



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ingeniería Electrónica,
opción Instrumentación Electrónica

Tesis para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería Electrónica

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA EMPOTRADO
PORTÁTIL PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES
AMBIENTALES EN TIEMPO REAL Y ALMACENADAS
EN LA NUBE PARA ESTUDIOS DE CIUDADES
INTELIGENTES”**

Presenta:

JOSÉ JAIR MEDINA GARCÍA*

Director:

M. C. NICOLÁS QUIROZ HERNÁNDEZ

Co-directoras:

M. C. SELENE EDITH MAYA RUEDA

DRA. AIDEÉ MONTIEL MARTÍNEZ

Agradecimientos

A la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por brindarme la oportunidad de estudiar la Maestría en Ingeniería Electrónica, opción Instrumentación Electrónica.

A CONACyT por el apoyo otorgado en el desarrollo del proyecto “Sistema Empotrado para la Medición de Variables Ambientales en Tiempo Real con Almacenamiento en la Nube” durante mis estudios de maestría.

Al M. C. Nicolás Quiroz Hernández, a la M. C. Selene Edith Maya Rueda y a la Dra. Aideé Montiel Martínez, por su tiempo, comprensión y confianza que me brindaron durante la maestría.

A mis sinodales, la M. C. Ana María Rodríguez Domínguez, el M. C. Ricardo Álvarez González y la Dra. Josefina Castañeda Camacho, por sus aportaciones, consejos y comentarios.

A los profesores y personal administrativo que forman parte de la Maestría en Ingeniería Electrónica, especialmente a la M. C. Ana María Rodríguez Domínguez, por el apoyo brindado durante la maestría.

A la Dra. Mariana Natalia Ibarra Bonilla y la Mtra. Rosalba Isabel Ojeda Pérez, profesoras de mi alma máter, por el apoyo brindado desde mi carrera universitaria hasta ahora.

Por último, agradezco a mi madre Mercedes, a mi abuelita Zenaida, a mi hermana Yeslie, a mi padre Antonio, a mi suegra Luz María, a mis cuñados Monserrat, Óscar y Héctor y sobre todo a mi esposa Adriana, por el gran apoyo que me han brindado durante estos años

Nunca olvides que basta una persona o una idea para cambiar tu vida para siempre, ya sea para bien o para mal.

J. Brown

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Organización del documento	5
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. General.....	6
1.2.2. Específicos	6
1.3. Justificación	7
1.4. Estado del arte.....	9
1.5. Descripción	10
Capítulo 2. Marco teórico	13
2.1. Variables para estudios de la calidad del aire, agua y suelo.....	14
2.1.1. Calidad del aire.....	14
2.1.2. Calidad del agua	22
2.1.3. Calidad del suelo	27
2.2. Sistemas empotrados para la medición de variables ambientales.....	29
2.3. Tecnologías para comunicación a Internet	31
2.4. Herramientas de monitoreo <i>dashboard</i>	36
2.5. Sistemas de posicionamiento global (GPS).....	38
2.6. Tecnologías actuales de las baterías eléctricas	39
Capítulo 3. Desarrollo e implementación del sistema.....	41
3.1. Selección de hardware.....	42
3.1.1. Sensores de medición.....	42
3.1.2. Sistemas de comunicación	46
3.1.3. Microcontrolador	48

Índice

3.2. Selección de software	50
3.3. Integración del prototipo	51
3.3.1. Etapa eléctrica	51
3.3.2. Etapa de software.....	60
3.3.3. Placa de circuito impreso	73
3.4. Diseño de la página Web de monitoreo.....	77
3.5. Aplicación para dispositivos Android	78
Capítulo 4. Pruebas y resultados	85
4.1. Validación de datos	86
4.2. Exactitud del sistema GPS.....	95
Conclusiones y trabajo futuro	97
Referencias.....	101
Anexos	111
Anexo A. Programa del módulo ESP-12F.....	111
Anexo B. Datos recabados de CO, partículas PM10 y PM2.5.....	116
Anexo C. Datos recabados de temperatura del aire.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de sensores de ozono.....	15
Tabla 2. Comparativa de sensores de dióxido de nitrógeno.....	16
Tabla 3. Comparativa de sensores de bióxido de azufre.....	17
Tabla 4. Comparativa de sensores de monóxido de carbono.....	18
Tabla 5. Comparativa de sensores de bióxido de carbono.....	19
Tabla 6. Comparativa de sensores de humedad relativa.....	20
Tabla 7. Datos técnicos de sensor BMP280.....	21
Tabla 8. Comparativa de sensores de temperatura.....	21
Tabla 9. Comparativa entre sensores de temperatura en agua.....	23
Tabla 10. Comparativa entre sensores utilizados para medir pH.....	23
Tabla 11. Comparativa de arquitecturas de microcontroladores de 32 bits.....	31
Tabla 12. Comparativa entre dispositivos 2G, 3G y 4G.....	33
Tabla 13. Comparativa entre dispositivos utilizados para comunicación Sigfox....	34
Tabla 14. Comparativa dispositivos para comunicación LoRaWAN.....	35
Tabla 15. Comparativa entre módulos GPS.....	38
Tabla 16. Tabla de verdad del puerto UART 1.....	66
Tabla 17. Tabla de verdad del puerto UART 6.....	66
Tabla 18. Datos de la primera prueba.....	88
Tabla 19. Mensajes asociados al color de la calidad del aire [80].	90
Tabla 20. Puntos de corte para el cálculo del ICA [80].....	91
Tabla 21. Datos obtenidos por el sistema del 2 de noviembre del 2022.....	91
Tabla 22. Mediciones de temperatura del día 2 de noviembre del 2022.....	93
Tabla 23. Prueba de geolocalización del sistema de monitoreo ambiental.....	95
Tabla 24. Datos del 1 de noviembre del 2022.....	116
Tabla 25. Datos del 3 de noviembre del 2022.....	118
Tabla 26. Datos del 4 de noviembre del 2022.....	120
Tabla 27. Datos del 5 de noviembre del 2022.....	122
Tabla 28. Datos del 6 de noviembre del 2022.....	124

Tabla 29. Datos del 7 de noviembre del 2022.....	126
Tabla 30. Datos del 8 de noviembre del 2022.....	128
Tabla 31. Mediciones de temperatura del día 1 de noviembre del 2022.	129
Tabla 32. Mediciones de temperatura del día 3 de noviembre del 2022.	131
Tabla 33. Mediciones de temperatura del día 4 de noviembre del 2022.	133
Tabla 34. Mediciones de temperatura del día 5 de noviembre del 2022.	135
Tabla 35. Mediciones de temperatura del día 6 de noviembre del 2022.	137
Tabla 36. Mediciones de temperatura del día 7 de noviembre del 2022.	139
Tabla 37. Mediciones de temperatura del día 8 de noviembre del 2022.	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del sistema de monitorización y adquisición.	10
Figura 2. Mapa de cobertura de la red Sigfox sobre la capital de Puebla [69].	34
Figura 3. Cobertura de la red LoRaWAN en la capital de Puebla [70].	36
Figura 4. Ejemplo de un dashboard creado en DashThis [73].	37
Figura 5. Sensor tipo sonda DS18B20.....	43
Figura 6. Sensor BMP180.....	44
Figura 7. Módulo GY/BM.	44
Figura 8. Sensor MICS5524.....	44
Figura 9. Módulo VOC Gas-Sensor.	45
Figura 10. Sensor MH-Z19B.	45
Figura 11. Sensor SDS011.....	46
Figura 12. Sensor KS0429.	46
Figura 13. Módulo NODEMCU.....	47
Figura 14. Módulo SFM11R2D.	48
Figura 15. Módulo Bluetooth 2.0 HC-05.....	48
Figura 16. Multiplexor/Demultiplexor dual de 4 canales analógicos.	49
Figura 17. Tarjeta de desarrollo BlackPill.	49
Figura 18. Módulo GNSS NEO-7M.....	50
Figura 19. Esquema de conexión del sensor DS18B20.....	51
Figura 20. Configuración para comunicación I ² C del sensor BMP180.....	52
Figura 21. Diagrama esquemático para el sensor MICS5524.....	52
Figura 22. Esquema de conexión del sensor MH-Z19.	53
Figura 23. Esquema de conexiones del sensor SDS011.	53
Figura 24. Diagrama de conexión del módulo TDS.....	53
Figura 25. Diagrama esquemático del módulo ESP-12F.....	54
Figura 26. Diagrama de conexiones del módulo SFM11R2D.	54
Figura 27. Diagrama esquemático del módulo HC-05.	55
Figura 28. Diagrama de conexión del módulo NEO-7M.	55

Figura 29. Diagrama de conexiones de la memoria SPI W25Q32.....	56
Figura 30. Diagrama de conexiones de los multiplexores CD4052.	56
Figura 31. Diagrama de conexión de LED indicador WS2812B.....	56
Figura 32. Esquema eléctrico de la etapa de alimentación.	57
Figura 33. Esquema de conexiones de los módulos con el microcontrolador.	57
Figura 34. Conexión física de los módulos al microcontrolador.	58
Figura 35. Circuito eléctrico completo del sistema de monitoreo.....	59
Figura 36. Diagrama de flujo del firmware del sistema de monitoreo.	60
Figura 37. Ejemplo de operación 2, del sensor DS18B20 [76].....	61
Figura 38. Diagrama de tiempos de lectura y escritura del sensor DS18B20 [76].	62
Figura 39. Diagrama de tiempos de inicialización del sensor DS18B20 [76].	63
Figura 40. Algoritmo de medición del sensor BMP180 [77].....	64
Figura 41. Comando para lectura de concentraciones del sensor MH-Z19 [79]. ...	67
Figura 42. Diagrama de flujo de envío de datos.	70
Figura 43. Almacenamiento de datos en Firebase.....	73
Figura 44. Vista superior de la PCB del sistema de monitoreo.	74
Figura 45. Vista inferior de la PCB del sistema de monitoreo.	74
Figura 46. Vista 3D de la PCB diseñada.	75
Figura 47. Placa de circuito impreso del sistema de monitoreo ambiental.....	76
Figura 48. Carcasa del sistema de monitoreo ambiental.	76
Figura 49. Sistema de monitoreo ambiental completo.	77
Figura 50. Página Web de monitoreo ambiental.	78
Figura 51. Diagrama de flujo de la aplicación.	79
Figura 52. Pantalla principal de la aplicación para dispositivos inteligentes.	80
Figura 53. Menú de interacción de la aplicación.	81
Figura 54. Lista de dispositivos emparejados con el teléfono inteligente.	81
Figura 55. Menú de interacción con la configuración del sistema.....	82
Figura 56. Configuración del sistema de monitoreo ambiental.	83
Figura 57. Prototipo del sistema de monitoreo ambiental.	86
Figura 58. Sonda multiparamétrica HI98194.....	87
Figura 59. Sonda multiparamétrica HI98129.....	88

Figura 60. Muestras tomadas de la periferia del lago de CU.....	89
Figura 61. Ubicación de las estaciones de monitoreo.	89
Figura 62. Histórico de calidad del aire del 2 de noviembre del 2022 [80].....	92
Figura 63. Gráfica de temperatura, generada por la página Web desarrollada.....	94
Figura 64. Gráfica de temperatura, proporcionada por Weather Spark [81].	94
Figura 65. Histórico de calidad del aire del 1 de noviembre del 2022 [80].....	117
Figura 66. Histórico de calidad del aire del 3 de noviembre del 2022 [80].....	119
Figura 67. Histórico de calidad del aire del 4 de noviembre del 2022 [80].....	121
Figura 68. Histórico de calidad del aire del 5 de noviembre del 2022 [80].....	123
Figura 69. Histórico de calidad del aire del 6 de noviembre del 2022 [80].....	125
Figura 70. Histórico de calidad del aire del 7 de noviembre del 2022 [80].....	127
Figura 71. Histórico de calidad del aire del 8 de noviembre del 2022 [80].....	128
Figura 72. Gráfica de temperatura 01/11/22 (Web desarrollada).....	129
Figura 73. Gráfica de temperatura 01/11/22 (Weather Spark [81]).	130
Figura 74. Gráfica de temperatura 03/11/22 (Web desarrollada).....	132
Figura 75. Gráfica de temperatura 03/11/22 (Weather Spark [81]).	132
Figura 76. Gráfica de temperatura 04/11/22 (Web desarrollada).....	134
Figura 77. Gráfica de temperatura 04/11/22 (Weather Spark [81]).	134
Figura 78. Gráfica de temperatura 05/11/22 (Web desarrollada).....	136
Figura 79. Gráfica de temperatura 05/11/22 (Weather Spark [81]).	136
Figura 80. Gráfica de temperatura 06/11/22 (Web desarrollada).....	138
Figura 81. Gráfica de temperatura 06/11/22 (Weather Spark [81]).	138
Figura 82. Gráfica de temperatura 07/11/22 (Web desarrollada).....	140
Figura 83. Gráfica de temperatura 07/11/22 (Weather Spark [81]).	140
Figura 84. Gráfica de temperatura 08/11/22 (Web desarrollada).....	141
Figura 85. Gráfica de temperatura 08/11/22 (Weather Spark [81]).	142

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el análisis, diseño y fabricación de un sistema de monitoreo ambiental para estudios de ciudades inteligentes, se propone el diseño de modo que puedan ser adicionados más dispositivos de medición de variables ambientales.

En primer lugar, se realizó una investigación para determinar que variables son importantes para determinar la calidad del ambiente y con que dispositivos pueden o no ser dimensionadas estas variables, con esta investigación se determinaron las variables que son sensadas y los sensores apropiados para estas.

Posteriormente, se comienza con el diseño del dispositivo utilizando módulos que integren los sensores elegidos y un microcontrolador ARM Cortex-M4, los datos recabados por el sistema de monitoreo ambiental son mostrados en una página Web desarrollada en HTML5.

Por último, para poder configurar el sistema se diseñó una aplicación para dispositivos inteligentes, con esta se pueden cambiar los intervalos de tiempo de sensado para cada variable.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta una introducción de los sistemas de monitoreo ambiental y ciudades inteligentes, así como el objetivo principal del proyecto y objetivos específicos que ayudaron a la conclusión satisfactoriamente del sistema de monitoreo ambiental, también se presenta la justificación del desarrollo de este proyecto, por último, se describe como está conformado el sistema tanto en hardware como en software.

El cambio climático es, hoy en día, uno de los retos más importantes que enfrenta la humanidad, por lo tanto, un tema obligado en la agenda de cualquier gobierno [1]. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variación natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables [2]. Desde un punto de vista meteorológico, el cambio climático es la alteración de las condiciones predominantes [3].

Los impactos del cambio climático ya son perceptibles y quedan puestos en evidencia por datos como: la temperatura media mundial ha aumentado 1.1 °C desde la época preindustrial y la tasa de subida del nivel del mar ha ascendido a 5 mm al año en el quinquenio 2014 – 2019 [4].

En 2018, el mundo se encontró con 315 casos de desastres naturales que están principalmente relacionadas con el clima. Aproximadamente 68.5 millones de personas se vieron afectadas [5]. Además, los alimentos, el agua, la salud, el ecosistema, el hábitat humano y la infraestructura han sido identificados como los sectores más vulnerables al ataque climático [5].

Tanto el cambio climático como la contaminación del aire se ven empeoradas por la combustión de combustibles fósiles, que incrementan las emisiones de CO [6]. La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental, ya sea en los países desarrollados o en desarrollo [7]. Se estima que la contaminación del aire, tanto en las ciudades como en las zonas rurales, es causa de 4.2 millones de muertes en todo el mundo al año [8].

Sin embargo, son las zonas urbanas las que contaminan en mayor medida. Las estimaciones recientes de las Naciones Unidas indican que para el año 2025 la población mundial será de 8,500 millones de personas. Este brusco crecimiento ha detonado el proceso de aglomeración poblacional en las áreas urbanas con la formación de grandes zonas metropolitanas [9]. En las zonas urbanas, la población convive en espacios geográficos reducidos y consumen en forma depredadora los recursos naturales con el fin de satisfacer sus necesidades, esto ha acarreado todo tipo de problemas de carácter social, económico y, sin duda, de impacto ambiental [10].

Un paso necesario para atender la problemática ambiental es contar con información

que permita conocer la situación actual del ambiente y de los recursos naturales para, con base en ella, formular estrategias y políticas de gobierno que conjunten armónicamente el desarrollo económico, la conservación y recuperación del ambiente [11].

Las Ciudades Inteligentes o Smart Cities, son el resultado de la necesidad cada vez más imperiosa de orientar nuestra vida hacia la sostenibilidad [12]. Así, estas ciudades innovadoras utilizan, entre otras cosas, las tecnologías de la información y comunicación, programas de análisis y sensores para promover un desarrollo sostenible, un incremento de calidad de vida de los ciudadanos, una mayor eficacia de los recursos disponible y la participación ciudadana activa [13].

Las tecnologías que proveen de información ambiental cuantitativa a las ciudades inteligentes son los sistemas de monitoreo. Un sistema de monitoreo ambiental de calidad del aire (SMCA), consiste en un conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para operar una o un conjunto de estaciones de monitoreo que miden la calidad del aire en una zona o región [14]. Permiten observar, medir y registrar en tiempo real variables físicas como: temperatura, humedad relativa, presión diferencial, conteo de partículas viables y no viables, gases, olores, velocidad de aire, cambios de aire por hora, iluminación y ruido [15].

Existen normas que ayudan a determinar los parámetros y métodos de medición de los índices de calidad del aire, una de estas normas es la NOM-172-SEMARNAT-2019. El objetivo de esta norma es establecer lineamientos para la obtención y comunicación del índice de calidad del aire y riesgos a la salud para informar de manera clara el estado de la calidad del aire, los probables daños a la salud y las medidas que pueden tomarse para reducir la exposición [16].

Esta norma tiene algunas referencias normativas, entre las cuales se encuentran los métodos de medición y el procedimiento para la calibración de las variables ambientales.

El análisis de la información ambiental proporcionada, por los sistemas de monitoreo de calidad del aire en México, disponible en el año 2016, sobre partículas suspendidas (PM10 y PM2.5) y ozono en 20 sistemas de monitoreo de la calidad del aire, distribuidas en la república mexicana, permitió identificar que los límites normados para protección de la salud se cumplieron en muy pocas ciudades: ozono, solo se cumplió en Mexicali y Mérida; PM10, en Tulancingo y Zapotlán; y PM2.5 en ninguna ciudad [17]. El monitoreo de la calidad del

aire en México muestra problemas operativos que se reflejan en el alto porcentaje de estaciones de monitoreo que no generan información suficiente para evaluar el cumplimiento de las normas oficiales [15].

Para medir y evaluar el impacto de la contaminación del aire en la población y los recursos naturales, es indispensable contar con sistemas, redes y programas adecuados que provean de información de calidad del aire [13]. Para poder plantear soluciones que puedan ponerse en práctica y, sobre todo, mejoren y preserven el ambiente, es preciso contar, entre otras cosas, con un buen conocimiento técnico del problema [18].

El conocimiento es una mezcla de experiencia, valores e información que sirven como marco para la incorporación de nuevas experiencias e información [19]. La información es un conjunto de datos procesados que tienen un significado, y que son de utilidad para quien debe tomar decisiones [20]. Los datos son la mínima unidad semántica y se corresponden con elementos primarios de información, que por sí solos son irrelevantes como apoyo a la toma de decisiones [21]. Una base de datos es una colección masiva organizada de datos estructurados. Con la recopilación masiva de datos del IoT (Internet Of Things o Internet de las cosas), hoy en día se tienen acceso a más datos que nunca. Las organizaciones con visión de futuro ahora pueden usar bases de datos para ir más allá, para ejecutar actividades de manera más eficiente y permitir una mejor toma de decisiones [20].

1.1. Organización del documento

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño e implementación del sistema de monitoreo y adquisición para medir variables ambientales que tienen impacto en el cambio climático, basado en microcontroladores.

En el capítulo 1 se muestran las generalidades del proyecto como justificación, los objetivos generales y específicos, estado del arte y una pequeña descripción del sistema.

En el capítulo 2 se realiza una investigación sobre las diferentes características y sensores que contendrá el sistema de monitorización y adquisición de datos, como, variables ambientales de aire y agua, sistemas de comunicación a Internet, sistemas de geolocalización, *dashboard*, tecnología de baterías eléctricas y microcontroladores.

En el capítulo 3 se presenta el desarrollo e implementación del dispositivo recolector de variables ambientales, en donde se lleva a cabo la selección de los diferentes dispositivos que integraran el proyecto, desde los sensores hasta tecnología de comunicación a Internet, y por último la integración y programación del sistema completo.

En el último capítulo se muestran los resultados de las comparaciones de medición del sistema con mediciones obtenidas de sistemas de monitoreo ambiental que se encuentran en funcionamiento en la ciudad de Puebla y sondas multiparamétricas comerciales.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Desarrollar un sistema empotrado para recuperar variables ambientales asociadas al cambio climático, geolocalizadas y con almacenamiento de datos en la nube utilizando el concepto de IoT.

1.2.2. Específicos

1. Investigar y seleccionar cinco variables ambientales asociadas con el cambio climático.
2. Determinar los sensores apropiados para la medición de las variables seleccionadas.
3. Desarrollar un sistema de recuperación y almacenamiento de datos, utilizando un sistema de comunicación IoT.
4. Implementar el firmware del dispositivo de recolección con la capacidad de actualizar el mismo.
5. Desarrollar un dispositivo empotrado con un microcontrolador para la recolección de datos ambientales.
6. Implementar una aplicación en un teléfono inteligente para la configuración del sistema desarrollado.
7. Integrar el sistema completo para la realización de pruebas funcionales.

1.3. Justificación

Actualmente, se tiene un problema grave debido al cambio climático. El crecimiento de la población, la rápida urbanización, el aumento en el nivel de consumo, la desertificación, degradación de la tierra y el cambio climático se han combinado para hacer que los países sufran una escasez de recursos severa [30]. La integridad y funcionalidad de estos activos naturales se ven cada vez más comprometidas. La gestión inadecuada del medio ambiente y los recursos naturales da lugar a pérdidas económicas considerables [31].

Con el sistema de monitorización y adquisición de datos que se desarrollado se podrán obtener datos ambientales de diversas zonas, almacenando datos en la nube para estudios de calidad de aire y de esta manera, que las ciudades inteligentes puedan implementar acciones preventivas con la información recabada, para preservar y mejorar el medio ambiente en el que se encuentran y así mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Para poder establecer un sistema de gestión ambiental, es necesario obtener o crear una ingente cantidad de datos para realizar un análisis de la situación actual y generar información para la toma oportuna de decisiones, esta creación de datos podría realizarse sensorizando el planeta, ya que esta sensorización proveerá de datos cuantitativos. La elaboración de un registro de los resultados del monitoreo, así como el seguimiento de la situación actual del medio ambiente, es de fundamental importancia [32]. Con el estudio de las variables ambientales, podría ser dimensionada la magnitud del impacto ambiental de una ciudad o zona urbana [33].

Para que una ciudad sea considerada ciudad inteligente debe reunir ciertas condiciones, entre las que se encuentra el desarrollo económico, social y medioambiental sostenible y en armonía, el sistema de monitorización y adquisición proveerá de datos necesarios para evaluar y gestionar los recursos naturales que tiene una ciudad [34].

En la Licenciatura en Gestión de Ciudades Inteligentes y Transiciones Tecnológicas de la BUAP, los alumnos deben analizar problemáticas, diseñar estrategias y propuestas, gestionar recursos, evaluar infraestructura, interpretar y aplicar metodologías, a partir del análisis crítico de datos, enfocadas en las operaciones del sector público y privado, para la implementación de plataformas e infraestructura tecnológica, para reducir el impacto ambiental en el medio ambiente [35]. El sistema desarrollado es un dispositivo para dicha carrera, ya que requiere de un laboratorio con equipo de medición de variables ambientales,

Justificación

que provea de datos cuantitativos, para estudios de impacto ambiental y permita a los alumnos poder implementar instrumentos utilizando tecnología IoT.

1.4. Estado del arte

En el desarrollo de estaciones de monitoreo, existen diversas investigaciones, en las cuales se reportan diseños aplicados con diferentes tecnologías y características. Por ejemplo, Ortega [22], diseña una estación meteorológica utilizando *RaspBerry* enfocada a cultivos protegidos y campo abierto, utilizando sensores de bajo costo y bajo nivel, por lo que se reduce el costo final en comparación de las estaciones manufacturadas y ofertadas de manera comercial, pero al utilizar sensores de bajo nivel estos no tienen la capacidad de ser duraderos y su sensibilidad puede variar ocasionando errores de lectura.

En los artículos de Quintana [23], Arango [24], Marín [25] y Salcedo [26] se presentan diferentes propuestas de desarrollos de estaciones meteorológicas o de monitoreo ambiental, cada una usa diferentes controladores desde microcontroladores PIC de Microchip, hasta tarjetas Arduino basadas en microcontroladores ATmega, sin embargo, todas proponen el uso de sensores de bajo nivel y, por lo tanto, de bajo costo, lo que llevara a que estas estaciones comiencen a capturar errores en las lecturas al pasar demasiado tiempo sin mantenimiento.

En el artículo Huazano [27], realizan una comparativa de las estaciones climatológicas comerciales y se sugieren componentes para una estación meteorológica portátil, entre las variables que se proponen se encuentra presión atmosférica, humedad, temperatura, calidad del aire y radiación UV, en esta propuesta se presenta desde sensores de nivel estudiantil hasta sensores de calidad industrial, solo se debería corroborar si estos sensores trabajan en los niveles que se requieren medir las variables ambientales.

Blanco [28] y López [29], proponen la conformación de una red de estaciones meteorológicas, para esta red utilizan estaciones de monitoreo comerciales, a las cuales se le acoplan algunos sensores como pluviómetro, velocidad del viento y temperatura del suelo, sin embargo, las distancias más largas alcanzadas en esta red son de 10 metros.

1.5. Descripción

El sistema de monitorización y adquisición de datos adquiere señales eléctricas de los sensores, el microcontrolador procesa estas señales eléctricas y las convierte en datos. Por último, la nube recibe los datos que el microcontrolador genera. Si el sistema de monitorización pierde conexión con el sistema de almacenamiento en la nube, el sistema tiene la capacidad de almacenar de forma local los datos recabados, durante un periodo de tiempo, para que en cuanto el sistema de adquisición recupere la comunicación con la base de datos en la nube, sean subidos los datos almacenados; en la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema de monitoreo y adquisición de datos. Este proyecto se desarrolló en cuatro etapas.

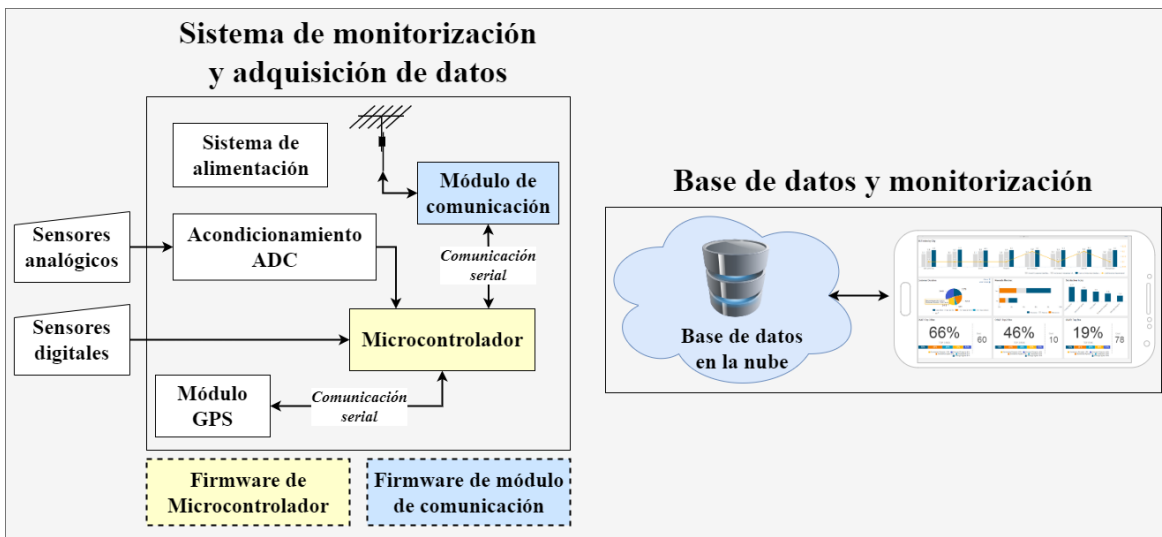


Figura 1. Diagrama general del sistema de monitorización y adquisición.

Durante la etapa uno se realizó el acoplamiento de sensores a la tarjeta que contiene al microcontrolador, para lo cual se realizó una investigación sobre las variables ambientales, con dicha investigación se determinó que variables pueden ser monitoreadas mediante sensores y que variables deben ser monitoreadas mediante procesos de laboratorio, de las variables que pueden ser monitoreadas mediante sensores se seleccionaron cinco, de estas se investigó sobre diferentes tipos de sensores que existen para dichas variables y sus características generales, con lo cual se determinó los apropiados para ser utilizados en el sistema de monitoreo y adquisición.

En la segunda etapa se desarrolló e implemento el firmware para poder comunicar los sensores con el microcontrolador, para lo cual se debió investigar a fondo las características de cada sensor seleccionado, y de esta manera determinar cómo debe ser la comunicación entre el microcontrolador y cada sensor, con esta investigación se llevó a cabo una correcta selección del microcontrolador con las características necesaria para el sistema, del mismo modo para cada sensor se verificó la forma de obtención de los datos por parte del microcontrolador, ya que esta puede ser digital o analógica, o mediante algún protocolo de comunicación serial como I²C, SPI o UART.

La tercera etapa consistió en la comunicación del sistema de adquisición con la base de datos en la nube, por lo que se realizó una investigación sobre los diferentes sistemas que existen actualmente para poder realizar una conexión del microcontrolador a una base de datos de Internet, de esta manera se determinaron sus ventajas, desventajas y características, del mismo modo se realizó una investigación sobre las plataformas *dashboard* o tableros de control, para poder elegir la mejor plataforma que se adapte a las necesidades del sistema.

En la cuarta etapa se desarrolló una aplicación para teléfonos inteligentes, con la cual se configuran parámetros del sistema de adquisición, como tiempos de muestreo, variables sensadas, sistema de comunicación, entre otros parámetros. Esta aplicación también tiene la función de un tablero de monitoreo.

El firmware del sistema se desarrolló para que pueda ser configurado por la aplicación para teléfonos inteligentes.

En el próximo capítulo se presenta una investigación realizada sobre variables para determinar calidad del aire, agua y suelos, el fin de esta investigación fue la de determinar las variables apropiadas para el desarrollo del sistema.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta una investigación con la cual se seleccionaron los componentes que conforman todo el sistema de monitoreo ambiental, esta investigación comienza con la identificación de las Normas Oficiales Mexicanas para este tipo de sistemas de monitoreo ambiental, ya que estas determinan que variables pueden ser dimensionadas con sensores y las características que estos deben poseer; también se presenta una investigación para identificar las principales redes de comunicación móviles, para poder realizar el envío de la información obtenida hacia la base de datos en la nube; también se presenta una investigación con la cual se determinó el sistema de posicionamiento global; por último se presenta una investigación sobre microcontroladores la cual ayudo a determinar el microcontrolador ideal para soportar todos los sensores y dispositivos necesarios para el sistema.

2.1. Variables para estudios de la calidad del aire, agua y suelo

Las variables ambientales son condiciones climáticas que participan en la identificación de una zona. Estas poseen una estrecha relación con el ser humano, ya que es parte de su entorno y por el cual se ve afectado, por ello se buscan diversas formas de aprovechamiento de las condiciones. El principal objetivo de identificar estas variables es que a partir de ellas se satisfaga las necesidades del ser humano, entre estas variables podemos mencionar clima, vegetación, vientos, topografía, hidrografía, entre otras.

En México la contaminación ambiental representó la novena causa de muerte, con cerca de 20 mil muertes atribuidas, en el año 2010. La Organización Mundial de la Salud (OMS), estima que, en el mundo, la contaminación atmosférica provoca cada año más de 3 millones de muertes prematuras [36].

En este contexto, el monitoreo ambiental es de fundamental importancia para proveer la información necesaria que ayude a evaluar la calidad del ambiente en cada región o zona, y sus tendencias, así como desarrollar estrategias de prevención [37].

Las variables ambientales pueden ser divididas principalmente en tres grupos como, aire, agua y suelo, cada uno de estos grupos, posee diversas variables que pueden ser dimensionadas.

2.1.1. Calidad del aire

La contaminación del aire representa uno de los mayores riesgos ambientales para la salud, se ha indicado que la exposición a contaminantes en el aire ambiente está asociada con una amplia variedad de efectos que afectan la calidad de vida de la población en general [36].

Existen normas que determinan los métodos de medición para variables ambientales que tienen impacto sobre el ser humano, La Norma Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 es una de estas normativas, en ella se establecen los lineamientos que se deben seguir para la obtención y comunicación de los índices de calidad del aire y riesgos a la salud [37].

De la norma mencionada se derivan las Normas Oficiales que establecen los métodos de medición para determinar la concentración de contaminantes en el medio ambiente y los procedimientos para calibración de equipos de medición, dentro de estas normativas se

establecen que variables deben ser dimensionadas mediante procesos de laboratorio y que variables pueden ser sensadas utilizando sensores, a continuación, se presentan estas variables:

- * Variables de aire que se miden a través de procesos de laboratorio.
 - Ozono (O₃): es un poderoso oxidante, este reacciona a otros compuestos químicos, es inestable a altas concentraciones. Es un componente natural de la atmosfera, a nivel del suelo, el ozono en altas concentraciones es un contaminante del aire, que provoca efectos nocivos para el humano, las plantas y los animales, además es un contribuyente del calentamiento global. La Norma Oficial Mexicana NOM-036-SEMARNAT-1993, establece los métodos de medición y procedimientos para determinar las concentraciones de ozono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El método establecido para la medición de ozono, en esta norma, es el de luminiscencia química, basado en la capacidad que tiene el ozono de emitir luz al reaccionar con etileno. La norma NOM-020-SSA1-2014, sobre salud ambiental, establece el valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su

Tabla 1. Comparativa de sensores de ozono.

Modelo	ZE25-O3	3SP_O3_5 P Package 110-407	3SP_O3_5 P Package 110-406
Fabricante	Winsen	SPEC Sensors	SPEC Sensors
Voltaje de funcionamiento (VDC)	3.7 ~ 5.5	5	5
Datos de salida	ADC y UART	ADC	ADC
Tiempo de calentamiento (min)	≤ 3		
Tiempo de reposo (s)	≤ 90	< 15	< 15
Intervalo de detección (ppm)	0 ~ 10	0 ~ >20	0 ~ 5
Resolución (ppb)	10	< 20	< 20
Temperatura de operación (°C)	-10 ~ 55	-30 ~ 50	-30 ~ 50
Humedad de operación (% RH)	15 – 90	0 ~ 100	0 ~ 100
Vida útil (años)	2	5	5
Consumo (μW)		10 ~ 50	10 ~ 50
Precio (dólares)	\$62.00	\$20.00	\$20.00

evaluación, este método establece 2 valores límites de concentración, la primera establece que la concentración debe ser menor o igual a 0.095 ppm para promedio horario y 0.070 ppm para promedio móvil de 8 horas y anual, las concentraciones pueden ser horarias con registros de 1 minuto en 1 hora, promedio de 8 horas con registro cada hora, diarias y anual. Para determinar el cumplimiento de la norma al menos se deberá contar con un 75 % de los datos para cada concentración [38].

En la tabla 1 se muestra la comparativa de diferentes sensores que son utilizados para poder determinar concentraciones de ozono O₃

- Dióxido de Nitrógeno (NO₂): es un corrosivo y oxidante de color rojizo-marrón con un olor penetrante e irritante, este es generado por la combinación de oxígeno y nitrógeno a altas temperaturas como las que se generan en un motor por la combustión interna y este reacciona rápidamente con oxígeno ambiental produciendo dióxido de nitrógeno. El dióxido de nitrógeno puede irritar los pulmones y disminuir la resistencia a enfermedades infecciosas. Con la norma NOM-037-SEMARNAT-1993 se establecen los métodos para determinar la concentración de bióxido de carbono en el aire y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El método que establece esta NOM para la medición de NO₂ es el de quimioluminiscencia en fase gaseosa, este método permite medir la concentración de bióxido de

Tabla 2. Comparativa de sensores de dióxido de nitrógeno.

Modelo	SGX-4NO2	MICS-2714	FECS2-20
Fabricante	SGX Sensortech	SGX Sensortech	FIGARO
Voltaje de funcionamiento (VDC)	0 (no vias)	4.9 ~ 5.1	No requiere
Datos de salida	ADC		ADC
Tiempo de reposo (s)	<30		<25
Intervalo de detección (ppm)	0 ~ 30	0.05 ~ 10	0 ~ 20
Resolución (ppm)	0.1	0.25	0.1
Temperatura de operación (°C)	-30 ~ 50	-30 ~ 85	-20 ~ 50
Humedad de operación (% RH)	15 ~ 90	5 ~ 95	15 ~ 90
Vida útil (años)	2	1	>3
Consumo (mA)	<1000	26	
Precio (dólares)	\$64.79	\$12.00	\$250.00

nitrógeno en el aire ambiente de forma directa. La norma NOM-023-SSA1-2020, sobre salud ambiental, proporciona los valores normados para la concentración de dióxido de nitrógeno en el aire, los valores límite en 1 hora son de 0.106 ppm o $200 \frac{\mu g}{m^3}$ y anual de 0.021 ppm o $40 \frac{\mu g}{m^3}$, para el cumplimiento de la norma se requiere del 75 % de los datos [39].

En la tabla 2 se muestran diferentes sensores utilizados para determinar las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂).

- Bióxido de Azufre (SO₂): es un gas con un olor penetrante, no es un gas inflamable, ni explosivo, es muy soluble en el agua. Durante su proceso de oxidación en la atmosfera, este gas forma sulfatos, estos sulfatos forman parte del material particulado PM10. El SO₂ es el responsable de la lluvia ácida. La principal fuente de emisión de dióxido de azufre es la combustión de productos petrolíferos y la quema de carbón en centrales eléctricas, también existen fuentes naturales, como los volcanes. La NOM-038-SEMARNAT-1993 establece los métodos para medición de concentraciones de bióxido de azufre en el aire y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El método que se establece para la medición de SO₂ es el de la pararrosanilina, este método hace pasar la muestra a través de una solución de tetracloromercurato. La norma NOM-022-SSA1-2019 sobre salud ambiental, establece los criterios para determinar las concentraciones de dióxido de azufre en el aire, se establece dos límites, los cuales deben ser evaluados en 1

Tabla 3. Comparativa de sensores de bióxido de azufre.

Modelo	SGX-7SO2	SGX-4SO2
Fabricante	SGX Sensortech	SGX Sensortech
Datos de salida	ADC	ADC
Tiempo de reposo (s)	<30	<30
Intervalo de detección (ppm)	0 ~ 100	0 ~ 20
Resolución (ppm)	0.5	0.1
Temperatura de operación (°C)	-30 ~ 50 °C	-30 ~ 50
Humedad de operación (% RH)	15 ~ 90	15 ~ 90
Vida útil (años)	>1	>2
Consumo (mA)	<1000	<1000
Precio (dólares)	\$144.00	\$156.00

hora o 24 horas, donde los límites son 0.075 ppm y 0.04 ppm respectivamente [40].

En la tabla 3 se puede observar diferentes sensores utilizados para determinar la concentración de bióxido de azufre en el aire (SO₂).

- * Variables del aire que pueden ser medidas a través de sensores.
 - Monóxido de Carbono (CO): es un gas incoloro e inodoro, aunque es un constituyente natural de la atmosfera, es también un contaminante del aire, el CO es el gas más abundante de los gases contaminantes. Este gas tiene la capacidad de unirse a la hemoglobina, cuando esto sucede se forma un complejo llamado carboxihemoglobina (COHb). Por lo cual la hemoglobina no puede transportar oxígeno. La Norma Oficial Mexicana NOM-034-SEMARNAT-1993, establece los métodos de medición para concentraciones de monóxido de carbono en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición. El método que establece esta norma para determinar las concentraciones de monóxido de carbono es el de absorción infrarroja por medio de un fotómetro no dispersivo. Este método se basa en la capacidad que tiene el contaminante para absorber la energía de determinadas longitudes de onda. Para aplicar este método se requiere de un fotómetro de absorción de radiación infrarroja con capacidades de detección de 0 a 50 ± 0.5 ppm. La norma NOM-021-SSA1-1993, sobre salud ambiental, establece el valor permisible para la concentración de monóxido de carbono

Tabla 4. Comparativa de sensores de monóxido de carbono.

Modelo	MQ-9B	MQ-7	MICS-4514
Fabricante	Winsen	Parallax	SGX Sensortech
Voltaje de funcionamiento (VDC)	1.5 ~ 5	5	2.4
Datos de salida	ADC		
Tiempo de calentamiento (s)	60 ~ 90	60 ~ 90	
Intervalo de detección (ppm)	10 ~ 500	20 ~ 2000	1 ~ 1000
Resolución (ppm)	>5		
Temperatura de operación (°C)	-20 ~ 50	-20 ~ 50	-30 ~ 85
Humedad de operación (% RH)	55	< 95	5 ~ 95
Consumo (mW)		350	81
Precio (dólares)	\$8.00	\$8.00	\$11.00

en el aire, esta concentración de monóxido como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de 11.00 ppm o su equivalente a $12.595 \frac{\mu g}{m^3}$ en promedio móvil de 8 horas una vez al año [41].

La tabla 4 muestra los datos técnicos de diferentes sensores que pueden ser utilizados para determinar la concentración de monóxido de carbono (CO).

- Partículas PM10 y PM2.5: son una mezcla de partículas y gotas líquidas, son diminutas, las partículas PM10 son menor o igual a un diámetro de 10 micrones, mientras que las partículas PM2.5 son menor o igual a un diámetro de 2.5 micrones. Debido a sus dimensiones, estas se mantienen más tiempo en el aire y son absorbidas fácilmente por el sistema respiratorio. Las principales causas de generación de estas partículas son las actividades como el aumento del tráfico, quema de cohetes, llantas o basura y la combustión diésel. En la Norma NOM-035-SEMARNAT-1993 se determinan los métodos de medición y los procesos para calibrar los equipos que determinan las concentraciones de partículas suspendidas. El método que establece esta norma es el de muestreo de alto volumen, este método permite medir la

Tabla 5. Comparativa de sensores de bióxido de carbono.

Modelo	MH-Z14A	MiCS-VZ-89TE	SCD4x	T6713
Fabricante	Winsen	SGX Sensortech	SENSIRION	TELAIRE
Voltaje de funcionamiento (VDC)	4.5 ~ 5.5	3.3	2.4 ~ 5.5	4.5 ~ 5.5
Datos de salida	UART, TTL, PWM y DAC	PWM: TTL y I ² C	I ² C	I ² C, UART y PWM
Tiempo de calentamiento (min)	3	15		<2
Tiempo de reposo (s)	<120	< 5	60	
Intervalo de detección (ppm)	0 ~ 10000	400 ~ 2000	0 ~ 40000	0 ~ 5000
Precisión (ppm)	+/- 50		+/- 40	+/- 30
Temperatura de operación (°C)	0 ~ 50	0 ~ 50	-10 ~ 60	-10 ~ 60
Humedad de operación (% RH)	0 ~ 90	0 ~ 95	0 ~ 100	0 ~ 95
Vida útil (años)	>5			
Consumo (mA)	150	125	<0.4	200
Precio (dólares)	\$36.00	\$22.00	\$47.00	\$110.00

concentración por medio de un muestreo adecuado localizado, que succiona a través de un filtro una cantidad determinada de aire [42].

* Algunas variables no están dentro de las normas, sin embargo, son de importancia, como:

- Bióxido de Carbono (CO₂): es el principal gas de efecto invernadero que se emite a raíz de las actividades del ser humano, este gas se hace presente de manera natural en la atmosfera como parte del ciclo de carbono de la tierra. La principal actividad que emite CO₂, es la combustión de combustibles fósiles para generación de energía [43].

La tabla 5 muestra los datos técnicos de diferentes sensores utilizados para medir bióxido de carbono (CO₂).

- Humedad Relativa (HR): según la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), es una relación, en porcentaje, de la cantidad de humedad atmosférica presente relativa a la cantidad que estaría presente si el aire estuviera saturado. Es una función tanto del contenido de humedad como de la temperatura. Medir el nivel de humedad de un ambiente a nivel doméstico como industrial, genera ahorros de energía y mejora la calidad de productos finales [44], la tabla 6 muestra una comparativa entre diferentes sensores utilizados para la medición de humedad relativa.

Tabla 6. Comparativa de sensores de humedad relativa.

Modelo	HIH-4602-A/C	HIH8000	WSEN-HIDS	DHT 11
Fabricante	Honeywell	Honeywell	Wurth Elektronik	Adafruit
Voltaje de funcionamiento (VDC)	4 ~ 5.8	2.3 ~ 5.5	1.7 ~ 3.6	3 ~ 5
Datos de salida	ADC	I ² C y SPI	I ² C y SPI	Digital
Tiempo de calentamiento (s)	50	8	120	2
Intervalo de detección (% RH)	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100
Resolución (% RH)	+/- 3.5	+/- 2	+/- 3	+/- 2
Temperatura de operación(°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 125	-40 ~ 120	-40 ~ 80
Humedad de operación (% RH)	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100
Consumo (mA)	0.5	1	0.0089	1.5
Precio (dólares)	\$128.00	\$20.00	\$4.00	\$5.00 ~ \$20.00

- Presión Atmosférica: es la fuerza que ejerce una columna de aire de la atmosfera sobre una superficie terrestre en un punto determinado. Esta fuerza es inversamente proporcional a la altitud, a mayor altitud menor presión atmosférica y a menor altitud mayor presión atmosférica [45], la tabla 7 muestra los datos técnicos del sensor BMP280 utilizado para medición de presión atmosférica.

Tabla 7. Datos técnicos de sensor BMP280.

Modelo	BMP280
Fabricante	BOSCH
Voltaje de funcionamiento (VDC)	1.7 ~ 3.6
Datos de salida	I ² C y SPI
Tiempo de reanudación (ms)	2
Intervalo de detección (hPa)	300 ~ 1100
Resolución (Pa)	0.16
Temperatura de operación (°C)	-40 ~ 85
Consumo (μA)	4.2
Precio (dólares)	\$6.00

- Temperatura: es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, o de un sistema termodinámico en general. La temperatura se define como la medida de la energía cinética media de las moléculas que la forman

Tabla 8. Comparativa de sensores de temperatura.

Modelo	BMP280	MCP9501	Familia PTF	KN3026	SHT20
Fabricante	BOSCH	MICROCHIP	TE Connectivity	Sensor Technology	Sensirion
Voltaje de funcionamiento (VDC)	1.7 ~ 3.6	2.7 ~ 5.5			2.1 ~ 3.6
Datos de salida	I ² C y SPI	ADC			I ² C
Tiempo de reposo (s)		1.7	17		30
Tiempo de reanudación (ms)	2	1			
Intervalo de detección (°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 125	-50 ~ 600	-196 ~ 660	-40 ~ 125
Precisión (°C)	+/- 1	+/- 1	+/- 0.43		+/- 0.3
Resolución (°C)	0.1				0.04
Temperatura de operación (°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 125			
Consumo (mA)	0.0042	0.0040	1.7		0.33
Precio (dólares)	\$6.00	\$1.00	\$4.02	\$40.00	\$8.00

[46], la tabla 8 muestra las características de algunos sensores utilizados para realizar mediciones de temperatura.

2.1.2. Calidad del agua

La contaminación hídrica es la presencia de componentes químicos o de naturaleza diferente a la situación natural, de modo que este líquido no reúne las condiciones de uso para el que fue destinado [47].

Las principales causas de la contaminación hídrica son:

- * Aguas de origen doméstico, las cuales provienen de núcleos urbanos.
- * Aguas de origen agrícola, estas son el resultado de riego y limpieza ganadera.
- * Aguas de origen industrial, proceden de agua utilizada como medio de transporte de sustancias, lavado y enjuague.
- * Aguas pluviales, el agua arrastra toda la suciedad que se encuentre a su paso.
- * Aguas de navegación, son el producto de rutas de navegación, vertidos de petróleo accidentales o no.

Un informe de 2016 de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos en el mundo dice que, alrededor del 80 % de puestos laborales dependen del acceso a un suministro adecuado de agua y servicios relacionados [48].

La Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, establece los límites máximos de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal, esta norma sirve como referencia para determinar variables que pueden ser dimensionadas en el agua. De esta norma se referencian diferentes Normas Oficiales para cada variable o contaminante, y dentro de estas se establecen los métodos de medición y los niveles máximos [47].

- * Variables del agua que pueden ser medidas con sensores
 - Temperatura: la medición de temperatura es muy importante para mantener los niveles de oxígeno que puede transportar el agua, a menor temperatura el agua transporta más oxígeno. El aumento en la temperatura se debe al vertido de aguas calientes que son producidas por plantas industriales, también se

debe a la escasez de árboles en la orilla de ríos. La NMX-AA-007-SCFI-2013, establece el método de medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. El principio que se establece es la utilización de termómetros basados en la propiedad que tienen los materiales de dilatarse o contraerse con los cambios de temperatura o en la propiedad eléctrica de los mismos. Para esta norma es válido el uso de termómetro con sensor de termistor, termopar y termómetro con resistencia de platino [49], en la tabla 9 se muestran algunos sensores que pueden ser utilizados para mediciones de temperatura en agua, ya que estos tienen algún grado de protección.

Tabla 9. Comparativa entre sensores de temperatura en agua.

Modelo	JS4710	TM1STNTCRN61515	B57227K
Fabricante	Amphenol	Schneider	TDK
Datos de salida	Resistencia	Resistencia	Resistencia
Intervalo de detección (°C)	0 ~ 100	0 ~ 100	-55 ~ 155
Precisión (°C)	+/- 1.8		
Protección	IP66	IP67	IP65
Precio (dólares)	\$9.00	\$7.00	\$10.00

- pH: este indica la acidez o alcalinidad del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno. El pH es importante, ya que los organismos requieren un margen estrecho de este, en los extremos de la escala (2 y 13), se dañan agallas, esqueletos y aletas. Los cambios de pH pueden

Tabla 10. Comparativa entre sensores utilizados para medir pH.

Modelo	SEN0161-V2	S-pH-01B
Fabricante	DFRobot	seeed
Voltaje de funcionamiento (VDC)	3.3 ~ 5.5	3.6 ~ 30
Datos de salida	ADC	RS485 y ADC
Tiempo de reposo (s)	120	2
Intervalo de detección (pH)	0-14	0-14
Resolución (pH)		0.01
Precisión (pH)	+/-0.1	+/-0.1
Temperatura de operación (°C)	5 ~ 60	-40 ~ 85
Vida útil (años)	0.5	
Consumo (mA)		35
Precio (dólares)	\$52.00	\$155.00

alterar las concentraciones de otras sustancias modificando su toxicidad. La NMX-AA-008-SCFI-2016 se utiliza para realizar la medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, el principio de medición que se establece es el de la utilización de una celda electroquímica empleado un pHmetro, el valor de pH depende de la temperatura, por lo que la muestra debe ir en conjunto con la medición de temperatura, se puede utilizar un pHmetro eléctrico, con resolución de 0.01 unidades [50], la tabla 10 muestra algunos sensores y sus características, para medición de pH.

- * Variables del agua que deben ser medidas a través de procesos de laboratorio
 - Grasa y aceites: están presentes en mayor o menor medida en todas las aguas residuales, las grasas son el componente de las aguas residuales que tienen mayor tendencia a oxidarse. Estas grasas y aceites tienen tendencia a flotar, debido a su densidad, lo que genera capas en la superficie, dificultando la transferencia de oxígeno. La norma NMX-AA-005-SCFI-2013 establece la medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, el principio que establece esta norma se basa en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales son extraídos en un equipo, empleando hexano como disolvente. Una vez evaporado el hexano se pesa el residuo que queda en el recipiente, siendo este el contenido de grasas y aceites [51].
 - Cromo hexavalente: es un compuesto químico que contiene cromo en el estado de oxidación 6, el vertido incontrolado al medio ambiente es principalmente porque la mayor parte de los sistemas colectores de aguas residuales no posibilitan la separación de afluentes urbanos e industriales. La NMX-AA-044-SCFI-2014 para medición de cromo hexavalente en aguas naturales, salinas, residuales y residuales tratadas establece el método que se basa en la reacción del cromo hexavalente con la 1.5-difenilcarbazida en medio ácido que da como resultado un color rojo violeta. La intensidad del color es proporcional a la concentración de cromo hexavalente [52].
 - Arsénico: este material está presente en el agua debido a la disolución de minerales de depósitos geológicos, las concentraciones elevadas de origen

natural afectan grandes áreas, el agua subterránea con elevados niveles de arsénico es utilizada para regar cultivos en todo el mundo, esto ha traído como resultado la acumulación de arsénico en los suelos. La norma NMX-AA-46-1981 ayuda a determinar los niveles de arsénico en el agua, se fundamenta por la reducción que tiene el arsénico al mezclarse con zinc en una solución ácida, lo cual forma un complejo rojo cuyo color es proporcional al contenido de arsénico [53].

- Plomo: la industria y la minería son los principales contribuyentes en la contaminación de mantos acuíferos, al consumir agua contaminada el plomo se acumula en la sangre y tiene un alto grado de toxicidad. La norma NMX-AA-57-1981, ayuda a realizar mediciones para determinar el nivel de plomo en agua, el método que establece se basa en la reacción del plomo presente en agua con la ditizona disuelta en tetracloruro de carbono formando un complejo de color rosa, la intensidad de esta determinada colorimétricamente es proporcional al contenido de plomo [54].
- Cianuros: son compuestos potencialmente tóxicos, si el pH cambia se puede liberar ácido cianhídrico, este es un compuesto de máxima toxicidad para el ser humano. La norma NMX-AA-058-SCFI-2001 para determinar cianuros totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas, establece el método espectrofotométrico, este método detecta cianuros inorgánicos que están presentes tanto en forma de sales simples como radicales complejos [55].
- Cadmio: es un metal tóxico liberado por fuentes naturales y antrópicas, como, la minería, el uso de fertilizantes, fundición de metales, quema de combustibles, fabricación de baterías, pigmentos, cemento y plásticos. El cadmio tiende a acumularse en los suelos, haciéndose disponible para las plantas, de esta manera entrando a la cadena alimenticia. La norma NMX-AA-60-1978 determina los métodos de medición de cadmio en agua, el principio que dispone esta norma se basa en la reacción del cadmio presente en el agua con la ditizona para formar un complejo de color rojo, el cual se cuantifica colorimétricamente a una longitud de onda de 515 nm [56].

- Mercurio: es un contaminante tóxico, puede viajar largas distancias por la atmósfera y depositarse lejos de su fuente original, donde es absorbido por bacterias convirtiéndose en metilmercurio, el cual se abre camino hasta la cadena alimenticia. La norma NMX-AA-64-1981, para determinación de mercurio en agua, establece el método basado en la reacción del mercurio disuelto en agua con la ditizona para obtener un complejo naranja, cuya intensidad se cuantifica colorimétricamente a una longitud de onda de 490 nm [57].
- Cobre: es un metal, se encuentra naturalmente en las rocas, agua, sedimentos y el aire, en bajas concentraciones en la dieta, es un elemento esencial para todos los organismos, a niveles altos tiene efectos tóxicos, el cobre entra al medio ambiente a través de liberaciones en minas y desde fábricas que manufacturan compuestos de cobre, también puede provenir desde el agua residual, cuando es liberado puede adherirse fuertemente a la materia orgánica. La norma NMX-AA-66-1981, para la determinación de cobre en el agua, estipula el método, de soluciones neutras, donde los iones cuprosos reaccionan con la neucoproína para dar una solución de color amarilla, la cual se cuantifica espectrofotométricamente a una longitud de onda de 457 nm [58].
- Níquel: es un metal duro, pero flexible, se encuentra en casi todo tipo de tierras. El níquel se transporta principalmente en las partículas de aire, durante las lluvias estas partículas pueden ser arrastradas por el agua superficial. La norma NOM-AA-76-1981, para determinación de níquel en el agua, la cual especifica, que, para obtener la determinación de níquel, la muestra debe ser sometida a una digestión preliminar para eliminar interferencias. Posteriormente, es separada en una fase acuosa ácida y se hace reaccionar con una solución dimetilglioxima, para desarrollar el color y medirlo con absorción espectral fotométricamente [59].
- Zinc: este material está presente de forma natural en el agua, no es tóxico para las personas, excepto en niveles altos o en algunas sales donde otros compuestos son los agentes tóxicos. La norma NMX-AA-78-1982, ayuda a

determinar los niveles de zinc en el agua, estableciendo el método basado en la reacción que tiene el zinc con la ditizona, lo que proporciona coloración a la solución, proporcional al contenido del metal [60].

2.1.3. Calidad del suelo

Actividades como la ganadería y la agricultura emplean fármacos, plaguicidas y fertilizantes que contaminan los campos. La contaminación puntual tiene lugar en áreas reducidas, estos contaminantes son habituales de las ciudades, emplazamientos de antiguas fábricas, los alrededores de carreteras, vertederos ilegales y depuradoras, la contaminación difusa se da en territorios muy amplios, en este se dispersan contaminantes a través de sistemas aire-suelo-agua y tienen un impacto importante en la salud y el medio ambiente [61].

La Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, para aplicar esta norma se debe realizar un muestreo del suelo, cada determinación tiene sus propias variables a considerar para determinar los niveles en los que se encuentra [62].

Para determinar la fertilidad del suelo se efectúan las siguientes pruebas:

- * Preparación de la muestra
- * pH: medido en agua
- * Densidad
- * Humedad
- * Materia orgánica
- * Nitrógeno inorgánico
- * Textura del suelo
- * Fósforo extraíble
- * Cationes intercambiables
- * Micronutrientes disponibles
- * Contenido de boro.

Para determinar la salinidad del suelo se efectúan las siguientes pruebas:

- * Preparación de la muestra

- * pH medido en el extracto de saturación
- * Humedad
- * Extracto de saturación
- * Porcentaje de saturación
- * Conductividad eléctrica
- * Cationes solubles
- * Aniones solubles
- * Porcentaje de saturación de base.

Para clasificar los suelos son necesarias las siguientes pruebas:

- * Preparación de la muestra
- * pH en agua, cloruro de potasio y cloruro de calcio
- * Densidad
- * Humedad
- * Curva de retención de humedad
- * Materia orgánica
- * Cationes intercambiables
- * Conductividad eléctrica
- * Cationes solubles
- * Aniones solubles
- * Porcentaje de saturación de bases
- * Color del suelo
- * Fósforo soluble en ácido cítrico
- * Retención de fósforo
- * Tamaño de partículas elementales
- * Carbonatos en el suelo
- * Carbonatos de calcio
- * Yeso
- * Medición de acidez extraíble
- * Medición de acidez y aluminios intercambiables
- * Hierro, aluminio, manganeso y silicio extraíbles

- * Análisis elemental de arcillas.

Aunque algunas de estas mediciones se pueden realizar con sensores, la mayoría de estas se realizan dentro de un laboratorio, por lo que no se podría determinar la fertilidad, salinidad o clasificación solo con sensores.

2.2. Sistemas empotrados para la medición de variables ambientales

Los sistemas empotrados o embebidos son sistemas diseñados para realizar funciones específicas, y cuyos componentes están integrados en una placa base, se piensa en estos sistemas como sistemas cerrados o que tiene una interfaz con el usuario limitada, el proceso principal se realiza con ayuda de un microcontrolador, comúnmente se diseñan para cumplir con tareas en tiempo real [63].

Además de controlar procesos, también son utilizados en comunicaciones y monitorización [63].

Inicialmente, un sistema empotrado se encontraba muy ligado a la aplicación concreta para la que fue diseñado, pero se ha ido cambiando con la aparición de los microprocesadores [64].

Un microprocesador está formado por un oscilador, la ALU (Unidad Aritmética Lógica) y registros. Estos no son utilizados de manera aislada, no tienen uso por sí mismos, sino que son integrados dentro de sistemas que les dan usos concretos, como los microcontroladores [65].

Los microcontroladores son circuitos integrados que pueden ser usados para diversos propósitos, ya que son programables, se compone de CPU, de una memoria, y periféricos. Pueden emplearse para el manejo de sensores, controladores, cerrojos electrónicos, relojes, alarmas, robots, entre otras aplicaciones [65].

La clasificación de microcontroladores se da de acuerdo con su arquitectura, memoria, grupo de instrucciones y bits:

- Según el tipo de memoria puede ser de memoria interna o externa.
- Según los bits de velocidad pueden ser de 8, 16 y 32 bits.

- Según el grupo de instrucciones pueden ser CISC-CISC y RISC-RISC.
- Según su arquitectura pueden ser Harvard y Von Neumann.

Las ventajas de usar microcontroladores son:

- Tamaño pequeño.
- Funciona como sustituto de otro circuito.
- Se pueden configurar de acuerdo con las necesidades.
- Es funcional en actividades complejas.
- Existen modelos para cada necesidad.
- Son de bajo costo.
- Un mismo circuito puede ejecutar distintas funciones.

Un microcontrolador se programa en lenguaje ensamblador. Por lo que cada microcontrolador tiene su conjunto de instrucciones. La curva de aprendizaje del lenguaje ensamblador es muy grande, para el ciclo de desarrollo de aplicaciones para sistemas embebidos esto es muy tardado, por lo tanto, se utiliza un lenguaje de alto nivel como Basic o C/C++, estos lenguajes son traducidos al lenguaje ensamblador mediante compiladores [65].

Los microcontroladores de 8 bits tienen limitación a la hora de realizar operaciones aritméticas, estos solo permitirían operaciones cuyos números de salida estén entre 0 y 255, también tienen menor velocidad de procesamiento, son muy baratos y fácil utilización, para proyectos en donde es necesaria la utilización de diversos periféricos un microcontrolador de 8 bits resultaría insuficiente, al integrar estos a una placa de circuito impreso es relativamente fácil, ya que no suelen tener más de 30 pines [65].

Un microcontrolador de 32 bits puede manejar 4 veces más datos que un microcontrolador de 8 bits, estos pueden ejecutar operaciones aritméticas con números sin signo desde 0 hasta 4,294,697,295, la principal ventaja de estos microcontroladores es su velocidad de procesamiento, suelen operar a cientos de MHz, esto se vuelve evidente al ejecutar aplicaciones con alto volumen de procesamiento de datos, si se trabaja en un proyecto que requiere mucha memoria RAM es posible que se tenga que utilizar un microcontrolador de 32 bits, estos suelen tener hasta 8 veces más RAM, tienen muchas más funcionalidades que los microcontroladores de 8 bits, ya que pueden manejar múltiples periféricos eficientemente, aunque con mayor consumo, diseñar una placa de circuito

impreso con estos microcontroladores suele ser complejo, ya que pueden tener más de 100 pines [66].

Existe gran cantidad de microcontroladores de 32 bits, los más destacados son PIC32, AVR y ARM, cada uno con sus propias características, en la tabla 11 se enlistan algunas de estas características.

Tabla 11. Comparativa de arquitecturas de microcontroladores de 32 bits.

PIC32	AVR	ARM
Fácil grabación	Memorias Flash y RAM no segmentadas	Diseñados para consumir la menor energía posible
Infinidad de software de programación	Gran cantidad de IDEs para programación	Gran cantidad de IDEs de programación
Gran diversidad de microcontroladores	Interfaz de programación simple ISP	Existe un estándar de programación
Necesita muchas instrucciones para una tarea en particular	Modos de ahorro de energía	Poco programa maligno para la plataforma
Costo medio	Costo menor a PIC	Por la venta de licencias el costo es muy bajo
Solo los fabrica Microchip	Solo los fabrica Microchip	Más de 200 fabricantes

2.3. Tecnologías para comunicación a Internet

En los últimos años, el IoT se ha vuelto una de las tecnologías más importantes. Mediante la información de bajo costo, la nube, bigdata, analítica y tecnologías móviles, las cosas físicas pueden compartir y recopilar datos prácticamente sin intervención humana. Con esta tecnología se ha hecho posible acceder a tecnologías de sensores de bajo costo y plataformas informáticas en la nube. El IoT ha ganado importancia a medida que nuestras vidas y negocios se han vuelto más complejos [67].

El Internet es una red compuesta por millones de ordenadores en el mundo, interconectados mediante una amplia infraestructura de telecomunicaciones, que permite el intercambio de información [68].

Actualmente, existen diversas formas de obtener acceso a Internet, como:

- Mediante línea telefónica: este método es el más antiguo, este acceso se realiza mediante un modem y una línea telefónica convencional. Esta es de baja velocidad, no logra superar el ancho de banda de los 56 kbps y no es estable, además al estar conectado a Internet por este medio no permitía que el usuario pudiera efectuar llamadas, por otro lado, es el método más simple de conexión [68].
- Mediante televisión por cable: La conexión por este medio es cada vez más popular, se utiliza la misma infraestructura que la del servicio de cable contratado, el desempeño del Internet depende del modem del usuario [68].
- Conexión por satélite: En esta se necesitan equipos específicos que suelen ser de costos elevados, se debe adquirir una antena capaz de captar la señal proveniente del satélite. Una ventaja es que se puede acceder a Internet en sitios remotos, no se necesita tener línea telefónica contratada, lo que la hace muy versátil al moverse de un sitio a otro, la mayor desventaja de esta conexión es la latencia, ya que suele encontrarse entre los 500 a 700 milisegundos, también la velocidad puede oscilar en función de las condiciones meteorológicas [68].
- Conexión por radio o inalámbricas: esta es una forma de extender una conexión de banda ancha a un lugar en donde no se disponga del servicio, mediante antenas que se encargaran de enviar y recibir la señal con los datos, para lograr mayores distancias se utilizan repetidores intermedios, estos se encargaran de que la señal no pierda calidad al llegar a las terminales. Sus ventajas son la capacidad de transmitir grandes cantidades de datos, bajo costo e instalación rápida [68].
- Conexiones 3G y 4G: Estas conexiones son cada vez mejor, son conexiones de banda ancha. Las ventajas de esta conexión son una mayor movilidad, velocidades similares a las redes de fibra óptica estándar, sin línea de teléfono fijo y una excelente cobertura en grandes ciudades, sus desventajas son que no está disponible en todos lados, se tiene limitaciones para la navegación, ya que tiene gigas limitados. No solo los teléfonos celulares son capaces de establecer conexión con redes 3G o 4G, existen módulos de expansión para

placas de desarrollo que permiten establecer esta comunicación, solo basta con introducirles un chip de alguna compañía para poder establecer una conexión, cabe resaltar que este chip debe ser funcional y deberá contener saldo a favor para poder acceder a la conexión. Algunos de estos módulos se muestran en la tabla 12 [68].

Tabla 12. Comparativa entre dispositivos 2G, 3G y 4G.

Modelo	SARA-R5	SIM7600A-H	FiPy	SIM800L
Fabricante	ublox	SIMCom	Pycom	SIMCom
Voltaje de alimentación (VDC)	3.3 ~ 4.4	3.4 ~ 4.2	3.3 ~ 5.5	3.4 ~ 4.4
Consumo máximo (mA)	395	650	200	455
Comunicación	UART, USB, I ² C y GPIO	USB, UART e I ² C	UART	I ² C, UART y USB
Red	LTE (M1 y NB2)	LTE (B2, B4 y B12) y WCDMA (B2, B5)	LTE (M1 y NB1)	GPRS
Capacidad de comunicación (kbps)	1200	1500	375	85
Temperatura de operación (°C)	-20 ~ 65	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85
Precio de herramienta de desarrollo (dólares)	\$163.00	\$194	\$66.00	\$13.00

- Redes LPWAN: Estas redes son de baja potencia y consumo energético reducido, estas cubren grandes superficies y son una buena alternativa ante las actuales tecnologías de comunicación móvil. La tecnología LPWAN se desarrolla en torno a tres ejes principales, bajo consumo energético, gran alcance y amplia distancia entre los nodos y la antena, reducida capacidad de transmisión [68]. Actualmente, existe infinidad de compañías que proporcionan este tipo de servicio, pero principalmente son tres, cada una de estas tiene sus ventajas e inconvenientes:
 - Sigfox: Esta red permite conectar objetos utilizando las bandas electromagnéticas no licenciadas, las cuales no requieren autorización especial para su utilización, tiene la necesidad de comunicación entre los objetos (M2M), utiliza la tecnología denominada Ultra Narrow Band, la cual funciona con bajas tasas de transferencia (10 ~ 1000 bps) [69]. Para poder establecer una conexión con esta tecnología existen

dos formas, la primera opción es de pago, actualmente la suscripción anual ronda los \$17.00 euros por dispositivo, esta suscripción permite un envío máximo de 140 mensajes por día, la segunda opción es adquirir un dispositivo que contenga una suscripción a este servicio, las cuales son de un año, en México actualmente solo se puede usar esta tecnología mediante la segunda opción y la cobertura en la capital de Puebla es excelente como se puede observar en la figura 2. Existen diferentes dispositivos que permiten la conexión a este servicio, en la tabla 13 se listan los dispositivos más usados.

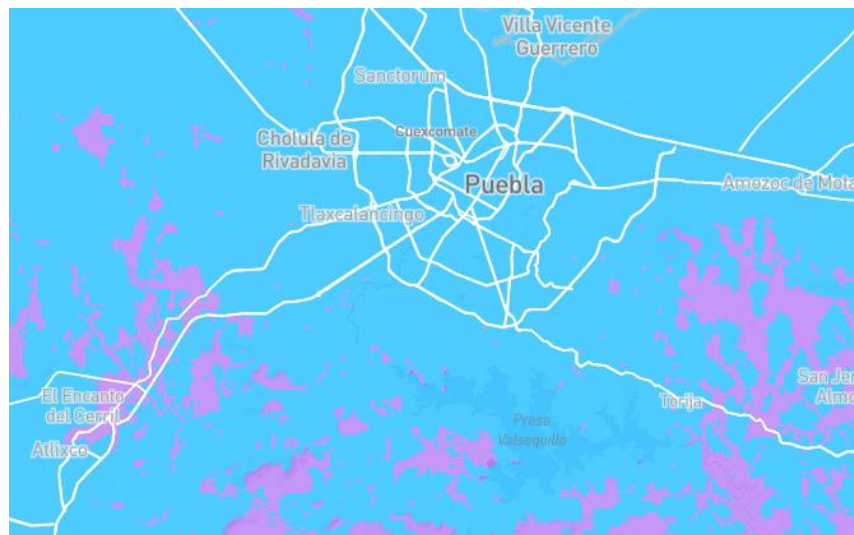


Figura 2. Mapa de cobertura de la red Sigfox sobre la capital de Puebla [69].

Tabla 13. Comparativa entre dispositivos utilizados para comunicación Sigfox.

Modelo	LoPy4	FiPy	MKRFOX1200	BlackMoon	BRKWS01
Fabricante	Pycom	Pycom	Arduino	Blackiot	SNOC
Voltaje de alimentación (VDC)	3.3 ~ 5.5	3.3 ~ 5.5	3.3 ~ 5.0	1.8 ~ 3.6	1.8 ~ 3.6
Capacidad de comunicación (kbps)	375	375		500	
Consumo máximo (mA)	200	200		10	55
Comunicación	UART	UART	UART, SPI e I ² C	UART	UART
Temperatura de operación (°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 85		-40 ~ 85	-30 ~ 85
Precio (dólares)	\$46.00	\$69.00	\$52.00	\$35.00	\$27.00
Suscripción (años)	1	1	1		1

- LoRaWAN: es un protocolo de red que usa la tecnología LoRa, para redes de baja potencia y área amplia. Esta red se compone de gateways que se encargan de recibir y enviar información a los nodos y los nodos que son los dispositivos finales que envían y reciben información. Es una conexión bidireccional encriptada, de bajo consumo de energía, largo alcance de comunicación, baja velocidad de datos, baja frecuencia de transmisión, movilidad y servicio de localización. Permite la interconexión de objetos sin la necesidad de instalaciones complejas, proporciona amplia libertad de uso para el desarrollador [70]. Para poder conectarse a esta red se necesita un gateway cercano al dispositivo, en la figura 3 se muestra el mapa de cobertura en donde se observa que la ciudad de Puebla tiene uno de estos gateway. Para hacer uso de esta tecnología se necesita de módulos capaces de realizar esta conexión, en la tabla 14 se muestran algunos de los más utilizados.

Tabla 14. Comparativa dispositivos para comunicación LoRaWAN.

Modelo	LoPy4	FiPy	Onethinx Core
Fabricante	Pycom	Pycom	Onethinx
Voltaje de alimentación (VDC)	3.3 ~ 5.5	3.3 ~ 5.5	1.8 ~ 3.6
Capacidad de comunicación (kbps)	375	375	
Consumo máximo (mA)	200	200	250
Comunicación	UART	UART	GPIO
Temperatura de operación (°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85
Precio de herramienta de desarrollo (dólares)	\$46.00	\$69.00	\$81.00

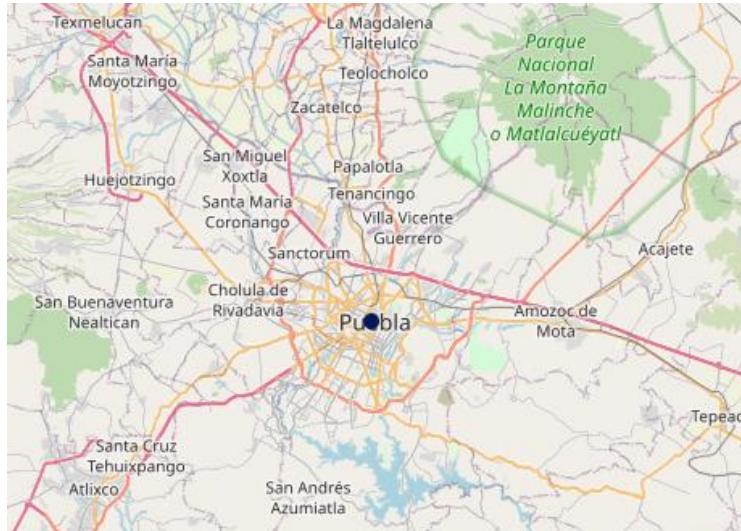


Figura 3. Cobertura de la red LoRaWAN en la capital de Puebla [70].

- NB-IoT: esta tecnología es proporcionada por las mismas compañías de telecomunicaciones. Esta tecnología funciona por proyectos, es decir que el operador de datos móviles es quien estructura una red dedicada, está basado en tarjetas SIM de pago para acceder a la red. Existen herramientas de desarrollo para esta red como el dispositivo FiPy de Pycom [71].
- Bluetooth LE: esta es una tecnología de comunicación de corto alcance, esta tecnología permite el envío de datos a una distancia máxima de 100 metros, se puede establecer conexión simultánea entre varios dispositivos, no es necesario utilizar cables para establecer conexión, no es necesario orientar los dispositivos, se puede implementar prácticamente en cualquier sitio. Existen diversos dispositivos para poder establecer este tipo de conexiones, por lo que es de fácil implementación [72].

2.4. Herramientas de monitoreo *dashboard*

Actualmente para una buena gestión es necesario contar con información de los diversos procesos que se tienen, se estima que las personas son un 89% más eficientes en la resolución de problemas cuando son analizados los datos visualmente [73].

Los *dashboard* son tableros inteligentes, en donde la intervención humana se reduce al mínimo, ya que los datos son actualizados continuamente en tiempo real, con esta tecnología no es necesario la redacción de informes una y otra vez, ya que los datos siempre estarán actualizados. Estas herramientas se pueden personalizar para visualizar diversos datos de forma ordenada en formato de tablas, gráficas u otros datos, como se muestra en la figura 4, esto ayuda a reducir el tiempo de análisis de la información [73].



Figura 4. Ejemplo de un *dashboard* creado en DashThis [73].

Las herramientas de gestión de la información se han vuelto muy importantes ya que facilitan la toma de decisiones [73].

Para crear un tablero de datos en general se deben seguir estos pasos:

- Definir el propósito del tablero.
- Identificar los procesos que se monitorearan.
- Seleccionar los objetivos de rendimiento.
- Elegir los indicadores.
- Estructurar el tablero.
- Actualizar constantemente el tablero de acuerdo con las necesidades.

Existen diversas plataformas para el diseño de tableros, tanto de pago como gratuitas, en cuanto a las gratuitas por lo regular limitan la actualización de datos y los controles que se pueden utilizar, las plataformas de pago proporcionan todos los elementos necesarios para

una buena gestión de la información, en estos existen planes mensuales que pueden ir desde los 25 dólares [73]. Entre las plataformas más utilizadas para crear estos tableros se encuentran:

- Cyfe: es una plataforma muy completa. Se puede conectar muchas fuentes y es muy fácil de utilizar y ofrece la posibilidad de redimensionar los widgets.
- Chart.io: esta plataforma permite conectar una base de datos externa con MySQL.
- Klipfolio: Permite ver una analítica de la comparación de los datos mensuales, además su puede interaccionar con todos los gráficos.
- DashThis: es una herramienta con una buena visualización, muy completa y avanzada.
- Power BI: este es un panel empresarial y una herramienta de administración de datos.

2.5. Sistemas de posicionamiento global (GPS)

Este es un sistema de radionavegación, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación y cronometría gratuita e ininterrumpidamente en todo el mundo [74].

Tabla 15. Comparativa entre módulos GPS.

Modelo	NEO-6	BN-180	NEO-7	BN-880
Fabricante	u-blox	Beitian	u-blox	Beitian
Tipo	GPS	GNSS	GNSS	GNSS
Comunicación	UART, USB y SPI	UART	UART, USB y SPI	UART
Sensibilidad (dBm)	-160	-167	-162	-167
Resolución (m)	2.5	2.0	2.5	2.0
Velocidad (m/s)	500	515	500	515
Voltaje de alimentación (VDC)	1.75 ~ 3.6	3.6 ~ 5.5	2.7 ~ 3.6	3.6 ~ 5.5
Consumo (mA)	100	50	100	50
Temperatura de operación (°C)	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85	-40 ~ 85
Precio (dólares)	\$12.00	\$26.00	\$38.00	\$31.00

La tecnología GPS se compone de tres elementos básicos: los satélites, las estaciones terrestres y los receptores GPS, actualmente están al alcance los pequeños receptores de GPS portátiles, de estos últimos actualmente existen módulos para integrar en proyectos, en la tabla 15 se enlistan algunos de los más comunes y utilizados [74].

El GPS es indispensable para los sistemas de transporte, ya que sirven de apoyo a la navegación marítima, terrestre y aérea, servicios de emergencia en casos de desastres dependen del GPS para localización y coordinación de misiones para salvar vidas, en las actividades cotidianas como operaciones bancarias o incluso redes de distribución eléctrica, son más eficientes gracias a la exactitud proporcionada por el GPS [74].

La precisión de los dispositivos GPS depende del número de satélites disponibles, el entorno urbano, obstrucción física, efectos atmosféricos, cálculos numéricos erróneos e interferencias artificiales. La precisión tiende a ser mejor en zonas abiertas sin edificios adyacentes [74].

2.6. Tecnologías actuales de las baterías eléctricas

Las baterías eléctricas son artefactos compuestos por celdas electroquímicas capaces de convertir la energía química en su interior en energía eléctrica, de esta manera se genera corriente continua y puede ser utilizada para alimentar circuitos eléctricos [75].

El desarrollo de las baterías va de la mano con el avance tecnológico de la electrónica. La capacidad de una batería está determinada por la naturaleza de su composición [75].

Existen muchos tipos de baterías, como:

- Baterías alcalinas: son comúnmente desechables, estas emplean hidróxido de potasio como electrolito. Estas son pilas muy estables, pero de corta vida [75].
- Baterías de ácido-plomo: son usadas comúnmente en vehículos y motocicletas, son pilas recargables. El electrolito empleado es ácido sulfúrico [75].
- Baterías de níquel: estas son baterías de bajo costo y pésimo rendimiento [75], estas dieron paso a nuevas baterías como:
 - Níquel-hierro.

- Níquel-cadmio.
- Níquel-hidruro.
- Baterías de iones de litio (Li-ION): estas emplean sal de litio como electrolito, son muy usadas en la electrónica portátil, son de gran densidad energética, livianas, tamaño reducido y buen rendimiento, pero su vida útil máxima es de tres años [75].
- Baterías de polímero de litio (LiPo): son una variante de las baterías de litio, pero con una mejor densidad de energía y tasa de descarga, pero quedan inutilizables si pierden su carga por debajo del 30 % por lo que no se debe descargar por completo [75].
- Baterías de litio cloruro de tionilo: estas son las pilas con mayor voltaje y energía, la mayor vida de almacenamiento y la menor tasa de auto descarga. Son ideales para dispositivos que requieren una fuente de energía de larga duración [75].

La investigación realizada en este capítulo ayudo a determinar las variables que son sensadas por el sistema desarrollado, así como los sensores apropiados para cada variable, también influyo en la selección de la red apropiada para enviar la información recabada a la base de datos en la nube por último se pudo determinar el microcontrolador apropiado para albergar todas las conexiones necesarias. En el siguiente capitulo se describe el desarrollo del sistema de monitoreo ambiental desde la selección de hardware, diseño de la placa de circuito impreso, desarrollo del firmware, montaje de componentes, creación de la página Web de monitoreo y diseño de la aplicación de configuración para dispositivos móviles.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se describe el proceso para el diseño del dispositivo empotrado de medición ambiental. Este proceso consta de 4 etapas: primero se realizó la selección del hardware necesario para integrar todo el sistema de monitoreo, analizando las normas de medición para variables ambientales, que establecen los métodos de medición y límites máximos permisibles, con la finalidad de determinar las variables y sensores apropiados para integrar el sistema, se analizaron los sistemas de comunicación inalámbrica existentes para determinar las redes apropiadas para comunicación con la base de datos en la nube y para la configuración del sistema; analizando el método de comunicación de cada componente seleccionado, se determina un microcontrolador que pueda albergar todos los componentes elegidos, después se seleccionó el software necesario para desarrollar el firmware del sistema de adquisición, el firmware del módulo de comunicación Wifi, la página Web de monitoreo y la aplicación para dispositivos inteligentes, posteriormente, se llevó a cabo la integración del prototipo con el hardware seleccionado, desarrollando el firmware del sistema. Por último, se realizó el diseño de la página Web y la aplicación para dispositivos móviles, en la que se observan gráficamente los datos obtenidos por el sistema de monitoreo ambiental y se realiza la configuración.

3.1. Selección de hardware

Se realizó una investigación y análisis de los sistemas de monitoreo ambiental que existen en el mercado, así como de la Norma Oficial Mexicana para sistemas de monitoreo ambiental, estos datos fueron considerados como base en el desarrollo del sistema de monitoreo ambiental.

Considerando la investigación efectuada en el capítulo 2, se procedió con la selección de los componentes físicos que integran el sistema, considerando la futura integración de nuevos sensores y sistemas de comunicación.

3.1.1. Sensores de medición

Se han seleccionado 7 variables ambientales, de acuerdo con las normas oficiales mexicanas, se seleccionaron variables que pueden ser medidas con sensores.

Algunas variables que no se encuentran dentro de las normas, pero que son de ayuda para estudios de cambio climático, también se incluyeron, las variables con las que se trabajó se enlistan a continuación:

1. Temperatura en aire
2. Temperatura en agua
3. Monóxido de carbono
4. Dióxido de carbono
5. Partículas suspendidas PM10
6. Partículas suspendidas PM2.5
7. Sólidos disueltos totales en agua.

Las variables seleccionadas son de ayuda en la realización de estudios de calidad del aire y agua, y en estudios de cambio climático, para poder seleccionar los sensores útiles para la monitorización de variables ambientales, se realizó una investigación, en la que se tomó en consideraciones características como:

- Resolución
- Precisión
- Voltaje de alimentación

- Consumo de corriente
- Tiempo de calentamiento
- Tiempo de respuesta
- Intervalo de detección
- Temperatura de detección
- Datos de salida o tipo de comunicación
- Vida útil.

Esta investigación se encuentra en el capítulo 2, tablas 1 a 10, con base en estos datos recabados fueron seleccionados los siguientes sensores:

- Para temperatura de agua fue utilizado el sensor tipo sonda DS18B20, este proporciona mediciones de temperatura de 9 a 12 bits, se comunica a través de una sola línea de datos, este sensor permite la comunicación de varios sensores DS18B20 a través del mismo bus de comunicaciones, el sensor tiene grado de protección IP68, por lo que puede ser sumergido por completo, la figura 5 muestra el sensor usado para el diseño del sistema.



Figura 5. Sensor tipo sonda DS18B20.

- Para temperatura de aire se utilizó el sensor BMP180, ya que puede proporcionar mediciones de altitud, presión barométrica y temperatura, es de bajo consumo de energía, permite la comunicación a través de los protocolos de comunicación I²C o SPI, la figura 6 muestra el sensor BMP180, pero este no ha sido empleado, ya que para el sistema fue utilizado el módulo *GY/BM*, que integra este sensor, el cual se muestra en la figura 7.



Figura 6. Sensor BMP180.

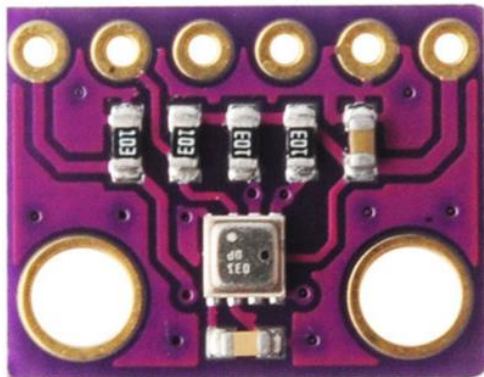


Figura 7. Módulo GY/BM.

- Para monóxido de carbono fue integrado el sensor MICS5524, es un sensor tipo MEMS, proporciona mediciones de monóxido de carbono y gas natural, las mediciones entregadas por este sensor son analógicas por lo que deben ser leídas mediante un puerto ADC, la figura 8 muestra el sensor MICS5524, del mismo modo para el sistema ha sido utilizado el módulo VOC Gas-Sensor, que integra este sensor, este módulo se muestra en la figura 9.

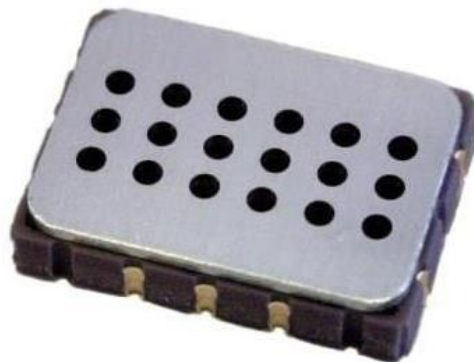


Figura 8. Sensor MICS5524.

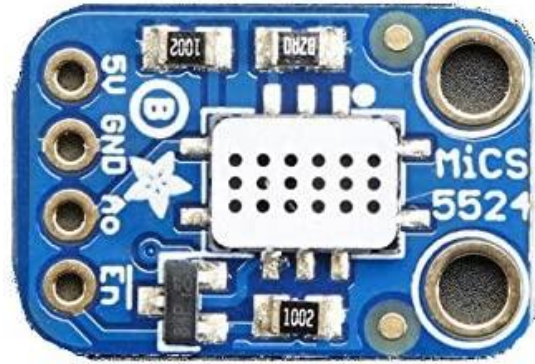


Figura 9. Módulo VOC Gas-Sensor.

- Para dióxido de carbono se usó el sensor MH-Z19, es un sensor tipo NDIR (Non Dispersive Infrared Detector), que mide las concentraciones de bióxido de carbono en el aire, además posee compensación por temperatura, permite la comunicación de las mediciones a través del protocolo UART o PWM, la figura 10 muestra el sensor utilizado para el diseño del sistema.



Figura 10. Sensor MH-Z19B.

- Para partículas suspendidas PM10 y PM2.5 fue utilizado el sensor SDS011, este sensor utiliza el principio de dispersión láser, puede obtener concentraciones de partículas de entre 0.3 a 10 μm , entrega las mediciones a través del protocolo UART o PWM, la figura 11 muestra el sensor usado para el diseño del sistema.



Figura 11. Sensor SDS011.

- Para TDS (sólidos disueltos totales en agua) fue utilizado el sensor KS0429, calcula una medición de la conductividad que depende de la cantidad global de minerales disueltos en el agua, entrega mediciones a través de una salida analógica, en la figura 12 se muestra el sensor empleado para el sistema.



Figura 12. Sensor KS0429.

3.1.2. Sistemas de comunicación

Para poder seleccionar un sistema que brinde las mejores comodidades, en el capítulo 2, subtema “Tecnologías para comunicación a Internet”, se enlistaron las características de los sistemas actuales que permiten realizar una comunicación con una base de datos en la nube.

Con base en la investigación, se llevó a cabo una comparativa entre los diferentes dispositivos que actualmente existen para cada tecnología de comunicación, esta

investigación se enlista en las tablas 12, 13 y 14 del capítulo 2, revisando características como:

- Voltaje de alimentación
- Consumo de corriente
- Comunicación con MCU
- Tipo de red
- Tasa de transferencia
- Temperatura de operación.

Para enviar los datos recabados por el sistema de monitoreo hacia una base de datos, se utilizaron las redes Wifi y LPWAN.

Para poder realizar la comunicación del sistema utilizando la red Wifi, se implementó el módulo ESP-12F, la comunicación con el sistema es mediante el protocolo UART, para la etapa de pruebas se empleó la tarjeta de desarrollo NODEMCU, que integra dicho módulo, este se muestra en la figura 13.

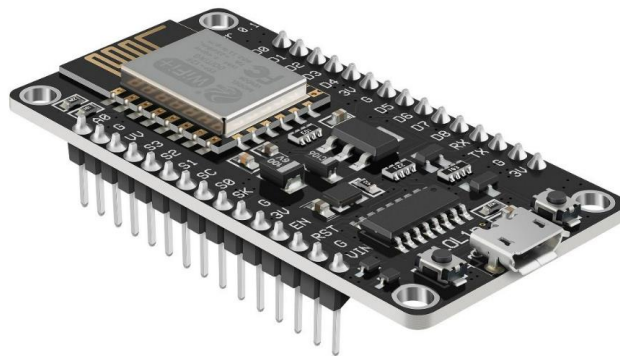


Figura 13. Módulo NODEMCU.

Para el envío de datos a través de las redes LPWAN, se utilizó la red de Sigfox, mediante la integración del módulo SFM11R2D de WISOL, ya que como se pudo observar en la figura 2 del capítulo 2, existe una amplia cobertura de esta red en la zona de Puebla capital, este módulo utiliza las bandas de frecuencia entre 902 MHz a 928 MHz, lo que es ideal para ser utilizado en México, el alcance de conectividad varía desde 2 km hasta 100 km. La figura 14 muestra el módulo utilizado para el sistema.



Figura 14. Módulo SFM11R2D.

Para la configuración del sistema de monitoreo se integró un módulo Bluetooth 2.0 HC-05, este tiene un alcance máximo de 10 metros, el módulo usado en el sistema se muestra en la figura 15.

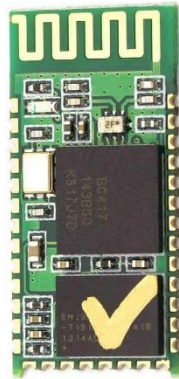


Figura 15. Módulo Bluetooth 2.0 HC-05.

3.1.3. Microcontrolador

Para poder seleccionar el microcontrolador adecuado, se realizó una investigación sobre las características generales de los microcontroladores de 32 bits, el resultado de dicha investigación se presenta en la tabla 11 del capítulo 2.

De acuerdo con la investigación realizada, se seleccionó la tecnología ARM, en específico Cortex-M, para poder realizar una selección más precisa se revisaron las características de los sensores y tecnologías de comunicación seleccionados, ya que la forma en que estos se comunican con el microcontrolador determina la cantidad de periféricos de comunicación, frecuencia, entradas y salidas digitales necesarios para albergar todas las conexiones eficientemente.

De acuerdo con esto, fue seleccionado el microcontrolador STM32F411CEU6, aunque este microcontrolador solo posee 3 UARTS y son necesarios 6 de estos puertos, esto se logró resolver multiplexando la salida con ayuda de un multiplexor/demultiplexor dual de 4 canales analógicos (CD4052), lo que es perfecto para integrar más elementos en un futuro, en la figura 16 se muestra el multiplexor utilizado en el sistema. La figura 17 muestra la tarjeta de desarrollo utilizada para las pruebas.

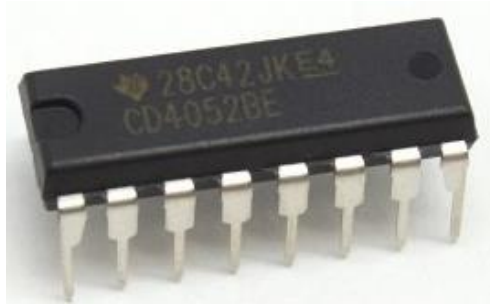


Figura 16. Multiplexor/Demultiplexor dual de 4 canales analógicos.

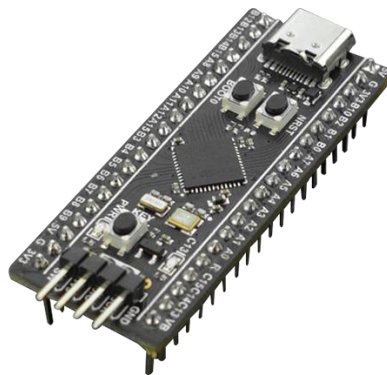


Figura 17. Tarjeta de desarrollo BlackPill.

Para brindar a los datos la localización en la que fue tomada la muestra, fue seleccionado el módulo NEO-7M, ya que este es de tipo GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite), lo cual lo hace más preciso que un sistema GPS convencional, este se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo UART, en la figura 18 se muestra el módulo utilizado.



Figura 18. Módulo GNSS NEO-7M.

3.2. Selección de software

Considerando el hardware seleccionado, se procedió a seleccionar los programas necesarios, considerando si son de uso gratuito o tienen costo y las limitaciones que se tiene con cada uno de estos.

Para programar el microcontrolador seleccionado se utilizó el software de STM32CubeIDE de la empresa STMicroelectronics, ya que este es un software gratuito todo en uno, la programación es en lenguaje C/C++ y es perfecto para la cantidad de elementos que se integraron al sistema.

Para programar el módulo de comunicación Wifi se seleccionó el IDE de Arduino, porque este proporciona una serie de bibliotecas que facilitan la programación de estos dispositivos.

Como gestor de base de datos fue seleccionado Firebase de la empresa Alphabet, puesto que este proporciona una base de datos en tiempo real, y proporciona una API (*Application Programming Interface*), que permite que la información de las aplicaciones sea sincronizada y almacenada en su nube.

Para el *dashboard* del sistema se optó por realizar una página Web HTML ya que la API de Firebase habilita integración con JavaScript y de esta forma poder acceder a los datos almacenados, con esto se pudo representar cada variable sensada de diversas formas, sin limitaciones.

Por último, para desarrollar la aplicación de configuración del sistema de monitoreo fue seleccionado el entorno de programación de App Inventor, pues facilita el desarrollo de aplicaciones Android.

3.3. Integración del prototipo

Durante la integración se realizó primero la conexión de los sensores y módulos de comunicación con el microcontrolador, siguiendo los esquemas de conexión especificados en las hojas de datos de cada módulo, posteriormente se procedió a realizar el control de cada módulo integrado para poder obtener la información de estos, una vez obtenidos estos datos se realizó la conexión a la base de datos para posteriormente obtener los datos en la página Web desarrollada.

3.3.1. Etapa eléctrica

Para integrar cada módulo se ha verificado el protocolo de comunicación utilizado para enviar los datos hacia el microcontrolador y a la par se comenzó con el diseño de la parte esquemática de la placa de circuito impreso.

El sensor DS18B20 se comunica a través de un solo bus de datos, sin embargo, para que este bus tenga una buena corriente para realizar una correcta conversión de temperatura fue necesario colocar una resistencia de pull-up. La figura 19 muestra el esquema de conexión realizado para el sistema.

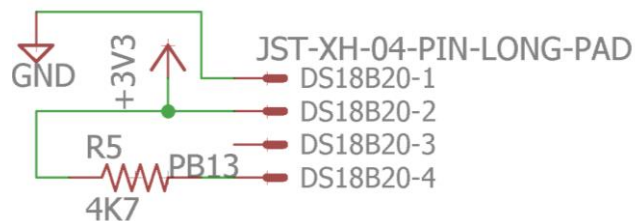


Figura 19. Esquema de conexión del sensor DS18B20.

La comunicación con el sensor BMP180 se realiza mediante el protocolo de comunicación I²C, como este sensor puede ser comunicado mediante dos protocolos

distintos, para poder seleccionar la interfaz I²C es necesario conectar el pin CSB a VDD, ya que al alimentar el sensor si se detecta un nivel alto se activa la interfaz I²C, esta interfaz trabaja con direcciones en los dispositivos. Este sensor tiene dos direcciones las cuales son seleccionadas con el pin SDO. Se trabajó con la dirección 0x76, también se debe colocar las resistencias pull-up de protección de la comunicación serie I²C, por último, se colocan capacitores a la alimentación como protección, el módulo que integra el sensor ya contiene todas las conexiones necesarias por lo que solo es necesario alimentarlo y realizar las conexiones hacia el microcontrolador. En la figura 20 se muestra esta conexión.

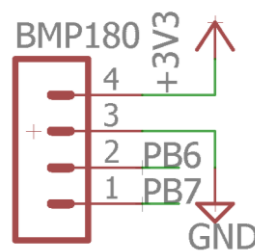


Figura 20. Configuración para comunicación I²C del sensor BMP180.

El sensor MICS5524 entrega una señal analógica, para poder leer esta señal es necesario colocar una resistencia de carga pull-down, al igual que el sensor anterior, el módulo utilizado ya tiene esta configuración y solo es necesaria la alimentación eléctrica y las conexiones con el microcontrolador. En la figura 21 se muestra la conexión realizada en el sistema.

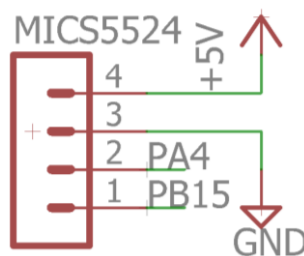


Figura 21. Diagrama esquemático para el sensor MICS5524.

Para poder utilizar el sensor MH-Z19 no es necesario utilizar ninguna configuración especial, este sensor está listo para ser integrado en el sistema, las mediciones de este sensor pueden ser obtenidas mediante el protocolo de comunicación UART o PWM, para el desarrollo del sistema fue utilizado el protocolo UART. La figura 22 muestra el esquema de conexiones de este sensor.

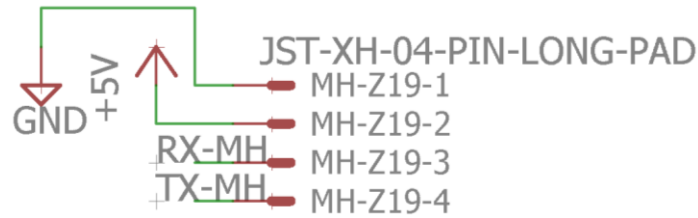


Figura 22. Esquema de conexión del sensor MH-Z19.

Al igual que el sensor MH-Z19, el sensor SDS011 ya está listo para ser integrado al sistema, del mismo modo, entrega las mediciones a través de protocolo UART o PWM, en este caso se utilizó el protocolo UART para obtener las mediciones. La figura 23 muestra el esquema de conexión del sensor SDS011.



Figura 23. Esquema de conexiones del sensor SDS011.

En el caso del sensor TDS se utilizó un módulo que ya está preparado para integrarse directamente al sistema. En la figura 24 se muestra la conexión realizada para funcionar con el sistema de adquisición.



Figura 24. Diagrama de conexión del módulo TDS.

Para realizar la conexión del módulo ESP-12F fue necesario leer cuidadosamente la hoja de datos de éste, ya que es necesario utilizar cierta configuración de resistencias y capacitores para hacer que funcione correctamente, este módulo se comunica con el microcontrolador mediante protocolo UART. La figura 25 muestra el diagrama esquemático de configuración usado para el desarrollo del sistema.

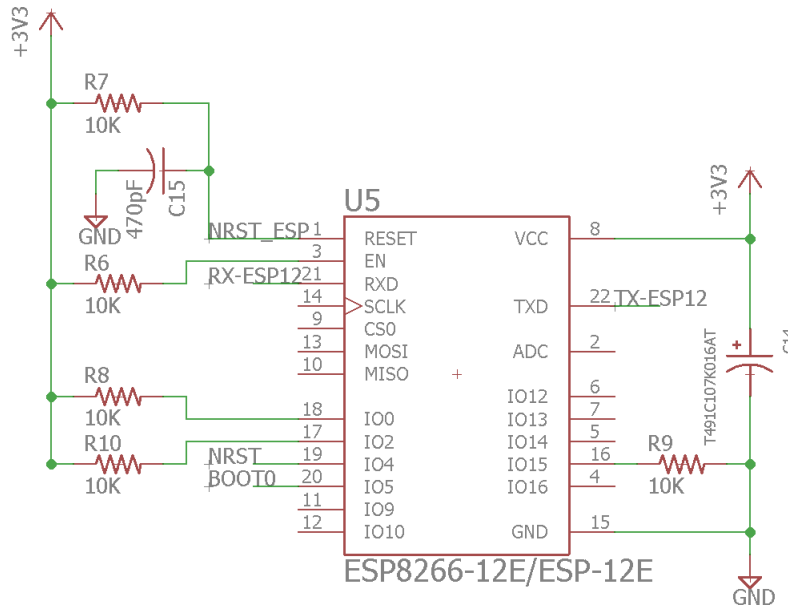


Figura 25. Diagrama esquemático del módulo ESP-12F.

El módulo SFM11R2D se comunica a través de protocolo UART, para poder utilizarlo no fue necesario realizar conexiones extra, ya que está listo para ser integrado. La figura 26 muestra el esquema de conexión con el microcontrolador.

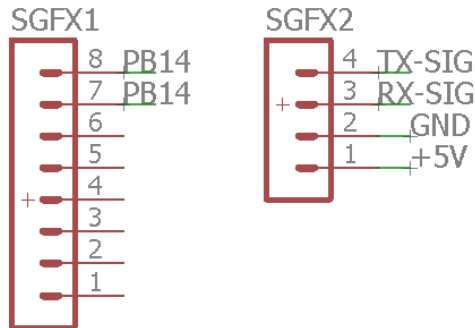


Figura 26. Diagrama de conexiones del módulo SFM11R2D.

El módulo Bluetooth HC-05 tampoco necesita conexiones extras, ya que este puede trabajar perfectamente con el microcontrolador, este se comunica mediante protocolo UART. En la figura 27 se muestra el diagrama de conexiones del módulo.

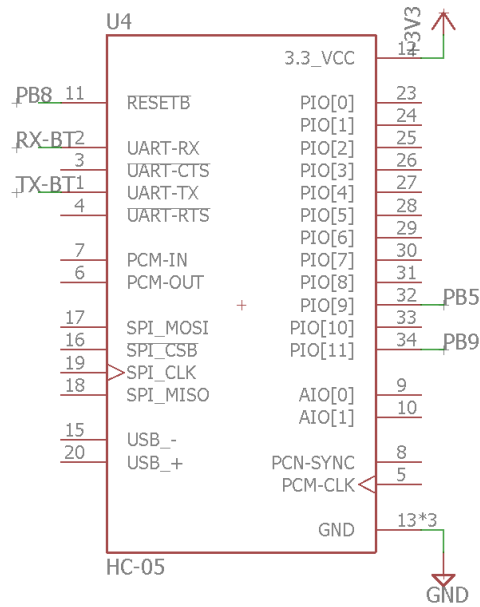


Figura 27. Diagrama esquemático del módulo HC-05.

El módulo GNSS NEO-7M no necesita de conexiones adicionales para funcionar, solo es necesario realizar la conexión con el microcontrolador y esperar los datos a través del protocolo UART. En la figura 28 se muestra el diagrama de conexión del módulo GNSS.

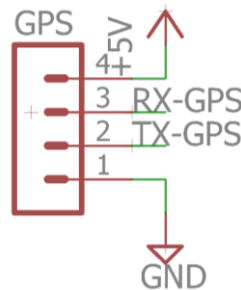


Figura 28. Diagrama de conexión del módulo NEO-7M.

Se integró una memoria W25Q32 de 4 MB, esta se controla mediante el protocolo SPI, dentro de esta se almacena la configuración del Wifi, de las variables que se deben leer, los intervalos de medición y si el sistema pierde conexión con la base de datos, se almacenará temporalmente la información recabada por el sistema, hasta recuperar esta conexión. En la figura 29 se muestra el diagrama de conexiones realizado para el sistema.

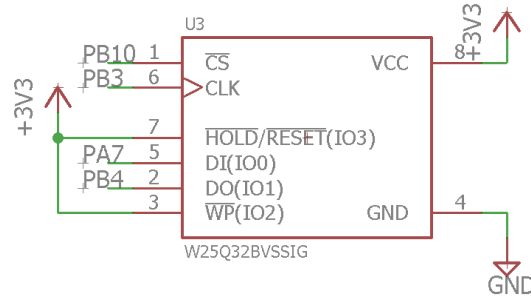


Figura 29. Diagrama de conexiones de la memoria SPI W25Q32.

Como se mencionó anteriormente, ya que se está sobrepasando el número de puertos UARTS disponibles en el microcontrolador, se utilizaron 2 multiplexores/demultiplexores duales de 4 canales analógicos. En la figura 30 se muestra el diagrama eléctrico utilizado para el sistema.

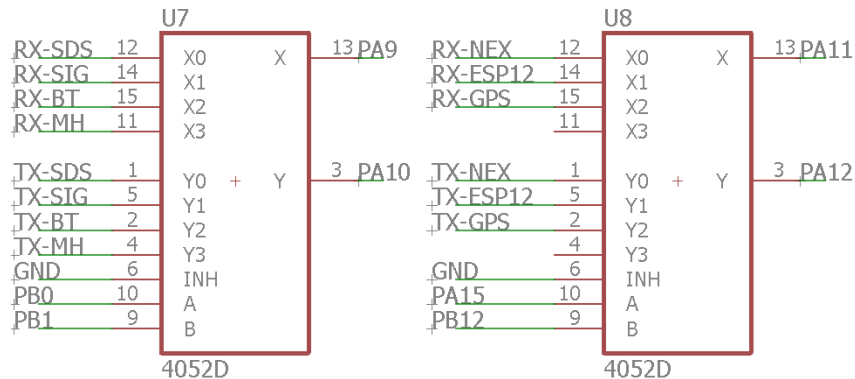


Figura 30. Diagrama de conexiones de los multiplexores CD4052.

Se ha adicionado un LED WS2812B al sistema, en este se muestran errores mediante parpadeos. El diagrama de conexión se muestra en la figura 31.

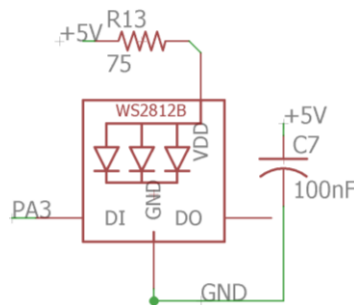


Figura 31. Diagrama de conexión de LED indicador WS2812B.

Para la etapa de alimentación del sistema, se tienen dos opciones, alimentándolo directamente con un eliminador de 5 VCD a 1 A o utilizando una batería. En la figura 32 se muestra el esquema eléctrico de esta etapa.

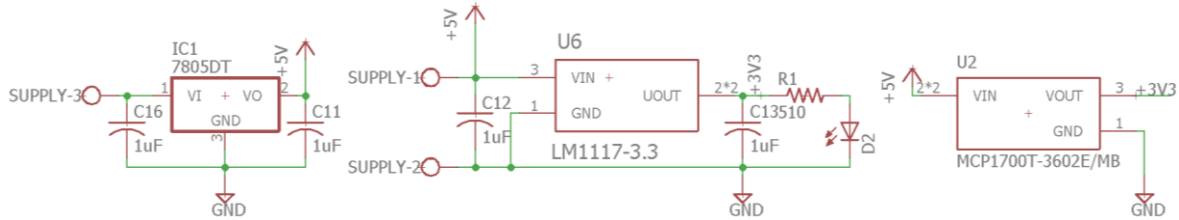


Figura 32. Esquema eléctrico de la etapa de alimentación.

Las conexiones necesarias para el microcontrolador se muestran en la figura 33, en la figura 34 se muestra las conexiones físicas realizadas de los diferentes módulos con la tarjeta de desarrollo. En la figura 35 se muestra el esquemático eléctrico completo del sistema de monitoreo ambiental.

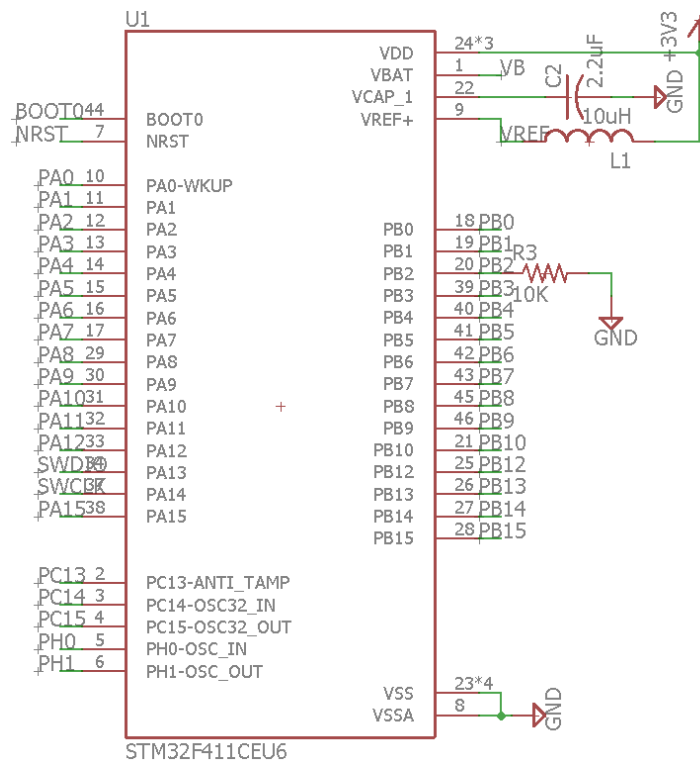


Figura 33. Esquema de conexiones de los módulos con el microcontrolador.

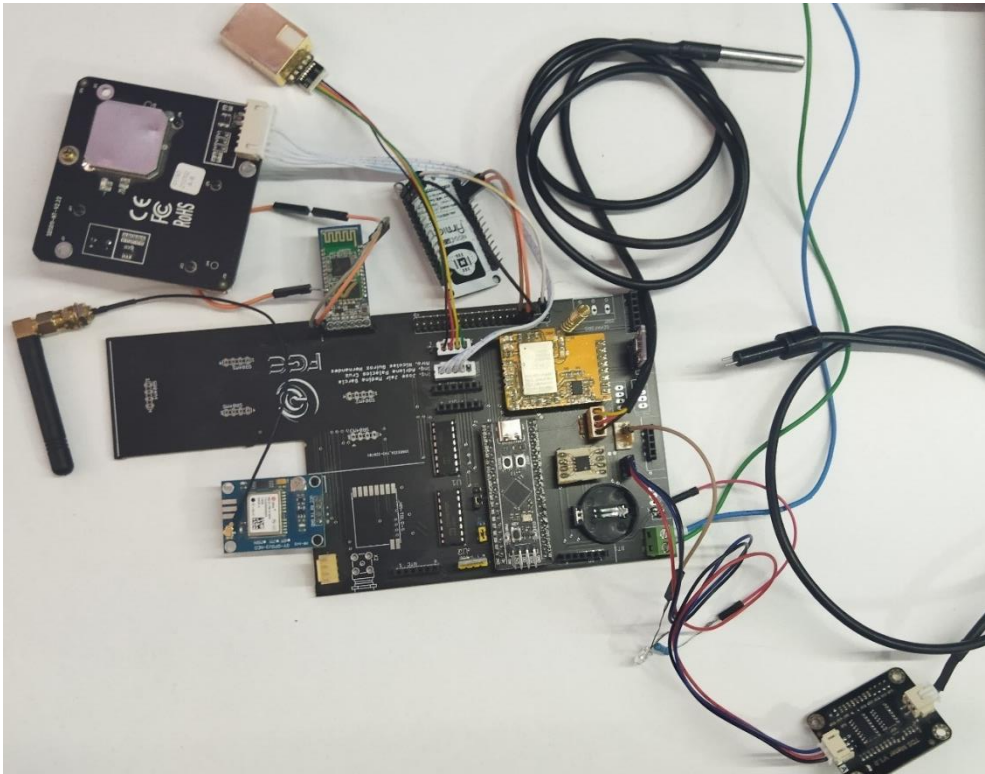


Figura 34. Conexión física de los módulos al microcontrolador.

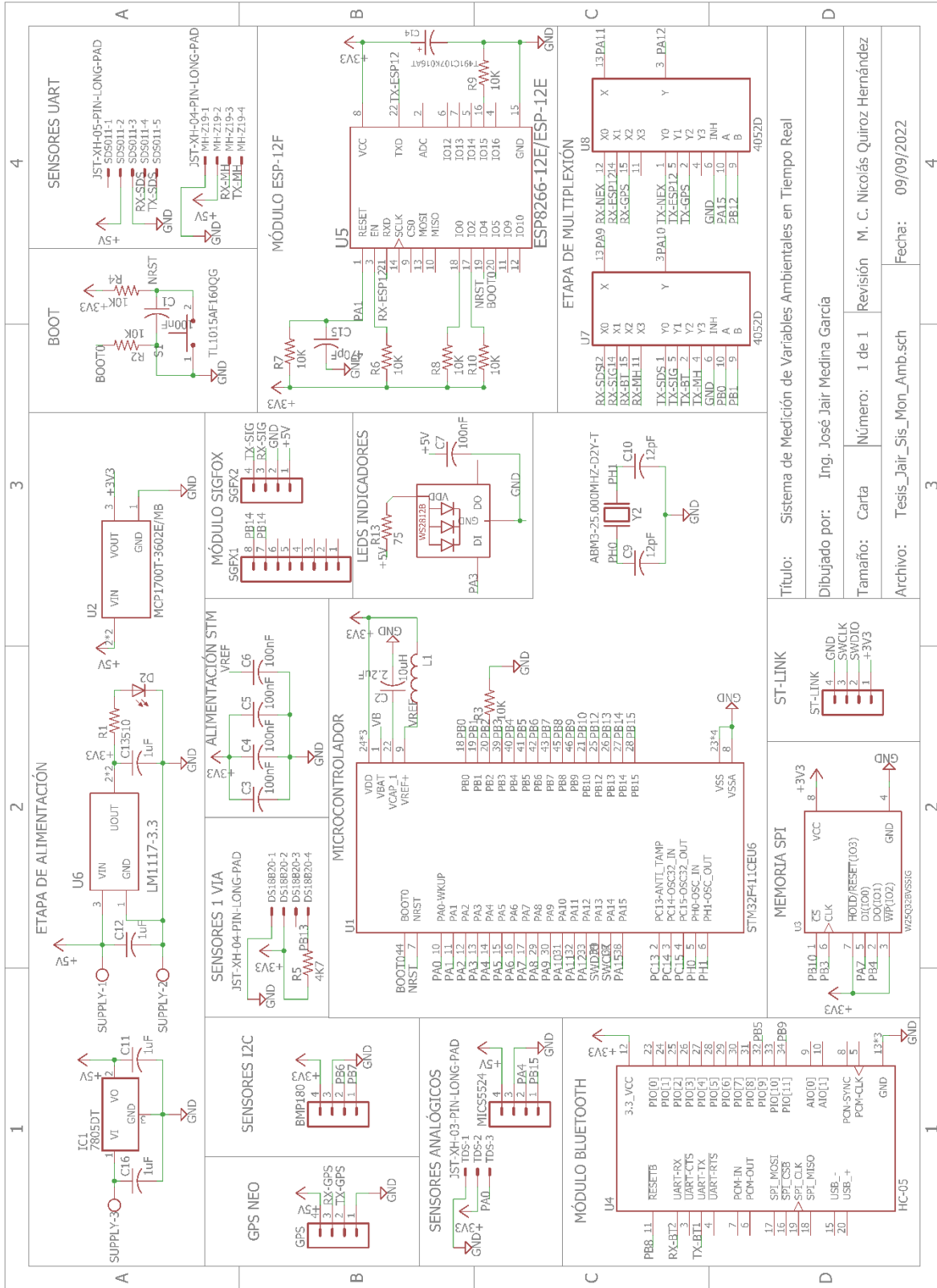


Figura 35. Circuito eléctrico completo del sistema de monitoreo.

3.3.2. Etapa de software

Se utilizó el programa STM32CubeIDE para desarrollar el código de programación del microcontrolador, se realizó un diagrama de flujo el cual se siguió para integrar todos los componentes del sistema dentro de la programación. Este se muestra en la figura 36.

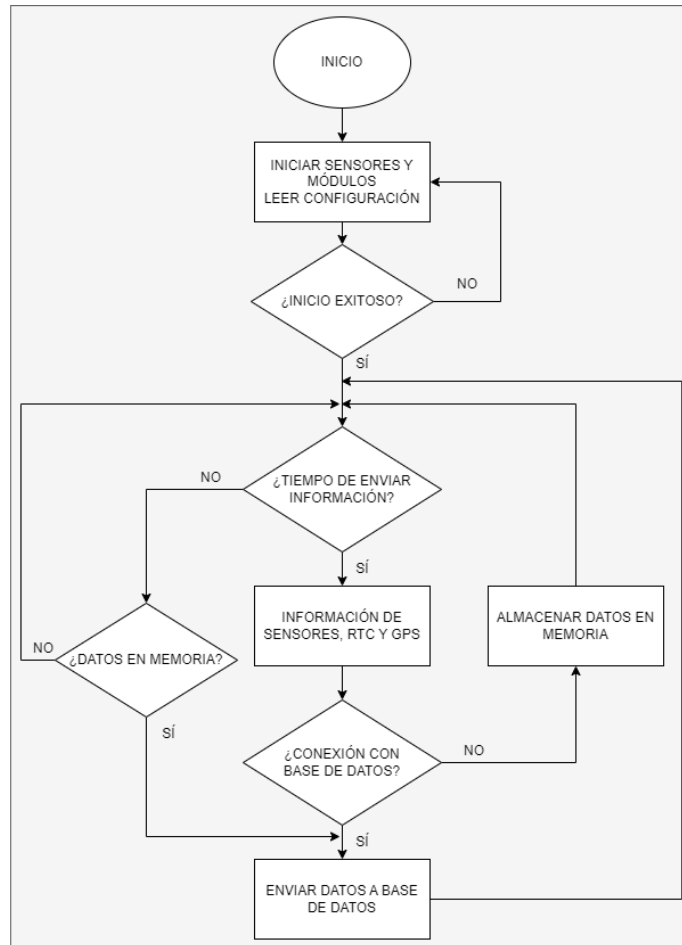


Figura 36. Diagrama de flujo del firmware del sistema de monitoreo.

Se inician los sensores y módulos del sistema, posteriormente se lee la configuración que está contenida en la memoria, esta tiene los datos de red Wifi, las variables que deben ser monitoreadas y los intervalos de tiempo para muestreo. Si todo el inicio fue correcto pasa a verificar si es tiempo de obtener una nueva muestra, si no es así el sistema pasa a corroborar si existen datos en la memoria para enviarlos a la base de datos, si es tiempo de muestreo, se obtienen los datos de la geolocalización y el reloj de tiempo real para añadirlos a la trama que se enviará, se verifica si existe conexión con la base de datos, si esta conexión es exitosa se envían los nuevos datos, si no lo es estos son almacenados dentro de la memoria.

Para el sistema se activaron los siguientes periféricos y herramientas del microcontrolador:

- ADC
- RTC
- TIM
- I²C
- UART
- DMA
- GPIO
- SPI

Para el control del sensor DS18B20, se siguió el modo de operación 2, que se proporciona en la hoja de datos de este. En la figura 37 se muestra el ejemplo de operación.

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	4Eh	Master issues Write Scratchpad command.
Tx	3 data bytes	Master sends three data bytes to scratchpad (T _H , T _L , and config).
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	BEh	Master issues Read Scratchpad command.
Rx	9 data bytes	Master reads entire scratchpad including CRC. The master then recalculates the CRC of the first eight data bytes from the scratchpad and compares the calculated CRC with the read CRC (byte 9). If they match, the master continues; if not, the read operation is repeated.
Tx	Reset	Master issues reset pulse.
Rx	Presence	DS18B20 responds with presence pulse.
Tx	CCh	Master issues Skip ROM command.
Tx	48h	Master issues Copy Scratchpad command.
Tx	DQ line held high by strong pullup	Master applies strong pullup to DQ for at least 10ms while copy operation is in progress.

Figura 37. Ejemplo de operación 2, del sensor DS18B20 [76].

Desarrollo e implementación del sistema

En el microcontrolador se activó un PIN GPIO como salida, solo que al tener un solo bus de datos este debió funcionar como entrada y salida, esto fue configurado mediante programación durante la ejecución del programa, utilizando la función “set_pin_output(port,pin)”, en donde se especificó el puerto y el pin en el que se conectó el bus de datos del sensor, ya que el sensor tiene tiempos de transmisión y recepción, lo que da esa flexibilidad. La figura 38 muestra el diagrama de tiempos de lectura y escritura del sensor.

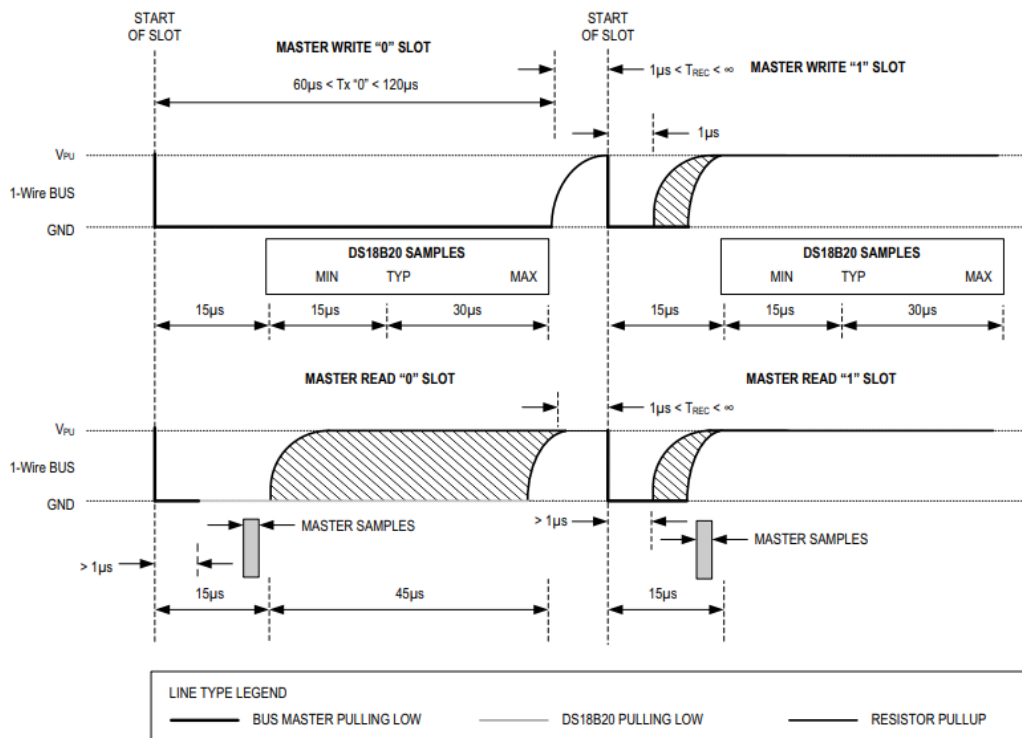


Figura 38. Diagrama de tiempos de lectura y escritura del sensor DS18B20 [76].

La hoja de datos también proporciona los tiempos de inicialización del sensor para poder detectar su presencia. Estos tiempos se muestran en la figura 39.

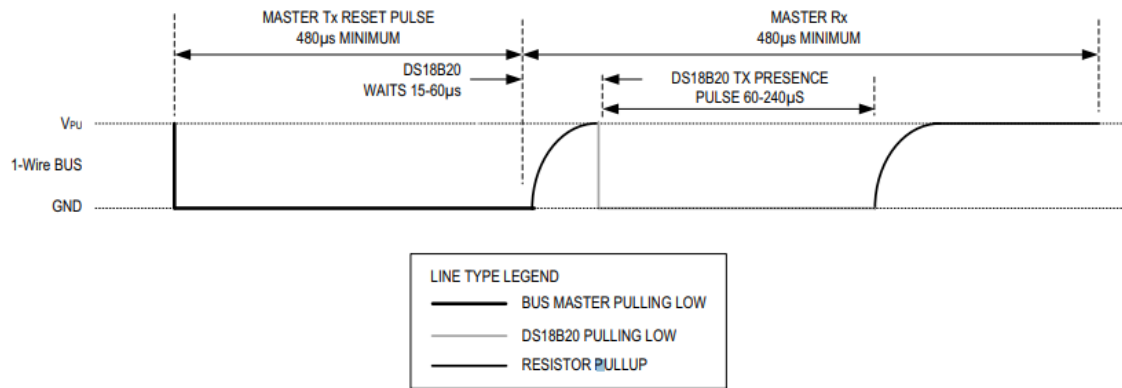


Figura 39. Diagrama de tiempos de inicialización del sensor DS18B20 [76].

En la figura 38 se puede observar que el tiempo más corto utilizado para escribir o leer es de 1 µs. Para lograr este tiempo, se creó una función llamada “delay_us” en la que se utilizó el temporizador 1 del microcontrolador, el cual fue configurado para que cada incremento fuera precisamente de 1 µs, para utilizar esta función solo se debió llamar a ella especificando el número de microsegundos que se requerían contar, en el siguiente código se muestra la función creada y un ejemplo de su utilización.

```

1. /*****Función para contar microsegundos*****/
2. void delay_us(uint16_t us) {
3.     __HAL_TIM_SET_COUNTER(&htim1, 0);
4.     while (__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim1) < us);
5. }
6. /*****Uso de la función*****/
7. delay_us(35); //Contar 35 microsegundos

```

Como se explicó anteriormente, el sensor BMP180 fue controlado utilizando el protocolo de comunicación serial I²C, en este caso se activó el periférico I²C1 del microcontrolador, en modo rápido y con una frecuencia de 400 kHz.

La hoja de datos del sensor BMP180 proporciona un algoritmo para obtener las mediciones y registros de compensación. Este algoritmo se muestra en la figura 40, los cuales pueden ser usados para calcular la medición real de las variables.

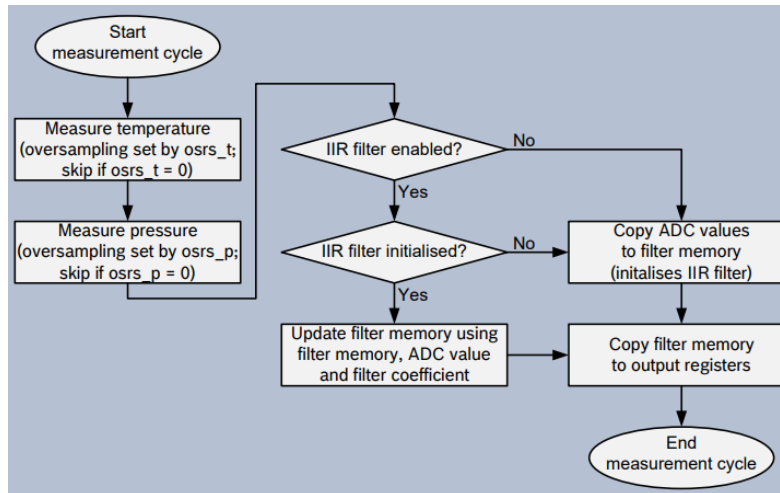


Figura 40. Algoritmo de medición del sensor BMP180 [77].

La siguiente función fue utilizada para realizar la compensación de las variables, esta se puede encontrar en la hoja de datos del sensor BMP180 [76].

```

1. // Returns temperature in DegC, resolution is 0.01 DegC. Output
   value of "5123" equals 51.23 DegC.
2. // t_fine carries fine temperature as global value
3. BMP180_S32_t t_fine;
4. BMP180_S32_t bmp180_compensate_T_int32(BMP180_S32_t adc_T) {
5.   BMP180_S32_t var1, var2, T;
6.   var1=(((adc_T>>3)-
   ((BMP180_S32_t)dig_T1<<1)))*((BMP180_S32_t)dig_T2))>>11;
7.   var2=((((adc_T>>4)-((BMP180_S32_t)dig_T1))*((adc_T>>4-
   ((BMP180_S32_t)dig_T1)))>>12)*((BMP180_S32_t)dig_T3))>>14;
8.   t_fine=var1+var2;
9.   T=(t_fine*5+128)>>8;
10.  return T;
11. }
12. // Returns pressure in Pa as unsigned 32 bit integer in Q24.8
   format (24 integer bits and 8 fractional bits).
13. // Output value of "24674867" represents 24674867/256 = 96386.2 Pa
   = 963.862 hPa
14. BMP180_U32_t bmp180_compensate_P_int64(BMP180_S32_t adc_P) {
15.   BMP180_S64_t var1, var2, p;
16.   var1=((BMP180_S64_t)t_fine)-128000;
17.   var2=var1*var1*(BMP180_S64_t)dig_P6;
18.   var2=var2+((var1*(BMP180_S64_t)dig_P5)<<17);
19.   var2=var2+(((BMP180_S64_t)dig_P4)<<35);
20.   var1=((var1*var1*(BMP180_S64_t)dig_P3)>>8)+
   ((var1*(BMP180_S64_t)dig_P2)<<12);
  
```

```

21. var1=(((BMP180_S64_t)1)<<47)+var1))*((BMP180_S64_t)dig_P1)>>33;
22. if (var1 == 0){
23.     return 0; // avoid exception caused by division by zero
24. }
25. p=1048576-adc_P;
26. p=((p<<31)-var2)*3125)/var1;
27. var1=((BMP180_S64_t)dig_P9)*(p>>13)*(p>>13)>>25;
28. var2=((BMP180_S64_t)dig_P8)*p)>>19;
29. p=(p+var1+var2)>>8)+((BMP180_S64_t)dig_P7)<<4);
30. return (BMP180_U32_t)p;
31. }

```

Para utilizar el sensor TDS se utilizó el ADC del microcontrolador, el cual tiene una resolución de 12 bits, ya que el microcontrolador elegido solo posee un convertidor ADC se han activado 2 entradas analógicas. Para realizar la lectura analógica se utiliza el código que se muestra a continuación.

```

1. /*****Sensor TDS*****/
2. ADC_Select_CH0();
3. HAL_ADC_Start(&hadc1);
4. HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1);
5. adc_tds = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
6. vt ds = (adc_tds * 3.3) / 4095;
7. dt ds = (vt ds * 1000) / 2.3;
8. HAL_Delay (10);
9. tds_2 = dt ds;
10. sprintf (tds, "%0.2f", dt ds);
11. HAL_ADC_Stop(&hadc1); //Es necesario para leer el siguiente canal
    ADC

```

El sensor MICS5525 entrega lecturas analógicas por lo que se utilizó un canal del ADC para obtener estas, el siguiente código muestra el proceso de obtención.

```

1. /*****MICS5524*****/
2. ADC_Select_CH4();
3. HAL_ADC_Start(&hadc1);
4. HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1);
5. adc_MICS5524 = HAL_ADC_GetValue(&hadc1);
6. vMICS5524 = adc_MICS5524 / 4095;
7. dMICS5524 = vMICS5524 * 1000;
8. HAL_Delay(10);
9. MICS5524_2 = dMICS5524;
10. sprintf(MICS5524, "%u", adc_MICS5524);
11. HAL_ADC_Stop(&hadc1); //Es necesario para leer el siguiente canal
    ADC

```

Para poder añadir la memoria Flash SPI W25Q32 al proyecto se utilizó una biblioteca desarrollada por el Ing. Nima Askari [78], esta facilita el uso de la memoria, ya que proporciona funciones para borrar, escribir y leer de esta.

Como todos los dispositivos y sensores que emplean el protocolo de comunicación UART, trabajan a 9600 baudios de velocidad, no fue necesario cambiar esta configuración durante la ejecución del código; los puertos UART utilizados del microcontrolador son el 1 y 6.

Para poder multiplexar el puerto UART, se emplean 2 pines GPIO del microcontrolador para controlar las salidas y entradas del multiplexor CD4052, en la tabla 16 se muestra la tabla de verdad para el puerto UART 1 en donde se emplean los pines PB0 y PB1 para seleccionar los canales y en la tabla 17 se muestra la tabla de verdad para el puerto UART 6 utilizando los pines PA15 y PB12 para seleccionar los canales.

Tabla 16. Tabla de verdad del puerto UART 1.

Entradas		Canal activo
S2 – PB1	S1 – PB0	
Low	Low	0X, 0Y
Low	High	1X, 1Y
High	Low	2X, 2Y
High	High	3X, 3Y

Tabla 17. Tabla de verdad del puerto UART 6.

Entradas		Canal activo
S2 – PB12	S1 – PA15	
Low	Low	0X, 0Y
Low	High	1X, 1Y
High	Low	2X, 2Y
High	High	3X, 3Y

Se crearon funciones para la transmisión y espera de datos a través de los puertos UART, estas se muestran a continuación:

```

1. /*****Función UART*****/
2. void Transmit_UARTX(char *cmd) {
3.     HAL_UART_Transmit(&huartX, (uint8_t*) cmd, strlen(cmd), 1000);
4. }
5. void Received_UARTX() {
6.     memset(bufferH, 0, sizeof(bufferH));
7.     HAL_UART_Receive(&huartX, bufferH, 1000, 1000);}

```

La hoja de datos del sensor MH-Z19 proporciona el comando que debe ser enviado al sensor para poder obtener los datos de medición, este comando se muestra en la figura 41.

Send command								
Byte0	Byte1	Byte2	Byte3	Byte4	Byte5	Byte6	Byte7	Byte8
Starting byte	Sensor No.	command	-	-	-	-	-	Check value
0XFF	0x01	0x86	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x79

Figura 41. Comando para lectura de concentraciones del sensor MH-Z19 [79].

El sensor MH-Z19 retorna 9 bytes al realizar la lectura, de los cuales el byte 2 y 3 son los que contienen la información de la lectura del sensor, con estos datos se creó una función en la que se envía el comando de lectura y se espera la trama proveniente del sensor para poder realizar el cálculo de la concentración de CO₂, utilizando las funciones anteriores, el código de la función se muestra a continuación.

```

1. /*****MH-Z19*****/
2. Transmit_UART1 (leer_mhz19);
3. Received_UART1 ();
4. MHZ19_CO2 = (bufferH [2] * 256) + bufferH [3];
5. Sprintf (CO2_mhz19, "%d", MHZ19_CO2);

```

La hoja de datos también proporciona comandos para realizar la calibración del sensor MH-Z19 a determinadas concentraciones de CO₂.

El sensor SDS011 funciona de manera automática, entregando datos cada segundo, utiliza el protocolo UART, la hoja de datos del sensor SDS011 proporciona una tabla con la trama esperada, esta consta de 9 bytes, de los cuales del byte 2 al 4 son los que se usan para llevar a cabo los cálculos de concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, para poder obtener las mediciones se creó una función la cual entrega los datos en $\frac{\mu g}{m^3}$. Esta función se muestra a continuación:

```

1. /*****SDS011*****/
2. while (bufferH [9] != 171) {
3.     memset (bufferH, 0, sizeof (bufferH));
4.     Received_UART1 ();
5.     cal_sds011 ();
6. }
7. void cal_sds011 (void) {
8.     value_pm25 = 0;
9.     value_pm10 = 0;

```

Desarrollo e implementación del sistema

```
10. value_pm25 = (bufferH [3] << 8) | (bufferH [2] / 10);
11. Sprintf (PM25_sds, "%d", value_pm25);
12. value_pm10 = (bufferH [5] << 8) | (bufferH [4] / 10);
13. Sprintf (PM10_sds, "%d", value_pm10);
14. }
```

Como se mencionó anteriormente, el módulo Bluetooth HC-05, se utilizó para realizar la configuración del sistema de monitoreo, este utiliza el protocolo UART para comunicarse con el microcontrolador, tiene un pin que se mantiene activo en alto cuando un dispositivo se conecta a él, esto ayuda para interrumpir el programa principal y poder realizar la configuración, esta es guardada en la memoria. En el siguiente código se muestra cómo se esperan datos de configuración desde la aplicación para Android:

```
1. /*****Bluetooth HC-05*****/
2. while (HAL_GPIO_ReadPin(ST_BT_GPIO_Port, ST_BT_Pin) == 1) {
3.     HAL_GPIO_WritePin(CMD_BT_GPIO_Port, CMD_BT_Pin, GPIO_PIN_RESET);
4.     ATisOK = 0;
5.     Transmit_UART1(conversion_buffer_memory);
6.     while (!ATisOK) {
7.         Received_UART1();
8.         if (strstr((char*) bufferH, "OK")) {
9.             ATisOK = 1;
10.            W25qxx_EraseSector(0);
11.            W25qxx_WriteSector(bufferH, 0, 0, sizeof(bufferH));
12.            HAL_GPIO_WritePin(RST_BT_GPIO_Port,
RST_BT_Pin,GPIO_PIN_RESET);
13.            HAL_Delay(100);
14.        }else if(strstr((char*) bufferH, "FINISH")){
15.            ATisOK = 1;
16.            HAL_GPIO_WritePin(RST_BT_GPIO_Port,
RST_BT_Pin,GPIO_PIN_RESET);
17.            HAL_Delay(100);
18.        }
19.    }
20.    read_memory();
21.    ID_WIFI();
22.}
```

Para obtener los datos del módulo NEO-7M se crearon dos funciones, la primera función llamada “get_location” obtiene la trama leída en el puerto UART y separa los datos necesarios para obtener la latitud y longitud, mientras que la segunda llamada “Format_data” decodifica los datos obtenidos, ya que estos se encuentran en el estándar NMEA (Asociación Nacional de Electrónica Marina) y los convierte para obtener la latitud y longitud real.

```
1. /*****NEO-7M*****/
2. void get_location(char *GPSstrParse) {
3.     Msgindex=0;
```

```

4. strcpy(Txdata, (char*) (Rxdata));
5. ptr=strstr(Txdata, "GPRMC");
6. if(*ptr=='G'){
7.     while(1){
8.         GPS_Payyload[Msgindex]=*ptr;
9.         Msgindex++;
10.        *ptr=(ptr+Msgindex);
11.        if(*ptr=='\n'){
12.            GPS_Payyload[Msgindex]='\0';
13.            break;
14.        }
15.    }
16.    sscanf(GPS_Payyload, "GPRMC,%f,A,%f,%c,%f,%c",&time,
    &latitude, &N_OR_S, &longitude, &E_OR_W);
17.    dec_latitude = Format_data(latitude, N_OR_S);
18.    dec_longitude = Format_data(longitude, E_OR_W);
19.    HAL_Delay(1);
20.}
21.}

1. float Format_data(float deg_coord, char nsew){
2.     int degree = (int)(deg_coord/100);
3.     float minutes = deg_coord - degree*100;
4.     float dec_deg = minutes / 60;
5.     float decimal = degree + dec_deg;
6.     HAL_GPIO_TogglePin(LD_INFO_GPIO_Port, LD_INFO_Pin);
7.     if (nsew == 'S' || nsew == 'W') {
8.         decimal *= -1;
9.     }
10.    return decimal;
11.}

```

Para enviar los datos a la nube tanto por red Wifi como red Sigfox se utiliza el diagrama de flujo de la figura 42, consiste en leer la configuración de la red, es decir, que red será usada para enviar la información, posteriormente se verifica la conexión con el módulo de comunicaciones, si ésta es correcta se estructura la trama de envío y es enviada la nueva información.

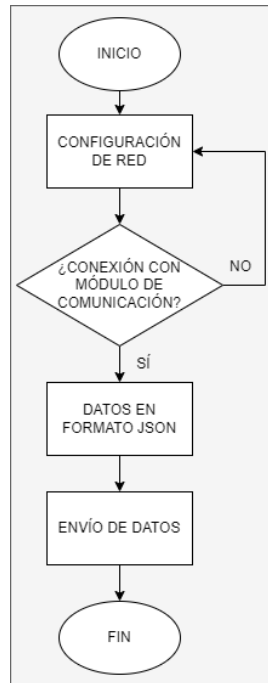


Figura 42. Diagrama de flujo de envío de datos.

El módulo SFM11R2D, para enviar datos mediante la red Sigfox, utiliza el protocolo de comunicación UART para comunicarse con el microcontrolador, el fabricante recomienda reiniciar el módulo cada vez que se envíen datos para asegurar un correcto funcionamiento de este, el código que se muestra a continuación fue utilizado para enviar datos a la Backend de Sigfox:

```
1. /*****Módulo Sigfox*****/
2. HAL_GPIO_WritePin(Shown_Sigfox_GPIO_Port, Shown_Sigfox_Pin, RESET);
3. HAL_Delay(5000);
4. HAL_GPIO_WritePin(Shown_Sigfox_GPIO_Port, Shown_Sigfox_Pin, SET);
5. HAL_Delay(10000);
6. Transmit_UART1("AT$DR?\r\n");
7. HAL_Delay(100);
8. Transmit_UART1("ATS400?\r\n");
9. HAL_Delay(100);
10. Transmit_UART1("AT$WR\r\n");
11. HAL_Delay(100);
12. ATisOK = 0;
13. while (!ATisOK) {
14.   Transmit_UART1("AT$I=10\r\n");
15.   Received_UART1();
16.   if (strstr((char*) bufferH, "003FDB39")) {
17.     ATisOK = 1;
18.   }
```

```

19. }
20. ATisOK = 0;
21. while (!ATisOK) {
22.   Transmit_UART1("AT$I=11\r\n");
23.   Received_UART1();
24.   if (strstr((char*) bufferH, "AA")) {
25.     ATisOK = 1;
26.   }
27. }
28. ATisOK = 0;
29. while (!ATisOK) {
30.   Transmit_UART1("AT\r\n");
31.   Received_UART1();
32.   if (strstr((char*) bufferH, "OK")) {
33.     ATisOK = 1;
34.   }
35. }
36. ATisOK = 0;
37. while (!ATisOK) {
38.   Transmit_UART1("AT$RC\r\n");
39.   Received_UART1();
40.   if (strstr((char*) bufferH, "OK")) {
41.     ATisOK = 1;
42.   }
43. }
44. ATisOK = 0;
45. sprintf(datos_sigfox,
    "AT$SF=01%u02%u03%d04%d\r\n", var1, var2, var3, var4);
46. Transmit_UART1(datos_sigfox);
47. while (!ATisOK) {
48.   Received_UART1();
49.   if (strstr((char*) bufferH, "OK")) {
50.     ATisOK = 1;
51.   }
52. }

```

El módulo ESP-12F de la marca Espressif se utilizó para enviar los datos recabados a la base de datos del gestor de Firebase a través de Wifi. El anexo A contiene el programa utilizado para el módulo, el cual se ha compilado en el IDE de Arduino, el código desarrollado para comunicar los datos desde el sistema hacia el módulo ESP-12F se muestra a continuación:

```

1. /*****Módulo ESP-12F*****/
2. Transmit_UART6("EnviarFirebase\r\n");

```

```
3. ATisOK = 0;
4. while (!ATisOK) {
5.     Received_UART6();
6.     if (strstr((char*) bufferH_UART6, "OK")) {
7.         HAL_Delay(100);
8.         Transmit_UART6(datos_wifi);
9.         Transmit_UART6("\r\n");
10.        ATisOK = 1;
11.        status_wifi = 1;
12.    }
13.    if (strstr((char*) bufferH_UART6, "Error")) {
14.        ID_WIFI();
15.        ATisOK = 1;
16.    }
17. }
```

Dentro de los datos enviados a la base de datos se envía la hora y fecha de la captura de datos, para esto se utilizó el RTC que integra el microcontrolador. La trama de datos queda de la siguiente forma: {"Dia":25, "Mes":4, "Año":22, "Hora":13, "Minuto":50, "Temperatura_aire":25, "Temperatura_agua":25, "PM25":6, "PM10":13, "CO":0, "CO2":2820, "TDS":0.0, "Latitud":18.91842, "Longitud":-98.42992}

Para entablar la comunicación con Firebase se utilizó la siguiente URL:

- <https://monitoreo-ambiental-puebla-default-rtdb.firebaseio.com/MonitoreoPuebla/%s.json?NiKoji3L0PBhSPSDBuMGOhTPR3HIFy9iID1JqVQx>

En donde “monitoreo-ambiental-puebla-default-rtdb.firebaseio.com” es la manera de acceder a la aplicación creada, “Monitoreo Puebla” es la base de datos a la que se accedió, “%s” es una base de datos creada dentro de la base de datos principal, en este caso los datos son guardados con identificadores de fecha, “. json” es el método utilizado para enviar estos datos y por último se colocó el key de la aplicación para poder acceder, la manera en que son almacenados estos datos se muestra en la figura 43.



Figura 43. Almacenamiento de datos en Firebase.

3.3.3. Placa de circuito impreso

Los circuitos que han sido mostrados se han creado en el software Eagle utilizando la versión gratuita, con los circuitos ya establecidos correctamente, se procedió a realizar el diseño de la placa de circuitos impresos, comenzando por colocar las reglas de diseño del circuito. En la figura 44 se muestra la vista superior del diseño y en la figura 45 se muestra la vista inferior de la PCB terminada.

El diseño de la PCB fue enviado a JLCPCB, ya que este ofrece la fabricación de placas de circuito a bajo costo y en poco tiempo, además ofrece una vista preliminar en 3D del diseño a fabricar. En la figura 46 se muestra la vista 3D de la placa de circuitos diseñada para el proyecto.

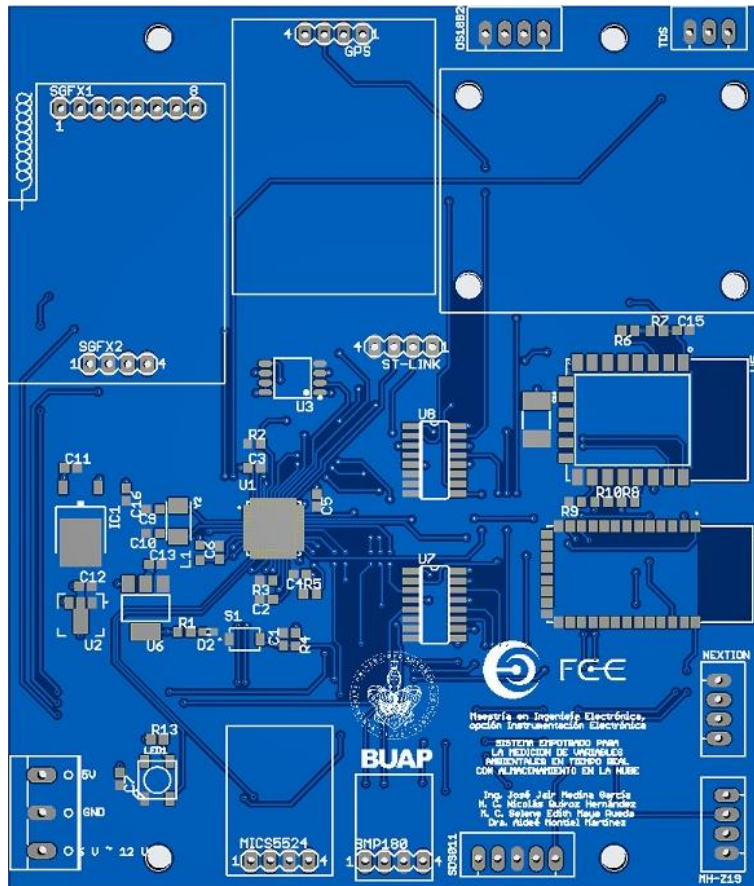


Figura 46. Vista 3D de la PCB diseñada.

En la figura 47 se muestra la placa de circuito impreso con los componentes seleccionados para el sistema de monitoreo ambiental, con esta placa se realizaron pruebas de funcionamiento.

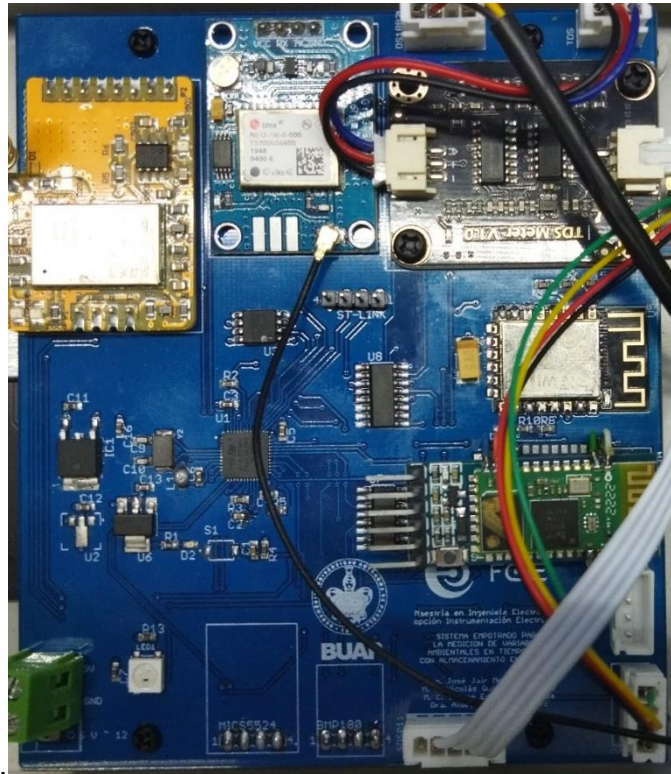


Figura 47. Placa de circuito impreso del sistema de monitoreo ambiental.

Para integrar todo el sistema se utilizó una carcasa de policarbonato, la cual posee un nivel de protección IP65, sin embargo, para poder realizar mediciones con los sensores estos deben estar expuestos, por lo que esta protección solo es en la parte superior, esta carcasa se muestra en la figura 48.



Figura 48. Carcasa del sistema de monitoreo ambiental.

En la figura 49 se muestra la placa de circuito impreso ya con todos los componentes necesarios para que el sistema funcione.

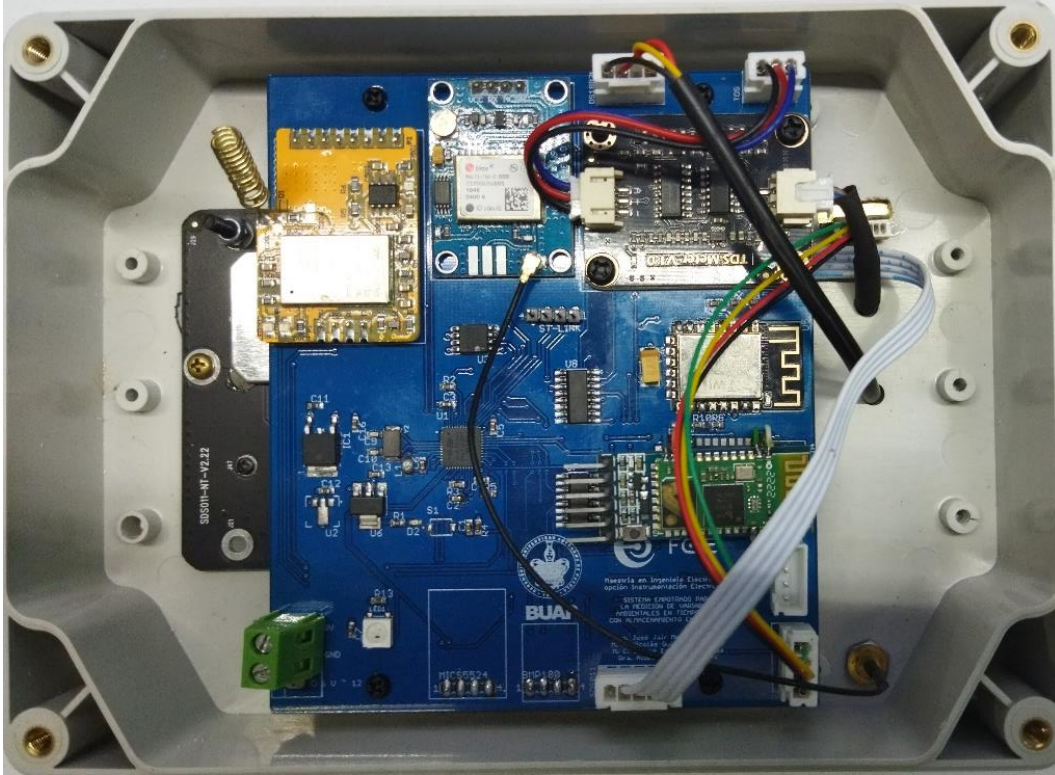


Figura 49. Sistema de monitoreo ambiental completo.

3.4. Diseño de la página Web de monitoreo

Para mostrar los datos gráficamente se realizó una página Web en la que se pudieran obtener los datos recabados por el sistema de monitoreo ambiental, ya que de esta manera se tuvo más versatilidad en el manejo de la información, la página fue desarrollada en lenguaje HTML5, fue diseñada de modo que se adapte a cualquier tamaño de pantalla, para poder obtener los datos recabados por el sistema se utilizó JavaScript, puesto que Firebase ofrece la posibilidad de integrar su API a esta plataforma, para lo cual se deben importar el módulo de la aplicación, que contiene el key, dominio y la base de datos de la aplicación de Firebase, los cuales son proporcionado por la misma plataforma. Con los datos obtenidos de la base de datos se procedió a mostrarlos visualmente empleando Chart.js que es una biblioteca de código abierto, que se integró a JavaScript, esto permitió crear gráficas de diferentes tipos, para la página Web todas las gráficas han sido de tipo lineal, adicionalmente se ha añadido un botón con el cual se pueden exportar los datos recabados por el sistema de monitoreo a una hoja de cálculo de Excel. La figura 50 muestra la página Web creada.



Figura 50. Página Web de monitoreo ambiental.

La página Web se ha añadido a GitHub, para poder acceder a esta se utilizó la plataforma de Vercel, para obtener un dominio, aquí se puede obtener el repositorio de GitHub. Esta página se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://tesis-web-monitoreo.vercel.app>.

3.5. Aplicación para dispositivos Android

La aplicación fue diseñada en el entorno de programación de App Inventor, ya que este facilita la creación de aplicaciones, para diseñar la aplicación se siguió el diagrama de flujo presentado en la figura 51.

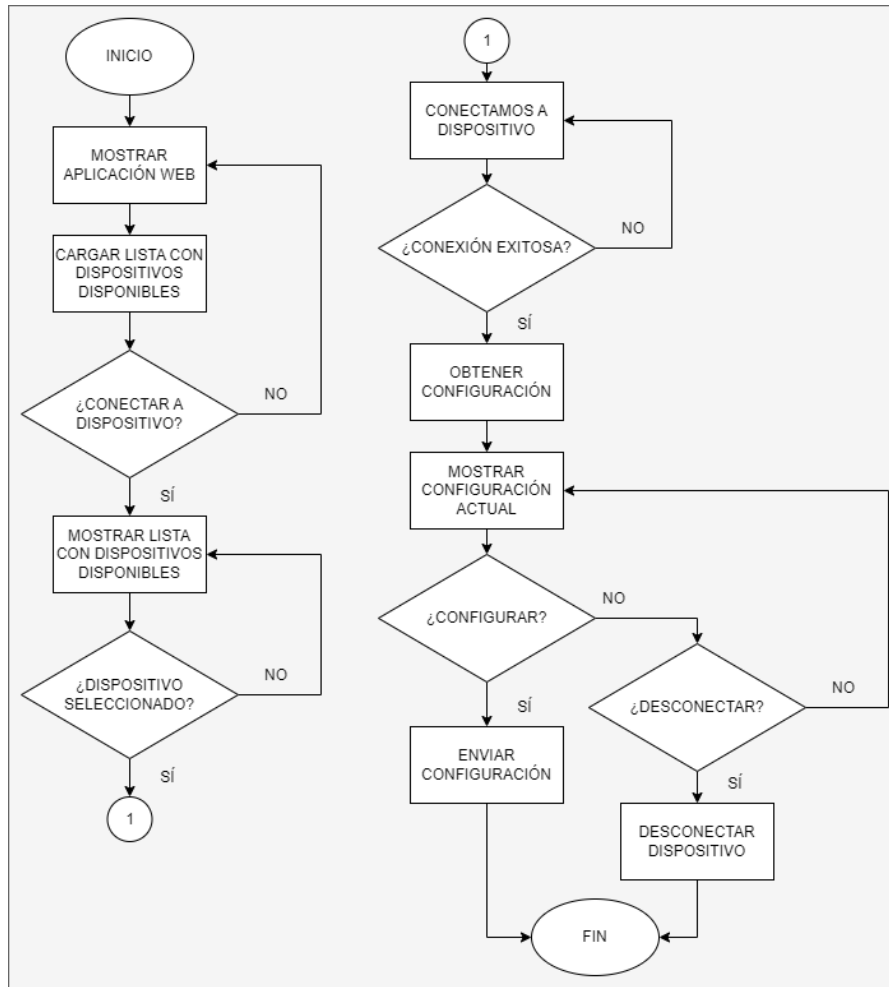


Figura 51. Diagrama de flujo de la aplicación.

Al iniciar la aplicación se muestra la página Web desarrollada, ya que esta es adaptativa, posteriormente se verifica si el bluetooth se encuentra activo, si no es así, se piden permisos al usuario para realizar esta activación. Si está activo el bluetooth del dispositivo se carga la lista de dispositivos asociados a este, si da clic en conectar a dispositivo, se mostrará la lista de los dispositivos cargados previamente, al seleccionar alguno de estos se conectará. Si esta conexión es exitosa, el sistema de adquisición de datos enviará la configuración actual a la aplicación y será mostrada dentro de esta para poder realizar cambios, si se da clic en el botón configurar se envía la nueva configuración, también se puede desconectar directamente la aplicación sin cambiar la configuración actual. En la figura 52 se muestra la pantalla principal de la aplicación desarrollada.

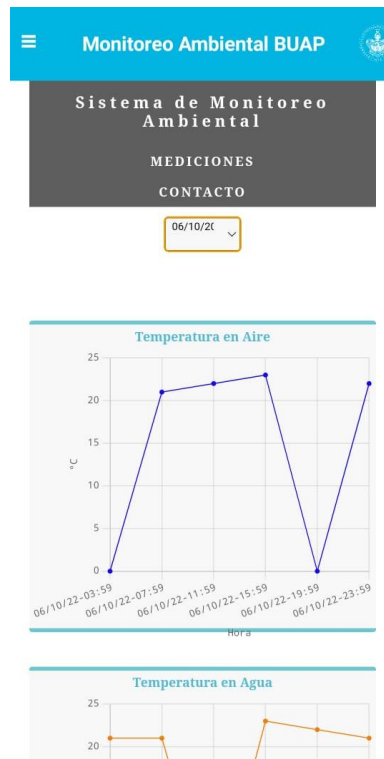


Figura 52. Pantalla principal de la aplicación para dispositivos inteligentes.

En la figura 53 se muestra el menú de interacción de la aplicación al cual se puede acceder a través del botón ubicado en la parte superior izquierda de la pantalla, marcado con 3 líneas horizontales.

Al dar clic en conectar a dispositivo dentro de la aplicación, se muestran los dispositivos bluetooth emparejados con el teléfono inteligente, en la figura 54 se muestra un ejemplo de esta lista.

Al seleccionar el dispositivo Bluetooth del sistema de monitoreo ambiental, la aplicación hace el intento de conexión, si esta es correcta, la aplicación recibirá la configuración guardada en el sistema de monitoreo, y será mostrada en el menú de interacción de la aplicación, como se muestra en la figura 55.

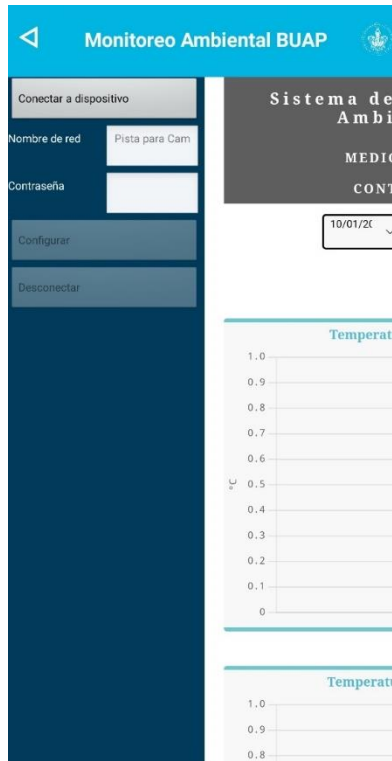


Figura 53. Menú de interacción de la aplicación.

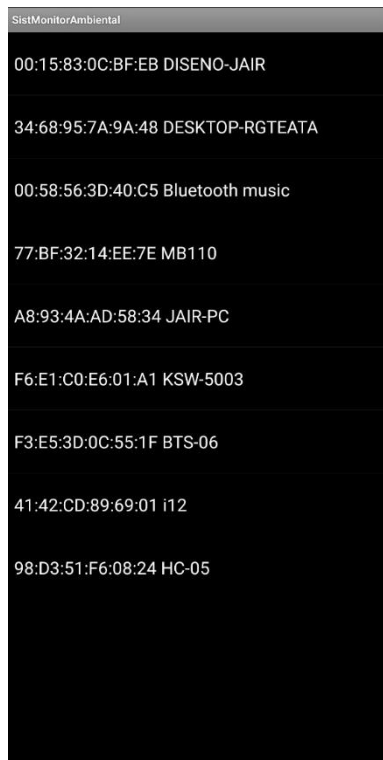


Figura 54. Lista de dispositivos emparejados con el teléfono inteligente.



Figura 55. Menú de interacción con la configuración del sistema.

Con la información cargada en la aplicación ya se podrá realizar la configuración del sistema de monitoreo, aquí se puede seleccionar las variables que serán sensadas por el sistema, así como el intervalo de tiempo en que debe realizarse la lectura de las variables, este tiempo puede seleccionarse entre 10 o 30 minutos, 1, 4, 8, 12 o 24 horas dependiendo de las necesidades del usuario. También puede ser seleccionada la red por la cual debe ser transferida la información de los sensores a la base de datos en la nube, una vez configurado para enviar la nueva información al sistema se debe presionar el botón que indica configurar, mostrado en la figura 56, y el sistema comenzara a trabajar nuevamente.



Figura 56. Configuración del sistema de monitoreo ambiental.

En este capítulo se mostró el desarrollo del sistema desde la selección del hardware necesario para integrar el sistema, diseño de la placa de circuito impreso, el sistema con los componentes soldados, parte del código utilizado para la programación del firmware de acuerdo con los algoritmos presentados, desarrollo de la página Web de monitoreo y creación de la aplicación de configuración para dispositivos móviles. Con el sistema de monitoreo ambiental recabando información, en el próximo capítulo se presentan las pruebas realizadas al sistema y los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas realizadas con el sistema de monitoreo ambiental desarrollado, que permiten verificar su correcto funcionamiento, estos resultados son comparados con mediciones obtenidas de sondas multiparamétricas para líquidos y a través de los sistemas de monitoreo ambiental de la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial de la Ciudad de Puebla.

Durante las primeras pruebas de envío de datos utilizando el módulo ESP-12F se detectaron fallos en la comunicación entre el módulo y el microcontrolador, ya que solo estaba conectado mediante unos cables y al haber un poco de movimiento en estos se tenían errores de comunicación, por lo que se procedió a programar etapas de confirmación de comunicación en donde el módulo ESP-12F es reseteado, para evitar que el sistema completo se bloquee, así garantizando el funcionamiento continuo del sistema de monitoreo ambiental.

Como los sensores no poseen la capacidad de operar en estado de reposo, estos siempre están activos, por lo cual el consumo del sistema va desde los 300 mA hasta los 350 mA.

El sistema completo se puede observar en la figura 57, donde se muestran las sondas para medir TDS y temperatura en agua, también se pueden ver los sensores utilizados para medir temperatura ambiente, monóxido de carbono, dióxido de carbono, partículas suspendidas PM10 y PM2.5



Figura 57. Prototipo del sistema de monitoreo ambiental.

4.1. Validación de datos

Para validar los datos obtenidos con el sistema de monitoreo, las pruebas se dividieron en dos categorías de agua y aire. Para las pruebas en agua se utilizaron los sensores DS18B20

para la temperatura del líquido y el sensor KS0429 para medir el total de sólidos disueltos en el líquido, la comparación de las mediciones se realizó con las obtenidas por las sondas multiparamétrica HI98194 de HANNA Instruments, la cual tiene la capacidad de medir variables como: pH, ORP (Potencial de Oxidación y Reducción), CE (Conductividad Eléctrica), TDS (Total de Sólidos Disueltos), salinidad, OD (Oxígeno Disuelto), presión y temperatura. Esta sonda se muestra en la figura 58 y el instrumento de medición HI98129 de HANNA Instruments, esta sonda tiene la capacidad de medir variables como: pH, TDS (Total de Sólidos Disueltos), CE (Conductividad Eléctrica) y temperatura, este instrumento se muestra en la figura 59, las pruebas se realizaron con 20 muestras de agua, estas muestras se observan en la figura 60, tomadas de la periferia del lago de la zona de lanchas, ubicado en CU, las mediciones obtenidas se muestran en la tabla 18.



Figura 58. Sonda multiparamétrica HI98194.



Figura 59. Sonda multiparamétrica HI98129.

Tabla 18. Datos de la primera prueba.

Muestra No.	HI98129 (1)		HI98129 (2)		HI98194		Sistema de Monitoreo Ambiental	
	TDS (ppm)	Temperatura (°C)	TDS (ppm)	Temperatura (°C)	TDS (ppm)	Temperatura (°C)	TDS (ppm)	Temperatura (°C)
1	361	18.7	411	19.3	360	19.6	363	20.06
2	340	18.2	341	18.4	292	18.52	295	18.25
3	418	20.4	431	20.5	371	20.45	379	20.44
4	266	21.2	273	21.2	236	21.02	240	21.19
5	421	20.4	430	20.5	381	20.66	390	20.62
6	273	20	279	20.2	245	20.4	240	20.38
7	255	20.2	261	20.5	233	20.82	250	20.81
8	258	20.1	263	20.1	221	20.63	240	20.5
9	257	20.3	265	20.5	226	20.86	243	20.75
10	258	20.5	267	20.7	233	21.15	247	21.06
11	257	20.4	264	20.6	232	20.92	239	20.81
12	357	20.3	370	20.6	331	20.75	336	20.69
13	411	20.3	432	20.5	368	20.73	387	20.69
14	269	20.2	274	68.9	233	20.73	246	20.69
15	297	20	304	20.2	270	20.6	281	20.44
16	282	20	289	20.1	253	20.3	252	20.38
17	260	20.1	267	20.2	231	20.58	224	20.56
18	503	20.2	479	20.2	706	20.62	595	20.56
19	271	20	277	20.2	238	20.69	274	20.69
20	262	20.2	268	20.3	236	20.86	240	20.75



Figura 60. Muestras tomadas de la periferia del lago de CU.

Para las pruebas en aire, el sistema de monitoreo ambiental fue colocado, durante 8 días, del día 1 de noviembre al 8 de noviembre del 2022, cercano a la estación de monitoreo de calidad del aire de la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Puebla, la cual se encuentra en la Universidad Tecnológica de Puebla, en el mapa de la figura 61 marcado con el punto uno, se muestra la posición del sistema de monitoreo ambiental desarrollado y en el punto dos se ubica la estación de monitoreo de calidad del aire, la distancia entre ambos puntos fue de 1.7 km.

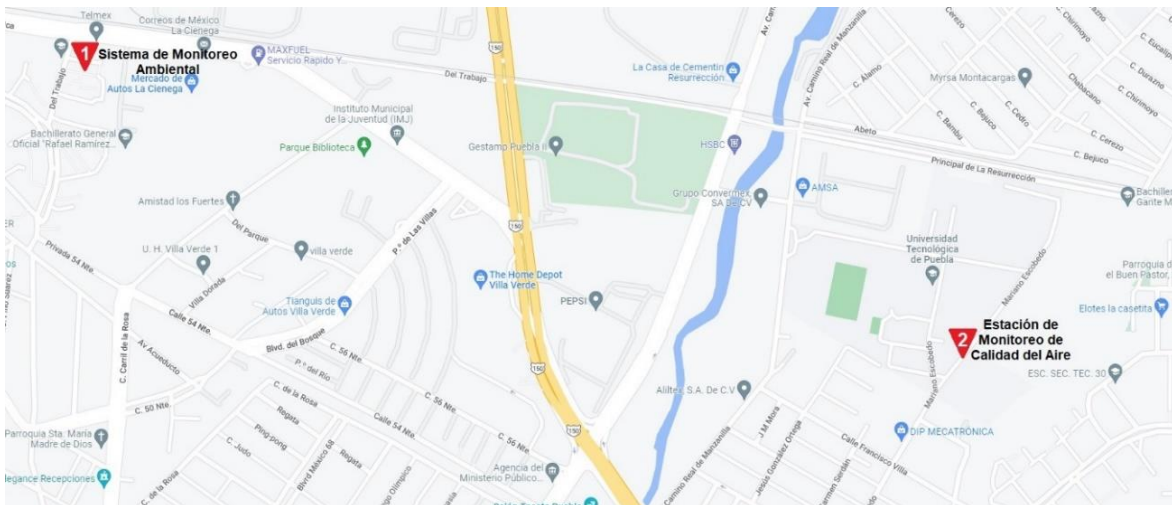


Figura 61. Ubicación de las estaciones de monitoreo.

Los datos proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Puebla, de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, son proporcionados de acuerdo a una asignación de color e intervalo de medición ICA (Índice de Calidad del Aire) los intervalos de medición se muestran en la tabla 19, con la información de las estaciones de monitoreo de calidad del aire

se pudo realizar una comparación con los datos obtenidos por el sistema desarrollado, solo para las variables de Monóxido de Carbono (CO), partículas PM10 y PM2.5.

Tabla 19. Mensajes asociados al color de la calidad del aire [80].

Categoría	Intervalo	Riesgo a la salud
Buena	0 – 50	Bajo Existe poco o ningún riesgo para la salud
Regular	51 – 100	Moderado Los grupos susceptibles pueden presentar síntomas en la salud.
Mala	101 – 150	Alto Los grupos susceptibles presentan efectos en la salud.
Muy mala	151 – 200	Muy alto Todos pueden presentar efectos a la salud; quienes pertenecen a los grupos susceptibles experimentan efectos graves.
Extremadamente mala	201 – 300	Extremadamente alto Toda la población tiene probabilidades de experimentar efectos graves a la salud.
Peligrosa	301 – 500	Peligro Toda la población experimenta efectos graves en la salud.

Debido a que los datos de la Secretaría se encuentran en ICA, los datos obtenidos por el sistema de monitoreo ambiental debieron ser calculados al mismo sistema de medición, esto se realiza con la ecuación 1.

$$\text{Índice} = \left(k * (C_{obs} - PC_{inf}) \right) + I_{inf} \quad \dots \text{Ecuación 1 [80].}$$

Donde:

Índice = Índice de Calidad del Aire, adimensional.

C_{obs} = Concentración observada del contaminante, en ppm para CO y en $\frac{\mu g}{m^3}$ para PM10 y PM2.5.

k = Constante de proporcionalidad, en ppm para CO, mientras que para PM10 y PM2.5 en $\frac{\mu g}{m^3}$.

PC_{inf} = Concentración del punto de corte inferior a igual a la concentración a evaluar, en ppm para CO y en $\frac{\mu g}{m^3}$ para PM10 y PM2.5.

I_{inf} = Índice de la PC_{inf} adimensional.

En la tabla 20 se muestran los puntos de corte para realizar el cálculo del ICA.

Tabla 20. Puntos de corte para el cálculo del ICA [80].

Intervalos ICA	Clasificación	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	CO (ppm)
$0 \leq ICA \leq 50$	Verde	0	0.0	0.0
		54	15.4	4.4
$51 \leq ICA \leq 100$	Amarillo	55	15.5	4.5
		154	40.4	9.4
$101 \leq ICA \leq 150$	Anaranjado	155	40.5	9.5
		254	65.4	12.4
$151 \leq ICA \leq 200$	Rojo	255	65.5	12.5
		354	150.4	15.4
$201 \leq ICA \leq 300$	Morado	355	150.5	15.5
		424	250.4	30.4
$301 \leq ICA \leq 400$	Marrón	425	250.5	30.5
		504	350.4	40.4
$401 \leq ICA \leq 500$	Marrón	505	350.5	40.5
		604	500.4	50.4

Tabla 21. Datos obtenidos por el sistema del 2 de noviembre del 2022.

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	42	415	57	51	19	65
01:10	43	425	58	52	18	63
02:10	43	425	61	53	18	63
03:10	44	435	62	54	18	63
04:10	45	445	68	57	19	65
05:10	44	435	66	56	19	65
06:10	44	435	70	58	20	67
07:10	45	445	67	56	20	67
08:10	45	445	66	56	21	69
09:10	44	435	65	55	20	67
10:10	44	435	54	49	19	65
11:10	44	435	52	47	20	67
12:10	43	425	50	45	19	65
13:10	44	435	47	43	19	65
14:10	43	425	47	43	20	67
15:10	43	425	46	42	19	65
16:10	42	415	45	41	18	63
17:10	43	425	45	41	18	63
18:10	43	425	42	38	18	63
19:10	43	425	42	38	18	63
20:10	42	415	42	38	17	61
21:10	43	425	44	40	18	63
22:10	44	435	44	40	18	63
23:10	45	445	44	40	17	61

Pruebas y resultados

En la tabla 21 se muestran los datos obtenidos, del día 2 de noviembre del 2022, por el sistema de monitoreo ambiental y los índices de calidad del aire calculados con ayuda de la ecuación 1 y la tabla 20.

En la figura 62 se muestran los datos obtenidos del histórico disponibles a través de Internet, del mismo día 2 de noviembre del 2022 de la estación de monitoreo de calidad del aire que se encuentra ubicada en la Universidad Tecnológica de Puebla.

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-2.5
00:00	F.O.	10	13	2	52	63
01:00	F.O.	8	13	2	52	64
02:00	F.O.	7	14	2	54	64
03:00	F.O.	6	14	2	55	66
04:00	F.O.	4	14	2	57	67
05:00	F.O.	5	14	2	57	67
06:00	F.O.	6	14	2	57	67
07:00	F.O.	5	13	2	57	67
08:00	F.O.	7	14	2	55	67
09:00	F.O.	8	13	2	54	69
10:00	F.O.	9	13	2	51	67
11:00	F.O.	12	13	2	45	67
12:00	F.O.	5	12	2	45	67
13:00	F.O.	4	12	2	44	66
14:00	F.O.	2	12	2	44	66
15:00	F.O.	1	12	2	41	64
16:00	F.O.	0	11	2	41	64
17:00	F.O.	0	11	2	40	63
18:00	F.O.	2	10	2	39	63
19:00	F.O.	2	10	2	38	61
20:00	F.O.	4	10	2	39	61
21:00	F.O.	4	10	2	39	61
22:00	F.O.	6	10	2	39	61
23:00	F.O.	7	11	2	40	61

Figura 62. Histórico de calidad del aire del 2 de noviembre del 2022 [80].

En el anexo B se muestran los datos recabados durante los 8 días de monitoreo del sistema, también se muestran los datos históricos proporcionados por la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en la Universidad Tecnológica de Puebla.

Para comparar los datos de temperatura del aire se han recabado los mismos datos que con las tres variables anteriores y para realizar la comparación se tomaron los datos

históricos de Weather Spark [81]. En la tabla 22 se muestra la comparación de los datos obtenidos por el sistema de monitoreo desarrollado y los proporcionados por Weather Spark, del día 2 de noviembre del 2022.

En la figura 63 se muestra la gráfica obtenida a través de la página desarrollada y en la figura 64 se muestra la gráfica proporcionada por Weather Spark, en donde se grafican los datos de la tabla 22, comparando ambas gráficas se observan comportamientos similares, con una ligera variación de décimas de grados.

Tabla 22. Mediciones de temperatura del día 2 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	18.0	17.8
01:10	18.2	18.3
02:10	18.4	18.3
03:10	17.5	17.2
04:10	16.1	15.6
05:10	17.6	17.2
06:10	17.8	17.2
07:10	17.6	17.2
08:10	18.1	17.8
09:10	19.9	20
10:10	22.4	22.2
11:10	23.8	23.3
12:10	23.5	23.3
13:10	23	22.8
14:10	24	23.9
15:10	23.5	23.9
16:10	23	23.3
17:10	21.6	21.7
18:10	19.8	20
19:10	18.1	18.3
20:10	17.8	17.2
21:10	15.9	16.1
22:10	15.2	15.6
23:10	15.1	15.6

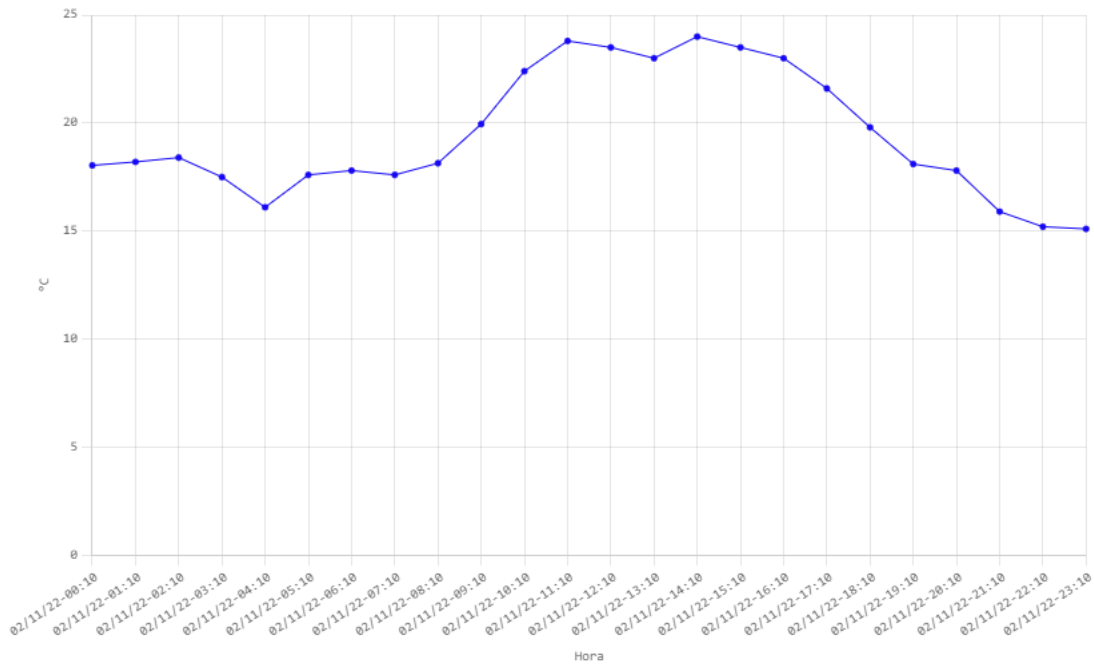


Figura 63. Gráfica de temperatura, generada por la página Web desarrollada.

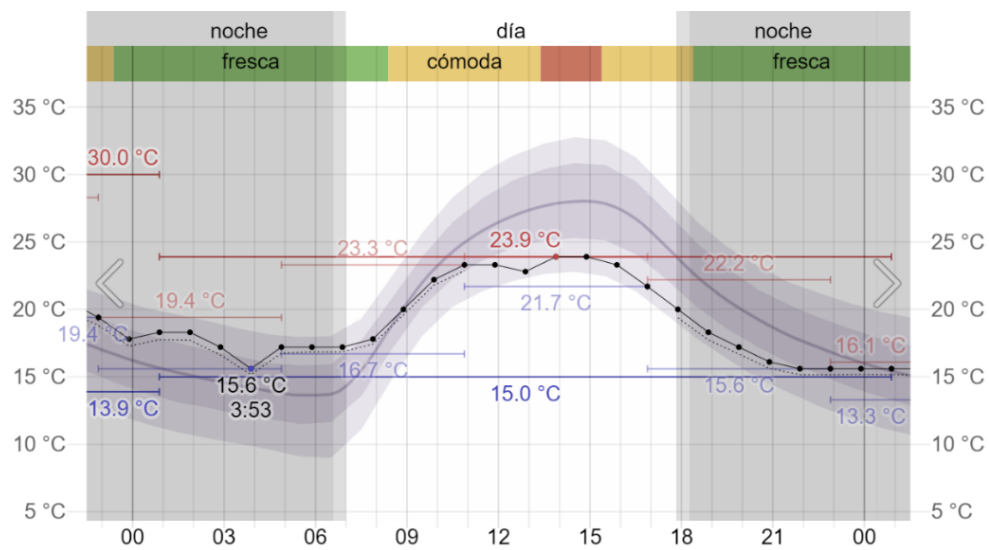


Figura 64. Gráfica de temperatura, proporcionada por Weather Spark [81].

En el anexo C se muestran los datos de temperatura recabados por el sistema de monitoreo ambiental y los obtenidos de la red a través de la página Weather Spark, del 1 de noviembre al 8 de noviembre del 2022.

4.2. Exactitud del sistema GPS

Para determinar la precisión del sistema GNSS utilizado en el desarrollo del sistema, este fue colocado a la intemperie, estático, con cielo despejado y una antena GPS de 1575 MHz, la posición original fue 18.91840, -98.42991, se obtuvieron datos con intervalos de tiempo de 1 hora, los cuales se muestran en la tabla 23, colocando las coordenadas obtenidas en Google Maps se obtuvo que la variación máxima en posición del punto original fue de 5.8 metro, considerando el tipo de sistema desarrollado la variación obtenida se encuentra dentro de un rango excelente, ya que solo es necesario saber la zona en donde está ubicado el sistema de monitoreo y no exactamente la posición de en donde se realizaron las mediciones.

Tabla 23. Prueba de geolocalización del sistema de monitoreo ambiental.

Hora	Latitud	Longitud	Variación (m)
15:10	18.91842	-98.4299	4.2
16:10	18.91842	-98.42989	5.3
17:10	18.91842	-98.4299	4.2
18:10	18.91842	-98.42992	4.5
19:10	18.91843	-98.42992	5.7
20:10	18.91843	-98.42992	5.7
21:10	18.91842	-98.4299	4.2
22:10	18.91843	-98.4299	5.8
23:10	18.91842	-98.4299	4.2
00:10	18.91842	-98.4299	4.2

En este capítulo se mostraron las pruebas realizadas al sistema de monitoreo, así como una comparación de los datos obtenidos, con sondas multiparamétricas para medición de variables en agua, con los proporcionados por la Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Puebla sobre calidad del aire y con el histórico proporcionado por Weather Spark sobre temperatura ambiente, por último se realizó una prueba para determinar la exactitud del sistema GPS incorporado, después de todas las pruebas que se realizaron se determina que el sistema es completamente funcional y con lo cual se abarcaron todos los objetivos planteados del trabajo. En la siguiente sección se presentan las conclusiones y trabajo futuro del proyecto.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El prototipo desarrollado es una primera versión para que pueda formar parte de uno de los laboratorios que requiere la Licenciatura de Gestión de Ciudades Inteligentes y Transiciones Tecnológicas de la BUAP, ya que se requiere de equipo que permita realizar mediciones de variables ambientales y que tenga la característica de enviar la información recabada a la nube para su posterior análisis en prácticas que desarrollan los alumnos en dicha carrera, con lo cual podrán realizar estudios a partir del análisis de datos, que ayuden a generar estrategias para preservar el medio ambiente y los recursos naturales. A continuación, se muestran las conclusiones de este trabajo de manera puntual.

- El sistema puede efectuar mediciones de variables ambientales de aire y de agua dependiendo de las necesidades.
- Tiene la flexibilidad de seleccionar entre 7 variables diferentes con intervalos de tiempo diferentes para cada variable, utilizando la aplicación para dispositivos móviles.
- El sistema desarrollado tiene la flexibilidad de enviar la información a la base de datos en la nube a través de dos redes diferentes Wifi y Sigfox.
- El sistema fue pensado para estar dentro de un laboratorio alimentándolo con un eliminador o ser portátil, ya que se puede adicionar una batería para la alimentación del sistema.
- Al ser un diseño propio se pueden realizar adecuaciones para adicionar sensores para medir otras variables y nuevos elementos de comunicación.
- El sistema puede ser alimentado usando un eliminador de 12 VDC o una batería de 5 VDC.
- Al diseñar el sistema con un microcontrolador ARM, este puede cambiarse por uno de mejores características, de una empresa diferente, con cambios mínimos en el firmware.
- En la página Web, no solo se puede ver en tiempo real los datos recabados por el sistema, también se puede descargar un histórico de estos en una hoja de cálculo de Excel para realizar un análisis más profundo.

Conclusiones y trabajo futuro

- La comparación de mediciones en agua fue satisfactoria, ya que los resultados arrojados están dentro del rango de precisión de los sensores.
- Los resultados de índice de calidad del aire para partículas son satisfactorios.
- Los resultados de temperatura ambiente, comparados con los obtenidos del histórico de Weather Spark, arrojaron una máxima variación de 0.4 grados Celsius.
- Los diversos módulos integrados al sistema de monitoreo ambiental pueden ser modificados, para mejorar las mediciones finales y optimizar el sistema completo.
- El prototipo desarrollado puede aplicar en Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad, así como en Agentes Tóxicos y Procesos Contaminantes de PRONACES, ya que ambos buscan el aprovechamiento y restauración de los ecosistemas.
- El sistema *Station Air Quality* de la empresa *Libelium* en su versión básica tiene un costo de 5 veces más que el prototipo desarrollado, mientras que la versión completa tiene un costo de 10 veces más.
- La sonda multiparamétrica para agua HI98194 tiene un costo de 7 veces más que el prototipo desarrollado.
- La sonda multiparamétrica para agua HI98129 tiene un costo comparable con el prototipo desarrollado.

A continuación, se presentan algunos trabajos futuros que, por exceder el alcance de esta tesis, no han podido ser tratados. Además, se sugieren algunos desarrollos específicos para mejorar el prototipo presentado. Entre los posibles trabajos futuros se destacan:

- Implementar la actualización de firmware, utilizando una memoria MicroSD o vía remota mediante Wifi, ya que esto ayudara cuando se añadan nuevos sensores o módulos al prototipo.
- Cambiar el microcontrolador del prototipo, por uno con mayor capacidad de memoria para así poder albergar el firmware del bootloader y el firmware de la aplicación.
- Implementar sensores de tipo industrial, los cuales tienen mayor intervalo de temperatura de funcionamiento, una mayor calidad y mejor precisión.
- Diseñar una carcasa para proteger los sensores de aire cuando sea necesario efectuar mediciones de líquidos.

- Aplicar seguridad a la aplicación para dispositivos móviles, para evitar que cualquier persona pueda configurar del sistema.
- Mejorar el firmware del prototipo implementando cambio automático de red y no realizarlo mediante la aplicación.
- Adicionar una batería recargable diseñando un sistema de protección contra cortos y de carga.
- Implementar una etapa de calibración de sensores.
- Se buscará obtener la patente del prototipo desarrollado.

REFERENCIAS

- [1] G. Delgado, C. Gay and M. Imaz, México frente al cambio climático, 1st ed. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [2] “Cambio climático”, Un.org, 2021. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>. [Accessed: 17-Mar- 2021].
- [3] R. Pachauri and L. Meyer, Climate change 2014, 1st ed. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- [4] F. E. Saavedra, “Crisis ambiental y cambio climático en la política global: un tema crecientemente, complejo para américa latina”, *Universum*, vol. 25, no. 3, pp. 57-77, 2010.
- [5] Oficina de Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, “Pérdidas económicas, pobreza y DESASTRES 1998-2017”, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters CRED, 2017.
- [6] U. Nations, “Las ciudades y la contaminación contribuyen al cambio climático | Naciones Unidas”, United Nations, 2021. [Online]. Available: <https://www.un.org/es/climate-change/climate-solutions/cities-pollution#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20principalmente%20identificada%20como,incrementa%20las%20emisiones%20de%20CO2>. [Accessed: 17- Mar- 2021].
- [7] “Qué es el cambio climático”, Miteco.gob.es, 2021. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/el-cambio-climatico/>. [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [8] “Calidad del aire ambiente (exterior) y salud”, Who.int, 2021. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [9] Naciones Unidas. (2019, Junio 17). Una población en crecimiento [Online]. Available: <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/population/index.html>

- [10] M. Perevochtchikova, “La situación actual del sistema de monitoreo ambiental en la zona metropolitana de la ciudad de México”, ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS Y URBANOS, vol. 24, no. 3, Marzo 2019.
- [11] “Informe del Medio Ambiente”, Apps1.semarnat.gob.mx, 2021. [Online]. Available: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/index.html>.
- [12] J. Linares y K. Vásquez, “Ciudades inteligentes: ¿materialización de la sostenibilidad o estrategia económica de modelo neoliberal?”, AGO. USB, vol. 18, no. 2, pp. 479-495, Julio 2018.
- [13] E. Duran, C. Ortega y R. Zarate, “Implementación de tecnologías para la innovación social en ciudades inteligentes”, ESPACIOS, vol. 40, no. 27, pp. 23, Agosto 2019.
- [14] “SEMARNAT”, Dgeiawf.semarnat.gob.mx, 2021. [Online]. Available: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_R_AIRE01_12&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce#:~:text=Sistema%20de%20Monitoreo%20de%20Calidad,en%20una%20zona%20o%20regi%C3%B3n. [Accessed: 23-Feb- 2021].
- [15] “Sistemas de Monitoreo Ambiental - Rosemlak Scientific - Ingenieria Life Science Health Care,” Rosemlak Scientific - Ingenieria Life Science Health Care, 2021. [Online]. Available: <https://www.rosemlak.com/sistemas-de-monitoreo-ambiental#:~:text=Los%20sistemas%20de%20Monitoreo%20Ambienta,Presi%C3%B3n%20diferencial>. [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [16] “Calidad del aire ambiente (exterior) y salud”, *Who.int*, 2021. [Online]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Accessed: 07- May- 2021].
- [17] Climático, “Estado de la Calidad del Aire en México”, gob.mx, 2021. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/inecc/es/articulos/estado-de-la-calidad-del-aire-en-mexico?idiom=es>. [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [18] B. E. Jiménez, La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada, 1er. Ed. México: Limusa, 2001.
- [19] “¿En qué consiste el procesamiento de datos? Definición y fases - Talend,” Talend Real-Time Open Source Data Integration Software, 2021. [Online]. Available:

- <https://www.talend.com/es/resources/what-is-data-processing/>. [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [20] ORACLE. (2014, Julio 31). Base de datos [Online]. Available: <https://www.oracle.com/mx/database/what-is-database>
- [21] “Datos, información, conocimiento”, Sinnexus.com, 2021. [Online]. Available: https://www.sinnexus.com/business_intelligence/piramide_negocio.aspx. [Accessed: 23- Feb- 2021].
- [22] C. Ortega Rodríguez, J. Ibarra Almeda and D. Cardona Ríos, “Estación meteorológica con RaspBerry utilizando IoT enfocada a cultivos protegidos y a campo abierto”, *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*, vol. 11, no. 9, pp. 2614-2617, 2019. [Accessed 6 May 2021].
- [23] N. Quintana Hernández, L. Méndez González, L. Rodríguez Picón and V. García Jiménez, “Prototipo de estación meteorológica”, *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*, vol. 11, no. 2, pp. 2274-2279, 2019. [Accessed 6 May 2021].
- [24] D. Arango Parrado, F. Rincón Infante, L. Manrique Daza and D. Buitrago Rojas, “ESTACIÓN METEOROLÓGICA INALÁMBRICA”, *Umbral Científico, Bogotá Colombia*, no. 17, pp. 67-72, 2010. [Accessed 6 May 2021].
- [25] E. Marín García, J. Torres Marín and A. Serna Ruiz, “Sistema Meteorológico con Comunicación Remota Usando Zigbee”, *Lámpsakos*, no. 20, pp. 13-21, 2018. Available: 10.21501/21454086.2855 [Accessed 6 May 2021].
- [26] M. Salcedo and J. Cendrós, “USO DEL MINICOMPUTADOR DE BAJO COSTO “RASPERRY PI” EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS”, *Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, vol. 15, no. 1, pp. 62-84, 2016. [Accessed 6 May 2021].
- [27] J. Huazano Arroyo, A. Méndez Patiño, E. Reyes Archundia, J. Gutiérrez Gnechi and M. García Ramírez, “Sistema de Control Embebido en Tiempo Real para una Estación Meteorológica Portátil”, *Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*, vol. 10, no. 3, pp. 1665-1670, 2018. [Accessed 6 May 2021].
- [28] J. BLANCO VELANDIA and J. PÉREZ CASTILLO, “REDES INALÁMBRICAS DE GEOSENSORES APLICADAS EN SISTEMAS DE OBSERVACIÓN Y

Referencias

- MONITOREO AMBIENTAL”, *Gerencia Tecnológica Informática*, vol. 11, no. 29, pp. 59-68, 2012. [Accessed 6 May 2021].
- [29] G. López Martínez, “Estación Meteorológica para la Conformación de Redes. Proceso de Instalación”, *Scientia et technica*, vol. 21, no. 1, p. 115, 2016. Available: 10.22517/23447214.12691 [Accessed 6 May 2021].
- [30] "El daño ambiental aumenta en todo el planeta, pero aún hay tiempo para revertir el peor impacto si los gobiernos actúan ahora: PNUMA", UN Environment, 2021. [Online]. Available: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/noticias/el-dano-ambiental-aumenta-en-todo-el-planeta-pero-aun-hay-tiempo#:~:text=En%20todo%20el%20mundo%2C%20el,del%202030%2C%20indican%20los%20informes>.
- [31] "Medio ambiente", World Bank, 2021. [Online]. Available: <https://www.bancomundial.org/es/topic/environment/overview>.
- [32] "Para qué sirve el monitoreo ambiental", Alsglobal.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.alsglobal.com/%2Fes-co%2Fnews%2Farticulos%2F2019%2F08%2Fpara-qu-sirve-el-monitoreo-ambiental>.
- [33] K. Arbeláez Bermúdez and M. Parra Sepúlveda, "Análisis de impacto ambiental y social de la planta de tratamiento de aguas residuales barra da tijuca en Brasil como lecciones aprendidas para la ciudad de Bogotá D. C.", licenciatura, universidad católica de Colombia, 2017.
- [34] "¿Cuáles son las características de una ciudad sostenible? | Ingredientes que Suman", Ingredientes que Suman, 2021. [Online]. Available: <https://blog.oxfamintermon.org/cuales-son-las-caracteristicas-de-una-ciudad-sostenible/>.
- [35] BUAP. Licenciatura de Gestión de Ciudades Inteligentes y Transiciones Tecnológicas [Online]. Available: <https://des.buap.mx/?q=pdf/licenciatura-en-gesti%C3%B3n-de-ciudades-inteligentes-y-transiciones-tecnol%C3%B3gicas>.
- [36] Mitchell, C., 2021. OPS/OMS | OMS estima que 7 millones de muertes ocurren cada año debido a la contaminación atmosférica. [online] Pan American Health Organization / World Health Organization. Available at: https://www3.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9406:2

- 014-7-million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es> [Accessed 10 June 2021].
- [37] SEMARNAT, “NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.”, CDMX, 2019.
- [38] “Norma Oficial Mexicana Nom-036-Ecol-1993”, *Siga.jalisco.gob.mx*, 1983. [Online]. Available:
<http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom036semarnat1993.htm>.
 [Accessed: 20- May- 2021].
- [39] “Norma Oficial Mexicana Nom-037-Ecol-1993”, *Siga.jalisco.gob.mx*, 1993. [Online]. Available:
<http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom037semarnat1993.htm>.
 [Accessed: 20- May- 2021].
- [40] “NOM-038-SEMARNAT-1993 NOM-038-SEMARNAT-1993”, *Cmic.org.mx*, 1993. [Online]. Available:
https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/medioambiente/Varios/Leyes_y_Normas_SEMARNAT/NOM/Medici%C3%B3n%20de%20Concentraciones/3.%201993.pdf. [Accessed: 20- May- 2021].
- [41] “Norma Oficial Mexicana Nom-034-SEMARNAT-1993”, *Siga.jalisco.gob.mx*, 1993. [Online]. Available:
<http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom034semarnat1993.htm>.
 [Accessed: 20- May- 2021].
- [42] “Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993”, *Siga.jalisco.gob.mx*, 2021. [Online]. Available:
<http://siga.jalisco.gob.mx/assets/documentos/normatividad/nom035semarnat1993.htm>.
 [Accessed 19 October 2021].
- [43] “Emisiones de dióxido de carbono | US EPA”, *US EPA*, 2017. [Online]. Available:
<https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>. [Accessed: 20- May- 2021].
- [44] “¿Qué es la humedad relativa y por qué es tan importante? Clima de búsqueda”, *Quest Climate*, 2020. [Online]. Available:

Referencias

- <https://www.questclimate.com/es/%C2%BFQu%C3%A9-es-la-humedad-relativa-y-por-qu%C3%A9-es-importante%3F/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [45] "PRESIÓN ATMOSFÉRICA; QUÉ ES Y COMO SE MIDE - SailandTrip", *SailandTrip*, 2016. [Online]. Available: <https://sailandtrip.com/presion-atmosferica/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [46] "Temperatura del aire", *meteoblue*, 2020. [Online]. Available: <https://content.meteoblue.com/es/meteoscool/el-tiempo/temperatura>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [47] "NOM-002-ECOL-1996", *Profepa.gob.mx*, 1996. [En línea]. Disponible: <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3295/1/nom-002-semarnat-1996.pdf>. [Consultado: 19 de octubre de 2021].
- [48] "Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2016: Agua y empleo", *Fondo para los Objetivos de Desarrollo Sostenible*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.sdgfund.org/es/informe-de-las-naciones-unidas-sobre-el-desarrollo-de-los-recursos-h%C3%ADdricos-en-el-mundo-2016-agua-y>. [Consulta: 21 de mayo de 2021].
- [49] "NMX-AA-007-SCFI-2013", *Legismex.mty.itesm.mx*, 2013. [En línea]. Disponible: http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa007-2014_01.pdf. [Consultado: 19 de octubre de 2021].
- [50] "NMX-AA-008-SCFI-2016", *Gob.mx*, 2016. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166767/NMX-AA-008-SCFI-2016.pdf>. [Consultado: 19 de octubre de 2021].
- [51] "NMX-AA-005-SCFI-2013", *Gob.mx*, 2013. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166764/nmx-aa-005-scfi-2013.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [52] "NMX-AA-044-SCFI-2014", *Gob.mx*, 2014. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166148/nmx-aa-044-scfi-2014.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [53] "NMX-AA-46-1981", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1981. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa046can.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].

-
- [54] "NMX-AA-57-1981", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1981. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa057.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [55] "NMX-AA-058-SCFI-2001", *Gob.mx*, 2001. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166784/NMX-AA-058-SCFI-2001.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [56] "NMX-AA-60-1978", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1978. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa060.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [57] "NMX-AA-64-1981", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1981. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa064.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [58] "NMX-AA-66-1981", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1981. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa066.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [59] "NOM-AA-76-1981", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1981. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa076.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [60] "NMX-AA-78-1982", *Legismex.mty.itesm.mx*, 1982. [Online]. Available: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa078.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [61] U. Ruiz, "La agricultura y la ganadería, las actividades primarias que más contaminan el agua", *EFEverde*, 2018. [Online]. Available: <https://www.efeverde.com/noticias/contaminacion-agua-agricultura-ganaderia-fao/>. [Accessed: 18- Oct- 2021].
- [62] "NOM-021-RECNAT-2000", *Ordenjuridico.gob.mx*, 2000. [Online]. Available: <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [63] A. DEAN, *EMBEDDED SYSTEMS FUNDAMENTALS WITH ARM CORTEX-M BASED MICROCONTROLLERS*. [S.I.]: ARM EDUCATION MEDIA, 2017.
- [64] W. Dunn, *Introduction to instrumentation, sensors and process control*. Boston: Artech House, 2006.
- [65] R. Solís and C. Valdivieso, *Microprocesadores Fundamentos y Aplicaciones: diseño embebido con simulaciones interactivas*, 1st ed. Ecuador: LATIn Project, 2018.
- [66] J. Yiu, *The definitive guide to ARM Cortex®-M3 and Cortex-M4 processors*, 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Newnes, 2014.

Referencias

- [67] "¿Qué es IoT?", *MIOTI*, 2020. [Online]. Available: <https://www.mioti.es/es/que-es-iot/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [68] "Todos los tipos de conexiones a Internet", *Tecnología + Informática*, 2020. [Online]. Available: <https://www.tecnologia-informatica.com/tipos-conexion-internet/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [69] "SIGFOX", *Sigfox.com*. [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [70] "LoRaWAN y LoRa", *Lorawan.es*. [Online]. Available: <https://lorawan.es/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [71] "¿Qué es NB-IoT?", *Tecnología++*, 2018. [Online]. Available: <https://informatica.blogs.uoc.edu/que-es-nb-iot/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [72] "¿Qué es el Bluetooth y para qué sirve?", *SoftwareLab*, 2018. [Online]. Available: <https://softwarelab.org/es/bluetooth/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [73] D. Ortiz, "¿Qué es un *dashboard* y para qué se usa? (2021)", *Cyberclick.es*, 2021. [Online]. Available: <https://www.cyberclick.es/numerical-blog/que-es-un-dashboard>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [74] J. Kyes, "¿Qué significa GPS?", *Geotab*, 2020. [Online]. Available: <https://www.geotab.com/es-latam/blog/qu%C3%A9-significa-gps/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [75] H. Hidalgo, "Tipos de Baterías Eléctricas y Acumuladores", *Baterías de Grafeno*, 2017. [Online]. Available: <http://bateriasdegrafenopara.com/tipos-de-baterias/>. [Accessed: 19- Oct- 2021].
- [76] "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer", 2019, Maximun Integrated. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [77] "BMP180 Digital pressure sensor", 2013, BOSCH Invented for life. [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [78] N. Askari. "w25qxx SPI FLASH driver for stm32 HAL". [Online]. Available: <https://github.com/nimaltd/w25qxx>. [Accessed: 20-May-2022].

- [79] “Intelligent Infrared CO2 Module (Model: MH-Z19)”, Winsen. [Online]. Available: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/PDF/Infrared%20Gas%20Sensor/NDIR%20CO2%20SENSOR/MH-Z19%20CO2%20Ver1.0.pdf>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [80] “CALIDAD DEL AIRE”, Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable y Ordenamiento Territorial del Gobierno de Puebla, [Online]. Available: <https://calidaddel Aire.puebla.gob.mx/views/principal.php>. [Accessed: 10-Nov-2022].
- [81] “El tiempo durante todo el año en cualquier lugar del mundo”. [Online]. Available: <https://es.weatherspark.com/>. [Accessed: 10-Nov-2022].

ANEXOS

Anexo A. Programa del módulo ESP-12F

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <NTPClient.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <FirebaseESP8266.h>

#define LED 2
#define FIREBASE_HOST "https://monitoreo-ambiental-puebla-default-
rtbd.firebaseio.com"
#define FIREBASE_AUTH "NiKoji3L0PBhSPSDBuMGOhTPR3HIFy9iID1JqVQx"

char ssid[20];
char password[20];
String cont;
String ssi;
String datos_sigfox;
String agua;
String aire;
String pm25;
String pm10;
String co;
String no_2;
String co_2;
String tds;
int agua_1;
int aire_1;
int pm25_1;
int pm10_1;
int co_1;
int no_2_1;
int co_2_1;
int tds_1;
char datos[50];
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP);
String formattedDate;
String dayStamp;
String timeStamp;
String año;
String dia;
String mes;
String hora;
String minuto;
int año_1;
int dia_1;
int mes_1;
int hora_1;
int minuto_1;
FirebaseData firebaseData;
FirebaseJson json;
String path = "/Monitoreo Puebla";
```

```
String user = "jazmin";
String sensor = "prueba";
int valuePrueba = 12;
int valCO2 = 25;
int enviar = 0;

void config_wifi(){
  WiFi.disconnect();
  delay(1000);
  Serial.println("SSID");
  while(!Serial.available());
  if(Serial.available()){
    ssi=Serial.readStringUntil('\n');
    Serial.print(ssi);
  }
  Serial.println("password");
  while(!Serial.available());
  if(Serial.available()){
    cont=Serial.readStringUntil('\n');
    Serial.print(cont);
  }
  ssi.toCharArray(ssid, ssi.length());
  cont.toCharArray(password, cont.length());
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(200);
    Serial.print('.');
  }
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.print("OK\n\r");
  }
  Serial.println();
  Serial.print("Conectado a:\t");
  Serial.println(WiFi.SSID());
  Serial.print("IP address:\t");
  Serial.println(WiFi.localIP());
  timeClient.begin();
  timeClient.setTimeOffset(-18000);
}

void wifi_conectado(){
  if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
    Serial.print("OK\n\r");
  }else{
    Serial.print("Error\n\r");
  }
}

void send_firebase(){
  int Iaire = 0;
  int Iagua = 0;
  int IPM25 = 0;
  int IPM10 = 0;
  int ICO = 0;
  int INO2 = 0;
  int ICO2 = 0;
```

```

int ITDS = 0;
if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
  Serial.print("OK\n\r");
  while(!Serial.available());
  if(Serial.available()){
    datos_sigfox=Serial.readStringUntil('\n');
    Serial.println(datos_sigfox);
    Iaire=datos_sigfox.indexOf(",");
    aire=datos_sigfox.substring(0,Iaire);
    Serial.println(aire);
    aire_1=aire.toInt();
    Iagua=datos_sigfox.indexOf(",",Iaire+1);
    agua=datos_sigfox.substring(Iaire+1,Iagua);
    Serial.println(agua);
    agua_1=agua.toInt();
    IPM25=datos_sigfox.indexOf(",",Iagua+1);
    pm25=datos_sigfox.substring(Iagua+1,IPM25);
    Serial.println(pm25);
    pm25_1=pm25.toInt();
    IPM10=datos_sigfox.indexOf(",",IPM25+1);
    pm10=datos_sigfox.substring(IPM25+1,IPM10);
    Serial.println(pm10);
    pm10_1=pm10.toInt();
    ICO=datos_sigfox.indexOf(",",IPM10+1);
    co=datos_sigfox.substring(IPM10+1,ICO);
    Serial.println(co);
    co_1=co.toInt();
    INO2=datos_sigfox.indexOf(",",ICO+1);
    no_2=datos_sigfox.substring(ICO+1,INO2);
    Serial.println(no_2);
    no_2_1=no_2.toInt();
    ICO2=datos_sigfox.indexOf(",",INO2+1);
    co_2=datos_sigfox.substring(INO2+1,ICO2);
    Serial.println(co_2);
    co_2_1=co_2.toInt();
    ITDS=datos_sigfox.indexOf(",",ICO2+1);
    tds=datos_sigfox.substring(ICO2+1,ITDS);
    Serial.println(tds);
    tds_1=tds.toInt();
  }

  while(!timeClient.update()){
    timeClient.forceUpdate();
  }
  formattedDate = timeClient.getFormattedDate();
  int splitT = formattedDate.indexOf("T");
  dayStamp = formattedDate.substring(0, splitT);
  int f1 = dayStamp.indexOf("-");
  año = dayStamp.substring(2, f1);
  int f2 = dayStamp.indexOf("-",f1+1);
  mes = dayStamp.substring(f1+1, f2);
  int f3 = dayStamp.indexOf("-",f2+1);
  dia = dayStamp.substring(f2+1, f3);
  Serial.println(dia);
  Serial.println(mes);
  Serial.println(año);
  año_1=año.toInt();
}

```

```

    mes_1=mes.toInt();
    dia_1=dia.toInt();
    timeStamp = formattedDate.substring(splitT+1, formattedDate.length()-
1);
    int f4 = timeStamp.indexOf(":");
    hora = timeStamp.substring(0, f4);
    int f5 = timeStamp.indexOf(":",f4+1);
    minuto = timeStamp.substring(f4+1, f5);
    Serial.println(hora);
    Serial.println(minuto);
    hora_1=hora.toInt();
    minuto_1=minuto.toInt();
    json.clear().add("Temp_Aire", aire_1);
    json.add("Temp_Agua", agua_1 );
    json.add("PM25", pm25_1 );
    json.add("PM10", pm10_1 );
    json.add("CO", co_1 );
    json.add("NO2", no_2_1 );
    json.add("CO2", co_2_1 );
    json.add("TDS", tds_1 );
    json.add("Dia", dia_1 );
    json.add("Mes", mes_1 );
    json.add("Año", año_1 );
    json.add("Hora", hora_1 );
    json.add("Minuto", minuto_1 );
    if (Firebase.pushJSON(firebaseData,path+ "/" + dia + "-" + mes + "-"
+ año, json)){
        Serial.println("PASSED");
        Serial.println("PATH: " + firebaseData.dataPath());
        Serial.print("PUSH NAME: ");
        Serial.println(firebaseData.pushName());
        Serial.println("ETag: " + firebaseData.ETag());
        Serial.println("-----");
        Serial.println();
    }else{
        Serial.println("FAILED");
        Serial.println("REASON: " + firebaseData.errorReason());
        Serial.println("-----");
        Serial.println();
    }
    }else{
        Serial.print("Error\n\r");
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(LED, OUTPUT);
    Serial.print("Conectando a:\t");
    Firebase.begin(FIREBASE_HOST, FIREBASE_AUTH);
    Firebase.reconnectWiFi(true);
    Firebase.setwriteSizeLimit(firebaseData, "tiny");
}

void loop() {
    digitalWrite(LED, HIGH);
    if(Serial.available()>0) {
        int i=Serial.readBytesUntil('\n',datos,50);

```

```
Serial.print(datos);
if(strstr(datos,"ConfigWIFI")){
  config_wifi();
}
if(strstr(datos,"WiFiconectado")){
  wifi_conectado();
}
if(strstr(datos,"EnviarFirebase")){
  send_firebase();
}
}
delay(200);
digitalWrite(LED, LOW);
delay(200);
}
```

Anexo B. Datos recabados de CO, partículas PM10 y PM2.5**Tabla 24.** Datos del 1 de noviembre del 2022.

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
11:10	42	415	48	44	18	63
12:10	44	435	47	43	19	65
13:10	42	415	48	44	20	67
14:10	43	425	48	44	18	63
15:10	45	445	54	49	18	63
16:10	45	445	55	50	17	61
17:10	44	435	55	50	17	61
18:10	46	455	57	51	19	65
19:10	45	445	57	51	18	63
20:10	45	445	58	52	18	63
21:10	46	455	59	52	19	65
22:10	45	445	57	51	17	61
23:10	43	425	55	50	18	63

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-2.5
00:00	F.O.	9	14	2	33	55
01:00	F.O.	9	14	2	34	57
02:00	F.O.	7	14	2	35	57
03:00	F.O.	7	13	2	35	55
04:00	F.O.	7	13	2	36	57
05:00	F.O.	5	12	2	36	57
06:00	F.O.	6	11	2	36	57
07:00	F.O.	6	11	2	38	57
08:00	F.O.	8	12	2	39	57
09:00	F.O.	14	13	2	39	57
10:00	F.O.	16	14	2	41	58
11:00	F.O.	6	14	2	43	60
12:00	F.O.	5	14	2	43	60
13:00	F.O.	5	14	2	44	60
14:00	F.O.	4	15	2	45	61
15:00	F.O.	3	14	2	51	63
16:00	F.O.	3	14	2	51	63
17:00	F.O.	3	13	2	51	63
18:00	F.O.	2	12	2	51	63
19:00	F.O.	7	12	2	52	63
20:00	F.O.	7	12	2	52	64
21:00	F.O.	8	12	2	52	64
22:00	F.O.	10	12	2	52	63
23:00	F.O.	10	13	2	51	63

Figura 65. Histórico de calidad del aire del 1 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 25. Datos del 3 de noviembre del 2022.

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	44	435	43	39	17	61
01:10	44	435	43	39	17	61
02:10	44	435	42	38	16	59
03:10	45	445	41	37	16	59
04:10	44	435	38	35	16	59
05:10	44	435	39	35	17	61
06:10	44	435	40	36	17	61
07:10	45	445	40	36	17	61
08:10	45	445	41	37	18	63
09:10	46	455	43	39	18	63
10:10	46	455	45	41	18	63
11:10	47	465	46	42	17	61
12:10	46	455	64	55	17	61
13:10	46	455	72	59	17	61
14:10	45	445	82	64	16	59
15:10	46	455	82	64	17	61
16:10	45	445	83	64	17	61
17:10	44	435	87	66	18	63
18:10	44	435	92	69	19	65
19:10	43	425	93	69	18	63
20:10	44	435	91	68	18	63
21:10	45	445	88	67	17	61
22:10	45	445	83	64	17	61
23:10	44	435	84	65	17	61

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-25
00:00	F.O.	9	11	2	39	61
01:00	F.O.	7	11	2	38	61
02:00	F.O.	6	11	2	38	61
03:00	F.O.	5	11	2	36	60
04:00	F.O.	5	11	2	35	60
05:00	F.O.	5	11	2	35	60
06:00	F.O.	5	11	2	35	60
07:00	F.O.	6	11	2	36	60
08:00	F.O.	6	12	2	38	61
09:00	F.O.	8	13	2	40	61
10:00	F.O.	14	14	2	41	61
11:00	F.O.	8	14	2	43	61
12:00	F.O.	5	14	2	54	61
13:00	F.O.	5	14	2	60	60
14:00	F.O.	4	14	2	63	60
15:00	F.O.	6	14	2	64	60
16:00	F.O.	4	14	2	65	61
17:00	F.O.	5	13	2	67	61
18:00	F.O.	3	12	2	68	61
19:00	F.O.	6	12	2	70	63
20:00	F.O.	8	13	2	68	61
21:00	F.O.	7	13	2	67	61
22:00	F.O.	10	13	2	65	60
23:00	F.O.	9	13	2	65	60

Figura 66. Histórico de calidad del aire del 3 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 26. Datos del 4 de noviembre del 2022.

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	45	445	84	65	16	59
01:10	45	445	84	65	16	59
02:10	44	435	83	64	16	59
03:10	44	435	83	64	16	59
04:10	44	435	82	64	16	59
05:10	43	425	82	64	15	56
06:10	43	425	79	62	15	56
07:10	44	435	79	62	16	59
08:10	44	435	78	62	17	61
09:10	47	465	78	62	17	61
10:10	46	455	77	61	16	59
11:10	46	455	74	60	16	59
12:10	47	465	64	55	16	59
13:10	47	465	49	45	16	59
14:10	47	465	46	42	17	61
15:10	45	445	47	43	16	59
16:10	45	445	48	44	16	59
17:10	45	445	47	43	17	61
18:10	45	445	46	42	16	59
19:10	45	445	46	42	15	56
20:10	45	445	46	42	16	59
21:10	46	455	47	43	17	61
22:10	45	445	47	43	17	61
23:10	45	445	48	44	16	59

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-2.5
00:00	F.O.	8	13	2	65	60
01:00	F.O.	8	13	2	65	60
02:00	F.O.	7	13	2	65	60
03:00	F.O.	6	13	2	65	60
04:00	F.O.	6	12	2	64	60
05:00	F.O.	4	12	2	64	58
06:00	F.O.	3	12	2	63	58
07:00	F.O.	5	12	2	63	57
08:00	F.O.	9	13	2	63	57
09:00	F.O.	18	15	2	63	57
10:00	F.O.	12	15	2	63	57
11:00	F.O.	9	16	2	61	57
12:00	F.O.	8	16	2	54	57
13:00	F.O.	6	17	2	44	58
14:00	F.O.	5	17	2	43	58
15:00	F.O.	4	17	2	43	58
16:00	F.O.	5	15	2	43	58
17:00	F.O.	5	14	2	43	58
18:00	F.O.	6	13	2	41	57
19:00	F.O.	6	13	2	40	57
20:00	F.O.	9	13	2	41	58
21:00	F.O.	10	14	2	41	60
22:00	F.O.	11	14	2	43	60
23:00	F.O.	10	15	2	43	60

Figura 67. Histórico de calidad del aire del 4 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 27. Datos del 5 de noviembre del 2022

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	46	455	47	43	16	59
01:10	46	455	47	43	17	61
02:10	46	455	50	45	17	61
03:10	45	445	50	45	17	61
04:10	44	435	54	49	18	63
05:10	44	435	62	54	18	63
06:10	43	425	63	54	19	65
07:10	43	425	63	54	19	65
08:10	45	445	60	53	19	65
09:10	45	445	60	53	18	63
10:10	45	445	63	54	18	63
11:10	46	455	66	56	18	63
12:10	46	455	70	58	19	65
13:10	45	445	70	58	19	65
14:10	44	435	70	58	20	67
15:10	44	435	72	59	19	65
16:10	42	415	71	58	19	65
17:10	42	415	70	58	20	67
18:10	42	415	70	58	20	67
19:10	42	415	76	61	20	67
20:10	43	425	75	60	21	69
21:10	43	425	75	60	21	69
22:10	43	425	75	60	22	71
23:10	43	425	75	60	21	69

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-2.5
00:00	F.O.	8	15	2	43	60
01:00	F.O.	7	15	2	44	60
02:00	F.O.	6	15	2	45	60
03:00	F.O.	7	15	2	45	61
04:00	F.O.	7	15	2	51	61
05:00	F.O.	5	14	2	52	63
06:00	F.O.	8	14	2	54	63
07:00	F.O.	7	13	2	54	64
08:00	F.O.	8	13	2	52	64
09:00	F.O.	15	14	2	52	63
10:00	F.O.	12	15	2	55	63
11:00	F.O.	7	15	2	55	64
12:00	F.O.	5	15	2	57	64
13:00	F.O.	3	15	2	58	66
14:00	F.O.	3	15	2	58	66
15:00	F.O.	3	14	2	58	66
16:00	F.O.	3	14	2	58	67
17:00	F.O.	3	12	2	58	67
18:00	F.O.	5	12	2	58	69
19:00	F.O.	7	12	2	60	69
20:00	F.O.	10	12	2	60	69
21:00	F.O.	13	13	2	60	69
22:00	F.O.	9	13	2	60	70
23:00	F.O.	5	13	2	60	70

Figura 68. Histórico de calidad del aire del 5 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 28. Datos del 6 de noviembre del 2022

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	43	425	75	60	21	69
01:10	44	435	76	61	21	69
02:10	44	435	76	61	22	71
03:10	43	425	76	61	22	71
04:10	44	435	76	61	22	71
05:10	44	435	76	61	22	71
06:10	43	425	81	63	21	69
07:10	43	425	80	63	21	69
08:10	43	425	77	61	21	69
09:10	43	425	73	59	21	69
10:10	43	425	73	59	21	69
11:10	44	435	76	61	21	69
12:10	44	435	76	61	21	69
13:10	43	425	75	60	23	73
14:10	43	425	75	60	23	73
15:10	42	415	75	60	23	73
16:10	42	415	76	61	22	71
17:10	41	405	75	60	22	71
18:10	41	405	74	60	21	69
19:10	42	415	76	61	21	69
20:10	42	415	73	59	21	69
21:10	42	415	74	60	21	69
22:10	42	415	72	59	21	69
23:10	42	415	71	58	21	69

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-2.5
00:00	F.O.	8	14	2	61	70
01:00	F.O.	7	14	2	61	70
02:00	F.O.	6	14	2	61	70
03:00	F.O.	8	14	2	61	70
04:00	F.O.	8	13	2	61	72
05:00	F.O.	7	13	2	61	70
06:00	F.O.	7	13	2	63	72
07:00	F.O.	8	13	2	63	72
08:00	F.O.	10	13	2	61	72
09:00	F.O.	14	13	2	60	72
10:00	F.O.	18	14	2	60	72
11:00	F.O.	7	14	2	61	72
12:00	F.O.	3	14	2	61	72
13:00	F.O.	2	14	2	61	72
14:00	F.O.	2	14	2	61	73
15:00	F.O.	2	13	2	60	73
16:00	F.O.	3	13	2	61	73
17:00	F.O.	3	12	2	61	73
18:00	F.O.	4	11	2	61	73
19:00	F.O.	5	11	2	61	73
20:00	F.O.	3	11	2	60	73
21:00	F.O.	8	12	2	60	72
22:00	F.O.	6	12	2	58	72
23:00	F.O.	9	12	2	58	70

Figura 69. Histórico de calidad del aire del 6 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 29. Datos del 7 de noviembre del 2022

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	42	415	70	58	21	69
01:10	42	415	70	58	21	69
02:10	42	415	63	54	20	67
03:10	42	415	63	54	20	67
04:10	42	415	59	52	20	67
05:10	42	415	60	53	20	67
06:10	42	415	60	53	19	65
07:10	44	435	60	53	18	63
08:10	44	435	59	52	18	63
09:10	45	445	64	55	18	63
10:10	46	455	64	55	18	63
11:10	46	455	63	54	18	63
12:10	42	415	62	54	18	63
13:10	42	415	57	51	18	63
14:10	42	415	58	52	17	61
15:10	42	415	58	52	17	61
16:10	42	415	57	51	16	59
17:10	42	415	61	53	16	59
18:10	42	415	66	56	16	59
19:10	42	415	68	57	15	56
20:10	42	415	79	62	15	56
21:10	42	415	98	72	14	54
22:10	42	415	111	78	15	56
23:10	42	415	112	79	13	52

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-25
00:00	F.O.	10	12	2	57	69
01:00	F.O.	9	12	2	55	69
02:00	F.O.	7	12	2	55	69
03:00	F.O.	7	12	2	54	67
04:00	F.O.	6	12	2	52	67
05:00	F.O.	6	12	2	52	66
06:00	F.O.	6	12	2	52	66
07:00	F.O.	8	12	2	52	64
08:00	F.O.	12	14	2	52	64
09:00	F.O.	13	15	2	54	64
10:00	F.O.	17	15	2	55	63
11:00	F.O.	18	16	2	54	63
12:00	F.O.	10	16	2	54	61
13:00	F.O.	4	16	2	52	61
14:00	F.O.	2	16	2	52	60
15:00	F.O.	3	15	2	52	60
16:00	F.O.	3	14	2	51	58
17:00	F.O.	1	13	2	54	58
18:00	F.O.	2	12	2	55	57
19:00	F.O.	4	11	2	58	55
20:00	F.O.	7	11	2	63	54
21:00	F.O.	9	12	2	71	54
22:00	F.O.	6	12	2	80	54
23:00	F.O.	4	12	2	80	55

Figura 70. Histórico de calidad del aire del 7 de noviembre del 2022 [80].

Tabla 30. Datos del 8 de noviembre del 2022

Hora	CO (ppm)	CO (ICA)	PM10 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM10 (ICA)	PM2.5 ($\frac{\mu g}{m^3}$)	PM2.5 (ICA)
00:10	42	415	112	79	14	54
01:10	42	415	113	79	15	56
02:10	42	415	116	81	15	56
03:10	42	415	116	81	14	54
04:10	42	415	110	78	14	54
05:10	42	415	109	77	14	54
06:10	42	415	109	77	14	54
07:10	42	415	106	76	15	56
08:10	42	415	107	76	14	54
09:10	42	415	109	77	15	56

Horas	O ₃	NO ₂	CO	SO ₂	PM-10	PM-25
00:00	F.O.	10	13	2	78	54
01:00	F.O.	8	13	2	80	54
02:00	F.O.	7	13	2	80	55
03:00	F.O.	6	13	2	80	55
04:00	F.O.	7	13	2	80	55
05:00	F.O.	6	12	2	78	55
06:00	F.O.	6	11	2	78	54
07:00	F.O.	6	12	2	78	54
08:00	F.O.	9	13	2	78	54
09:00	F.O.	13	14	2	77	55
10:00	F.O.	7	14	2	76	54
11:00	F.O.	4	14	2	74	54
12:00	F.O.	3	14	2	76	54
13:00	F.O.	3	14	2	74	54
14:00	F.O.	4	14	2	74	54
15:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
16:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
17:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
18:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
19:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
20:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
21:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
22:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato
23:00	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato	Sin dato

Figura 71. Histórico de calidad del aire del 8 de noviembre del 2022 [80].

Anexo C. Datos recabados de temperatura del aire

Tabla 31. Mediciones de temperatura del día 1 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
11:10	21.6	22.8
12:10	24.3	25.6
13:10	22.8	27.8
14:10	28.0	27.8
15:10	28.8	28.9
16:10	28.5	28.9
17:10	28.1	28.3
18:10	25.9	26.7
19:10	24.1	23.9
20:10	23.1	22.8
21:10	20.8	21.1
22:10	20.3	20.6
23:10	19.1	19.4

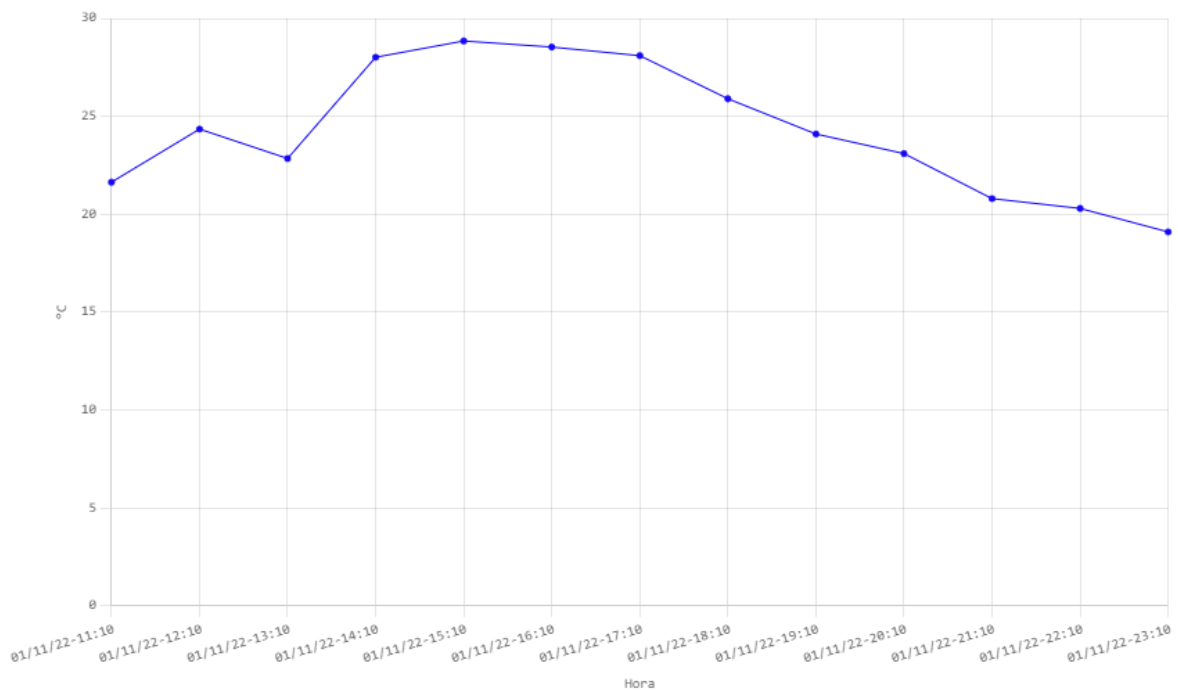


Figura 72. Gráfica de temperatura 01/11/22 (Web desarrollada).

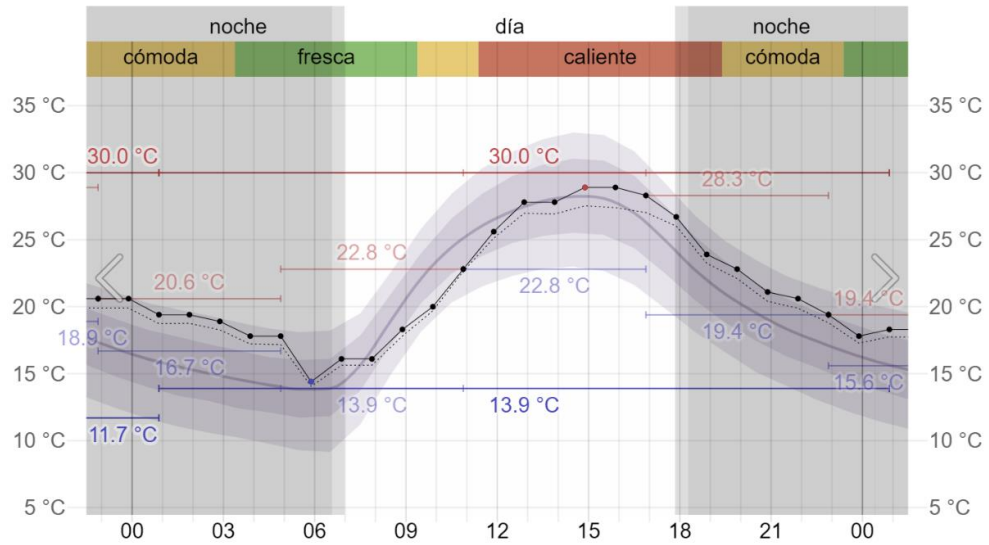


Figura 73. Gráfica de temperatura 01/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 32. Mediciones de temperatura del día 3 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	14.9	15.6
01:10	14.8	15.6
02:10	14.8	15.6
03:10	14.6	15.0
04:10	14.2	14.4
05:10	14.1	14.4
06:10	12.9	12.2
07:10	12.1	12.2
08:10	13.5	13.3
09:10	16.4	16.1
10:10	15.9	15.6
11:10	16.8	16.7
12:10	18.6	18.3
13:10	19.0	18.9
14:10	20.1	20.0
15:10	20.1	20.0
16:10	19.9	20.0
17:10	19.2	19.4
18:10	18.0	17.8
19:10	15.7	15.0
20:10	13.1	13.3
21:10	13.1	13.9
22:10	12.5	12.2
23:10	10.4	10.6

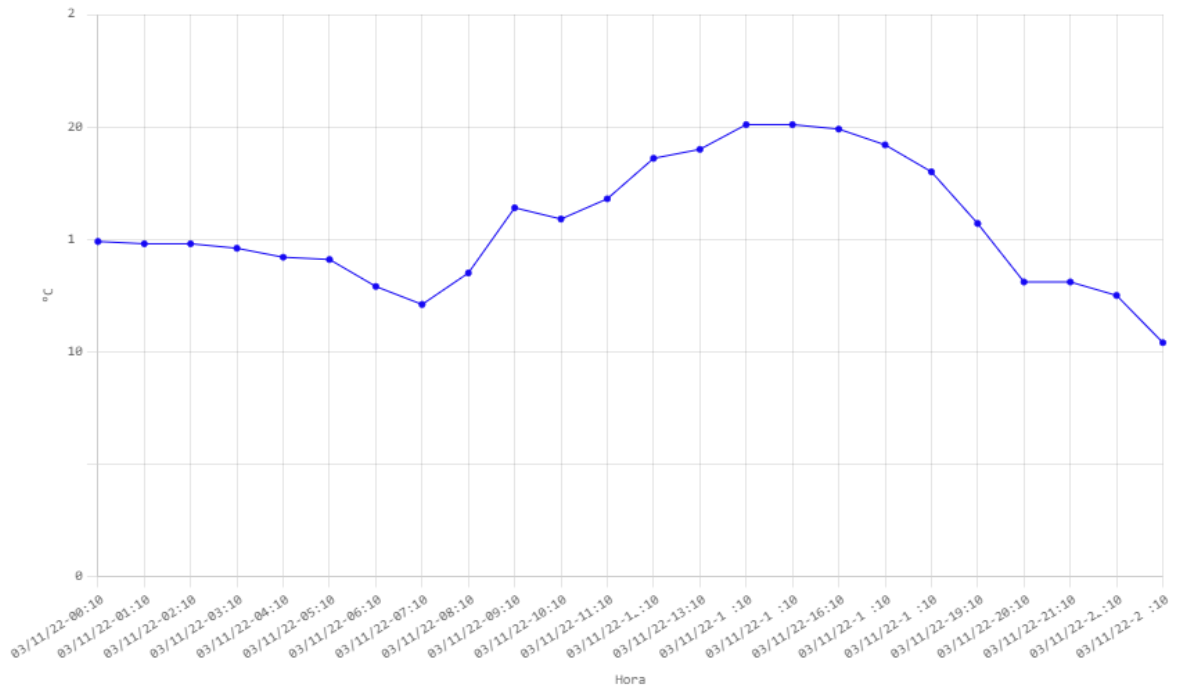


Figura 74. Gráfica de temperatura 03/11/22 (Web desarrollada).

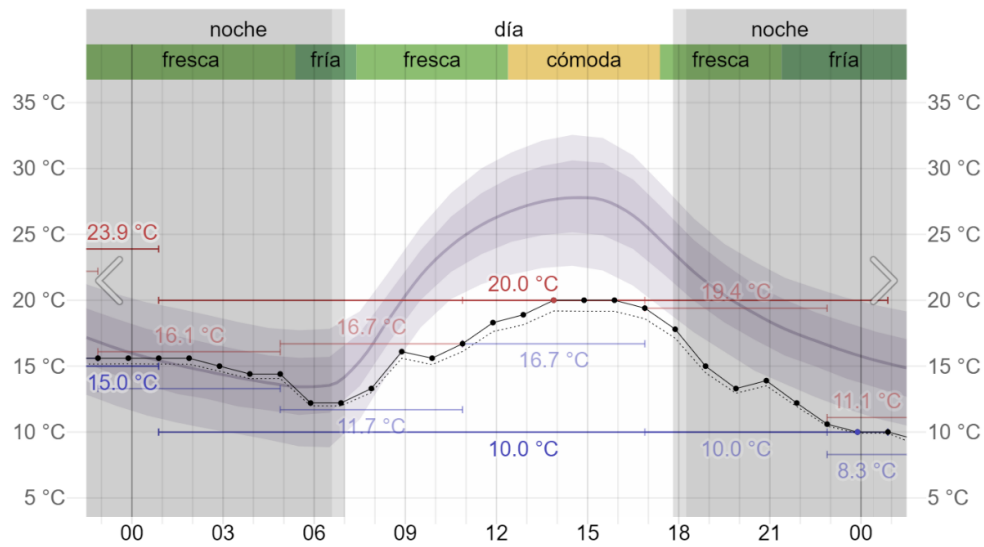


Figura 75. Gráfica de temperatura 03/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 33. Mediciones de temperatura del día 4 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	10.2	10.0
01:10	9.8	10.0
02:10	9.4	9.4
03:10	9.6	10.0
04:10	9.3	9.4
05:10	8.8	8.9
06:10	8.9	10.0
07:10	8.5	8.3
08:10	9.1	8.9
09:10	14.5	14.4
10:10	17.4	17.2
11:10	18.9	19.4
12:10	19.5	19.4
13:10	20.6	20.6
14:10	20.8	20.6
15:10	21.8	21.7
16:10	21.5	21.7
17:10	20.9	21.1
18:10	20.1	20.0
19:10	16.9	16.7
20:10	15.6	15.6
21:10	13.6	13.9
22:10	12.1	12.2
23:10	13.0	12.8

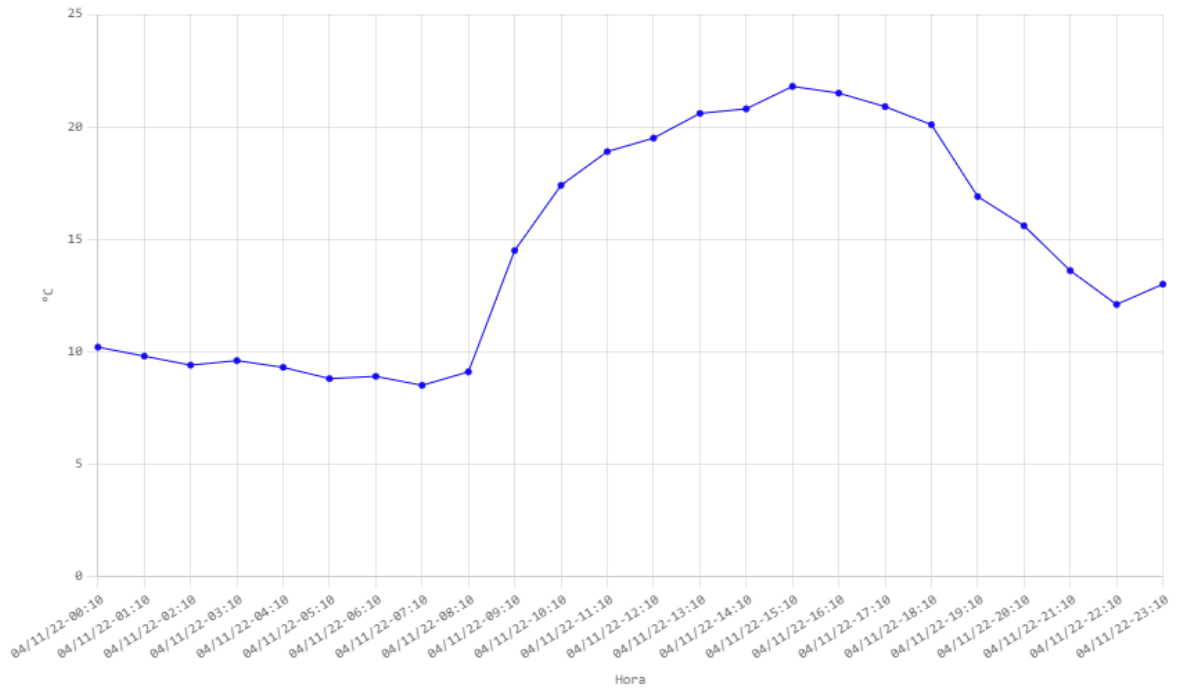


Figura 76. Gráfica de temperatura 04/11/22 (Web desarrollada).

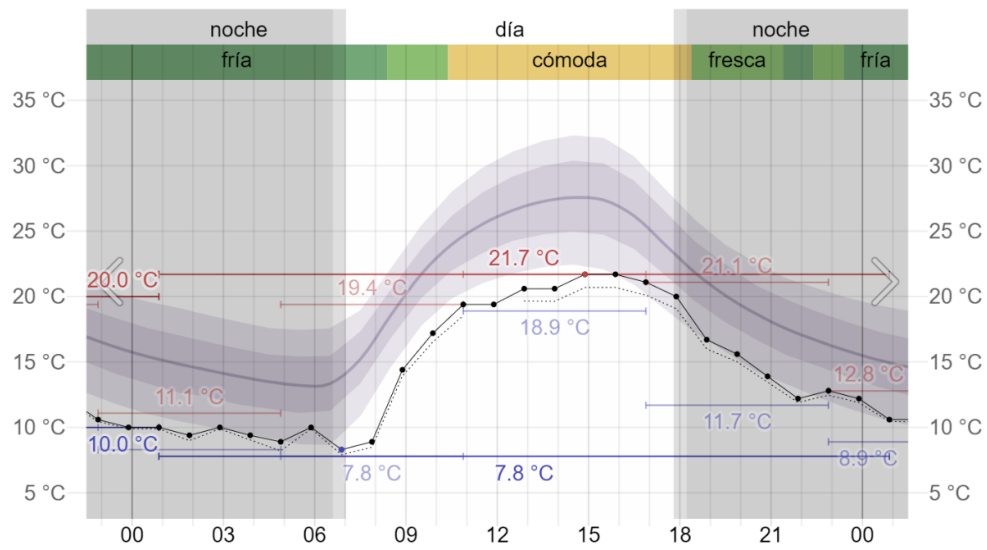


Figura 77. Gráfica de temperatura 04/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 34. Mediciones de temperatura del día 5 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	12.5	12.2
01:10	10.4	10.6
02:10	10.3	10.6
03:10	9.9	10.0
04:10	9.4	9.4
05:10	9.3	9.4
06:10	8.4	8.3
07:10	10.1	10.0
08:10	12.6	12.2
09:10	16.4	16.7
10:10	19.0	18.9
11:10	20.5	20.6
12:10	22.9	22.2
13:10	23.2	23.3
14:10	23.9	23.9
15:10	24.0	23.9
16:10	24.0	23.9
17:10	22.9	22.8
18:10	20.8	21.1
19:10	19.3	19.4
20:10	17.1	17.8
21:10	16.4	16.1
22:10	14.2	14.4
23:10	10.7	10.6

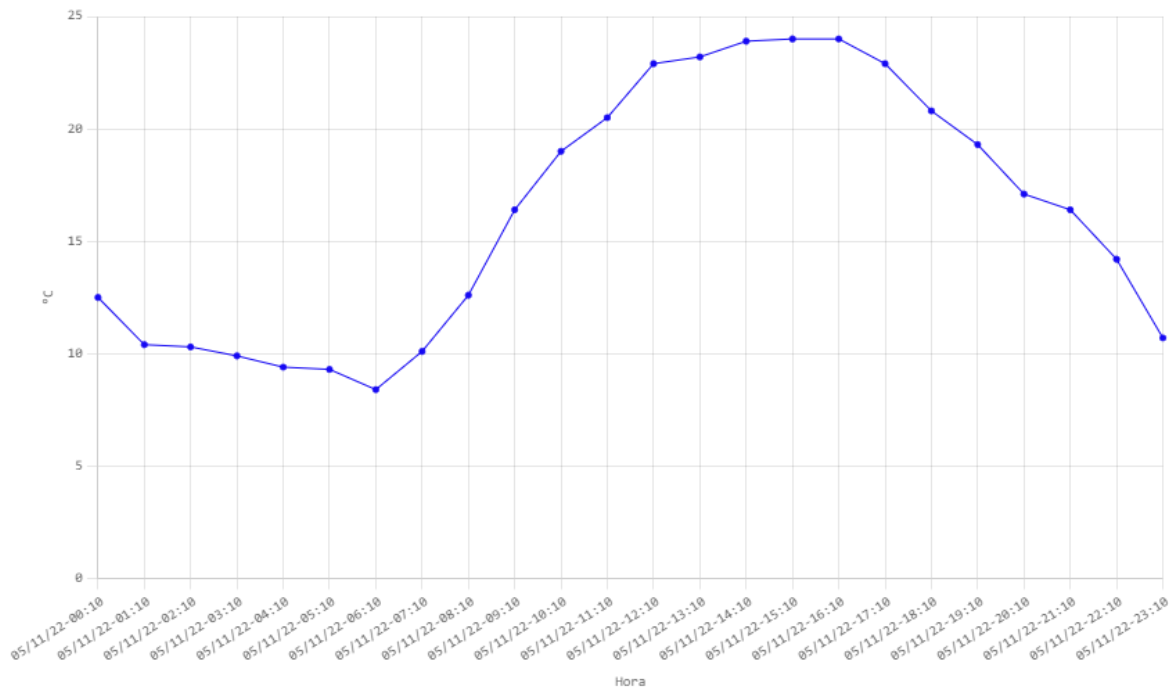


Figura 78. Gráfica de temperatura 05/11/22 (Web desarrollada).

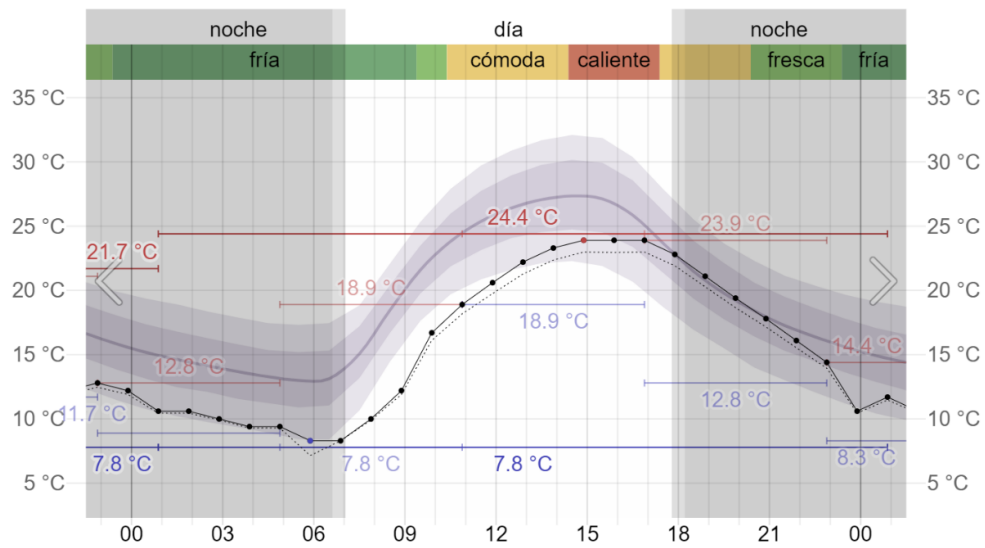


Figura 79. Gráfica de temperatura 05/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 35. Mediciones de temperatura del día 6 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	10.4	10.6
01:10	11.2	11.7
02:10	10.6	10.6
03:10	8.5	8.3
04:10	9.3	9.4
05:10	9.2	9.4
06:10	8.9	8.9
07:10	10.3	10.0
08:10	9.5	9.4
09:10	13.5	13.3
10:10	15.4	15.6
11:10	19.5	19.4
12:10	21.1	21.1
13:10	22.6	22.8
14:10	23.2	23.3
15:10	24.5	24.4
16:10	24.5	24.4
17:10	24.2	24.4
18:10	22.2	22.2
19:10	19.7	20
20:10	18.7	18.9
21:10	18.3	18.3
22:10	18.2	18.3
23:10	16.3	16.1

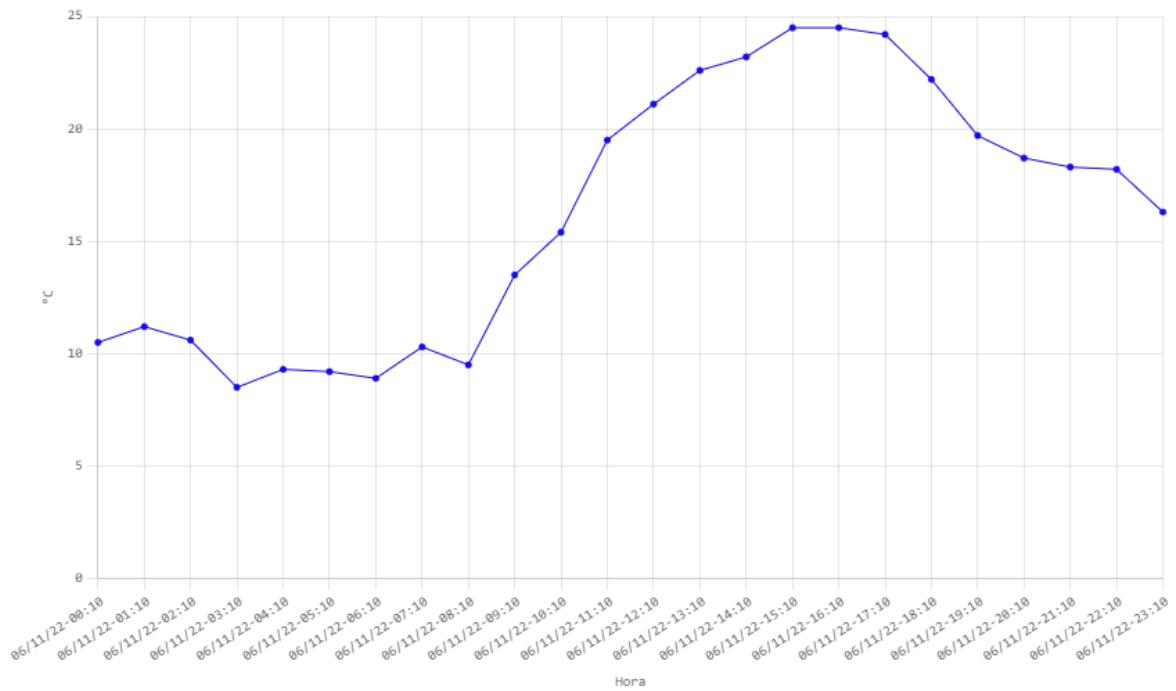


Figura 80. Gráfica de temperatura 06/11/22 (Web desarrollada).

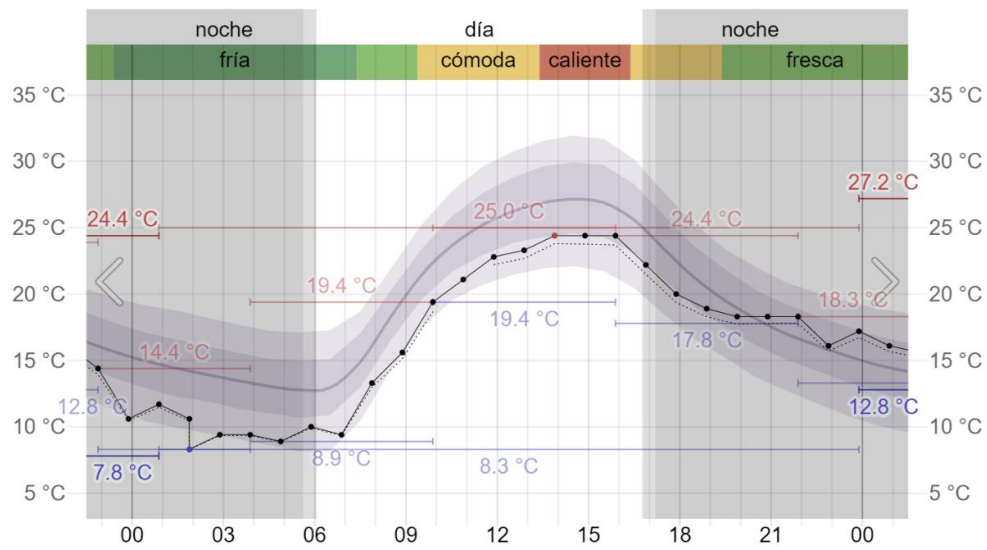


Figura 81. Gráfica de temperatura 06/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 36. Mediciones de temperatura del día 7 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	17.1	17.2
01:10	16.4	16.1
02:10	15.3	15.6
03:10	15.1	15.0
04:10	13.3	13.3
05:10	13.0	13.3
06:10	13.5	13.3
07:10	14.0	14.4
08:10	17.6	17.8
09:10	20.7	20.6
10:10	22.7	22.8
11:10	24.1	23.9
12:10	24.6	24.4
13:10	25.6	25.6
14:10	26.5	26.7
15:10	26.7	25.0
16:10	24.9	23.3
17:10	21.9	22.2
18:10	21.5	21.7
19:10	20.4	20.6
20:10	20.1	20.0
21:10	20.3	20.6
22:10	19.5	19.4
23:10	18.6	18.9

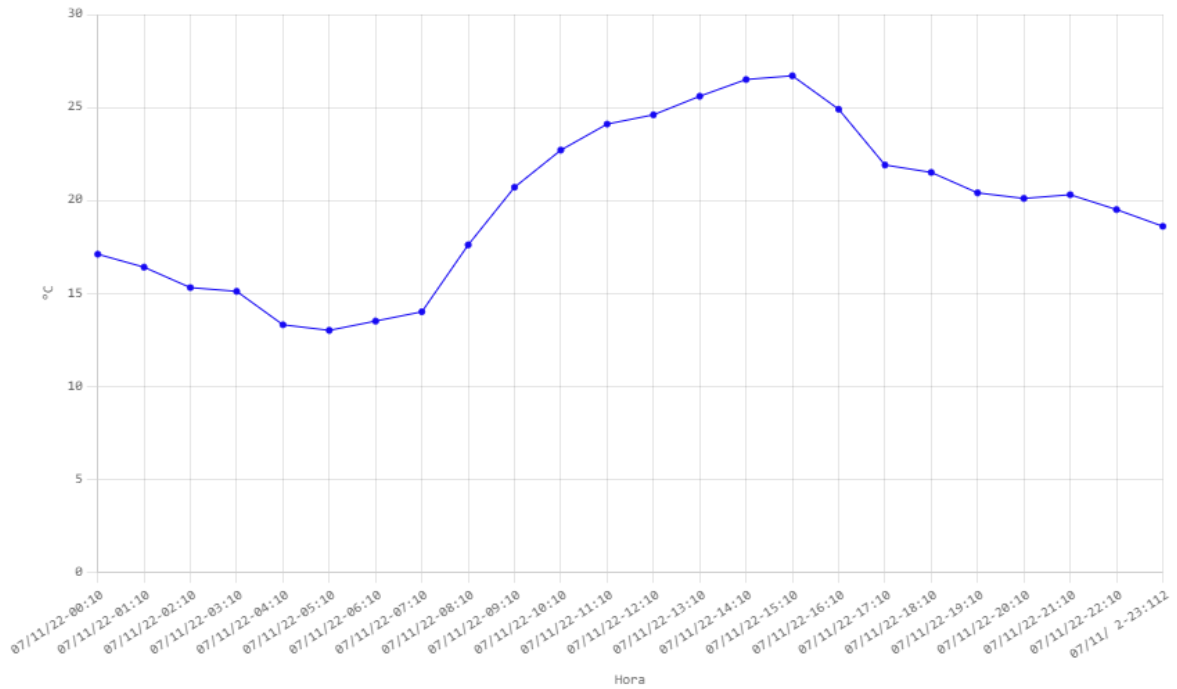


Figura 82. Gráfica de temperatura 07/11/22 (Web desarrollada).

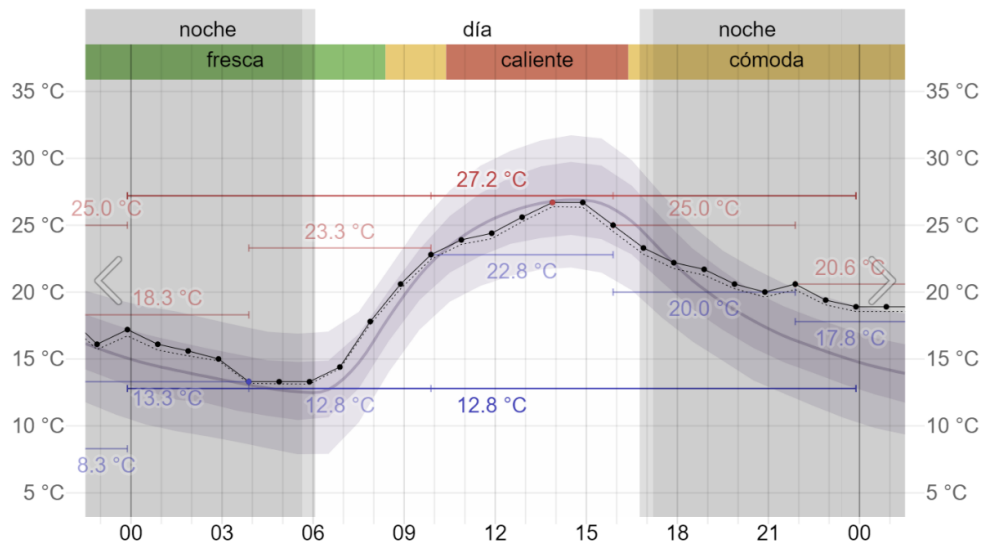


Figura 83. Gráfica de temperatura 07/11/22 (Weather Spark [81]).

Tabla 37. Mediciones de temperatura del día 8 de noviembre del 2022.

Hora	Sistema de monitoreo ambiental Temperatura (°C)	Weather Spark Temperatura (°C)
00:10	18.7	18.9
01:10	18.6	18.9
02:10	18.7	18.9
03:10	18.7	18.9
04:10	18.1	18.3
05:10	17.5	17.2
06:10	16.0	16.1
07:10	17.5	17.2
08:10	18.8	18.9
09:10	20.7	20.6

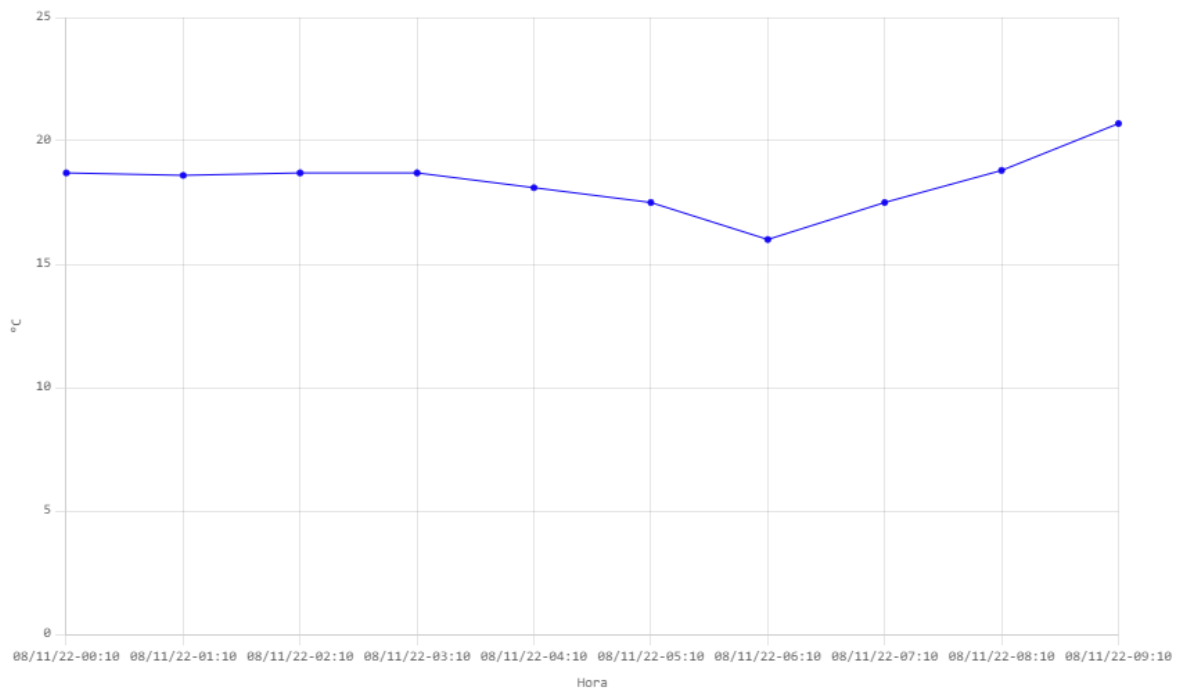


Figura 84. Gráfica de temperatura 08/11/22 (Web desarrollada).

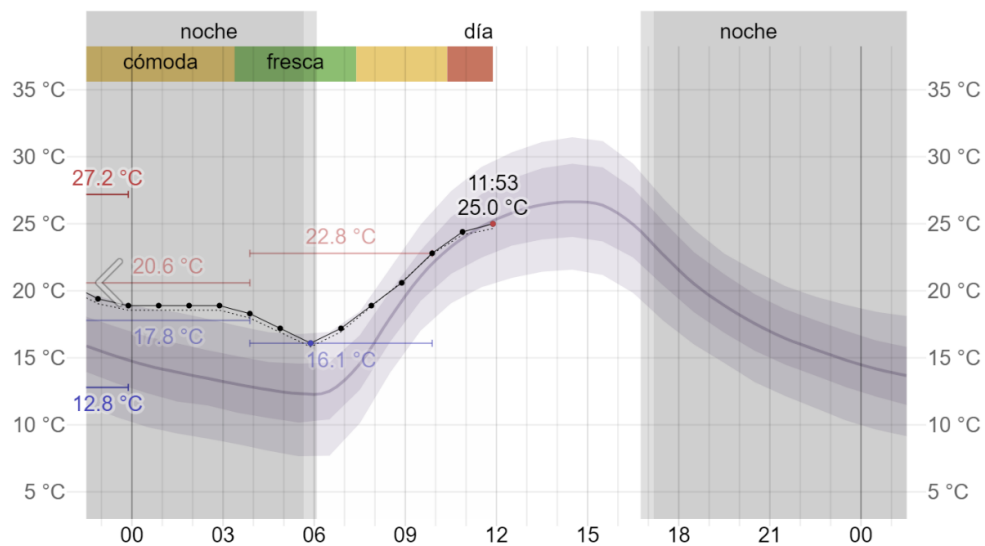


Figura 85. Gráfica de temperatura 08/11/22 (Weather Spark [81]).