- temperatura del aire de un invernadero: una metodología,” pp. 181–192, 2007.
- [49] C. G. Lemus, “Estimación de modelos lineales para el control predictivo de pequeñas centrales hidroeléctricas,” pp. 63–78, 2012.
- [50] L. Cheng, A. Cigada, Z. Lang, E. Zappa, and Y. Zhu, “An output-only ARX model-based sensor fusion framework on structural dynamic measurements using distributed optical fiber sensors and fiber Bragg grating sensors,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 152, p. 107439, 2021, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.107439.
- [51] J. Wang and Z. Yong-hong, “Model reduction for identification of ARX models,” pp. 2093–2098, 2012.
- [52] K. S. Rani, “Modeling a MIMO System with an ARX model and input-output data with noise,” pp. 620–624, 2015.