



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

SISTEMA DIFUSO TAKAGI-SUGENO PARA MONITOREO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DE CULTIVOS DE PLÁTANO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES

PRESENTA:
ING. DAVID ENRIQUE ROSALES MANZO

DIRECTOR DE TESIS:
D. EN C. NOEL GARCIA DIAZ

CO-DIRECTORA:
D. EN C. ANA CLAUDIA RUÍZ TADEO

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 1.2.11/118/2020

**ALUMNO ROSALES MANZO DAVID ENRIQUE
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 "**SISTEMA DIFUSO TAKAGI-SUGENO PARA MONITOREO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA EN CULTIVOS DE PLÁTANO**", 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.



EPIGRAFE

“La paciencia es un elemento clave del éxito”

- Bill Gates

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres David Rosales Dueñas y Martha Alicia Manzo Gudiño, por su amor y cariño incondicional, quienes me brindaron su apoyo en cada etapa de mi vida, me alentaron a nunca rendirme y ser mejor persona.

A mis hermanas, Dulce, Karina y Mayra, que siempre están apoyándome y cuidándome a pesar de que no siempre estemos juntos.

A mi novia María de la Luz, por brindarme su apoyo absoluto, estar a mi lado durante este proceso tan importante para mí y especialmente por su amor incondicional.

Agradezco a mi director de tesis, el doctor Noel García Díaz, por todos los conocimientos, consejos y apoyo que me brindo a lo largo de estos años.

A todos mis compañeros de la generación, quienes me acompañaron y compartieron sus conocimientos y consejos conmigo.

A los maestros y personal de la División de Estudio de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Colima, por su apoyo y conocimientos que me aportaron durante esta etapa de crecimiento profesional.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su brindarme los recursos para la elaboración de este trabajo.

RESUMEN

El plátano es la fruta tropical de mayor importancia, su cultivo es el cuarto cultivo más importante a nivel mundial, obteniendo una producción aproximada de 100 millones de toneladas al año y se realiza en más de 120 países. México se coloca como uno de los principales países productores y exportadores de plátano. Sin embargo, la calidad del plátano es afectada por enfermedades tales como la sigatoka negra, que ha sido la enfermedad que ocasiona mayores pérdidas económicas, debido a que no se ha logrado exterminar en su totalidad a causa de las condiciones climáticas en las que aparece y se transmite. La temperatura y la humedad relativa son las principales variables que influyen en la aparición y propagación de la sigatoka negra; y si no se controla, la enfermedad puede reducir hasta 50% del peso del racimo y causar pérdidas de hasta el 100% de la producción. Este trabajo de investigación propone un sistema integral con un módulo de sensores para obtener las variables climáticas de temperatura y humedad relativa, posteriormente analiza los datos por medio de un modelo de inferencia difuso tipo Takagi-Sugeno, con salida constante, permitiendo determinar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra en cultivos de plátano, por medio del análisis de la temperatura ambiental (13-38°C) y humedad relativa (0%-100%), almacena los datos en una base de datos y finalmente los presenta en una interfaz gráfica amigable al usuario. Para validar el sistema difuso se utilizó el coeficiente de determinación (r^2), debido a que esta métrica ha sido utilizada en trabajos previos de investigación, obteniendo resultados mayores a 0.9, demostrando que el modelo predictivo es aceptable. Esta investigación presenta un enfoque innovador utilizando un módulo de sensores junto con un sistema de inferencia difuso tipo Takagi-Sugeno con salida constante que contribuye a determinar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra, lo que otorga a los productores de cultivos de plátano una herramienta para combatir eficazmente la enfermedad.

Palabras Clave: Lógica Difuso, Takagi-Sugeno, Sigatoka Negra, Arduino, Xbee

ABSTRACT

Banana is the most important tropical fruit, their cultivation is the fourth most important crop worldwide, obtaining an approximate production of 100 million tons per year and is carried out in more than 120 countries. México is positioned as one of the principal banana producers and exporters. However, the banana quality is affected by plagues and diseases such as black sigatoka, which has been the disease that generates the greatest economic losses, because it has not been able to exterminate entirely due to the climatic conditions in which it appears and it's transmitted. The temperature and relative humidity are principal variables that affect black sigatoka's presence and propagation; and if it is not controlled, the disease can reduce up to 50% the bunch weight and causes losses of up to 100% of the production. This research paper proposes an integral system with a sensors module to obtain the climatic variables of temperature and relative humidity, then analyze the data using a fuzzy inference model of the Takagi-Sugeno type, with a constant output, to determine the risk of black sigatoka proliferation in banana crops, through the analysis of environmental temperature (13-38°C) and relative humidity (0%-100%), store the data in a database and finally present it in a user friendly graphical interface. To validate the fuzzy system the determination coefficient (r^2) was used, with results greater than 0.9, demonstrating that the predictive model is acceptable. This research presents an innovative approach using a sensors module together with a Takagi-Sugeno diffuse system with constant output that will help to prevent the risk of black sigatoka proliferation, which gives banana crop growers a tool to effectively combat the disease.

Key Words: Fuzzy Logic, Takagi-Sugeno, Black Sigatoka, Arduino, Xbee

INDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
INDICE GENERAL	III
INDICE DE FIGURAS	VII
INDICE DE TABLAS	X
CAPITULO I. INTRODUCCION	1
1.1. La naturaleza del problema	1
1.2. El contexto del problema	3
1.3. Revisión de la literatura	5
1.4. Planteamiento de la solución del problema a investigar	8
1.5. Motivación	9
1.6. Justificación	10
1.7. Objetivos	10
1.7.1. Objetivo General	11
1.7.2. Objetivos Específicos	11
1.8. Hipótesis	11
1.9. Métodos y herramientas	11
1.9.1. Enfoque de la investigación	12
1.9.2. Participantes	12
1.9.3. Análisis de datos	12
1.9.4. Instrumentos	12
1.9.5. Metodología de desarrollo de software	13
1.10. Beneficios esperados	13
1.11. Organización de la tesis	14
CAPITULO II. ESTADO DEL CAMPO DEL CONOCIMIENTO	16
2.1. Marco Histórico	16
2.1.1. Cultivo de Plátano	16
2.1.1.1. Temperatura	17
2.1.1.2. Localización Geográfica	17
2.1.1.3. Precipitación y Humedad	17
2.1.2. Sigatoka negra	18

2.1.2.1.	Síntomas	19
2.1.2.2.	Factores climáticos que facilitan la propagación	20
2.2.	Marco Contextual	21
2.2.1.	Investigaciones relacionadas	21
2.3.	Marco Teórico	23
2.3.1.	Inteligencia Artificial	24
2.3.2.	Lógica difusa	24
2.3.2.1.	Lógica difusa tipo Takagi-Sugeno	25
2.3.3.	Arduino	25
2.3.4.	Zig Bee	26
2.3.5.	Sensor de Humedad y Temperatura DHT 22	26
2.3.6.	MATLAB	27
2.3.7.	Interfaz Gráfica	28
2.3.8.	Python	28
2.3.8.1.	SciKit Fuzzy	29
2.3.9.	Django	29
2.3.10.	MySQL	30
CAPITULO III. MÉTODOS EMPLEADOS		31
3.1.	Metodología	31
3.1.1.	Investigación preliminar	32
3.1.2.	Modelado	32
3.1.3.	Implementación	32
3.1.4.	Pruebas	33
3.1.5.	Despliegue	33
3.1.6.	Configuración y administración del proyecto	33
3.1.7.	Administración del ambiente	34
3.1.8.	Documentación	34
3.2.	Caso de estudio	34
3.3.	Hardware y Software	34
3.3.1.	Hardware	35
3.3.2.	Software	37
CAPITULO IV. DESARROLLO DE LA TESIS		39
4.1	Análisis	39

4.1.1	Modelo conceptual (Big Picture)	39
4.1.2	Diagrama de actividades	40
4.1.3	Modelo de casos de uso	42
4.1.4	Modelo de requisitos	43
4.2	Diseño	45
4.2.1	Modelo de clases	45
4.2.2	Modelo de datos	46
4.2.3	Diccionario de datos	47
4.2.4	Sistema Difuso	47
4.2.4.1.	Variables	48
4.2.4.2.	Reglas	52
4.2.5	Modelo de interfaces	52
4.3	Implementación	55
4.3.1	Nodo sensor	55
4.3.1.1.	Construcción	56
4.3.1.2.	Programación del Arduino y configuración del Xbee	59
4.3.1.3.	Costo de los materiales	60
4.3.2	Módulo de adquisición de datos	61
4.3.2.1.	Construcción	61
4.3.2.2.	Configuración del Xbee	63
4.3.2.3.	Costo de los materiales	63
4.3.3	Almacenamiento de datos	64
4.3.3.1.	Recepción de datos	64
4.3.3.2.	Base de datos	65
4.3.4	Interfaz gráfica	65
4.3.5	Manual de usuario	73
4.4.	Verificación del Sistema Difuso	76
CAPITULO V. RESULTADOS OBTENIDOS		81
5.1.	Comparación del sistema difuso	82
CAPITULO VI. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES		84
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS		86
APENDICES Y ANEXOS		91
Anexo A: Programa del nodo sensor		91

Anexo B: Rutina para recibir los datos del módulo de adquisición de datos	93
Anexo C: Instalación de Xampp y Python	96
Anexo D: Verificación del sistema difuso propuesto por Cárdenas-Valdovinos et al. (2017)	102

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Síntomas de la sigatoka negra (Martínez Bolaños et al., 2013).....	3
Figura 2: Ubicación del Rancho La Laguna.....	5
Figura 3: Esquema de funcionamiento del sistema.....	9
Figura 4: Etapas de la sigatoka negra (Ayala et al., 2014)	20
Figura 5: Funcionamiento de Takagi-Sugeno (The MathWorks, Inc., 2019)	25
Figura 6: Sensor DHT22 (e-radionica, 2019).....	27
Figura 7: Fases del proceso unificado ágil (Ambler, 2014).....	31
Figura 8: Cultivo donde se implantó el proyecto.....	34
Figura 9: Diagrama de actividades de los datos actuales.....	40
Figura 10: Diagrama de actividades del histórico	41
Figura 11: Modelo de casos de uso del sistema.....	42
Figura 12: Requisitos funcionales del proyecto	44
Figura 13: Requisitos no funcionales del proyecto	45
Figura 14: Modelo de clases	46
Figura 15: Modelo de datos.....	46
Figura 16: Funciones de membresía de la humedad relativa	49
Figura 17: Funciones de membresía de la temperatura	51
Figura 18: Ventana principal de la interfaz	53
Figura 19: Visualización de los datos en forma de gráfica.....	53
Figura 20: Visualización de los datos en forma de tabla.....	54
Figura 21: Histórico de los datos mostrados en forma de gráfica	54
Figura 22: Histórico de los datos mostrados en forma de tabla	55
Figura 23: Diagrama de conexión	56
Figura 24: Arduino Mega.....	56
Figura 25: Tarjeta electrónica Xbee S3B.....	57
Figura 26: Caja nema que aloja el nodo.....	57
Figura 27: Conectores glándula usados en el nodo	58
Figura 28: Nodo sensor dentro del gabinete	58
Figura 29: Nodo sensor terminado y alimentado por la power bank.....	59
Figura 30: Configuración del nodo sensor.....	60
Figura 31: Diagrama de conexión del nodo.....	62

Figura 32: Arduino UNO.....	62
Figura 33: Tarjeta Electrónica S3B PRO	62
Figura 34: Modulo de adquisición de datos	63
Figura 35: Configuración del coordinador.....	63
Figura 36: Terminal de comandos mostrando los datos recibidos y analizados	65
Figura 37: Datos almacenados en la base de datos.....	65
Figura 38: Ventana principal de la interfaz	66
Figura 39: Menú despegable de la interfaz	67
Figura 40: Ventana para observar los parámetros actuales	67
Figura 41: Datos del día actual en forma de gráfica	68
Figura 42: Datos del día actual en forma de gráfica	69
Figura 43: Histórico de todos los datos en forma de gráfica	70
Figura 44: Gráficas de los máximos diarios.....	71
Figura 45: Histórico de todos los datos en forma de tabla.....	72
Figura 46: Histórico de los máximos diarios en forma de tabla.....	72
Figura 47: Alerta para evitar datos erróneos	73
Figura 48: Icono de la aplicación.....	74
Figura 49: Consola que permite mostrar la interfaz gráfica	74
Figura 50: Consola que recibe los datos del nodo sensor	75
Figura 51: Icono de la aplicación de recepción de datos	75
Figura 52: Simulación del sistema difuso	76
Figura 53: Gráfico de probabilidad normal de los datos obtenidos	80
Figura 54: Nodo sensor en la base	81
Figura 55: Nodo sensor y alimentación	82
Figura 56: Grafico de caja y bigotes de los datos obtenidos con Takagi-Sugeno y Mamdani....	83
Anexo Figura 1: Instalador del Xampp	96
Anexo Figura 2: Seleccionador de componentes	97
Anexo Figura 3: Ventana para seleccionar la carpeta de instalación.....	97
Anexo Figura 4: Ventana para seleccionar el idioma.....	98
Anexo Figura 5: Instalación del XAMPP	99
Anexo Figura 6: Ventana del fin de la instalación de XAMPP.....	99
Anexo Figura 7: Ventana del fin de la instalación de XAMPP.....	100
Anexo Figura 8: Instalación de Python.....	100

Anexo Figura 9: Ventana del fin de la instalación de Python101
Anexo Figura 10: Gráfico de probabilidad normal de los datos obtenidos103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Datos técnicos del Arduino Mega	35
Tabla 2: Datos técnicos del sensor DHT22	36
Tabla 3: Datos técnicos del reloj de tiempo real DS3231	36
Tabla 4: Datos técnicos del Xbee Pro S3B.....	37
Tabla 5: Especificaciones del equipo de cómputo.....	37
Tabla 6: Diccionario de datos.....	47
Tabla 7: Condiciones óptimas de la humedad y temperatura que propician el crecimiento de la enfermedad sigatoka negra en plátanos (Álvarez et al., 2013).....	48
Tabla 8: Rangos de la humedad relativa.....	48
Tabla 9: Valores de pertenencia de la humedad relativa.....	50
Tabla 10: Rangos de la temperatura.....	50
Tabla 11: Valores de pertenencia de la temperatura.....	51
Tabla 12: Valores del riesgo de proliferación de la enfermedad de sigatoka negra en el cultivo de plátano.....	52
Tabla 13: Reglas del sistema difuso.....	52
Tabla 14: Costo de los materiales del nodo sensor.....	61
Tabla 15: Costo de los materiales del módulo de adquisición de datos.....	64
Tabla 16: Resultados obtenidos del sistema difuso.....	78
Tabla 17: Análisis de varianza del sistema difuso	79
Tabla 18: Análisis de las variables de entrada del sistema difuso	79
Tabla 19: Prueba de normalidad de los valores obtenidos	80
Tabla 20: Valores de R-cuadrada.....	82
Tabla 21: Prueba de normalidad de la diferencia	83
Anexo Tabla 1: Comandos de las dependencias	101
Anexo Tabla 2: Análisis de varianza del sistema difuso Mamdani.....	102
Anexo Tabla 3: Análisis de las variables de entrada del sistema difuso	102
Anexo Tabla 4: Prueba de normalidad de los valores obtenidos	103

CAPITULO I. INTRODUCCION

El cultivo de banana es una actividad agrícola demasiado relevante a nivel mundial, debido a que da un gran aporte comercial y es una buena fuente de ingresos (Cuevas Gutiérrez, 2015). Los plátanos pertenecen al género Musa y son el cuarto cultivo más importante a nivel internacional, solo es superado por el arroz, trigo y maíz, además, es el fruto tropical más significativo por su consumo internacional. Mundialmente se producen aproximadamente 100 millones de toneladas de plátano al año y su cultivo se realiza en más de 120 países. El plátano es el principal sustento de al menos 400 millones de personas, debido a que cuenta con carbohidratos, vitaminas y minerales (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018).

De acuerdo con (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2018), en el 2017 la exportación de los plátanos fue de aproximadamente 18.1 millones de toneladas, de las cuales América Latina es la principal fuente de exportación, con 15.4 millones de toneladas, seguido por Asia y África con 1.9 y 0.7 millones de toneladas respectivamente. Por otra parte, México se encuentra ubicado en sexto lugar de los países exportadores en América Latina con una producción aproximada de 500 mil toneladas de plátano.

1.1. La naturaleza del problema

En el ámbito nacional el plátano es uno de los cultivos más importantes de la agricultura, su precio bajo, disponibilidad todo el año y su valor nutritivo son unos de los principales factores que lo ubican en segundo lugar de producción en frutas tropicales. Los

principales estados productores de plátano en México son Chiapas Tabasco, Veracruz, Colima y Jalisco (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018).

Acorde con (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018), en México se constituyó una intención de cosecha de 2.3 millones de toneladas para el 2018, con una cantidad de 206 mil toneladas pertenecientes para el estado de Colima, ubicándolo en el cuarto lugar a nivel nacional a pesar de contar con una menor superficie, siendo solamente superado por Chiapas, Tabasco y Veracruz.

La calidad del cultivo de plátano es afectada por la aparición de enfermedades y plagas como la sigatoka negra, siendo ésta el agente patógeno que más presencia tiene en los cultivos de banana en el estado de Colima, ocasionando mermas en el cultivo y gastos elevados para el tratamiento del patógeno. La sigatoka negra es ocasionada por el hongo *Mycosphaerella fijiensis* y ocasiona que los racimos y los frutos tengan menor peso e incluso provoca que los frutos maduren prematuramente. La presencia de la enfermedad, como se muestra en la Figura 1, puede ser reconocida con la aparición de rayas o estrías de color amarillo o marrón en las hojas, cuando se encuentra en estado temprano; en cambio, en estado grave de la enfermedad se pueden presenciar manchas de color café o negro, llegando incluso a secar la hoja casi por completo (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013).

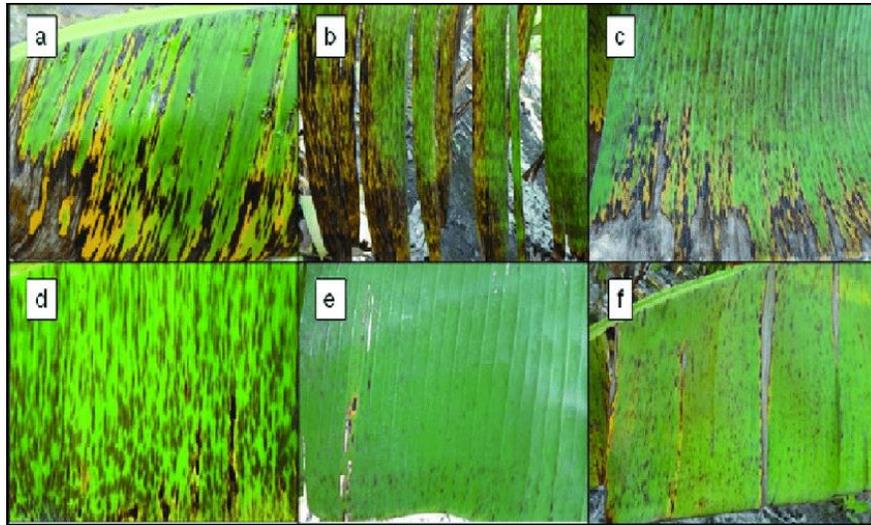


Figura 1: Síntomas de la sigatoka negra (Martínez Bolaños et al., 2013)

De acuerdo con (Vázquez Castrejón et al., 2005), la sigatoka negra se presentó por primera vez en México en 1981, en los estados de Tabasco y Chiapas y se dispersó al resto de los estados productores. La primera aparición de la enfermedad en el estado de Colima data del año 1989, ocasionando grandes cantidades de pérdidas en la producción y aumentando los costos, debido al uso de químicos para el tratamiento y erradicación del patógeno.

1.2. El contexto del problema

En el estado de Colima, los cultivos han sido afectados por la sigatoka negra desde la primera aparición, debido a que no se ha logrado exterminar completamente por las condiciones climáticas en las que se origina la enfermedad. Por consecuencia, a lo largo de los años en el estado se han generado mermas de hasta el 50% dentro de los cultivos (Vázquez Castrejón et al., 2005). Incluso hay casos en los que los productores de plátano prefieren perder toda la producción de plátano y dejan morir el cultivo, para evitar hacer gastos de los cuales no se puedan recuperar; sin embargo, estas situaciones son

perjudiciales para los cultivos aledaños, puesto que el hongo puede transportarse más fácilmente cuando la enfermedad se encuentra en cultivos cercanos.

Entre las causas más relevantes por las cuales se genera la enfermedad se debe a las lluvias continuas, siendo la época lluviosa cuando más se presenta la enfermedad, debido a la presencia continua de una lámina de agua sobre las hojas, que favorece los procesos de liberación e infección de las esporas. Otra de las causas es cuando la humedad relativa es mayor al 80% y una temperatura promedio que oscila entre 23 y 28 °C; además, al ser una espora, la enfermedad puede transmitirse de una planta infectada a una planta sana (Álvarez, 2013).

En la actualidad, existen muy pocos sistemas que permiten la monitorización de cultivos de plátano y detección de agentes patógenos, como la sigatoka negra, a pesar de la gran cantidad de trabajos afines, solo se enfocan a la investigación y no son implementados en ambientes reales. Dentro del estado de Colima solo se encontró un trabajo que ataque el problema de la sigatoka negra.

Por lo anterior, en este trabajo de investigación se propone un Sistema Difuso Takagi-Sugeno para Monitoreo de Humedad y Temperatura de Cultivos de Plátano con la finalidad de identificar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra en el estado de Colima.

El sistema será implementado en el rancho La Laguna del ingeniero Agustín Hueso Alcaraz, que se ubica en el municipio de Manzanillo, cerca de la localidad de El Colomo, como se puede observar en la Figura 2. El rancho se enfoca a la producción de plátano contando con una extensión mayor a 10 hectáreas de cultivo.

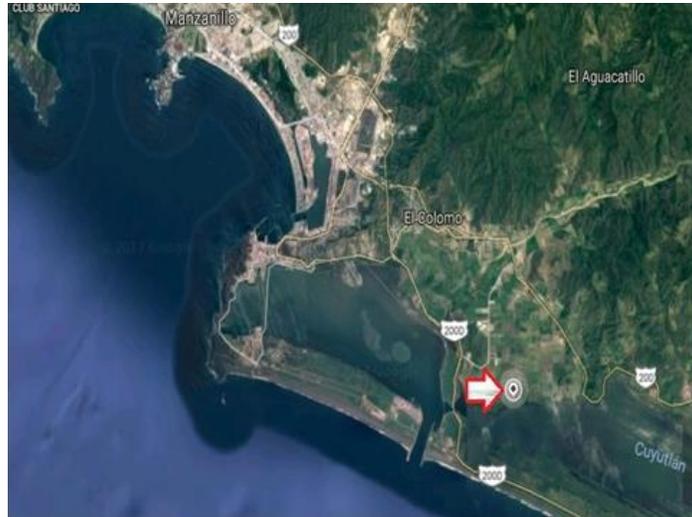


Figura 2: Ubicación del Rancho La Laguna

1.3. Revisión de la literatura

Actualmente existen varias soluciones propuestas para solventar la problemática analizada anteriormente; sin embargo, estas soluciones se enfocan en la detección de la enfermedad cuando ya ha sido infectada y no a la prevención de la enfermedad.

Entre éstos, el trabajo desarrollado por Cárdenas-Valdovinos et al. (2017) propone el uso de un sistema de control difuso para el monitoreo de la humedad y temperatura en los cultivos de plátano por medio de sensores, utilizando el sistema difuso Mamdani para detectar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra en los cultivos. Para la obtención de datos utilizó el protocolo Zig Bee donde construyó dos nodos, el nodo sensor, encargado del censado de las variables de humedad y temperatura; y el nodo coordinador, encargado de recibir los datos, mostrarlos en la terminal y guardarlos en un archivo CSV (del inglés comma-separated values). Para el sistema de predicción empleó el FIS (por sus siglas en inglés Fuzzy Inference System) Mamdani que, a pesar de obtener resultados satisfactorios en su aplicación, no existe la certeza de que el FIS utilizado sea el óptimo para la prevención de la sigatoka negra. Además, el sistema cuenta con ciertas deficiencias que no se

alcanzaron a rectificar satisfactoriamente, como la falta de alimentación al nodo sensor, debido a que tiene que apagarse para ahorrar energía puesto que debe durar mucho tiempo en funcionamiento; de lo contrario, la fuente de alimentación se acaba y se tendría que estar cambiando a cada rato.

Por otro lado, Cuevas Gutiérrez (2015) presenta un sistema de adquisición y análisis de información en el cultivo para determinar la gravedad de la sigatoka negra en los cultivos afectados, para ello implementó una aplicación móvil que realiza muestreos basándose en el método de Stover. Para el desarrollo utilizó la metodología de Programación Extrema (XP), elaborando una aplicación híbrida compatible con móviles utilizando HTML 5 y Javascript con el framework Ionic. Sin embargo, al emplear el método de Stover la detección de la enfermedad se realiza cuando la planta ha sido infectada y, por tanto, no puede sustituir por completo las tareas y acciones de predicción.

En el trabajo de investigación elaborado por Subert-Semanat (2018) presenta un modelo de predicción de sigatoka negra en el cultivo de plátano para el monitoreo remoto de variables climáticas relacionadas con la enfermedad, buscando programar tratamientos utilizando fungicidas que erradiquen la enfermedad. Para ello, se utilizaron las variables de temperatura, intensidad y duración de las lluvias, intensidad y duración de las hojas y evaporación, empleando sensores de bajo costo ubicados en una casa meteorológica estándar. La cualificación del estado de desarrollo de la enfermedad se realizó empleando el método Stover. Por tal motivo, el descubrimiento de la sigatoka negra se realiza cuando ya la planta ha sido infestada, en cambio, la predicción la realiza por medio de la correlación entre las variables climáticas y la gravedad de la enfermedad.

El trabajo realizado por Nagaraju & Shankar (2017) presenta una red de sensores inalámbricos para capturar la temperatura ambiental, la humedad relativa, la humedad del suelo y la lluvia. Con los datos obtenidos, realiza un análisis para obtener patrones basados en el contexto del cultivo, para ello, compara los datos adquiridos con los valores almacenados en una base de datos; después, realiza la cuenta acumulada de los datos obtenidos constantemente por 6 días; si la cuenta acumulada es mayor a 36 en dos días, la gravedad de la enfermedad es alta; si es mayor a 36 en cuatro días la gravedad es moderada y si es mayor a 36 en seis días la gravedad es normal. A pesar de contar con alertas a los usuarios por medio de mensajes, las variaciones climáticas, los picos de temperatura y humedad pueden ser factores que afecten a la detección de la enfermedad, debido al uso de patrones.

Por otro lado, Flores Gallegos et al.(2017) presentó un modelo difuso de inferencia Mamdani para monitorizar la humedad relativa y temperatura en macro túneles de enraizamiento de esquejes en viveros, permitiendo aumentar la productividad al obtener un aumento en el índice de sobrevivencia de esquejes. Debido a que la aplicación del sistema es a otro producto, realiza el control de las variables para obtener las condiciones óptimas de crecimiento, por tal motivo no elabora predicciones para enfrentar alguna enfermedad o plaga que se pueda presentar.

Como se puede observar, las soluciones mencionadas presentan en común las siguientes limitaciones:

- Los trabajos detectan la enfermedad hasta que la planta ha sido infectada, a excepción del trabajo de Cárdenas-Valdovinos et al. (2017).

- Los sensores utilizados por Subert-Semanat (2018) y Nagaraju & Shankar (2017) no son recomendables cuando se busca precisión en las lecturas de las variables climáticas.
- La utilización de patrones y el estudio correlativo no son buenos sistemas de prevención de la sigatoka negra, debido a que existen factores que pueden afectar los resultados.
- Incluyen variables climáticas que pueden no ser útiles para la detección de la propagación de la sigatoka negra.
- Ningún trabajo presentado cuenta con interfaz gráfica para facilitar la interpretación de los datos por los usuarios finales.

Finalmente, ningún trabajo de investigación ha sido encontrado en el cual se utilice un Sistema Difuso Takagi-Sugeno con una salida constante ha sido usada para predecir el riesgo de proliferación de la sigatoka negra en los cultivos de plátano.

1.4. Planteamiento de la solución del problema a investigar

En este trabajo de investigación se propone un sistema de control difuso, como se muestra en la Figura 3, el cual se encargará de monitorizar los cultivos de plátano por medio de sensores para obtener las variables climáticas de temperatura, humedad ambiental y humedad del suelo, donde son registradas en lapsos de 10 minutos. Los datos son recolectados por el nodo sensor, utilizando una placa Arduino y alimentado por medio de una power bank. Una vez recolectados los datos, haciendo uso del protocolo Zig Bee, son enviados por medio de una interfaz de hardware al nodo coordinador o módulo de recolección de datos, que se encarga de procesar los datos de las variables climáticas. En caso de que no se establezca conexión entre los nodos, el nodo sensor cuenta con una

tarjeta SD (por sus siglas en inglés: Secure Digital) para almacenamiento local de los datos, que son transmitidos cuando la conexión se restablezca.

Los datos procesados por el nodo coordinador serán recibidos en el servidor local, establecido en un equipo de cómputo, mismo que llevara a cabo el análisis por medio de un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno. Posteriormente se almacenan en una base de datos para mantener un registro histórico. Finalmente son extraídos de la base de datos y desplegados en una interfaz gráfica para facilitar su interpretación a los usuarios, apoyando a la toma de decisiones para la prevención y control de la enfermedad.

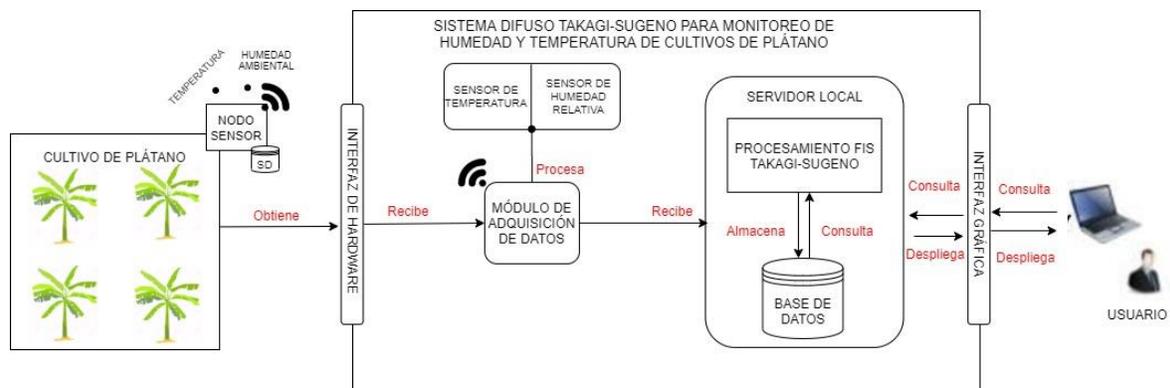


Figura 3: Esquema de funcionamiento del sistema

1.5. Motivación

La principal razón del trabajo de investigación es proporcionar a los productores de plátano una herramienta de bajo costo que ayude a la detección de la sigatoka negra, facilitando la toma de decisiones, disminución de las mermas del cultivo y de los gastos que se generan cuando la proliferación de la enfermedad es alta. Este trabajo se enfoca a la detección del riesgo de la proliferación de la sigatoka negra y su aplicación en los cultivos de plátano; sin embargo, puede ser adaptado a otros productos agrícolas ofreciendo un

producto tecnológico que ayude a la detección de agentes patógenos para mejorar la calidad de los frutos, aportando información útil a los dueños de los cultivos.

1.6. Justificación

El cultivo de plátano es una de las principales fuentes agrícolas del estado de Colima, puesto que se ubica en el cuarto lugar a nivel nacional con una producción aproximada de 206 mil toneladas en el año 2018 (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018). Sin embargo, la producción se ve afectada por la presencia de plagas y enfermedades, siendo la sigatoka negra la enfermedad que más ha afectado desde su primera aparición en el año 1989 (Vázquez Castrejón et al., 2005). Por lo tanto, para evitar que la enfermedad afecte al cultivo y cause pérdidas, es importante detectarla lo antes posible para su tratamiento.

El presente trabajo permite conocer los datos de las variables de humedad y temperatura para detectar el riesgo de proliferación y permitir a los productores tomar decisiones antes de la presencia de la enfermedad para la prevención y erradicación de la misma, disminuyendo las pérdidas y reduciendo costos.

1.7. Objetivos

A continuación, se describe el objetivo general de este trabajo de investigación, así como los objetivos específicos que permiten lograr el objetivo de ésta.

1.7.1. Objetivo General

Desarrollar un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno que detecte el riesgo de proliferación de sigatoka negra en cultivos de plátano por medio del monitoreo de humedad y temperatura.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Estudiar el FIS Takagi-Sugeno.
- Configurar el módulo existente para censar la humedad y temperatura.
- Aplicar técnicas de lógica difusa a los datos obtenidos por los sensores.
- Realizar pruebas unitarias y de integración del módulo de censado y análisis de los datos.
- Crear una interfaz gráfica para facilitar la visualización de los datos.
- Elaborar pruebas funcionales de la interfaz gráfica.

1.8. Hipótesis

La utilización de un Sistema de Inferencia Difuso tipo Takagi-Sugeno determina con mayor precisión el riesgo de proliferación de la sigatoka negra en los cultivos de plátano.

1.9. Métodos y herramientas

A continuación, se especifican los métodos y herramientas utilizados para el desarrollo del trabajo de investigación.

1.9.1. Enfoque de la investigación

El desarrollo de la investigación se realiza tomando el enfoque cuantitativo, debido a que se trabajan con variables y propiedades, en este caso la temperatura y humedad relativa de los cultivos de plátano, que posteriormente serán analizadas para detectar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra.

1.9.2. Participantes

La empresa Productor de Plátano de Manzanillo del ingeniero Agustín Hueso Alcaraz dedicada a la siembra y cultivo de plátano para su venta, se ubica en la comunidad El Colomo en el municipio de Manzanillo, Colima.

1.9.3. Análisis de datos

Los datos obtenidos de la temperatura y humedad relativa del cultivo de plátano serán analizados mediante lógica difusa utilizando el Sistema de Inferencia Difuso del tipo Takagi-Sugeno permitiendo obtener el riesgo de proliferación de la sigatoka negra.

1.9.4. Instrumentos

El trabajo de investigación cuenta con varios módulos, a continuación, se detallan los instrumentos que se utilizan en estos:

- **Módulo de censado:** para el desarrollo de este módulo se utiliza la placa programable Arduino, el sensor de humedad y temperatura DHT22, el protocolo Zig bee para enviar los datos entre los nodos; mientras que, la alimentación del nodo sensor se realiza por medio de power bank.

- **Módulo de publicación:** para el desarrollo de este módulo se realiza una página web elaborada con HTML5 y Bootstrap para la creación de las interfaces; mientras que, para el back-end se realiza con el lenguaje de programación Python en su versión 3. Debido a que la página requiere de una base de datos se utiliza el gestor de base de datos MYSQL en su versión 8.
- **Módulo de análisis:** para la elaboración de este módulo, se realiza el modelo base del FIS Takagi-Sugeno por medio de la herramienta MATLAB, posteriormente se utiliza la librería Sci-Kit de Python para integrar el FIS con la interfaz gráfica.

1.9.5. Metodología de desarrollo de software

Debido a la necesidad del producto de software se optó por utilizar la metodología de desarrollo de software de Proceso Unificado Ágil, debido a que, al ser una metodología ágil, permite el desarrollo iterativo de los módulos (Pressman, 2010). Además, la metodología permite el desarrollo de capas simultáneas para facilitar el desarrollo del trabajo de investigación, así mismo se requieren de reuniones con el productor.

1.10. Beneficios esperados

Con la realización del trabajo se busca un beneficio para los productores, debido a que se proporciona un producto que:

- Permite la detección de la sigatoka negra.
- Permite que los productores enfrenten la presencia de la sigatoka negra con mayor efectividad.
- Disminuye las mermas de cultivo y los gastos de tratamiento de la enfermedad.
- Permite el desarrollo tecnológico a bajo costo.

Aunque el producto solo se enfoca a la sigatoka negra, se espera que los resultados obtenidos sean significativos para el combate de esta enfermedad mejorando la calidad de la producción de plátano en el estado de Colima.

1.11. Organización de la tesis

Este trabajo de investigación está dividido en seis capítulos, los cuales son:

- **Capítulo 1 Introducción.** Se exponen las causas de las que surge el trabajo de investigación y la importancia de implementar un sistema para apoyar la detección de enfermedades en el cultivo de plátano. Así como también se plantea la propuesta de solución, los objetivos que se desean alcanzar, la hipótesis a comprobar y una descripción de las herramientas para el desarrollo del trabajo de investigación.
- **Capítulo 2 Estado del campo del conocimiento.** Aborda las cuestiones teóricas sobre el combate de la sigatoka negra, además abordando los trabajos que sirven de antecedentes.
- **Capítulo 3 Métodos empleados.** Se define el tipo de investigación y la metodología a utilizar en este trabajo de investigación.
- **Capítulo 4 Desarrollo.** Se describe detalladamente el proceso de elaboración del trabajo de investigación, incluyendo los pasos realizados para el desarrollo del módulo de censado implementando el FIS para la detectar el nivel de proliferación de la enfermedad. Además, se describe el desarrollo de la interfaz gráfica para la visualización de los datos.
- **Capítulo 5 Resultados obtenidos.** Se exponen los datos al validar el sistema, también se verifica la satisfacción del uso del sistema por el productor, así mismo se hace la comparación de los resultados con estudios previos.

- **Capítulo 6 Conclusión y recomendaciones.** Se mencionan las conclusiones a las que se llegaron al realizar la tesis, la validación de la hipótesis, las observaciones finales referentes a los datos obtenidos en este trabajo de investigación y presenta los posibles trabajos futuros.

CAPITULO II. ESTADO DEL CAMPO DEL CONOCIMIENTO

En este capítulo se describe el estado del campo de conocimiento, el cual contiene los antecedentes de la problemática y el objeto de estudio, las investigaciones que anteceden este trabajo de investigación, así como una descripción del contexto de la problemática en el estado de Colima.

2.1. Marco Histórico

Esta sección se presentará la evolución y desarrollo del problema y objeto de estudio, desde su origen hasta la actualidad.

2.1.1. Cultivo de Plátano

De acuerdo con la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (2017), los plátanos proceden del sudeste asiático, siendo cultivados desde hace cinco mil años. El plátano llegó a las zonas tropicales de nuestro continente con el descubrimiento de América, donde se hallan los países que tienen mayor producción de plátano a nivel mundial (Brasil, Ecuador, Costa Rica, Colombia, México y Panamá, entre otros). El plátano también es cultivado en Asia, África y Europa; gracias a que se produce en cualquier región que posea un clima cálido y húmedo, actualmente es la fruta tropical más cultivada y una de las cuatro más importantes a nivel mundial (Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación , 2017).

La planta del plátano no es un árbol, es una hierba gigante, contando con las hojas más grandes del reino vegetal. Las plantas usualmente tienen una altura de 3.5 metros, sin embargo, pueden alcanzar hasta 7.5 metros, además, pertenecen a la familia de las

Musáceas, llamadas así debido a que no necesitan polen para poder desarrollarse. El periodo desde que se planta la semilla hasta que se puede cortar un racimo es de diez a doce meses (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017).

2.1.1.1. Temperatura

El rango de temperaturas que propicia el crecimiento de plátano va de los 20°C a los 30°C, con una media de 38°C. Temperaturas menores a los 13°C ocasionan que el crecimiento de la fruta se alente, además, el látex del pericarpio se coagula, provocando una coloración café claro en las venas subepidérmicas (Acanelamiento) y los frutos no maduran de manera normal (Vázquez Castrejón et al., 2005).

2.1.1.2. Localización Geográfica

De acuerdo con Vázquez Castrejón et al. (2005), las condiciones climáticas adecuadas para el cultivo se ubican entre una latitud de 30° norte y 30° sur del Ecuador. Además, las zonas que se ubican entre los 0 y 300 metros sobre el nivel del mar son favorables para el cultivo, sin embargo, el plátano puede adaptarse a alturas hasta de 2,200 msnm.

2.1.1.3. Precipitación y Humedad

El peso de la planta de plátano se constituye de 85% al 88% aproximadamente de agua, por lo cual se requiere un suministro constante durante todo el año y una región con mucha humedad para acelerar su crecimiento. Es recomendable suministrar mensualmente

de 100 a 180 milímetros (mm) de agua. La precipitación óptima es entre los 2,000 y 3,000 mm, pero con una buena distribución durante el año (Vázquez Castrejón et al., 2005).

2.1.2. Sigatoka negra

La sigatoka negra es considerada la enfermedad foliar más destructiva y la que ocasiona mayor cantidad de pérdidas en los cultivos de plátano. Si no se controla, la sigatoka negra, puede disminuir hasta en un 50% el peso del racimo y ocasionar pérdidas de hasta 100% de la producción. La sigatoka negra se encuentra presente en todos los países productores de plátanos. Su nombre proviene del Valle de Sigatoka en las Islas Fiji donde tuvo su primera aparición en el año 1912. Por los siguientes 40 años, la enfermedad se propagó a la mayoría de los países productores de plátano (CropLife Latin America, 2018).

CropLife Latin America (2018) afirma que, la sigatoka negra emergió en Centroamérica en el año 1934 y en dos años fue capaz de destruir más de 8900 hectáreas de cultivo de plátano en Honduras y Surinam. En México, se presentó por primera vez en 1981 en Tabasco y Chiapas y se dispersó al resto de los estados productores, mientras que en el estado de Colima se detectó hasta 1989 (Vázquez Castrejón et al., 2005).

Actualmente la sigatoka negra no ha podido ser erradicada completamente, debido a la facilidad de la aparición y contagio de la enfermedad. Los productores invierten en promedio 30 mil pesos mexicanos (aproximadamente 1500 USD) por hectárea al año para el control de la enfermedad, lo que representa un costo de hasta 300 millones de pesos en control de la enfermedad. Por ese motivo existen convocatorias como la presentada en (Clúster de

Tecnologías de la Información de Colima, 2019), el pasado mes de abril del 2019, que buscan reducir los gastos que ocasiona el control de la enfermedad.

De acuerdo con Orozco-Santos et al. (2008), existen múltiples prácticas para combatir la sigatoka negra. La práctica más importante para reducir la fuente del patógeno es la remoción de hojas afectadas o porciones de éstas. Una práctica alternativa es el “minicomposteo”, que consiste en situar la hojarasca y plantas recolectadas en pequeños cúmulos para su rápida degradación, la poda prematura de las puntas de hojas jóvenes (antes de mostrar lesiones esporuladas) y la expulsión rápida de plantas recolectadas disminuyen el patógeno.

2.1.2.1. Síntomas

Con información de la organización internacional CropLife Latin America (2018), el patógeno destruye rápidamente el tejido foliar, reduciendo la fotosíntesis y afectando el crecimiento de la planta y la producción del plátano. Sin medidas de control, el peso del racimo se reduce hasta en un 50%. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2013), la enfermedad se presenta en las hojas y se pueden reconocer en seis etapas:

- Etapa 1: Pequeñas lesiones o puntos de color blanco-amarillento a marrón, de hasta 1mm de longitud llamadas pizcas, siendo casi imperceptibles.
- Etapa 2: Rayas o estrías cloróticas de 3 a 4mm de longitud por 1mm de ancho, de color marrón.
- Etapa 3: Las rayas o estrías se alargan y amplían, sin bordes definidos y de color café, alcanzando hasta 2cm de longitud.
- Etapa 4: Manchas ovaladas de color café en el envés y negro en el haz.

- Etapa 5: Manchas negras envueltas de un anillo negro y en algunas ocasiones un halo amarillento con centro seco y semihundido.
- Etapa 6: Manchas con centro seco y hundido, de color marrón claro, cercadas de tejido clorótico.

En la Figura 4, se muestran las diferentes etapas de la enfermedad, donde, la imagen A muestra la etapa 1, la imagen B corresponde a la etapa 2, la imagen C muestra la etapa 3, mientras que en la imagen D se observa la etapa 4 y 5, la imagen E muestra la etapa 6 y finalmente la imagen F muestra la perdida de la hoja.

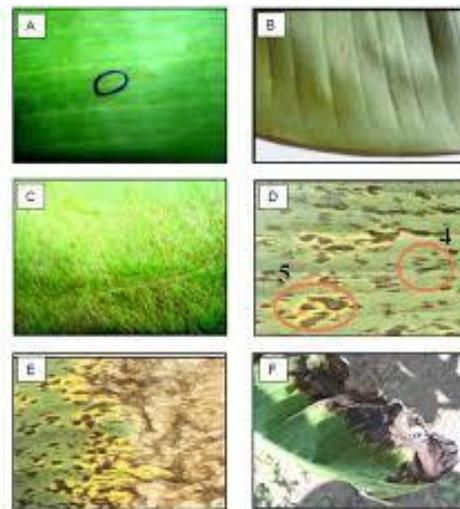


Figura 4: Etapas de la sigatoka negra (Ayala et al., 2014)

2.1.2.2. Factores climáticos que facilitan la propagación

Las altas temperaturas, alta humedad relativa y épocas lluviosas favorecen el desarrollo de la sigatoka negra e incrementa la severidad en las plantaciones. Mientras que las corrientes de viento contribuyen a la propagación a largas distancias (CropLife Latin America, 2018).

2.2. Marco Contextual

Los campos de cultivo de plátano en el estado de Colima se ubican mayormente en los municipios de Tecomán y Manzanillo, debido a las condiciones climáticas (temperatura y humedad) que existen en estos municipios, las cuales favorecen el desarrollo del plátano. A pesar de que no hay medida estándar para el tamaño del campo de cultivo, se deben manejar entre 1500 a 2000 plantas por hectárea, dejando una distancia aproximada de 5 metros entre cada planta, para evitar que los nutrientes sean insuficientes y afecten el desarrollo.

En el estado de Colima el principal agente patógeno que afecta a los cultivos de plátano es la sigatoka negra, debido a que las condiciones climáticas propician su aparición y contagio. Además, la sigatoka negra es una espora, por lo que el contagio de una planta a otra es muy habitual, siendo dispersadas por el viento o por el salpique del agua hacia hojas nuevas. Incluso hay productores que no controlan la enfermedad y pierden todo el cultivo, situación que no solo les afecta a ellos, sino que también puede afectar a los cultivos aledaños.

En esta investigación se aplican técnicas y métodos que permitan prevenir y reducir la proliferación de la sigatoka negra en cultivos de plátano en el estado de Colima.

2.2.1. Investigaciones relacionadas

M. Taghoy y Flores Villaverde (2018) realizaron un sistema automatizado para establecer la vida útil de una fruta de plátano Cavendish, utilizando su contenido de gas etileno mediante un enfoque de lógica difusa. Fabricaron una cámara de experimentación

donde sitúan la fruta, utilizaron el sensor MQ3 para obtener las medidas del gas etileno de la fruta y el sensor DHT22 para obtener la temperatura dentro de la cámara para determinar la vida útil de la fruta, por medio de la herramienta de lógica difusa de MATLAB y desplegando los resultados en una interfaz gráfica de usuario. Este trabajo utilizó lógica difusa y sensores para determinar la vida útil, sin embargo, no predicen ni detectan ninguna enfermedad y la aplicación en cultivos es poco práctica, debido a que la cámara solo aloja una fruta.

En el trabajo realizado por Dagar, Som y Khatri (2018) implementaron Internet de las Cosas (IoT) para la agricultura, creando una red de sensores para obtener las variables climáticas en viveros. Los sensores utilizados fueron sensor de temperatura del aire, sensor de PH del suelo, sensor de humedad del suelo, sensor de humedad relativa, sensor de volumen del agua, entre otros; los datos obtenidos eran enviados por medio de Wi-Fi, donde el servidor puede tomar acciones dependiendo de la información, como regar las plantas si la humedad es muy baja. Para la visualización de los datos obtenidos y procesados se mostraban por medio de una página web, permitiendo que sea accesible desde cualquier parte, enfocando su visualización en celulares. A pesar de utilizar red de sensores con una gran cantidad de sensores, las acciones que toma son muy básicas, sin utilizar alguna de las ramas de la inteligencia artificial para mejorar la precisión y decisiones del sistema.

Ochoa Duarte (2017), expone la creación de un prototipo escalable de un sistema de medición y monitoreo de variables climáticas, como la humedad, temperatura, presencia de gases entre otras variables, relacionadas con la calidad del aire. Los sensores y dispositivos se basan en la filosofía libre, lo cual otorga libertades básicas al usuario, para utilizar la herramienta con cualquier propósito. Las mediciones que realizó se hacen en un ambiente cerrado, donde se conectan los dispositivos de manera fija y se realizan perturbaciones

para verificar el cambio de las variables. Esta investigación se enfoca a la implementación de red de sensores con software libre, permitiendo reducir costos, sin embargo, la problemática que resuelve es diferente, pero comparte el uso de algunas tecnológicas como Arduino y sensores. Además, no realiza ningún análisis de los datos obtenidos por los sensores.

En el trabajo realizado por Apler Akkas y Sokullu (2017) presentaron un prototipo de una red de sensores, integrada por nodos MicaZ, los cuales se encargan de obtener las variables de la temperatura, luz, presión, y humedad en invernaderos. Los datos se comunican gracias al IoT. Con este sistema los agricultores pueden controlar su invernadero desde teléfonos móviles o computadoras con conexión a internet. Este trabajo se enfoca en la recolección y visualización de las variables climáticas, por lo que no realiza ninguna acción ni análisis de los datos.

De acuerdo con la investigación de Singh et al. (2016) utilizaron lógica difusa para crear técnicas de clúster para seleccionar el líder y su tiempo, obteniendo mejor resultados que la técnica LEACH, el cual selecciona el líder una vez y solo ese tiene permiso para comunicarse con la estación base. Las técnicas de clúster que utilizan lógica difusa generan sobrecarga menor y reduce las incertidumbres en la selección del líder del clúster. Este trabajo utiliza lógica difusa pero solamente para determinar el líder del clúster y el tiempo.

2.3. Marco Teórico

En esta sección se presenta el conocimiento necesario que se requiere para comprender la propuesta de solución.

2.3.1. Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial (IA) es la habilidad digital de una computadora o un robot controlado por computadora de realizar tareas comúnmente asociadas con seres inteligentes. El termino se aplica con frecuencia al proyecto de desarrollar sistemas dotados de los humanos como la aptitud de descubrir significados, razonar, generalizar o aprender de experiencias pasadas (Copeland, 2018).

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se utilizará una de las ramas de la Inteligencia Artificial, permitiendo que el sistema “razone” para obtener el riesgo de proliferación.

2.3.2. Lógica difusa

Un conjunto difuso es una clase de objetos que poseen un grado continuo de membresía (Zadeh, 1965). La lógica difusa, como el nombre lo dice, es la lógica subyacente a los modos de razonamiento que son cercanos en vez de exactos. De acuerdo con Zadeh, (1996), la relevancia de la lógica difusa proviene del hecho de que la mayoría de las modalidades de razonamiento humano, y principalmente la razón de sentido común, son de naturaleza aproximada.

La lógica difusa es la base del proyecto de investigación, por medio de esta, se analizarán los datos obtenidos para predecir el riesgo de proliferación de la sigatoka negra.

2.3.2.1. Lógica difusa tipo Takagi-Sugeno

Introducido en 1985, la lógica difusa tipo Takagi-Sugeno toma variables de entrada, teniendo funciones de membresía cada una, y aplicando el operador difuso, las reglas del sistema; se obtiene como salida una constante o función lineal, como se puede visualizar en la Figura 5 (The MathWorks, Inc., 2019).

El sistema difuso de inferencia utilizado en este trabajo de investigación es tipo Takagi-Sugeno, debido a que no ha sido utilizado para la detección de sigatoka negra en cultivos de plátano.

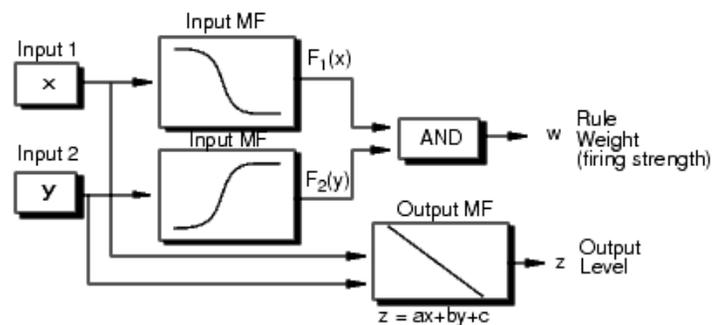


Figura 5: Funcionamiento de Takagi-Sugeno (The MathWorks, Inc., 2019)

2.3.3. Arduino

“Arduino es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra, que permiten establecer conexiones entre el microcontrolador, los sensores y actuadores de una manera muy sencilla” (MCI electronics, 2018).

Arduino maneja diferentes modelos de oficiales, cada una pensada con un propósito diferente y características variadas, sin embargo, todas cuentan con los microcontroladores

AVR marca Atmel, compartiendo la mayoría de sus características de software, como arquitectura, librerías y documentación.

Gracias a su bajo costo, fácil programación y flexibilidad, la placa Arduino fue útil para el montaje de los sensores y recolección de los datos, además, para la implementación de los nodos que se ocupan para el Zig Bee.

2.3.4. Zig Bee

Zig bee es una tecnología que permite la conexión inalámbrica entre los nodos de la red, con baja tasa de transferencia, además, bajo consumo de energía. Se rige por las capas del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos OSI (Open System Interconnection). IEEE 802.15.4, se centra en la especificación de las dos capas inferiores del protocolo (capa física, control de acceso al medio) (Vera Romero et al., 2017). Para el funcionamiento del protocolo Zig Bee se requiere de un nodo principal, que es el nodo coordinador, donde se recibirán y procesarán los datos; y al menos un nodo final, que se encargara del envío de datos.

El protocolo Zig Bee es ideal debido a las condiciones donde se desarrolla el proyecto, al no contar con internet y la distancia del lugar donde se va a censar y la oficina donde se presentan los datos.

2.3.5. Sensor de Humedad y Temperatura DHT 22

El sensor DHT22, Figura 6, es utilizado para censar la temperatura ambiental y la humedad relativa que, a diferencia del sensor LM35, la salida es señal digital calibrada.

Utiliza la exclusiva técnica de recolección de señales digitales y la tecnología de detección de humedad, asegurando su confiabilidad y estabilidad. Sus elementos de detección están conectados con una computadora de un solo chip de 8 bits. El bajo consumo, bajo costo, tamaño pequeño y larga distancia de transmisión son algunas de las ventajas del DHT22, sin embargo, para aplicaciones con enfoque industrial no es suficiente para satisfacer las necesidades (Liu, 2016).

El sensor DHT22 se implementó para la recolección de los datos de entrada para su posterior análisis, fue elegido por su bajo costo, bajo consumo y tamaño pequeño.



Figura 6: Sensor DHT22 (e-radionica, 2019)

2.3.6. MATLAB

MATLAB es una de las muchas sofisticadas herramientas de computación disponibles en el mercado para resolver problemas de matemáticas. Permite efectuar cálculos matemáticos básicos, pero difiere con otros entornos de desarrollo matemáticos en el modo como manejan los cálculos simbólicos y procesos matemáticos más complicados, como la manipulación de matrices de hecho el nombre mismo de MATLAB es una abreviatura de Matrix Laboratory, laboratorio de matrices. Debido a que es una herramienta fácil de usar se ha convertido en una herramienta estándar para ingenieros y científicos (Moore, 2014).

Se utilizó la herramienta MATLAB para el modelado del Sistema Difuso que fue utilizado como base, debido a que es de las pocas herramientas que permiten trabajar con lógica difusa tipo Takagi-Sugeno.

2.3.7. Interfaz Gráfica

Es la parte del software que las personas pueden ver, oír, tocar, hablar; es decir, donde se pueden entender. La Interfaz de Usuario tiene esencialmente dos componentes: la entrada y la salida. La entrada es como una persona le informa sus necesidades o deseos a la computadora. La salida es el modo en que la computadora le transmite los resultados a lo requerido por el usuario. Hoy en día el mecanismo de salida de la computadora más común es la pantalla, seguido de mecanismos que aprovechan las capacidades auditivas de una persona: de voz y sonido (Albornoz , 2014).

Para la presentación de los datos se implementó una interfaz gráfica, permitiendo al productor y sus trabajadores interpretar los datos más fácilmente y realizar acciones para combatir la enfermedad.

2.3.8. Python

Fernández Montoro (2012) define a Python como un lenguaje de programación interpretado, de alto nivel y de propósito general, que últimamente ha experimentado un gran auge, debido a que es fácil de aprender, puede ejecutarse en múltiples sistemas operativos, además, permite crear y desarrollar aplicaciones velozmente sin renunciar a un código legible y fácil de mantener. Múltiples empresas y organizaciones importantes, como

por ejemplo, Google y la NASA, utilizan Python como lenguaje de programación predominante en la mayoría de sus proyectos, y debido a ello, pueden desarrollar complejas aplicaciones en tiempo récord.

El lenguaje de programación a utilizar para elaborar la interfaz gráfica fue Python, debido a que es uno de los pocos lenguajes que incluyen librerías para utilizar lógica difusa, además, Python es de los mejores para el análisis y procesamiento de datos.

2.3.8.1. SciKit Fuzzy

Es una colección de algoritmos de lógica difusa escritos en lenguaje Python. Es desarrollado por la comunidad SciPy, siendo código abierto para su uso general y sin costo (scikit-fuzzy development team, s.f.).

La librería SciKit se utilizó para realizar el análisis de los datos por medio de lógica difusa, permitiendo que el servidor procese los datos, los almacene y los muestre en la interfaz gráfica.

2.3.9. Django

Es un framework web de Python de alto nivel que fomenta un desarrollo rápido y pragmático. Fue creado por desarrolladores experimentados, encargándose de gran parte de la molestia de desarrollo web, permitiendo concentrarse en escribir la aplicación sin demasiados esfuerzos. Es un framework gratis y de código abierto. Se basa en la estructura Modelo-Vista-Controlador (MVC) (Django Software Foundation, 2019). Entre las ventajas de Django frente a otros framework se encuentran:

- Permite el desarrollo rápido de aplicaciones.
- Ayuda a reducir los errores de seguridad.
- Permite que las aplicaciones sean escalables.
- Al utilizar Python, el análisis y procesamiento de datos es más eficiente.

El framework Django se utilizó en el trabajo de investigación para el desarrollo de la interfaz gráfica, que es compuesta por una página web montada en un servidor local.

2.3.10. MySQL

MySQL es un manejador de base de datos que se utiliza en aplicaciones web, siendo compatible con una gran variedad de lenguajes de programación. Convirtiéndose en el manejador base de datos de código abierto más popular del mercado, Gracias a su rendimiento probado, a su fiabilidad y a su facilidad de uso, MySQL se ha convertido en la base de datos líder elegida para las aplicaciones basadas en web y utilizada por propiedades web de perfil alto (ORACLE, 2019).

En el trabajo de investigación se utilizó MySQL para realizar y manipular la base de datos, debido a que se requiere tener el histórico de los datos, además, es compatible con Python y es software de filosofía libre.

CAPITULO III. MÉTODOS EMPLEADOS

En este capítulo se describe todos los detalles de la metodología utilizada en el transcurso del desarrollo de la tesis, especificando lo más posible cada una de las etapas que la componen.

3.1. Metodología

La metodología empleada para el desarrollo de este trabajo de investigación fue el proceso unificado ágil (PUA), que, de acuerdo con Pressman (2010), adopta una filosofía “iterativa para lo pequeño”, a fin de construir sistemas basados en computadora. Las fases del PUA son: concepción, elaboración, construcción y transmisión. Cada fase cuenta con las actividades de: Modelado, Implementación, Pruebas, Despliegue, Gestión de la configuración y proyecto y Ambiente, como se visualiza en la Figura 7.

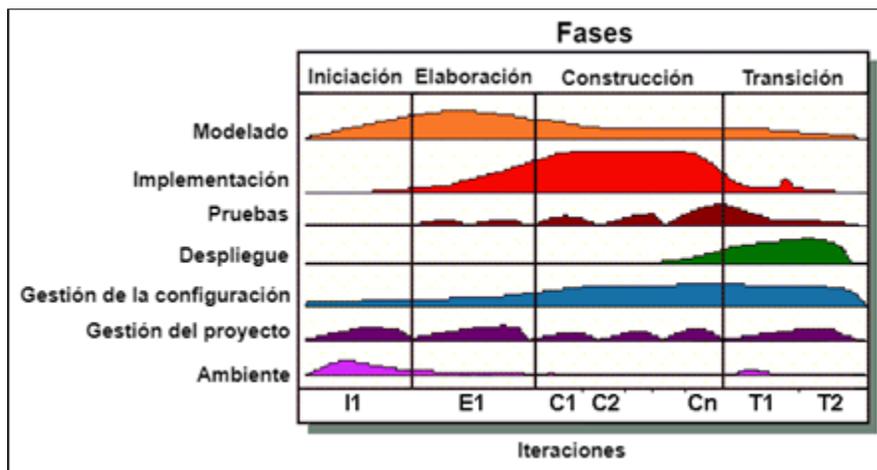


Figura 7: Fases del proceso unificado ágil (Ambler, 2014)

3.1.1. Investigación preliminar

En la investigación preliminar se buscaron los trabajos relacionados con la detección y prevención de sigatoka negra en cultivos de plátano. Además, se visitó el cultivo donde será aplicado, con el objetivo de observar las instalaciones y revisar el estado de los materiales que tiene el productor. En esta etapa se definieron las necesidades del productor, la viabilidad y alcance del proyecto. De igual forma, se definieron los requerimientos, con el propósito de conocer todas las características del entorno de desarrollo del proyecto.

3.1.2. Modelado

En el modelado se realizaron las tareas y actividades por realizar, los recursos necesarios para la elaboración del trabajo. Además, se realizaron los diferentes modelos, modelo de casos de uso, modelo de clases y modelo de datos. Finalizando con el modelo base del sistema de inferencia difuso tipo Takagi-Sugeno para el monitoreo de humedad y temperatura, para determinar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra.

3.1.3. Implementación

En la etapa de implementación se creó el módulo encargado de la recolección de datos, consistiendo este en dos nodos; el nodo sensor, que recolecta los datos de las variables climáticas de temperatura y humedad relativa, tomando la hora por medio del módulo de reloj de tiempo real, además, almacenando los datos en una tarjeta microSD y, por medio del protocolo Zig Bee, se envían al nodo coordinador para su registro en la base de datos. Además, se realizó el FIS en Python, utilizando el modelo base, que extrae los datos de la base de datos, para su análisis y determinar el riesgo de proliferación.

Finalmente se desarrolló la interfaz gráfica en lenguaje Python, utilizando el framework Django, para que el productor y sus trabajadores puedan visualizar los datos.

3.1.4. Pruebas

En la etapa de pruebas se llevaron a cabo las pruebas de campo en las que el sistema difuso fue analizado con las variables de temperatura y humedad relativa, con datos obtenidos por el sensor, dando como resultado en la variable de salida una buena precisión al determinar el riesgo de proliferación. También se llevaron a cabo pruebas de estrés, para verificar la robustez y confiabilidad del sistema frente a una gran cantidad de datos con gran variación, así como para comprobar el funcionamiento de la alimentación del nodo sensor. Para finalizar, se revisó que se cumplieran con los requisitos que se determinaron en la actividad de Modelado.

3.1.5. Despliegue

En esta etapa se instaló el nodo sensor en el cultivo de plátano y el nodo coordinador en el equipo de cómputo, así como el servidor local, encargado de alojar la base de datos y la interfaz gráfica, evaluando el funcionamiento del sistema a través de bitácoras, revisando el correcto uso y obteniendo retroalimentación de los usuarios que manipulan el sistema.

3.1.6. Configuración y administración del proyecto

En esta etapa se proporcionó capacitación a los usuarios para indicar las acciones a tomar en caso de que el sistema sufra algún inconveniente, también se elaboraron estrategias de gestión de cambios, para asegurar la calidad del sistema a lo largo de su tiempo de vida.

3.1.7. Administración del ambiente

En esta etapa se realizaron las configuraciones necesarias en el ambiente en el que se ubica el sistema, permitiendo que los componentes estén disponibles los usuarios.

3.1.8. Documentación

Finalmente, en esta fase se redactó la documentación del proyecto.

3.2. Caso de estudio

El desarrollo de este trabajo de investigación se llevó a cabo en el cultivo de plátano llamada la Laguna propiedad del ingeniero Agustín Hueso Alcaraz, ubicada cerca de la localidad de El Colomo, en el municipio de Manzanillo, Colima, México, Figura 8.



Figura 8: Cultivo donde se implantó el proyecto

3.3. Hardware y Software

En esta sección se describe el hardware y software utilizado en este proyecto de investigación, detallando algunos aspectos técnicos.

3.3.1. Hardware

El hardware utilizado para el desarrollo del proyecto fue extenso, debido a la necesidad de obtención de datos por medio de sensores. Para ello, se enfocó en el uso de la placa programable Arduino Mega, con las características descritas en la Tabla 1.

Microcontrolador	Atmega2560
Voltaje de Operación	5V
Tensión de Entrada (limite)	6-20V
Pines Digitales I/O	54
Pines de Entrada Analógicos	16
Memoria Flash	256 KB
Velocidad del Reloj	15 MHz

Tabla 1: Datos técnicos del Arduino Mega

La recolección de los datos en el cultivo se realizó con el sensor de temperatura y humedad relativa DHT22, tomando la fecha y hora del reloj de tiempo real DS3231 y enviándolos por medio del módulo Xbee Pro S3B, cuyas características se describen en la Tabla 2, 3 y 4 respectivamente.

Voltaje de Operación	3.3-6V DC
Señal de Salida	Señal digital a través de un solo bus
Rango de Operación	Humedad: 0-100%;

	Temperatura: -40~80 °C
Precisión	Humedad: +-2%; Temperatura: <+-0.5 °C
Periodo de Censado	2 segundos

Tabla 2: Datos técnicos del sensor DHT22

Precisión	+ - 2ppm de 0 °C a 40 °C
Voltaje de Operación	3.3V DC
Rangos de Temperatura	0 °C a 70 °C
Otras características	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenta los segundos, los minutos, las horas, la fecha del mes, el mes, el día de la semana y el año. • Dos alarmas de hora del día. • Entrada de batería de respaldo para el cronometraje continuo. • Señal de salida de onda cuadrada programable.

Tabla 3: Datos técnicos del reloj de tiempo real DS3231

Voltaje de Operación	2.1-3.6V DC
Velocidad de Datos de Radiofrecuencia	Alto: 200 kb/s Bajo: 10 kb/s
Potencia de Salida de Transmisión	24 dBm
Banda de Frecuencia	902 a 928 MHz

Periodo de Censado	2 segundos
Pines Digitales I/O	15
Temperatura de Operación	-40 °C a 85°C

Tabla 4: Datos técnicos del Xbee Pro S3B

El servidor local e interfaz gráfica son alojados en el equipo de cómputo que le pertenece a la empresa donde se implementara el proyecto, cuyas especificaciones se describen en la Tabla 5.

Modelo	Acer Aspire 15
Procesador	Intel Pentium
RAM	2 GB
Disco Duro	500 GB
Sistema Operativo	Windows 8.1

Tabla 5: Especificaciones del equipo de cómputo

3.3.2. Software

El software utilizado para el desarrollo del proyecto fue:

- MATLAB R2017b junto con el ToolBox de lógica difusa
- Librería JAVA JFuzzyLogic
- Statgraphics
- Arduino IDE
- XCTU
- Xampp (Servidor Apache)
- Python

- Framework Django (Python, HTML, CSS)
- Chart.js
- MySQL

CAPITULO IV. DESARROLLO DE LA TESIS

4.1 Análisis

En esta sección del desarrollo se describen las etapas involucradas en el análisis, como lo son el modelo conceptual del sistema, diagrama de actividades, modelo de casos de uso y modelo de requisitos.

4.1.1 Modelo conceptual (Big Picture)

El sistema propuesto, presentado en la Figura 3, se compone principalmente de varios módulos:

- **Nodo Sensor:** Se encarga de obtener los datos de las variables climáticas de temperatura y humedad relativa, posteriormente envía los datos al Módulo de Adquisición de Datos, en caso de no establecer conexión, los almacena en una memoria microSD para poder enviarlos cuando se establezca la conexión nuevamente.
- **Módulo de Adquisición de Datos:** Se encarga de recibir los datos del Nodo Sensor y enviarlos al Servidor Local por medio de una interfaz de hardware.
- **Servidor Local:** Es alojado en un equipo de cómputo y se encarga de recibir los datos del Módulo de Adquisición de Datos por medio del puerto serial, aplica las técnicas de lógica difusa y posteriormente los almacena en la base de datos para su registro histórico.
- **Interfaz Gráfica:** Toma los datos de la base de datos y los muestra en forma de gráfica y tablas para su fácil entendimiento, además, realiza consultas de los datos históricos.

4.1.2 Diagrama de actividades

En esta sección se muestran los diagramas de actividades con responsabilidades del sistema. La Figura 9 muestra el diagrama de actividad del sistema con la operación de mostrar los datos del día actual.

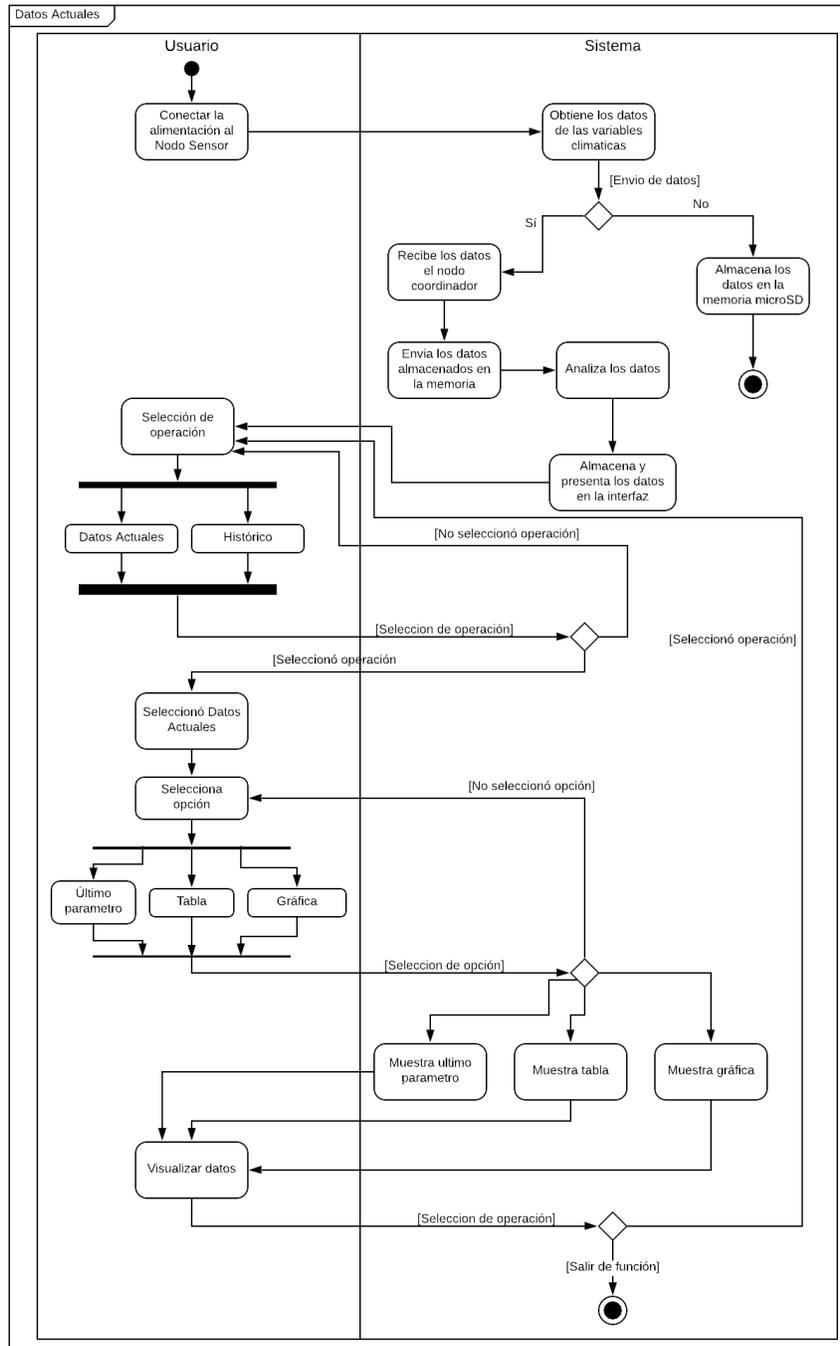


Figura 9: Diagrama de actividades de los datos actuales

La figura 10 muestra el flujo del sistema con la operación de mostrar el histórico de los datos en la interfaz.

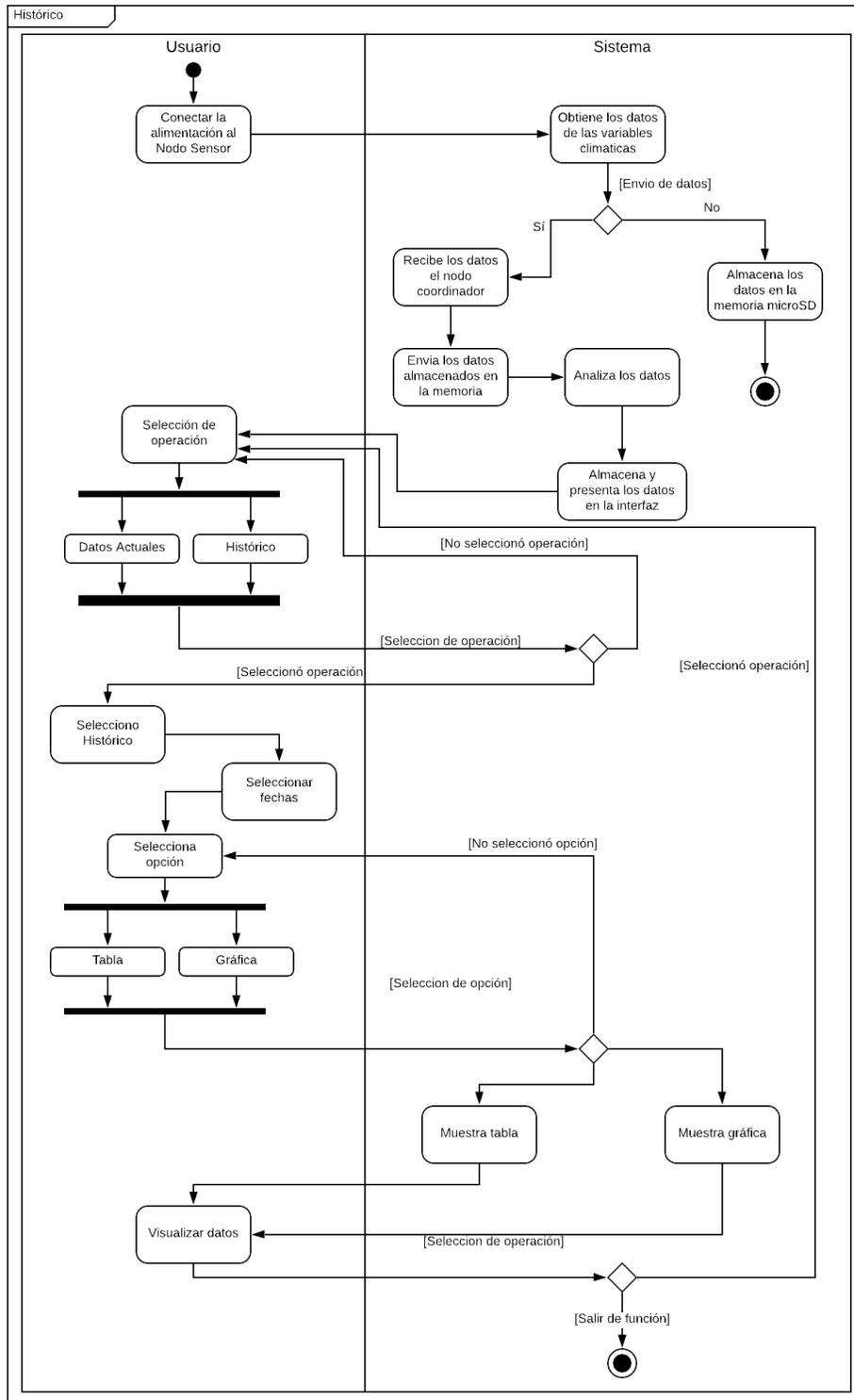


Figura 10: Diagrama de actividades del histórico

4.1.3 Modelo de casos de uso

A continuación se presenta el modelo de casos de uso del sistema.

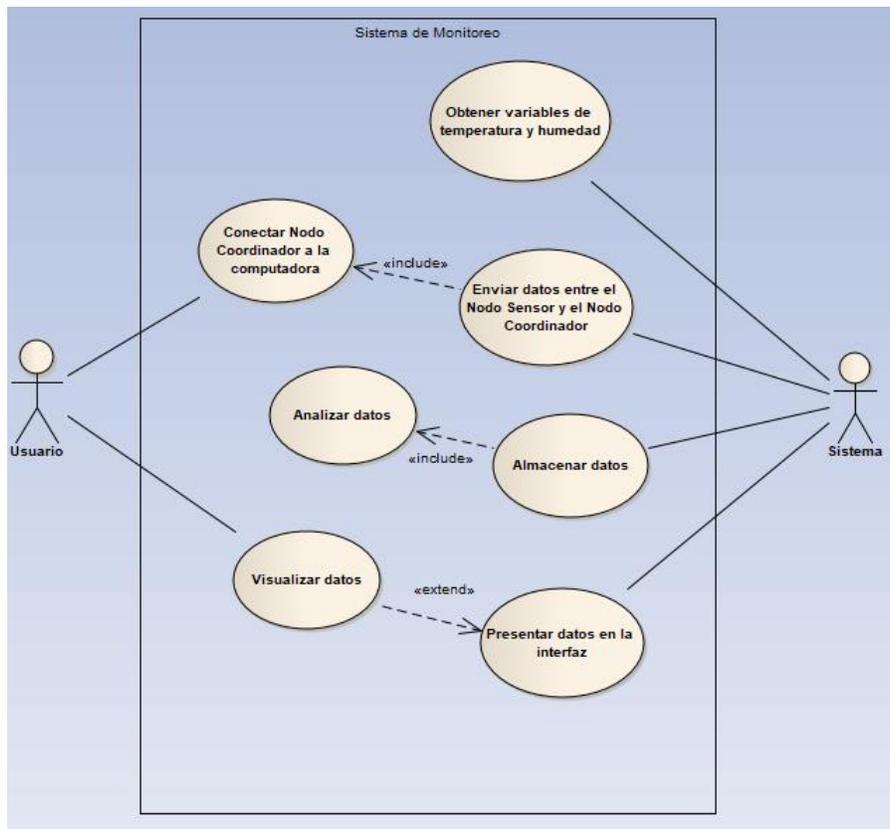


Figura 11: Modelo de casos de uso del sistema

La Figura 11 muestra el modelo de casos de uso, los cuales representan las actividades que desempeña cada usuario, incluyendo al sistema como autor mismo. Los casos de uso se describen a continuación:

- **Obtener variables de temperatura y humedad:** en este caso de uso el sistema obtiene los datos de las variables climáticas por medio del Nodo Sensor.
- **Conectar Nodo Coordinador a la computadora:** el objetivo es que el usuario conecte el Nodo Coordinador o módulo de adquisición de datos para proceder al envío de datos.

- **Enviar datos entre el Nodo Sensor y el Nodo Coordinador:** este caso de uso el sistema envía los datos entre el Nodo Sensor que está montado en el cultivo de plátano y el Nodo Coordinador que se encuentra conectado a la computadora.
- **Almacenar datos:** el sistema almacena los datos recibidos del Nodo Coordinador en la base de datos para su registro histórico.
- **Analizar datos:** este caso de uso tiene como propósito analizar los datos de la temperatura y humedad por medio del sistema difuso para obtener el riesgo de proliferación.
- **Presentar datos en la interfaz:** el sistema muestra los datos, ya sea en forma de tabla o gráficas.
- **Visualizar datos:** el propósito es que el usuario pueda observar los datos en la interfaz y realizar consultas del registro histórico.

4.1.4 Modelo de requisitos

La recolección de los requisitos funcionales y no funcionales del proyecto se realizó en conjunto con los participantes del proyecto, expuestos previamente en la sección 1.9.2. Los requisitos funcionales del sistema se muestran en la Figura 12.

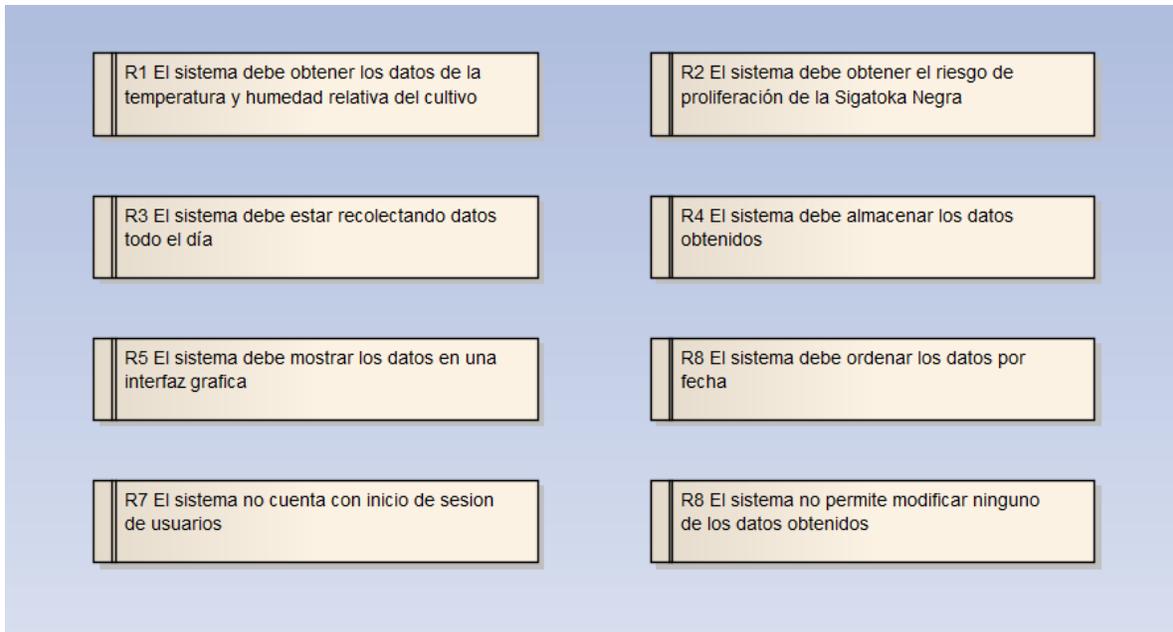


Figura 12: Requisitos funcionales del proyecto

Los requisitos no funcionales se muestran en la Figura 13, los cuales abarcan aspectos técnicos y propiedades del proyecto.

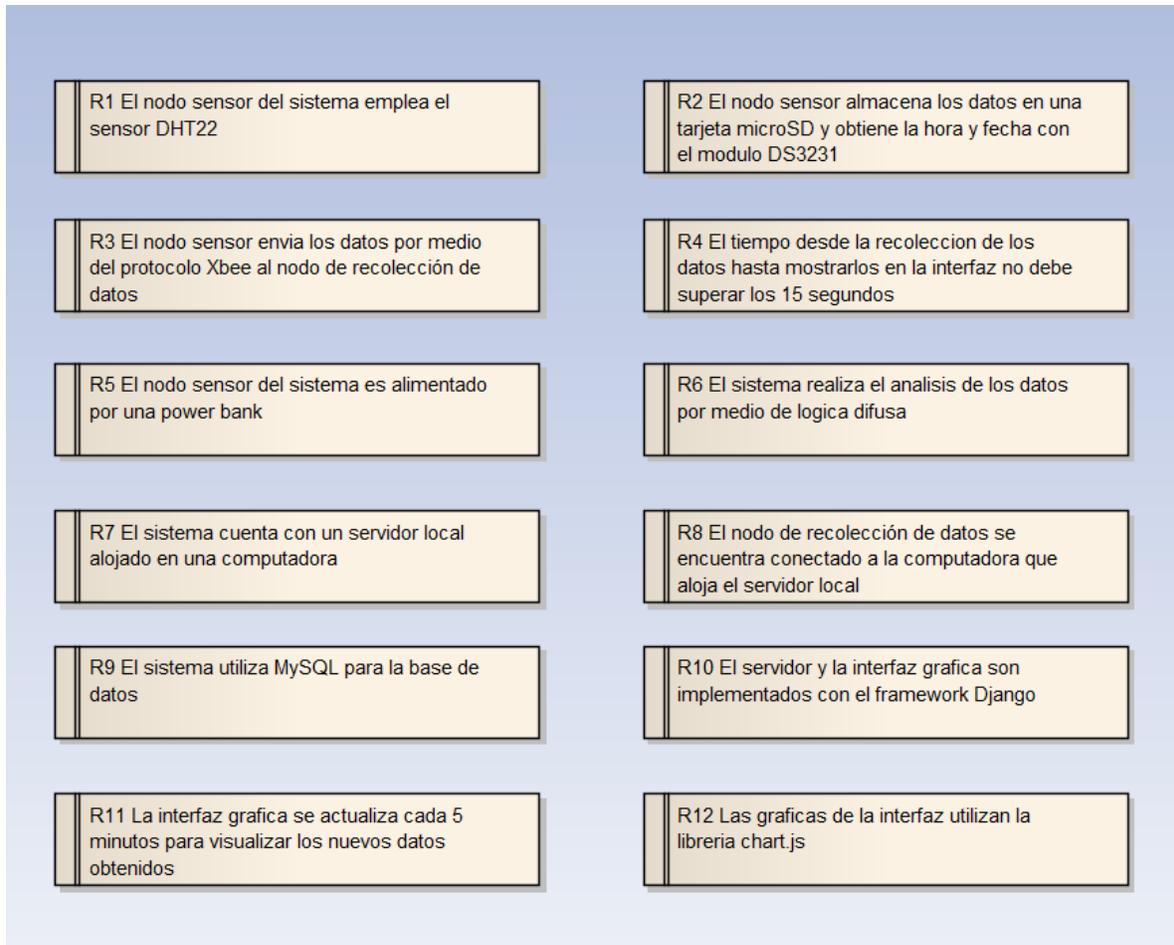


Figura 13: Requisitos no funcionales del proyecto

4.2 Diseño

En esta sección se describe el diseño realizado para el proyecto de investigación presentado en este documento.

4.2.1 Modelo de clases

El modelo de clases, mostrado en la Figura 14, que se utilizó para el registro histórico, consta de una tabla principal donde, además de almacenar los datos de los sensores con, también registra el riesgo de proliferación obtenido por el sistema difuso.

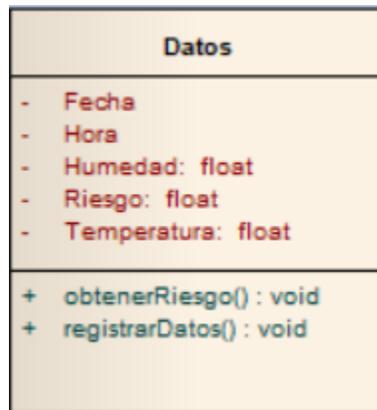


Figura 14: Modelo de clases

El modelo fue elaborado con la herramienta Enterprise Architect.

4.2.2 Modelo de datos

En la Figura 15 se muestra el modelo de datos que incluye la tabla de la base de datos que contiene el sistema.



Figura 15: Modelo de datos

4.2.3 Diccionario de datos

La Tabla 6 muestra la descripción de la tabla principal del diccionario de datos.

Nombre: Datos

Descripción: Permite almacenar los datos de los sensores y el riesgo de proliferación.				
Columna	Tipo	Nulo	Predeterminado	Comentarios
id (<i>Primaria</i>)	int(11)	No		Llave primaria que identifica el registro
fecha	date	No	01-01-2019	Fecha del registro
hora	time(6)	No	00:00	Hora del registro
temperatura	decimal(10,2)	No	0	Temperatura obtenida del sensor
humedad_relativa	decimal(10,2)	No	0	Humedad Relativa obtenida del sensor
riesgo	decimal(10,2)	No	0	Riesgo de Proliferación obtenida por el análisis de la Temperatura y Humedad Relativa

Tabla 6: Diccionario de datos

4.2.4 Sistema Difuso

El sistema difuso propuesto en este trabajo de investigación se compone de las variables de entrada, variables de salida y reglas.

4.2.4.1. Variables

Para la creación del sistema difuso se definieron las variables de entrada, las cuales son la humedad relativa y la temperatura ambiental, permitiendo obtener la variable de salida, siendo el riesgo de proliferación de la sigatoka negra. Acorde con Álvarez et al. (2013), las condiciones favorables para la aparición y crecimiento de la sigatoka negra se ocasionan cuando las condiciones climáticas de humedad relativa y temperatura ambiental se encuentran en el rango de los valores mostrados en la Tabla 7.

Variable	Rango
Humedad relativa	Mayor a 80%
Temperatura	23 a 28°C

Tabla 7: Condiciones óptimas de la humedad y temperatura que propician el crecimiento de la enfermedad sigatoka negra en plátanos (Álvarez et al., 2013).

4.2.4.1.1. Variables de entrada

Las variables de entrada del sistema difuso son las variables climáticas que influyen en la presencia de la sigatoka negra, humedad relativa y temperatura ambiental.

Humedad Relativa

Los valores para la humedad relativa utilizados en el sistema difuso propuesto, mostrados en la Tabla 8, se crearon con base en el rango de humedad relativa mostrado en la Tabla 7 y en los rangos de medición (0-100%).

FM	Rango
Poca	0 a 35%
Media	25 a 75%
Mucha	65 a 100%

Tabla 8: Rangos de la humedad relativa.

Las funciones de membresía trapezoidales utilizan cuatro parámetros, donde a pertenece al ángulo inferior izquierdo, b corresponde al ángulo superior izquierdo, c al ángulo superior derecho y por último d al ángulo inferior derecho y se especifican como (López-Martín et al., 2008):

$$FM(x) = 0 \text{ si } -\infty < x \leq a$$

$$FM(x) = 1 \text{ si } b \leq x \leq c$$

$$FM(x) = 0 \text{ si } d \leq x < \infty$$

Para la variable de entrada humedad relativa, se optó utilizar funciones de membresía trapezoidales, como se muestra en la Figura 16, puesto que son las funciones de membresía que se adaptan ventajosamente, por su forma geométrica, al rango de humedad relativa que favorece la presencia de la sigatoka negra, como se puede observar en la Tabla 7.

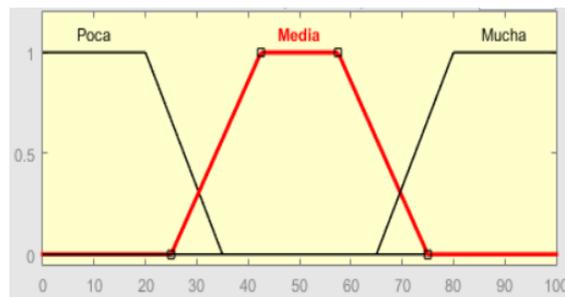


Figura 16: Funciones de membresía de la humedad relativa

Los valores de pertenencia de las funciones de membresía para la humedad se obtuvieron con base al valor de la humedad relativa en la Tabla 7 y se ajustaron de manera empírica. Además, debido a que se utilizaron funciones de membresía trapezoidales se utilizan 4 valores para cada una, mostrados en la Tabla 9.

FM	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Poca	0	0	20	35
Media	22.5	42.5	57.5	77.5
Mucha	65	80	100	100

Tabla 9: Valores de pertenencia de la humedad relativa.

Temperatura

La Tabla 10 muestra los rangos utilizados en el sistema difuso para la temperatura, con base en el rango de la temperatura mostrado en la tabla 7.

Funciones de membresía	Rango
Baja	13 a 24°
Media	18 a 33°
Alta	27 a 38°

Tabla 10: Rangos de la temperatura.

Para la variable de entrada temperatura ambiental, se emplearon funciones de membresía gaussianas, mostradas en la Figura 17, debido a que se ajustan al rango de temperatura ambiental que propicia la aparición y crecimiento de sigatoka negra, mostrado en la Tabla 7. De acuerdo con López-Martín et al. (2008), las funciones de membresía gaussianas cuentan con dos parámetros, siendo el parámetro k , el que determina la curvatura y el otro m , concierne al punto central de la curva y se especifican como:

$$FM(x) = e^{-k(x-m)^2}$$

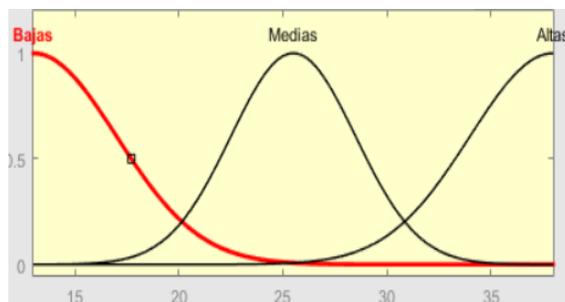


Figura 17: Funciones de membresía de la temperatura ambiental

Para obtener los valores de pertenencia de las funciones de membresía de la temperatura ambiental, se tomó como base al valor de la temperatura ambiental mostrado en la Tabla 7 y se ajustaron de manera empírica. La Tabla 11 muestra los valores de las funciones de membresía, que, al ser gaussianas, requieren de 2 valores para cada una.

FM	k	m
Baja	4	13
Media	2	25.5
Alta	4	38

Tabla 11. Valores de pertenencia de la temperatura.

4.2.4.1.2. Variable de Salida

El principal distintivo de la lógica difusa tipo Takagi-Sugeno, es que emplea una salida constante, en lugar de funciones de membresía. Los valores de salida utilizados en el sistema difuso propuesto, mostrados en la Tabla 12, se crearon tomando como base el grado de pertenencia de un conjunto difuso, el cual se encuentra en el rango de 0 a 1.

Conjunto	Valor
----------	-------

Difuso	
Bajo	0
Medio	0.5
Alto	1

Tabla 12: Valores del riesgo de proliferación de la enfermedad de sigatoka negra en el cultivo de plátano.

4.2.4.2. Reglas

Las reglas del sistema difuso se crearon basándose en las condiciones climáticas presentadas en la Tabla 7. La Tabla 13 muestra las combinaciones de las reglas establecidas en el sistema difuso.

Humedad/ Temperatura	Poca	Media	Mucha
Baja	Bajo	Bajo	Medio
Media	Medio	Medio	Alto
Alta	Bajo	Bajo	Medio

Tabla 13: Reglas del sistema difuso.

4.2.5 Modelo de interfaces

El diseño de la interfaz gráfica del proyecto se realizó por medio de mock-ups, haciendo uso de la herramienta Axure. La ventana principal de la interfaz, Figura 18, cuenta con un menú despegable que permite navegar fácilmente entre secciones, también cuenta tres botones, los cuales son: Parámetros Actuales, Gráfica y Tabla, donde por defecto está seleccionada la primera opción. Esta ventana pertenece a los parámetros actuales y muestra el último dato recibido de los sensores, en los cuadros se observan los valores, además, en la parte inferior permite visualizar la fecha y hora en la que se obtuvieron esos datos.



Figura 18: Ventana principal de la interfaz

Al presionar el segundo botón, Gráfica, muestra todos los datos recibidos del día actual, como se muestra en la Figura 19.



Figura 19: Visualización de los datos en forma de gráfica

De igual modo, los datos pueden ser desplegados en una tabla, Figura 20, presionando el tercer botón.



Figura 20: Visualización de los datos en forma de tabla

Al contar con registro histórico en una base de datos, la interfaz gráfica permite visualizar los datos en un rango de fechas establecidas, ya sea en forma de gráfica o tabla. En la Figura 21 y 22 se pueden observar los datos mostrados en gráfica o tabla respectivamente.



Figura 21: Histórico de los datos mostrados en forma de gráfica

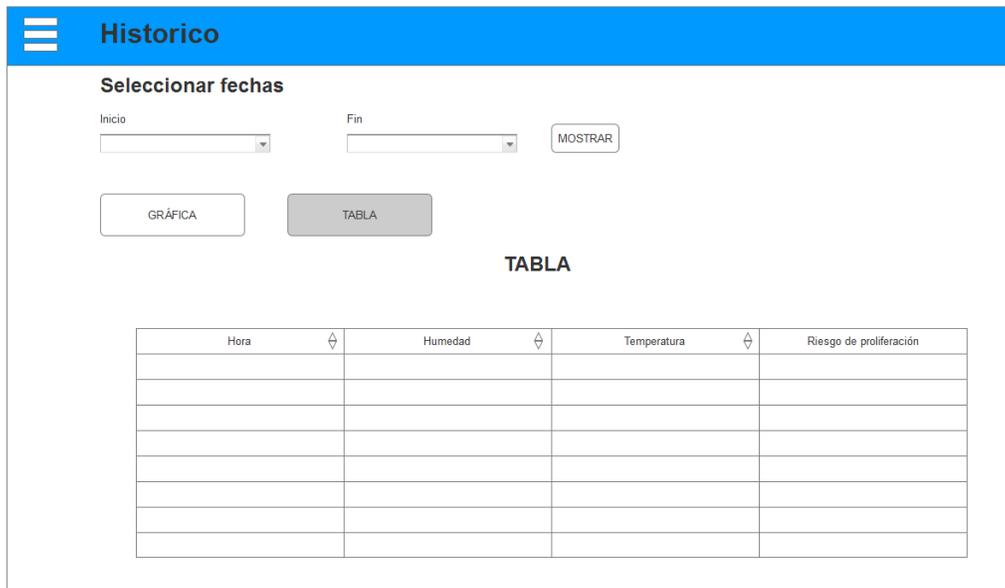


Figura 22: Histórico de los datos mostrados en forma de tabla

4.3 Implementación

En esta sección se describe el proceso que se realizó para implementar el proyecto presentado en este documento, abarcando la configuración y ejecución de los módulos del sistema.

4.3.1 Nodo sensor

El nodo sensor se encarga de obtener los datos de las variables climáticas de temperatura y humedad relativa por medio del sensor DHT22. Posteriormente se envían mediante Xbee al módulo de adquisición de datos junto con la fecha y hora obtenidas del reloj de tiempo real DS3231, esperando respuesta de la recepción de los datos. Si no se obtiene respuesta, se almacenan en un archivo CSV (por sus siglas en inglés Comma Separated Values) en la tarjeta microSD incluida en el módulo. En caso de obtener respuesta del módulo de adquisición de datos, se envía el archivo CSV con los datos almacenados en la tarjeta microSD y finalmente se hiberna aproximadamente durante 15 minutos para ahorrar energía.

4.3.1.1. Construcción

En la Figura 23 se puede observar el diagrama de conexiones del nodo sensor, con los componentes y las conexiones que lleva el nodo.

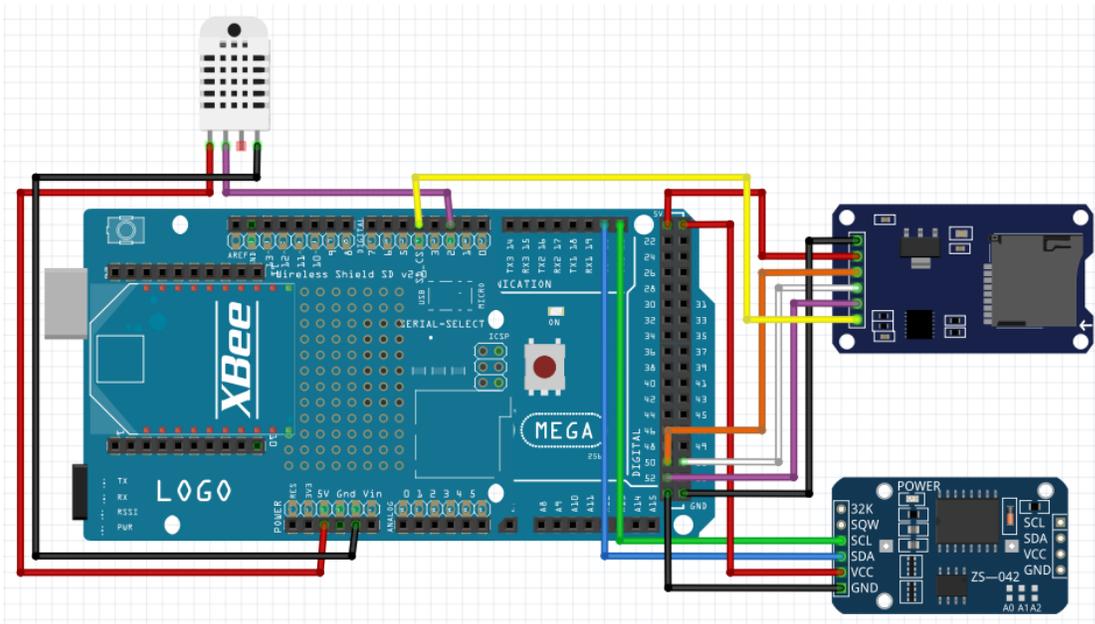


Figura 23: Diagrama de conexión

La base del nodo es el Arduino Mega y la tarjeta electrónica Xbee S3B en su placa Xbee Shield, Figura 24 y 25 respectivamente.



Figura 24: Arduino Mega



Figura 25: Tarjeta electrónica Xbee S3B

Debido a que el nodo sensor va a ser implementado en el cultivo de plátano a la intemperie, se requiere que la base donde sea albergado sea resistente, tanto al agua como al polvo, para ello se utilizó un gabinete de plástico para exteriores o caja Nema, como se muestra en la Figura 26, junto con conectores glándula que permita sacar el cable de alimentación y antena del Xbee, además, sirva como cobertura para el sensor (Figura 27).

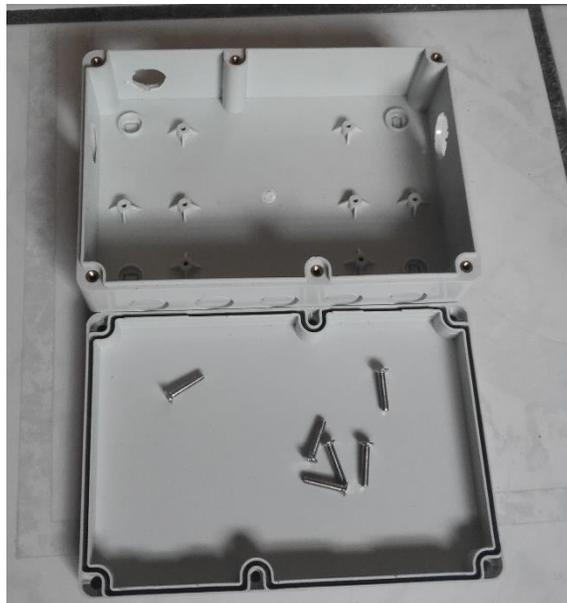


Figura 26: Caja nema que aloja el nodo



Figura 27: Conectores glándula usados en el nodo

Como se puede observar en la Figura 28, se colocó el arduino, con el Xbee montado, de tal manera que se pueda extraer el cable de alimentación y la antena mediante los conectores glándula. El sensor se extrajo con otro conector para que obtenga los datos fuera y anular la interferencia que puede ocasionar el gabinete. Además, se colocó el reloj de tiempo real DS3231 y el modulo lector de microSD en las bases que tiene la caja, ocasionando que no se muevan. Finalmente se cerró el gabinete y se conectó a la power bank, Figura 29.

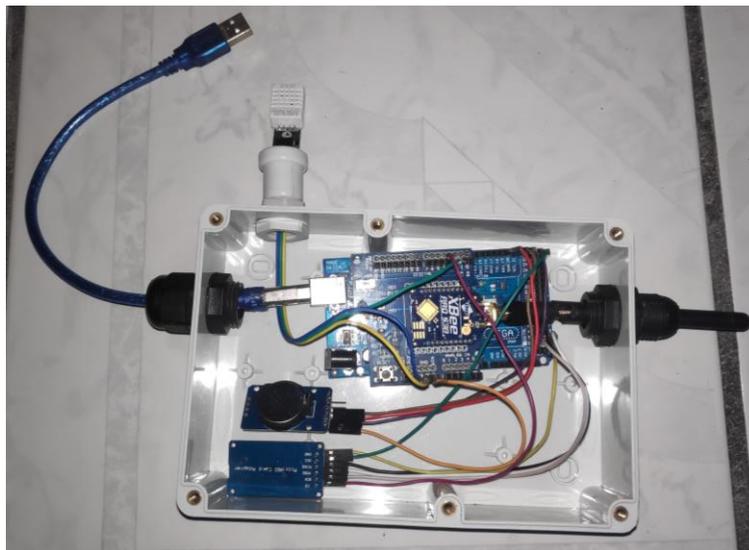


Figura 28: Nodo sensor dentro del gabinete



Figura 29: Nodo sensor terminado y alimentado por la power bank

4.3.1.2. Programación del Arduino y configuración del Xbee

La rutina del programa de arduino que incluye el nodo sensor, ver Anexo A, se encarga de inicializar todos los componentes, obtener y enviar los datos al módulo de adquisición de datos, también permite el funcionamiento en caso de que no se reciban los datos, almacenándolos en la tarjeta microSD. Además, cuenta con rutinas para el ahorro en el consumo de la alimentación, permitiendo que trabaje continuamente las 24 horas hasta que se agote la carga de la power bank.

Este proyecto de investigación se configuró en conjunto con otro para la misma empresa, debido a eso, la configuración del Xbee debe ser una red con un nodo coordinador y dos nodos que funcionan como routers, permitiendo que envíen y reciban datos del coordinador. Por tal motivo se configuro en modo API sin escapes. La configuración del Xbee utilizado se realizó mediante el programa XCTU. La Figura 30 muestra la configuración del nodo sensor identificado como DISPOSITIVO2.

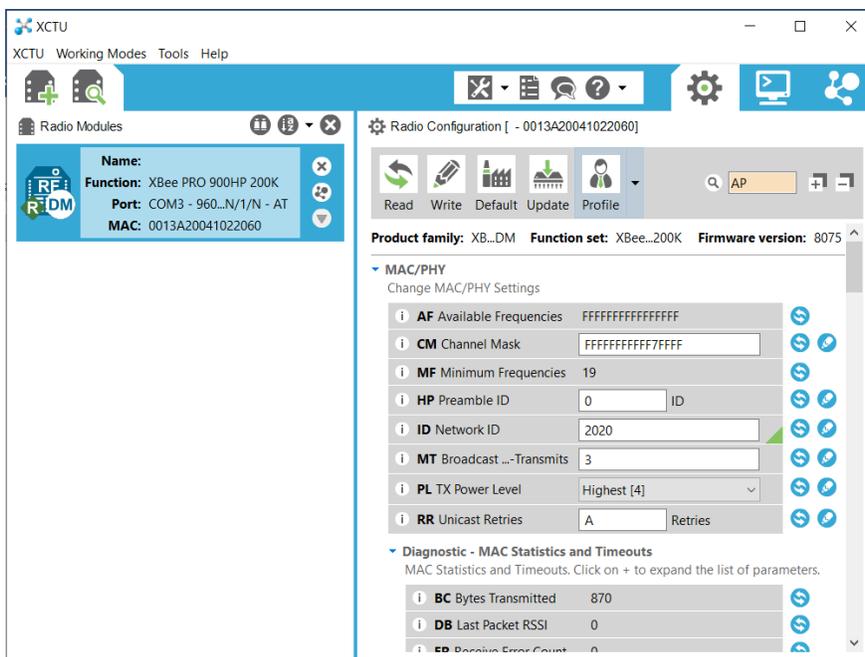


Figura 30: Configuración del nodo sensor

4.3.1.3. Costo de los materiales

El precio de los materiales puede variar dependiendo del lugar donde se compran, los cuales fueron comprados por los participantes del proyecto de investigación. La tabla 14 muestra el precio aproximado de compra de los materiales del nodo sensor.

Materiales	Costo
Arduino Mega	\$230
Xbee S3B	\$1100
Xbee Shield	\$80
Gabinete para exterior	\$300
Conectores glándula	\$150
Sensor DHT22	\$140

Reloj de tiempo real DS3231	\$70
Módulo de lector microSD	\$60

Tabla 14: Costo de los materiales del nodo sensor

El costo total del nodo sensor fue de \$2,130.00 pesos mexicanos, equivalentes a \$94.76 dólares americanos al cambio.

4.3.2 Módulo de adquisición de datos

El módulo de adquisición de datos obtiene los datos del módulo sensor por medio del Xbee y envía una respuesta para confirmar la correcta recepción de los mismos. El módulo de adquisición de datos se encuentra conectado al equipo de cómputo encargado del almacenamiento de datos, que, además de proporcionarle energía al módulo, recibe los datos por medio del Arduino utilizando el puerto serial.

4.3.2.1. Construcción

Para el módulo de adquisición de datos solo requiere de un Xbee, junto con el Xbee Shield y el arduino para tomar los datos del puerto serial. La Figura 31 muestra el diagrama de conexión del módulo.

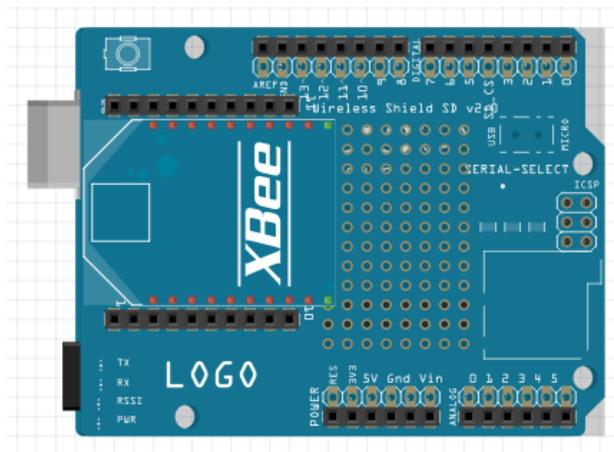


Figura 31: Diagrama de conexión del nodo

El módulo de adquisición de datos hace uso de una placa Arduino, en este caso, Arduino UNO (Figura 32), debido a que es de menor tamaño, y la tarjeta electrónica Xbee S3B en su placa Xbee Shield (Figura 33).



Figura 32: Arduino UNO



Figura 33: Tarjeta Electrónica S3B PRO

El Xbee, junto con el Xbee Shield se montó al Arduino UNO para la recepción de los datos, como se puede observar en la Figura 34, para posteriormente, ser conectado al equipo de cómputo por medio del cable USB.



Figura 34: Módulo de adquisición de datos

4.3.2.2. Configuración del Xbee

Debido a que el nodo coordinador debe enviar y recibir datos de los routers, se requiere configurarse en modo API sin escapes. La configuración del Xbee utilizado se realizó mediante el programa XCTU. La Figura 35 muestra la configuración del nodo sensor identificado como COORDINADOR, con el Network ID de 2020, al igual que los routers.

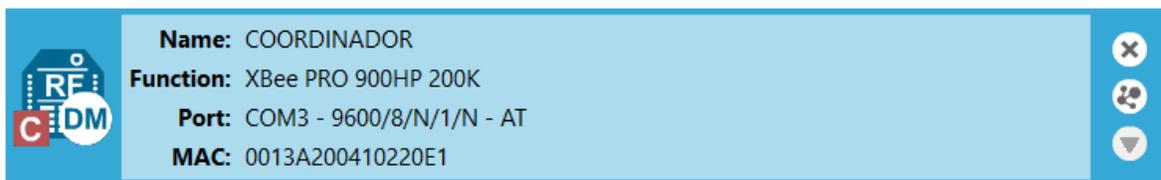


Figura 35: Configuración del coordinador

4.3.2.3. Costo de los materiales

Los materiales del módulo de adquisición de datos son muy pocos, y el costo puede ser diferente, según el lugar donde se compren. La Tabla 15 muestra y el costo aproximado de los materiales utilizados.

Materiales	Costo
Arduino Uno	\$170
Xbee S3B	\$1100
Xbee Shield	\$80

Tabla 15: Costo de los materiales del módulo de adquisición de datos

El costo total del nodo sensor fue de \$1,350.00 pesos mexicanos, equivalentes a \$60.06 dólares americanos al cambio.

4.3.3 Almacenamiento de datos

Una vez realizados el nodo sensor y el módulo de adquisición de datos, se requiere almacenar los datos obtenidos de las variables climáticas permitiendo tener registro histórico de los mismos.

4.3.3.1. Recepción de datos

Para la recepción de datos, se creó una rutina, ver Anexo B, que toma los valores por medio del puerto serial del módulo de adquisición de datos, además, realiza el análisis de los valores obtenidos mediante el sistema difuso, explicado en la sección 4.2.4, y obtiene el riesgo de proliferación, posteriormente muestra los valores en una consola de comandos, como se puede observar en la Figura 36.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Tue Feb 06 11:18:02 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 11:33:07 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 11:48:07 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 12:03:12 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 12:18:17 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 12:33:17 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
Tue Feb 06 12:48:22 2020 Tem: 19.90 Hum: 43.30
Riesgo: 3.81
    
```

Figura 36: Terminal de comandos mostrando los datos recibidos y analizados

4.3.3.2. Base de datos

Para el almacenamiento de los datos, se optó por utilizar una base de datos en MySQL, lo que permite tener un registro histórico para el análisis y consulta de los mismos, con la estructura y propiedades descritas en las secciones 4.2.2 y 4.2.3. Los valores de temperatura, humedad relativa y riesgo de proliferación, obtenido del análisis mediante el sistema difuso son almacenados en la base de datos, junto con la hora y fecha de censado.

La Figura 37 muestra algunos valores almacenados en la base de datos.

	id	fecha	hora	temperatura	humedad_relativa	riesgo
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	101	2020-02-04	15:18:00.000000	24.30	70.50	4.91
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	102	2020-02-04	15:33:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	103	2020-02-04	15:48:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	104	2020-02-04	16:03:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	105	2020-02-04	16:18:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	106	2020-02-04	16:33:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	107	2020-02-04	16:48:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	108	2020-02-04	17:03:00.000000	25.50	70.10	4.87
<input type="checkbox"/> Editar Copiar Borrar	109	2020-02-04	17:18:00.000000	25.50	70.10	4.87

Figura 37: Datos almacenados en la base de datos

4.3.4 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica se desarrolló con el Framework Django, utilizando el lenguaje de programación Python para la consulta de los datos. Además, el lenguaje de etiquetas HTML para crear una página web local, junto con CSS para los estilos y Javascript para las

secciones dinámicas. Debido a que la interfaz debe mostrar los datos de otro proyecto que se desarrolló en conjunto para la misma empresa participante, la ventana principal, como se puede observar en la Figura 38, muestra del lado izquierdo los datos obtenidos del cultivo, temperatura ambiental, humedad relativa y el riesgo de proliferación, y del lado derecho los datos referentes a la calidad del agua, calidad, temperatura, pH y conductividad, así como la fecha y hora del dato recibido. Además, en la parte superior tiene el menú despegable para navegar entre secciones de la misma Figura 39.



Figura 38: Ventana principal de la interfaz

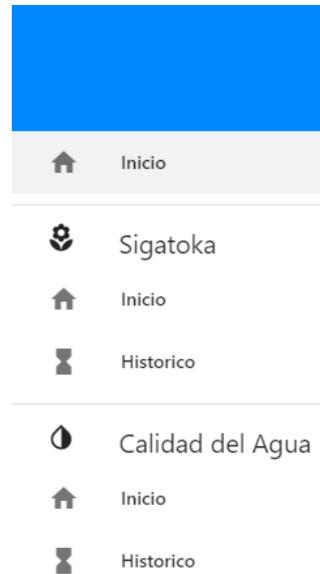


Figura 39: Menú despegable de la interfaz

Similar a la Figura 18, la ventana (Figura 40) muestra los parámetros actuales del riesgo de proliferación, temperatura y humedad, además, también muestra imágenes para mostrar el nivel de cada dato, junto con la fecha y hora del dato obtenido.

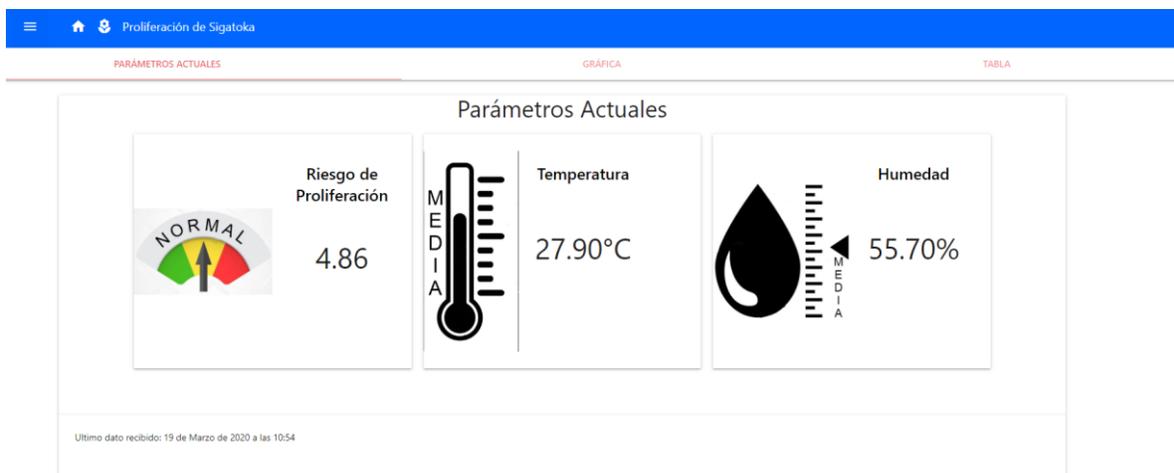


Figura 40: Ventana para observar los parámetros actuales

Los datos del día actual se pueden mostrar en forma de gráfica, como se visualiza en la Figura 41, donde cada barra representa a un parámetro, de diferente color para diferenciar fácilmente cada una.



Figura 41: Datos del día actual en forma de gráfica

También se pueden visualizar en forma de tabla, para visualizar cada uno individualmente, como se observa en la Figura 42. La tabla permite seleccionar la cantidad de datos a mostrar por página, siendo 10, 25, 50 o 100 datos.

Proliferación de Sigatoka

PARÁMETROS ACTUALES GRÁFICA TABLA

Datos del del 19 de Marzo de 2020

Mostrar: 25

Hora	Temperatura	Humedad Relativa	Riesgo de Proliferación
10:54	27.90 °C	55.70%	4.85
10:54	27.90 °C	55.70%	4.85
10:53	27.80 °C	56.30%	4.87
10:52	27.80 °C	56.30%	4.87
10:52	27.80 °C	56.30%	4.87
10:52	27.80 °C	56.40%	4.87
10:52	27.80 °C	56.40%	4.87
10:52	27.80 °C	56.20%	4.87
10:52	27.80 °C	56.20%	4.87
10:51	27.80 °C	56.10%	4.87
10:51	27.80 °C	56.10%	4.87
10:51	27.70 °C	56.30%	4.88
10:51	27.70 °C	56.30%	4.88
10:51	27.70 °C	56.70%	4.88
10:51	27.70 °C	56.70%	4.88
10:50	27.70 °C	56.50%	4.88
10:50	27.70 °C	56.50%	4.88
10:50	27.70 °C	56.70%	4.88
10:50	27.70 °C	56.70%	4.88
10:50	27.70 °C	56.70%	4.88
10:50	27.70 °C	56.70%	4.88
10:50	27.70 °C	56.70%	4.88
10:49	27.70 °C	56.50%	4.88
10:48	27.70 °C	56.60%	4.88
10:48	27.70 °C	56.60%	4.88
10:48	27.70 °C	56.60%	4.88

Registros del 1 al 25

Figura 42: Datos del día actual en forma de gráfica

La visualización histórica de los datos, similar a la descrita en la sección 4.2.5, se puede observar en forma de gráfica y de tabla. En la parte superior se selecciona el rango de fechas a presentar, además, permite visualizar todos los datos o solo los máximos diarios. Sin embargo, el histórico solo muestra los valores de la temperatura y humedad, como se puede observar en la Figura 43.



Figura 43: Histórico de todos los datos en forma de gráfica

Si se desea imprimir los máximos diarios, Figura 44, se muestran dos tablas, donde la gráfica del máximo representado cambia a ser de color rojo.

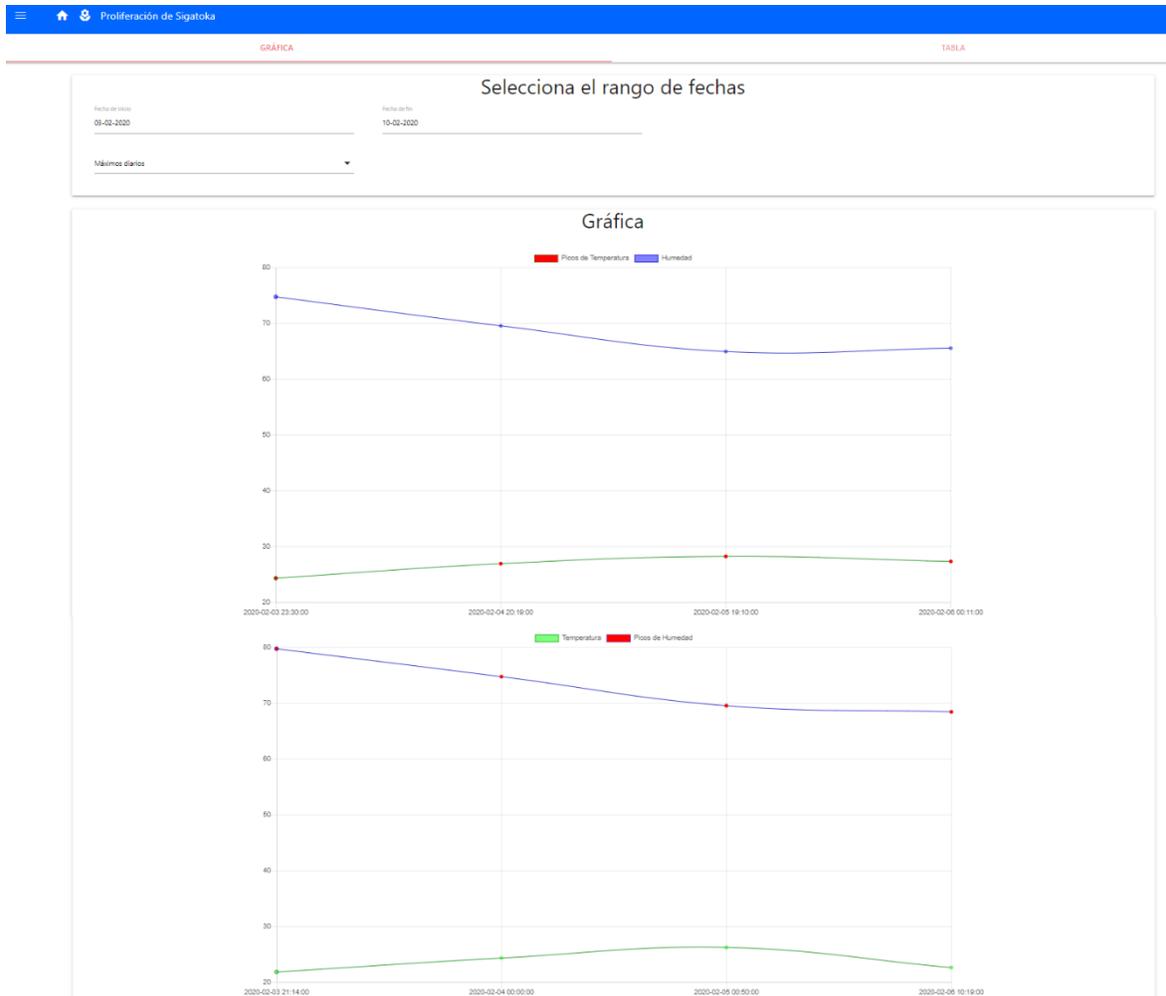


Figura 44: Gráficas de los máximos diarios

De igual modo, se puede visualizar en forma de tabla con todos los datos y los máximos diarios, Figura 45 y 46 respectivamente, donde el máximo diario es representado en la tabla de color rojo, además, con la observación al finar que explica los datos en rojo de la tabla.

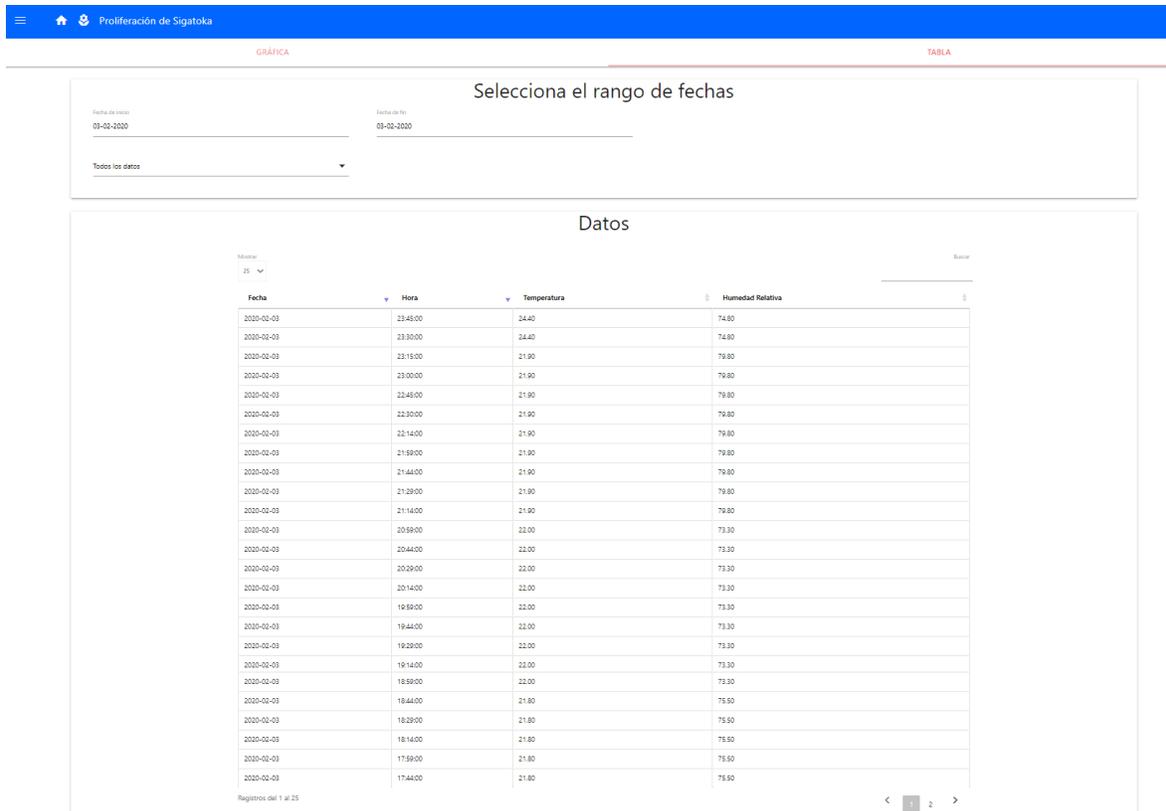


Figura 45: Histórico de todos los datos en forma de tabla

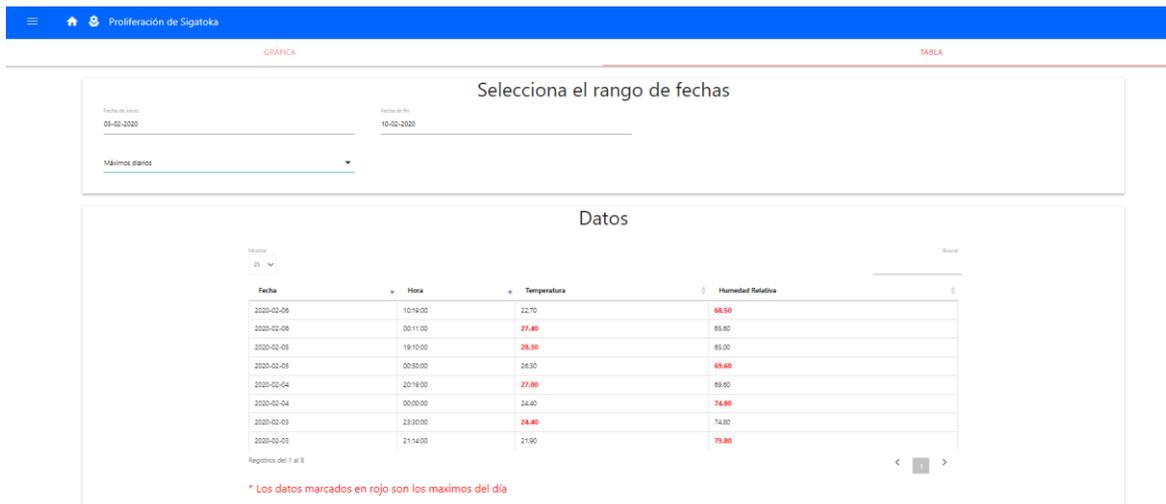


Figura 46: Histórico de los máximos diarios en forma de tabla

Cabe recalcar, que, en caso de seleccionar una fecha de inicio mayor a la fecha de fin, muestra una alerta para evitar la representación de datos erróneos (Figura 47).



Figura 47: Alerta para evitar datos erróneos

4.3.5 Manual de usuario

Para el funcionamiento del sistema se requiere de la instalación de múltiples programas, los cuales son: XAMPP y Python, así como algunas dependencias y librerías de Python, ver Anexo C.

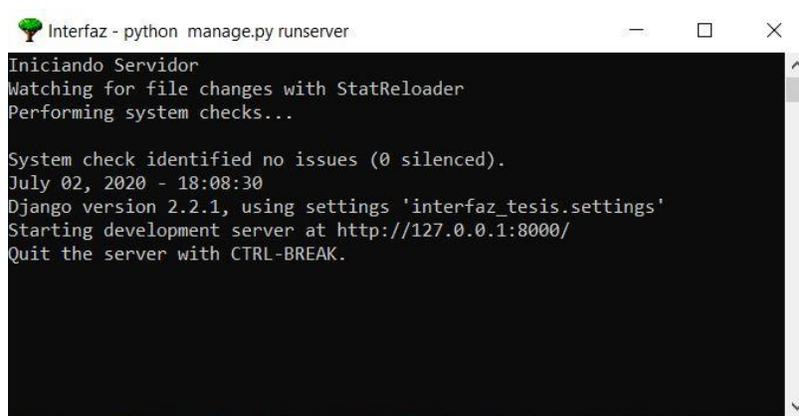
Una vez instalados todos los programas que requiere el sistema se debe de conectar el nodo sensor a la alimentación y montar ambos cajones a la base, con las perforaciones traseras, y colocarse en la superficie del cultivo.

Posteriormente se debe conectar el módulo de adquisición de datos a un puerto USB de la computadora donde se encuentra alojado el servidor local. Una vez conectado el nodo se debe abrir la aplicación dando clic sobre el icono mostrado en la Figura 48.



Figura 48: Icono de la aplicación

Después de varios segundos abrirá dos consolas de comandos, la primera sirve para abrir la interfaz gráfica, como se muestra en la Figura 49, y abre el navegador para visualizar la interfaz.



```
Interfaz - python manage.py runserver
Iniciando Servidor
Watching for file changes with StatReloader
Performing system checks...

System check identified no issues (0 silenced).
July 02, 2020 - 18:08:30
Django version 2.2.1, using settings 'interfaz_tesis.settings'
Starting development server at http://127.0.0.1:8000/
Quit the server with CTRL-BREAK.
```

Figura 49: Consola que permite mostrar la interfaz gráfica

Mientras que la segunda es la consola que permite la recepción, análisis y almacenamiento de los datos, mostrado en la Figura 50. Cabe recalcar que la aplicación detecta automáticamente el puerto USB en el que se conecta el módulo de adquisición de datos, por lo que no requiere de ninguna configuración extra. Se recomienda esperar unos minutos hasta que lleguen los datos del nodo sensor, puesto que están configurados para enviarlos cada 15 minutos.

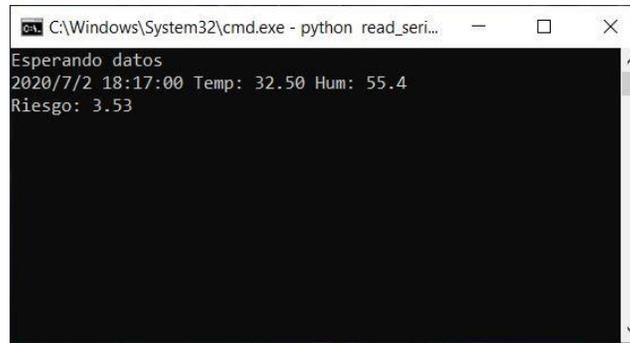


Figura 50: Consola que recibe los datos del nodo sensor

Si solamente se quiere abrir la ventana de recepción de datos, se debe abrir dando clic sobre el icono de recepción, mostrado en la Figura 51, que abre la consola para la recepción (Figura 50).



Figura 51: Icono de la aplicación de recepción de datos

En caso de existir algún error al conectar el nodo sensor o durante la recepción de los datos, se recomienda abrir solamente la aplicación de recepción de datos. Si el error no se soluciona, se recomienda cerrar todas las consolas, Figura 49 y 50, desconectar y conectar nuevamente el nodo sensor y abrir la aplicación de la interfaz nuevamente (Figura 48). Si no se recibe ningún dato después de varios minutos puede deberse a que la carga de la power bank se haya agotado, por lo que se recomienda desmontar la base, revisar la carga y cambiarla en caso de ser necesario.

4.4. Verificación del Sistema Difuso

Para simular el sistema difuso propuesto se utilizó MATLAB, consiguiendo la relación de las variables de entrada, temperatura ambiental y humedad relativa, para obtener la variable de salida, riesgo de proliferación. Como se muestra en la Figura 52, el mayor riesgo de proliferación respecto a la temperatura se concentra en la parte central, en cambio, para la variable humedad se concentra en la parte alta. Por otro lado, se puede observar que el menor riesgo de proliferación con respecto a la variable temperatura se ubica en los extremos inferior y superior, mientras que a menor humedad es menor el riesgo de proliferación.

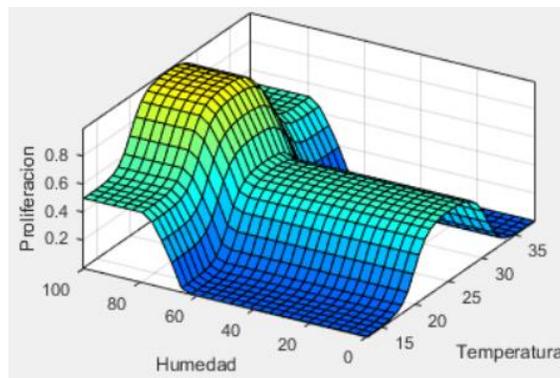


Figura 52: Simulación del sistema difuso

Para realizar pruebas del sistema difuso, se manejaron datos históricos del promedio mensual de la temperatura ambiental y la humedad relativa del municipio de Manzanillo, Colima, México, los cuales van desde Enero de 2015 hasta Junio de 2019, obtenidos de Meteored (2019); Tutiempo Network, S.L. (2019), obteniendo un conjunto total de 54 datos, permitiendo tener un conjunto de datos representativos de las condiciones climáticas que influyen en la aparición y propagación de la sigatoka negra. Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 16.

Temperatura	Humedad	Riesgo de Proliferación
27	54	0.484
26	60	0.492
26	57	0.492
27	66	0.536
29	63	0.365
30	64	0.185
31	59	0.047
31	60	0.047
30	74	0.572
30	78	0.685
30	76	0.639
29	73	0.717
27	66	0.536
27	72	0.799
26	68	0.640
26	73	0.843
28	77	0.940
29	74	0.752
30	72	0.500
30	74	0.572
29	75	0.786
30	75	0.606
28	75	0.876
27	75	0.905
26	72	0.806
25	73	0.843
26	76	0.945
25	76	0.945
25	80	0.992
29	80	0.865

30	74	0.572
30	80	0.685
29	83	0.865
30	79	0.685
30	78	0.685
27	74	0.871
26	75	0.913
27	76	0.938
26	76	0.945
25	76	0.945
29	76	0.813
29	77	0.850
31	74	0.435
30	77	0.670
30	77	0.670
29	80	0.865
27	80	0.984
27	74	0.871
27	73	0.836
25	75	0.913
26	74	0.879
25	75	0.913
26	77	0.977
29	74	0.752

Tabla 16: Resultados obtenidos del sistema difuso

De acuerdo con Jeng-Fung & Quang Hung (2014), existen múltiples métricas que permiten evaluar el desempeño de los modelos neuro-difusos, difusos y de redes neuronales, empleados para comparar los valores estimados con los modelos y los valores reales. Para la evaluación del sistema difuso propuesto se aplicó el coeficiente de determinación (r^2). Acorde con Humphrey (1995), un modelo predictivo se considera aceptable cuando $r^2 \geq$

0.5. El coeficiente de determinación ha sido usado en otros trabajos de investigación en los que implican las variables de temperatura ambiental y humedad relativa, aplicados a modelos neuro-difusos y/o difusos (López-Cruz & Hernández-Larragoiti, 2010). El coeficiente de determinación obtenido es:

$$R - cuadrada = 0.903$$

La Tabla 17 muestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos en el sistema difuso elaborado.

Fuente	Suma de cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2.4192	2	1.2096	238.06	0.0000
Residuo	0.25913	51	0.00508098		
Total (Corr.)	2.67833	53			

Tabla 17: Análisis de varianza del sistema difuso

Debido a que el valor-P de la tabla de análisis de varianza, mostrado en la Tabla 17, para este sistema difuso es menor a 0.05, existe una relación estadísticamente importante entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0.781639	0.181356	4.30996	0.0001
Temperatura	-0.0722901	0.00513534	-14.077	0.0000
Humedad	0.0267834	0.00156833	17.0777	0.0000

Tabla 18: Análisis de las variables de entrada del sistema difuso

Como se observa en la Tabla 18, se puede determinar si es posible simplificar el modelo, aprecie que el valor-P en ambas variables independientes es 0.0000. Ya que el valor-P es menor que 0.05, ambas variables son estadísticamente significativas con un nivel de

confianza del 95.0%. Consecuentemente, no es conveniente descartar ninguna variable del sistema difuso.

La Tabla 19 muestra la prueba de normalidad ejecutada a los valores obtenidos del sistema difuso.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.876699	0.000008197

Tabla 19: Prueba de normalidad de los valores obtenidos

Puesto que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas (Tabla 19) es menor a 0.05, se puede refutar la idea de que los valores obtenidos por el sistema difuso propuesto proceden de una distribución normal con 95% de confianza. La Figura 53 muestra el gráfico de probabilidad normal para el conjunto de datos.

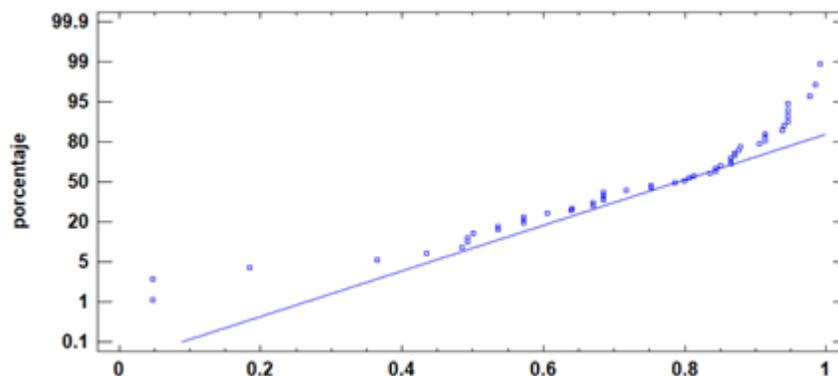


Figura 53: Gráfico de probabilidad normal de los datos obtenidos

CAPITULO V. RESULTADOS OBTENIDOS

En la finalización del proyecto se instaló el nodo sensor en el cultivo de plátano para la obtención de datos, como se puede observar en la Figura 54, además, la alimentación se colocó también dentro de un gabinete para exterior o caja nema, permitiendo que tenga resistencia al polvo y agua, ver Figura 55. Además, se instaló los programas y dependencias necesarias en el equipo de cómputo que va a alojar el servidor y la interfaz, permitiendo la transferencia de datos entre el nodo sensor y el módulo de adquisición de datos dentro del cultivo.



Figura 54: Nodo sensor en la base



Figura 55: Nodo sensor y alimentación

5.1. Comparación del sistema difuso

El sistema difuso propuesto en este documento (Takagi-Sugeno) se comparó con el sistema difuso propuesto por Cárdenas-Valdovinos et al. (2017), además se realizaron las mismas pruebas de la sección 4.4 para este último, ver Anexo D. La Tabla 20 muestra el valor de R-cuadrada para cada sistema difuso.

Sistema Difuso	R-cuadrada
Takagi-Sugeno	0.903
Cárdenas-Valdovinos et al. (2017)	0.523

Tabla 20: Valores de R-cuadrada

Para seleccionar la prueba se obtuvo la diferencia de los datos obtenidos con ambos sistemas difusos, con un rango desde -0.453 hasta 0.344. Posteriormente se realizó la prueba de probabilidad normal al conjunto obtenido, mostrado en la Tabla 21.

Prueba	Estadístico	Valor-P
--------	-------------	---------

Estadístico	W de	0.869912	0.00000375225
Shapiro-Wilk			

Tabla 21: Prueba de normalidad de la diferencia

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que la diferencia entre los datos obtenidos con el sistema difuso Takagi-Sugeno y el sistema difuso Mamdani proviene de una distribución normal con 95% de confianza. Por tal motivo, se aplicó la prueba de Wilcoxon (también conocida como Mann-Whitney), la cual se construye combinando las dos muestras, ordenando los datos de menor a mayor, y comparando los rankeos promedio de las dos muestras en los datos combinados, dando como resultado:

$$\text{valor} - P = 0.0000212048$$

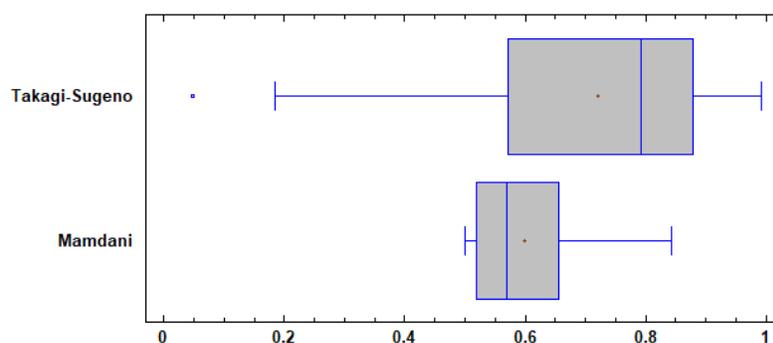


Figura 56: Gráfico de caja y bigotes de los datos obtenidos con Takagi-Sugeno y Mamdani

Debido a que el valor-P es menor que 0.05 y, como se puede observar en la Figura 56, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%.

CAPITULO VI. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

En este proyecto de investigación se implementó un sistema integral para obtener y analizar las variables climáticas de temperatura y humedad relativa en el cultivo de plátano, determinando el riesgo de proliferación de sigatoka negra, almacenando los datos y mostrándolos en una interfaz gráfica. El sistema propuesto es muy útil no solo para conocer los valores de las variables temperatura y humedad relativa del cultivo en tiempo cuasi-real, sino que además, cuenta con el análisis de los datos obtenidos por medio de lógica difusa para conocer el riesgo de proliferación de sigatoka negra.

Como se mostró en el presente trabajo, el sistema es una herramienta de bajo costo y resistente a la intemperie, permitiendo obtener los datos directamente del cultivo de plátano y trabajar de manera independiente por varios días, a través del cual los productores de plátano pueden visualizar el riesgo de proliferación de la sigatoka negra para tomar acciones frente a la enfermedad, además, pueden acceder a información histórica.

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación comprueban que la utilización de un sistema difuso tipo Takagi-Sugeno resulta más apropiado para la detección del riesgo de proliferación de la sigatoka negra que el sistema difuso propuesto en el trabajo de Cárdenas-Valdovinos et al. (2017), obteniendo un mayor coeficiente de determinación, una mayor relación entre las variables, además, ambos términos, temperatura ambiental y humedad relativa, son estadísticamente significativos a diferencia del sistema difuso de Cárdenas Valdovinos.

Como trabajo a futuro se propone la integración de más nodos sensores distribuidos en varios puntos del cultivo; gracias a la utilización del módulo Xbee, admite la creación de una red de sensores, lo que permitirá abarcar una mayor superficie del cultivo de plátano. Otro

trabajo a futuro es añadir más sensores al nodo sensor para obtener una mayor cantidad de variables climáticas y modificar el sistema difuso para la detección de un rango más amplio de patógenos en cultivos de plátano e incluso en distintos cultivos que se producen en el estado, como limón, papaya, piña, entre otros.

Un trabajo a futuro más es la utilización de redes neuronales o modelos probabilísticos, técnicas de inteligencia artificial, o algunos otros métodos estadísticos, para la detección de la sigatoka negra, posteriormente comparar los resultados para verificar cual método de detección es más efectivo. Por último, se propone utilizar los datos históricos almacenados en la base de datos, posteriormente aplicarles técnicas de Data Mining, obteniendo información y patrones que permiten predecir las horas y los días en los que el riesgo de proliferación de la sigatoka negra es mayor, lo que puede ayudar a combatir la enfermedad.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Albornoz , M. (2014). Diseño de Interfaz Gráfica de Usuario. *WICC 2014 XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*.
- Alper Akkaş , M., & Sokullu, R. (2017). An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes. *Procedia Computer Science*, 603-608.
- Álvarez, E., Pantoja, A., Gañán, L & Ceballos, G (2013). *La Sigatoka negra en plátano y banano. Guía para el reconocimiento y manejo de la enfermedad, aplicado a la agricultura familiar*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/019/as089s/as089s.pdf>
- Ambler, S. (2014). *The Agile Unified Process (AUP)*. Obtenido de <http://www.ambysoft.com/unifiedprocess/agileUP.html>
- Ayala, A., Colina, M., Molina, J., Vargas, J., & Rincón, D. (2014). EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD ANTIFÚNGICA DEL QUITOSANO CONTRA EL HONGO *Mycosphaerella Fijiensis* Morelet QUE PRODUCE LA Sigatoka negra QUE ATACA EL PLÁTANO. *Revista Iberoamericana de Polímeros* .
- Cárdenas-Valdovinos, E., García-Díaz, N., García-Virgen J. & Flores-Gallegos, E. (2017) Modelo difuso para predecir la proliferación de plaga “Sigatoka Negra” en el cultivo. *Revista de Ingeniería Eléctrica*, 1(1), 16- 21.
- Clúster de Tecnologías de la Información de Colima. (2019). *Control de Sigatoka Negra en Cultivos de Banano 2a Convocatoria*. Obtenido de <https://clustertic.org/control-de-sigatoka-negra-en-cultivos-de-banano-2a-convocatoria/>
- Copeland, B. (2018). *Artificial intelligence*. Obtenido de <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence>

- CropLife Latin America. (2018). *Sigatoka Negra*. (Listado de Plagas) Recuperado el 19 de Mayo de 2019, de <https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/sigatoka-negra>
- Cuevas Gutiérrez, J. d. (Noviembre de 2015). Sistema de Adquisición y Análisis de Información para el Diagnóstico de Sigatoka Negra. Colima, Colima, México.
- Dagar, R., Som, S., & Kumar Khatri, S. (2018). Smart Farming – IoT in Agriculture. 2018 *International Conference on Inventive Research in Computing Applications*.
- Django Software Foundation. (2019). *Meet Django*. Obtenido de <https://www.djangoproject.com>
- e-radionica. (2019). *DHT22 TEMPERATURE AND HUMIDITY SENSOR*. Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwi7w6XokNPiAhXBo54KHWKDDEoQjhx6BAgBEAM&url=https%3A%2F%2Fe-radionica.com%2Fen%2Fdht22-temperature-and-humidity-sensor.html&psig=AOvVaw3PqGS1ILy-jlB4GgrCOPpN&ust=1559851222190143>
- Fernández Montoro, A. (2012). *Python 3 al descubierto*. Madrid: Alfaomega.
- Flores Gallegos, E., Farias Mendoza, N., Silos-Espino, H., García-Díaz, N. & Vargas-González C.O. (2017). Modelado de un Sistema Difuso de Temperatura y Humedad para Macro Túneles de Plantas Ornamentales. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 5(29).
- García Mata, R., González Machorro, M., García Sánchez, R., Mora Flores, J., González Estrada, A., & Martínez Damian, M. (2013). El mercado del plátano (*Musa paradisiaca*) en México, 1971-2017. *Agrociencia*, 47(4).
- Humphrey, W. S. (1995). *A Discipline for Software Engineering*. Michigan: Addison-Wesley Professional.

- Jeng-Fung, C. & Quang Hung, D. (2014). A cooperative Cuckoo Search - hierarchical adaptive neuro-fuzzy inference system approach for predicting student academic performance. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2551-2561.
- Liu, T. (2016). *Digital relative humidity & temperature sensor AM2302/DHT22*. Obtenido de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>
- López-Cruz, I. L., & Hernández-Larragoiti, L. (2010). Modelos neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México. *Agrociencia*, 791-805.
- López-Martín, C., Yáñez-Márquez, C., & Gutiérrez-Tornés, A. (2008). Predictive accuracy comparison of fuzzy models for software development effort of small programs. *Journal of Systems and Software*, 949-960.
- M. Taghoy, D., & Flores Villaverde, J. (2018). A Fuzzy Logic Approach for the Determination of Cavendish Banana Shelf Life. *TENCON 2018*.
- Manzo Sánchez, G., Orozco Santos, M., Martínez Bolaños, L., Garrido Ramírez, E., & Canto Canche, B. (2014). Enfermedades de importancia cuarentenaria y económica del cultivo de banano. *Revista mexicana de fitopatología*, 32(2).
- Martínez Bolaños, L., Orozco Santos, M., García Mariscal, K., & Manzo Sánchez, G. (2013). *La Sigatoka Negra y su manejo integrado en banano*. Colima: INIFAP.
- MCI electronics. (2018). *¿QUE ES ARDUINO?* Obtenido de Arduino.cl: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Moore, H. (2014, Febrero 8). *MATLAB® para ingenieros*. Salt Lake: Pearson.
- Nagaraju, B., & Shankar, P. (2017). Precision Agriculture for Banana Using Wireless Sensor Network. *Conference: 2017 International Conference on Computing, Communication, Control and Automation*. India.

- Ochoa Duarte, A. (2017). Gestionando datos heterogéneos provenientes de sensores para medir la calidad del aire de Bogotá. Bogotá, Colombia.
- ORACLE. (2019). *La base de datos de código abierto más popular del mundo*. Obtenido de <https://www.oracle.com/mx/mysql/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2018). *Situación del mercado del banano. Resultados preliminares relativos a 2017*. Recuperado el 29 de Noviembre de 2018, de http://www.fao.org/fileadmin/templates/est/COMM_MARKETS_MONITORING/Bananas/Documents/Spanish_December_2017_update.pdf
- Orozco-Santos, M., Orozco-Romero, J., Pérez-Zamora, O., Manzo-Sánchez, G., Farías-Larios, J., & da Silva Moraes, W. (2008). Prácticas culturales para el manejo de la Sigatoka negra en bananos y plátanos. *Tropical Plant Pathology*, 189-196.
- Pressman, R. (2010). *Ingeniería de Software. Un enfoque práctico*. México: McGraw-Hill.
- scikit-fuzzy development team. (n.d.). *SciKit-Fuzzy*. Obtenido de <https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/overview.html>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). *Intención de cosecha 2018*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2018, de http://infosiap.siap.gob.mx/opt/agricultura/intencion/Intencion_cosechaPerenne_cultivo2018.pdf
- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación . (2017, Septiembre 5). *Oro no es, plata no es*. (SIAP) Recuperado el 14 de Mayo de 2019, de <http://siaprendes.siap.gob.mx/contenidos/2/04-platano/contexto-1.html>
- Singh, M., Gaurav, Soni , S., & Kumar, V. (2016). Clustering using fuzzy logic in wireless sensor networks. *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development* .

- Subert-Semanat, A. (2018). Poster: Wireless Sensor Network to Predict Black Sigatoka in Banana Cultivations. *Smart Industry & Smart Education*, 159-164.
- The MathWorks, Inc. (2019). *What Is Sugeno-Type Fuzzy Inference?* Obtenido de <https://la.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-sugeno-type-fuzzy-inference.html>
- Vázquez Castrejón, R., Romero Cadena, A., & Figueroa Viera, J. (2005, Febrero). *Paquete tecnológico para el cultivo de plátano*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2018, de <http://www.campocolima.gob.mx/paginaOEIDRUS/paquete%20tecnologico%20del%20platano.pdf>
- Vera Romero, C., Barbosa Jaimes, J., & Pabón González, D. (2017). La Tecnología ZigBee estudio de las características de la capa física. *Scientia Et Technica*, 238-245.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 338-353.
- Zadeh, L. (1996). *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems*. New York: World Scientific.

APENDICES Y ANEXOS

Anexo A: Programa del nodo sensor

```

#include <LowPower.h>
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
#include <RTClib.h>
#include <DHT.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <LIBRERIA_XBEE_S3B.h>
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22
Transmit_0x10 saludo;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

File myFile;
RTC_DS3231 rtc;
int DST;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();

  if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    while (1);
  }
  // Reloj Tiempo Real
  if (!rtc.begin()) {
    Serial.println(F("Couldn't find RTC"));
    while (1);
  }
  if (rtc.lostPower()) {
    rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  }
  rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
  DST = EEPROM.get(0, DST);
}

void saveFile(DateTime date, float h, float t){
  myFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);//abrimos el archivo
  if (myFile) {
    myFile.print(date.year(), DEC);
    myFile.print('/');
    myFile.print(date.month(), DEC);
    myFile.print('/');
    myFile.print(date.day(), DEC);
    myFile.print(" ");
    myFile.print(date.hour(), DEC);
    myFile.print(':');
    myFile.print(date.minute(), DEC);
    myFile.print(":00 ");
    myFile.print("Tem: ");
    myFile.print(t);
    myFile.print(" Hum: ");
    myFile.println(h);
    myFile.close(); //cerramos el archivo
  }
  delay(100);
}

```

```

void readFile(){
  String c;
  myFile = SD.open("data.txt");
  if (myFile) {
    while (myFile.available()) {
      c=myFile.readStringUntil('\n');
      c.remove(c.length()-1);
      saludo.Framee(c);
      LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF);
    }
    myFile.close(); //cerramos el archivo
  } else {
    //Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
  SD.remove("data.txt");
}

void loop() {
  DateTime now = rtc.now();
  if (now.dayOfTheWeek() == 0 && now.month() == 4 && now.day() >= 1 && now.day() <= 7 && now.hour() == 2 && DST == 0){
    rtc.adjust(DateTime(now.year(), now.month(), now.day(), now.hour()+1, now.minute(), now.second()));
    DST = 1;
    EEPROM.put(0, DST);
  }
  else if(now.dayOfTheWeek() == 0 && now.month() == 10 && now.day() >= 25 && now.day() <= 31 && now.hour() == 2 && DST == 1){
    rtc.adjust(DateTime(now.year(), now.month(), now.day(), now.hour()-1, now.minute(), now.second()));
    DST = 0;
    EEPROM.put(0, DST);
  }
  float h = dht.readHumidity(); //Leemos la Humedad
  float t = dht.readTemperature(); //Leemos la temperatura en grados Celsius
  String respuesta = "";

  DateTime date = rtc.now();
  String datos="";
  datos = String(date.year(), DEC) + "/" + String(date.month()) + "/" + String(date.day()) + " " + String(date.hour()) + ":"
  saludo.Framee(datos);
  delay(1000);
  LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF);
  LowPower.powerDown(SLEEP_2S, ADC_OFF, BOD_OFF);
  if (Serial.available() > 0) {
    respuesta = Serial.readString();
    String recorte = respuesta.substring(26,33);
    if(recorte == "saludos"){
      readFile();
      Serial.println("1");
    }
    else{
      saveFile(date,h,t);
      Serial.println("0");
    }
  }
  delay(1000);
  //Cada 15 minutos
  for(int i = 1; i<=201;i++){
    LowPower.powerDown(SLEEP_4S, ADC_OFF, BOD_OFF);
  }
}

```

Anexo B: Rutina para recibir los datos del módulo de adquisición de datos

```

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 getSigatoka (valtemperatura, valhumedad):
    humedad = ctrl.Antecedent(np.arange (0, 100, 1), 'humedad')
    temp = ctrl.Antecedent(np.arange (10, 40, 1), 'temperatura')
    prol = ctrl.Consequent(np.arange (0, 10, 1), 'proliferacion')

    humedad['poca'] = fuzz.trapmf(humedad.universe, [-15, 0, 20, 35])
    humedad['media'] = fuzz.trapmf(humedad.universe, [22.5, 42.5, 57.5, 77.5])
    humedad['mucha'] = fuzz.trapmf(humedad.universe, [65, 80, 100, 115])

    temp['baja'] = fuzz.gaussmf(temp.universe, 10, 4)
    temp['media'] = fuzz.gaussmf(temp.universe, 25.5, 3)
    temp['alta'] = fuzz.gaussmf(temp.universe, 41, 4)

    rule1 = ctrl.Rule(temp['baja'] & humedad['poca'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(0))])
    rule2 = ctrl.Rule(temp['baja'] & humedad['media'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(0))])
    rule3 = ctrl.Rule(temp['baja'] & humedad['mucha'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(5))])
    rule4 = ctrl.Rule(temp['media'] & humedad['poca'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(5))])
    rule5 = ctrl.Rule(temp['media'] & humedad['media'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(5))])
    rule6 = ctrl.Rule(temp['media'] & humedad['mucha'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(10))])
    rule7 = ctrl.Rule(temp['alta'] & humedad['poca'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(0))])
    rule8 = ctrl.Rule(temp['alta'] & humedad['media'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(
    coefficient=(0))])
    rule9 = ctrl.Rule(temp['alta'] & humedad['mucha'], prol[fuzz.fuzzymath.polynomial(

```

```

coefficient=(5))]
prol_control = ctrl.ControlSystem([rule1, rule2, rule3, rule4, rule5, rule6, rule7, rule8,
rule9])
riesgo = ctrl.ControlSystemSimulation(prol_control)
riesgo.input['humedad'] = valhumedad
riesgo.input['temperatura'] = valtemperatura
riesgo.compute()
sigatoka = riesgo.output['proliferacion']
return sigatoka

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("COM8", 9600, timeout=1)
time.sleep(2)

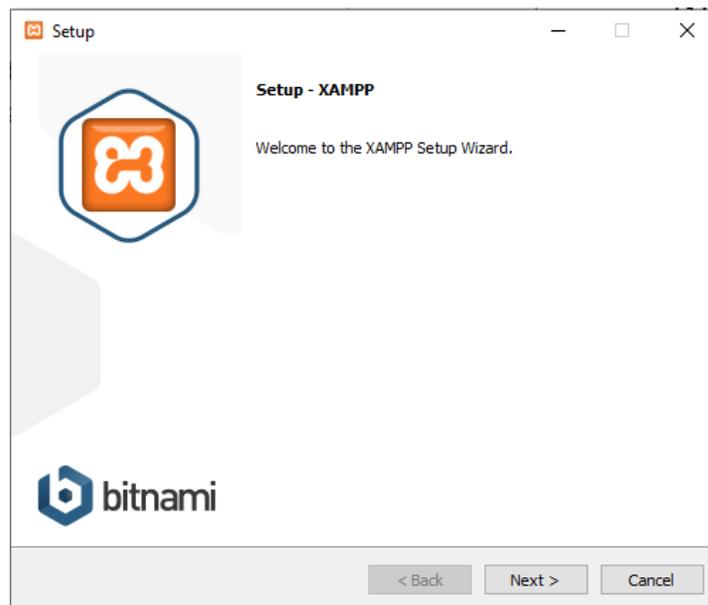
while 1:
    try:
        size = ser.inWaiting()
        localtime = time.asctime(time.localtime(time.time()))
        fecha = time.strftime("%Y/%m/%d", time.localtime())
        hora = time.strftime("%H:%M:00", time.localtime())
        if size:
            sql_select_Query = ""
            data = ser.read(size)
            if data[11:12]==b'\x60':
                datos = data[15:len(data)-2].decode("utf-8").split()
                while len(datos) < 6:
                    data2 = ser.read(size)
                    data = data + data2
                    datos = data[15:len(data)-2].decode("utf-8").split()
                if len(datos) == 6 and datos[3]!="nan" and datos[3]!="NAN" and datos[5]!="na"
                and datos[5]!="NA":
                    sigatoka=getSigatoka(float(datos[3]),float(datos[5]))
                    sigatoka = '%.2f' % sigatoka
                    print(datos[0]+" "+datos[1]+" Temp: "+datos[3]+" Hum: "+datos[5])
                    print("Riesgo: "+sigatoka)
                    sql_select_Query = "INSERT into datos_sigatoka_historico(fecha,hora,
temperatura,humedad_relativa,riesgo) VALUES("+datos[0]+",""+datos[1]+",""+
+datos[3]+",""+datos[5]+",""+sigatoka+"")"
                    input_array = [0x7E, 0x00, 0x15, 0x10, 0x01, 0x00, 0x13, 0xA2, 0x00, 0x41,
0x02, 0x20, 0x60, 0xFF, 0xFE, 0x00, 0x00, 0x73, 0x61, 0x6C, 0x75, 0x64,

```

```
0x6F, 0x73, 0x7E]
write_bytes = struct.pack('<' + 'B' * len(input_array), *input_array)
ser.write(write_bytes)
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)
```

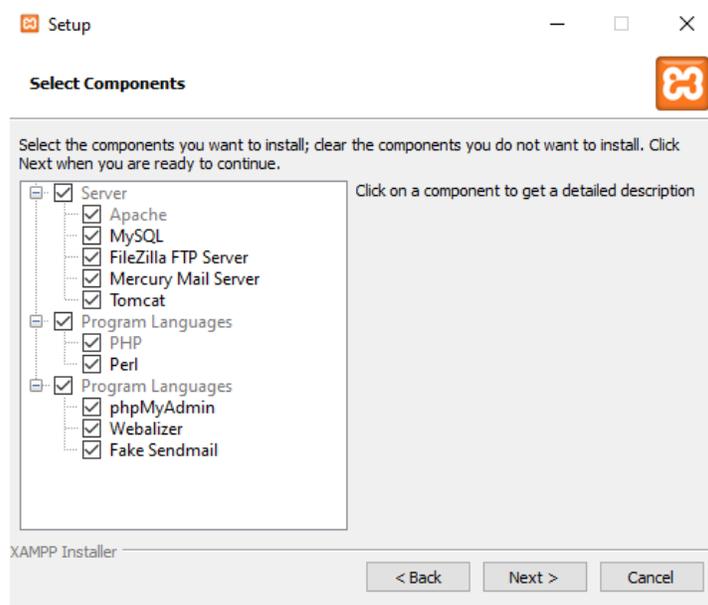
Anexo C: Instalación de Xampp y Python

Para descargar Xampp debe acceder al siguiente enlace: <https://www.apachefriends.org/es/download.html>. Una vez descargado el instalador, se debe abrir dándole clic dos veces sobre el icono y esperar a que abra. Cuando abra, debe dar clic en Next para pasar a la siguiente sección, como se ve en la Figura 1.



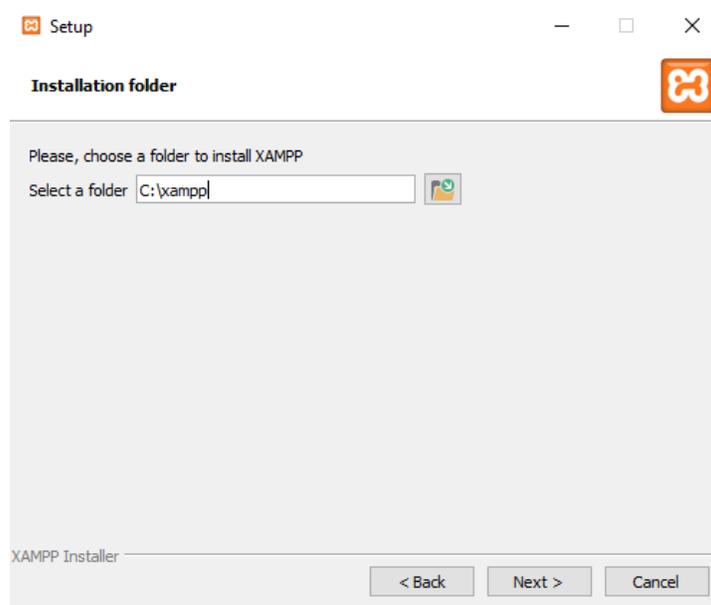
Anexo Figura 1: Instalador del Xampp

Posteriormente, te pide seleccionar los componentes a instalar, en este caso, se instalaran todos, así que se debe dar clic en Next para pasar a la siguiente sección, como se observa en la Figura 2.



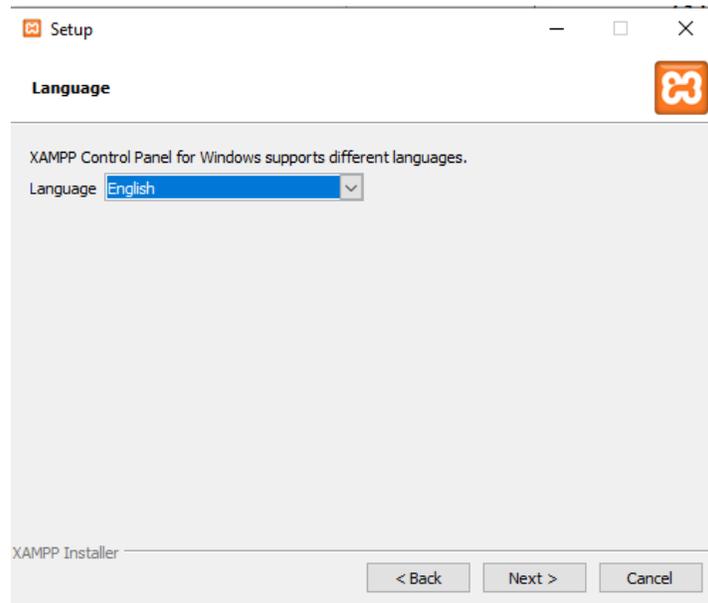
Anexo Figura 2: Seleccionador de componentes

Después se debe seleccionar la carpeta de instalación, una vez seleccionada, se debe dar clic en Next, como se observa en la Figura 3.



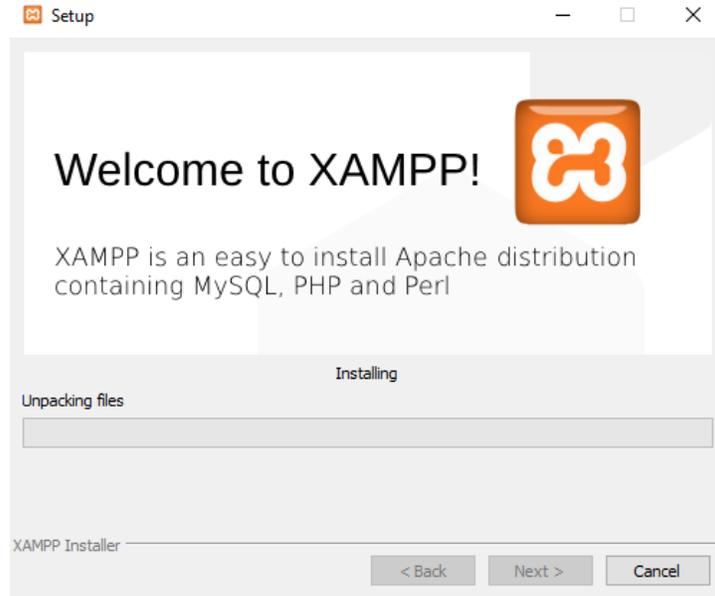
Anexo Figura 3: Ventana para seleccionar la carpeta de instalación

Posteriormente debe seleccionar el idioma, en este caso inglés, puesto que no tiene la opción en español, y dar clic en Next, como se puede observar en la Figura 4.



Anexo Figura 4: Ventana para seleccionar el idioma

Una vez seleccionado el idioma, debe dar clic en siguiente hasta que comience la instalación, Figura 5.



Anexo Figura 5: Instalación del XAMPP

Finalmente se debe dar clic en Finish para que abra el panel de control de XAMPP, como se puede visualizar en la Figura 6.



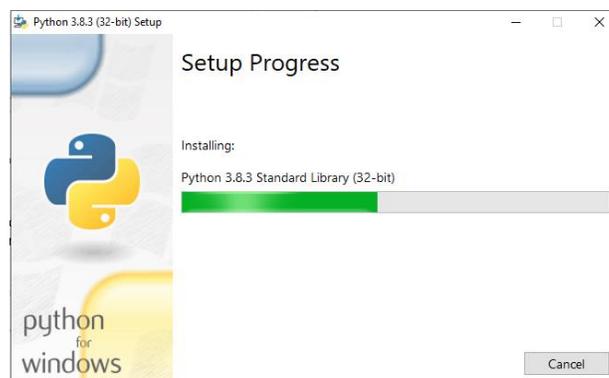
Anexo Figura 6: Ventana del fin de la instalación de XAMPP

Para descargar Python debe acceder al siguiente enlace: <https://www.python.org/downloads/>. Una vez descargado el instalador, se debe abrir para comenzar con la instalación, cuando abra se recomienda seleccionar la opción se añadir Python a PATH, posteriormente dar clic en Install Now, Figura 7.



Anexo Figura 7: Ventana del fin de la instalación de XAMPP

Posteriormente comienza a instalarse, como se muestra en la Figura 8.



Anexo Figura 8: Instalación de Python

Una vez finalizada la instalación, solo debe dar clic en Close para cerrar la ventana, Figura 9.



Anexo Figura 9: Ventana del fin de la instalación de Python

Una vez instalado Python, se requiere instalar todas las dependencias, para ello se necesita la herramienta pip, instalada junto con Python. Posteriormente se procede a instalar todas las dependencias necesarias con los comandos de la Tabla 1.

Dependencia	Comando	Descripción
Pyserial	pip install pyserial	Librería para leer el puerto serial
Django	pip install Django	Framework utilizado para la interfaz
MySQL Connector	pip install mysql – connector – python	Librería para utilizar MySQL en Python
Scikit	pip install – U scikit – fuzzy	Librería para utilizar lógica difusa en Python

Anexo Tabla 1: Comandos de las dependencias

Anexo D: Verificación del sistema difuso propuesto por Cárdenas-Valdovinos et al. (2017)

Para la verificación del sistema difuso propuesto por Cárdenas-Valdovinos et al. (2017), que se llamara Mamdani para fines prácticos, se utilizaron los mismos datos de la sección 4.4, siendo 54 en total. El coeficiente de determinación obtenido es:

$$R - cuadrada = 0.523$$

La Tabla 2 muestra el análisis de varianza de los resultados obtenidos en el sistema difuso Mamdani.

Fuente	Suma de cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0.300124	2	0.150062	28.04	0.0000
Residuo	0.272899	51	0.00535096		
Total (Corr.)	0.573023	53			

Anexo Tabla 2: Análisis de varianza del sistema difuso Mamdani

Ya que el valor-P de la tabla de análisis de varianza (Tabla 2) para el sistema difuso Mamdani es menor a 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

Parámetro	Error		Estadístico	
	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	-0.439263	0.186112	-2.36021	0.0221
Temperatura	0.00609136	0.00527001	1.15585	0.2531
Humedad	0.0118495	0.00160946	7.36241	0.0000

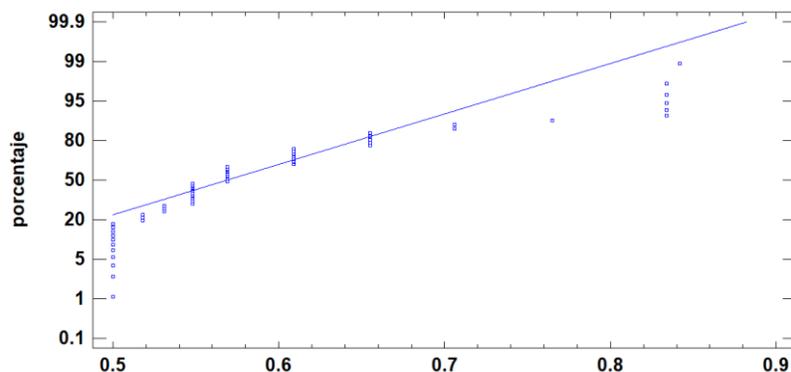
Anexo Tabla 3: Análisis de las variables de entrada del sistema difuso

Con base en el análisis de las variables de entrada (Tabla 3), podemos determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.2531, que corresponde a Temperatura. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% o mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Temperatura del modelo. La Tabla 4 muestra la prueba de normalidad realizada a los valores obtenidos del sistema difuso.

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.797256	0.797256

Anexo Tabla 4: Prueba de normalidad de los valores obtenidos

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas, mostrado en la Tabla 4, es menor a 0.05, se puede rechazar la idea de que las estimaciones hechas en el sistema difuso Mamdani provienen de una distribución normal con 95% de confianza. La Figura 10 muestra la gráfica de probabilidad normal para el conjunto de datos.



Anexo Figura 10: Gráfico de probabilidad normal de los datos obtenidos