



# EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DE PLÁTANO MEDIANTE UNA RED DE SENSORES Y LÓGICA DIFUSA

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

PRESENTA:

ING. HÉCTOR MORALES RUBALCAVA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. NOEL GARCÍA DÍAZ

CO-DIRECTOR:

DR. JESÚS ALBERTO VERDUZCO RAMÍREZ

VILLA DE ÁLVAREZ, COLIMA 14 DE AGOSTO DE 2020.





# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Colima

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Villa de Álvarez, Colima, **4/Septiembre/2020**  
Oficio No. DEPI 1.2.11/116/2020

**ALUMNO MORALES RUBALCAVA HÉCTOR  
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES  
PRESENTE**

La División de Estudios de Posgrado e Investigación de acuerdo al procedimiento para la obtención del Título de Maestría de los Institutos Tecnológicos y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la comisión revisora hizo a su trabajo profesional denominado **"EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DE PLÁTANO MEDIANTE UNA RED DE SENSORES Y LÓGICA DIFUSA"**, por la opción de tesis, que para obtener el grado de Maestro en Sistemas Computacionales será presentado por Usted, tiene a bien concederle la **AUTORIZACIÓN** de impresión de la tesis citada.

Sin otro particular por el momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial y afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**  
**Excelencia en Educación Tecnológica®**

**RAMONA EVELIA CHÁVEZ VALDEZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



SEP - TecNM  
INSTITUTO TECNOLÓGICO  
De Colima  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

RECV/cas

C.p. Archivo.



Av. Tecnológico No. 1, Villa de Álvarez, Col., C.P. 28976  
Tel. 01 (312) 314 0933, 314 0683, 312 6393, 312 9920  
[www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx) | [www.colima.tecnm.mx](http://www.colima.tecnm.mx)



# Agradecimientos

Le agradezco a mi esposa Maribel por su apoyo y experiencias invaluable a lo largo de estos casi ocho años (parecen menos) y por brindarme la experiencia extraordinaria de ser papá. *Te amo Melissa Noelia.*

A mis papás Héctor y Mercedes, porque con su apoyo he logrado muchas metas; han estado presentes en cada etapa importante en mi vida y seguirán estando por siempre dondequiera que vaya.

Mi hermana es alguien que siempre está para mí. Aunque los quehaceres y deberes a veces hacen distancia el cariño que te tengo no sabe de eso Mariana.

Por todos sus consejos, pero principalmente por su amistad bien correspondida, a mi amigo Carlos Torres.

Gracias a mi director de tesis y amigo, el doctor Noel García Díaz por todo el apoyo brindado e invaluable lecciones de vida.

A todos los maestros que me estuvieron acompañando en esta etapa tan importante y que me aportaron conocimientos y experiencias valiosas a nivel intelectual y personal. Patricia, Jesús Alberto, Evelia, Nicandro, Reyes; gracias, de todos llevo un bonito recuerdo.

Un gusto Víctor, Fernando, Martín, David, Isis, Joshua, Joel, Adán, Juanmi, Alex, Ismael, Juande, Marco, Gabriel, Braulio y Carlos, de todos aprendí algo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a todos los que forman parte del equipo de posgrado y del Instituto Tecnológico de Colima por brindarme la posibilidad de seguirme preparando profesionalmente.

# Resumen

La agricultura es una actividad vital que contribuye a garantizar la seguridad alimentaria mundial a través de la producción de una gran variedad de cultivos, dentro de los cuales el plátano es un fruto de amplio consumo que representa el sustento económico de cientos de familias; sin embargo, para lograr una buena producción, se necesita que el agua de riego sea de buena calidad, por lo que es importante para el agricultor monitorear el agua, sin que esto represente una merma importante en su economía. No obstante, la mayoría de los equipos disponibles en el mercado son complejos y requieren de una inversión considerable, razón por la cual, en este proyecto se investigaron los parámetros del agua de riego más significativos para la planta y que pueden obtenerse con equipos de bajo costo, con lo cual se desarrolló un sistema automatizado que evalúa la calidad agronómica del agua mediante un sistema de inferencia difuso generado con base en las características de los parámetros de interés, capaz de transmitir la información desde el lugar de medición hasta el ordenador de consulta sin la necesidad de una conexión de internet. Dicho sistema representa una alternativa de bajo costo e innovadora que contribuye a mejorar la producción del plátano, brindándole al productor información oportuna que le permita tomar las medidas necesarias de prevención o corrección en su cultivo, evitando así la merma del mismo.

**Palabras Clave:** Lógica Difusa, Sensores, Plátano.

# Abstract

Agriculture is a vital activity that contributes to guaranteeing world food security through the production of a great variety of crops, among which, the banana is a fruit of wide consumption that represents the economic sustenance of hundreds of families. However, to achieve a good production, the irrigation water should have good quality, so it is important for the farmer to monitor the water, without this representing a significant decrease in their economy. However, most of the equipment available on the market is complex and requires considerable investment, which is why, in this project, the most significant parameters of irrigation water for the plant were investigated, and can be obtained with low-cost equipment, with which an automated system was developed that evaluates the agronomic quality of the water by means of a diffuse inference system generated based on the characteristics of the parameters of interest, capable of transmitting the information from the measurement site to the query computer without the need for an internet connection. This system represents a low-cost and innovative alternative that contributes to improving the production of bananas, providing to the producer a timely information that allows him to take the necessary preventive measures or correction to prevent deterioration of the crop.

**Keywords:** Fuzzy Logic, Sensors, Banana.

# Índice

Agradecimientos .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract .....	iv
Índice .....	v
Índice de figuras .....	viii
CAPÍTULO 1 .....	1
Introducción .....	1
1.1 La naturaleza del problema .....	2
1.2 El contexto del problema .....	6
1.3 Revisión de la literatura .....	8
1.4 Propuesta de solución .....	11
1.5 Justificación .....	13
1.6 Objetivos .....	14
1.7 Hipótesis .....	14
1.8 Métodos y herramientas .....	15
1.9 Beneficios esperados .....	16
1.10 Organización del documento .....	17
CAPITULO 2 .....	19
Estado del campo del conocimiento .....	19
2.1 Marco histórico .....	19
2.2 Marco contextual .....	25
2.3 Marco teórico .....	32
CAPÍTULO 3 .....	43

Métodos Empleados .....	43
3.1 Tipo de investigación.....	43
3.2 Investigación preliminar .....	44
3.3 Análisis de requerimientos .....	45
3.4 Planeación.....	46
3.5 Diseño .....	47
3.6 Construcción .....	50
3.7 Implementación .....	52
3.8 Pruebas .....	53
3.9 Documentación .....	54
CAPÍTULO 4 .....	55
Desarrollo del Prototipo .....	55
4.1 Análisis.....	55
4.2 Adquisición de los parámetros .....	56
4.3 Comunicación de los datos .....	75
4.4 Almacenamiento de la información .....	82
4.5 Procesamiento de la información .....	82
4.6 Presentación de la información .....	89
CAPÍTULO 5 .....	92
Resultados obtenidos .....	92
5.1 Modelo difuso .....	92
5.2 Equipo de medición .....	95
5.3 Implementación en campo .....	97
5.4 Discusión de resultados .....	98
CAPÍTULO 6 .....	99

Conclusiones y trabajo futuro .....	99
Referencias Bibliográficas.....	101
Apéndice A.....	108
Cronograma de actividades.....	108
Apéndice B.....	109
Componentes del sistema de monitoreo .....	109
Anexo 1.....	110
Prueba de funcionamiento de los XBee.....	110
Anexo 2.....	112
Script de la implementación.....	112
Anexo 3.....	115
Manual del usuario .....	115
¿Qué es?.....	115
Funcionalidades .....	115
Precauciones y recomendaciones.....	116
Puesta en marcha .....	117
Solución de problemas .....	118



# Índice de figuras

Figura 1.1 Ubicación de la parcela de plátano. Obtenida de: <a href="http://www.google.com/earth/">www.google.com/earth/</a> .	6
Figura 1.2 Estructura del sistema.	12
Figura 2.1 Vasos de la laguna de Cuyutlán. Obtenida de (Lara, 2012).	30
Figura 2.2 Placa electrónica Arduino UNO. Obtenida de pixabay.com.	39
Figura 2.3 Radio XBee. Obtenida de (DIGI, 2018).	40
Figura 2.4 Estructura de la trama del modo API. Obtenida de (Oyarce, 2008).	42
Figura 3.1 Modelo en cascada para el desarrollo del proyecto. “Elaboración propia”.	44
Figura 3.2 Sección hidráulica principal.	47
Figura 3.3 Diseño del módulo de obtención. “Elaboración propia”.	49
Figura 3.4 Caja Nema IP65.	49
Figura 3.5 Carcasa del módulo de medición.	51
Figura 3.6 Conexión interna del módulo de medición.	52
Figura 3.7 Instalación del módulo de medición.	53
Figura 4.1 Conexión de calibración para sonda de pH. Obtenida de: (Atlas Scientific, 2002)	57
Figura 4.2 Calibración de la sonda de pH.	58
Figura 4.3 Mediciones de pH previas a la calibración.	59
Figura 4.4 Calibración del primer punto de la sonda de pH.	60
Figura 4.5 Mediciones de pH previas a la calibración del primer punto.	60
Figura 4.6 Mediciones de pH una vez calibrado el primer punto.	61
Figura 4.7 Calibración del segundo punto de la sonda de pH.	62
Figura 4.8 Mediciones de pH previas a la calibración del segundo punto.	62
Figura 4.9 Mediciones de pH una vez calibrado el segundo punto.	63
Figura 4.10 Mediciones de pH previas a la calibración del tercer punto.	63
Figura 4.11 Mediciones de pH una vez calibrado el tercer punto.	64
Figura 4.12 Mediciones de pH posteriores a la calibración.	64

Figura 4.13 Conexión para calibración para sonda de CE. Obtenida de: (Atlas Scientific, 2019)	65
Figura 4.14 Calibración de la sonda de CE.	65
Figura 4.15 Mediciones de CE previas a la calibración.	66
Figura 4.16 Mediciones de CE previas a la calibración del primer punto.	67
Figura 4.17 Mediciones de CE una vez calibrado el primer punto.	68
Figura 4.18 Mediciones de CE previas a la calibración del segundo punto.	68
Figura 4.19 Mediciones de CE una vez calibrado el segundo punto.	69
Figura 4.20 Calibración de la sonda de temperatura.	71
Figura 4.21 Mediciones de temperatura previas a la calibración.	71
Figura 4.22 Calibración de la sonda de temperatura. “Elaboración propia”.	72
Figura 4.23 Mediciones de temperatura posteriores a la calibración. “Elaboración propia”.	73
Figura 4.24 Conexión I2C del nodo de sensores. “Elaboración propia”.	75
Figura 4.25 Librería para la generación de tramas.	79
Figura 4.26 Definición del FIS. “Elaboración propia”.	83
Figura 4.27 Definición de la entrada CE. “Elaboración propia”.	84
Figura 4.28 Definición de la entrada PH. “Elaboración propia”.	85
Figura 4.29 Definición de la salida CALIDAD. “Elaboración propia”.	86
Figura 4.30 Toma de mediciones en una muestra de agua.	87
Figura 4.31 Interfaz de Parámetros Actuales. “Elaboración propia”.	89
Figura 4.32 Interfaz de gráficos de los parámetros. “Elaboración propia”.	90
Figura 4.33 Tabla de datos recopilados. “Elaboración propia”.	90
Figura 4.34 Conexión del módulo I2C con la pantalla LCD. “Elaboración propia”.	91
Figura 5.1 Superficie de salida del FIS. “Elaboración propia”.	92
Figura 5.2 Visualizador de reglas del FIS. “Elaboración propia”.	95
Figura 5.3 Vista exterior del módulo de medición.	96
Figura 5.4 Vista interior del módulo de medición.	96
Figura 5.5 Prototipo instalado.	97

# Introducción

La agricultura en el mundo colabora de forma importante a garantizar la seguridad alimentaria mundial mediante la producción de una gran variedad de cultivos. De ella dependen millones de personas para subsistir y, al mismo tiempo, significa una forma de vida, patrimonio e identidad cultural para todo el mundo (FAO, 2005). En este sentido, México cuenta con un territorio de 198 000 000 ha, de las cuales 30 000 000 ha, están destinadas al cultivo y, pese a que su aportación al producto interno bruto nacional es de apenas el 4 %, la agricultura posee un alto impacto en el desarrollo económico, social y ambiental del país (FAO, 2020).

Dentro de la extensa gama de cultivos que se generan en el campo, el plátano posee particular importancia, pues representa una fuente esencial de ingresos para miles de hogares rurales en los países en desarrollo (Vallejo, Vallejo, Nájera, & Garnier, 2017). De igual manera, su impacto se puede ver reflejado en el amplio consumo a nivel mundial, donde es reconocido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), como la fruta fresca más exportada del mundo, además de constituir el fruto más importante en América Latina y el Caribe, con un volumen de producción anual de aproximadamente 30 000 000 t (OECD/FAO, 2019).

En 2017, México se logró posicionar como el decimosegundo productor de plátano a nivel mundial, con una superficie sembrada de 103 160 ha (INEGI, 2017a); una producción estimada de 2 229 519 t y un rendimiento promedio de 28.9 t/ha, generando así una ganancia de 6 966 000 000 MXN. Por otra parte, las áreas encargadas de la producción de plátano en México se encuentran localizadas en las regiones tropicales de la costa del Golfo de México y Océano Pacífico, siendo Chiapas, Veracruz, Tabasco, Nayarit, Colima, Michoacán, Oaxaca, Guerrero, Jalisco y Puebla los principales estados productores. Dichos estados, se encuentran agrupados en tres

regiones productoras: la Región del Golfo de México, que ocupa el 36.3 % de la superficie nacional cultivada; la Región del Pacífico Centro, encargada del 24 % y, la Región del Pacífico Sur con el 31.5 % de la producción de plátano (Moctezuma, González, Romero, Pérez, & Castillo, 2017). Por su parte Colima se encuentra dentro de la región del Pacífico Centro, junto con los estados de Michoacán, Jalisco, Guerrero y Nayarit (Vazquez, Romero, Figueroa, & Munro, 2005), situándose en 2017 como el cuarto productor de plátano a nivel nacional, con una producción de 178 487 t (SAGARPA, 2018). Además, en 2020 Colima, Chiapas y Tabasco, fueron partícipes de la primera exportación de plátano mexicano a China, de tal forma que 4767 ha de banano tuvieron que ser registradas y aprobadas previamente por China, de las cuales 1520 provienen de Colima (González Villarreal, 2020).

No obstante, para lograr una buena producción de plátano, uno de los factores determinantes es el agua de riego, debido a que forma parte de la propia planta y permite que ésta pueda asimilar los elementos y demás minerales que necesita del exterior. Por esta razón, existe un complejo conjunto de estudios que, por normativa, debe realizarse previamente y de forma periódica a cualquier fuente de agua para garantizar que esta cumpla con las características esenciales de acuerdo al uso que se le desea dar, en este caso como agua de riego.

## **1.1 La naturaleza del problema**

En un predio destinado al cultivo de plátano ubicada en el municipio de Manzanillo en el estado de Colima, eventualmente se han presentado cambios en el agua de riego detectados en primera instancia por los trabajadores de la parcela, quienes describen un aroma “como de pantano” y un sabor ligeramente a sal. Dichas alteraciones han terminado por impactar en la salud de los vástagos, sin que el productor cuente hasta el momento con una forma viable de analizar continuamente el líquido para evitar daños en su cultivo, por lo que el dueño de la parcela, el ingeniero Agustín Hueso Alcaraz, tuvo a bien expresar la necesidad de abordar esta problemática, para lo cual primero es necesario comprender las posibles causas de esta.

En su estado natural, el agua que forma parte de los diferentes cuerpos hídricos contiene sustancias disueltas que en su conjunto son llamadas sales; estas incluyen partículas provenientes de las rocas y del sustrato que en algún momento tuvieron contacto con el agua. Las cantidades de estos componentes son las que determinan si el agua es adecuada o no para el riego de determinado cultivo (Ayers & Westcot, 1985).

En el caso particular de las aguas subterráneas, su composición química natural puede verse modificada por causas naturales o por factores antropogénicos. Entre las primeras se encuentra el clima, la temperatura, el tipo de terreno a través del cual se desplaza el agua subterránea, el tiempo de residencia del agua en el acuífero, y el ingreso de gases reactivos, entre los que destacan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el oxígeno disuelto (O<sub>2</sub>). Por otra parte, la raíz del factor antropogénico es el ser humano, cuyas actividades diversas pueden representar una degradación importante del recurso debido a la alteración tanto en el proceso de infiltración y recarga de los mantos acuíferos, como en la composición química del agua mediante la introducción de sales y nitratos; así como sustancias diversas tales como hidrocarburos y plaguicidas; sin embargo, también es importante contemplar aquellos procesos modificadores del agua subterránea que se presentan a raíz del desplazamiento de la misma por otra de composición química distinta, como es el caso de los acuíferos costeros, donde existe una zona de mezcla entre el agua dulce continental y el agua salada marina (Juan López, Fornés, Ramos, & Villarroja, 2009). Dicho lo anterior, se puede comprender por qué las características naturales del agua y del entorno donde se encuentra, la vuelven propensa a sufrir alteraciones en su composición, aun cuando se lleve un control adecuado de la misma mediante los análisis que por normativa se le deben realizar. No obstante, existen parámetros que pueden medirse en tiempo cuasi real cuya obtención no involucra una inversión económica elevada y que, de evaluarse continuamente, contribuyen a tener un mejor cultivo. Tal es el caso del potencial de Hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE), los cuales son utilizados en la práctica cotidiana de la agricultura para evaluar si el agua es apta o no para irrigar determinado cultivo. Esto gracias a que, aun cuando cada planta responde de forma distinta a los elementos presentes en su entorno, estos dos parámetros en particular

producen un impacto pronunciado en el desarrollo del cultivo y en el sustrato mismo; por lo que es conveniente mantenerlos en constante control.

Aun cuando no es el único factor, el agua de riego influye de manera importante en el pH de suelo, donde este a su vez, afecta a la planta de diferentes maneras. De acuerdo con Robinson & Galán (2012), los terrenos con pH alcalino y alto contenido de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), provocan clorosis en las plantas, mientras que, la presencia de un pH bajo en el suelo, es decir, muy ácido; aumenta el contenido de aluminio intercambiable, el cual puede ser tóxico por sí solo además de inducir la presencia de niveles tóxicos de algunos elementos menores como manganeso. Así mismo, provoca deficiencia de calcio y magnesio, frenando el crecimiento de la raíz.

Por otro lado, existen niveles de pH que favorecen el buen crecimiento de la planta, mejorando incluso su rendimiento. Al respecto, (Moctezuma et al., 2017) menciona que los valores ideales de pH para el plátano son de 6 a 7.5 (ligeramente ácido a ligeramente alcalino), pero también prospera en suelos con pH de 5 a 8; mientras que, INTAGRI (2018) por su parte menciona que el rango de pH óptimo para el cultivo del plátano es de 5.5 a 6.5. No obstante, el rango ideal de pH a utilizar dependerá de las características del suelo y de la variedad específica del plátano que se produzca.

Por su parte, la CE es un parámetro estrechamente relacionado con la concentración total de sales de una solución acuosa; por lo que, frecuentemente es utilizada como una expresión de la concentración total de sales disueltas en el agua (Rhoades, Chanduvi, & Lesch, 1999). Así pues, un exceso de sales en el agua de riego, termina por generar problemas de salinidad en el suelo, lo cual a su vez provoca dificultades para que el agua pueda ser asimilada por las plantas, de hecho en algunos casos, una planta sometida a estrés por sales puede presentar los mismos síntomas que si estuviera sometida a estrés por sequía; las hojas se hacen más cerosas y el color de la planta se torna azul verdoso, siendo más pronunciados los síntomas cuando la planta es afectada en etapas tempranas de su desarrollo (Ayers & Westcot, 1985). El problema de sales también se presenta principalmente en aquellos lugares con clima seco y suelos salinos; por la presencia de periodos largos con ausencia de lluvias, o por el riego con agua de baja calidad (Flores et al., 1996) y, aun cuando

existen cultivos que son más tolerantes, el plátano no es apto para suelos con alto contenido de sales (Australian Government, 2008). No obstante, al igual que en el agua, la presencia de sales en el suelo no es algo que se pueda evitar, ya que forma parte de los componentes naturales del mismo, junto con muchos otros elementos, independientemente de la región que se trate (Flores et al., 1996).

Una de las sales más dañinas para las plantas cuando se presenta en cantidades elevadas es el sodio (Na), específicamente los carbonatos de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), los cuales, entre otras cosas incrementan el pH del suelo (Almazan Cisneros, 2003), reducen la absorción de potasio (K) y disminuyen la productividad de la planta (Robinson & Galán, 2012). Además, los niveles altos de Na también pueden provocar una reducción en el crecimiento del cultivo, debido a la disminución de la presión osmótica del suelo, generando así un aumento de iones tóxicos para la planta (Australian Government, 2008). En este sentido, Ayers & Westcot (1985) desarrollaron una clasificación para la CE con base en el riesgo de salinidad que esta representa para cualquier cultivo; donde, tal como se muestra en la Tabla 1-1, si se desea tener una buena producción, se debe procurar que la CE del agua de riego se mantenga por debajo de los 0.7 dS/m.

**Tabla 1-1 Niveles de conductividad eléctrica y riesgo de salinidad.**

<b>Nivel (dS/m)</b>	<b>Riesgo de salinidad</b>
< 0,7	Nulo
0,7 – 3	Moderado
> 3	Alto

Dicho lo anterior, la implementación de un sistema de evaluación de la calidad agronómica del agua mediante el monitoreo de su pH y CE, contribuyen a mejorar la producción de plátano, proporcionando al productor una herramienta que le permita procurar las condiciones óptimas de riego para su cultivo y reduciendo las pérdidas que un agua de mala calidad podría generar sobre la planta, al contar con información

en tiempo cuasi real que le permita al agricultor actuar de forma oportuna en caso de alteraciones en su agua de riego.

## 1.2 El contexto del problema

En los últimos años se han presentado pérdidas importantes en una parcela de plátano a causa de la degradación de su cultivo el cual, como se muestra en la Figura 1.1, se sitúa a menos de mil metros de la laguna de Cuyutlán y por lo tanto también del mar. En dicha parcela se cuenta con un pozo profundo para abastecer de riego a toda la plantación; sin embargo, en diversas temporadas del año se ha llegado a percibir un aroma y sabor diferente al acostumbrado en el agua extraída del subsuelo y, pese a que el agricultor ha cumplido con realizar los estudios que periódicamente se deben realizar a su pozo, no ha logrado detectar algún patrón o fecha específica por sí solo en la que esta alteración ocurre e impacta en su cultivo, por lo que requiere de un método viable para evaluar el agua que está por introducir en su cultivo.

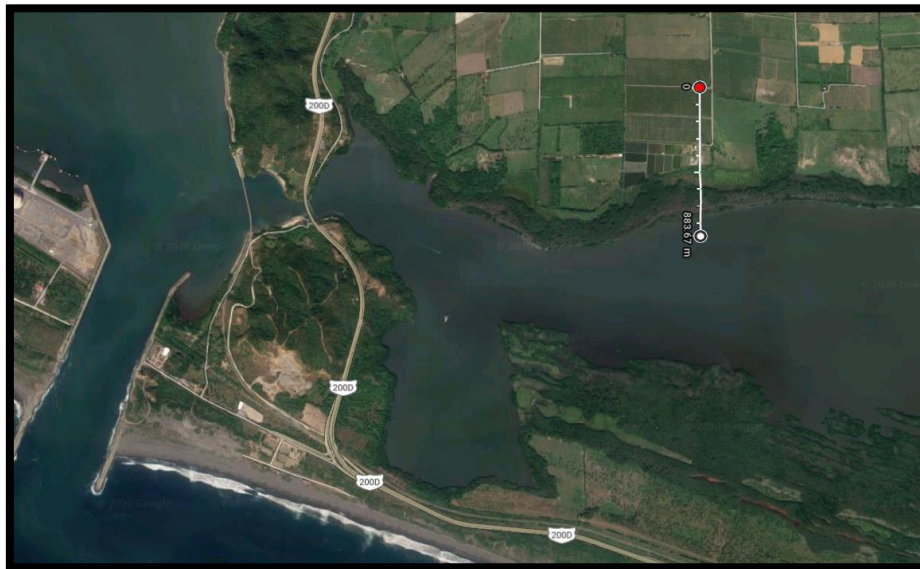


Figura 1.1 Ubicación de la parcela de plátano. Obtenida de: [www.google.com/earth/](http://www.google.com/earth/).

Dicho lo anterior, es importante recordar que el agua es reconocida como el disolvente universal, por lo que es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrenos por los que circula. Además, las aguas subterráneas tienen mayor oportunidad de disolver materiales que las aguas superficiales, debido a



su prolongado contacto con las formaciones geológicas a través de las cuales se desplaza, a la presencia de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> disueltos en el agua, y a la lenta velocidad con que se mueven. Por este motivo, de acuerdo con Juan López et al. (2009) en términos generales el agua subterránea suele presentar una concentración iónica mayor que la de escorrentía superficial del mismo origen.

Por su parte, la evaluación de la calidad del agua está regulada de forma específica dependiendo de cada país y del uso que se le dé; sin embargo, en todos los casos tiene que ver con el tipo y grado de presencia que los elementos, compuestos o microorganismos, pueden tener en el agua (Dong, Wang, Yan, Xu, & Zhang, 2015). No obstante, debido a la facilidad con que cambia la composición del agua, existen procedimientos de verificación de su calidad que se pueden realizar en los cuerpos de agua con mayor frecuencia que los análisis requeridos por normatividad.

Los métodos de análisis y predicción de los parámetros que describen la calidad del agua pueden dividirse en dos grupos: mecanismos de modelado acuático y mecanismos de modelado no acuático. El primero analiza en conjunto el comportamiento de las variables de interés y su interacción con los elementos contaminantes, así como el impacto que representan los procesos físicos, químicos y biológicos en el sistema acuático. El segundo utiliza principalmente la minería de datos a través de herramientas tales como modelos de redes neuronales, algoritmos genéticos, árbol de decisiones, matemáticas difusas, matemáticas aleatorias, etc., como método de análisis y predicción del comportamiento de las variables que determinan la calidad del agua (Dong et al., 2015). Esta última metodología es la que se implementa en este trabajo, debido a que se analiza el comportamiento de parámetros químicos del agua y se aplican algoritmos de lógica difusa para evaluar la calidad del agua.

Actualmente, la mayoría de los sistemas desarrollados para el monitoreo de la calidad del agua están basados en módulos, los cuales en conjunto se encargan de recopilar información del medio, transportar los datos y procesar la información para ofrecerla al usuario de formas diversas. Gran parte de ellos cuenta con conexiones a Internet y otros más utilizan módulos para enviar mensajes de texto con información

de las mediciones; sin embargo, la mayoría de ellos son costosos o requieren de complejas instalaciones, por lo que se vuelven inaccesibles para la mayoría de los agricultores quienes cuentan con la necesidad de hacerse de información importante para su cultivo, pero no cuentan con los suficientes recursos para realizar grandes inversiones. Es por esta razón que deben crearse soluciones que vayan acorde al contexto de cada país, procurando atender las necesidades de los encargados de desarrollar una actividad tan importante como es la agricultura.

### **1.3 Revisión de la literatura**

Si bien, queda bastante clara la relevancia de la agricultura en el país y en el mundo, es de notar que, gran parte de los fines de investigación en cuanto a equipos de análisis y monitoreo del agua se refiere, están enfocados al agua con fines de consumo humano, lo cual quizá se deba a los cambios y alteraciones que se han presentado apenas en los últimos años en la naturaleza, y que han abierto un gran campo de acción para la investigación y el desarrollo de tecnología aplicada al campo, donde se ha vuelto necesaria su intervención para potenciar las actividades del ser humano. A continuación, se presentan algunos de los trabajos científicos más importantes relacionados al tema de investigación.

En el trabajo de Lin & Liu (2008) se propone un sistema de monitoreo de señales de campo mediante una red inalámbrica de sensores (temperatura, humedad del aire y el suelo, CO<sub>2</sub> e iluminación), como parte de lo que llaman agricultura de precisión. Para esto, el sistema está compuesto por tres módulos; en el primero un microprocesador adquiere los parámetros provenientes de los sensores para después, con el uso de amplificadores, procesar la señal y convertirla en datos digitales. Así mismo, un segundo módulo con tecnología Zigbee, funciona a manera de ruteador para enviar la información proveniente del primer módulo al tercero, donde otro equipo de radiofrecuencia (RF), recibe la información y la sube a una plataforma Web para su consulta por medio de una conexión Ethernet. Añadir Inteligencia Artificial (IA) a este sistema les permitiría llevar un mejor control a las actividades al predecir el comportamiento de su cultivo.

Por su parte Cloete, Malekian, & Nair (2016) describe el diseño de un sistema de monitoreo para la calidad del agua con fines de consumo humano. En éste se utilizan diferentes sensores para medir parámetros como el flujo, temperatura, pH, conductividad y potencial redox del agua; parámetros con los que determinan qué tan contaminada se encuentra el agua. El equipo consta de dos módulos (medición y notificación) que se comunican entre sí por medio de tecnología Zigbee. Los sensores son conectados a un microcontrolador (nodo de medición), el cual recibe y analiza los datos para después transmitirlos a la otra sección del sistema donde son procesados. A su vez, el sistema cuenta con un módulo de notificaciones que utiliza elementos auditivos y visuales para comunicar los resultados del monitoreo, de tal manera que, cuando los parámetros salen de un rango seguro, un buzzer, es activado para alertar al usuario. Cabe resaltar que, en este trabajo los autores señalan que algunos parámetros son difíciles de medir a largo plazo, debido a la complejidad de los sensores y del continuo mantenimiento que requieren, por lo que seleccionan los parámetros más factibles de medir y que sigan siendo representativos de la calidad del agua. Además, este equipo podría utilizar IA para ofrecer al agricultor una estimación del comportamiento de sus parámetros de interés.

En el caso de Caldo & Dadios (2012), se desarrolló un sistema asesor para dar seguimiento y vigilancia a la calidad del agua en el lago Taal de Batangas con el objetivo de proteger los recursos naturales en este lago. Para esto el sistema utiliza un modelo de lógica difusa con el que evalúa parámetros físicos, químicos y bacteriológicos importantes para la valoración de la calidad del agua. Esta herramienta arroja como resultado un grado de aceptación aproximado de la calidad del recurso evaluado con base en los rangos considerados aceptables para cada parámetro. Este sistema trabaja únicamente con una base de datos que previamente se debe recabar, ya que la información que analiza únicamente puede obtenerse mediante pruebas de laboratorio, por lo que es necesario muestrear el cuerpo de agua cada vez que se requiera alimentar el sistema de evaluación. Se podrían añadir sensores y evaluar su funcionamiento en campo.

En Bórquez-López et al. (2017) se elaboró un sistema que registra variables fisicoquímicas (oxígeno disuelto, temperatura y pH) del agua de un estanque utilizado

para el cultivo de camarón y pese a que el giro del proyecto es distinto, el principio de es muy parecido al que se plantea para las plantas en este proyecto, ya que la información es obtenida a través de una red de sensores para después ser procesada mediante un sistema de lógica difusa que utiliza reglas de inferencia específicas para determinar un índice de calidad del agua, permitiendo evaluar el agua como: pobre, regular, buena y excelente, en función de los umbrales óptimos requeridos por el cultivo de camarón. Sin embargo, dicho proyecto fue realizado en un ambiente controlado, por lo que habría que evaluar su funcionamiento en un entorno cotidiano de producción, además de comprobar si el motor de inferencia es el adecuado.

En Sakizadeh (2016) se presentó un estudio en el que se obtuvo la predicción del índice de calidad del agua a través de redes neuronales artificiales. Como base se utilizaron las concentraciones de 16 variables de calidad del agua subterránea recolectadas de 47 pozos y manantiales en un periodo de ocho años. La información fue procesada mediante tres algoritmos de redes neuronales artificiales entre los que se encuentra el algoritmo de regularización Bayesiano. El sistema de predicción se realizó con base en una serie de muestras externas tomadas de múltiples puntos en una región geográfica, por lo que convendría delimitar el área de monitoreo debido a la gran cantidad de factores que impactan constantemente a los cuerpos de agua. Además, sería conveniente contar con un módulo de medición que pudiera registrar los cambios en los parámetros más importantes.

Considerando lo anterior, dentro de los trabajos analizados sin duda se pueden percibir alternativas innovadoras que buscan atender la necesidad de obtener y proveer de información oportuna mediante el monitoreo de variables de importancia para los cultivos; sin embargo, algunos se quedan en el desarrollo de prototipos, limitando su funcionamiento a un ambiente de condiciones controladas, dejando de lado la creación de herramientas finales, capaces de implementarse en campo y que respondan de forma real a la necesidad planteada. Algunos otros, hacen necesaria la compra de equipos que requieren de una gran inversión, así como de personal especializado para su manipulación, lo que muchas veces resulta inviable para muchos campesinos. Así mismo, se ha encontrado que la mayoría únicamente utilizan los parámetros por separado para realizar cualquier evaluación sobre el impacto que podría tener el agua

sobre el cultivo, por lo que se visualiza un área de oportunidad donde se podría establecer una relación entre las variables mediante técnicas de IA para así potenciar su funcionamiento como se desarrolló en el presente trabajo.

## **1.4 Propuesta de solución**

Debido a la falta de una herramienta viable de adquirir económicamente, que le permita al agricultor contar con información oportuna para proteger su cultivo ante variaciones inesperadas en los componentes de su agua de riego y, en vista de las áreas de oportunidad que existen actualmente en el campo específico que atañe a este tema de investigación, se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo cuasi real que resulte en una implementación económica para el productor, utilizando equipos básicos de medición y tomando únicamente el pH y la CE del agua como factores de evaluación; de manera que, se plantea aprovechar las cualidades de la IA, específicamente de la lógica difusa para que el resultado de la interacción de estos dos parámetros en un modelo difuso, le permitirá conocer al productor en todo momento, qué tan adecuada es su agua para los vástagos de plátano, permitiéndole así tomar las medidas necesarias de prevención o corrección sobre su cultivo.

Se trata de un conjunto de sensores que adquiere mediciones del agua de riego en un receptáculo instalado a la salida de la bomba de extracción. Dicho receptáculo albergará las sondas, esto debido a que, por normativa no se permite tener contacto ni realizar algún tipo de alteración a las secciones previas en el sistema de extracción. Además, el tipo de sensores que se plantea utilizar no cuentan con la capacidad de soportar la presión del agua que una instalación en línea bajo esas condiciones supondría.

En la Figura 1.2 se muestran los componentes del sistema de monitoreo. En la primera sección se utiliza un equipo de sensores para obtener los parámetros de interés, específicamente pH, CE y temperatura. Cabe mencionar en este momento que, se está contemplando un sensor de temperatura debido a que, como el pH y la CE varían con respecto a la temperatura del medio en que se encuentran, resulta más viable económicamente colocar un sensor sencillo de temperatura extra al equipo de

medición y realizar el ajuste en la programación que, adquirir sondas con un compensador de temperatura integrado. Por lo anterior, se propone utilizar un microcontrolador para que coordine el trabajo de los sensores, junto con un dispositivo de RF con una topología de red de malla para llevar los datos desde el equipo de adquisición ubicado en la cercanía de la bomba de extracción, hasta el módulo de recepción de datos el cual estará localizado en las oficinas operativas del predio, donde un dispositivo de comunicación inalámbrica y un microcontrolador, se encargan de recibir los datos de los sensores. Dicha información se almacenará en una base de datos que, de acuerdo a las necesidades de la implementación, será un almacenamiento interno en el ordenador, para después pasar al módulo de procesamiento, donde un algoritmo de IA es utilizado para calcular el índice que describe la calidad agronómica del agua muestreada. Esta información podrá ser consultada por el usuario a través de la interfaz, así como también se podrá obtener el resultado de las mediciones directamente en el módulo de medición, ya que estará equipado con una pantalla LCD (liquid crystal display: 'pantalla de cristal líquido' por sus siglas en inglés) donde se estarán mostrando en tiempo cuasi real el pH y la CE del agua que se extrae.

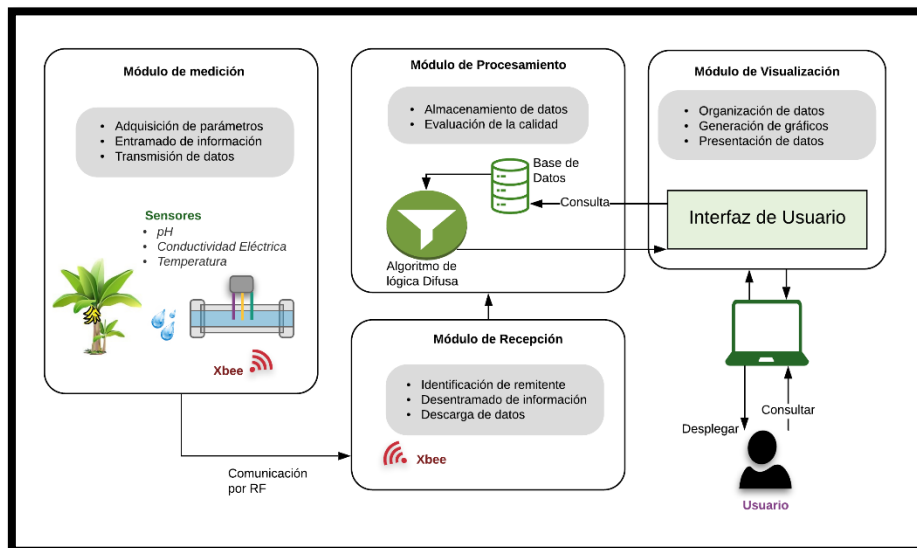


Figura 1.2 Estructura del sistema.

Debido a que actualmente en la misma parcela se encuentra en funcionamiento un sistema de monitoreo para la prevención de la Sigatoka Negra y a que en dicho

proyecto se utiliza la misma tecnología de RF para comunicarse entre sus nodos, se considera que ambos sistemas trabajen en conjunto. Esto con el fin de agilizar el monitoreo y control de los parámetros por parte del productor al integrar todo en una sola interfaz. Además, ya que se estaría utilizando un solo equipo de RF para coordinar las actividades de monitoreo, en lugar de un coordinador para cada sistema, los costos de producción se reducirían considerablemente. Por último y no menos importante, esta forma de trabajo permitirá añadir cuantos nodos sea necesario en el futuro, ya sea para incrementar el monitoreo en otros puntos de la parcela o para estudiar otras variables de su cultivo que sean de su interés.

## **1.5 Justificación**

Las propiedades del agua, junto con su entorno y la actividad humana provocan que todo el tiempo se encuentre en contacto con diversos materiales que modifican su composición e impactan de forma contraproducente a las plantas y demás organismos que hacen uso de ella. En este sentido, la calidad del agua de riego que se utiliza en la parcela vinculada con este proyecto, la cual presenta alteraciones en diferentes temporadas del año que, repercuten en el cultivo y han significado una pérdida importante para el productor, sin tener hasta el momento una forma de monitorear su calidad o de detectar alteraciones en la misma de manera oportuna. Por esta razón, el sistema propuesto ofrece una alternativa viable técnica y económicamente, que ataca un problema real con el uso de tecnologías de vanguardia como lo es la IA; con lo que el agricultor podrá contar con información oportuna que le permitirá anticiparse a la degradación de su cultivo ante un agua de mala calidad, mejorando así su producción y evitando las pérdidas. Además, se trata de un sistema sumamente versátil que, puede implementarse en otras parcelas, sin la restricción de la distancia entre el equipo de medición y el lugar donde se desea recibir los datos; sin la necesidad de una conexión a Internet, ya que la información es transmitida de forma remota vía RF y, sobre todo, no requiere de una gran inversión.

## 1.6 Objetivos

A continuación, se describen el objetivo general y los objetivos específicos que fueron planteados para el desarrollo de este proyecto.

### 1.6.1 Objetivos generales

Diseñar e implementar una red de sensores para el monitoreo de pH y CE del agua utilizada en riego de cultivos de plátano para determinar su nivel de calidad aplicando técnicas de lógica difusa.

### 1.6.2 Objetivos específicos

- Investigar el estado del campo del conocimiento de sistemas de monitoreo de la calidad del agua utilizada en cultivos de plátano.
- Analizar y determinar los requerimientos para el desarrollo del proyecto.
- Diseñar los diferentes módulos que integran el sistema.
- Diseñar e implementar un modelo de lógica difusa para evaluar la calidad del agua de riego.
- Implementar los distintos módulos del sistema siguiendo las pautas del diseño.
- Realizar el despliegue del sistema en campo y validar su funcionamiento.
- Medir el impacto del proyecto.
- Elaborar la documentación del proyecto.

## 1.7 Hipótesis

La utilización de la lógica difusa en la implementación de un sistema automatizado de monitoreo de la calidad agronómica del agua para el cultivo de plátano, permite desarrollar una herramienta que brinda información importante para mantener un control adecuado del agua de riego.

**Variables independientes:** La utilización de la lógica difusa en la implementación de un sistema automatizado de monitoreo de la calidad agronómica del agua para el cultivo de plátano.



**Variables dependientes:** Permite desarrollar una herramienta que brinda información importante para mantener un control adecuado del agua de riego.

## 1.8 Métodos y herramientas

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la investigación aplicada, donde además se realizó un estudio intensivo con el fin de conocer los hechos, procesos y fenómenos involucrados en el cultivo del plátano; así mismo, para el desarrollo del proyecto se utilizó una metodología en cascada.

Como primer paso para abordar este tema de investigación, se realizó una visita de campo a la parcela de plátano en la que se presenta la problemática que atañe a este tema de investigación, en donde, en reunión con el productor y parte del personal encargado de la plantación, explicaron a detalle el contexto y las características de la situación a tratar. Dicha reunión sentó las bases para comenzar una investigación donde se recopiló información referente al tema y se analizaron las posibles soluciones, de las que se fueron descartando a través de un análisis de viabilidad hasta determinar la más adecuada técnicamente y que resultase más económica.

En el desarrollo de este proyecto se llevó a cabo la planeación e implementación del equipo de medición y captura de datos. Además, se realizó el modelado del sistema difuso para la evaluación de la calidad del agua. Para esto, se tomaron en cuenta dos variables que, con base en la información recabada durante la investigación, se determinaron como las más básicas e importantes para evaluar las condiciones del agua de riego; el pH y la CE, las cuales fueron implementadas como entradas para el sistema de inferencia difuso (por sus siglas en inglés: Fuzzy Inference System, FIS) que fue desarrollado utilizando un sistema tipo Mamdani, donde las reglas de inferencia y rangos para las funciones de membresía (por sus siglas en inglés Membership Function, MF) se obtuvieron a partir de las características específicas obtenidos para el cultivo de plátano. El modelo se desarrolló utilizando Matlab; sin embargo, después se migró a skfuzzy para integrarlo en la implementación.

En el proyecto se utilizaron sensores de la familia Atlas Scientific; para medir el pH se utilizó una sonda que posee un rango de 0 a 14 y una precisión de  $\pm 0.002$ ; mientras

que, para la CE, se eligió una sonda con un rango de 5 a 200 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una precisión de  $\pm 2 \%$ . Así mismo, ya que los dos parámetros anteriores, varían en función de la temperatura presente en el agua, fue necesario añadir un sensor de temperatura, con un rango de medición de  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , para así realizar la compensación.

En la implementación de campo, los sensores recabaron los datos del agua a la salida de la bomba de extracción, donde el equipo que recibe la información muestra en tiempo cuasi real los valores de temperatura, pH y CE del agua en una pantalla LCD, para después enviar la información vía RF hacia un ordenador ubicado en las oficinas de producción utilizando equipos de RF XBee S3B configurados en modo API. Posteriormente, dicha información fue almacenada en una base de datos local, de donde es extraída para procesarla mediante el FIS y estimar la calidad del agua, de modo que puedan ser mostrados todos los parámetros obtenidos en el ordenador a través de una página local.

## **1.9 Beneficios esperados**

Gracias a la implementación de este sistema para el monitoreo del agua de riego, el productor puede acceder a una herramienta tecnológica de bajo costo y fácil de utilizar, que le brinde información oportuna y le permita actuar de forma precisa sobre su cultivo mediante la aplicación de técnicas de prevención o corrección ante la presencia de un agua de riego de mala calidad, evitando daños en la planta. Así mismo, con dicha información el productor podrá tomar acciones para procurar las condiciones óptimas en su agua de riego y generar una mejor producción pues, cualquier variación de pH o CE, aunque se encuentre dentro de los niveles permitidos, servirán al empresario para mejorar aún más el impacto que el riego pueda tener. Además, al ser un sistema automatizado, se podrá prescindir de la necesidad de contar con una persona encargada de estar analizando el agua, reduciendo sus costos y permitiéndole al agricultor generar una base de datos con la que podrá analizar el comportamiento del agua de su pozo profundo en las diferentes temporadas del año.

## **1.10 Organización del documento**

El trabajo está estructurado en 6 capítulos. En el Capítulo 1, se presenta una breve introducción, donde se abordan los aspectos fundamentales correspondientes al tema de investigación, tales como: la naturaleza del problema, donde se indica el origen del problema y se describen los antecedentes; el contexto del problema, donde son abordados aquellos trabajos de investigación cuyas aplicaciones, importancia y relevancia en los sectores social y productivo, son de gran impacto en la actualidad; la revisión de la literatura, que contiene el resultado de la indagación de diversas fuentes de información, y de donde se extrajo información relevante e importante referente al problema de investigación, lo cual fue utilizado como sustento para dar paso al siguiente punto, que es el planteamiento de la solución del problema a investigar, donde las carencias y limitaciones en los enfoques o tecnologías utilizados en otros proyectos, fueron tomados en cuenta para proponer una alternativa viable y competente que proporcione solución al problema en cuestión. Posteriormente, se presenta la justificación, donde son expresadas la importancia, relevancia y pertinencia del tema de estudio, la utilidad de los resultados obtenidos en función de su contribución al campo de conocimiento existente, así como su aplicación práctica y concreta en los sectores sociales y productivos. Del mismo modo, posteriormente se presentan los objetivos general y específico, en donde se declaran las diferentes metas propuestas para el desarrollo de esta investigación. Así mismo, enseguida se presenta la Hipótesis, en la que se describe la propuesta del proyecto y cuyo texto antecede a la sección de métodos y herramientas, en donde el lector podrá encontrar descritos de manera concisa, los pasos y procedimientos realizados durante la investigación. No obstante, dicha información se encuentra descrita de forma más detallada en el Capítulo 3.

En el Capítulo 2 se encuentra descrito el estado del campo del conocimiento, el cual contiene los estudios e investigaciones que anteceden a este tema de investigación, además de una amplia descripción del contexto del problema y la integración de la teoría con la investigación y sus relaciones mutuas. Así mismo, en este capítulo se describen el marco Histórico, Contextual y Teórico, siendo el Marco

Histórico donde se puede encontrar una descripción de la evolución histórica del objeto de estudio, desde su origen hasta nuestros días. Por su parte, el Marco Contextual describe el ambiente donde se desarrolla el problema de investigación, haciendo énfasis en los factores físicos y circunstanciales que terminan por limitar el alcance del presente trabajo, siendo el punto final del Capítulo el Marco Teórico, el cual contiene la base teórica de referencia que le permitirá al lector comprender el problema y sus principales aspectos de detalle en toda su extensión.

Por su parte, el Capítulo 3 presenta los Métodos empleados; apartado en el cual se describen todos los pormenores de la metodología utilizada a lo largo del desarrollo de esta tesis, detallando cada uno de los métodos, técnicas, procedimientos y demás herramientas utilizadas. Se detalla el tipo de investigación utilizada para llevar a cabo este proyecto; la investigación preliminar a la que estuvo sujeto el desarrollo del sistema, así como la descripción de la planeación, el diseño y la construcción del mismo. Así mismo se detalla el proceso de implementación del prototipo desarrollado, el periodo de pruebas e información acerca de la documentación elaborada en torno a este trabajo de investigación.

Posteriormente, el Capítulo 4 describe el proceso de desarrollo del prototipo propuesto a lo largo de este proyecto, a través de diferentes técnicas que permiten describir e ilustrar todo el proceso de desarrollo de esta tesis al lector.

Luego, el Capítulo 5 describe los resultados del proyecto, para más adelante, en el Capítulo 6, mostrar las conclusiones obtenidas posteriores a todo el proceso de desarrollo e investigación que forman las bases de las recomendaciones también descritas en este capítulo.

Por último, en los capítulos 7 y 8 el lector podrá encontrar las referencias bibliográficas, así como los apéndices y anexos correspondientes.

## Estado del campo del conocimiento

En este capítulo se aborda el estado del campo del conocimiento, donde se describe el contexto de la problemática del objeto de estudio y el trabajo relacionado.

### 2.1 Marco histórico

Dentro de este subtema se aborda la evolución y desarrollo del problema de investigación.

#### 2.1.1 La agricultura en México

Los antecedentes primordiales de la agricultura en México parten del espacio geográfico conocido como Mesoamérica, donde la domesticación del maíz sentó las bases de la grandeza de la agricultura y donde en aquellos tiempos, los bosques y la cantidad de recursos acuíferos como lagos y lagunas era más extensa. Aunado a esto, la intervención de cultivos como el frijol, el chile y la calabaza, junto con diversas técnicas de producción, tales como las chinampas y los camellones, generaron las condiciones que posibilitaron el establecimiento de las primeras civilizaciones, tales como la tolteca, náhuatl, tenochca e incluso el Imperio Maya Clásico. Para tiempo después, añadir y transformar las metodologías y costumbres agrícolas en otras con tintes europeos a raíz de la conquista española en 1519 donde, además de la introducción de los animales como apoyo en las actividades de siembra y cosecha, una de las características más resaltantes fue la inserción de variados estratos y títulos políticos que impactaron en el campo y en el estilo de vida mismo, volviendo a la agricultura dependiente de las actividades mineras, generando una economía basada en la plata, encabezada por la Monarquía española y que permaneció vigente de 1800 a 1850, pero que, a partir de 1810, gracias al proceso de Independencia y a la revolución industrial, se pudo poner fin a finales del siglo XVIII, terminando con el

dominio español y con el predominio de la plata en el mercado mundial, así como la subordinación de la agricultura (Martínez Saldaña, 1983).

No fue sino a partir de 1850 cuando México pudo por fin incorporarse al mercado mundial, a través de los productos agrícolas y pecuarios demandados por Estados Unidos, para después entrar en el mercado internacional con productos como el garbanzo, el frijol y el algodón. El conjunto de políticas económicas que más tarde se dieron y las que actualmente se están integrando, han ido reestructurando el campo mexicano y, aun cuando hoy en día México cuenta con lugares destacados en la producción y exportación de productos provenientes de la tierra, tales como el plátano, aguacate, tomates, fresas, cebollas, pepinos, etc.; todavía existen problemas que se deben atender en este sector tan vasto y complejo, ya que millones de personas en el mundo siguen sufriendo de desnutrición a la par de la degradación de la tierra, el agua y la biodiversidad, lo cual deja en claro que hay un gran trabajo por hacer, en especial para lograr una seguridad alimentaria que vaya acompañada de estrategias de desarrollo del campo que sean sostenibles (Christophersen, 2017).

### **2.1.2 El riego en México**

Las primeras civilizaciones duraderas, tuvieron que incluir actividades que solventaran las necesidades básicas de sus integrantes para poder sobrevivir, y una de ellas fue el desarrollo de métodos y técnicas que se fueron perfeccionando con el objetivo de abastecer de agua a los cultivos, el ganado y para el consumo de las personas. No obstante, pese a que durante milenios la principal fuente de agua para los cultivos fue la lluvia -a manera de "agricultura de temporal"-, las personas poco a poco comenzaron a poder combinar el agua pluvial con el riego, trayendo como resultado incrementos en el rendimiento de las plantas cultivadas y en la cantidad de territorio que se podía colonizar, pues el agua dejó de ser un limitante para cosechar el alimento aún en temporada de sequía, permitiendo así un cultivo continuo de la tierra. No obstante, hasta ese entonces, la irrigación en Mesoamérica -salvo algunas excepciones-, se limitaba a obras de pequeña y mediana escala, debido principalmente a que, en las zonas áridas, los ríos eran pequeños y no requerían de grandes construcciones mientras que, en aquellos lugares más húmedos, las altas

precipitaciones hacían innecesario el riego. Por otra parte, también era utilizada el agua de pozos someros, lagunas y algunos embalses para irrigar los cultivos, en lo que hoy se le conoce como riego manual o riego a brazo. Esta técnica se utilizaba principalmente como "riego de auxilio" en aquellas parcelas sometidas a cultivo intensivo como las chinampas, los campos drenados, terrazas y arenales, y cuya finalidad era producir una segunda o tercera cosecha anual en la misma parcela. Años más tarde, la llegada de los españoles en 1521, trajo consigo una revolución en diferentes aspectos del campo, lo que entre otras cosas significó la introducción de máquinas y herramientas que transformaron las metodologías utilizadas hasta entonces para el manejo del agua, así como una alteración en la administración de los derechos del agua y de la infraestructura hidráulica, a raíz de la fuerza europea que imperaba en los ámbitos sociopolítico, económico y cultural de lo que más tarde sería México. Por otra parte, fue a finales del siglo XIX, cuando la agricultura en México, gozó de un alto impulso del sector público y privado, trayendo entre otras cosas el desarrollo de la bomba hidráulica, lo que posibilitó el uso sistemático del agua subterránea para riego y, pese a que no fue sino hasta principios de 1900 cuando fue posible alimentar con corriente eléctrica este tipo de maquinarias; el uso de máquinas de vapor, motores de combustión interna, de gas y de aceite pesado, sirvió para la explotación del agua con fines de riego. Aunque el uso de técnicas más rudimentarias se prolongó en las zonas marginales hasta la década de 1960, en otras regiones como Hermosillo, Sonora, antes de 1945 ya se extraía el agua de los primeros 100 metros del acuífero utilizando norias y calderas de vapor, y de ahí a 1949, ya se habían perforado 70 pozos profundos que aprovisionaban de agua a 17 500 hectáreas, esto con apoyo del gobierno federal (CONAGUA, 2009).

Naturalmente la perforación de pozos, la extracción y el manejo y distribución de los cuerpos de agua han cambiado significativamente desde entonces y las tecnologías que se tiene actualmente permiten realizar las tareas con mayor eficiencia; sin embargo, no se debe dejar de lado que el agua es un recurso no renovable muy delicado. De acuerdo con la Secretaría del Foro Mundial Bananero (2017), el 70 % del agua dulce del mundo extraída de acuíferos, arroyos y lagos es utilizada para la agricultura. Además, de acuerdo con Khokhar (2017) se espera que para el año 2050

aumente en un 15 % dicha extracción, por lo que se debe hacer un uso responsable de las misma y cuidar que las actividades que se realicen en nombre del progreso no resulten contraproducentes, a tal grado que en algún momento no se pueda contar más con un recurso indispensable como lo es el agua.

### **2.1.3 El agua en Colima**

A pesar de las abundantes precipitaciones pluviales en la mayor parte del estado de Colima y de los elevados volúmenes de agua escurridos; el agua subterránea constituye la fuente principal para satisfacer la demanda en las actividades agropecuarias y urbanas de la entidad, lo que ha provocado una extracción intensiva desmesurada. Así mismo, a partir de la creación de los distritos de riego en la década de los cincuentas, se dio inicio a la explotación sistemática de los acuíferos, incrementando su explotación de manera importante en 1972 y trayendo con ello la necesidad de decretar en veda a los municipios de Tecomán, Armería y Manzanillo en el año de 1973, con el fin de controlar las extracciones, el uso y el aprovechamiento de las aguas del subsuelo de dicha zona (INEGI, 1995). A esta veda se sumó una segunda con las mismas características de control, publicada el 21 de septiembre de 1984, pero cuyo ordenamiento comprende los límites geopolíticos correspondientes a los municipios de: Colima, Comala, Coquimatlán, Cuauhtémoc, Ixtlahuacán, Minatitlán y Villa de Álvarez.

### **2.1.4 El plátano o banano**

El plátano es un cultivo perene cuya planta es considerada como una hierba, debido a que sus partes aéreas mueren y caen al suelo después de su periodo de cosecha (SAGARPA, 2018). Su “tronco” es realmente un seudotallo compuesto por los tallos de las hojas (Kruiter, 1989). La mayoría de los bananos comestibles provienen de dos especies silvestres: *Musa acuminata* y *Musa balbisiana*; sin embargo, la procedencia del plátano o banano no está exactamente documentada; algunos investigadores ubican su origen en el sureste asiático, aunque existen evidencias de que se cultivaba a la par en Malasia y en las islas indonesia, mientras que también se han encontrado registros de su presencia en la India que datan del año 600 antes de



Cristo. (Soto, 1994). No obstante, no es sino hasta 1516 que el plátano, es introducido al continente americano, dando inicio a su cultivo comercial a finales del siglo XIX y principios del siglo XX (Secretaría de Economía, 2012).

El término “plátano”, es utilizado en México para referirse a todos los frutos comestibles o variedades derivados de la familia de las musáceas (Moctezuma et al., 2017). Estos pueden ser clasificados en dos grupos: de postre, los cuales son consumidos al madurar (aproximadamente 4 días después de su cosecha) y de cocción, que por su nivel de almidón, requieren de un proceso térmico antes de consumirse (Rosales, 2012). Por otra parte, en la mayoría de los países de Centro y Sudamérica, así como en algunos estados del sureste de México (Chiapas y Tabasco), el término “banano”, es utilizado para referirse a los de la clase postre y, la palabra “plátano” para denotar que se trata de las variedades de cocción (Moctezuma et al., 2017); sin embargo, en algunos lugares se utilizan las palabras plátano o banano de manera indistinta para referirse al fruto de la clase postre por ser este el más común.

### **2.1.5 Manzanillo, Colima**

Tras la caída de Tenochtitlán, en el año de 1521, Hernán Cortés ordenó una serie de expediciones estratégicas para extender la conquista, lo que en 1521 llevó a un grupo de hombres al mando de Juan Rodríguez de Villafuerte, a entrar por primera vez al territorio de Coliman, de donde fueron repelidos por los indígenas habitantes del lugar. Un año más tarde para vengar su derrota, Cortés envió al capitán Gonzalo de Sandoval quién logró la rendición de los señoríos indígenas y fundó la Villa de Colima, además de descubrir lo que Cortés reconoció como “un muy buen puerto”, la bahía de Manzanillo, aunque de hecho fue hasta el siglo XVIII cuando comienza a llamársele puerto de “la Manzanilla” o “las Manzanillas”, en referencia a los árboles de manzanilla que crecían cerca de la costa, derivando hasta inicios del siglo XIX en el nombre actual: Manzanillo (Reyes Garza, 2006).

Actualmente Manzanillo es la ciudad y municipio más extenso y poblado del estado de Colima. Con una superficie de 1337.83 km<sup>2</sup>, representa el 23.73 % de la superficie total del estado. Se localiza 73 km al sur de la capital del estado y colinda al norte con el Jalisco y el municipio de Minatitlán; al este con los municipios de Minatitlán,

Coquimatlán y Armería; al sur con el municipio de Armería y el océano pacífico y, al oeste con el océano Pacífico y el estado de Jalisco (INEGI, 2001).

La ciudad se compone de 9 localidades: El Naranjo, Miramar, Las Brisas, El Colomo, Tapeixtles, Salagua, Valle de las Garzas, Santiago y Manzanillo (ahora conocido como Centro Histórico de Manzanillo). Es un destino turístico por demás popular a nivel nacional e internacional que cuenta con playas hermosas y clima agradable (Muñiz Mercado, 2007); cuyo puerto ha sido clave en el desarrollo del estado a través de la participación en múltiples actividades de comunicación y transacciones vía marítima con el resto del mundo, entre las que destaca el envío del primer embarque de plátano mexicano exportado a China, con producto proveniente de Colima, Chiapas y Tabasco (González Villarreal, 2020).

### **2.1.6 IA**

La IA es una de las disciplinas más antiguas cuyo estudio se remonta hasta hace más de 2000 años, cuando los filósofos enfocaban sus esfuerzos en comprender la manera en que se realizan actividades tan complejas como el ver, aprender, recordar y se razonar. No obstante, la IA inicia formalmente en 1956, año en que se acuñó el término, aunque para ese entonces ya se había estado trabajando en ello durante cinco años. Así pues, hacia 1960 en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT por sus siglas en inglés), John McCarthy creó el LISO (el primer lenguaje de investigación dentro de la IA). No obstante, el término IA suele atribuírsele a Marvin Minsky -también del MIT-, quien en 1961 escribió un artículo titulado “Hacia la Inteligencia Artificial” Posteriormente, en 1972 Alain Colmerauer, en Marsella, Francia, creó el PROLOG; lenguaje diseñado para ayudar a resolver problemas relativos a la IA. Este lenguaje poseía un gran número de características especiales tales como una base de datos incorporada y una sintaxis bastante simple (Ponce Cruz, 2010).

No obstante, desde sus inicios la IA siempre ha tenido como fin el construir máquinas que pudieran pensar como el ser humano o emular las funcionalidades inteligentes del hombre a través de diferentes enfoques, por lo que hoy en día aún se tiene un amplio espectro de investigación en esta disciplina tan basta y compleja. Es por esto que, la IA cuenta con diversas áreas de estudio, de las cuales las más

importantes hasta el momento son: Búsqueda de soluciones, Sistemas expertos, Procesamiento del lenguaje natural, Reconocimiento de modelos, Robótica, Aprendizaje de las máquinas, Lógica e Incertidumbre; sin embargo, para su estudio también se suele dividir en tres grandes ramas: Lógica difusa, Redes neurales artificiales y Algoritmos genéticos (Ponce Cruz, 2010).

### **2.1.7 Lógica difusa**

El estudio moderno de la lógica difusa y de las contradicciones parciales tiene sus orígenes en el siglo XX, cuando Bertrand Russell retomó la antigua paradoja griega en la que, según ésta, un cretense afirma que todos los cretenses mienten. Posteriormente, en la década de 1920 e independientemente de Russell, el lógico polaco Jan Lukasiewicz trabajó los principios de la lógica multivaluada, en cuya lógica las proposiciones pueden tomar valores verdaderos fraccionales entre los unos y ceros de la lógica clásica. Por su parte, en 1965 Lotfi A. Zadeh, en aquel entonces director del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de California en Berkeley, publicó Fuzzy Sets; artículo que describe las matemáticas de los conjuntos difusos y por extensión de la lógica difusa. Zadeh aplicó la lógica de Lukasiewicz a cada objeto en un conjunto y creó un álgebra completa para conjuntos difusos. Después, la lógica difusa se aplicó a mediados de la década de 1970 por Ebrahim H. Mamdani en el Queen Mary Collage en Londres, quien diseñó un controlador difuso para un motor a vapor. Desde entonces el término lógica difusa es sinónimo de cualquier sistema matemático o computacional que razona con lógica difusa (Zadeh, 1965).

## **2.2 Marco contextual**

A continuación, se describe el lugar o ambiente donde se desenvuelve el problema de investigación.

### **2.2.1 Disponibilidad del agua en México**

Con el propósito de administrar las aguas nacionales, y conocer su disponibilidad; la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), ha definido 757 cuencas hidrológicas junto con sus disponibilidades, de conformidad a la norma NOM-011-Conagua-2000;

de las cuales 649 se encontraban en situación de disponibilidad. En este sentido, en México se reciben aproximadamente 1 449 471 millones de m<sup>3</sup> de agua en forma de precipitación al año, de la cual aproximadamente el 72.1 % se regresa a la atmósfera por medio de la evapotranspiración; el 21.4 % fluye por los ríos o arroyos, y el 6.4 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural recargando los acuíferos. De acuerdo con esto, considerando los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, México cuenta con 451 585 millones de m<sup>3</sup> de agua dulce renovable al año (CONAGUA, 2018).

### **2.2.2 Aguas subterráneas en México**

Las aguas subterráneas funcionan como filtros purificadores, preservando la calidad del agua. Sus características físicas permiten que puedan ser aprovechadas en cualquier temporada del año, fungiendo a manera de presas de almacenamiento y red de distribución, por lo que se han vuelto un elemento clave en el desarrollo socioeconómico del país. Así mismo, la importancia del agua subterránea se puede ver reflejada en el volumen utilizado por los principales usuarios, ya que el 39.1 % del volumen total concesionado para usos consuntivos (34 380 hm<sup>3</sup> por año al 2017), procede de agua subterránea (CONAGUA, 2018).

No obstante, para garantizar la disponibilidad del recurso, la recarga en los mantos acuíferos debe ser mayor que su extracción; de lo contrario se considera un acuífero sobreexplotado. En consecuencia, para lograr una gestión integrada, donde se procure un uso eficiente y un manejo y distribución adecuado de las aguas nacionales, el país se ha dividido en 653 acuíferos oficialmente reconocidos en los Estados Unidos Mexicanos, con base en la Norma Oficial Mexicana vigente "NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales", y cuyos nombres oficiales, fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre de 2001, siendo actualizada su disponibilidad por última vez el 20 de abril de 2015 en el DOF; sin embargo, se sabe que para el 2017; 105 de los 653 acuíferos ya se encontraban en condiciones de sobreexplotación; 32 tienen presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 presentan intrusión marina; razón por la cual ha sido

necesario emitir distintos ordenamientos jurídicos, tales como vedas, reglamentos, zonas reglamentadas, zonas de reserva y el acuerdos de suspensión de libre alumbramiento, con el fin de controlar y revertir la sobreexplotación de las aguas subterráneas (CONAGUA, 2018).

### **2.2.3 Disponibilidad de agua en Colima y Manzanillo**

El estado de Colima se encuentra ocupando parcialmente la Región Hidrológica número 15, denominada Costa de Jalisco, y la región hidrológica número 16, Ríos Armería – Coahuayana (CONAGUA, 2015). El volumen de extracción de agua subterránea en el estado de Colima es de aproximadamente 241 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales el 66.5 % son utilizados para consumo agrícola, 30.98 % para uso público-urbano, 0.08 % para abrevadero y el 2.33 % se destina a la industria. Así mismo, el volumen de recarga estimado es de 388 millones de m<sup>3</sup>, lo que refleja un superávit de 147 millones de m<sup>3</sup> (INEGI, 1995).

En lo que se refiere a Manzanillo; de 1961 al 2016 el municipio presentó una precipitación promedio anual de 1001.5 mm, siendo el periodo comprendido entre junio y noviembre los meses en los que se presenta aproximadamente en el 92.85 % de la precipitación; de diciembre a enero el 4.74 % y tan solo el 2.41 % restante de febrero a mayo (INEGI, f2017b). Cabe señalar que en estos últimos meses el nivel de los mantos freáticos tiende a disminuir, debido principalmente al consumo que demandan los usuarios y a la poca aportación de infiltración por parte del agua de lluvia.

### **2.2.4 Ubicación del predio**

El lugar en el que se centra esta investigación se trata de una parcela de plátano ubicada en el ejido el Colomo y la Arena, en el municipio de Manzanillo, Colima; con coordenadas 19°00'59.7"N 104°13'25.4"W.

La plantación se encuentra dentro de la región que corresponde al acuífero de El Colomo - clave 0607 - el cual a su vez pertenece a la región hidrológico-administrativa "Lerma-Santiago-Pacífico". Su ubicación geográfica se muestra en la Figura 1.1, donde la imagen satelital indica con un punto rojo el sitio donde se localiza el pozo profundo de donde se extrae el agua para irrigar el cultivo y, al otro extremo de la línea

de medición, se encuentra señalado parte de lo que es el vaso tres de la laguna de Cuyutlán.

De acuerdo con la medición realizada con el programa Google Earth, existen menos de mil metros de distancia entre la laguna y el pozo profundo y, de acuerdo al propietario del cultivo, no se tiene la certeza de cuál sea la causa que haya provocado la alteración en su agua de riego en los últimos años. Pese a que el uso del pozo es exclusivo para el riego de la parcela, normalmente el agua que extraen del subsuelo cuenta con la calidad suficiente incluso para ser potable. No obstante, se tiene el antecedente de una serie de alteraciones y construcciones realizadas en la laguna aledaña y en sus alrededores que, parecen coincidir con el surgimiento de este trastorno, identificado principalmente por cambios en el aroma del agua y que en dado caso podría sumarse a las temporadas de sequías y a los muchos otros factores mencionados anteriormente que terminan por influir en la composición del agua.

Al respecto, actualmente en esta parcela no se cuenta con ningún medio que les permita estar evaluando las características del agua que utilizan; únicamente los análisis generales que por ley se requieren para mantener activo el pozo. Debido a esto se buscó contar con un medio que proporcione información de las condiciones del agua utilizada para el riego en esa parcela para que el agricultor pueda tomar las medidas adecuadas cada que se presenten anomalías.

### **2.2.5 Acuífero El Colomo**

El acuífero El Colomo pertenece a la Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma-Santiago-Pacífico, misma a la que pertenecen los estados de Aguascalientes, Colima, Guanajuato, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Nayarit, Querétaro y Zacatecas (CONAGUA, 2017).

La zona geohidrológica del acuífero El Colomo, colinda al oriente con zona geohidrológica de Venustiano Carranza tiene una extensión de 210.72 km<sup>2</sup>; se encuentra ubicada totalmente en el municipio de Manzanillo, Col.; dentro de las principales poblaciones que abarca se encuentran Colomos y las Adjuntas, donde su principal actividad es la agricultura, el comercio y los servicios turísticos en la zona

costera del municipio de Manzanillo. Además, cuenta con una recarga media anual de 43 millones de m<sup>3</sup>, de los cuales, un volumen de aproximadamente 17.73 millones de m<sup>3</sup>, se encuentra concesionado. Cabe mencionar que, en el estado de Colima, así como en todo el país, cualquier concesión o asignación de pozos o norias para la extracción de agua subterránea, debe realizarse conforme a lo dispuesto en el artículo 22 segundo párrafo de la Ley de Aguas Nacionales (LAN), donde entre otras cosas se señala que para dicho fin se debe tomar en cuenta la disponibilidad media anual del agua y estar sujeto a revisión al menos cada tres años (CONAGUA, 2015).

### **2.2.6 Laguna de Cuyutlán**

La laguna de Cuyutlán es una subcuenca hidrológica que se encuentra comprendida dentro de la cuenca Chacala-Purificación, la cual a su vez, forma parte de la región hidrológica número 15 denominada Costa de Jalisco (INEGI, 2017b). En esta subcuenca desembocan dos arroyos que nacen en la sierra de Perote: El Zacate y Agua Blanca. Por otra parte, la laguna de Cuyutlán cuenta con tres canales que la comunican directamente al mar; los canales de Ventanas, Tepalcates y Cantúnel, por lo que, pese a la aportación de agua dulce proveniente de los arroyos, el agua de la laguna de Cuyutlán, posee una concentración de sal parecida a la que se encuentra en el mar (INEGI, 1995); siendo este hecho aprovechado por las personas para la extracción de sal (SEMARNAT, 2015).

La laguna de Cuyutlán está dividida en cuatro cuerpos de agua denominados Vaso I, Vaso II, Vaso III y Vaso IV (ver Figura 2.1), los cuales, están delimitados entre sí por barreras físicas naturales y artificiales que regulan el intercambio de agua y el paso de sedimentos (Torres & Quintanilla-Montoya, 2014). Cada uno de estos vasos posee características fisicoquímicas y biológicas particulares derivadas del agua dulce proveniente de los escurrimientos naturales, del agua marina y de las alteraciones provocadas por el ser humano al introducir materiales de desecho y al modificar la estructura natural de la laguna a través de construcciones civiles (SEMARNAT, 2015).



Figura 2.1 Vasos de la laguna de Cuyutlán. Obtenida de (Lara, 2012).

Esta laguna ha sufrido cambios importantes de tipo antropogénico, como la construcción de El Dique Salinero a principios del siglo XX, que divide a los vasos III y IV; la conformación de un ferrocarril alrededor del año 1889, que cruza la laguna y que conecta a Manzanillo con el centro del país, lo que entre otras cosas obstruyó la circulación del agua, creando algunas áreas con deficiencia de oxígeno y fuerte olor a sulfuros; razón por la cual se construyó el túnel del Porfiriato o “Cantúnel” en 1932, el cual constituyó la primera conexión al mar. Más tarde, en 1978, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) construyó la segunda conexión al mar, el canal Ventanas, con el objetivo de obtener agua para el sistema de enfriamiento del Complejo Termoeléctrico de Manzanillo (CTM). Posteriormente, debido a las necesidades de caudal del CTM, se construyó el canal de Llamada, seccionando el vaso I. Por último, en el año 2000 se abrió el canal Tepalcates, al sureste del vaso II, para incrementar el intercambio de agua entre la Laguna y el mar (Lara, 2012).

### 2.2.7 Requerimientos de agua del plátano

El plátano se desarrolla mejor en climas tropicales con condiciones húmedas y cálidas (Kruiter, 1989). Aproximadamente, de 85 a 88 % del peso de la planta de plátano está constituido por agua. Su cultivo requiere de un suministro mínimo de 100 a 180 mm por mes durante todo el año para satisfacer sus necesidades elementales; sin embargo, la precipitación óptima para el desarrollo de la planta es de 2000 a 3000



mm anuales, con una buena distribución durante el año. De no ser así, es necesario suministrar riego en los meses de sequía (Vazquez et al., 2005).

Herrera & Colonia (2011) señala que para tener una buena producción de plátano es indispensable proveer al cultivo de la humedad necesaria, especialmente en los meses de sequía del año, por lo que se deben aplicar riegos oportunos y adecuados. Incluso Lardizabal (2007) comenta que un buen riego es más importante que la fertilización misma, debido a que la planta no puede tomar los nutrientes que necesita de la tierra o el fertilizante por sí sola, ya que “si no manejamos bien el riego no hay buena sopa ni sistema radicular, por lo que se le debe dedicar tiempo al riego y a cómo se maneja la humedad de nuestro suelo.” Por otra parte, para que el cultivo pueda desarrollarse y producir frutos de forma eficiente necesita agua de buena calidad.

### **2.2.8 El riego en el predio El Colomo**

Cuando un cultivo perene como lo es el plátano cuenta con una fuente de agua suficiente para abastecerlo incluso en la temporada de sequía, le permite generar una actividad constante de producción en la que se puede obtener cosecha cada 18 o 20 días; sin embargo, en el caso específico de la parcela que atañe a este trabajo, el agua de riego proviene de un pozo de 40 m de profundidad, por lo que se debe tener en cuenta que el manto freático del que se extrae el agua para irrigar las plantas, al mismo tiempo debe abastecer a los diferentes fines con que los demás usuarios la utilizan y, aun cuando las concesiones de extracción de agua subterránea regulan el número y las características de las tomas, en la temporada de sequía, la escasa recarga de los acuíferos, aunado a la demanda de los concesionarios, puede hacer descender el nivel de los mantos hasta llegar a niveles más sedimentarios e incluso a presentar infiltraciones mayores provenientes de los cuerpos de agua aledaños, que en este caso podría ser la laguna de Cuyutlán, teniendo esto repercusiones en el suelo y en el cultivo irrigado con esta agua. Esto actualmente se puede ver reflejado en la parcela, ya que se tiene el antecedente de que el agua utilizada para el riego de las plantas sufre de variaciones en su composición a lo largo del año, principalmente en los meses de sequía; que se ha podido percibir en algunas ocasiones a partir de un aroma

anormal en el agua y que ha causado pérdidas para el agricultor a raíz del detrimento y enfermedad de los vástagos irrigados con esta agua.

Actualmente, el productor sigue realizando los estudios al pozo de su parcela que corresponden a lo reglamentado en su concesión; sin embargo, hasta el momento no cuenta con una forma eficiente para manejar esta situación; que le alerte ante cambios de la calidad de su agua y que le permita tomar las medidas adecuadas para su cultivo.

## **2.3 Marco teórico**

A continuación, se describen conceptos teóricos utilizados a lo largo de esta tesis.

### **2.3.1 Nutrición del plátano**

Las plantas de banano requieren un conjunto de nutrientes para su correcto desarrollo; macronutrientes como el nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y azufre; particularmente grandes cantidades de nitrógeno y potasio. El descontrol de dichos nutrientes puede afectar al cultivo tanto en su desarrollo como en su proceso postcosecha. Un ejemplo posterior a la cosecha es el caso del tratamiento térmico, en el que los bananos son sumergidos en agua caliente para contrarrestar ciertas enfermedades y, debido a la falta de potasio, se reduce la flotabilidad del fruto, provocando que este se hunda e interfiriendo con el proceso. De ser así, se puede aplicar potasio extra en el suelo para restaurar la flotabilidad de la fruta. Por otra parte, dentro de los micronutrientes que requieren los bananos se encuentran el boro, hierro, manganeso, cobre, zinc, molibdeno, cloro y cobalto; cuyas deficiencias en estos elementos pueden repercutir en una malformación morfológica de las hojas, un crecimiento y rendimiento reducidos, así como también en una producción de mala calidad de la fruta (Australian Government, 2008).

### **2.3.2 Intrusión marina**

De acuerdo con CONAGUA (2018), la salinización de los suelos y la presencia de aguas subterráneas salobres se producen como resultado de altos índices de evaporación en zonas de niveles someros de agua subterránea, disolución de minerales evaporíticos y presencia de agua congénita de elevada salinidad. Así

mismo, las aguas salobres se presentan específicamente en aquellos acuíferos localizados en provincias geológicas caracterizadas por formaciones sedimentarias antiguas, someras, de origen marino y evaporítico, en las que la interacción del agua subterránea con el material geológico produce su enriquecimiento en sales.

### **2.3.3 Calidad del agua**

La calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado; por ejemplo: el consumo humano o el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indeseables o riesgosos. En este sentido, el deterioro de la calidad del agua ocurre por procesos naturales o antropogénicos (CONAGUA, 2018).

### **2.3.4 Calidad agronómica del agua**

La calidad indica generalmente idoneidad de uso y es por tanto difícil de evaluar, a no ser que se realice en términos relativos a su uso específico. La idoneidad de un agua de riego se establece en relación a la evolución de la peligrosidad potencial sobre los suelos y cultivos que compartan su uso y a las estrategias de manejo del riego capaces de reducir los riesgos derivados de su calidad (Domingo, 2017).

### **2.3.5 pH**

El pH o potencial de hidrógeno, es una medida que representa la actividad de iones de hidrógeno, es decir, la acidez o alcalinidad de una solución acuosa a una temperatura específica, usualmente a 20 °C o 25 °C. Se mide en una escala continua que va de 0 a 14 y se pueden utilizar diferentes tipos de herramientas para obtener este parámetro, como medidores electrónicos (mejor conocidos como pH-metros) o tiras reactivas de papel; sin embargo, los medidores electrónicos los más utilizados en aplicaciones que requieren de mayor precisión (Lawn, 2003).

Se le denomina potencial hidrógeno porque está directamente relacionado a la proporción de las concentraciones de los iones de hidrógeno [H<sup>+</sup>] e hidroxilo [OH<sup>-</sup>]. De

esta manera, si la concentración de  $H^+$  es mayor que la de  $OH^-$ , el material es ácido (el valor del pH es menor que 7) y viceversa, si la concentración de  $OH^-$  es mayor que la de  $H^+$ , el material es básico (el valor de pH es mayor que 7). En el caso de que las cantidades de  $H^+$  y de  $OH^-$  sean las mismas, el material es neutral y su pH es 7. La relación entre los iones de hidrógeno y de hidroxilo en determinada solución es constante para un dado conjunto de condiciones y cada uno puede ser determinado a partir del otro (OMEGA Engineering, 2003).

### **2.3.6 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE), expresa la capacidad de un medio para transmitir una corriente eléctrica, debido a que esta y la concentración total de sales de una solución acuosa están estrechamente relacionadas, frecuentemente se utiliza la CE como una expresión de la concentración total de sales disueltas en el agua (Rhoades et al., 1999). Sus unidades en el Sistema Internacional de Unidades (SI) son los siemens por metro (S/m) aunque, debido a las dimensiones habituales de este parámetro en el agua de riego, se acostumbra utilizar los decisiemens por metro (dS/m).

### **2.3.7 Transductor**

Para obtener las mediciones de los parámetros deseados, es necesario convertirlos en otras variables físicas más convenientes que se encuentren en función de la variable medida por medio de transductores. En este sentido, un transductor es aquel dispositivo capaz de convertir una variable física en otra con un dominio distinto. De acuerdo con esto, se puede afirmar que un transductor forma parte de un sensor (Corona, Abarca, & Mares, 2014).

### **2.3.8 Sensor**

Es necesario asegurarse de que las señales procedentes de los transductores tengan un comportamiento predecible o entendible por los usuarios. Es por esto que los sensores toman la señal del transductor y la convierten a una salida normalizada que pueda ser utilizada (Pallás, 2003). Así pues, los sensores son dispositivos

electrónicos que nos permiten interactuar con el entorno, ya que nos proporcionan información del comportamiento de las variables que nos rodean y que son de nuestro interés, con el fin de utilizar dichos datos para generar una respuesta en el entorno (Serna, Ros, & Rico, 2010).

### **2.3.9 pH-metro**

El pH-metro o sonda de pH, es un instrumento utilizado para medir la acidez o alcalinidad de un líquido; está compuesto básicamente de electrodos y un potenciómetro, donde la función del potenciómetro es medir la diferencia de potencial que se establece entre los electrodos al entrar contacto con la solución (J. López, Gómez, Rivas, & Losada, 1974). La sonda utilizada para este proyecto cuenta con una membrana de vidrio en la punta. Dicha membrana permite que los iones de hidrógeno presentes en el líquido se neutralicen en la capa externa del vidrio, mientras que los iones más grandes permanecen en la solución. La diferencia en la concentración de iones de hidrógeno (fuera de la sonda versus dentro de la sonda) crea una corriente muy pequeña que es proporcional a la concentración de iones de hidrógeno en el líquido que se mide (Atlas Scientific, 2002).

### **2.3.10 Sonda de CE**

Como su nombre lo indica, este tipo de sondas miden la CE en una solución y se usan comúnmente en sistemas hidropónicos, acuícolas y de agua dulce para controlar la cantidad de nutrientes, sales o impurezas en el agua. Dentro de la sonda de conductividad existen dos electrodos que se colocan opuestos entre sí para después aplicar un voltaje a los electrodos, lo que hace que los cationes se muevan al electrodo cargado negativamente, mientras que los aniones se mueven al electrodo positivo. Cuanto más electrolito libre contiene el líquido, mayor es la CE (Atlas Scientific, 2019).

### **2.3.11 Sensor de temperatura**

Las mediciones de pH y CE del agua son afectadas de manera directa por la temperatura. Es por esto que debe aplicarse una compensación a la medición de dichos parámetros basada en la temperatura presente en el agua que se está

midiendo. Para obtener este parámetro se emplea un tipo de sensores que utilizan el platino como base, debido a la correlación tan precisa que existe entre la resistencia del elemento y la temperatura a la que se encuentra sometido en cualquier momento. Es por esto que el sensor de temperatura resistivo (RTD, por sus siglas en inglés: Resistance Temperature Detector) de platino es el estándar industrial para la medición de temperatura (Atlas Scientific, 2018).

### **2.3.12 Lógica difusa**

Como se sabe, gran parte de la lógica detrás del razonamiento humano no está basada en conceptos precisos. De esta manera, la mayoría de las decisiones en el mundo real se llevan a cabo en un ambiente en el cual los objetivos, las restricciones y las consecuencias de las acciones posibles no son conocidos con precisión. Esto justifica y sienta las bases de la lógica difusa, actualmente es considerada una generalización de la teoría de conjuntos que permite que elementos de un universo tengan grados intermedios de pertenencia a un conjunto por medio de una función característica.

Gran parte de la lógica detrás del razonamiento humano no está basada en conceptos precisos. Por este motivo una parte importante de las decisiones que se toman en el mundo real se llevan a cabo en un ambiente en el cual los objetivos, las restricciones y las consecuencias de las acciones posibles no pueden establecerse con precisión, lo que pone en aprietos a la lógica clásica o bivalente en la que únicamente son admitidos dos valores de verdad. Así pues, la lógica difusa es considerada una generalización de la teoría de conjuntos que permite que elementos de un universo tengan grados intermedios de pertenencia a un conjunto por medio de una MF o función característica (Pérez, 2007), con lo que provee de una herramienta para poder trabajar con conceptos que no están delimitados estrictamente, en lugar de descartarlos en su totalidad mediante la imposición arbitraria de afirmaciones ciertas o falsas que parte únicamente de la lógica bivalente.

La lógica difusa representa modelos o conocimiento utilizando reglas IF-THEN en la forma “*si X entonces Y*”.

Un modelo difuso es una construcción de modelado que presenta dos propiedades principales (Xu & Khoshgoftaar, 2004)

- Opera a un nivel de términos lingüísticos (conjuntos difusos que son conjuntos cuyos elementos tienen grados de pertenencia), y
- representa y procesa la incertidumbre.

La lógica difusa ofrece una forma particularmente conveniente de generar una correspondencia entre los espacios de entrada y salida gracias a la expresión natural de las reglas difusas (Zadeh, 1999).

### 2.3.13 FIS Mamdani

Las reglas de los sistemas difusos estándar tipo Mamdani tienen la forma:

$$R_i: IF x_1 is A_1^j \text{ and } \dots \text{ and } x_n is A_n^j THEN y is B^j \quad (1)$$

Donde  $R_i$  denota la  $i$ -ésima regla,  $i = 1, \dots, N_r$ , donde  $N_r$  es el número de reglas,  $x_n$  es la  $n$ -ésima entrada del sistema difuso,  $A_n^j$  y  $B^j$  son los conjuntos difusos descritos por la MF  $\mu_{A_i,j}(x_i): \rightarrow [0,1]$  y  $\mu_{B^j}(y): \rightarrow [0,1]$ . Las proposiciones en la parte del antecedente IF, están combinadas mediante la aplicación de operadores mínimos. A veces el producto es calculado, pero la mayoría depende de la situación. El número de proposiciones en la parte del consecuente THEN de las reglas depende del número de salidas del sistema difuso.

### 2.3.14 Microcontrolador

Un microcontrolador o MCU, puede definirse como un ordenador integrado en un solo chip. Puede tener todos o la mayoría de los componentes de una computadora, tal como procesador, memoria y periféricos de entrada/salida. Aun así, gracias a que su uso está orientado al control de tareas específicas, se ha convertido en una herramienta tecnológica eficaz y a un costo relativamente económico (Yadav & Kúmar, 2004).

Comúnmente los microcontroladores son embebidos en el interior de algún dispositivo o tarjeta electrónica de desarrollo que, generalmente está habilitado con

zócalos, leds, osciladores, circuitos reguladores de voltaje y demás elementos que permiten aprovechar la mayoría de las prestaciones que un MCU ofrece, como poder interactuar con el entorno y lograr el control de una gran cantidad de dispositivos como sensores y actuadores. Ejemplos de tarjetas de desarrollo ampliamente utilizadas en todo el mundo son las que utiliza la plataforma de Arduino, como la Arduino Uno, Arduino Mega 2560, Arduino LilyPad, entre otras.

### **2.3.15      Arduino**

Arduino es una plataforma de prototipado electrónico basada en el concepto de hardware y software “libre”, lo que permite su uso y desarrollo de manera colectiva. Es una plataforma “conectada al entorno”, es decir, permite desarrollar proyectos utilizando sensores y actuadores que, a su vez, posibilitan la construcción de sistemas que perciben la realidad y responden con acciones físicas. Dicha plataforma fue creada en el año 2015, con el objetivo de servir como base para proyectos de bajo costo y de una forma lo suficientemente simple para ser utilizado por desarrolladores. Está basada en tarjetas equipadas con microcontroladores Atmega, como por ejemplo la tarjeta Arduino UNO (ver Figura 2.2). Además, está desarrollada sobre una biblioteca que simplifica la escritura de la programación en C/C++. Este paquete de desarrollo es capaz de interpretar variables de entorno y transformarlas en las señales eléctricas correspondientes a través de sensores conectados a sus terminales de entrada para tener el control o accionamiento de algún otro elemento electrónico conectado a la terminal de salida (Caicedo, 2017).



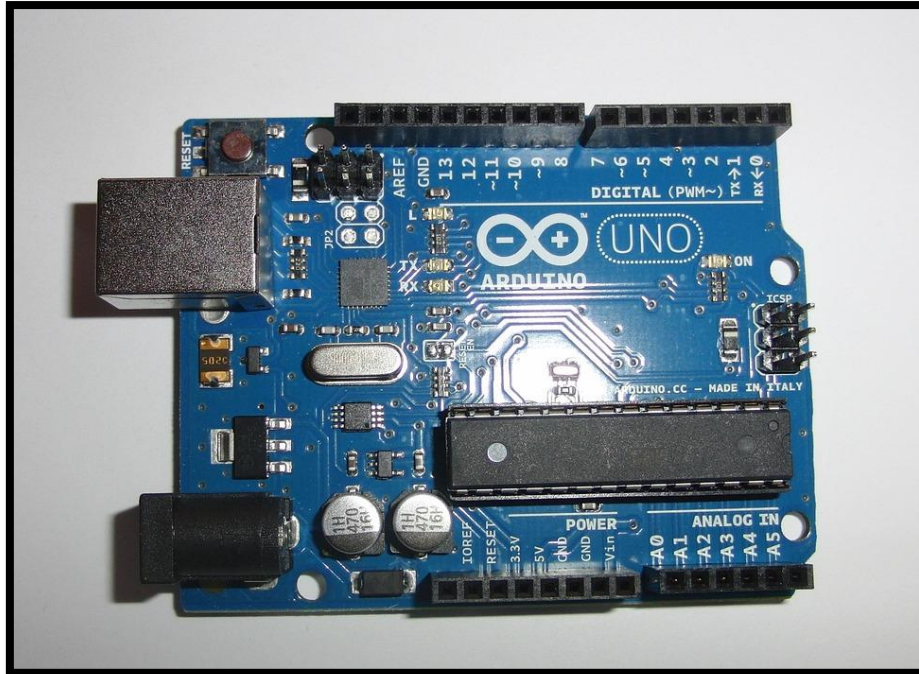


Figura 2.2 Placa electrónica Arduino UNO. Obtenida de pixabay.com.

### 2.3.16 XBee

De acuerdo con DIGI (2013), XBee es una implementación de Digi basada en el protocolo Zigbee que proporciona soluciones integradas para brindar un medio inalámbrico de interconexión y comunicación de bajo consumo entre dispositivos; es decir, son pequeñas radios (ver Figura 2.3) que pueden comunicarse de forma inalámbrica unas con otras sin requerir de mucha energía. Utilizan un estándar de red llamado IEEE 802.15.4 para crear redes POINT-TO-MULTIPOINT (punto a multipunto); o para redes PEER-TO-PEER (punto a punto). Fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible. Además, cuentan con entradas y salidas digitales y analógicas que pueden ser controladas, y a las que pueden ser conectados sensores para obtener mediciones en forma remota.

En una red ZigBee existen tres tipos de nodos o formas de trabajo posibles para los XBee: coordinador, ruteador y dispositivo final. A su vez, los módulos XBee cuentan con tres modalidades de comunicación: modo transparente, modo comandos AT y modo API. Por defecto los dispositivos vienen configurados en modo transparente. En

esta modalidad los dispositivos se comunican directamente como si estuvieran conectados a través de un cable; lo que entra por el puerto serie de un XBee automáticamente es transmitido al otro módulo y de igual manera, lo que el otro módulo reciba vía serial, lo envía al otro XBee. Por su parte, el modo AT es una modalidad que se utiliza principalmente para configurar los dispositivos cuando se desea hacerlo sin tener que configurar uno por uno cargando un programa a la vez; de esta manera un dispositivo manda los comandos AT a una red y esta puede configurarse automáticamente. Por último, el modo API permite enviar y recibir información en forma de paquetes; dicha información puede contener comandos de configuración, así como información de las direcciones del emisor y remitente (Oyarce, 2008).



Figura 2.3 Radio XBee. Obtenida de (DIGI, 2018).

### 2.3.17 Estándar 802.15.4

El estándar 802.15.4 de la IEEE forma parte de un grupo de estándares destinados a reglamentar la realización de redes personales inalámbricas, o WPAN's (Wireless Personal Area Networks). Este estándar se encarga de establecer una comunicación confiable mediante un enlace de RF, permitiendo además el uso de broadcast para direccionar varios dispositivos a la vez. Su confiabilidad se obtiene mediante la detección de errores, acuse de recibo y retransmisiones; de modo que se pueda determinar si un mensaje se entrega o no. Además, requiere relativamente de poca

potencia de procesamiento y baja inversión de infraestructura, facilitando la puesta en marcha de estos equipos con bajo consumo de energía y recursos (Caprile, 2009).

### **2.3.18 DigiMesh**

DigiMesh o red de malla es una topología patentada de redes inalámbricas punto a punto desarrollada por Digi International. El protocolo permite tanto nodos como enrutadores en modo sleep, sincronización y funcionamiento con batería de baja potencia. El protocolo actualmente es compatible con varios módulos de radio de 900 MHz y 2.4 GHz de Digi International, como es el caso del XBee-PRO 900HP. Además, la red de malla es una forma poderosa de enrutar datos cuya metodología amplía las capacidades de rango, al permitir que los datos viajen de nodo a nodo. Además, este tipo de redes aumentan la confiabilidad a través de la "recuperación automática", que es la capacidad de crear rutas alternativas cuando falla un nodo o se pierde una conexión (DIGI, 2019).

### **2.3.19 Modo API**

El modo de operación API (por sus siglas en inglés: Application Programming Interface), es una modalidad que permite administrar redes grandes de XBee's. Es la forma más apropiada para realizar tareas como recopilar datos de múltiples ubicaciones o controlar múltiples dispositivos de forma remota. El modo API es un protocolo basado en "tramas" que le permite dirigir los datos a través de paquetes. Puede ser particularmente útil en redes en las que se necesita control sobre la red de radio o cuando se requiere saber de qué dispositivo provienen los paquetes de datos. El dispositivo comunica datos UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) o SPI (Serial Peripheral Interface) en paquetes, también conocidos como tramas API, las cuales son estructuras que contienen información de configuración y dirección del emisor y remitente, así como la carga útil o información que se desea transmitir entre otras cosas. Como se muestra en la Figura 2.4, su estructura comienza por un byte que indica el inicio de la trama; los siguientes dos bytes indican la longitud; después, se colocan los bytes que corresponden a la estructura específica de la trama que se va a trabajar y por último se ingresa el byte de la suma de comprobación, cuya labor

es garantizará un manejo correcto de la trama dentro de la red de radiofrecuencia (DIGI, 2018).

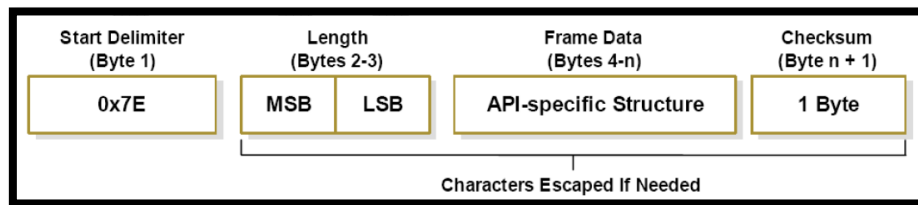


Figura 2.4 Estructura de la trama del modo API. Obtenida de (Oyarce, 2008).

### 2.3.20 XBee Shield

Una fuente de alimentación deficiente puede conducir a un rendimiento deficiente del XBee; especialmente si no se mantiene la fuente de alimentación dentro de la tolerancia o si el ruido es excesivo. No obstante, la tarjeta XBee Shield, provee de una fuente de voltaje con la calidad necesaria para alimentar los módulos. Además, es una tarjeta electrónica desarrollada por MCI Electronics que simplifica la tarea de conectar un módulo XBee con una tarjeta Arduino, permitiendo a esta comunicarse de forma inalámbrica utilizando Zigbee (Arduino, 2020).

### 2.3.21 I2C

De acuerdo con Steiner (2005), I2C es un protocolo basado en una relación esclavo-maestro. El microcontrolador (que en este caso es el maestro), tiene completo control sobre la comunicación que se realiza con cada uno de los dispositivos esclavos I2C. Un esclavo no puede "hablar" a menos que le haya hablado primero el maestro. El bus I2C está conformado únicamente por dos líneas de comunicación:

- Serial Data (SDA): Es la línea de datos. Es una línea bidireccional utilizada para escribir información proveniente del microcontrolador a los dispositivos esclavos I2C, o leer información del esclavo para el microcontrolador.
- Serial Clock (SCL): Como su nombre lo indica, es la línea del reloj. Es empleada para indicar cuando hay información válida en SDA y para proveer de una señal de tiempo que controle la comunicación entre el microcontrolador y los dispositivos esclavos.

# Métodos Empleados

En el presente capítulo, se describen cada uno de los métodos, técnicas, procedimientos y demás herramientas utilizadas en el desarrollo de este trabajo.

### 3.1 Tipo de investigación

Una vez que se identificó el problema a resolver, se optó por utilizar la investigación aplicada, cuyo propósito de acuerdo a (Sampieri, 2014), es el de resolver problemas. Esto a través del uso de los conocimientos especializados con que se disponen, aunado a la investigación y el estudio que se requiere para asimilar aquella información con que no se cuenta y sea necesaria para brindar una solución adecuada al problema planteado.

Debido a que los requerimientos del proyecto son claros y delimitados, al igual que las herramientas a utilizar para dar solución al problema; se decidió por utilizar la metodología en cascada para el control secuencial de las etapas de desarrollo del proyecto basada en (Pressman, 2012) ya que, de acuerdo con este autor, cuando los requerimientos están bien definidos y tienen una estabilidad razonable, es recomendable utilizar esta técnica. En la Figura 3.1 se muestran las etapas que fueron contempladas para desarrollar este proyecto.

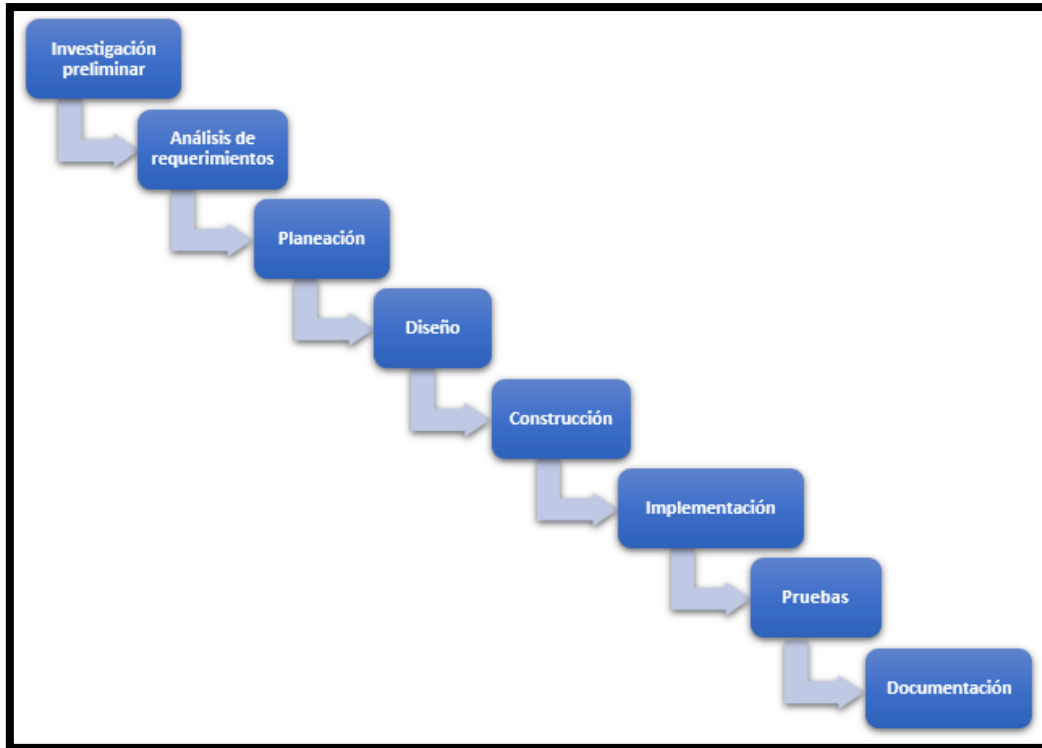


Figura 3.1 Modelo en cascada para el desarrollo del proyecto. “Elaboración propia”.

## 3.2 Investigación preliminar

Como primera actividad se realizó una visita de campo a las instalaciones propias de su parcela, donde se produce y se empaqueta plátano para su distribución y venta, mismas donde se presenta la problemática a tratar. En el lugar, el ingeniero Agustín Hueso Alcaraz expuso los hechos relevantes y las características que describen la situación en su parcela que es objeto de atención por poner en riesgo a su cultivo, específicamente del agua de riego, por lo que posteriormente se visitó el área de extracción de agua, donde se pudo examinar con cuidado las instalaciones y el equipo con que cuentan en esta empresa para el suministro de agua de riego. Al tiempo que el propietario describía las circunstancias específicas en que se presentan las alteraciones en el agua, hubo oportunidad para aclarar dudas y responder a las preguntas que previamente se prepararon para la ocasión. Al cabo de la charla se logró generar una idea más clara del panorama en general, así como lo que, de acuerdo con sus necesidades, el productor espera obtener como solución para que su plantación deje de ser afectada. Hecho esto se procedió a realizar una investigación

exhaustiva en diversas fuentes bibliográficas como libros, trabajos de tesis, artículos científicos y demás textos de investigación relacionados con el tema, para así comprender a fondo la situación y poder vislumbrar las posibles causas del problema, así como ofrecer alternativas de solución con un sustento científico firme y con viabilidad técnica y económica.

### **3.3 Análisis de requerimientos**

Una vez recabados todos los pormenores en la parcela, así como la teoría necesaria para entender la problemática y dar fundamento a las posibles soluciones, se procedió a realizar el estudio de los requerimientos. Algunos de ellos fueron especificados de forma directa por parte del productor, como la frecuencia de medición y algunos de los parámetros del agua que, de acuerdo con su experiencia en la producción de plátano, le serían de utilidad para manejar su cultivo. Otros como la temperatura y el tipo de sensores, fueron definidos con base en las características específicas de los parámetros a medir y del uso del agua que se pretende monitorear, que en este caso es para agua de riego. Así mismo se evaluaron las condiciones del lugar donde resulta factible la instalación de un sistema con las cualidades deseadas y la necesidad de llevar la información hasta un ordenador ubicado en las oficinas de la empresa. No obstante, se planteó la posibilidad de contar además con una pantalla que permita mostrar el valor de los datos en tiempo cuasi real para que los usuarios pudieran consultarlo con mayor facilidad.

Para definir el total de parámetros a medir y conseguir una evaluación de la calidad agronómica del agua se buscó una alternativa con la capacidad de involucrar tan pocos parámetros como fuera posible para reducir los costos de implementación, pero que fuera lo suficientemente representativo y determinante para el cultivo a través de técnicas inteligentes que aumenten el potencial de la información. Además, en todo momento se procuró contemplar aquellos materiales y componentes que resultasen en un producto final más accesible, sin dejar de cumplir con las metas establecidas. Con base en lo anterior se pudo realizar un análisis de las tecnologías disponibles para solucionar el problema, de los costos y de las actividades necesarias a realizar para poder implementar la solución más adecuada.

### 3.4 Planeación

Con base en los requerimientos definidos hasta el momento, se definieron cinco etapas generales para alcanzar el desarrollo del proyecto, las cuales se enumeran a continuación.



Posteriormente, se estudiaron las diferentes tecnologías disponibles en el mercado para el monitoreo del agua, así como aquellas herramientas que pudieran utilizarse en el desarrollo de alguna de las cinco etapas mencionadas. De igual forma, se analizaron diversos trabajos de investigación en los que se planteaba el monitoreo del agua con fines agronómicos. Todo esto permitió conocer las tecnologías más actuales; descubrir aquellos puntos donde es posible innovar, las áreas de oportunidad, así como algunos aspectos y recomendaciones a considerar antes de desarrollar este proyecto. Así mismo, se buscó que las alternativas emergentes contemplaran componentes funcionales y accesibles económicamente, además de mantener una comunicación constante con el productor para asegurar que el producto final cubriera sus necesidades y pudiera desarrollarse en tiempo y forma con los recursos disponibles. Por otra parte, se analizaron las diferentes tareas a realizar y los recursos involucrados en cada una de las etapas para llevar un control adecuado. Se realizó una calendarización de las actividades y metas a lograr, con base en el tiempo estimado para definir y disponer de los materiales de construcción, así como el tiempo de aprendizaje necesario para manipular los dispositivos a implementar. En el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede consultar el cronograma de



actividades correspondiente al periodo de desarrollo de este proyecto, que va del 28 de enero de 2019 al 26 de junio de 2020.

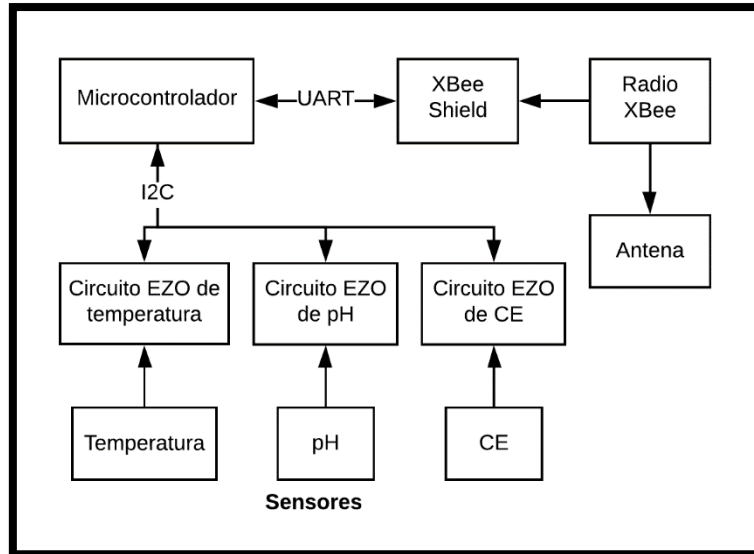
### 3.5 Diseño

Para el diseño de la primera etapa, correspondiente a la adquisición de datos, se analizaron las alternativas posibles acorde a la implementación. Debido a que la esencia del proyecto radica en la medición de parámetros del agua utilizada para riego y a que dicha agua proviene del subsuelo; primeramente se hizo un análisis de dónde podría ubicarse un equipo de medición basado en las características de la instalación hidráulica de riego presente en la parcela (ver Figura 3.2); con lo que se optó por instalar una derivación a la salida de la tubería principal con una cápsula en el extremo, generando un flujo meramente representativo en el receptáculo por medio de una válvula, para de esta manera, contar en todo momento con las mismas características del agua de la toma principal. Así mismo, se procedió a buscar las opciones de sensores más apropiadas con base en las condiciones de trabajo a las que estarían sometidos normalmente. De igual manera, se buscó una solución que facilitara el acoplamiento de los sensores con el resto del proceso, por lo que optó por utilizar embebidos de la familia de Arduino.



Figura 3.2 Sección hidráulica principal.

Para la etapa de comunicación, debido a que en las instalaciones de la parcela no disponen de conexión a internet, la potencia de la red celular es débil y las características del entorno y distancia desde el punto de medición hasta el módulo de recepción vuelven poco viable el uso de cableado para transmisión de datos, se optó por hacer uso de dispositivos de comunicación por RF. No obstante, aun cuando en esta banda de frecuencia existen diversas alternativas tecnológicas, un punto clave para la selección de la tecnología a utilizar fue que en la parcela donde se enfoca este proyecto cuentan con un sistema de monitoreo para la prevención de la Sigatoka Negra en los vástagos de plátano y en el que utilizan módulos de RF XBee. Este tipo de tecnología, además de encontrarse dentro de las alternativas contempladas para la etapa de comunicación, permite generar grandes redes de radios controladas por un solo XBee, lo que a su vez posibilita crear una integración de ambos sistemas de monitoreo, de calidad del Agua y de Sigatoka, facilitando al productor el acceso a la información de todos sus equipos a través de un solo módulo de visualización. Esto requeriría únicamente de agregar un módulo XBee en la sección de riego y utilizar el mismo coordinador que se tiene con la Sigatoka, lo que reduciría el costo final de implementación. Únicamente es necesario trabajar en la configuración y en la programación de los paquetes de información que comunican los radios, ya que esta forma de trabajo requiere de una estructura específica en los datos, a diferencia de cuando sólo son dos módulos y se comunican como si estuvieran conectados por un “cable” serial. Estos aspectos fueron planteados al productor, a quien le pareció buena idea integrar ambos sistemas y estuvo de acuerdo con las propuestas que se le presentaron. A continuación, en la Figura 3.3 se muestra el diseño del módulo para la adquisición y envío de parámetros desde el punto de medición.



**Figura 3.3** Diseño del módulo de obtención. “Elaboración propia”.

Por otra parte, a lo largo de la investigación se encontró con la existencia de tarjetas especializadas para la intercomunicación directa de Arduino con los módulos XBee, lo cual facilitaría el trabajo de comunicación de los datos entre los sensores y el ordenador destinado a la recepción y almacenamiento de datos. Además, considerando las condiciones ambientales y el entorno en el que estaría trabajando el nodo de medición, se decidió utilizar una caja Nema con grado de protección IP65 (ver Figura 3.4), para así aislar lo más posible los componentes electrónicos del exterior y evitar daños en el equipo a causa del polvo y la humedad.



**Figura 3.4** Caja Nema IP65.

Después de recibir la información de las mediciones en el dispositivo final ubicado en las oficinas de la parcela de producción de plátano se pasa a la etapa de almacenamiento de la información donde, debido a la falta de una conexión a internet, se planteó utilizar una base de datos local, para posteriormente acceder a ellos y pasar a la etapa de procesamiento de la información en la que, haciendo uso del lenguaje de programación Python, se implemente un algoritmo de lógica difusa para evaluar la calidad agronómica del agua. Así mismo, para la etapa de presentación se decidió implementar una página local, donde se muestren las mediciones de pH y CE en tiempo cuasi real, los picos máximo y mínimo del día, así como el valor correspondiente a la calidad agronómica del agua. Cabe mencionar que, para disminuir aún más el costo de producción del equipo de monitoreo, se optó por utilizar parte del material disponible en el stock del laboratorio de posgrado, por lo que únicamente fue necesario adquirir algunos de los componentes.

### **3.6 Construcción**

Una vez definidos todos los componentes y establecida la estructura y la lógica de funcionamiento para todo el sistema, se procedió a trabajar en la configuración, programación y construcción de cada uno de los módulos encargados de cumplir con las cinco funciones meta establecidas previamente. En el

Apéndice B se muestra una tabla con todos los elementos específicos que componen el equipo de monitoreo final (sin considerar las herramientas que se utilizaron para su fabricación).

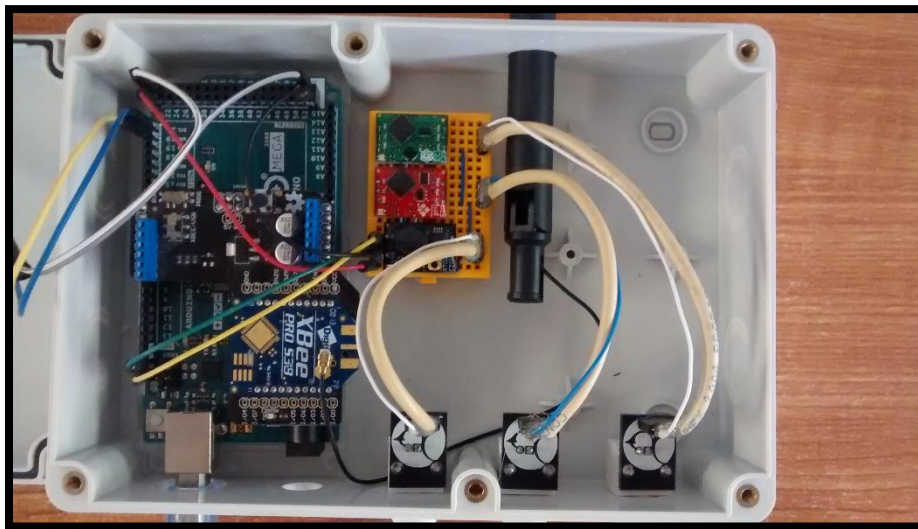
Para la carcasa del módulo de medición se adecuó una caja Nema; se realizaron orificios con la mayor precisión posible para evitar dejar huecos que pudieran permitir la entrada de elementos no deseables al interior como polvo, agua u otro líquido que pudiera tener contacto con el módulo. En este sentido, los conectores BNC no presentaron mayor problema al instalarse ya que cuentan con rondanas de sujeción, lo que permitió montar los conectores por fuera de la carcasa para una conexión externa de los sensores. Por otra parte, para la instalación de la pantalla LCD se realizó una apertura en la caja con las mismas dimensiones de la pantalla y se colocó silicón industrial en las orillas para sellar totalmente. El resultado se muestra en la Figura 3.5.



**Figura 3.5** Carcasa del módulo de medición.

Dentro de la carcasa se instalaron los componentes, de tal manera que no interfirieran entre ellos y dejando las partes esenciales lo más accesible posible previendo futuras intervenciones en el dispositivo. Para los circuitos EZO de traducción de los sensores se utilizó una tablilla para conexiones a la que se le colocaron las salidas de los conectores BNC, los cables de alimentación y tierra que se extrajeron

del Arduino y las salidas para la conexión I2C de los sensores, las cuales se conectaron a uno de los canales en la tarjeta del microcontrolador; así como también se conectaron la señal de datos y de reloj de la pantalla LCD en los pines 20 y 21 respectivamente del segundo canal I2C. Después se realizó el montaje de la tarjeta XBee Shield con el XBee y la antena sobre la placa Arduino, para por último extraer parte de la antena por el orificio previamente realizado en la carcasa. En la Figura 3.6 se muestra la conexión final de todos los elementos.



**Figura 3.6 Conexión interna del módulo de medición.**

El receptáculo y la derivación de la tubería fueron realizados por el personal de la propia parcela. Se llevó a cabo la calibración de los sensores y se puso en marcha la bomba para comenzar a tomar mediciones, mientras se verificó la operación adecuada del módulo receptor y de la interfaz de visualización de la información.

### **3.7 Implementación**

Tal como se muestra en la Figura 3.7, para la implementación se instaló el módulo de medición en un soporte colocado especialmente para este equipo, situado en la sección de la parcela que se encuentra destinada para la infraestructura de extracción de agua; así mismo, los sensores se ubicaron en la cápsula instalada en la derivación de la toma principal y se conectó el equipo mediante un regulador a una toma de 120 V, ubicada en las cercanías del sistema de monitoreo.





**Figura 3.7** Instalación del módulo de medición.

Una vez energizado el equipo se verificó que se comenzaron a visualizar las mediciones en la pantalla LCD, para posteriormente proceder a configurar e instalar los programas necesarios para almacenar y mostrar la información en el ordenador. Después se conectó el dispositivo de recepción en uno de los puertos USB para crear el enlace entre los módulos.

Por último, se proporcionó capacitación a los usuarios, y se resolvieron dudas respecto al funcionamiento del sistema.

### **3.8 Pruebas**

Una vez terminada la instalación se realizaron pruebas de caja negra con el fin de verificar la comunicación entre los módulos de adquisición y procesamiento. Para esto, primero se puso en marcha la bomba de extracción y se comprobó que las mediciones correspondieran a las del agua proveniente del subsuelo. Después se energizó el módulo de medición para verificar que en la pantalla apareciera la información correspondiente a los tres parámetros de interés y que esta estuviera actualizándose continuamente. Así mismo, se comprobó que la información llegara sin ningún problema hasta las oficinas donde se ubicó el dispositivo de recepción y que esta se mostrara adecuadamente en la interfaz, junto con la evaluación del agua y el

almacenamiento en la base de datos. Posteriormente, se realizó una doble comprobación del sistema contrastando las lecturas del módulo de medición con las del módulo receptor y se aseguró que fueran las mismas. Luego, debido a que no se pudieron conseguir sensores digitales de pH y CE, se utilizaron sustancias reveladoras para analizar el pH del agua y cotejar las lecturas con las lecturas del módulo de medición.

### **3.9 Documentación**

En esta fase se redactó la documentación del proyecto, donde quedaron establecidos, tanto las actividades desarrolladas, como las bases científicas que dan sustento a los procedimientos y decisiones tomados en este trabajo. Además, se desarrolló un pequeño manual (ver Anexo 3) con una serie de recomendaciones e instrucciones con el fin guiar al usuario en el proceso de familiarización con el sistema de Monitoreo de la Calidad Agronómica del Agua.



---

## Desarrollo del Prototipo

En el presente capítulo se describen las tareas realizadas en cada una de las etapas del desarrollo de desarrollo del proyecto. Dichas actividades se organizaron siguiendo las pautas del modelo descrito en el capítulo anterior.

### 4.1 Análisis

El análisis de la situación específica, del contexto y de la base científica que giran en torno a la problemática planteada, favoreció el desarrollo de la estructura del sistema propuesto (ver Figura 1.2) y que se presentó en el subtema 1.4. En dicho esquema, se aprecian cada una de las cinco etapas descritas en la sección 3.4. La obtención del pH, CE y temperatura se realiza en una derivación alterna a la tubería principal de suministro, cuyo flujo representativo proporciona al receptáculo de medición las mismas características del agua que llega hasta los vástagos de plátano.

Los sensores son colocados en el receptáculo mientras que su otro extremo es conectado a un módulo compuesto por una caja NEMA de grado de protección IP65 que alberga los tres embebidos para los sensores y el embebido central de control, una pantalla LCD, así como el módulo de RF encargado de realizar la comunicación con el módulo de recepción de datos encabezado por el XBee coordinador, el cual clasifica la información entrante de acuerdo con el remitente identificado.

La información recibida en el ordenador es almacenada en una base de datos local que registra en tiempo cuasi real el valor de pH y CE, con un lapso de quince minutos entre cada captura, así como la hora y fecha de recepción, extraída de la computadora. Cabe señalar que, aun cuando los dispositivos son capaces de registrar mediciones de forma más constante, el periodo de quince minutos se estableció a petición del productor.

Por otra parte, la información recabada en la base de datos es extraída para ser procesada mediante un algoritmo de lógica difusa, modelado mediante la herramienta especializada Matlab, el cual después fue trasladado a la etapa de visualización para mostrar la evaluación de la calidad del agua mediante el toolbox skfuzzy de Python.

La etapa de presentación y visualización de los datos se encuentra presente desde el módulo de adquisición, donde una pantalla LCD de 4x20, conectada al Arduino central por medio de una interfaz I2C, muestra las mediciones obtenidas en tiempo cuasi real. Además, en el ordenador donde se reciben los datos, una página local se encarga de mostrar la información del pH y CE en tiempo cuasi real y la evaluación correspondiente a la calidad agronómica del agua, así como el registro de esta información para su consulta posterior.

## **4.2 Adquisición de los parámetros**

Enseguida, se describe el procedimiento realizado para llegar a la obtención del pH, CE y temperatura del agua, parámetros identificados durante la investigación como los más adecuados y viables para la evaluación de la calidad agronómica del agua, y cuya instrumentación fue previamente determinada con base en los requerimientos del proyecto.

### **4.2.1 Estudio y análisis de los sensores**

Una tarea fundamental previa a la utilización de los sensores es el estudio de sus hojas de datos. En ellas se encuentra información importante acerca de su funcionamiento, características técnicas y eléctricas, así como los cuidados y recomendaciones que se deben atender al utilizarlos. Se analizó la información de cada uno de los sensores y posteriormente se procedió a trabajar con ellos.

### **4.2.2 Calibración**

Los sensores utilizados en esta implementación cuentan con dos modalidades de comunicación: UART e I2C. El modo I2C permite controlar múltiples sensores a la vez; sin embargo, antes de utilizarlos para realizar mediciones, deben pasar por un proceso de calibración para garantizar una mayor precisión en las lecturas y aprovechar todo

su potencial. Este proceso de calibración es más sencillo si los sensores están en modo UART, por lo que primero se trabajarán en este modo para calibrarlos y posteriormente se pasarán a modo I2C para la implementación final. Cada sensor se calibra de forma separada. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para calibrar cada una de las sondas de medición.

#### 4.2.2.1 Sensor de pH

Para comenzar con la calibración del sensor de pH en modo UART, primero se realizó la conexión de la sonda con el Arduino. Para esto, se utilizó una protoboard, en la que se conectó el embebido EZO™ de pH y el conector BNC, tal como se muestra en la Figura 4.1.

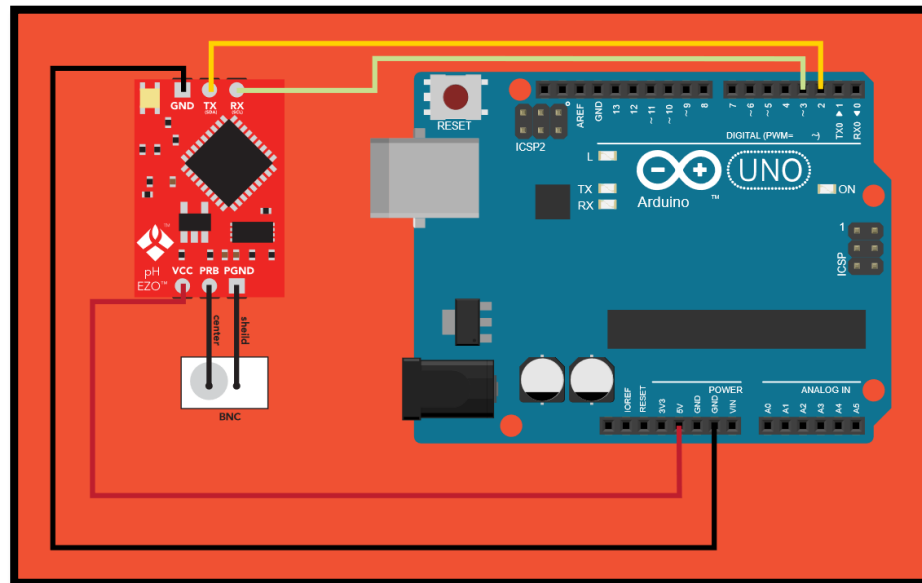
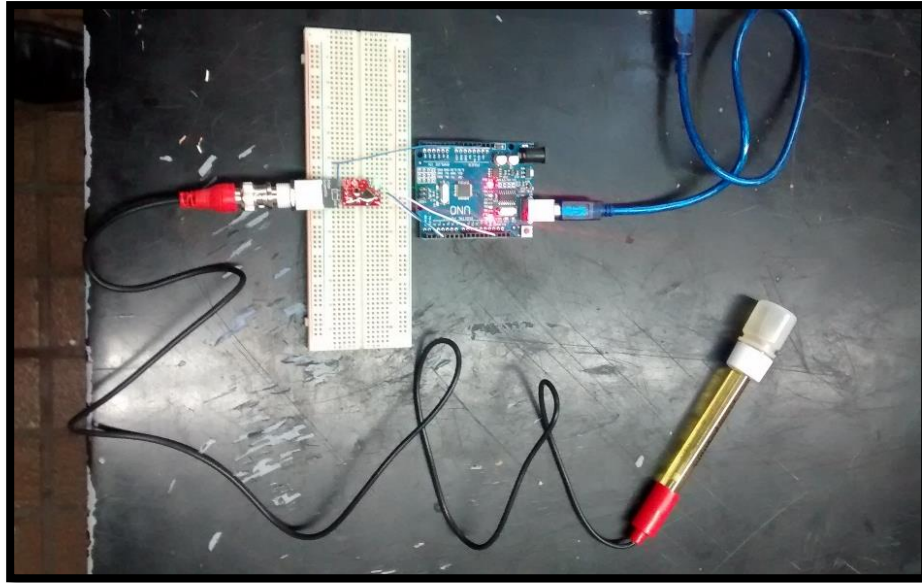


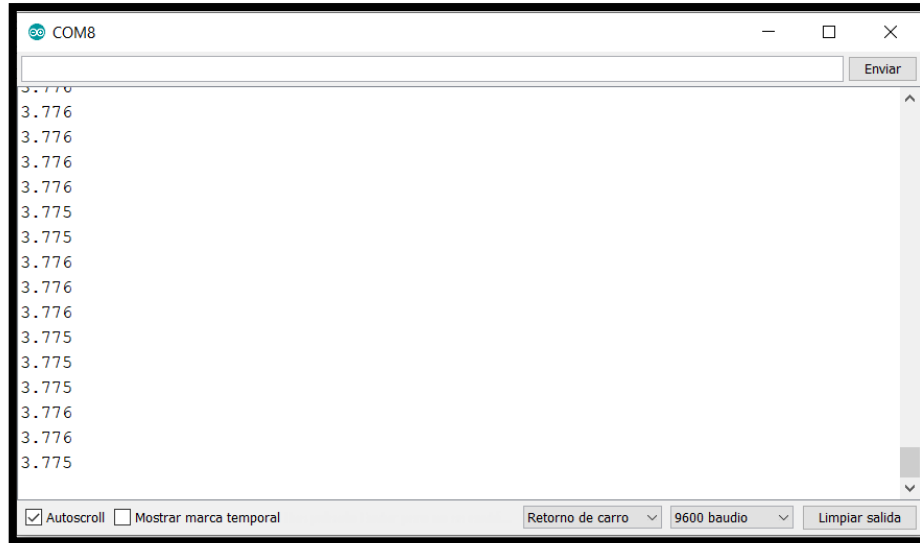
Figura 4.1 Conexión de calibración para sonda de pH. Obtenida de: (Atlas Scientific, 2002)

Una vez realizado lo anterior, se instaló la sonda de pH en el conector BNC y se conectó el Arduino a la computadora. Previamente el Arduino fue cargado con un programa para comunicarse con el circuito de medición. A continuación, en la Figura 4.2 se muestra la conexión final de todos los elementos.



**Figura 4.2 Calibración de la sonda de pH.**

Una vez conectado el Arduino a la computadora, se abrió el monitor serie del IDE de Arduino para visualizar el comportamiento de la sonda. Dicha terminal se configuró a 9600 baudios y con el retorno de carro activado. Acto seguido, el sensor comenzó a arrojar mediciones de forma continua por la terminal, esto debido a que, al tratarse de un sensor nuevo este posee la configuración preestablecida de fábrica, que es de medición continua, con una frecuencia de una lectura por segundo. Las lecturas iniciales arrojadas pertenecen a la solución de almacenamiento presente en el frasco de remojo que viene de fábrica con el sensor. La Figura 4.3 muestra una captura de pantalla con las mediciones iniciales del sensor impresas en la terminal de Arduino.

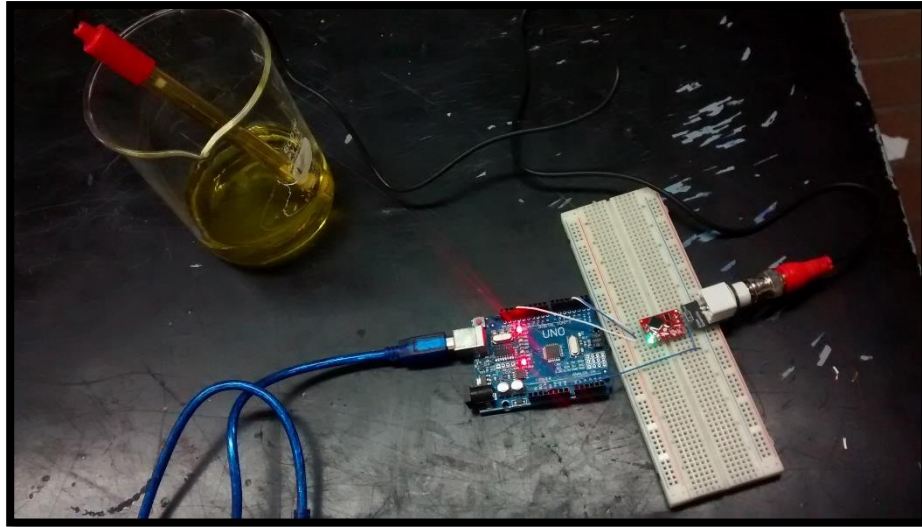


**Figura 4.3 Mediciones de pH previas a la calibración.**

Cabe señalar que, durante este proceso se puede observar un ciclo constante en el que un led en el circuito EZO™ de pH, cambia de color de verde a cian y viceversa. Este es un comportamiento específico del modo UART en el que se encuentra configurado e indica que el sensor está realizando mediciones continuas.

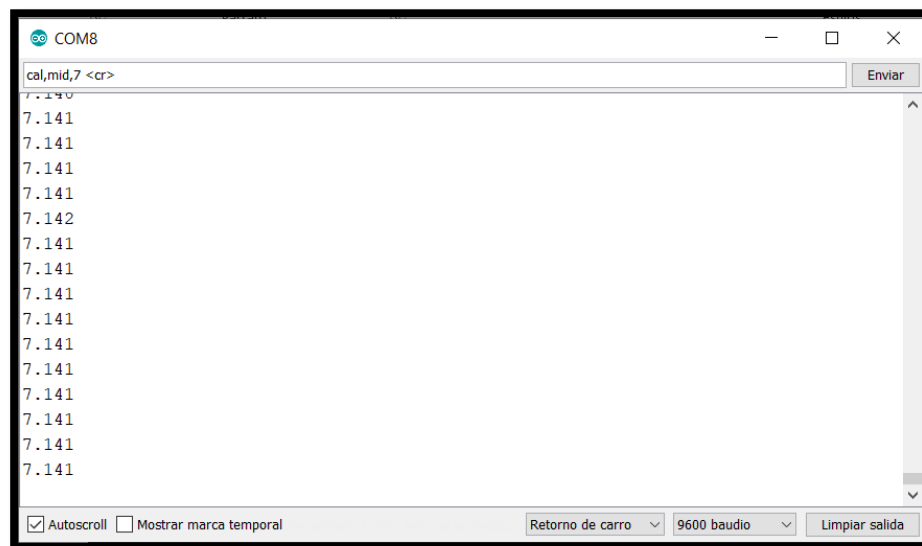
Por otra parte, para conocer la información de la sonda se ingresó el comando “i” por medio de la terminal serie, obteniendo como resultado la siguiente cadena: ?i,pH,2.12. Esto indica que la sonda cuenta con el firmware versión 2.12, lo que servirá para conocer las funcionalidades con las que cuenta, ya que varían conforme cambian las versiones de las sondas.

Una vez comprobado el funcionamiento de la sonda y del monitoreo de los parámetros, se procedió a realizar la calibración del sensor, iniciando con el punto medio, tal como lo indica el manual. Para esto, se vertió una solución amortiguadora con pH de 7 en un vaso de precipitado, de tal manera que, al introducir la sonda, los componentes principales de medición en el extremo del sensor quedasen sumergidos, teniendo cuidado de agitar un poco la sonda dentro de la sustancia para eliminar cualquier burbuja de aire que pudiera estar presente en el extremo de la sonda y que pudiera afectar la precisión de las mediciones. La Figura 4.4 muestra en equipo de medición en conjunto.



**Figura 4.4 Calibración del primer punto de la sonda de pH.**

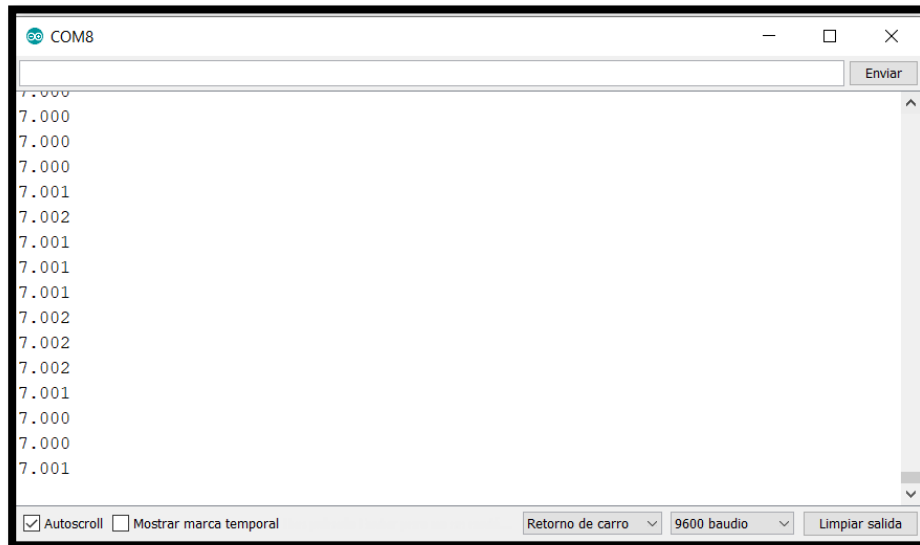
Una vez realizado lo anterior, se esperaron dos minutos a que la solución se asentara y se estabilizara la lectura. En la Figura 4.5 se muestran los valores obtenidos en la terminal:



**Figura 4.5 Mediciones de pH previas a la calibración del primer punto.**

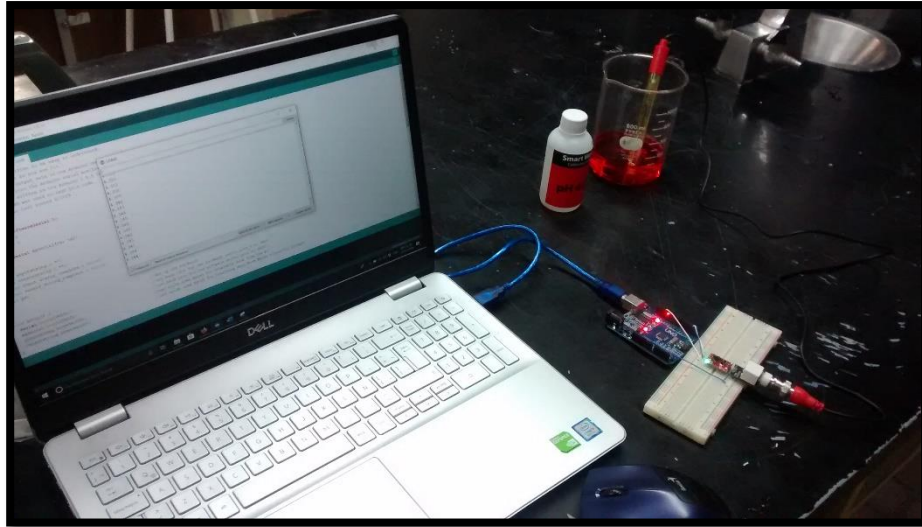
Una vez transcurrido el tiempo, se ingresó el comando “Cal,mid,7” en la terminal; esto para establecer el primer parámetro de calibración dentro del sensor, correspondiente al punto medio. Después de ingresar el comando el sensor responde con un “\*OK”, indicando una ejecución correcta. En la Figura 4.6 se muestran algunos

de los valores que reflejan el comportamiento de la sonda una vez calibrada con el primer punto.



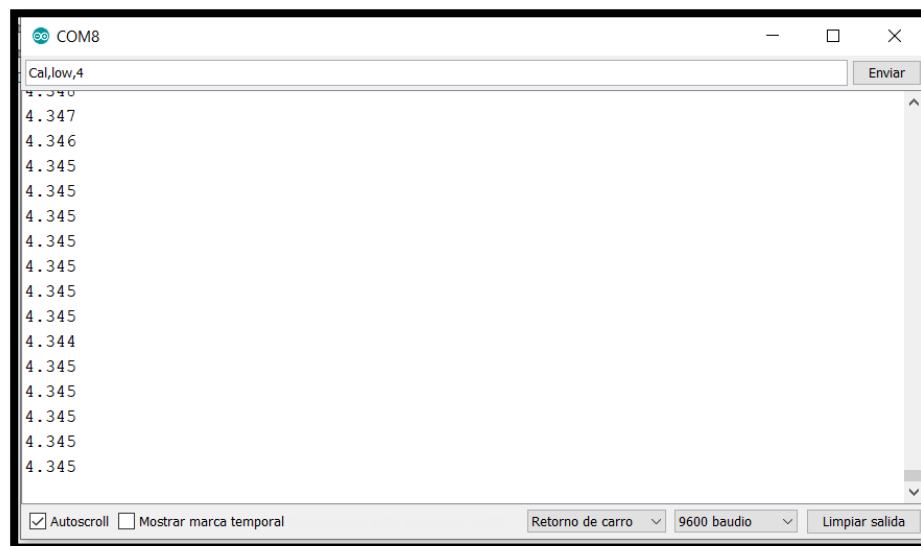
**Figura 4.6 Mediciones de pH una vez calibrado el primer punto.**

Ya con el primer punto de calibración configurado, se extrajo la sonda del vaso y se enjuagó con agua para comenzar con el segundo punto, correspondiente al punto bajo. Por lo que, igual que en el punto anterior, se vertió solución amortiguadora en un vaso de precipitado, pero esta vez con un pH de 4. Posteriormente se secó la sonda con un paño para eliminar el exceso de agua y se introdujo al vaso, de igual forma, cuidando eliminar las burbujas de aire. En la Figura 4.7 se muestra la sonda sumergida en la segunda sustancia.



**Figura 4.7 Calibración del segundo punto de la sonda de pH.**

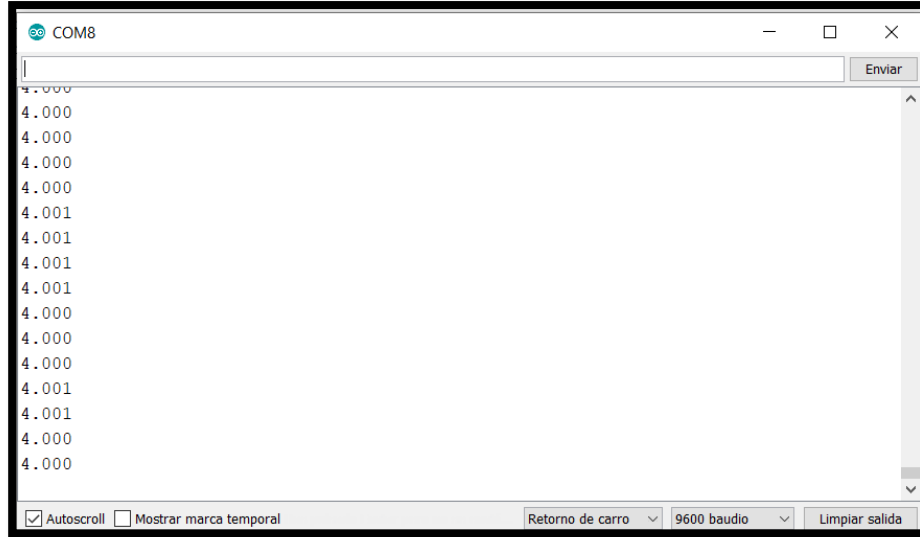
Las mediciones que aparecen en la Figura 4.8, son los valores registrados en los primeros instantes de la calibración con la sustancia amortiguadora con pH 4 antes de mandar el comando de calibración correspondiente al punto bajo.



**Figura 4.8 Mediciones de pH previas a la calibración del segundo punto.**

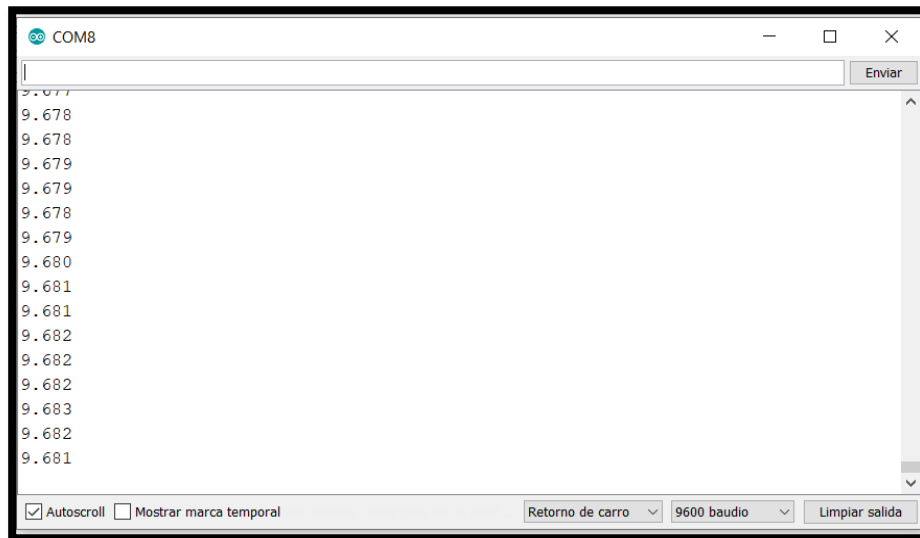
Una vez transcurridos los dos minutos de asentamiento se introdujo el comando “Cal,low,4” con lo que se estableció el punto de calibración bajo, mejorando la precisión de la sonda y dando como resultado las mediciones impresas en la terminal que se muestran en la Figura 4.9.





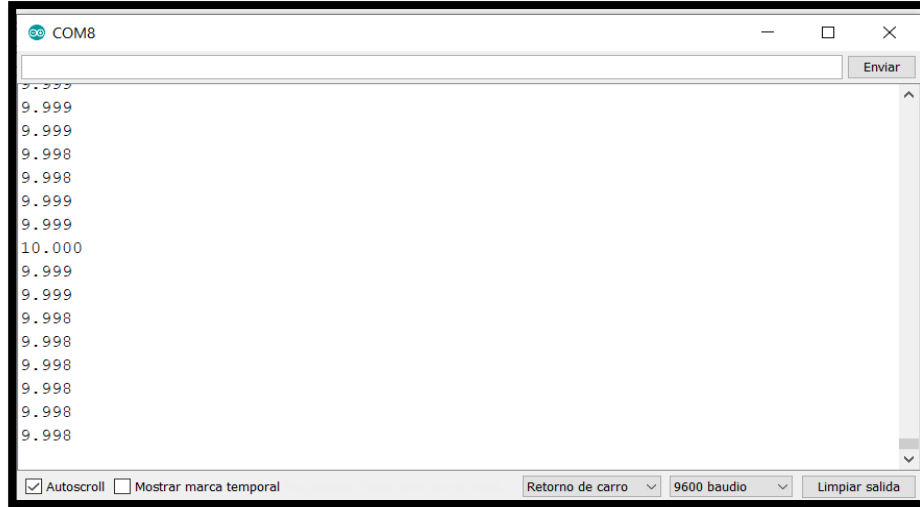
**Figura 4.9 Mediciones de pH una vez calibrado el segundo punto.**

Por último, se extrajo nuevamente la sonda para enjuagarla e introducirla a un vaso de precipitado con solución amortiguadora, pero esta vez de pH 10. Dicha sustancia dio como resultado las mediciones que se muestran en la Figura 4.10.



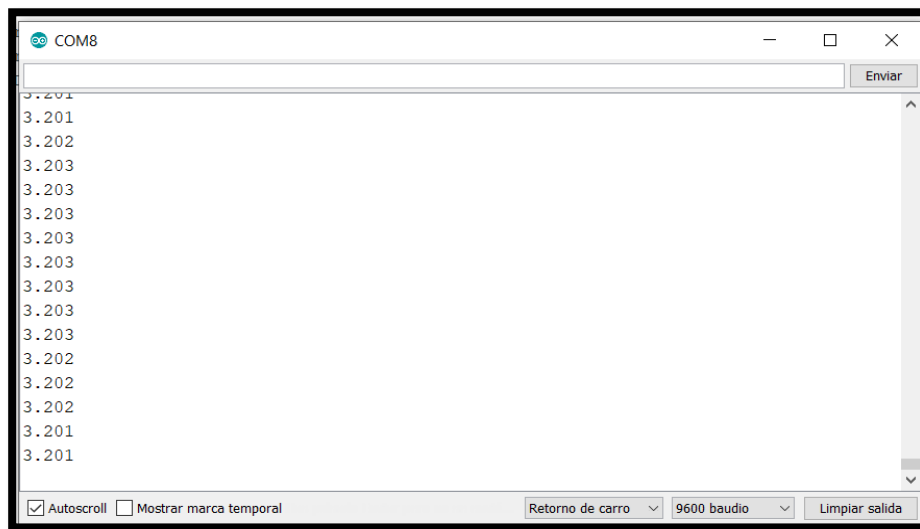
**Figura 4.10 Mediciones de pH previas a la calibración del tercer punto.**

Después del tiempo de asentamiento, se introdujo el comando “Cal,high,10”, asentando la configuración del último punto de calibración, y dando como resultado las mediciones que se muestran en la Figura 4.11.



**Figura 4.11 Mediciones de pH una vez calibrado el tercer punto.**

Una vez configurados los tres puntos de calibración, se limpió la sonda con agua, se secó con un paño y se regresó al frasco con solución de almacenamiento, sin desconectarla del módulo de adquisición, con lo que se obtuvieron las mediciones que se muestran en la Figura 4.12. En esta figura, se puede observar que los valores registrados sí cambian con respecto a las mediciones obtenidas al inicio cuando los puntos no habían sido calibrados, lo que confirma una correcta configuración de todos los parámetros. Cabe mencionar que, de acuerdo al fabricante, el tiempo recomendado antes de la próxima calibración es de un año.



**Figura 4.12 Mediciones de pH posteriores a la calibración.**

#### 4.2.2.2 Sensor de CE

Para calibrar el sensor de CE se retiró el circuito de pH anterior y se instaló el circuito EZO™ de conductividad (ver Figura 4.13).

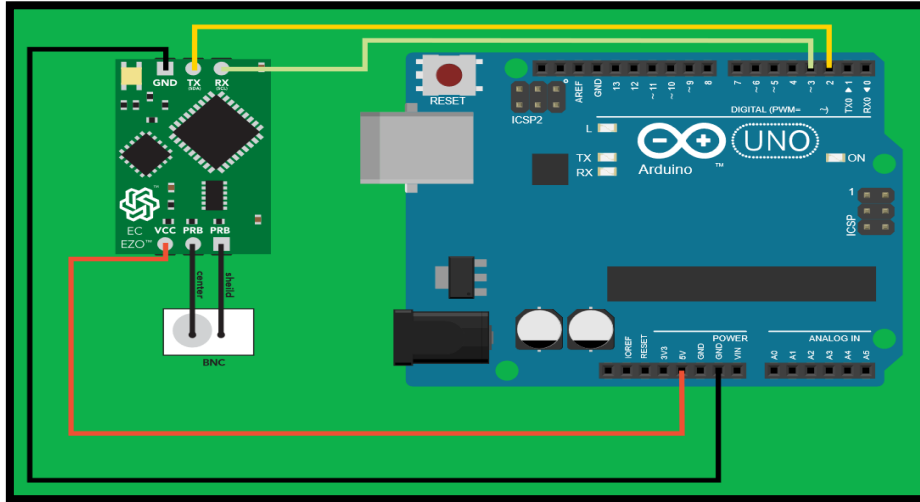


Figura 4.13 Conexión para calibración para sonda de CE. Obtenida de: (Atlas Scientific, 2019)

Así mismo, después se conectó la sonda correspondiente en el conector BNC, manteniendo la misma configuración para la alimentación y la comunicación serial. Cabe mencionar que antes de poner a medir al sensor, se modificó el firmware del Arduino para procesar el nuevo circuito de medición. La conexión de todos los elementos se muestra en la Figura 4.14.

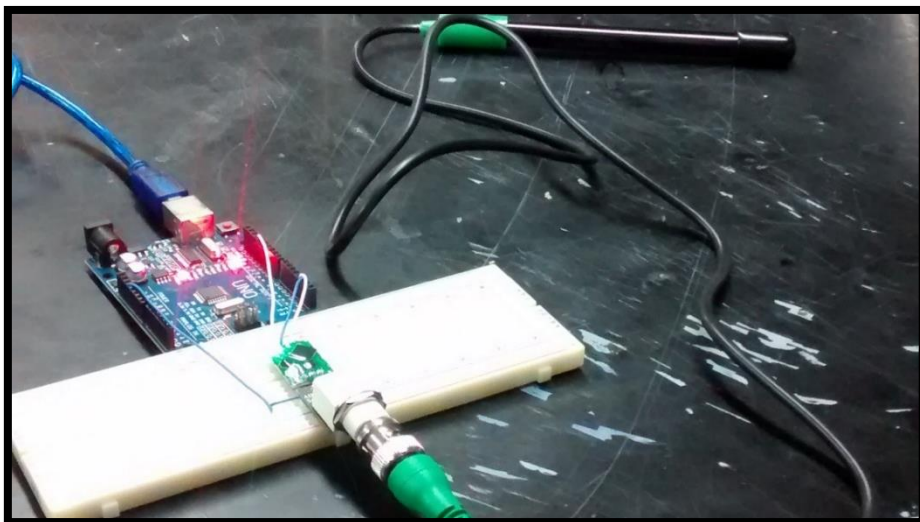
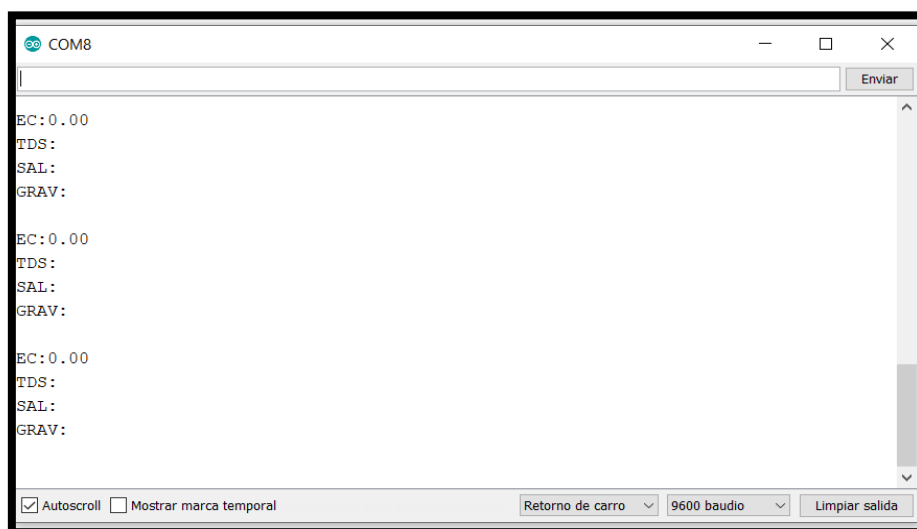


Figura 4.14 Calibración de la sonda de CE.

Una vez que se ejecutó el programa de Arduino y se inició el monitor serie, la sonda comenzó a arrojar los resultados que se muestran en la Figura 4.15. Como se puede observar, aparecen cuatro parámetros; el primero corresponde al valor de CE, el segundo al total de sólidos disueltos, el tercero a la salinidad y el cuarto a la gravedad específica; de los cuales únicamente el primero aparece con una medición, siendo esta de cero, y los otros tres sin valor alguno. En este circuito también se presenta el mismo comportamiento de cambio de color en el led de la placa.

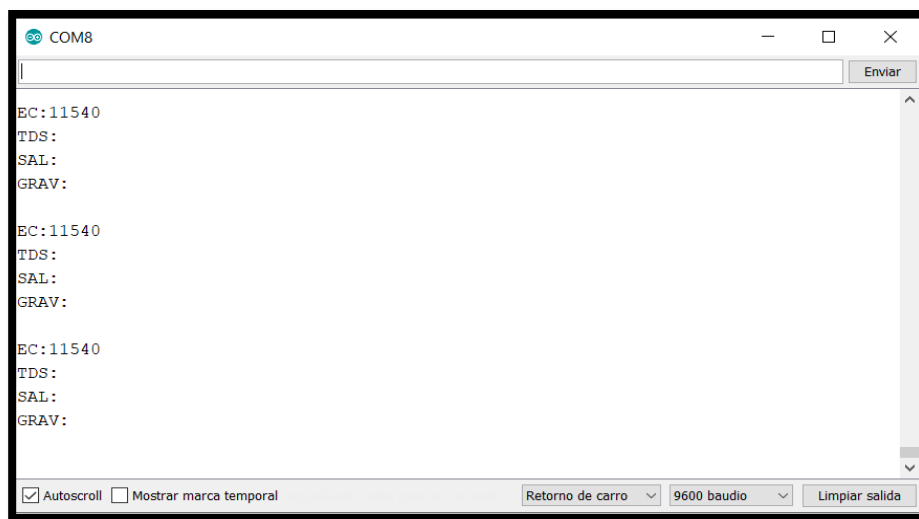


**Figura 4.15 Mediciones de CE previas a la calibración.**

Este sensor cuenta con un proceso de precalibración, en el que se ajustan algunos parámetros antes de realizar la calibración de los puntos con las sustancias amortiguadoras; el primero de ellos consistió en poner la sonda a obtener mediciones continuas “en seco”, es decir, antes de introducirla en cualquier sustancia. Después de esto, se debe verificar que el tipo de sonda que se tenga configurada, pertenezca al sensor con el que se está trabajando, para esto, se emitió el comando “K,?” a lo que el sistema respondió con un “?K,1.00 \*OK”. Este valor coincide, pues se está trabajando con una sonda K 1.0.

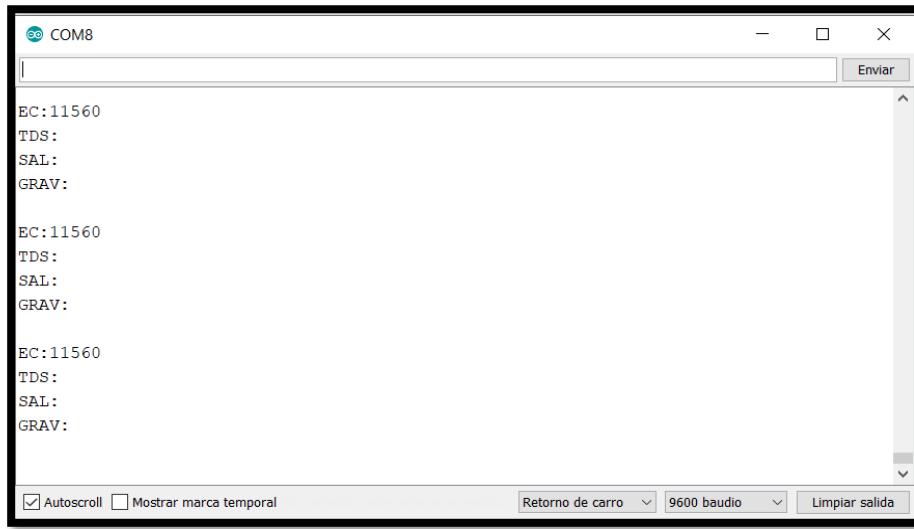
Una vez hecho lo anterior, se introdujo el comando de calibración en seco “Cal,dry”, teniendo como respuesta un “\*OK” por parte del sistema. Este es el último paso del proceso de precalibración.

Debido a que la calibración a dos puntos le confiere mayor precisión al sensor y a que se cuenta con las soluciones amortiguadoras adecuadas para el tipo de sensor (12880 y 80000 microsiemens), se realizará la calibración a dos puntos. Para esto, se comienza con el punto más bajo, que en este caso se trata de 12880 uS. Así pues, se colocó solución amortiguadora en un vaso de precipitado, la suficiente para sumergir la parte principal de la sonda de medición. Hecho esto, se retiró la capucha de protección del sensor y se introdujo en la solución para comenzar con las mediciones, cuidando agitarla un poco al inicio para eliminar las burbujas de aire que pudieran quedar remanentes en el extremo de la sonda. La Figura 4.16 muestra las mediciones registradas en esta primera etapa.



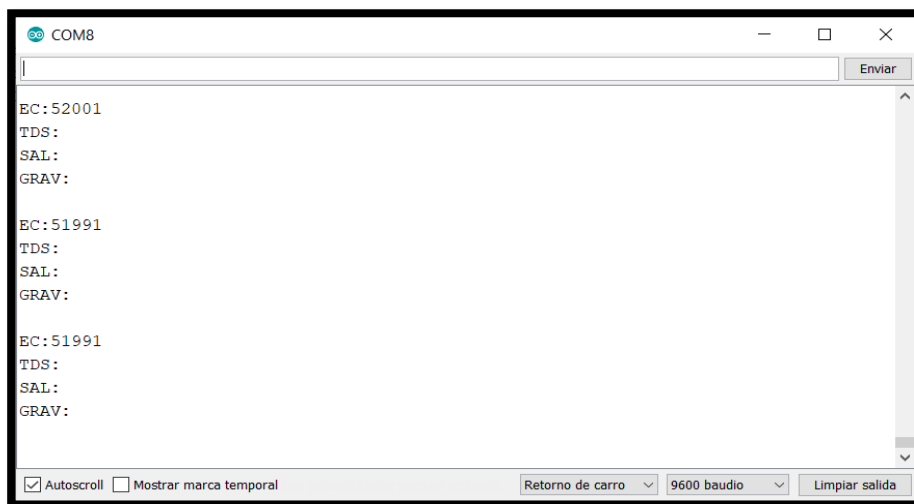
**Figura 4.16 Mediciones de CE previas a la calibración del primer punto.**

Hecho lo anterior, se dejó reposar la sonda por dos minutos para que la solución se asentara y el sensor pudiera registrar el valor más estable posible. Posteriormente, se ingresó el comando: "cal,low,12880"; a lo que el sensor respondió con un "\*\*OK", lo cual significa que la calibración correspondiente al punto bajo ha quedado asentada. A continuación, se muestran las mediciones obtenidas después de este primer ajuste. Es importante resaltar que, de acuerdo a las especificaciones técnicas de esta sonda, las lecturas durante este proceso de calibración, pueden variar desde 1 hasta el 40% con respecto al valor de la solución amortiguadora. En la Figura 4.17 se muestran las mediciones de la sonda una vez calibrado el primer punto.



**Figura 4.17 Mediciones de CE una vez calibrado el primer punto.**

Ya que se trabajó el punto bajo, el paso que sigue es llevar la sonda a una solución con la conductividad del punto alto, que en este caso es de 80000 uS. Para esto, primero se limpió el sensor con agua y se secó con un paño para eliminar en la medida de lo posible los remanentes de líquido que pudieran comprometer las características de la nueva sustancia. Hecho esto, se introdujo la sonda en el vaso de precipitado y se agitó levemente para eliminar las burbujas de aire. Las mediciones registradas se muestran en la Figura 4.18.



**Figura 4.18 Mediciones de CE previas a la calibración del segundo punto.**

Una vez que se estabilizaron las mediciones, se introdujo en la terminal el comando: “Cal,high,80000”, generando las mediciones que se muestran en la Figura 4.19. Al recibir un “\*OK” como respuesta, se da por finalizada la calibración de la sonda de CE. De esta manera, ya puede ser puesta en funcionamiento y utilizarse para realizar mediciones de cualquier sustancia que se encuentren en su rango de conductividad. Cabe señalar que, en este caso, el sensor no requerirá de otra calibración sino hasta dentro de diez años.

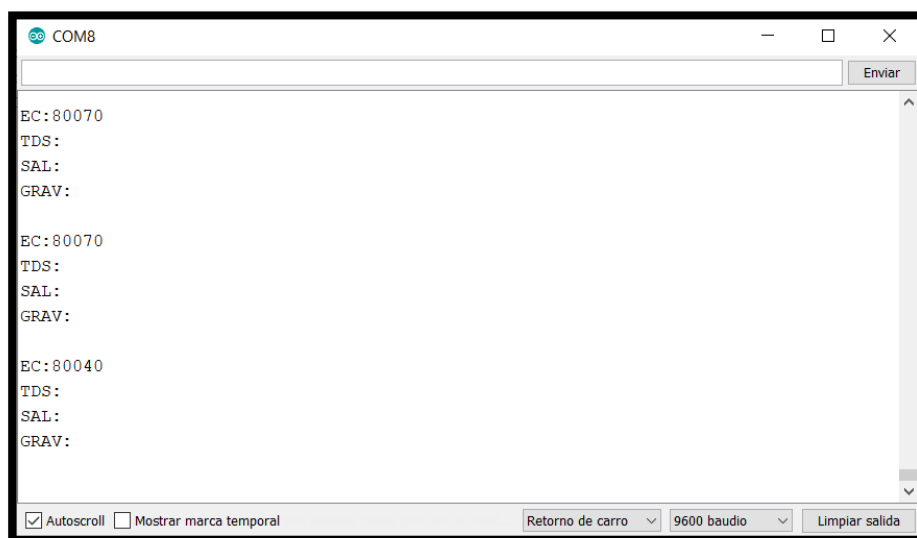


Figura 4.19 Mediciones de CE una vez calibrado el segundo punto.

### 4.2.2.3 Sensor de temperatura

Para calibrar la sonda de temperatura, únicamente se precisa de un punto de referencia; sin embargo, se puede calibrar con más puntos. Como referencia, se utiliza cualquier muestra de agua de la cual se pueda conocer su temperatura, siempre y cuando, dicha temperatura se encuentre dentro del rango permisible para la sonda, por lo que generalmente se utiliza agua en punto de ebullición.

De acuerdo con (Tambutti & Muñoz Héctor, 2002), el punto de ebullición de cualquier líquido depende fuertemente de la presión atmosférica a la que se encuentre y en menor medida de su pureza; a mayor altitud, la presión disminuye y se requiere de menor temperatura para que el líquido comience a hervir. Aproximadamente, por cada 300 metros de altura con respecto al nivel del mar, se reduce en un grado el punto de ebullición.

Dicho lo anterior, a continuación, en la Tabla 4-1 se enlistan los materiales que se utilizaron para la calibración de la sonda de temperatura.

**Tabla 4-1 Materiales para la calibración del sensor de temperatura.**

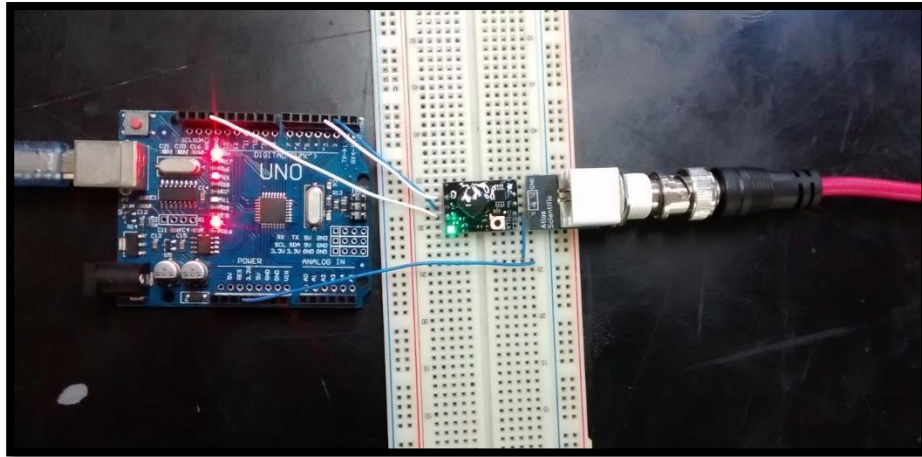
<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>
Mechero de bunsen	1
Tubo de látex	1
Soporte universal	1
Tela de alambre	1
Anillo de hierro	1
Pinzas para bureta	1
Termómetro	1
Vaso de precipitado de 400 ml	1
Agua destilada	250 ml

La calibración se realizó en el laboratorio de Bioquímica del Instituto Tecnológico de Colima. De acuerdo con la medición obtenida de la página web de Google Maps, se encuentra a una elevación aproximada de 530 metros sobre el nivel del mar, por lo que en teoría se debería considerar una reducción de poco menos de dos grados; sin embargo, se utilizó un termómetro para verificar la temperatura de ebullición.

Una vez en el laboratorio, se instalaron las pinzas y el anillo de hierro en el soporte universal; se colocó el tubo de látex en el mechero y se instaló a la toma de gas; se colocó la tela de alambre sobre el anillo y sobre ésta, el vaso de precipitado con el agua destilada. Después se sujetó el termómetro con las pinzas, se sumergió en el agua destilada sin tocar el fondo del vaso y se procedió a calentar el agua.

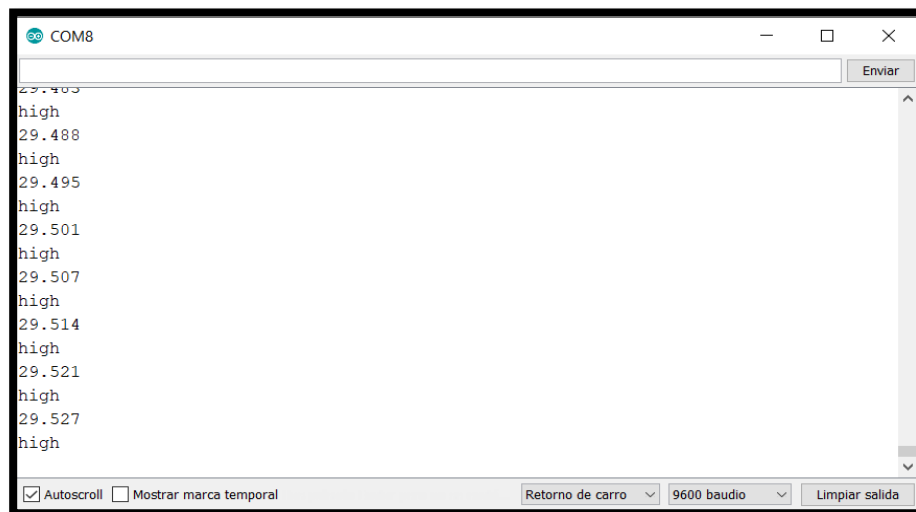


Debido a que este sensor también pertenece a la familia de AtlasScientific, para realizar la calibración, se utilizó la misma conexión empleada para los otros dos sensores; únicamente cambia el circuito de control, que en este caso es el EZO™ RTD de temperatura y el firmware en el Arduino para establecer la comunicación con el sensor. En la Figura 4.20 se muestra la conexión de los componentes electrónicos.



**Figura 4.20 Calibración de la sonda de temperatura.**

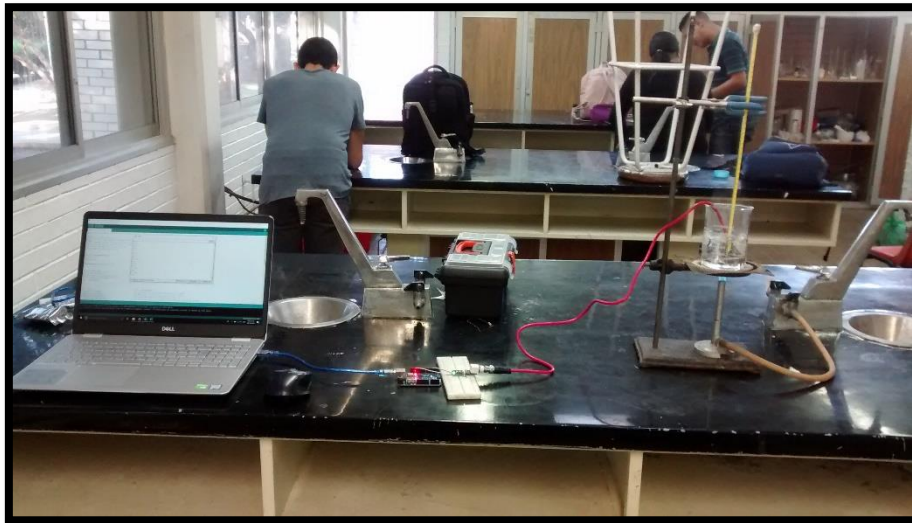
Una vez realizados todos los ajustes y conexiones, se conectó el Arduino al ordenador y se activó la terminal serie con el retorno de carro activado y la velocidad establecida a 9600 baudios. A continuación, la Figura 4.21 muestra las lecturas que la sonda comenzó a registrar en la terminal.



**Figura 4.21 Mediciones de temperatura previas a la calibración.**

Nuevamente se hace notar que, de acuerdo a la configuración de fábrica, el sensor se encuentra en modo de lecturas continuas; sin embargo, se optó por verificar esto ingresando el comando “C,1”; a lo que la sonda respondió con el mensaje “?C,1”, lo que comprueba que está configurado en el modo correcto. De igual forma, se obtuvo la versión del firmware de la sonda por medio del comando “i”, a lo que el sistema informó que se trata de la versión 2.10.

Una vez que el agua comenzó a hervir, se colocó la sonda de temperatura dentro del agua (ver Figura 4.22) y se esperaron de tres minutos hasta que se estabilizaran las mediciones del sensor. Mientras tanto, se consultó la medición del termómetro, el cual marcó una lectura de aproximadamente 99.8 °C, por lo que se utilizó esta cifra para la configuración de la sonda.



**Figura 4.22** Calibración de la sonda de temperatura. “Elaboración propia”.

El comando utilizado para establecer la calibración es “Cal,t”, donde “t” es la temperatura de la muestra de referencia, que en este caso es 99.8; por lo que, una vez estabilizadas las mediciones, se introdujo el comando “Cal,99.8”; a lo que el sistema respondió con un “\*OK”, confirmando que la calibración había quedado establecida. A continuación, en la Figura 4.23 se muestran las medidas obtenidas después de la calibración de la sonda. Cabe mencionar que el fabricante recomienda calibrar este sensor únicamente cada tres años.

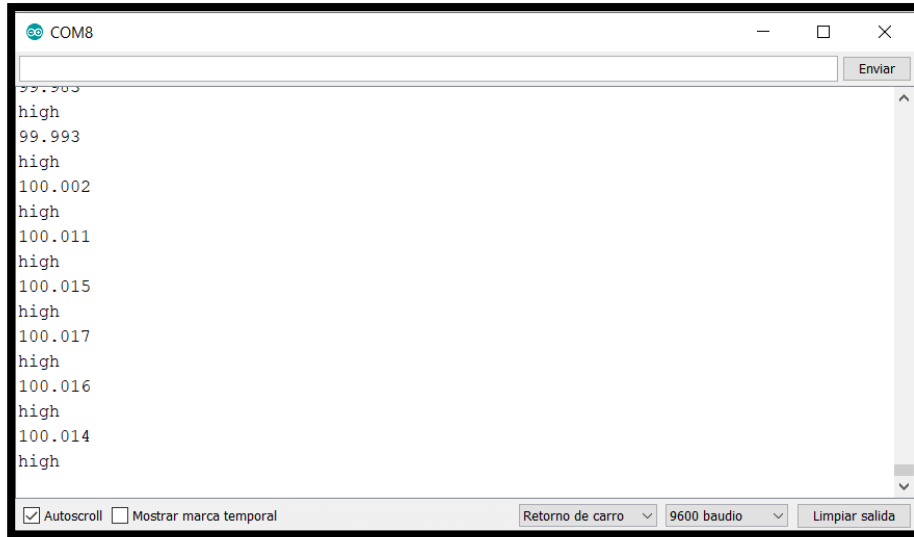


Figura 4.23 Mediciones de temperatura posteriores a la calibración. “Elaboración propia”.

### 4.2.3 Cambio de modo UART a I2C

Una vez realizada la calibración de los sensores en modo UART, es necesario configurarlos a modo I2C, ya que será la forma en que se estarán comunicando con el microcontrolador durante el tiempo de trabajo. A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para realizar el cambio en cada uno de los sensores.

Para la transición a modo I2C en los tres sensores, se utilizó el comando “I2C,n”. Este comando, coloca a los sensores en modo I2C y establece su dirección específica; acciones necesarias para su correcta identificación una vez establecida la red de medición.

Para realizar esta configuración, se requiere de la misma conexión con la que se realizó la calibración de los sensores, sólo que en este caso no se requieren de sustancias amortiguadoras; únicamente se debe conectar cada sensor con su circuito de control y, como en este caso se comenzó por la sonda de pH, se estableció la comunicación a través de su firmware correspondiente con el Arduino y se verificó su funcionamiento por medio de la terminal serie, la cual debe tener activado el retorno de carro y la velocidad configurada a 9600 baudios.

Una vez hecho esto, se utilizó el comando “I2C,n”, donde n es la dirección con la que se identificará la sonda una vez establecida la red de sensores. Dicha dirección,

puede ser cualquier número entre 1 y 127, pero en este caso, se utilizó la dirección que viene por defecto en la hoja de datos del sensor, que es 99 o (0x63) en hexadecimal. Este número reemplaza a la n del comando anterior, quedando como "I2C,99". Después, por medio de la terminal, se ingresó el comando al sensor y, de acuerdo con la hoja de datos, el sensor debía responder "\*OK (reboot in I2C mode)", pero no se obtuvo esta respuesta. No obstante, la reacción consistió en detener la lectura continua; la terminal dejó de recibir datos y el led que anteriormente cambiaba de color se detuvo y permaneció en color cian de forma continua. Esto indica que los cambios se han realizado de forma satisfactoria y ahora la sonda se encuentra en modo I2C. El paso siguiente es hacer el cambio en los otros dos sensores.

Para configurar las otras dos sondas se realizó el mismo procedimiento; el único cambio que se debe tomar en cuenta es el de la dirección, que es 100 o (0x64) en hexadecimal para la sonda de CE y 102 o (0x66) en hexadecimal para el sensor de temperatura. Una vez ingresados los comandos, los circuitos reflejaron el mismo comportamiento que el de pH, por lo que ahora los tres sensores se encuentran en modo I2C.

#### **4.2.4 Lectura de sensores**

Una vez configurados los sensores se comenzó a trabajar en el programa para recibir las mediciones en el Arduino. Hasta este punto se trata de una lectura básica, es decir sin contemplar el envío por RF. Se recibe la información directo de todos los sensores y los muestra uno a uno los valores de los parámetros a través de la terminal serie del IDE de Arduino ya con la compensación de temperatura considerada. Por otra parte, una vez terminado el programa, se procedió a realizar la conexión que requiere el protocolo I2C para el acoplamiento de los esclavos (sensores) con el maestro (Arduino) y poder establecer la comunicación. El procedimiento es el siguiente: Se conectó de forma común el GND o "tierra" de cada uno de los embebidos de los esclavos y ésta a su vez con uno de los GND de la placa maestro. De igual forma, los pines de alimentación VCC de los sensores se conectaron a una toma de 5 volts del Arduino. Por último, se unieron las señales TX (transmisión) y RX (recepción)

de los esclavos y se conectaron al SDA y SCL respectivamente en el maestro. La conexión se muestra en la Figura 4.24.

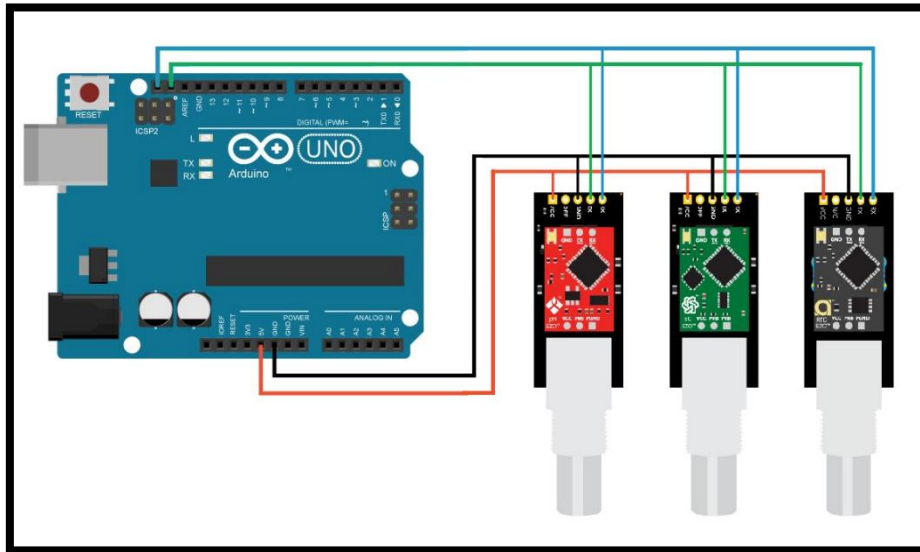


Figura 4.24 Conexión I2C del nodo de sensores. “Elaboración propia”.

### 4.3 Comunicación de los datos

En esta sección, se describen las actividades que se llevaron a cabo para generar la comunicación entre el módulo de adquisición ubicado cerca de la zona de extracción de agua y el módulo de recepción localizado en las oficinas de producción en la misma parcela.

#### 4.3.1 Estudio y análisis del XBee

Al igual que con los sensores, el manejo de estos dispositivos de RF, requiere del estudio de sus hojas de datos, pues esto permite comprender su funcionamiento, aprovechar al máximo su potencial y prevenir algún desperfecto derivado de un uso incorrecto, por lo que se procedió al estudio de su información técnica relevante. Así mismo, tomando en cuenta que se trataban de equipos previamente utilizados por estudiantes en proyectos anteriores, fue necesario realizar pruebas de caja blanca para corroborar que se encontrasen en buen estado, para después realizar pruebas

básicas de interacción entre los radios (ver Anexo 1) y así comenzar a familiarizarse con estos dispositivos.

### 4.3.2 Configuración del modo API

Aun cuando para este proyecto únicamente se requiere de un coordinador y un ruteador, la red de monitoreo en la parcela estará conformada por tres nodos: un coordinador y dos ruteadores (uno para el monitoreo del agua y otro para la Sigatoka), por lo que se trabajaron con tres radios XBee para realizar pruebas y verificar su interoperabilidad. En este contexto, además de todos los beneficios mencionados acerca del modo API para la comunicación con radios XBee, al ser más de dos dispositivos los que se pretenden comunicar y al requerir información el coordinador acerca de la procedencia de la información que recibe para poder clasificarla, es necesario trabajar con los módulos XBee en modo API.

CUANDO LOS RADIOS YA ENCUENTRAN TRABAJANDO EN UNA RED DE XBEES, SE PUEDEN ACCEDER A ELLOS Y CONFIGURARSE VÍA RF A TRAVÉS DE COMANDOS, SIN EMBARGO DADO QUE SE TRATA DE UNA RED QUE APENAS SE ESTÁ FORMANDO, PARA CONFIGURAR LOS RADIOS EN MODO API ES NECESARIO ACCEDER AL DISPOSITIVO UTILIZANDO UNA HERRAMIENTA ALTERNATIVA A TRAVÉS DEL PROGRAMA XCTU. PARA ESTO ES NECESARIO REALIZAR EL PROCEDIMIENTO UTILIZADO PARA REESTABLECER LOS EQUIPOS A SU CONFIGURACIÓN DE FÁBRICA, DESCRITO EN EL ANEXO 1

Prueba de funcionamiento de los XBee. Una vez hecho esto, se procedió a configurar uno de los XBee para utilizarlo como coordinador. La dirección MAC del dispositivo seleccionado es: 0013A200410220E1 y su configuración se estableció de acuerdo con los siguientes parámetros.

- Network ID: ID= 2020
- CE: Indirect Msg Coordinator [1]
- Node Identifier NI: COORDINADOR
- AP: API Mode Without Escapes [1]

Después, se configuró un segundo XBee a manera de ruteador, su dirección MAC es 0013A20040A152DA y los parámetros configurados son los siguientes:

- Network ID: ID= 2020
- CE: Standard Router [0]
- Node Identifier NI: DISPOSITIVO1
- AP: API Mode Without Escapes [1]

Un tercer radio, de dirección MAC 0013A20040A152B2 se configuró para fungir como el segundo ruteador tal como se muestra a continuación:

- Network ID: ID= 2020
- CE: Standard Router [0]
- Node Identifier NI: DISPOSITIVO2
- AP: API Mode Without Escapes [1]

Una vez configurados los dispositivos se realizó una prueba de comunicación mediante el generador de tramas disponible en el software XCTU. Para esto, primero fue necesario conectar el XBee configurado como coordinador, después elegir el protocolo 802.15.4 en Modo API 1 (sin escape de caracteres) y seleccionar una trama del tipo 82. Así mismo, como dirección de origen de 64 bits se colocó la dirección MAC del radio remitente, para posteriormente escribir un mensaje RF data con el texto “Hola mundo” y copiar la trama generada en la consola del XCTU que previamente debe ser habilitada.

Posteriormente, fue necesario dar clic en el botón de agregar una trama para enviar, con lo que se despliega un menú en el que se debe insertar la trama recién generada y escribir un nombre para su identificación.

Una vez agregado, se abrió la consola de comunicación, con lo que se habilitó el botón SEND SELECTED FRAME, el cual se pulsó para enviar la trama y con esto observar en consola los detalles del mensaje. Finalmente, se utilizó el intérprete de tramas de XCTU para analizar los caracteres recibidos y verificar su contenido.

### 4.3.3 Fabricación de la trama

Una vez teniendo configurados los XBee en modo API, ya están listos para reconocer y trabajar con los paquetes información llamados tramas; sin embargo, no tienen la capacidad de crear esta estructura de datos a partir del mensaje que se desea transmitir, por lo que es necesario crearla mediante código, a partir la estructura específica de cada tipo de trama.

De acuerdo con la hoja de datos del XBee PRO S3B 900HP, el protocolo especializado para esta versión de radio es el DigiMesh, por lo que éste fue el utilizado para estructurar el nodo de comunicación. Así mismo, se utilizó el modo API 1 y el tipo de trama 0x10 (Transmit Request). Se utilizó el XBee API Frames Generator como guía para determinar el número de bytes para cada parámetro y el orden de estos de acuerdo a la estructura específica de la trama. De igual forma, se utilizó la hoja de datos del radio para conocer el significado de cada sección de la trama y sus posibles configuraciones.

Así como ofrece una serie de características bastante útiles a la hora de formar redes de comunicación, al tratarse de una versión de las más recientes, el XBee PRO S3B 900HP actualmente no cuenta con muchos recursos disponibles para su manejo, por lo que para este proyecto fue desarrollada una librería en Arduino con el nombre de *LIBRERIA\_XBEE\_S3B*; capaz de generar tramas de forma dinámica, facilitando su manejo dentro del programa de lectura de los sensores desarrollado anteriormente. Una vez terminada la librería se realizaron pruebas de caja blanca en las que se introdujeron diferentes mensajes alfanuméricos para comprobar que los paquetes generados por programa coincidieran con la estructura descrita en el apartado 2.3.19, específicamente para la trama Transmit Request - 0x10, por lo que fue utilizado el generador de tramas de XCTU para contrastar los mensajes.

La librería generada recibe en una variable la información que se desea empaquetar para su envío, después, toma la información y mide su longitud; la segmenta y lleva cada parte al apartado de la trama que le corresponde. De igual manera, calcula la suma de comprobación de forma dinámica, la cual es un valor que cambia cada que se encapsula información nueva y sirve para garantizar que la



información llegue de forma íntegra. En la Figura 0.1 se muestra parte de la librería que se desarrolló en este proyecto.

```
LIBRERIA_XBEE_S3B.ino  LIBRERIA_XBEE_S3B.h  LIBRERIA_XBEE_S3B.cpp  ▼
4  MSC.
5  */
6  #include "LIBRERIA_XBEE_S3B.h"
7
8  uint8_t xbee_address_64[8] = {0x00, 0x13, 0xA2, 0x00, 0x41, 0x02, 0x20, 0xE1}; //COORDINATOR ADDRESS
9  uint8_t xbee_address_16[2] = {0xFF, 0xFE};
10 uint8_t payload[100]; //LONGITUD DE 100 ÚNICAMENTE PORQUE SÍ ; )
11 int i = 0;
12 int FRAME = 17;
13 int CHSUM = 1;
14 int longitud = 0;
15
16 Transmit_0x10::Transmit_0x10(){} //Constructor: no tiene que hacer nada en especial
17
18 void Payload(String dato) //Generación del PAYLOAD
19 {
20     //float medicion = 0;
21     String valor;
22     //medicion = dato;
23     //valor = String(medicion);
24     longitud = dato.length()+1;
25     char bufer[longitud];
26     dato.toCharArray(bufer, longitud);
27     for (int i = 0; i < longitud-1; i++){
28         payload[i] = bufer[i]; // Igualo valores de un vector de valores almacenado el valor ADC leído
29     }
30 }
31 void Transmit_0x10::Framee(String sensor) //Generación del FRAME
32 {
33     int pos =0;
34     Payload(sensor); //Aquí mando a llamar la funcion que genera el PAYLOAD y le mando un dato
35     int LONG = longitud-1;
36     int LongPayload = FRAME+LONG+CHSUM;
37     uint8_t xbee_frame[LongPayload]; //Se asigna la dimensión TOTAL del FRAME
38     xbee_frame[ pos++ ] = 0x7E; //Byte de inicio
39     xbee_frame[ pos++ ] = ( ( sizeof( xbee_frame ) - 4 ) >> 8 ) & 0xFF; //Byte de longitud1
40     xbee_frame[ pos++ ] = ( sizeof( xbee_frame ) - 4 ) & 0xFF; //Byte de longitud2
41     xbee_frame[ pos++ ] = 0x10; //Byte de tipo de FRAME
42     xbee_frame[ pos++ ] = 0x01; //Byte de frame ID, habilita el Status Response
43     // A continuación agrego la MAC address al FRAME
44     for ( int i = 0; i < 8; i++ )
45     {
46         xbee_frame[ pos++ ] = xbee_address_64[ i ];
47     }
48     xbee_frame[ pos++ ] = xbee_address_16[ 0 ]; //Agrego la dirección de 16 bits1
49     xbee_frame[ pos++ ] = xbee_address_16[ 1 ]; //Agrego la dirección de 16 bits2
50     xbee_frame[ pos++ ] = 0x00; //Byte de radio de Broadcast
51     xbee_frame[ pos++ ] = 0x40; //Byte Opcional, Selección del método de entrega del FRAME
52     // A continuación agrego el PAYLOAD al FRAME
53     for ( int i = 0; i < LONG; i++ )
54     {
55         xbee_frame[ pos++ ] = payload[ i ];
56     }
57     //A continuación genero el CHECKSUM del FRAME
58     uint8_t checksum = 0x00;
59     for( int c = 3; c < sizeof( xbee_frame ) - 1; c++ )
60     {
61         checksum += xbee_frame[ c ];
62     }
63     checksum = 0xFF - checksum;
64     xbee_frame[ pos++ ] = checksum; //Byte del CHECKSUM
65     // A continuación imprimo todo el FRAME
66     for( int i = 0; i < LongPayload; i++ )
67     {
68         Serial.write(xbee_frame[i]);
69     }
70     Serial.println();
71     delay(1000);
72 }
73
```

Figura 0.1 Librería para la generación de tramas.

#### 4.3.4 Envío y recepción por RF

Una vez que se realizaron pruebas de empaquetamiento utilizando la librería generada y se verificó que la estructura de la trama fuera la correcta, el paso siguiente fue integrar la librería en el programa de lectura de los sensores, ya que hasta el momento sólo se tienen habilitadas las mediciones de los sensores para ser mostradas por medio de la terminal serie del IDE de Arduino. Para hacer este cambio se modificó la forma en que se emitía la información recabada de los sensores; esta vez se transformaron las variables que contenían los parámetros en un formato compatible y se unieron en una sola cadena que se almacenó en una variable, para posteriormente ser procesada con la librería de generación de tramas.

Ya con la librería agregada en el programa, el siguiente paso fue comprobar su funcionamiento. Para esto, se almacenó en una variable una cadena aleatoria de valores con la misma estructura que tendría la información real proveniente de las sondas de medición. Después, se programó el nuevo firmware en el Arduino y se le colocó uno de los radios configurados como ruteador. Enseguida se conectó el XBee junto con los sensores al ordenador, mientras que, en otro puerto USB, se conectó el radio coordinador y se puso en funcionamiento mediante XCTU. Una vez que el coordinador comenzó a mostrar las notificaciones de los mensajes recibidos se verificó que dichos paquetes contuvieran la información correcta.

Después de comprobar el funcionamiento del programa de medición y envío de la información, se realizó un programa en código Python para recibir las mediciones, de forma tal que la información pueda ser clasificada dependiendo del remitente, almacenada en una base de datos y posteriormente procesada mediante lógica difusa. Dicho código se puede consultar en el Anexo 2; sin embargo, en el siguiente Script se muestra cómo se utilizó la herramienta serial de Python para mantener al dispositivo maestro de recepción a la espera de información, descartando y seleccionando la información que es de interés para cada caso. Para esto, primero se creó un objeto del tipo serial con el nombre de “ser” y se configuraron sus propiedades de acuerdo con los parámetros del puerto USB al que está conectado el XBee y del módulo de recepción que obtiene la información de los sensores. Si llega información, ésta se

almacena en el buffer de datos “data” para después analizarla y preguntar por una sección del paquete de datos (“da”), que corresponde a la dirección específica del XBee de procedencia y que se encuentra del Byte 39 al 41. Si es así, quiere decir que el paquete proviene del XBee de monitoreo del agua y no del XBee de monitoreo de Sigatoka, y por lo tanto se procede a enviar una trama al esclavo correspondiente para que este sepa que llegó su información y que puede seguir con la transmisión. Cabe mencionar que la estructura de la trama recibida concuerda con el orden mostrado en la Figura 2.4.

```
import serial
import time
import struct

ser = serial.Serial('COM3', 9600)
ser.timeout = 1

while True:
    size = ser.inWaiting()
    if size:
        data = ser.read(size)
        if str(data)[39:41] == "da":
            print(data)
            input_array = [0x7E, 0x00, 0x15, 0x10, 0x01, 0x00, 0x13,
0xA2, 0x00, 0x40, 0xA1, 0x52,
0xDA, 0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00, 0x73, 0x61, 0x6C, 0x75,
0x64, 0x6F, 0x73, 0x34]
            write_bytes = struct.pack('<' + 'B' * len(input_array),
*input_array)
            ser.write(write_bytes)

            time.sleep(1)
        else:
            print('no data')
            time.sleep(1)
    else:
        print('ser not open')
ser.close()
```

## **4.4 Almacenamiento de la información**

La información principal del proyecto, referente únicamente al pH y CE del agua, se almacenó en una base de datos local utilizando el gestor de base de datos de MySQL. Es aquí donde se extrae la fecha y hora actuales directo del ordenador para incluirlas en el registro diario. El Script de dicho procedimiento se puede consultar en el Anexo 2.

## **4.5 Procesamiento de la información**

En este subtema se describe el procedimiento que se realizó para obtener el modelo difuso a utilizar para la evaluación de la calidad agronómica del agua.

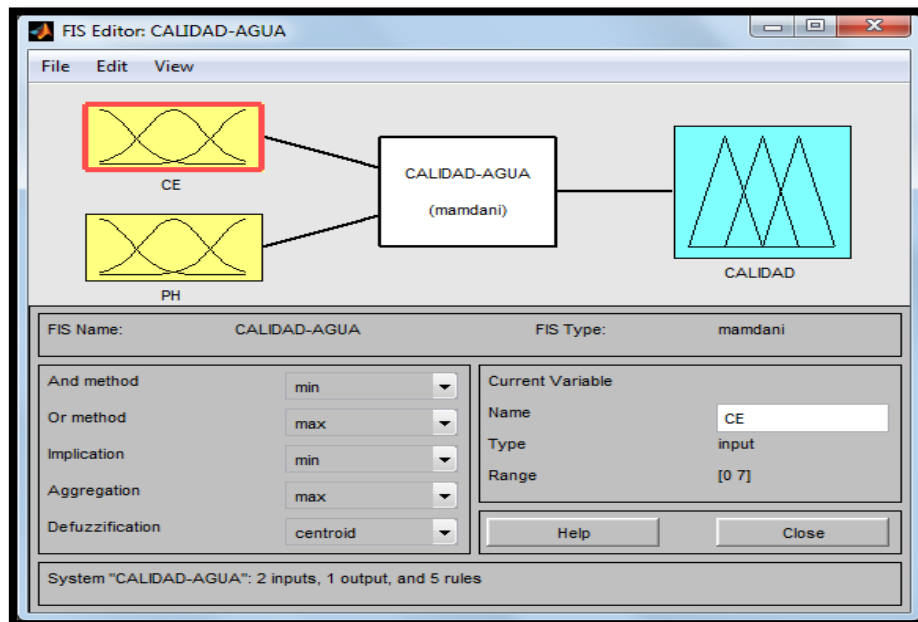
### **4.5.1 Modelado del sistema difuso**

Para desarrollar modelo difuso se investigaron los parámetros más importantes para la determinación de la calidad agronómica del agua y para cuáles de ellos existían equipos de bajo costo, capaces de obtener mediciones en tiempo cuasi real. En este caso se determinó que los más apropiados eran el pH y la CE del agua. Dichos parámetros fueron utilizados como variables lingüísticas de entrada del sistema difuso, es decir, aquellas que determinarán la calidad agronómica del agua. Además, se indagaron los rangos idóneos en los que se consigue un aprovechamiento óptimo del agua por parte de la planta y se favorece una mejor producción (tanto en calidad como en cantidad) en el cultivo del plátano, así como aquellos que generan condiciones desfavorables al presentarse en el agua de riego.

Para realizar el modelado del FIS, se utilizó el Toolbox Fuzzy Logic de Matlab, ya que se trata de una herramienta especializada en el diseño y simulación de sistemas difusos.

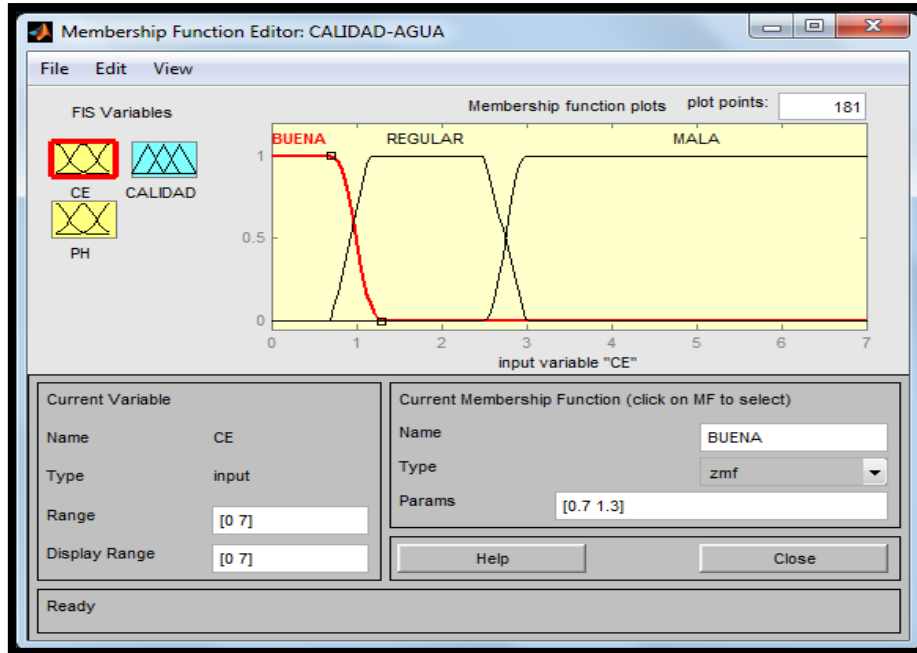
Una vez en Matlab se procedió a la elaboración y configuración del FIS. En la Figura 0.2 se muestra la definición de dos entradas, una para cada variable lingüística. En este caso, para la conductividad eléctrica se declaró la entrada CE, y para el pH la entrada PH; todas con mayúsculas. De igual forma, se definió la salida CALIDAD, que

en este caso es la que describe la calidad agronómica del agua. El sistema de inferencia utilizado es el tipo Mamdani.



**Figura 0.2** Definición del FIS. “Elaboración propia”.

La configuración de CE se muestra en la Figura 0.3. Se definió para un universo de discurso (Rango) de 0 a 7 es decir, el rango de valores que podrá tomar esta entrada será de 0 a 7. Esta variable se describió con el uso de tres conjuntos difusos (valores lingüísticos), para los cuales se insertaron tres MF. El dominio de estas funciones se definió con base en las características de los intervalos previamente recabados para la conductividad del agua de riego. A cada función se le asignó una etiqueta lingüística, también llamados identificadores descriptivos. Para la primera, que representa un riesgo de salinidad nulo, se utilizó la etiqueta BUENA; para la segunda, donde el riesgo es moderado, la etiqueta REGULAR; y para los valores donde el riesgo de salinidad es alto, se utilizó la etiqueta lingüística MALA.



**Figura 0.3 Definición de la entrada CE. “Elaboración propia”.**

Debido a que la etiqueta BUENA contiene todos los valores de la variable lingüística CE del rango que no representa un riesgo de salinidad para el cultivo, se empleó una función asimétrica polinomial con apertura a la izquierda, donde el núcleo de la función, es decir, aquellos valores que mantienen una pertenencia de uno, también llamada pertenencia total, son todas aquellas entradas con valores inferiores a 0.7 dS/m y cuyos valores de frontera -valores con pertenencia mayor a cero y menor a uno- comienzan a decrecer a partir de este mismo valor, generando así una intersección con la MF REGULAR, donde CE estará definida por el comportamiento de ambos conjuntos difusos y hasta un valor de 1.3 en el universo de discurso.

Por su parte, para la etiqueta REGULAR, se optó por utilizar una MF trapezoidal, para la cual se definió un soporte de entre 0.7 y 3 con un núcleo entre 1.15 y 2.5. Esto con el fin de darle mayor peso a los conjuntos BUENA y MALA, donde esta última etiqueta, corresponde a una MF sigmoideal (smf) con valores de frontera de entre 2.5 y 3 y un núcleo definido en todo el rango restante.

Por su parte, como se aprecia en la Figura 0.4 a la entrada PH se le asignó un universo de discurso de 0 a 14 y se utilizaron tres valores lingüísticos para describirla; todos con sus respectivas MF, pero esta vez, con los dominios determinados por las características de los rangos definidos para el pH del agua de riego.

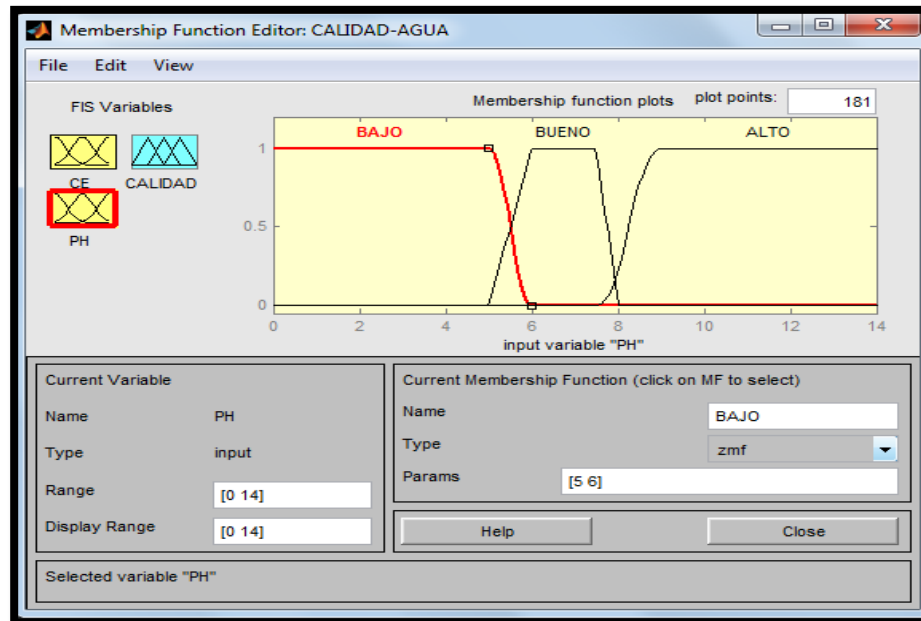
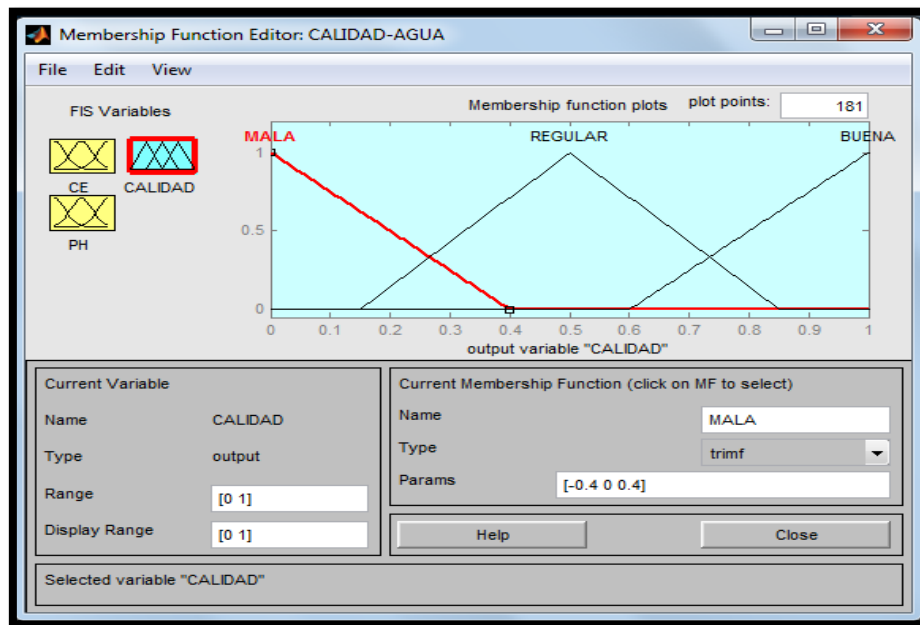


Figura 0.4 Definición de la entrada PH. “Elaboración propia”.

El conjunto difuso BAJO se definió mediante una MF asimétrica polinomial con apertura a la izquierda con el núcleo en un rango de 0 a 5, mientras que sus valores de frontera, decrecen de acuerdo con la función hasta alcanzar un valor de cero con una entrada de pH de 6, e intersecando a la función BUENO, cuyo comportamiento está definido por una MF tipo trapezoidal, con un soporte de entre 5 y 8 y un núcleo de entre 6 y 7.5. Por último, la función ALTO se configuró con una MF sigmoideal con una frontera que va de 7.5 a 9 y un núcleo que abarca todos los demás posibles valores de pH, es decir, aquellos que representan un incremento en la alcalinidad del agua conforme se avanza a la derecha del rango.

La variable lingüística de salida, llamada CALIDAD se muestra en la Figura 0.5. Fue delimitada a un rango que va de 0 a 1, y se caracterizó con tres conjuntos difusos; todos descritos mediante MF triangulares. La primera de ellas, se etiquetó como MALA y se configuró con un soporte de entre -0.4 y 0.4, con su valor de pertenencia más alto

ubicado en la punta de la función, indicando una mala calidad en el agua; la segunda MF, se estableció con un soporte de entre 0.15 y 0.85, con una pertenencia total exactamente a la mitad del rango y, por último, la tercera función, que define aquellos valores para los que el agua tiene las características más apropiadas para el cultivo, es decir, aquellas que resultan de las mejores ponderaciones de las dos variables lingüísticas de entrada y con las que se logra el mejor rendimiento en el cultivo del plátano, fue configurada con un soporte de entre 0.6 y 1.4, con una pertenencia total en 1.



**Figura 0.5 Definición de la salida CALIDAD. “Elaboración propia”.**

Las reglas lingüísticas o reglas de inferencia que se especificaron para el sistema de inferencia Mamdani se muestran en la Tabla 0-1; estas fueron propuestas conforme a la lógica de aceptación de la calidad del agua, es decir que, si alguno de los parámetros se encuentra fuera del rango aceptable, la calidad deberá ser proporcionalmente menor y, por el contrario, cuando ambos valores se encuentren en sus valores óptimos, la calidad agronómica del agua debe resultar con la mejor puntuación. Por ejemplo, para el caso de la regla uno, si la CE es buena, y el pH es bueno, entonces la calidad agronómica del agua es BUENA.



Tabla 0-1 Reglas lingüísticas del FIS.

---

**REGLAS LINGÜÍSTICAS IF - THEN**

---

1. If (*CE* is *BUENA*) and (*PH* is *BUENO*) then (*CALIDAD* is *BUENA*)
  2. If (*CE* is *REGULAR*) and (*PH* is *BUENO*) then (*CALIDAD* is *REGULAR*)
  3. If (*CE* is *MALA*) and (*PH* is *BAJO*) then (*CALIDAD* is *MALA*)
  4. If (*CE* is *MALA*) and (*PH* is *ALTO*) then (*CALIDAD* is *MALA*)
  5. If (*CE* is *MALA*) and (*PH* is *BUENO*) then (*CALIDAD* is *MALA*)
- 

Una vez generado el FIS, se tomó una muestra del agua que actualmente es utilizada para el riego de la parcela de plátano y se tomaron cinco mediciones de pH y CE con el apoyo de un medidor de bolsillo combo de pH/conductividad/TDS (ver Figura 0.6), para de esta manera utilizar los valores como entradas en la simulación del FIS y analizar su respuesta ante la presencia de niveles normales de los parámetros. Cabe señalar que únicamente se pudo contar con el medidor durante un tiempo limitado, por lo que los datos obtenidos corresponden a un solo día de muestreo en el mismo cuerpo de agua.



Figura 0.6 Toma de mediciones en una muestra de agua.

Como se muestra en la Tabla 0-2, los valores de conductividad eléctrica variaron de  $0.2 \pm 0.02$  dS/m y el nivel de pH fue de 6.59 a 7.27. En este caso, dicha variación se puede deber a diferentes factores, tales como el movimiento del agua y el oxígeno ingresado después de llenar el contenedor, así como la incidencia de los rallos solares sobre la muestra de agua; sin embargo, los valores no son tan contrastantes debido a que normalmente el agua no cambia de forma tan brusca en tan poco tiempo sin la inserción excesiva de otros agentes externos. No obstante, posteriormente se utilizaron valores que, de acuerdo con la bibliografía consultada en torno a la calidad agronómica del agua, podrían presentarse en el agua de riego como resultado de condiciones desfavorables en la fuente de suministro y que resultarían en afectaciones para los cultivos de plátano, tales como una conductividad mayor a tres dS/m y niveles de pH mayores a ocho y menores a cinco. Dichos valores se utilizaron para evaluar el comportamiento del sistema.

**Tabla 0-2 Parámetros recabados del muestreo.**

<b>Prueba</b>	<b>Conductividad (ds/m)</b>	<b>pH</b>
1	0.18	6.59
2	0.20	6.72
3	0.22	7.26
4	0.22	7.27
5	0.21	7.27

Posteriormente, el modelo difuso obtenido se trasladó al lenguaje utilizado para el desarrollo del sistema de control; para esto se utilizó la herramienta skfuzzy del Toolbox Scikit-Fuzzy, el cual es una colección de algoritmos de lógica difusa destinados al uso en SciPy Stack, escritos en el lenguaje informático Python. Con este instrumento se pudo integrar la parte de lógica difusa en el proyecto.

## 4.6 Presentación de la información

En este apartado se describen las actividades realizadas para el desarrollo de la etapa de presentación, siendo esta etapa la última del desarrollo del prototipo planteado en este proyecto.

### 4.6.1 Página local

Para el desarrollo de la página local de monitoreo se utilizó el framework web Django de Python. En él se desarrollaron las interfaces para el sistema de monitoreo de la sigatoka y para el de la evaluación de la calidad agronómica del agua. Para la parte de monitoreo del agua se programó un menú con tres páginas. Una de ellas contiene el valor de los parámetros actuales (ver Figura 0.7), donde se muestran la evaluación del agua, la temperatura, el pH y la CE en tiempo cuasi real; acompañados de imágenes ilustrativas que cambian de acuerdo a la valoración de cada uno de los parámetros, excepto la temperatura, puesto que no es un valor a considerar en la evaluación del agua para el cultivo del plátano.



Figura 0.7 Interfaz de Parámetros Actuales. “Elaboración propia”.

En la segunda pestaña se muestra la gráfica de las mediciones (ver Figura 0.8). En esta se pueden seleccionar las fechas a consultar para analizar la información de acuerdo con las necesidades del productor, así como también se puede elegir visualizar todos los datos o únicamente una parte de ellos.



**Figura 0.8** Interfaz de gráficos de los parámetros. “Elaboración propia”.

Por último, como se muestra en la Figura 0.9, la tercera pestaña del menú se encarga de presentar en una tabla toda la información ordenada de los parámetros recopilados hasta el momento de la consulta, de tal manera que se pueda tener un acceso a los datos de la manera que resulte más útil para el usuario.

Fecha	Hora	PH	Conductividad
2020-03-19	11:01:00	7.58	0.82
2020-03-19	11:01:00	7.58	0.82
2020-03-19	11:01:00	7.58	0.82
2020-03-19	11:01:00	7.77	0.82
2020-03-19	11:01:00	7.76	0.82
2020-03-19	11:01:00	7.60	0.82
2020-03-19	11:00:00	7.75	0.82
2020-03-19	11:00:00	7.74	0.82
2020-03-19	11:00:00	7.73	0.82
2020-03-19	11:00:00	7.74	0.82

**Figura 0.9** Tabla de datos recopilados. “Elaboración propia”.

## 4.6.2 Pantalla LCD

Los encargados de realizar el riego en la parcela requieren de poder acceder a los parámetros del agua de riego que se están monitoreando sin tener que ir a revisar

estos datos hasta las oficinas de control. La forma más accesible de satisfacer esta necesidad fue con una pantalla LCD en la carcasa del nodo de medición.

Para facilitar su instalación, se utilizó un módulo I2C, cuyos 16 pines fueron soldados directamente a la pantalla LCD, tal como se muestra en la Figura 0.10. Después se conectaron las terminales SDA y SCL del dispositivo a una de las terminales libres I2C del Arduino, el pin de voltaje a 5 V de la tarjeta, el GND a un GND del Arduino y se realizaron pruebas. Se modificó el programa de control de mediciones para enviar la información de pH y CE al LCD y para generar los caracteres necesarios para mostrar las unidades correspondientes de los parámetros en la pantalla, así como para refrescar en la información reflejada en el LCD cada que cambian los datos de la medición. Al realizar pruebas con la pantalla también fue necesario ajustar el brillo mediante el potenciómetro que tiene integrado el módulo I2C del LCD.



Figura 0.10 Conexión del módulo I2C con la pantalla LCD. "Elaboración propia".

## Resultados obtenidos

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de todo el proceso de investigación y desarrollo de este proyecto.

### 5.1 Modelo difuso

El resultado del proceso de modelado se puede apreciar en el visualizador de superficies de Matlab (ver Figura 5.1). Dicha superficie describe el comportamiento de la calidad agronómica del agua ante cualquier variación de pH o de CE comprendida en los universos de discurso definidos para este modelo. Las características restrictivas del pH hacen que las funciones limiten también su impacto en la evaluación del agua, por lo que el agua representará una mejor calidad a medida que el pH se acerque a cinco y la CE se mantenga en valores bajos; característica que coincide con los rangos previamente indicados y que son los adecuados para un favorable desarrollo del cultivo del plátano.

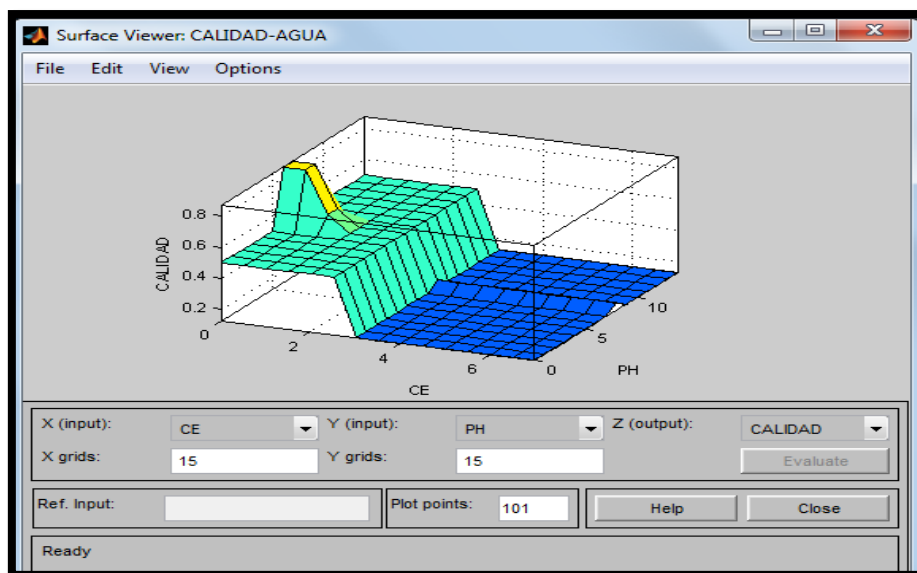


Figura 5.1 Superficie de salida del FIS. "Elaboración propia".

En la Tabla 5-1 se muestran las mediciones presentadas en el subtema 4.5, junto con la valoración de sistema difuso para cada conjunto de parámetros. Como se puede apreciar, la ponderación en todos los casos, resultó en una calidad agronómica de 0.87; esto debido a que, aún cuando existe una ligera variación en los parámetros debida al movimiento de las partículas dentro del agua y a la incidencia de otros factores como el oxígeno y la luz solar; el pH y la CE se mantuvieron siempre en un rango aceptable de calidad para el cultivo del plátano, de acuerdo a los rangos establecidos previamente en el Capítulo 1.

**Tabla 5-1 Parámetros medidos y evaluación de calidad.**

<b>Prueba</b>	<b>Conductividad (ds/m)</b>	<b>pH</b>	<b>Calidad</b>
1	0.18	6.59	0.87
2	0.20	6.72	0.87
3	0.22	7.26	0.87
4	0.22	7.27	0.87
5	0.21	7.27	0.87

Por otra parte, en la Tabla 5-2 se muestra la ponderación resultante del modelo como resultado de la interacción de niveles de pH y CE que, de acuerdo a la literatura consultada, pueden resultar dañinos para la planta, como es el caso de una conductividad mayor a tres dS/m y niveles de pH mayores a ocho y menores a cinco.

Así pues, al igual que los resultados anteriores, dicha valoración se obtuvo mediante el visualizador de reglas de Matlab, donde cada bina de parámetros fue utilizada como entrada en el FIS tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 5.2; en el que, un valor de 0.8 se ingresó en CE y un valor de 7.6 en PH, dando como resultado una calidad agronómica de 0.712.

Tabla 5-2 Parámetros de prueba y evaluación de la calidad.

<b>Prueba</b>	<b>Conductividad (ds/m)</b>	<b>pH</b>	<b>Calidad</b>
1	0.8	7.20	0.719
2	0.80	7.60	0.712
3	0.85	7.20	0.682
4	0.85	7.65	0.670
5	0.90	7.20	0.655
6	0.90	7.70	0.638
7	0.95	7.20	0.630
8	0.95	7.75	0.616
9	1	7.80	0.611
10	1	7.20	0.603

La evaluación resultante del agua en ambos casos, refleja un comportamiento lógico en el que el parámetro de calidad realmente puede ayudar al agricultor en la toma de decisiones respecto a su cultivo; sin embargo, es importante mencionar que para lograr una conjugación mejor entre los parámetros involucrados en la evaluación, se requiere de un proceso más extenso en el que se pueda analizar el comportamiento productivo de la parcela a partir de la implementación de este sistema y analizar cuáles son las condiciones óptimas para este predio en específico, con base en la variedad de plátano y en el tipo de suelo donde se cultiva.



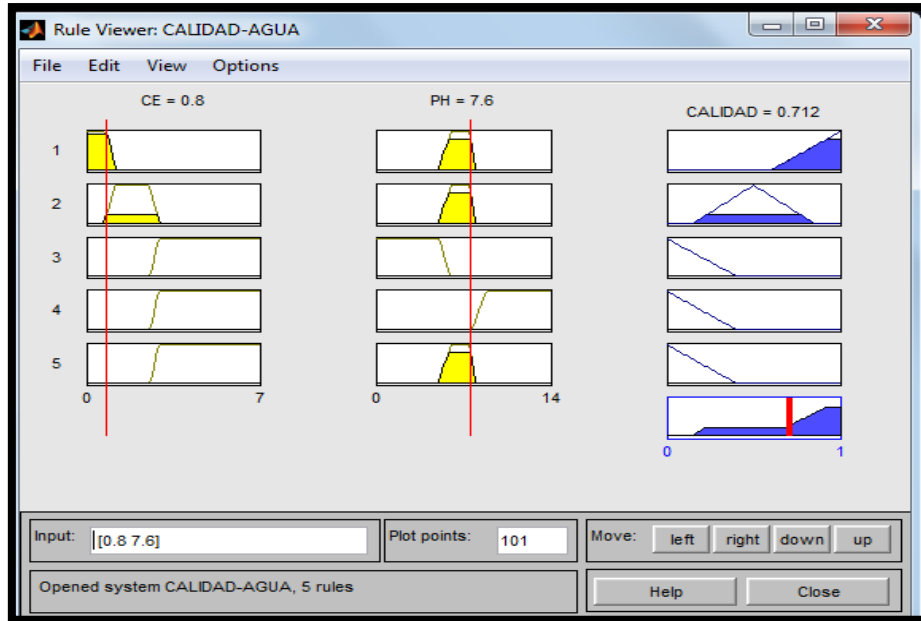
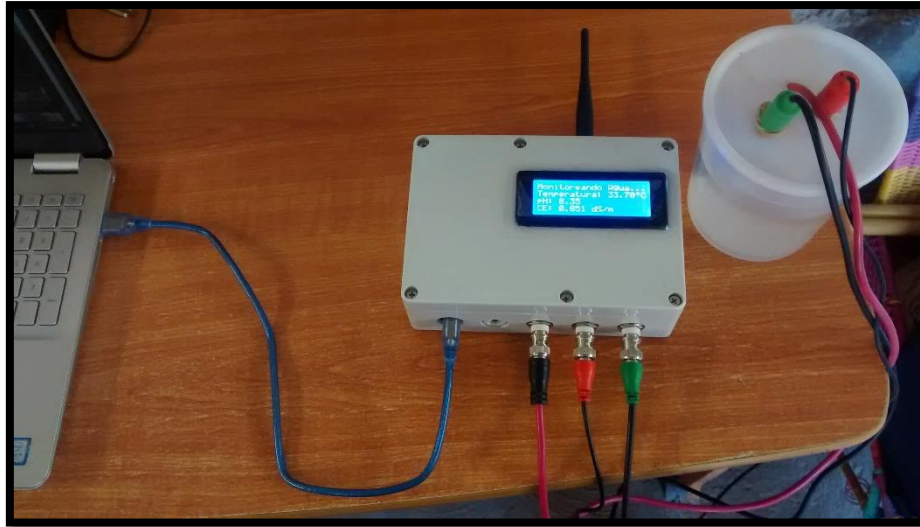


Figura 5.2 Visualizador de reglas del FIS. “Elaboración propia”.

Una vez modelado, se trasladó el sistema difuso a lenguaje Python (ver Anexo 2), con lo cual se comprobó que esta rama de la IA es bastante útil para aprovechar el potencial que pueden llegar a tener las relaciones entre variables agronómicas que por sí solas tienen valor, pero que pueden generar aplicaciones importantes en la agricultura, como en este caso, para evaluar las condiciones del agua de riego.

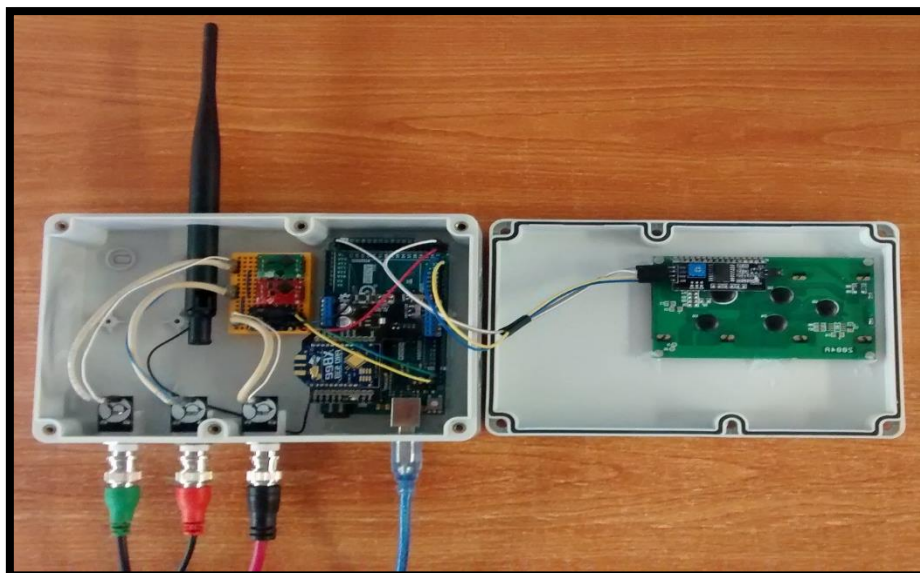
## 5.2 Equipo de medición

Como se muestra en la Figura 5.3, el módulo de medición desarrollado durante este proyecto consta de tres sensores (pH, CE y temperatura) con conexión BNC; una antena de comunicación y una pantalla LCD donde se muestran los parámetros medidos; todo instalado en un gabinete a prueba de polvo, humedad y agua u otro tipo de líquidos.



**Figura 5.3 Vista exterior del módulo de medición.**

El interior de la carcasa se muestra en la Figura 5.4. Ahí se encuentra la tarjeta Arduino que controla todas las sondas y coordina la comunicación por RV mediante el radio XBee conectado a ella. La antena de transmisión está orientada de manera vertical para lograr una mejor recepción y la pantalla LCD se encuentra conectada mediante el módulo I2C al Arduino. Cuenta con una entrada para reprogramar el microcontrolador en caso de ser necesario, así como una entrada para conectar a una fuente de alimentación de 120 V a través de un regulador de voltaje.



**Figura 5.4 Vista interior del módulo de medición.**

### 5.3 Implementación en campo

Una vez terminado el sistema de monitoreo se llevó a cabo de forma exitosa la instalación en campo de todos los componentes. La carcasa del módulo de adquisición se instaló en el soporte instalado en las cercanías del sistema de extracción y se conectó a un tomacorriente, tal como se muestra en la Figura 5.5; enfrente del soporte se colocó la cápsula que alberga las sondas, en cuyo extremo izquierdo se encuentra la entrada de agua proveniente de la derivación de la tubería principal y en el extremo derecho la salida que permite el flujo del líquido para mantener las mismas características del agua que se extrae y que es utilizada para el riego.



**Figura 5.5 Prototipo instalado.**

De igual forma, se realizó la instalación de los programas necesarios para almacenar y visualizar los parámetros en la computadora situada en las oficinas de la empresa; sin embargo, debido a que no se contaba con una conexión de Internet en las instalaciones y a que se requerían varios programas y actualizaciones, fue necesario buscar una conexión a internet para terminar con la configuración.

## 5.4 Discusión de resultados

Como se pudo analizar previamente en la revisión de literatura, los proyectos que se han venido desarrollando a lo largo del tiempo, junto con la continua evolución de la tecnología; han permitido visualizar nuevas formas de atajar algunas problemáticas que atañen a actividades sumamente importantes como lo es la agricultura. Es por esto que, con el desarrollo de este proyecto, se ofrece una alternativa de solución a un problema específico, con el afán de hacer una diferencia en el apoyo al sector agrícola mexicano.

A continuación, en la Tabla 5-3 Comparativa de sistemas analizados en la revisión de literatura. Tabla 5-3 se muestra una comparación entre los trabajos relacionados que se analizaron previamente y el sistema desarrollado al finalizar este proyecto.

**Tabla 5-3 Comparativa de sistemas analizados en la revisión de literatura.**

<b>Autor</b>	<b>Requiere conexión a Internet</b>	<b>Se comunica de forma inalámbrica</b>	<b>Utiliza inteligencia artificial</b>	<b>Cuenta con un medio de alerta</b>	<b>Se enfoca en la agricultura</b>	<b>Monitorea en tiempo cuasireal</b>	<b>Requiere pruebas de laboratorio</b>	<b>Es un prototipo funcional</b>
Lin & Liu (2008)	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	No	Sí
Cloete, Malekian, & Nair (2016)	No	Sí	No	Sí	No	Sí	No	Sí
Caldo & Dadios (2012)	No	No	Sí	No	No	No	Sí	No
Bórquez-López et al. (2017)	No	Sí	Sí	No	No	Sí	No	No
Sakizadeh (2016)	No	No	Sí	No	No	No	Sí	No
<b>Sistema propuesto</b>	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí

---

## Conclusiones y trabajo futuro

Se desarrolló un equipo de monitoreo de bajo costo, capaz de realizar mediciones del pH y CE del agua en tiempo cuasi real y mostrarlas de forma remota vía RF, junto con una evaluación de su calidad mediante un sistema de inferencia difuso, que expresa la idoneidad del agua para su uso en el riego del cultivo del plátano. Se trata de un sistema sumamente versátil, capaz de implementarse en cualquier cultivo únicamente adecuando el sistema de inferencia a los rangos específicos que requiera la planta. Además, puede convivir con otros sistemas de medición, posibilitando la generación de grandes redes de monitoreo que permitan un mejor control de todos los aspectos importantes del cultivo para el productor.

Por su parte, los resultados del modelo difuso reflejan un comportamiento lógico en el que la evaluación de la calidad por parte del sistema puede ayudar al agricultor en la toma de decisiones respecto a su cultivo, alertándolo ante la disminución de la calidad del agua o pudiendo mejorar aún más las condiciones del cultivo en caso de que los niveles de CE y pH pudieran ser mejores; sin embargo, para encontrar el balance correcto entre los parámetros involucrados, como trabajo futuro se propone un proceso de pruebas en el que la base de datos que se genere a partir de este sistema, pueda contratarse con registros de producción de la parcela para conocer qué proporciones favorecen más a esta variedad de plátano y junto con ello de qué manera el agua transforma las propiedades del sustrato con base en el tipo de suelo que se tiene en la parcela para de esta manera ir realizando adecuaciones en el sistema difuso.

Así mismo, se propone implementar un modelo difuso utilizando un sistema de inferencia tipo Takagi Sugeno en la etapa de evaluación de los parámetros para comparar los resultados con los obtenidos en este proyecto y así determinar cuál de los dos representa una mejor opción para estimar la calidad agronómica del agua para

el cultivo del plátano. Así mismo, se propone utilizar el registro de información recabada después de un periodo de tiempo representativo e implementar técnicas de minería de datos o IA para detectar patrones que permitan prever el comportamiento de la calidad del agua y anticiparse a los acontecimientos que pudieran afectar el cultivo. A continuación, se muestra una lista de los beneficios del sistema desarrollado.

- Modelo de lógica difusa para evaluar la calidad agronómica del agua en el cultivo de plátano.
- Monitoreo en tiempo cuasi real.
- Telecomunicación sin necesidad de internet.
- Fácil integración con otros sistemas de monitoreo.
- Puede adecuarse para cualquier otro cultivo.

Lo anterior permite aseverar que la integración de la lógica difusa en sistemas de monitoreo del agua de riego, es una alternativa viable que genera información de utilidad acerca de la calidad agronómica del agua; lo cual, ayuda a tener un mejor control del impacto que tiene el riego sobre cultivos tan importantes como lo es el plátano; comprobándose así la hipótesis planteada previamente en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- Almazan Cisneros, R. (2003). *Apuntes de la materia Riego y Drenaje*. Retrieved from <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego y Drenaje.pdf>
- Arduino. (2020). XBee Shield. Retrieved April 20, 2020, from <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoXbeeShield>
- Atlas Scientific. (2002). *Lab Grade pH Probe*. Retrieved from [https://www.atlas-scientific.com/\\_files/\\_datasheets/\\_probe/legacy/l-l-ph-probe.pdf](https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_probe/legacy/l-l-ph-probe.pdf)
- Atlas Scientific. (2018). PT-1000 Temperature Probe. Retrieved May 28, 2019, from [https://www.atlas-scientific.com/\\_files/\\_datasheets/\\_probe/PT-1000-probe.pdf](https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_probe/PT-1000-probe.pdf)
- Atlas Scientific. (2019). *E.C. Probe K 0.1*. Retrieved from [https://www.atlas-scientific.com/\\_files/\\_datasheets/\\_probe/EC\\_K\\_0.1\\_probe.pdf](https://www.atlas-scientific.com/_files/_datasheets/_probe/EC_K_0.1_probe.pdf)
- Australian Government. (2008). The Biology of Musa L. (banana). In *The Biology of Musa L. (Banana)*. Retrieved from [http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/content/banana-3/\\$FILE/biologybanana.pdf](http://www.ogtr.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/content/banana-3/$FILE/biologybanana.pdf)
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water Quality for Agriculture. In *IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER* (Vol. 29). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Bórquez-López, R. A., Martínez-Córdova, L. R., Casillas-Hernández, R., López-Elías, J. A., Barraza-Guardado, R. H., Ibarra-Gámez, J. C., & Gil-Núñez, J. C. (2017). MONITOREO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA PARA CAMARONICULTURA POR MEDIO DE UN HARDWARE DE ACCESO ABIERTO Y UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA. *Biotecnia*, 45–49. Retrieved from <http://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/449>
- Caicedo, A. (2017). *Arduino para principiantes* (Segunda). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=W1rGCgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=9781505349900&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjU1KiWnfLoAhUMEawKHQdoCIEQ6AEIKDAA#v=onepage&q=9781505349900&f=false>
- Caldo, R. B., & Dadios, E. P. (2012). Fuzzy logic control of water quality monitoring and surveillance for aquatic life preservation in Taal Lake. *IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON*. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2012.6412268>
- Caprile, S. R. (2009). *Equisbí: Desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4* (Primera; GAE, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=xTXv5-AhOhMC&pg=PA135&dq=Zigbee&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiEnaW8hMHiAhVKnq0KHct-Az8Q6AEIKzAA#v=onepage&q=Zigbee&f=false>

- Christophersen, T. (2017). La agricultura en el siglo XXI: un nuevo paisaje para la gente, la alimentación y la naturaleza. Retrieved April 8, 2020, from ONU Medio Ambiente website: <http://www.onu.org.mx/la-agricultura-en-el-siglo-xxi-un-nuevo-paisaje-para-la-gente-la-alimentacion-y-la-naturaleza/>
- Cloete, N. A., Malekian, R., & Nair, L. (2016). Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring. *IEEE Access*, 4(9), 3975–3990. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2592958>
- CONAGUA. (2009). *Semblanza Histórica del Agua en México*. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-28SemblanzaHistóricaMéxico.pdf>
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero El Colomo (0607), Estado de Colima*. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103486/DR\\_0607.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103486/DR_0607.pdf)
- CONAGUA. (2017). Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico. Retrieved April 16, 2020, from <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/organismo-de-cuenca-lerma-santiago-pacifico>
- CONAGUA. (2018). *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO 2018*. Ciudad de México.
- Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores, Aplicaciones con Arduino* (Primera). Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=wMm3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=9786074389364&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjK7Za\\_hPDoAhUESq0KHcelDlcQ6AEIKDAA#v=onepage&q=9786074389364&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=wMm3BgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=9786074389364&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjK7Za_hPDoAhUESq0KHcelDlcQ6AEIKDAA#v=onepage&q=9786074389364&f=false)
- DIGI. (2013). ¿Qué es XBee? Retrieved April 18, 2020, from MCI Electronics website: <https://xbee.cl/que-es-xbee/>
- DIGI. (2018). *XBee-PRO 900HP/XSC RF Modules, S3 and S3B*.
- DIGI. (2019). *WIRELESS MESH NETWORKING: Both Zigbee and DigiMesh offer unique advantages*. Retrieved from [https://www.digi.com/pdf/wp\\_zigbeevsdigimesh.pdf](https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf)
- Domingo, R. (2017). *LA CALIDAD AGRONÓMICA DE LAS AGUAS DE RIEGO*. (3).
- Dong, J., Wang, G., Yan, H., Xu, J., & Zhang, X. (2015). A survey of smart water quality monitoring system. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-4026-x>
- FAO. (2005). *AGRICULTURA Y DIÁLOGO DE CULTURAS, nuestro patrimonio común*.
- FAO. (2020). México en una mirada. Retrieved from La agricultura y el desarrollo rural de México website: <http://www.fao.org/mexico/fao-en-mexico/mexico-en-una-mirada/es/>
- Flores, A., Gálvez, V., Hernández, O., López, J., Obregón, A., Orellana, R., ... Valdéz, M. (1996). *Salinidad un nuevo concepto* (UCOL, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=Q6MDHsgklJAC&printsec=frontcover&dq>



=salinidad+un+nuevo+concepto&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj1jtaYxfDfAhUNMawKHeTpC0oQ6AEIKTAA#v=onepage&q=salinidad un nuevo concepto&f=false

González Villarreal, I. (2020, January 21). Titular de la Sader celebra exportación de plátano de Colima a China. *Economía y Negocios*. Retrieved from <https://estacionpacifico.com/2020/01/21/titular-de-la-sader-celebra-exportacion-de-platano-de-colima-a-china/>

Herrera, M., & Colonia, L. (2011). *GUÍA TÉCNICA CURSO – TALLER, MANEJO INTEGRADO DEL CULTIVO DE PLÁTANO “JORNADA DE CAPACITACIÓN UNALM – AGROBANCO”* (pp. 1–33). pp. 1–33. Perú: UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.

INEGI. (1995). *Estudio Hidrológico del Estado de Colima*. Retrieved from [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221355/702825221355\\_1.pdf#\[1,%7B%22name%22:%22Fit%22%7D\]](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221355/702825221355_1.pdf#[1,%7B%22name%22:%22Fit%22%7D])

INEGI. (2001). *Cuaderno Estadístico Municipal; Manzanillo, Colima* (Primera). Retrieved from [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825932541/702825932541\\_1.pdf#\[1,%7B%22name%22:%22Fit%22%7D\]](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825932541/702825932541_1.pdf#[1,%7B%22name%22:%22Fit%22%7D])

INEGI. (2017a). *Agricultura*. Retrieved from <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/>

INEGI. (2017b). *Anuario estadístico y geográfico de Colima 2017*. Retrieved from [https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF\\_Docs/COL\\_ANUARIO\\_PDF.pdf](https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/COL_ANUARIO_PDF.pdf)

INTAGRI. (2018). Requerimientos de Clima y Suelos para el Cultivo de Banano. *Serie Frutales Artículos Técnicos de INTAGRI. México*, 3p. Retrieved from <https://www.intagri.com/articulos/frutales/requerimientos-de-clima-y-suelo-para-el-cultivo-de-banano>

Khokhar, T. (2017). Gráfico: A nivel mundial, el 70 % del agua dulce es utilizada para la agricultura. Retrieved June 1, 2020, from <https://blogs.worldbank.org/es/opendata/el-70-del-agua-dulce-es-utilizada-para-la-agricultura>

Kruiter, A. H. (1989). *El Banano en El Norte de la Zona Atlántica de Costa Rica* - Google Libros. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=1csOAQAIAAJ&pg=PA2&dq=el+banano&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj2ZfJ5uTfAhUNLKwKHapRCDAQ6AEIKTAA#v=onepage&q=el banano&f=false>

Lara, A. (2012). *Modelación De La Hidrodinámica De La Laguna De Cuyutlán, Colima*. Retrieved from <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5318/tesis.pdf?sequence=1>

- Lardizabal, R. (2007). *Manual de Producción; Producción de Plátano De Alta Densidad* (pp. 1–2). pp. 1–2. Honduras: Entrenamiento y Desarrollo de Agricultores.
- Lawn, R. (2003). *Practical Laboratory Skills Trainind Guides; Measurement of pH*. Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=HNJy5rtJLjAC&pg=PA1&dq=pH+what+is&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiwx7bd8-\\_oAhVymK0KHdLUA8MQ6AEIPzAD#v=onepage&q=pH what is&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=HNJy5rtJLjAC&pg=PA1&dq=pH+what+is&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiwx7bd8-_oAhVymK0KHdLUA8MQ6AEIPzAD#v=onepage&q=pH what is&f=false)
- Lin, J. S., & Liu, C. Z. (2008). A monitoring system based on wireless sensor network and an SoC platform in precision agriculture. *International Conference on Communication Technology Proceedings, ICCT*, 101–104. <https://doi.org/10.1109/ICCT.2008.4716133>
- López, J., Gómez, C., Rivas, J., & Losada, M. (1974). *pH-Metría*. Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=ROWCJ6xrUmwC&pg=PA47&dq=pH+que+es&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwui-lbc8u\\_oAhUOKKwKHdYCAG4Q6AEIYTAG#v=onepage&q=pH que es&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=ROWCJ6xrUmwC&pg=PA47&dq=pH+que+es&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwui-lbc8u_oAhUOKKwKHdYCAG4Q6AEIYTAG#v=onepage&q=pH que es&f=false)
- López, Juan, Fornés, J., Ramos, G., & Villarroya, F. (2009). *Las aguas subterráneas Un recurso natural del subsuelo* (4a ed.). Retrieved from <https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed.../educacion ambiental.pdf>
- Martinez Saldaña, T. (1983). *Historia de la agricultura en México*. Retrieved from <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/09/Historia-de-la-agricultura-en-México.pdf>
- Moctezuma, G., González, A., Romero, M., Pérez, R., & Castillo, C. (2017). *AGENDA TÉCNICA AGRÍCOLA COLIMA*. Retrieved from [http://www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/Agendas\\_Tec/2017/Agenda Técnica Colima OK.pdf](http://www.inifap.gob.mx/Documents/inicio/Agendas_Tec/2017/Agenda Técnica Colima OK.pdf)
- Muñíz Mercado, H. (2007). Manzanillo. Retrieved April 10, 2020, from Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México website: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM06colima/municipios/06007a.html>
- OECD/FAO. (2019). OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028. In *Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations*. [https://doi.org/10.1787/agr\\_outlook-2019-en](https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2019-en)
- OMEGA Engineering. (2003). Medidores de pH, Introducción a la Medición de pH. Retrieved April 18, 2020, from <https://mx.omega.com/prodinfo/medidores-de-pH.html>
- Oyarce, A. (2008). *Guía del Usuario XBee Series 1, Documento Preliminar*. Retrieved from [http://www.hmangas.com/Electronica/Datasheets/Shield XBee Arduino/XBee-Guia\\_Usuario.pdf](http://www.hmangas.com/Electronica/Datasheets/Shield XBee Arduino/XBee-Guia_Usuario.pdf)
- Pallás, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal* (Cuarta). Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=Eevyk28\\_fVkc&pg=PA185&dq=8426713440&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwislrKHhvDoAhUS5awKHQ2XDH8Q6AEIKDAA#v=onepage&q=8426713440&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=Eevyk28_fVkc&pg=PA185&dq=8426713440&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwislrKHhvDoAhUS5awKHQ2XDH8Q6AEIKDAA#v=onepage&q=8426713440&f=false)

- Pérez, I. (2007). *Logica difusa para principiantes: teoría y práctica* (Primera). Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=iCiiyyCFZuIC&printsec=frontcover&dq=logica+difusa&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjjp\\_6xnb\\_iAhURi6wKHZ28BqoQ6AEIKDAA#v=onepage&q=logica+difusa&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=iCiiyyCFZuIC&printsec=frontcover&dq=logica+difusa&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjjp_6xnb_iAhURi6wKHZ28BqoQ6AEIKDAA#v=onepage&q=logica+difusa&f=false)
- Ponce Cruz, P. (2010). Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería. In A. Herrera (Ed.), *Alfaomega, México* (Primera). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Inteligencia+artificial+con+aplicaciones+a+la+ingenier+a#0>
- Pressman, R. S. (2012). Ingeniería Del Software I. In *Ingeniería Del Software*.
- Reyes Garza, J. C. (2006). SALAGUA Y SANTIAGO DE BUENA ESPERANZA. In *Historia y Futuro del Desarrollo Turístico y Portuario del Litoral en MANZANILLO COLIMA*. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=ydlMblZIZaQC&pg=PA19&dq=fundacion+de+manzanillo+colima&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwiu7b6ahNzoAhVVHzQIHSb8ADwQ6AEIKDAA#v=onepage&q=fundacion+de+manzanillo+colima&f=false>
- Rhoades, J. D., Chanduvi, F., & Lesch, S. (1999). Soil salinity assessment, Methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *FAO IRRIGATION AND DRAINAGE PAPER*, 165. [https://doi.org/ISSN 0254-5284](https://doi.org/ISSN+0254-5284)
- Robinson, J. C., & Galán, V. (2012). *Plátanos y bananas*. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=mAv3EQAcgZ8C&pg=PA305&lpg=PA305&dq=platanos+y+bananas+robinson+pdf&source=bl&ots=7AsZtsT5-3&sig=NR1GwJgx6PVr3rwzrDE05wfjeXU&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiO4eLWme7fAhVL2qwKHVxUAzE4ChDoATALegQIBRAB#v=onepage&q&f=false>
- Rosales, O. L. (2012). *Caracterización física y química de plátanos de postre y cocción cultivados en México*. 78.
- SAGARPA. (2018). *Atlas Agroalimentario 2012-2018* (Vol. 1). Retrieved from [https://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018](https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018)
- Sakizadeh, M. (2016). Artificial intelligence for the prediction of water quality index in groundwater systems. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1007/s40808-015-0063-9>
- Sampieri, R. H. (2014). *METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN* (Sexta, Vol. 3). México D.F.: McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Secretaría de Economía. (2012). Monografía del Sector Plátano en México: Situación actual y Oportunidades de Mercado. In *Monografía*. Retrieved from [http://www.economia.gob.mx/files/Monografia\\_Platano.pdf](http://www.economia.gob.mx/files/Monografia_Platano.pdf)
- Secretaría del Foro Mundial Bananero. (2017). *Huella hídrica de la industria bananera | Foro Mundial Bananero | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Retrieved from <http://www.fao.org/world-banana-forum/projects/good-practices/water-footprint/es/>

- SEMARNAT. (2015). *Consejo Consultivo para el Desarrollo Sustentable de la Región Occidente*. Colima.
- Serna, A., Ros, F. A., & Rico, J. C. (2010). *Guía práctica de sensores*. España: Creaciones Copyright.
- Soto, M. (1994). *Atlas agropecuario de Costa Rica* (Primera). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=AWQqijADFric&pg=PA149&dq=origen+del+banano&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjJ5uHA4-3fAhUGi6wKHUoSCIMQ6AEIKTAA#v=onepage&q=origen del banano&f=false>
- Steiner, C. (2005). *The 8051/8052 Microcontroller: Architecture, Assembly Language, and Hardware Interfacing*. Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=NHQEUzLiY1MC&pg=PA267&dq=i2c+protocol&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjezf\\_E24jpAhVDnq0KHewpC-QQ6AEIKDAA#v=onepage&q=i2c protocol&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=NHQEUzLiY1MC&pg=PA267&dq=i2c+protocol&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjezf_E24jpAhVDnq0KHewpC-QQ6AEIKDAA#v=onepage&q=i2c protocol&f=false)
- Tambutti, R., & Muñoz Héctor. (2002). *Física 2* (S. A. D. C. V. EDITORIAL LIMUSA, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=b5eXA4SxCX8C&pg=PA32&dq=variacion+del+punto+de+ebullicion+con+la+altura&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjx-6LD0p7mAhUM26wKHfGfD9wQ6AEIUjAE#v=onepage&q=variacion del punto de ebullicion con la altura&f=false>
- Torres, J., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2014). Alteraciones antrópicas: historia de la Laguna de Cuyutlán, Colima. *Investigación Ambiental, Ciencia y Política Pública*, 6(1), 29–42.
- Vallejo, A., Vallejo, M., Nájera, J., & Garnier, L. (2017). GUÍA METODOLÓGICA PARA LA HUELLA DE CARBONO Y LA HUELLA DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN BANANERA. In *Acción Clima II*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/l8333ES/l8333es.pdf>
- Vazquez, R., Romero, A., Figueroa, J., & Munro, D. (2005). *Paquete tecnológico para el cultivo del PLÁTANO*. Retrieved from PAQUETES TECNOLÓGICOS PARA CULTIVOS AGRÍCOLAS, EN EL ESTADADO DE COLIMA website: [http://www.campocolima.gob.mx/paginaOEIDRUS/paquete tecnologico del platano.pdf](http://www.campocolima.gob.mx/paginaOEIDRUS/paquete_tecnologico_del_platano.pdf)
- Xu, Z., & Khoshgoftaar, T. M. (2004). Identification of fuzzy models of software cost estimation. *Fuzzy Sets and Systems*, 145(1), 141–163. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2003.10.008>
- Yadav, D. S., & Kúmar, A. (2004). *Microcontrollers, Features and applications* (Primera). Retrieved from [https://books.google.com.mx/books?id=rSLWIIFGfGcC&printsec=copyright&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?id=rSLWIIFGfGcC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets. Information and control*. 8(3), 338–353. Retrieved from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S001999586590241X?token=81116A45C97EBE2B69EAD0FEFA6F30F01580D9A134FCB07C70175F4E14B8CD68587085509F854E353986FA7123EEBB56>

Zadeh, L. A. (1999). From computing with numbers to computing with words-from manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *Advances in Soft Computing*, 45(1), 105–119. [https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1841-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1841-3_1)

## Cronograma de actividades

Actividades	Periodo: del 28 de enero de 2019 al 15 de junio de 2020																		
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	
Análisis de requerimientos	■	■	■	■															
Diseño del módulo de medición		■	■	■	■	■	■												
Diseño del módulo de control y procesamiento					■	■	■	■	■	■	■	■							
Implementación												■	■						
Operación													■	■					
Pruebas													■	■	■	■			
Mantenimiento y Corrección															■	■			
Entrega del proyecto																		■	■

---

## Componentes del sistema de monitoreo

Componente	Cantidad
XBee PRO S3B 900Hp	2
Antena dipolo de largo alcance con conexión UFL	2
XBee Shield para Arduino	2
Arduino Mega 2560	1
Arduino Uno	1
Atlas Scientific Conductivity probe K1.0 5-200,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1
Soluciones Buffer de calibración de 12 880 y 80 000 $\mu\text{S}$	-
Atlas Scientific Lab Grade pH Probe	1
Soluciones Buffer de calibración pH: 4, 7 y 10	-
PT-1000 Temperature Kit	1
Pantalla Display Lcd 20x4 2004	1
Interfaz I2c Para Display Lcd Arduino	1
Eliminador Para Arduino 9v – 1A	1
Caja Nema Abs para exteriores Ip65	1

---

---

## Prueba de funcionamiento de los XBee

Para iniciar a trabajar con los módulos XBee primero se realizó una prueba de funcionamiento en la que se utilizaron los siguientes materiales:

Componente	Cantidad
Arduino (no importa la versión)	2
Arduino sin microcontrolador	1
XBee Shield para Arduino	3
XBee PRO S3B 900HP	2
Antena dipolo de largo alcance con conector U-FL RF	2

---

En esta prueba, una tarjeta Arduino enciende un led al recibir una letra “H” por su terminal serie y lo apaga al recibir una letra “L”. Para esto, se utilizó un código disponible en la página oficial de Arduino llamado “Physical Pixel”. Este programa lo que hace es leer el puerto serie de la tarjeta y, cuando por este medio recibe una letra “H”, se pone en alto el pin que por default está conectado al LED de la placa Arduino y, de igual manera, cuando recibe una letra “L”, pone en bajo el mismo pin, apagando el LED. Se cargó el programa en la placa y se verificó su funcionamiento con el monitor serie del IDE de Arduino. Este Arduino es el que funge como receptor. Después, se conectó al ordenador otro Arduino, el cual se programó para que cada segundo mandara una letra “H” vía serial y después de un tiempo una letra “L”. De igual manera se verificó su funcionamiento con el monitor serie de Arduino. Este Arduino es el emisor.

Una vez hecho lo anterior, se insertaron las tarjetas XBee Shield y los XBee con sus antenas en cada uno de los Arduino programados (emisor y receptor) y después



se colocó el XBee Shield en modo USB y en modo RUN con los botones que tiene para esto la tarjeta. Enseguida se conectaron al ordenador.

De acuerdo con la hoja de datos del XBee PRO S3B 900HP, la configuración de fábrica de estos radios debía ser suficiente para que estos se comunicasen entre sí instantáneamente; sin embargo, la primera prueba no funcionó, ya que, al ser utilizados anteriormente estos módulos XBee, tenían parámetros configurados que entorpecían la comunicación. Razón por la cual se procedió a restablecer los módulos a su configuración de fábrica. Para esto, debido a que no se contaba con una tarjeta especial para la configuración de los radios XBee, se utilizó una tarjeta Arduino UNO a la cual se le tuvo que desprender el microcontrolador. Después, se colocó el XBee Shield con el XBee que se deseaba programar en el Arduino y se colocó el XBee Shield en modo USB y en modo RUN. Después, se conectó a la computadora y, por medio del programa XCTU, se procedió a buscar el dispositivo.

Una vez que el programa reconoció que tenía un módulo XBee conectado; se hizo clic en el objeto reconocido y con esto se cargaron los parámetros que tenía configurado el módulo. Ahora, a través del programa, se pueden configurar todos los parámetros del XBee, pero en esta ocasión únicamente se deseaba restablecer el módulo a las condiciones de fábrica, por lo que se pulsó en la opción de RESTABLECER, después en ESCRIBIR y con esto se grabaron y restauraron los parámetros del radio a los valores originales. Esto se realizó con los dos XBee.

Después de restablecer los dos módulos se conectaron a su Arduino correspondiente y automáticamente se enlazaron; el Arduino receptor comenzó a encender y apagar el LED en respuesta del emisor, que enviaba caracteres vía inalámbrica a través del XBee.

## Script de la implementación

El siguiente código de Python es el utilizado para elaborar el programa de control de la implementación final. En él se reciben los valores de los parámetros provenientes del módulo de adquisición, se toma la fecha y hora de la computadora en la que se instala, descifra la trama recibida, almacena la información en la base de datos local y calcula la calidad agronómica del agua.

```
from serial import Serial
import time
import struct
import numpy as np
import skfuzzy as fuzz
from skfuzzy import control as ctrl
import mysql.connector
from mysql.connector import Error
from mysql.connector import errorcode
import serial.tools.list_ports

def getCalidad(valph, valconductividad):
    ce = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 70, 1), 'conductividad')
    ph = ctrl.Antecedent(np.arange(0, 140, 1), 'ph')
    calidad = ctrl.Consequent(np.arange(0, 100, 1), 'calidad')

    ce['buena'] = fuzz.zmf(ce.universe, 7, 13)
    ce['regular'] = fuzz.trapmf(ce.universe, [7,11.5,25,30])
    ce['mala'] = fuzz.smf(ce.universe, 25,30)

    ph['bajo'] = fuzz.zmf(ph.universe, 50, 60)
    ph['bueno'] = fuzz.trapmf(ph.universe, [50,60,75,80])
    ph['alto'] = fuzz.smf(ph.universe, 75,90)

    calidad['mala'] = fuzz.trimf(calidad.universe, [0,0,40])
    calidad['regular'] = fuzz.trimf(calidad.universe, [15,50,85])
    calidad['buena'] = fuzz.trimf(calidad.universe, [60,100,100])

    rule1 = ctrl.Rule(ce['buena'] & ph['bueno'], calidad['buena'])
    rule2 = ctrl.Rule(ce['regular'] & ph['bueno'],
```

```

calidad['regular'])
    rule3 = ctrl.Rule(ce['mala'] & ph['bajo'], calidad['mala'])
    rule4 = ctrl.Rule(ce['mala'] & ph['bueno'], calidad['mala'])
    rule5 = ctrl.Rule(ce['mala'] & ph['alto'], calidad['mala'])
    cal_control = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3, rule4,
rule5])
    resultado = ctrl.ControlSystemSimulation(cal_control)
    resultado.input['conductividad'] = valconductividad
    resultado.input['ph'] = valph
    resultado.compute()
    calidad = resultado.output['calidad']/100
    return calidad

print("Esperando datos")
ports = list(serial.tools.list_ports.comports())
if(ports):
    for port in ports:
        p = str(port).split(" ")[0]
else:
    p=""

ser = serial.Serial(p, 9600, timeout=1)
time.sleep(2)

while 1:
    try:
        size = ser.inWaiting()
        localtime = time.asctime(time.localtime(time.time()))
        fecha = time.strftime("%Y/%m/%d", time.localtime())
        hora = time.strftime("%H:%M:00", time.localtime())
        if size:
            sql_select_Query = ""
            data = ser.read(size)
            if data[11:12]==b'\xda':
                datos = data[15:len(data)-1].decode("utf-8").split()
                while len(datos) < 6:
                    data2 = ser.read(size)
                    data = data + data2
                    datos = data[15:len(data)-1].decode("utf-
8").split()
                if len(datos) == 6:
                    cond = float(datos[5])/1000
                    calidad = getCalidad(float(datos[3]),cond)
                    calidad = '%.2f' % calidad
                    print(localtime+" Temp: "+datos[1]+" PH:
"+datos[3]+" Conductividad: "+str(cond))

```

```

        print("Calidad: "+calidad)
        sql_select_Query = "INSERT into
datos_calidad_historico(fecha,hora,temperatura,conductividad,ph,calid
ad)
VALUES('"+fecha+"','"+hora+"','"+datos[1]+"','"+str(cond)+"','"+datos[3]+"
','"+calidad+"")"
        try:
            connection =
mysql.connector.connect(host='localhost',
                        database='tesisdb',
                        user='root',
                        password='')

            cursor = connection.cursor()
            result = cursor.execute(sql_select_Query)
            connection.commit()
            cursor.close()
        except mysql.connector.Error as error:
            print("Failed to insert data ".format(error))
        time.sleep(2)
    except ser.SerialTimeoutException:
        print('Data could not be read')
        time.sleep(2)

```

---

## Manual del usuario

**ATENCIÓN:** *Por su seguridad y la del equipo; lea con cuidado las siguientes instrucciones. Si existe alguna duda contacte al encargado antes de realizar cualquier tipo de operación descrita en este manual.*

A continuación, se presentan una serie de recomendaciones e instrucciones con el fin de guiar al usuario en el proceso de familiarización con el sistema de Monitoreo de la Calidad Agronómica del Agua.

### ¿Qué es?

Es un sistema automatizado de monitoreo del agua que surge debido a la necesidad de contar con un equipo de bajo costo; capaz de medir parámetros esenciales del agua utilizada para el riego de vástagos de plátano, que permite evitar los daños en el cultivo derivados de un agua de mala calidad.

### Funcionalidades

El sistema de Monitoreo de la Calidad Agronómica del Agua, es una herramienta que posee las siguientes funcionalidades:

- Mide en tiempo cuasi real el pH y la CE del agua.
- Muestra las mediciones en una pantalla LCD.
- Envía y recibe información de los sensores vía RF.
- Almacena la información de las mediciones en el ordenador receptor.
- Muestra en el ordenador un indicador de la Calidad Agronómica del Agua que se mide.
- Muestra en tiempo cuasi real el pH y la CE del agua en el ordenador.

## Precauciones y recomendaciones

Con el fin de mantener en buen estado el equipo de medición, se deben atender las siguientes recomendaciones:

1. La carcasa del nodo de medición está fabricada para soportar condiciones de polvo y humedad; sin embargo, debido a que ha sido alterada para cumplir con las necesidades del proyecto, se recomienda evitar derramar grandes cantidades de líquido sobre la caja, ya que podrían presentarse infiltraciones al interior del equipo y causar daños.
2. Evite ejercer demasiada presión sobre la pantalla LCD; de lo contrario podría causar un desprendimiento de la misma o dañar sus componentes.
3. Procure no tirar de los cables de los sensores con demasiada fuerza, ya que podría provocar su rompimiento o que se desprenda del circuito.
4. Evite mantener conectado el equipo en caso de tormentas eléctricas o cualquier situación que pudiera comprometer la calidad de la energía con que se alimenta el aparato.
5. Procure mantener limpio el módulo receptor del ordenador.
6. Evite tener cerca del módulo receptor del ordenador cualquier clase de líquido que pudiera derramarse sobre el equipo.
7. Evite colocar objetos sobre el módulo receptor del ordenador o colocarlo dentro de cajas metálicas ya que podrían interferir con la señal de comunicación.
8. Evite utilizar cualquier clase de cepillos para limpiar las sondas de medición; esto podría afectar su funcionamiento e incluso dejarlas inservibles.

El nodo sensor está compuesto por un conjunto de tres sensores (pH, CE y temperatura). Debido a operan en conjunto, es necesario atender las restricciones más adecuadas para las tres sondas, que en este caso corresponden a las siguientes:

1. El rango de temperatura del agua a medir debe estar entre 1 y 99 °C.
2. No someter los sensores a una presión mayor a 100 psi.
3. Mantener siempre húmedas las sondas, en especial la de pH.

4. En caso de requerir limpiar alguna de las sondas utilice un paño de microfibra y agua limpia; evite utilizar cualquier clase de cepillos. De persistir la suciedad utilice la sustancia de limpieza recomendada por el fabricante.

**Nota:** Es importante recalcar que los sensores NO son de uso rudo ni industrial, por lo que es necesario atender las recomendaciones anteriores para mantenerlos funcionando correctamente.

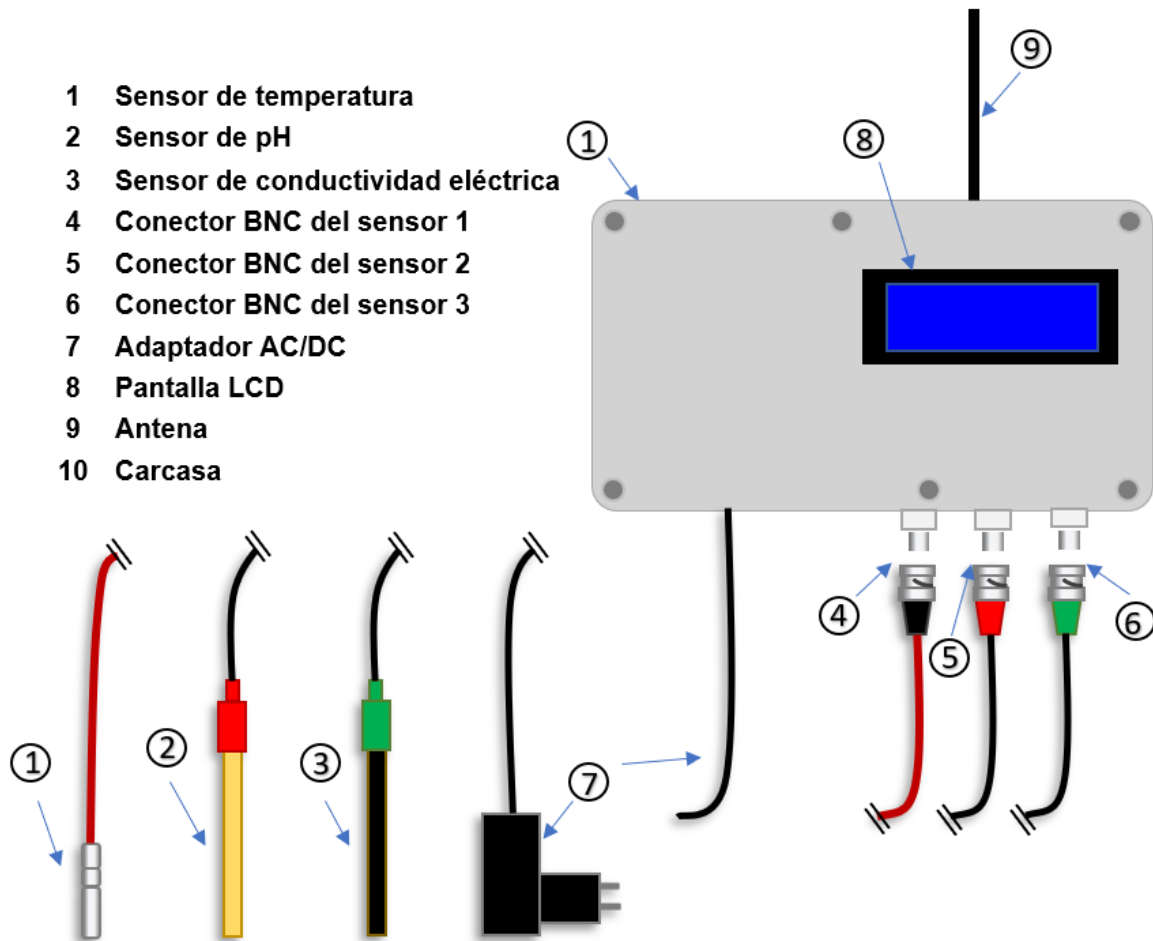
## Puesta en marcha

El equipo de monitoreo es sumamente sencillo de utilizar. Consta básicamente de dos partes: el módulo de medición y el módulo de recepción. El primero, cuya estructura y componentes se muestran en el siguiente esquema, se debe ubicar en la cercanía del cuerpo de agua a monitorear. El segundo se conecta al ordenador por medio del puerto USB para recibir los datos.

Para comenzar a tomar mediciones realice los siguientes pasos:

1. Instale el módulo de medición en un lugar cercano al cuerpo de agua que desea monitorear. Asegúrese de contar con un tomacorriente cerca.
2. Instale los conectores BNC de los sensores en el orden que se muestra en el esquema.
3. Coloque los sensores en contacto con el agua que se desea monitorear.
4. Conecte el adaptador (elemento número 4) al tomacorriente.
5. Verifique que la pantalla (elemento número 5) encienda y muestre el mensaje "Monitoreando agua...", seguido del valor de temperatura, pH y CE registrado. De no ser así verifique que el tomacorriente se encuentre energizado.
6. Deje funcionando el módulo de medición y diríjase al ordenador para instalar el segundo módulo.
7. Encienda el ordenador y ejecute el programa de visualización.
8. Conecte el módulo de recepción en uno de los puertos USB del ordenador y espere a que se enlacen los módulos a la red.
9. Verifique que se muestren los valores de los parámetros medidos en la interfaz y que se estén actualizando adecuadamente.

10. Una vez terminado el monitoreo apague el equipo de medición.



Estructura y componentes del módulo de medición.

## Solución de problemas

En caso de presentarse algún problema contacte con el encargado.