

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE AMBIENTAL EN
MARCO DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES
DENTRO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

RICARDO ALBERTO LEÓN LÓPEZ

DAVID ANTONIO PEÑA MARTÍNEZ

OSCAR EDUARDO PÉREZ RAFAEL

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO DE 2023

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

DR. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERINO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:
INGENIERO ELECTRICISTA

Titulo:

**MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE AMBIENTAL EN
MARCO DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES
DENTRO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

Presentado por:

RICARDO ALBERTO LEÓN LÓPEZ

DAVID ANTONIO PEÑA MARTÍNEZ

OSCAR EDUARDO PÉREZ RAFAEL

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

SAN SALVADOR, MAYO DE 2023

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

DR. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 23 de marzo de 2023, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 5:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma



Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ
(Docente Asesor)


Firma

- MSC. SALVADOR DE JESUS GERMAN


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE AMBIENTAL EN MARCO DE PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES DENTRO DEL CAMPUS CENTRAL DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- LEÓN LÓPEZ RICARDO ALBERTO
- PEÑA MARTÍNEZ DAVID ANTONIO
- PEREZ RAFAEL OSCAR EDUARDO

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

8.47
Ocho punto Cuarenta y Siete

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar por haberme dado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y el tiempo para culminarla.

Infinitas gracias a mi madre Graciela por apoyarme desde el día uno hasta este momento, siempre con sus palabras de motivación y haciéndome creer en mis capacidades para lograrlo, al igual que sin su apoyo económico no lo hubiera logrado, este logro también es de ella.

Agradezco a mis abuelos que siempre han estado pendientes y dándome consejos sabios que me han servido a lo largo de mi carrera y en general en mi vida. Al igual que a toda mi familia, a mis tíos que de una u otra manera han estado al pendiente de mí.

Gracias a mi novia por motivarme en mi última etapa como estudiante, sin duda me impulsó para finalizar mi carrera de la mejor manera.

Gracias a mis compañeros que estuvieron cerca todos estos años, gracias por el apoyo. A mis compañeros de tesis, por lograr y cumplir el objetivo al realizar nuestro trabajo de graduación.

Agradezco al Dr. Carlos Pocasangre por guiarnos y asesorarnos en esta investigación. Al igual que al Ing. Otoniel Flores por facilitarnos una base con sus trabajos previos y así poder seguir desarrollando la investigación.

Gracias a la Universidad De El Salvador por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de realizar mis estudios, a cada uno de los docentes por sus conocimientos compartidos y al personal de la institución por siempre estar en la disposición de ayudar.

Ricardo Alberto León López

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a nuestro Dios por dejarme llegar hasta este punto de mi vida, sin él no hubiera sido posible todo el crecimiento que gané en todos estos años. A mi madre Mercedes Martínez Hércules por creer en mí y siempre estar en cada paso de mi vida, dándome su apoyo y todo su cariño en todo momento, agradezco a mi padre Paz Antonio Peña Ramírez, por compartir toda su sabiduría, paciencia y consejos que a lo largo de mi vida han sido una fuente de motivación y fuerza para siempre seguir luchando y buscar crecer en la vida. Le doy las gracias a mi hermana Rosa María por nunca dejar que me rindiera y estar en los momentos difíciles brindándome todo su apoyo y siempre creyendo en mí.

Agradezco a toda mi familia por todo su apoyo y confianza que me dieron, gracias por todos los buenos momentos que compartimos, esos momentos que nos hicieron crecer para bien en nuestras vidas, con la seguridad de que siempre van a estar cuando los tiempos sean buenos o malos.

Agradezco a todos los docentes de la facultad de ingeniería y arquitectura de la Universidad de El Salvador por su firme compromiso de forjar profesionales con sólidos conocimientos en las diferentes materias de las diferentes carreras.

Agradezco a todos mis amigos por estar en las buenas y en las malas, por todos los buenos momentos de risas y festejos, también en los momentos de tristeza. Gracias por el apoyo, sus buenos consejos y todas las experiencias que nos hacen ser más fuerte cada día.

David Antonio Peña Martínez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios todopoderoso por brindarme la sabiduría y la fortaleza para superar los obstáculos y retos que se me han presentado hasta el día de hoy.

A mis padres, Osmín y Dalila, que gracias a su esfuerzo ha sido posible culminar mis estudios, ya que en todo momento me apoyaron incondicionalmente para seguir adelante y cumplir mis metas. A mis hermanos, Erick y Vanessa, los cuales también me apoyaron y animaron emocionalmente para esforzarme cada día más y ser un ejemplo a seguir.

A la familia Rafael, quienes han estado presentes en este proceso y me apoyaron incondicionalmente cuando lo necesité. A mi abuela María Salomé, que me vio crecer desde pequeño y ahora me cuida desde el cielo.

Agradezco a mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí tantos momentos difíciles y buenos que siempre serán memorables. A mi alma mater y catedráticos, quienes nos formaron como profesionales con los conocimientos y valores que el país necesita.

A mis amigos de toda la vida, en especial a los más cercanos quienes siempre han estado pendiente de mí, y han compartido muchos momentos de mi vida, su apoyo ha sido muy importante para mí.

Óscar Eduardo Pérez Rafael

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE ILUSTRACIONES	4
LISTA DE TABLAS	6
GLOSARIO	7
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	11
CAPITULO I: GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN EL SALVADOR	12
1.1 LA ATMÓSFERA.....	12
1.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS	13
1.3 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	13
1.4 CONTAMINACIÓN DEL AIRE	14
1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	14
1.5.1 Contaminantes Primarios.....	15
1.5.1 Contaminantes Secundarios.....	19
1.6 FORMALDEHÍDO	20
1.7 FUENTES DE CONTAMINACIÓN	21
1.8 DIFUSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL AIRE	23
1.8.1 Emisión.....	25
1.8.2 Inmisión	26
1.9 IMPACTO SOBRE LA SALUD HUMANA RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE EN UN ESPACIO CERRADO	26
1.9.1 Causantes De Una Mala Calidad Del Aire En Espacios Cerrados	28
1.9.2 Enfermedades Y Afecciones Comunes Por Mala Calidad Del Aire En Interiores.....	28
1.10 SÍNDROME DEL EDIFICIO ENFERMO.....	29
1.11 METODOLOGÍAS PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE ..	31
1.11.1 Muestreadores Pasivos De Monitoreo Del Aire.....	32
1.11.2 Muestreadores Activos De La Calidad Del Aire.....	33

1.11.3 Analizadores Automáticos Para La Calidad Del Aire.....	34
1.11.4 Analizadores Remotos Para La Calidad Del Aire.....	36
CAPITULO II: ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL SALVADOR	38
2.1 ANTECEDENTE DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS MONITOREADOS EN EL SALVADOR	38
2.2 ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN EL SALVADOR.....	38
2.3 CONTAMINACIÓN CAUSADA POR LOS AUTOMÓVILES Y TRANSPORTE PUBLICO	40
2.4 ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL SALVADOR.....	42
2.5 REGULACIONES PARA LOS NIVELES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN LAS NORMAS SALVADOREÑAS.....	45
2.6 ÍNDICE CENTROAMERICANO DE CALIDAD DEL AIRE (ICCA)	45
2.7 RECOMENDACIONES DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD EN RELACIÓN A LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE	47
CAPITULO 3: DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS.....	49
3.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL.....	49
3.2 COMPONENTES ELECTRÓNICOS UTILIZADOS	50
3.2.1 Sensor PMS5003ST.....	50
3.2.2 Microcontrolador ESP32	51
3.2.3 RTC DS3231	52
3.2.4 GSM SIM800L.....	53
3.2.5 Batería MI.....	54
3.3 SOFTWARE UTILIZADO	55
3.4 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN	56
3.5 ALMACENAMIENTO DE DATOS.....	62
3.6 PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS	62
3.7 PRESUPUESTO POR MEDIDOR	63
3.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIDORES	64
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
4.1 COMPORTAMIENTO DEL 31 DE DICIEMBRE.....	65

4.1.1	Santa Ana.....	65
4.1.2	San Salvador.....	66
4.1.3	Cojutepeque.....	67
4.1.4	Formaldehido del 31 de diciembre.....	68
4.1.5	Santa Ana.....	70
4.1.6	San Salvador.....	72
4.1.7	Cojutepeque.....	73
4.1.8	Formaldehido, Del Mes De Enero De Las 3 Estaciones.....	75
4.2	RESUMEN DEL MES DE FEBRERO 2023 DE CADA ESTACIÓN.....	77
4.2.1	Santa Ana.....	77
4.2.2	San Salvador.....	80
4.2.3	Cojutepeque.....	82
4.3	COMPARACIÓN ENERO Y FEBRERO 2023.....	85
4.3.1	Santa Ana.....	85
4.3.2	San Salvador.....	88
4.3.3	Cojutepeque.....	91
CAPITULO V: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....		94
5.1	RECOMENDACIONES.....	94
5.2	CONCLUSIONES.....	94
REFERENCIAS.....		96
ANEXOS.....		98
A.	CÓDIGOS UTILIZADOS.....	98
	Python.....	98
	Apps Script.....	100
B.	HOJA DE DATOS.....	101
	PMS5003ST.....	101
	ESP32-WROOM-32E.....	107
	SIM800L.....	111
	DS3231.....	118
	Power Bank 10000mAh.....	122

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fuentes de contaminación de material particulado (MINTIC, 2019).....	23
Ilustración 2. La contaminación y la atmósfera (DKV, 2010).	24
Ilustración 3. Condominios Área Metropolitana de San Salvador (El Diario de Hoy EDH, 2022).....	31
Ilustración 4. Muestreadores activos de la calidad del aire (Zambrano, 2016).....	34
Ilustración 5. Analizador automático de la calidad del aire (Algoritmos , 2015).....	36
Ilustración 6 Sensores remotos para calidad del aire (KUNAK SENSING ANYWHERE, 2022).....	37
Ilustración 7. Estaciones de monitoreo de la Calidad del Aire en San Salvador (MARN, 2023).....	39
Ilustración 8. Dispositivo de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire (Flores, 2019).....	39
Ilustración 9. Estación IoT monitoreando la calidad del aire en exteriores (Flores, 2019)..	40
Ilustración 10. Principales contaminantes en El Salvador (El Diario de Hoy EDH, 2022).	42
Ilustración 11. Personas expuestas a diario a la emisión de gases (El Diario de Hoy EDH, 2022).....	43
Ilustración 12. Calidad del aire en El Salvador según ranking IQAir (IQAir, 2023).	44
Ilustración 13. Ranking ciudades más contaminadas en El Salvador según IQAir (IQAir , 2023).....	44
Ilustración 14. Esquema general del sistema IoT desarrollado para funcionamiento de medidores.	49
Ilustración 15. Sensor PMS5003ST (ALIEXPRESS, 2022).....	50
Ilustración 16. Microcontrolador ESP32 WROOM 32E (Carmenate, 2023).....	51
Ilustración 17. RTC DS3231SN (FlyRobo, 2019).	52
Ilustración 18. GSM SIM800L EVB (Hi-Fi Electronica, 2023).	53
Ilustración 19. Batería Mi 10000mAh (Amazon, 2023).....	54
Ilustración 20. Interfaz del software Thonny.	55
Ilustración 21. Diagrama esquemático dibujado en Eagle.	56
Ilustración 22. Placa de circuito impreso.....	56
Ilustración 23. Componentes montados en los pines de placa de circuito impreso.	57
Ilustración 24. Caja plástica utilizada.	57
Ilustración 25. Proceso de adaptación de la placa en la caja plástica.	58
Ilustración 26. Los 3 medidores con la placa y sensor ajustados.	58
Ilustración 27. Medidor con la batería colocada.....	59
Ilustración 28. Los 3 medidores con la batería colocada.....	59
Ilustración 29. Prueba final después de terminar de armar todo el dispositivo.	60
Ilustración 30. Diseño final de los medidores.	60
Ilustración 31. Diodos LED listos para ser conectados.....	61

Ilustración 32. Medidor ubicado en Santa Ana.	61
Ilustración 33. Datos almacenados en la nube.	62
Ilustración 34. Presentación de los datos en dashboard.	63
Ilustración 35. Gráfica de PM del 31 de diciembre Santa Ana.	65
Ilustración 36. Gráfica de PM del 31 de diciembre San Salvador.	66
Ilustración 37. Gráfica de PM del 31 de diciembre Cojutepeque.	67
Ilustración 38. Formaldehído del 31 de diciembre de las 3 estaciones.	68
Ilustración 39. Promedio de PM enero Santa Ana.	70
Ilustración 40. Promedio de PM enero San Salvador.	72
Ilustración 41. Promedio de PM enero Cojutepeque.	73
Ilustración 42. Formaldehído enero las 3 estaciones.	75
Ilustración 43. Promedio de PM10 vs temperatura vs humedad Cojutepeque.	76
Ilustración 44. Promedio de PM febrero Santa Ana.	77
Ilustración 45. Promedio de Temperatura y Humedad febrero Santa Ana.	79
Ilustración 46. Promedio de formaldehído febrero Santa Ana.	79
Ilustración 47. Promedio de PM febrero San Salvador.	80
Ilustración 48. Promedio de temperatura y humedad febrero San Salvador.	81
Ilustración 49. Promedio de Formaldehído febrero San Salvador.	82
Ilustración 50. Promedio de PM febrero Cojutepeque.	82
Ilustración 51. Promedio de Temperatura y Humedad febrero Cojutepeque.	84
Ilustración 52. Promedio de formaldehído febrero Cojutepeque.	85
Ilustración 53. Promedio de PM1.0 enero y febrero Santa Ana.	85
Ilustración 54. Promedio de PM2.5 enero y febrero Santa Ana.	86
Ilustración 55. Promedio de PM10 enero y febrero Santa Ana.	86
Ilustración 56. Promedio de Temperatura enero y febrero Santa Ana.	87
Ilustración 57. Promedio de Humedad enero y febrero Santa Ana.	87
Ilustración 58. Promedio de formaldehído enero y febrero Santa Ana.	88
Ilustración 59. Promedio de PM1.0 enero y febrero San Salvador.	88
Ilustración 60. Promedio de PM2.5 enero y febrero San Salvador.	89
Ilustración 61. Promedio de PM10 enero y febrero San Salvador.	89
Ilustración 62. Promedio de Temperatura enero y febrero San Salvador.	90
Ilustración 63. Promedio de Humedad enero y febrero San Salvador.	90
Ilustración 64. Promedio de Formaldehído enero y febrero San Salvador.	91
Ilustración 65. Promedio de PM1.0 enero y febrero Cojutepeque.	91
Ilustración 66. Promedio de PM2.5 enero y febrero Cojutepeque.	92
Ilustración 67. Promedio de PM10 enero y febrero Cojutepeque.	92
Ilustración 68. Promedio de Temperatura enero y febrero Cojutepeque.	92
Ilustración 69. Promedio de Humedad enero y febrero Cojutepeque.	93
Ilustración 70. Promedio de Formaldehído enero y febrero Cojutepeque.	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes de la atmosfera a nivel superficial.	12
Tabla 2. Rangos según el Índice Centroamericano de Calidad del Aire (MARN, 2003). ...	46
Tabla 3. Presupuesto detallado por cada medidor.	64
Tabla 4. Índice de calidad del aire 31 de diciembre Santa Ana.....	66
Tabla 5. Índice de calidad del aire 31 de diciembre San Salvador.....	67
Tabla 6. Índice de calidad del aire 31 de diciembre Cojutepeque.....	68
Tabla 7. Resumen del índice de calidad del aire enero Santa Ana.	71
Tabla 8. Resumen del índice de calidad del aire enero San Salvador.	73
Tabla 9. Resumen del índice de calidad del aire enero Cojutepeque.	74
Tabla 10. Resumen del índice de calidad del aire febrero Santa Ana.	78
Tabla 11. Resumen del índice de calidad del aire febrero San Salvador.....	81
Tabla 12. Resumen del índice de calidad del aire febrero Cojutepeque.....	83

GLOSARIO

Atmosfera: Se refiere al aire o estado del aire que está presente en un lugar cerrado o abierto al ambiente.

Calidad del aire: Establece los valores de las concentraciones y periodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente.

Contaminantes atmosféricos: Es cualquier sustancia extraña a la constitución normal del aire, sean partículas o gases.

Estación de muestreo meteorológica: La conforman todos los elementos necesarios basados en la necesidad de medir y registrar regularmente variables de interés para su investigación o comportamiento en un tiempo definido.

Formaldehido: Es un compuesto orgánico volátil, incoloro, irritante y de olor penetrante, utilizado en las industrias química y como conservante por anatomistas, embalsamadores.

Gas: Fluido que tiende a expandirse y de muy pequeña densidad como el aire.

Humedad: Es la cantidad de agua, vapor de agua o cualquier otro líquido que está presente en la superficie o el interior de un cuerpo o en el aire.

Índice Centroamericano de Calidad del Aire (ICCA): Es un valor que representa el nivel de contaminación atmosférica y que a la vez indica los efectos en la salud humana asociados a este, dentro de una región determinada.

Inmisiones atmosféricas: Es la concentración de contaminantes en el aire cuya absorción causa daños a la salud humana y el medio ambiente.

Líquido: Sustancia que tiene la propiedad que sus partículas son de mayor movilidad a comparación con elementos sólidos y de menor movilidad comparado a un gas.

Materia: En física, materia es toda entidad dotada de masa propia y capaz de ocupar un espacio en un momento determinado.

Material particulado: En siglas en inglés PM se refiere a una mezcla de partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire y tienen diferentes tamaños, medidos en micrómetros y menores.

Medio ambiente: Está conformado por una serie de elementos tangibles e intangibles como: físicos, químicos, biológicos, sociales, políticos y culturales.

Muestreo: Es el proceso de selección y toma de muestras representativas sobre inmisiones atmosféricas.

Partícula: Parte pequeña de materia.

PM1.0: Son partículas inhalables con un tamaño menor que 1 micrómetros.

PM2.5: Son partículas inhalables con un tamaño menor que 2.5 micrómetros.

PM10: Son partículas inhalables con un tamaño menor que 10 micrómetros.

Temperatura: Magnitud física que expresa el grado de frío o calor de los cuerpos o del ambiente, en unidades diferentes; Fahrenheit (°F), Celsius (°C) y Kelvin (K).

RESUMEN

La contaminación del aire es un problema cada vez más relevante a nivel mundial, especialmente en ciudades densamente pobladas, ya que tiene graves consecuencias tanto para la salud humana como para el medio ambiente. PM (materia particulada) consiste en pequeñas partículas que están suspendidas en la atmósfera. En este trabajo se presenta la implementación de tres estaciones móviles de monitoreo de contaminación por material particulado en el aire. Los dispositivos implementados miden 6 parámetros: PM1, PM2.5, PM10, Temperatura, Humedad y Formaldehído. Para el diseño y desarrollo del dispositivo de medición se utilizó como componente principal el sensor PMS5003ST (PlanTower), el cual cumple la función de medir los parámetros descritos anteriormente, un microcontrolador ESP32 que ejecuta las funciones programadas a través del código utilizado en lenguaje Python, un RTC que se encarga de mostrar la hora en que se toman las medidas y un módulo GSM que se conecta a Internet. Todos estos componentes son de bajo costo, pero garantizan su buen funcionamiento. Los datos obtenidos son enviados en tiempo real a la nube, a su vez son almacenados y procesados con las herramientas de Google, obteniendo así una mejor visualización de los datos para cualquier usuario que desee consultar. A partir de las mediciones realizadas se comparan los datos obtenidos en las 3 ciudades diferentes y las horas en las que se produce la mayor contaminación en un día medio. El periodo de las mediciones realizadas abarca las fiestas de fin de año y el primer mes del año 2023.

INTRODUCCIÓN

Los niveles de contaminación atmosférica en todo el mundo han aumentado debido al rápido desarrollo económico, demográfico y tecnológico del planeta. La exposición a diversos contaminantes atmosféricos puede provocar enfermedades graves como cáncer de pulmón, infecciones respiratorias e incluso la muerte. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) la exposición a las partículas finas contenidas en el aire contaminado causa alrededor de millones de muertes al año en todo el mundo. Por estas razones se vuelve necesaria la vigilancia del medio ambiente. El comportamiento de algunas magnitudes, como la temperatura, la humedad, la presión atmosférica, la velocidad del viento y la contaminación

atmosférica, debe conocerse en tiempo real debido a que los cambios en cualquiera de ellas pueden repercutir en diversos aspectos, como la agricultura, el transporte, las comunicaciones y la salud, entre otros. Uno de los principales contaminantes ambientales que tiene mayor impacto en las personas son las partículas PM, o material particulado, que se refieren a una mezcla de sustancias líquidas y sólidas que están suspendidas en el aire. Estas partículas contaminantes se dividen en las categorías PM10 (10 μm), PM2.5 (2.5 μm) y PM1 (1 μm).

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador es el encargado de vigilar la calidad del aire del país (MARN). En la actualidad, este organismo sólo dispone de tres estaciones para controlar la calidad del aire del país, todas ellas situadas en San Salvador, una de las principales ciudades del país. El Salvador es uno de los países que la Organización Panamericana de la Salud ha identificado como carente de capacidad para monitorear la calidad del aire. Una de las principales limitaciones es que estas estaciones tienen un elevado costo de adquisición o un alto costo de mantenimiento, en el peor de los casos las reparaciones pueden ser muy costosas. Sin embargo, con el avance de la tecnología ha permitido el desarrollo de soluciones basadas en las comunicaciones inalámbricas e IoT. Cabe mencionar que se han realizado trabajos anteriores utilizando esta técnica, por parte de profesores de la Universidad Tecnológica de El Salvador (Flores, 2019).

En el proyecto se propone un sistema de bajo costo para la monitorización de la calidad del aire en tiempo real, el cual pueda ser portable, ya que no dependerá de una conexión inalámbrica WIFI y cuenta con su propia batería como fuente de alimentación. Este sistema consta de tres estaciones distribuidas en diferentes zonas del país, las cuales utilizan una comunicación vía GSM/GPRS y protocolo HTTPS para hacer efectivo el envío de datos y que sean almacenados en la nube, a su vez, la información enviada pueda ser procesada. Se utilizaron componentes accesibles y de bajo costo, con lo que se busca ser una alternativa a las estaciones de monitoreo del aire convencionales. Con las investigaciones realizadas anteriormente, se tiene la certeza que los resultados obtenidos serán de fiabilidad. Como segunda parte del proyecto, exponemos los resultados de la base de los datos recolectados, a través de diferentes gráficas en el período de un mes. Estas gráficas representan un resumen del período muestreado. Para la interpretación y análisis de los resultados se utiliza el Índice Centroamericano de Calidad del Aire (ICCA) (MARN, 2003).

OBJETIVOS

Objetivo General:

Construir dispositivos de medición para el monitoreo de la calidad del aire en marco de prevención de riesgos laborales dentro del campus central de la Universidad de El Salvador.

Objetivos específicos:

- Construir dispositivos con su sensor para medir la cantidad de PM1, PM2.5, PM10 (material particulado de diferentes diámetros), temperatura, humedad y formaldehído.
- Programar un módulo GSM/GPRS que permita conectarse a internet, para que el dispositivo sea móvil y no dependa de una red wifi.
- Diseñar una base de datos en línea que permita recopilar los datos obtenidos, así poder analizar los resultados posteriormente.
- Mostrar los resultados en una página web y generar la posibilidad de actualizar periódicamente los datos sobre la calidad del aire.

CAPITULO I: GENERALIDADES SOBRE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO EN EL SALVADOR

1.1 LA ATMÓSFERA

La atmósfera es una capa de gases que rodea a la Tierra y la protege de los peligrosos rayos cósmicos y la radiación solar. Es un componente esencial para la vida en la Tierra, ya que ayuda a regular la temperatura y retener el calor del sol, además de proteger a los seres vivos de los rayos cósmicos y la radiación solar.

La atmósfera está compuesta principalmente de nitrógeno (alrededor del 78% en volumen) y oxígeno (alrededor del 21% en volumen). Otros componentes importantes incluyen argón, dióxido de carbono, neón y gases nobles. Estos gases son esenciales para la vida, ya que el oxígeno es necesario para la respiración, y el dióxido de carbono es un componente clave del ciclo del carbono que ayuda a regular la temperatura de la Tierra (Carranza, 2004).

Además de los gases mencionados, la atmósfera también contiene trazas de otros gases, como el vapor de agua, el ozono y el metano. Estos gases desempeñan un papel crucial en el clima y el equilibrio del medio ambiente. Por ejemplo, el ozono protege a la Tierra de la radiación ultravioleta dañina del sol, y el vapor de agua es un componente clave de las precipitaciones. En la siguiente tabla se describen los componentes de la atmósfera a nivel superficial.

Constituyente	Símbolo	Porcentaje %	Tiempo de permanencia
Nitrógeno	N ₂	78	4 x 10 ⁸ años
Oxígeno	O ₂	20.9	6 x 10 ³ años
Argón	Ar	9 x 10 ⁻¹	permanente
Dióxido de Carbono	CO ₂	3 x 10 ⁻²	10 años
Neón	Ne	1 x 10 ⁻⁴	permanente
Helio	He	5 x 10 ⁻⁵	2 x 10 ⁶ años
Metano	CH ₄	1.5 x 10 ⁻⁵	5 años
Kriptón	Kr	1.1 x 10 ⁻⁵	permanente
Hidrógeno	H ₂	5 x 10 ⁻⁶	5 años
Oxido nitroso	N ₂ O	3 x 10 ⁻⁶	50 años
Xenón	Xe	8 x 10 ⁻⁷	permanente
Monóxido de carbono	CO	2-6 x 10 ⁻⁷	0.5 años
Ozono	O ₃	1-3 x 10 ⁻⁷	variable
Vapor de agua	H ₂ O	< 4	variable
Clorofluorocarbonos	CFCl ₃	1.3x10 ⁻⁹	50 - 100 años
	CFCl ₂	2.3x10 ⁻⁹	

Tabla 1. Componentes de la atmósfera a nivel superficial.

1.2 CAPAS ATMOSFÉRICAS

La atmósfera terrestre se divide en cinco capas diferentes basadas en su composición y sus propiedades. La capa más cercana a la superficie terrestre a una altura aproximada de 20 kilómetros sobre el nivel del mar es la troposfera, que es donde ocurren la mayoría de los fenómenos climáticos como las lluvias, los vientos y las tormentas (Zambrano, 2016).

La estratósfera se encuentra por encima de la troposfera y se extiende hasta una altura de aproximadamente 50 kilómetros. Aquí se encuentra la capa de ozono, que protege a la Tierra de la radiación ultravioleta dañina del sol. La mesosfera se encuentra entre la estratósfera y la termosfera y se extiende hasta una altura de aproximadamente 85 kilómetros. En esta capa, los meteoros se desintegran y se queman antes de llegar a la superficie terrestre.

Mientras la termosfera se encuentra por encima de la mesosfera y se extiende hasta una altura de aproximadamente 600 kilómetros. En esta capa, la temperatura aumenta con la altura debido a la presencia de ionización. Y, por último, la exosfera que es la capa más externa de la atmósfera y se extiende hasta una altura de aproximadamente 10,000 kilómetros. En esta capa, los gases están tan diluidos que la atmósfera se mezcla con el espacio interplanetario. Estas capas de la atmósfera tienen propiedades y características únicas que las diferencian unas de otras, y juntas, forman un sistema complejo que mantiene la vida en la Tierra y protege a los seres vivos de los peligrosos rayos cósmicos y la radiación solar. La comprensión de estas capas es esencial para entender el clima y el medio ambiente, y para proteger la vida en la Tierra.

1.3 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica es un problema global que afecta la salud humana y el medio ambiente. Es el resultado de la emisión de gases tóxicos, partículas y compuestos químicos en la atmósfera, principalmente debido a la actividad humana. Las principales fuentes de contaminación atmosférica incluyen la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, la industria, los vehículos y la agricultura (Zambrano, 2016).

La contaminación atmosférica puede tener graves consecuencias para la salud humana, incluyendo problemas respiratorios, enfermedades cardíacas y cáncer. También puede dañar la vida silvestre, los ecosistemas y la calidad de los cultivos.

Además, la contaminación atmosférica contribuye al cambio climático, ya que los gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, se acumulan en la atmósfera y contribuyen al aumento de la temperatura global.

Para abordar este problema, se requieren soluciones a nivel local y global. Esto incluye la transición hacia fuentes de energía renovable, la implementación de regulaciones más estrictas para limitar las emisiones tóxicas y la promoción de prácticas sostenibles en la industria, la agricultura y el transporte.

1.4 CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación atmosférica y la contaminación del aire son términos que están relacionados. Ambas describen la presencia en la atmósfera de sustancias químicas o particuladas que son perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente. La contaminación del aire puede ser causada por diversas actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la industria, la agricultura, y el tráfico vehicular, entre otros.

Sin embargo, es importante destacar que la contaminación atmosférica se refiere a una amplia gama de problemas ambientales, mientras que la contaminación del aire se centra específicamente en la calidad del aire que respiramos (Castillo, 2015).

1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

La mayoría de los contaminantes del aire afectan directamente la salud humana debido a que ingresan al cuerpo humano a través del sistema respiratorio o la piel. En otros casos, los contaminantes se transfieren del aire al suelo o cuerpos de agua y luego ingresan a la cadena alimenticia. Los contaminantes son transportados desde la atmósfera a la superficie de la tierra por sedimentación de partículas en el aire y/o absorción y arrastre del agua de lluvia.

La composición química del aire permanece prácticamente invariable debido a los procesos biogeoquímicos y transformaciones cíclicas en las que se integran sus constituyentes, especialmente los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno, oxígeno y azufre. Estos ciclos se autorregulan a través de una variedad de mecanismos, pero la actividad humana los ha acelerado, desequilibrándolos, movilizandolos y provocando la presencia de contaminantes atmosféricos en la atmósfera (Zambrano, 2016).

Se denomina tiempo de residencia o vida media de un contaminante al periodo de tiempo que puede permanecer en la atmosfera como tal o participando en variadas y muchas veces complejas reacciones química. El tiempo de residencia varía dependiendo de la naturaleza de cada contaminante.

Estos contaminantes se clasifican en los siguientes grupos:

- Contaminantes primarios
- Contaminantes secundarios

1.5.1 Contaminantes Primarios

Como se describe anteriormente, los contaminantes primarios son los que se emiten directamente al ambiente desde fuentes específicas. A continuación, se describen los principales contaminantes primarios:

1.5.1.1 Dióxido de azufre (SO₂):

Este gas se describe como un subproducto de la quema de combustibles fósiles, como el carbón y el petróleo, y es una de las principales causas de la lluvia ácida. El dióxido de azufre es uno de los gases comúnmente liberados durante las erupciones volcánicas. El dióxido de azufre es dañino para los humanos en forma gaseosa y puede precipitar como ácido sulfúrico y causar daño a la piel, irritación de los ojos y membranas mucosas en humanos, agricultura, bosques, vegetación y otros animales terrestres y acuáticos. Este contaminante es el resultado de la quema de azufre en combustibles fósiles (combustóleo, gasolina, diésel, carbón, etc.), la fundición de minerales que contienen azufre y otros procesos industriales. Cuando se quema este combustible, se libera azufre a la atmósfera en forma de dióxido de azufre o dióxido de azufre (SO₂). Finalmente, el estándar de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para SO₂ es de 50 µg/m³ con un tiempo de exposición promedio de un año (Zambrano, 2016).

1.5.1.2 Monóxido de carbono (CO):

El monóxido de carbono es el contaminante del aire más común en la atmósfera inferior, especialmente alrededor de las grandes ciudades. El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro e insípido, muy ligero y difícil de disolver en agua. Este gas incoloro e inodoro es un subproducto de la combustión incompleta de los combustibles fósiles, como la gasolina, y puede ser perjudicial para la salud si se inhala en grandes cantidades. Es altamente inflamable y tiene una alta capacidad de esparcimiento. La formación de CO generalmente es causada por uno de los siguientes procesos químicos:

Reacciones a alta temperatura entre CO₂ y materiales carbonosos.

- ✓ Combustión incompleta del carbón.
- ✓ El CO₂ se descompone a altas temperaturas.
- ✓ Procesos de producción y descomposición de la clorofila en las plantas.

El impacto ambiental de la presencia de CO en la atmósfera tiene repercusiones directamente en las personas y sobre las plantas.

El monóxido de carbono es un gas venenoso que puede causar la muerte cuando se expone a altas concentraciones, pero hasta ahora no se conocían los efectos de las bajas concentraciones. El daño a la salud causado por el monóxido de carbono se debe a su capacidad reducida para realizar su función normal de transporte de oxígeno cuando se une a la hemoglobina en la sangre. El monóxido de carbono tiene una afinidad 200 veces mayor por la hemoglobina que el oxígeno (Zambrano, 2016).

1.5.1.3 Óxidos de nitrógeno (NO_x):

Este gas es un subproducto de la combustión a altas temperaturas, como la producida por los motores de combustión interna, y puede ser perjudicial para la salud y el medio ambiente. Los automóviles y otras fuentes móviles representan aproximadamente la mitad de las emisiones de NO_x. Las calderas de las centrales térmicas generan aprox. 40% de emisiones estacionarias de NO_x. Además, las fuentes antropogénicas como las calderas industriales, los incineradores, las turbinas de gas, los motores estacionarios diésel y de encendido por chispa, las acerías, la producción de cemento, la producción

de vidrio, las refinerías de petróleo y la producción de ácido nítrico contribuyen a emisiones significativas. Las fuentes naturales u óxidos de nitrógeno incluyen rayos, incendios forestales, incendios de pastos, árboles, arbustos, pastos y levaduras. Además de ser un importante contaminante del aire por derecho propio, el NO_2 también reacciona en la atmósfera para formar ozono troposférico (O_3) y lluvia ácida. Es importante señalar que el ozono que queremos minimizar es el ozono troposférico; es decir, el ozono en el aire ambiente que respiramos (Zambrano, 2016).

1.5.1.3 Material particulado (PM):

La composición química y física de las partículas en la atmósfera varía mucho según la fuente de emisión y el tamaño de las partículas emitidas. Las partículas en la atmósfera se clasifican en fracciones dependiendo del tamaño de cada partícula que la conforma. Se clasifican principalmente en tres grupos más comunes. Las sustancias con un tamaño de partícula de más de 10 micras se denominan PM_{10} , y las sustancias con un tamaño de partícula de menos de 2.5 micras se denominan $\text{PM}_{2.5}$, siendo estas últimas las sustancias más importantes en la contaminación urbana debido a que pueden penetrar profundamente en los pulmones y suponer un importante riesgo potencial para la salud. Las partículas de entre 2.5 y 10 micrómetros de tamaño en realidad no son atraídas hacia las vías respiratorias profundas, sino que son expulsadas de manera relativamente eficiente a través de la mucosidad o la tos, o simplemente se asientan sin entrar en el sistema respiratorio (Zambrano, 2016).

La principal fuente de material particulado es el proceso de combustión, particularmente la quema de carbón. Estas partículas se transportan con gases calientes a través de tuberías o chimeneas y, después de la descarga, se produce la formación espontánea de partículas de carbono.

Las partículas en el aire bloquean la transmisión de la luz a través de la atmósfera. La dispersión y absorción de la luz por parte de las partículas conduce a una visibilidad reducida, que se manifiesta como una reducción en la distancia a la que se puede ver una imagen con el contraste y el color adecuados. Sin embargo, estas partículas dispersan la luz del sol en la imagen, causando desenfoque, lo que da como resultado una imagen borrosa con el color y las características de brillo de una atmósfera sin niebla.

Para el público en general, estos efectos ópticos son, con mucho, uno de los mejores indicadores de la presencia de contaminación en el aire. La visibilidad también se ve afectada por la neblina, la niebla y la precipitación natural, pero la atención se centra en reducir la visibilidad debido a los contaminantes transportados por el aire.

La exposición a partículas finas se asocia mayormente con una mayor incidencia de efectos adversos para la salud en la población humana, principalmente debido a los efectos en el corazón y los procesos respiratorios. Las estadísticas de morbilidad y mortalidad brindan información sobre lo que sucede con la salud cuando las personas están expuestas regularmente a partículas. Las poblaciones más susceptibles suelen incluir niños y ancianos, que responden de formas más documentadas a la exposición a partículas que los adultos. Debido a que intervienen muchos factores, es difícil establecer una relación clara entre los factores individuales y la exposición individual a las partículas (Carranza, 2004).

1.5.1.4 Compuestos orgánicos volátiles (COV):

Estos gases incluyen una amplia gama de compuestos químicos que se liberan en el aire como gases, líquidos o sólidos, y pueden ser perjudiciales para la salud y el medio ambiente.

Los heteroátomos más comunes que forman parte de los COV suelen ser oxígeno, flúor, cloro, bromo, azufre o nitrógeno. El término COV abarca una gran cantidad de compuestos, incluidos los hidrocarburos alifáticos y aromáticos (clorados o no) y otros compuestos como aldehídos, cetonas, éteres, ácidos y alcoholes. Los COV se liberan al quemar combustibles como gasolina, madera, carbón y gas natural. También se libera de solventes, pinturas, adhesivos y otros productos usados y almacenados en casa o en el trabajo (Carranza, 2004).

1.5.1.5 Ozono troposférico (O₃):

Aunque el ozono estratosférico es necesario para proteger la tierra de los rayos UV del sol, el ozono troposférico es perjudicial para la salud y el medio ambiente y se forma

cuando los compuestos químicos se reaccionan con la luz solar. El ozono es un alótropo del oxígeno. En condiciones normales, es un gas incoloro con un olor acre característico. Tiene un fuerte poder oxidante y se cambia fácilmente a oxígeno. Las concentraciones de ozono troposférico son muy bajas y aumentan rápidamente con la altitud. El ozono es producido por una variedad de fuentes, incluidas las descargas eléctricas, los rayos X, la luz ultravioleta y los arcos eléctricos, pero su presencia en la atmósfera inferior se debe principalmente a la fotoquímica de la radiación. Por lo tanto, es puramente un contaminante secundario. Los efectos del ozono en los humanos dependen de la concentración de ozono que reciben los humanos. Los primeros efectos encontrados fueron irritación nasal y de garganta. Concentraciones elevadas causan fatiga extrema, falta de coordinación y edema pulmonar. Los experimentos existentes aún no han demostrado que la exposición prolongada al ozono a niveles atmosféricos normales provoque enfermedades respiratorias crónicas en humanos. El ozono provoca lesiones en las plantas, cuyos efectos visibles son el moteado y las manchas blancas en las hojas, la reducción del rendimiento del crecimiento, el desarrollo de las flores y la madurez del polen (Zambrano, 2016).

1.5.1 Contaminantes Secundarios

Los contaminantes secundarios del aire son aquellos que se forman a partir de reacciones químicas entre los contaminantes primarios y otros componentes del aire. Algunos de los contaminantes secundarios más importantes son:

- **Ácido sulfúrico (H_2SO_4):** Este contaminante es producto de la reacción que ocurre en la atmósfera del vapor de agua y gases ricos en azufre vertidos como subproducto industrial, este ácido se precipita a tierra junto con la lluvia, formando lo que se llama una “lluvia ácida” y lo que puede ocasionar daños a toda la materia orgánica que esté expuesta a ella.

- **Metano (CH_4):** Este contaminante se considera como secundario ya que se origina a partir de la descomposición de la materia orgánica, muy abundante en los vertederos

de basura o en las zonas rurales de cría ganadera (por las heces del rebaño). Este gas de olor repugnante y muy inflamable asciende entonces a la atmósfera, donde se acumula propiciando el efecto invernadero.

- **Peroxiacetilnitrato (PAN):** Este compuesto, que tiene efectos severos en los ojos y los pulmones y puede dañar las plantas con una exposición prolongada, es uno de los principales componentes del smog urbano. Se forma por la descomposición de compuestos orgánicos volátiles en el aire, como los que se usan en pinturas y productos derivados del petróleo (Zambrano, 2016).

1.6 FORMALDEHÍDO

El formaldehído es un gas incoloro que es inflamable a temperatura ambiente. Tiene un olor acre característico y en altas concentraciones puede causar una sensación de ardor en los ojos, la nariz y los pulmones. El formaldehído también se conoce como metanal, óxido de metileno, oximetileno, metilaldehído y oxometano (ATSDR, 1999). El formaldehído puede reaccionar con muchas sustancias químicas y descomponerse a temperaturas muy altas para formar metanol (aceite de madera) y monóxido de carbono. El cuerpo humano puede producir cantidades pequeñas de formaldehído en forma natural como parte del metabolismo diario normal; sin embargo, estas cantidades pequeñas son inofensivas. También se puede encontrar formaldehído en el aire que respiramos en el hogar y el trabajo, en los alimentos que comemos y en algunos productos que usamos en la piel. Una fuente importante de formaldehído que respiramos diariamente se encuentra en el humo de la capa inferior de la atmósfera. El escape de automóviles con convertidores catalíticos o de automóviles que usan gasolina oxigenada también contiene formaldehído. También en algunos hogares donde se consumen cigarrillos y otros productos de tabaco, estufas de gas y chimeneas abiertas al aire. El formaldehído se usa también como preservativo en algunos alimentos tales como algunos quesos italianos, alimentos desecados y pescados. Este también se encuentra en muchos productos que se usan diariamente en el hogar, por ejemplo, antisépticos, medicamentos, cosméticos, líquidos para lavar platos, suavizadores de telas, artículos para el cuidado de zapatos, limpiadores de alfombras, pegamentos y adhesivos, barnices, papel, plásticos y en algunos productos de madera. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos

ha establecido un nivel de exposición máxima para el formaldehído en el aire interior de edificios en 0.1 partes por millón (ppm). Para reducir la exposición al formaldehído, se recomienda asegurarse de que las áreas de la casa o el trabajo estén bien ventiladas, reducir el uso de productos que contengan formaldehído, como ciertos tipos de madera prensada, y usar equipos de protección personal adecuados en la industria. También se están investigando nuevas tecnologías para reducir las emisiones de formaldehído en la industria.

La OSHA (Occupational Safety and Health Administration) en 1987, estableció una norma federal que redujo de 3 ppm a 1 ppm la cantidad de formaldehído a la que los trabajadores podían estar expuestos en una jornada de trabajo de 8 horas. En mayo de 1992, se modificó la norma, y el límite de exposición al formaldehído se redujo aún más a 0.75 ppm lo que es equivalente según factores de conversión a $919.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ATSDR, 1999).

1.7 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Existen diversas fuentes que contribuyen a la contaminación del aire, debido a la variedad ambiental del planeta, que incluye fauna y flora que pueden generar emisiones contaminantes mediante procesos naturales o de descomposición. La contaminación del aire se concentra principalmente en zonas urbanas y rurales, y se divide en fuentes fijas y móviles. Las fuentes fijas son aquellas relacionadas con procesos mineros e industriales, mientras que las fuentes móviles se refieren a emisiones de vehículos de combustión interna, incluyendo el transporte público. Además, el suelo y el agua también pueden contribuir en menor medida a la contaminación del aire (Zambrano, 2016).

Las fuentes de contaminación del aire se pueden dividir en dos categorías, naturales y artificiales, según su origen.

Naturales: Incluyen las emisiones contaminantes generadas por las actividades naturales en la geosfera, la biosfera, la atmósfera y la hidrosfera, de la siguiente forma:

- ✓ Los incendios forestales ocurren naturalmente y liberan altas concentraciones de CO_2 , óxidos de nitrógeno, humo, polvo y ceniza.

- ✓ Las erupciones volcánicas, una de las principales fuentes de contaminación, traen a la atmósfera compuestos de azufre (CO_2 y H_2S), en los que se dispersan gran cantidad de partículas bajo la influencia del viento.
- ✓ Aumento de CO_2 en plantas anaeróbicas (polinizadas por el aire) como pastos, olivos y gramíneas. Ciertas actividades biológicas como la respiración, la reproducción y la floración producen polen y esporas cuando se concentran en el aire, lo que provoca fiebre del heno (fiebre del heno) provoca una llamada alergia (más del 20% de la población urbana se ve afectada). O finalmente descomposición anaeróbica de materia orgánica (fermentación), producción de metano (CH_4).
- ✓ Las descargas eléctricas que se producen durante las tormentas conducen a la formación de óxidos de nitrógeno al oxidar el nitrógeno atmosférico.
- ✓ El océano libera partículas de sal en el aire, y las ráfagas de vientos mueven estas partículas de áreas secas a otras áreas.

Artificiales: Son el resultado de la existencia y actividad humana. La mayor parte de la contaminación proviene del uso de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). El problema de la contaminación del aire está relacionado principalmente con esta causa (Zambrano, 2016).

Entre las actividades humanas generadoras de contaminación podemos destacar las siguientes:

- ✓ Los medios de transporte como los automóviles y aviones provocan un mayor grado de contaminación. La proporción de transporte ferroviario y acuático es menor en comparación con lugares alejados de los centros de población. La cantidad de contaminación producida dependerá del tipo de combustible utilizado, el tipo de motor, el uso del convertidor catalítico y la intensidad del tráfico.

- ✓ En la industria, el impacto de la contaminación del aire depende del tipo de actividad, pero las centrales térmicas, cementeras, siderúrgicas, papeleras y químicas son las más contaminantes.
- ✓ Uso de calentadores y otros electrodomésticos en el hogar que utilizan combustibles fósiles (carbón, gas, diésel, gas natural) como fuentes de calor. El grado de contaminación depende más o menos del tipo de combustible utilizado (el carbón es más contaminante que el gas) y del diseño y mantenimiento de los equipos utilizados.
- ✓ En agricultura y ganadería, el uso intensivo de fertilizantes, el uso de grandes áreas de regadío (arrozales) y la alta concentración de ganado conducen al aumento de gases de efecto invernadero, como el metano, y al tratamiento de residuos sólidos a través de procesos de incineración. (MINTIC, 2019)

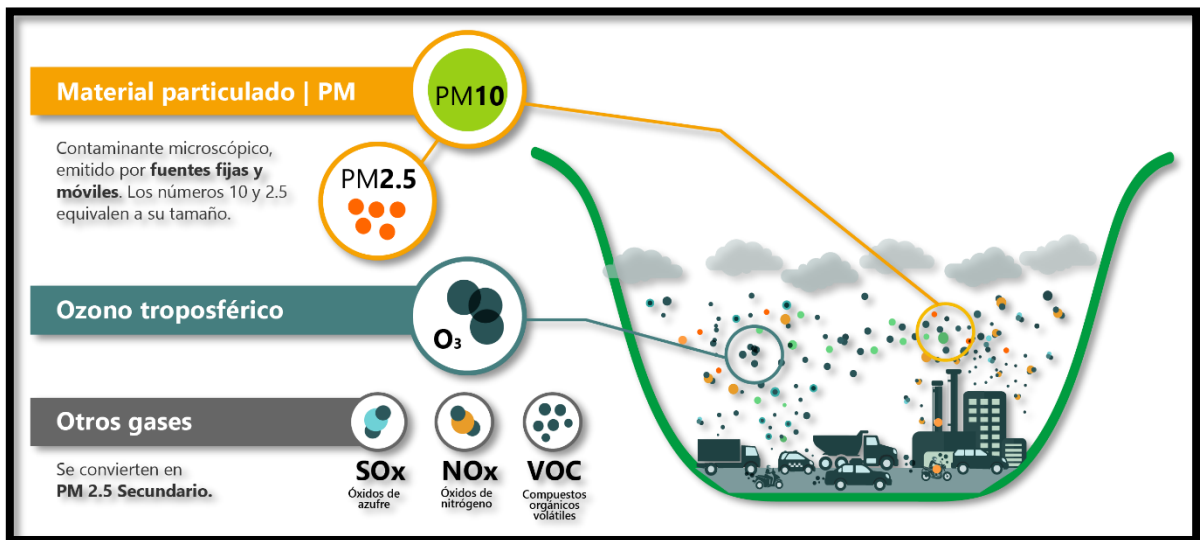


Ilustración 1. Fuentes de contaminación de material particulado (MINTIC, 2019).

1.8 DIFUSIÓN DE LOS CONTAMINANTES EN EL AIRE

El desplazamiento y esparcimiento de los contaminantes en el aire son afectados por diferentes factores como el clima, la topografía, el viento, la estabilidad atmosférica, la radiación solar y la precipitación. El viento es el movimiento del aire, y su velocidad tiene

una gran influencia en la concentración de contaminantes en una zona determinada. A medida que aumenta la velocidad del viento, disminuye la concentración de contaminantes.

La formación de ozono se ve afectada por la radiación solar, ya que esta facilita la combinación de vapores orgánicos con óxidos de nitrógeno. La lluvia tiene un efecto beneficioso, ya que limpia las partículas contaminantes del aire y ayuda a reducir las partículas provenientes de la construcción y ciertos procesos industriales. En las grandes ciudades que se encuentran en zonas de topografía compleja, como valles o cadenas montañosas, a menudo se experimentan altas concentraciones de contaminantes en el aire.

Hay varios factores involucrados en el proceso de contaminación del aire. A continuación, se muestra los mecanismos de este tipo de contaminación (DKV, 2010).

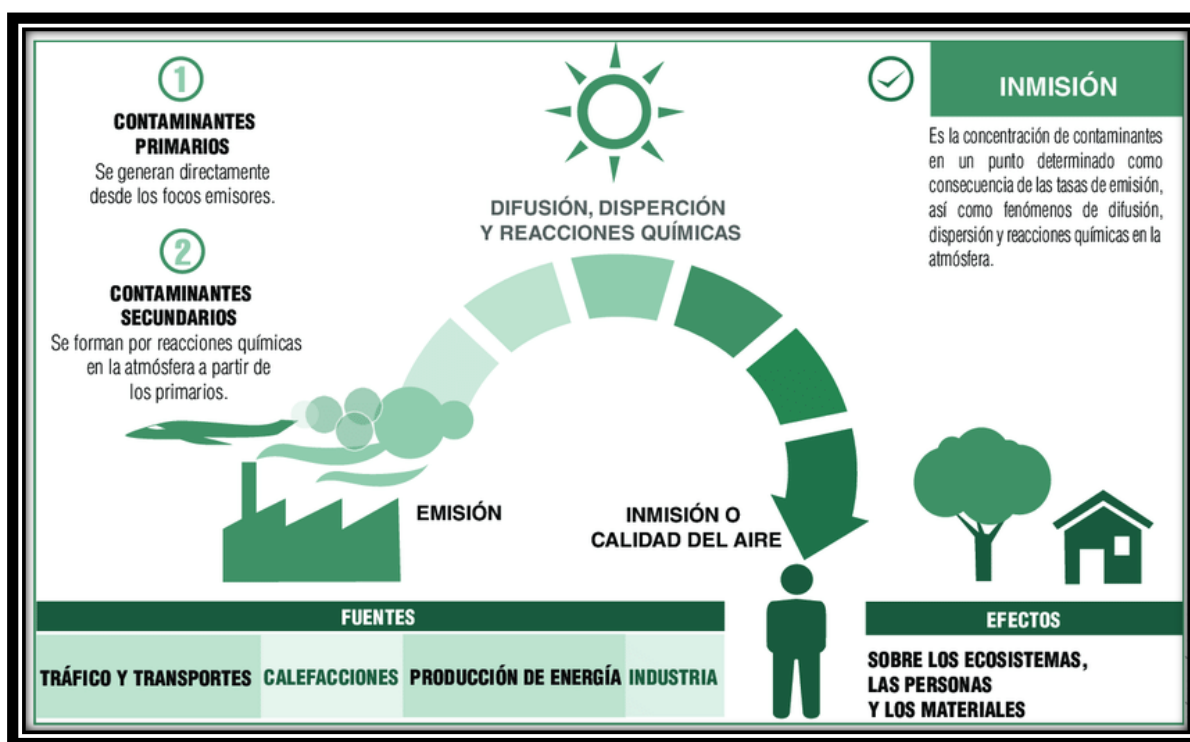


Ilustración 2. La contaminación y la atmósfera (DKV, 2010).

Por tanto, se puede observar que el primer proceso corresponde a la emisión de contaminantes, cuyos niveles varían según las características de las fuentes emisoras y las condiciones en que se producen estas emisiones.

Posteriormente cuando los contaminantes se han emitido permanecen en la atmósfera durante un tiempo determinado que se conoce como tiempo de residencia. Este tiempo de está asociado con la reactividad química de cada contaminante, con el lavado de la atmósfera que

efectúa la lluvia y con la capacidad del medio para dispersarlos. La última fase de la contaminación atmosférica debe incluir los efectos de los contaminantes sobre los seres vivos, las estructuras como edificaciones y sobre las propiedades intrínsecas de la atmósfera (reducción de la visibilidad, alteración del balance de calor del sistema).

La contaminación del aire inicia cuando las sustancias contaminantes son emitidas al aire por distintas fuentes de emisión, generando diferentes niveles de emisión. Una vez que estos contaminantes llegan a la atmósfera, experimentan diversos procesos de transporte y transformación, como la dilución y reacciones químicas. Estos procesos resultan en una determinada concentración de cada contaminante en un lugar específico, la cual se conoce como nivel de inmisión. Los niveles de inmisión o calidad del aire son importantes para determinar el impacto de un contaminante en la salud o el medio ambiente (DKV, 2010).

1.8.1 Emisión

Resulta importante el concepto de emisión, el cual se refiere a la liberación de sustancias contaminantes al medio ambiente a través de fuentes como chimeneas industriales, superficies comerciales e industriales, chimeneas residenciales, vehículos, locomotoras o aeronaves.

La cantidad de contaminantes que una fuente de emisión libera a la atmósfera durante un período de tiempo. Los valores de emisión se miden a la salida de la fuente de emisión. La generación de contaminantes atmosféricos continúa a través de procesos, transporte, difusión, mezcla o acumulación (mecanismos sumidero) realizados por fenómenos meteorológicos que determinan el potencial de contaminación.

De igual forma, se tiene un conjunto de reacciones químicas que dan lugar a la transformación de los contaminantes, ya que la atmósfera es un medio oxidante que recibe energía solar y contiene sustancias químicas oxigenantes potencialmente altamente reactivas (hidroxilo u otros radicales libres). El resultado final de estos procesos permite la determinación de valores de emisión de contaminantes, que indicarán la calidad del aire (Zambrano, 2016).

1.8.2 Inmisión

El término inmisión se refiere a la recepción de contaminantes en el medio ambiente, ya sea en el aire, suelo o agua, procedentes de una fuente emisora. La inmisión también puede ser utilizada como sinónimo de niveles de inmisión, que se refiere a la concentración de sustancias contaminantes en un medio determinado. Las emisiones de partículas sólidas, gases o vapores que son perjudiciales o molestos para la vida, especialmente para la especie humana, se transmiten a la atmósfera a través de focos emisores. La inmisión no se trata simplemente de la suma de las sustancias emitidas, ya que hay disoluciones y reabsorciones que ocurren naturalmente en la atmósfera, así como el agravamiento del problema mediante reacciones naturales o al combinarse diferentes tipos de emisiones.

Se puede relacionar también a la cantidad de contaminantes presentes en una determinada atmósfera, después de haber sido transportados, esparcidos, mezclados y entrados en contacto con organismos vivos y materiales afectados por ellos.

Si los niveles de inmisión no son adecuados, disminuye la calidad del aire y se originan los efectos negativos sobre los distintos receptores: el ser humano, los animales, los vegetales, los ecosistemas en su conjunto.

Los factores que influyen en la dinámica de la expansión de los contaminantes y sus concentraciones son las características de emisión, las condiciones atmosféricas, las características geográficas y topográficas (Zambrano, 2016).

1.9 IMPACTO SOBRE LA SALUD HUMANA RELACIONADOS CON LA CALIDAD DEL AIRE EN UN ESPACIO CERRADO

La Organización Mundial de la Salud (OMS) informó que en 2016 alrededor de 249 mil muertes prematuras en las Américas fueron causadas por la contaminación del aire exterior, mientras que aproximadamente 83 mil muertes prematuras fueron atribuibles a la contaminación del aire en hogares debido al uso de combustibles sólidos. Asimismo, los contaminantes climáticos de vida corta, como el carbono negro, pueden influir en el calentamiento global y tener consecuencias negativas en la salud. La calidad del aire en el interior de un espacio cerrado puede afectar directamente la salud de las personas que lo habitan. En general, los contaminantes que están presentes en el aire, penetran en el

organismo por inhalación, des esta forma, afectan inicialmente el tracto respiratorio, pudiendo también ser absorbidos y afectar a otros órganos o acumularse en distintos tejidos. Asimismo, puede haber contaminantes que provoquen irritación en los ojos o que provoquen problemas dérmicos. Los efectos sobre el tracto respiratorio son: irritación nasal, de garganta y bronquios, con posibilidad de causar cambios en la reactividad bronquial o liberación de un mediador inducido por alérgenos que conducen a la aparición de rinitis, asma o neumonitis hipersensitivas. Por otra parte, los contaminantes microbianos pueden provocar enfermedades infecciosas, por lo que, si el aire interior está contaminado con virus o bacterias, las personas que habitan en el espacio cerrado pueden ser más propensas a contraer enfermedades infecciosas como resfriados, gripe e incluso neumonía. Además, la falta de ventilación adecuada y la acumulación de dióxido de carbono y otros contaminantes pueden causar fatiga, dolores de cabeza y otros síntomas de malestar general. También se pueden relacionar con problemas cardiovasculares, por lo que una exposición a contaminantes en espacios cerrados puede aumentar el riesgo de enfermedades como la hipertensión y el infarto de miocardio. Cabe mencionar que existen notables diferencias en los niveles de contaminación ambiental entre distintos grupos de población y ubicaciones geográficas. Por ejemplo, las personas que viven cerca de carreteras o instalaciones industriales suelen estar más expuestas a niveles elevados de contaminación ambiental exterior. Por otro lado, aquellos que utilizan combustibles sólidos como fuente de energía en el hogar pueden estar más afectados por la contaminación del aire en espacios interiores. Estas diferencias en la exposición a la contaminación pueden estar relacionadas con la falta de equidad en el desarrollo, aplicación y cumplimiento de las leyes, normativas y políticas ambientales.

La contaminación del aire es un problema mundial cada vez más importante y está siendo abordado por la comunidad internacional. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, adoptada por la Asamblea General de las Naciones Unidas en septiembre de 2015, hace referencia directa a la contaminación del aire en tres de sus objetivos principales objetivos, en primer lugar busca reducir el número de enfermedades y muertes causadas por sustancias químicas peligrosas y la polución del aire, agua y suelo; en segundo lugar se busca garantizar el acceso universal a servicios de energía modernos, fiables y asequibles; y como tercer lugar se busca reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando atención a la calidad del aire y a la gestión de residuos municipales y de otro tipo (OPS, 2016).

1.9.1 Causantes De Una Mala Calidad Del Aire En Espacios Cerrados

La mala calidad del aire en espacios cerrados puede deberse a una variedad de factores, incluyendo la falta de ventilación adecuada, la acumulación de contaminantes químicos y biológicos, el humo del tabaco, la emisión de gases tóxicos de electrodomésticos o sistemas de calefacción, y la presencia de materiales de construcción o mobiliario que emiten compuestos orgánicos volátiles. Otros factores que pueden contribuir a una mala calidad del aire interior incluyen la humedad excesiva, la falta de limpieza y el mantenimiento inadecuado de los sistemas de ventilación. Estas humedades facilitan la proliferación de ácaros, hongos y bacterias, que pueden ser los causantes de enfermedades respiratorias y asma. En algunos casos también se debe a la presencia de mascotas o animales con las que se comparten los espacios, debido a que son portadores de sustancias como alérgenos, y estos pueden dañar sistemas de ventilación (S&P , 2020).

1.9.2 Enfermedades Y Afecciones Comunes Por Mala Calidad Del Aire En Interiores.

Como consecuencia a la exposición de una inadecuada calidad del aire puede provocarnos los siguientes síntomas y afecciones tales como:

- Zona ocular: sequedad, picor o escozor, lagrimeo y enrojecimiento.
- Vías respiratorias (nariz y garganta): sequedad, picor o escozor, congestión nasal, goteo nasal, estornudos, epistaxis, dolor de garganta.
- En los pulmones: opresión torácica, sensación de ahogo, sibilancias, tos seca, bronquitis.
- En la piel: enrojecimiento, sequedad, picor generalizado y localizado.
- En términos generales: debilidad, somnolencia, dificultad para concentrarse, irritabilidad, ansiedad, náuseas, mareos.
- Asma: Una exposición prolongada a humedad en interiores, ácaros del polvo y alérgenos fúngicos son los principales causantes de esta enfermedad.

- Alergias, rinitis, dermatitis: estas enfermedades son más que habituales en hogares o espacios cerrados donde existen casos de acumulación de ácaros, alérgenos en general o humedades (S&P , 2020).

1.10 SÍNDROME DEL EDIFICIO ENFERMO

Para el año 1982, la OMS acuñó el término “Síndrome del Edificio Enfermo” haciendo referencia a un conjunto de enfermedades originadas por la contaminación del aire en espacios cerrados revelándose en síntomas que se producen debido a los altos niveles de polución que se generan en los edificios, hogares y centros de trabajo.

Este síndrome también puede definirse como un conjunto de síntomas que afectan a las personas que pasan tiempo en edificios con una mala calidad del aire interior. Estos síntomas pueden incluir fatiga, dolores de cabeza, irritación de ojos, nariz y garganta, náuseas, mareos y dificultad para concentrarse.

Actualmente, situaciones como el trabajo remoto, distanciamiento social y la nueva forma de convivencia ante la propagación del Covid-19 han llevado a la realización de labores de forma continua en nuestros propios hogares, provocando que se preste más atención en la calidad de vida que nos brindan los edificios en los que vivimos, donde surge la inquietud si realmente es buena la calidad del aire en nuestro propio hogar (Berenguer, 2019).

Según la OMS, estos edificios presentan las siguientes características más comunes (Berenguer, 2019):

- En la mayoría de los casos cuentan con un sistema de ventilación forzado que generalmente es común a todo el edificio o a amplios sectores y existe recirculación parcial del aire. Algunos edificios tienen la localización de las tomas de renovación de aire en lugares inadecuados mientras que otros usan intercambiadores de calor que transfieren los contaminantes desde el aire de retorno al aire de suministro.

- Son edificios que cuentan con un mal diseño, provocando que los espacios cerrados tengan un sistema de ventilación natural casi inexistente.
- Se caracterizan por ser edificios herméticos en los que, en muchos casos, las ventanas no pueden abrirse o no se cuenta con ninguna.

Los factores a nivel de climatización que puedan afectar un edificio, lugar de trabajo u oficina de manera notable son las siguientes (Berenguer, 2019):

- Uso excesivo de sprays y perfumes.
- Una mala ventilación y escasa renovación del aire.
- Sistemas de aire acondicionado o calefacción colocados en lugares poco convenientes.
- Temperatura seca del aire.
- Humedad ambiental baja (menor de 40%) o excesiva (mayor de 60%).
- Velocidad del aire.
- Polvo (principal transportador de sustancias alérgicas).
- Riesgos biológicos (bacterias, virus, esporas, toxinas y ácaros)
- Calidad de aire (ventilación inadecuada, filtros sucios, funcionamiento incorrecto de los equipos de ventilación).

Algunas buenas prácticas que se deben tomar en cuenta para prevenir o mejorar las condiciones en los lugares donde convivimos son las siguientes (Berenguer, 2019):

- Dar corrector mantenimiento a los equipos de climatización.
- Realizar una limpieza periódica de los conductos de ventilación para eliminar las bacterias y poner al día los filtros de ventilación y equipos de climatización.
- Asegurar una buena entrada y salida del aire en todo el edificio. En este último caso, proteger la toma de aire exterior con materiales adecuados.
- Reducción de las partículas de polvo.
- Verificar que las ventanas con las que cuenta el edificio proporcionan una vista al exterior.



Ilustración 3. Condominios Área Metropolitana de San Salvador (El Diario de Hoy EDH, 2022).

1.11 METODOLOGÍAS PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE

Existen cuatro categorías generales de métodos para monitorear la calidad del aire: muestreadores pasivos, muestreadores activos, analizadores automáticos en línea y sensores remotos. También hay un quinto tipo, aunque menos común, conocido como bioindicadores. A continuación, se presentan las principales ventajas y desventajas de estas técnicas, y los objetivos de calidad de los datos son la herramienta final para seleccionar la tecnología adecuada. Otros factores importantes para la selección incluyen las limitaciones económicas locales y la disponibilidad de personal capacitado. En general, hay un equilibrio entre el costo de los instrumentos, su complejidad, confiabilidad y rendimiento. Los sistemas más costosos suelen proporcionar datos más precisos, pero a menudo son más difíciles de manejar.

Debido a que los costos de inversión y operativos de las diferentes técnicas de monitoreo del aire varían ampliamente, se recomienda elegir la tecnología más simple y económica que pueda cumplir con los objetivos de monitoreo establecidos. Para funciones básicas de monitoreo, estudios preliminares y selección de sitios, se pueden utilizar métodos de muestreo activos y pasivos. Los analizadores automáticos son costosos y tienen muchas desventajas operativas, por lo que solo deben utilizarse para mediciones a largo plazo

(generalmente de 5 a 10 años) o cuando los objetivos de calidad de los datos lo requieran. El uso de analizadores automáticos más simples, prácticos y resistentes con tecnologías emergentes, como los sensores de sólidos, puede aumentar su aplicación en el futuro. Los sensores remotos pueden realizar mediciones que integran componentes múltiples a lo largo de una ruta especificada, pero debido a su costo y complejidad, su uso se limita actualmente a aplicaciones especiales. Aunque las técnicas de biomonitorio pueden ser una forma más económica y flexible de identificar los niveles efectivos de contaminación o las áreas que requieren mediciones más detalladas, no están suficientemente desarrolladas para aplicarse en programas de monitoreo normalizados (Zambrano, 2016).

1.11.1 Muestreadores Pasivos De Monitoreo Del Aire

Los muestreadores pasivos de la calidad del aire son dispositivos de monitoreo que no requieren energía para su funcionamiento. Estos dispositivos se colocan en un lugar de interés y permiten la acumulación de contaminantes del aire en un medio absorbente, como un tubo o una tarjeta. Los contaminantes se absorben a través de procesos naturales de difusión y no se requiere un flujo de aire forzado para el muestreo. Los muestreadores pasivos son una opción de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire y se utilizan comúnmente en estudios de línea base y monitoreo de la exposición a largo plazo.

Estos sistemas utilizan la absorción en un sustrato específico para retener el contaminante que se desea analizar. El contaminante se difunde a través del aire y llega al sustrato. Después de la exposición, las muestras se llevan al laboratorio donde se extrae el contaminante y se analiza cuantitativamente. La muestra se recoge durante un período determinado, que suele variar entre una semana y un mes (Zambrano, 2016).

Estos muestreadores pueden ser utilizados de las siguientes maneras:

- En estudios iniciales para medir la cantidad de gases contaminantes principales en el aire.
- La exposición prolongada proporciona un promedio representativo de la zona en cuestión antes del inicio de las actividades evaluadas.

- Para complementar las mediciones continuas y lograr evaluar un área más grande, se puede reducir el número de estaciones automáticas.
- En planes de monitoreo de calidad del aire para actividades que no generen episodios o picos de contaminación agudos, y que requieren resultados en tiempo real debido a que son una fuente de emisión relativamente continua.
- En los monitoreos destinados a determinar la exposición a largo plazo de una población a una determinada concentración.

1.11.2 Muestreadores Activos De La Calidad Del Aire

Los muestreadores activos de la calidad del aire son dispositivos que utilizan una bomba de aire para aspirar activamente el aire ambiente y recolectar las partículas o gases contaminantes presentes en el aire. Estos muestreadores funcionan mediante el uso de un flujo constante de aire, que se dirige a través de un filtro o cartucho, donde se capturan las partículas o gases contaminantes. El flujo de aire se mide durante el muestreo para asegurar una recolección constante de contaminantes durante todo el periodo de muestreo. Los muestreadores activos son capaces de recolectar una gran cantidad de muestras, lo que permite una mayor precisión en la determinación de la concentración de contaminantes en el aire.

Estas muestras de contaminantes que son recolectados por medios físicos para su posterior análisis en el laboratorio. Los métodos incluyen muestreadores activos manuales o automáticos que bombean un volumen conocido de aire a través de un colector como un filtro o solución química durante un período determinado. Los datos recopilados a lo largo del tiempo proporcionan una línea base valiosa para el análisis de tendencias y comparaciones. La calidad de los datos finales depende de factores clave como los sistemas de muestreo, el acondicionamiento de muestras, los sistemas de ponderación y los procedimientos de laboratorio para el material particulado (PM) y los gases.

Este tipo de equipos de muestreo requieren de energía eléctrica, a diferencia de los muestreadores pasivos y utilizan un medio de colección físico o químico. A diferencia de los muestreadores pasivos, los muestreadores activos tienen una mayor sensibilidad debido al mayor volumen de aire que se mueve a través de ellos, lo que les permite obtener mediciones diarias promedio. Entre los muestreadores activos más utilizados se encuentran los

burbujeadores acidímetros para medir gases como SO_2 , CO , NO_2 , H_2S , HC , COV y O_3 , el método de filtración para medir partículas totales suspendidas (PTS) y el método gravimétrico de altos volúmenes.



Ilustración 4. Muestreadores activos de la calidad del aire (Zambrano, 2016).

1.11.3 Analizadores Automáticos Para La Calidad Del Aire

Los analizadores o muestreadores automáticos de la calidad del aire son dispositivos que se utilizan para recoger muestras de aire de manera constante y periódica, sin necesidad de intervención manual. Estos dispositivos suelen estar equipados con sensores y sistemas de control que les permiten tomar mediciones continuas y en tiempo real de diversos contaminantes atmosféricos, como partículas, gases y compuestos orgánicos volátiles. Los datos recopilados por los muestreadores automáticos se pueden utilizar para evaluar la calidad del aire en un área determinada y para identificar posibles fuentes de contaminación. Estos dispositivos suelen ser más costosos que los muestreadores pasivos o activos manuales, pero ofrecen la ventaja de proporcionar mediciones precisas y en tiempo real.

Este tipo de equipos presentan ciertas ventajas cuando se pretende identificar valores pico de concentración de contaminantes y se requieren tomar medidas de emergencia. Además, permiten obtener mediciones detalladas (usualmente en intervalos horarios o menores) en un

solo punto para varios contaminantes de interés (como SO₂, NO₂, CO, PM) y otros contaminantes relevantes, tales como los COV. Los datos se obtienen en línea y en tiempo real, por lo general a través de métodos basados en electro-óptica, tales como absorción de rayos UV o IR, fluorescencia y quimioluminiscencia.

Los dispositivos automáticos de monitoreo generan una gran cantidad de información que suele requerir sistemas de telemetría para su recolección y computadoras para su procesamiento y análisis posterior. Estos monitores tienen tres sistemas internos que están relacionados entre sí: electrónico, neumático y óptico (Zambrano, 2016).

- El sistema electrónico es responsable de controlar la operación del analizador y tiene un software incorporado que le permite realizar cálculos automáticos para informar los resultados.
- El sistema neumático de los monitores automáticos de calidad del aire está compuesto por la bomba de succión y las tuberías que permiten que la muestra de gas circule hacia el detector. La bomba de succión se encarga de extraer la muestra de aire a través del colector y de impulsarla hacia el detector para su análisis. Las tuberías y conexiones aseguran que la muestra se transporte de manera continua y sin interrupciones hacia el detector.
- El sistema óptico de un analizador automático de calidad del aire es donde se lleva a cabo el proceso de medición, el cual puede variar dependiendo del gas a analizar. Los procesos pueden involucrar técnicas físicas o químicas para medir la concentración de los contaminantes.



Ilustración 5. Analizador automático de la calidad del aire (Algoritmos , 2015).

Estos tipos de equipos normalmente son llamados estaciones destinados al análisis constante y periódico de los contaminantes presentes en la atmosfera.

1.11.4 Analizadores Remotos Para La Calidad Del Aire

Los sensores remotos para la calidad del aire son dispositivos que permiten medir y monitorear la calidad del aire utilizando tecnología de detección remota, como la teledetección por satélite y los sistemas LIDAR (detección y medición por láser). Estos sensores pueden proporcionar mediciones de grandes áreas geográficas y son útiles para detectar y monitorear la dispersión de contaminantes a gran escala. Además, los sensores remotos pueden ser utilizados para medir la concentración de gases como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), así como para monitorear la calidad del aire en áreas remotas o de difícil acceso.

Estos dispositivos remotos para la calidad del aire son dispositivos modernos que emplean técnicas espectroscópicas de larga data para medir en tiempo real las concentraciones de diversos contaminantes. La recolección de datos se lleva a cabo a lo largo de una ruta específica mediante la integración de un detector y una fuente de luz. Sin embargo, es importante destacar que estos métodos requieren una calibración rigurosa de los instrumentos y una garantía de calidad adecuada para obtener resultados precisos y confiables. Estos dispositivos tienen la capacidad de medir diversos componentes de forma conjunta a lo largo de una ruta determinada en la atmósfera, la cual suele ser de al menos 100 metros de longitud. Asimismo, pueden generar representaciones tridimensionales precisas de la concentración de contaminantes en una zona específica durante un lapso de tiempo determinado.

Algunos de los sistemas de monitoreo a distancia han sido realizados mediante la instalación de equipos en aviones o satélites. Las técnicas utilizadas incluyen la correlación espectrométrica, la reflexión de la luz solar en las partículas de los aerosoles, la absorción infrarroja y la emisión espectroscópica, el láser de color y de inducción infrarroja fluorescente y la aplicación de métodos astronómicos (Zambrano, 2016).



Ilustración 6 Sensores remotos para calidad del aire (KUNAK SENSING ANYWHERE, 2022).

CAPITULO II: ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL SALVADOR

2.1 ANTECEDENTE DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS MONITOREADOS EN EL SALVADOR

El estado de la calidad del aire de en El Salvador se verifica mediante mediciones partículas de un tamaño menor a 2.5 micrómetros de diámetro. Esto se debe a que tomando como base el estándar del Índice de Calidad de Aire Centroamericano (ICCA) para los contaminantes, estas partículas son las que causan el mayor daño a la salud en la población.

Este índice es utilizado en las estaciones de monitoreo de la calidad del aire con las que cuenta nuestro país, ya que de manera automática y periódica se están realizando mediciones en la atmosfera.

En estas estaciones se realizan mediciones de los siguientes gases NO_2 Y SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, siendo esta última la que genera la condición de la calidad del aire para determinar el nivel del ICCA (MARN, 2003).

2.2 ESTACIONES DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE EN EL SALVADOR

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador es el encargado de vigilar la calidad del aire del país (MARN). Actualmente, el MARN cuenta solamente con tres estaciones ubicadas en San Salvador, una de las principales ciudades del país, para monitorear la calidad del aire en todo el territorio. La Organización Panamericana de la Salud ha identificado a El Salvador como uno de los países que carece de capacidad para monitorear la calidad del aire (MARN, 2003). Una de las principales limitaciones es el elevado costo de adquisición y mantenimiento de las estaciones de monitoreo, y en el peor de los casos, las reparaciones pueden resultar muy costosas (Flores, 2019).



Ilustración 7. Estaciones de monitoreo de la Calidad del Aire en San Salvador (MARN, 2023).

El desarrollo de soluciones basadas en las comunicaciones inalámbricas e IoT ha sido posible gracias al avance de la tecnología. Por lo que es importante destacar que trabajos previos utilizando esta técnica han sido llevados a cabo por profesores de la Universidad Tecnológica de El Salvador. Con el cual se propone un sistema de bajo costo que cumpla con los estándares para realizar las mediciones de los contaminantes presentes en la atmosfera. Los cuales se presentan en las siguientes imágenes:



Ilustración 8. Dispositivo de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire (Flores, 2019).



Ilustración 9. Estación IoT monitoreando la calidad del aire en exteriores (Flores, 2019).

2.3 CONTAMINACIÓN CAUSADA POR LOS AUTOMÓVILES Y TRANSPORTE PÚBLICO

Durante su ciclo de vida, tanto en la operación como en la producción de combustible, los vehículos como los automóviles, camiones y autobuses liberan sustancias contaminantes al aire. Además, existe la emisión de gases relacionada con la elaboración y distribución de combustibles, y en menor proporción, con la fabricación y el proceso de desecho de los vehículos.

La emisión de contaminantes por parte de los automóviles se origina a partir de la combustión del combustible y la evaporación del mismo. Este proceso comienza cuando el combustible se quema en el cilindro del motor a altas temperaturas (alrededor de 800 grados Celsius), lo que provoca que el oxígeno y el nitrógeno del aire se combinen y formen óxidos de nitrógeno. También se generan hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono debido a la combustión incompleta, así como dióxido de carbono. Todos estos contaminantes se liberan al medio ambiente como gases de escape (Castillo, 2015).

Como se mencionaba anteriormente la contaminación generada por los vehículos de transporte puede ser clasificada en dos tipos: contaminación primaria y secundaria. La primera se refiere a la emisión directa de sustancias tóxicas en la atmósfera, mientras que la segunda se produce a partir de reacciones químicas entre los contaminantes. La exposición a esta contaminación es especialmente peligrosa para los fetos, los niños y las personas con enfermedades crónicas, ya que son más vulnerables a sus efectos negativos.

Entre las principales causas de la contaminación vehicular del aire, los productos de las emisiones vehiculares que son depositados en la atmósfera en mayor cantidad son:

- Óxido nitroso
- Monóxido de carbono (CO).
- Dióxido de carbono (CO₂).
- Compuestos de plomo.
- Pequeñas cantidades de dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno y amianto.

Una de las principales causas del exceso nivel de contaminación causado por los vehículos es la gran cantidad de ellos circulando constantemente en todo el mundo. Por esta razón, se promueve el uso del transporte público y compartir el vehículo particular con otros pasajeros para realizar diferentes actividades, ya sea para dirigirse al trabajo o a los centros educativos. Además de esta causa evidente, que se ha agravado con el desarrollo tecnológico de la industria automotriz desde la Revolución Industrial, también es importante destacar los agentes contaminantes que provienen directamente de los vehículos y que contribuyen a la contaminación del aire.

Este tipo de contaminación tiene graves y variadas consecuencias para la salud de los seres humanos que están expuestos a sus agentes contaminantes. Principalmente, la contaminación del aire que respiramos es la responsable del aumento de los síntomas de las personas que ya sufren asma y otras enfermedades pulmonares, siendo siempre más vulnerables a la contaminación vehicular. Se estima que, debido a una exposición prolongada al dióxido de nitrógeno proveniente de la combustión interna de los vehículos, existe un 25% de probabilidad dentro de la población de sufrir enfermedades pulmonares crónicas (Castillo, 2015).

2.4 ANTECEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE EN EL SALVADOR

La contaminación del aire tiene graves consecuencias en la salud respiratoria, como alergias, gripe, bronquitis, neumonía, cáncer de pulmón, entre otras enfermedades.

Según un informe realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2016, San Salvador, capital de un país de El Salvador, se encuentra en el tercer lugar de las ciudades de la región con el aire más contaminado (Zambrano, 2016).



Ilustración 10. Principales contaminantes en El Salvador (El Diario de Hoy EDH, 2022).

Los altos niveles de contaminación del aire en San Salvador son el resultado de la acumulación de partículas y gases tóxicos, como el ozono y el monóxido de carbono, que provienen principalmente del consumo de combustibles fósiles y de los procesos industriales. Estas partículas contaminantes son extremadamente pequeñas, con un diámetro inferior a los 2.5 micrómetros, y pueden penetrar directamente en los pulmones. La mayor responsabilidad en la emisión de estos contaminantes recae en los vehículos de transporte público, automóviles, camiones y otros vehículos que generan grandes cantidades de humo de manera diaria en San Salvador.

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) ha informado, a través de sus estudios de Calidad de Aire, que los niveles de contaminación en la región han aumentado cada año y que hay más días con niveles de contaminación altos que son perjudiciales para la salud de la población. Las autoridades correspondientes expresan que es necesario se regulen estos vehículos y transporte colectivo obsoleto que generan una gran cantidad de gases en la atmosfera que contaminan cada vez la calidad del aire en las principales ciudades del país (MARN, 2023).



Ilustración 11. Personas expuestas a diario a la emisión de gases (El Diario de Hoy EDH, 2022).

Según un informe de IQAir (empresa tecnológica Suiza que recopila información a través de diferentes colaboradores como el MARN) El Salvador en el año 2022 se encontraba en la posición 74 de países con mayor contaminación atmosférica (IQAir , 2023).

¿Qué país tuvo peor calidad del aire en 2022?

#	PAÍS	POBLACIÓN	MED. US
1	Chad	17,179,740	169
2	Iraq	43,533,592	164
3	Pakistan	231,402,117	159
4	Bahrain	1,463,265	157
5	Bangladesh	169,356,251	156
6	Burkina Faso	22,100,683	155
7	Kuwait	4,250,114	151
8	India	1,407,563,842	144
9	Egypt	109,262,178	128
10	Tajikistan	9,750,064	127
74	El Salvador	6,314,167	55

Ilustración 12. Calidad del aire en El Salvador según ranking IQAir (IQAir, 2023).

Mientras que a nivel de ciudades dentro de nuestro país se observa que Sonsonate presenta mayor cantidad de PM2.5 que San Salvador según datos del IQAir.

2022 Media de calidad del aire

Moderado 2022 US AQI media **55**

PM2.5 x2.8 **Concentración media de PM2,5 en 2022 en El Salvador: 2.8 veces el valor guía anual de calidad del aire de la OMS**

2022 Ciudad más limpia de El Salvador	San Salvador , San Salvador	54
2022 Ciudad más contaminada de El Salvador	Sonsonate , Sonsonate	63

Ilustración 13. Ranking ciudades más contaminadas en El Salvador según IQAir (IQAir , 2023).

2.5 REGULACIONES PARA LOS NIVELES DE EMISIÓN DE GASES CONTAMINANTES EN LAS NORMAS SALVADOREÑAS.

En El Salvador, se creó el Reglamento Especial de Normas Técnicas de Calidad Ambiental en el año 2000, que establece normas para la calidad del aire en el Artículo 9. Este reglamento establece parámetros mínimos para las emisiones de fuentes fijas o estacionarias. Según la disposición, la norma de calidad ambiental del aire establecerá los límites máximos permisibles para los contaminantes del aire para garantizar la salud humana y el medio ambiente. Estos límites nunca pueden superar los valores permisibles de la calidad del aire ambiente.

En el diario oficial tomo número 360, se publica el acuerdo 502 tomado por el Órgano Ejecutivo en el Ramo de Economía el día 4 de junio de 2003, la Norma Salvadoreña Obligatoria: emisiones atmosféricas fuentes móviles. NSO: 13.11.03: 01, por medio de la cual se establecen en el apartado 2, límites a las emisiones realizadas por vehículos con motores que utilicen combustible diésel para su funcionamiento tales como buses y microbuses. Por lo que cada vez que se produzca una modificación en los límites de emisiones para fuentes móviles estipulados en el Reglamento General de Tránsito y Seguridad Vial, los parámetros incluidos en esta norma serán reemplazados.

Así se establece la obligación para los empresarios de llevar a cabo los controles de emisiones de gases, conforme a lo estipulado en el Reglamento General de Tránsito y Seguridad Vial, con el fin de cumplir con los límites fijados en las normas previamente mencionadas (Castillo, 2015).

2.6 ÍNDICE CENTROAMERICANO DE CALIDAD DEL AIRE (ICCA)

Como su nombre lo indica, el ICCA es una medida que se utiliza para evaluar la calidad del aire en términos de los niveles de contaminantes presentes en el aire y los efectos que pueden tener en la salud humana. El ICCA suele medirse en una escala del 0 al 500, donde los valores más bajos indican una buena calidad del aire y los valores más altos indican una mala calidad del aire.

El ICCA se calcula en función de la concentración de diversos contaminantes del aire, como partículas en suspensión, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, ozono, entre otros. Los

valores de ICCA se pueden consultar en tiempo real en estaciones de monitoreo de la calidad del aire, que suelen estar disponibles en línea o en aplicaciones móviles. Los índices altos de ICCA pueden indicar problemas respiratorios, como asma, y pueden afectar especialmente a personas con enfermedades respiratorias preexistentes, niños y ancianos.

En la siguiente tabla se especifican según el ICCA los diferentes rangos y sus indicadores para la salud respecto a los niveles de concentración de Material Particulado 2.5 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (MARN, 2003).

Índice de Calidad del Aire (ICCA)	Calidad del aire Material particulado (PM)	PM2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
0-50	Buena	0-15.3	0-54
51-100	Moderada	15.5-40.2	56-154
101-150	Dañina a la Salud de los Grupos sensibles	40.5-65.4	155-254
151-200	Dañina a la Salud	66-159	255-354
201-300	Muy dañina a la Salud	160-250	355-424
301-500	Peligroso	251-500	424-604

Tabla 2. Rangos según el Índice Centroamericano de Calidad del Aire (MARN, 2003).

Cada nivel de contaminación está asociado a una categoría específica que podría tener los siguientes impactos en la salud de las personas:

- **Buena:** Los valores medidos en un lugar determinado están dentro del rango de 0 a 50 en el Índice de Calidad del Aire (ICA), esto indica que la calidad del aire es satisfactoria y representa poco o ningún riesgo para la salud.
- **Moderada:** El ICA se encuentra en el rango de 51 a 100, lo que indica que la calidad del aire es aceptable. Sin embargo, la contaminación en este rango puede ser un problema de salud moderado para un pequeño grupo de personas. Aquellas que son

especialmente sensibles al ozono o la contaminación por partículas pueden experimentar síntomas respiratorios.

- **Dañina a la salud para los grupos sensibles:** Cuando los valores de ICA se encuentran entre 101 y 150, es poco probable que el público en general se vea afectado, pero los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud.
- **Muy dañino a la salud:** Cuando los valores de ICA se encuentran entre 151 y 200, todas las personas pueden empezar a experimentar efectos en la salud, mientras que los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves.
- **Peligroso:** Los valores de ICA entre 201 y 300 activan una alerta de salud, lo que indica que todas las personas pueden experimentar efectos de salud más graves si se está expuesto por un tiempo prolongado a este nivel de contaminación.

2.7 RECOMENDACIONES DE LA ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD EN RELACIÓN A LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AIRE

De acuerdo con las últimas evaluaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire, tanto en exteriores como en interiores, es responsable de cerca de siete millones de muertes prematuras a nivel global. Este problema de salud pública se encuentra entre los mayores riesgos mundiales, equiparable al tabaquismo y superado solo por los riesgos de salud asociados a la hipertensión y la nutrición. En 2013, el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer de la OMS llevó a cabo una evaluación que concluyó que la contaminación del aire exterior es un agente carcinógeno para los seres humanos. La evaluación también encontró una estrecha relación entre las partículas del aire contaminado y el aumento de la incidencia del cáncer, especialmente del cáncer de pulmón. Además, se ha observado una conexión entre la contaminación del aire exterior y el aumento del cáncer de vías urinarias y vejiga. Esta mortalidad se debe a la exposición a partículas pequeñas con un diámetro de 10 micrones o menos (PM10), que pueden causar enfermedades cardíacas, neurológicas y cáncer. Las últimas estimaciones de la carga de enfermedad reflejan la importancia crucial que la contaminación del aire tiene en las enfermedades cardiovasculares y las muertes prematuras, mucho más de lo que se creía anteriormente por los científicos.

La mayor parte de las fuentes de contaminación del aire al aire libre están fuera del control de las personas y necesitan medidas tomadas por las ciudades, así como regulaciones nacionales e internacionales en sectores como el transporte, la gestión de residuos, la energía, la construcción y la agricultura.

Algunas de las políticas que podrían implementarse dentro de las grandes ciudades es el transporte sostenible, como el fomento del uso de bicicletas, el mejoramiento del transporte público, la creación de zonas peatonales y la promoción de vehículos eléctricos. También se pueden implementar políticas de planificación urbana que promuevan la densificación de las zonas urbanas, la creación de espacios verdes y la reducción del uso de vehículos particulares. En cuanto a la generación de electricidad, se pueden implementar políticas para fomentar el uso de energías renovables, como la solar y la eólica, en lugar de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. En la industria, se pueden establecer regulaciones más estrictas sobre las emisiones de gases contaminantes y se pueden incentivar prácticas más limpias y eficientes.

En 2005, la OMS publicó directrices que proporcionan información general sobre los límites y umbrales recomendados para los contaminantes atmosféricos que son considerados un riesgo para la salud. Según estas directrices, reducir la cantidad de partículas contaminantes (PM10) en el aire de 70 a 20 microgramos por metro cúbico puede disminuir en un 15% el número de muertes relacionadas con la contaminación del aire (OMS, 2021).

Las directrices son de alcance global y están fundamentadas en el análisis de las pruebas científicas actuales por parte de expertos, en relación con:

- Material Particulado (PM)
- Ozono (O₃)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)
- Dióxido de azufre (SO₂)

CAPITULO 3: DISEÑO DE LOS DISPOSITIVOS

3.1 FUNCIONAMIENTO GENERAL

Con una conexión vía GSM y con los datos obtenidos en tiempo real mostrados en la web, se realiza un seguimiento automático de la contaminación por partículas PM a través de un sensor con capacidad para capturar y realizar mediciones en el entorno inmediato, con un microcontrolador central el cual está configurado para leer periódicamente el sensor y enviar los datos a la nube como se menciona a través de una conexión GSM en una plataforma en línea.

Cada estación dispondrá de una batería que garantizará su autonomía por varias horas e incluso días. El código integrado en el microcontrolador se ha creado en torno a cuatro funcionalidades: el arranque de los componentes, las operaciones de medición y captura de los datos, preparación de datos para la transmisión y la transferencia de los datos. Este código de control se encuentra en la memoria flash del controlador dentro del dispositivo, el cual fue cargado por medio de un cable micro USB. El acceso al sitio web será público y cualquier usuario podrá verificar las mediciones que se actualizarán cada cierto periodo.

En la siguiente figura se muestra de forma general el funcionamiento interno que realiza cada medidor.

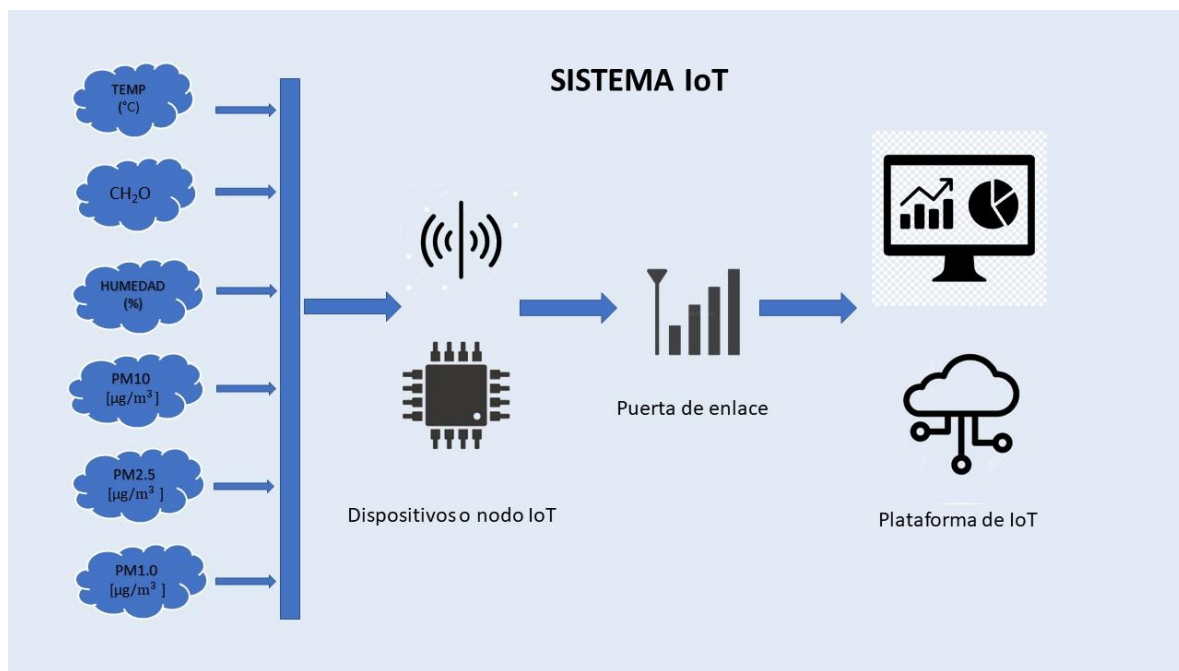


Ilustración 14. Esquema general del sistema IoT desarrollado para funcionamiento de medidores.

3.2 COMPONENTES ELECTRÓNICOS UTILIZADOS

Para dicho funcionamiento, todos los componentes cumplen una función importante que permite el desarrollo deseado, al igual que son componentes de bajo costo. Así cumplir uno de nuestros objetivos principales, desarrollar medidor de calidad del aire económicos.

3.2.1 *Sensor PMS5003ST*

Es fabricado por la compañía PlanTower, un sensor multifuncional que puede detectar concentraciones de partículas y formaldehído, así como valores de temperatura y humedad. Como sensor de concentración de partículas, se puede usar para determinar la cantidad de partículas suspendidas en el aire usando un láser. También integra una sonda electroquímica para formaldehído y un sensor de un chip para temperatura y humedad (ALIEXPRESS, 2022). Es nuestro principal componente para los dispositivos de medición.



Ilustración 15. Sensor PMS5003ST (ALIEXPRESS, 2022).

Las características principales (ALIEXPRESS, 2022):

- Principio de dispersión láser para lograr una medición precisa
- Tasa de alarma de cero errores
- Respuesta en tiempo Real y asistencia para la adquisición continua
- Tamaño de partícula de resolución mínima 0.3um
- Estructura con blindaje omnidireccional de seis lados, rendimiento de interferencia rígida más fuerte
- La Dirección de entrada y salida es opcional, y el ámbito de aplicación es amplio

3.2.2 *Microcontrolador ESP32*

El microcontrolador ESP32 es fabricado por la empresa Espressif Systems. Esta familia de microprocesadores es más potente que un Arduino, se caracterizan por tener conectividad inalámbrica Wifi, Bluetooth y algunos modelos traen incorporado un módulo GSM, sin embargo, por cuestiones de tiempo y la falta de estos componentes en el país, se decidió utilizar los modelos más sencillos y utilizar un módulo GSM aparte (Carmenate, 2023).



Ilustración 16. Microcontrolador ESP32 WROOM 32E (Carmenate, 2023).

Las características principales (Carmenate, 2023):

- Procesador dual Core Xtensa® LX6 de 32 bits.
- Es compatible Arduino con algún programa complementario adecuado.
- Tiene una velocidad de reloj entre 160 MHz y 240 MHz.
- Memoria RAM de 520 Kb.
- Wifi integrado.
- Bluetooth 4.2 2.4 GHz; BT 2.0 y 4.0 BLE.
- 36 GPIO pines.

3.2.3 *RTC DS3231*

El componente electrónico DS3231 es un reconocido reloj de tiempo real (RTC) que trabaja con el protocolo de comunicación I2C, cuenta con una excelente precisión, tiene un oscilador de cristal con compensación de temperatura y puede variar la alimentación requerida entre 2.3V a 5.5V, además cuenta con espacio para poner una batería de respaldo (FlyRobo, 2019). Este reloj lo utilizamos para saber exactamente la hora, minutos y segundos que fueron tomados los datos medidos.

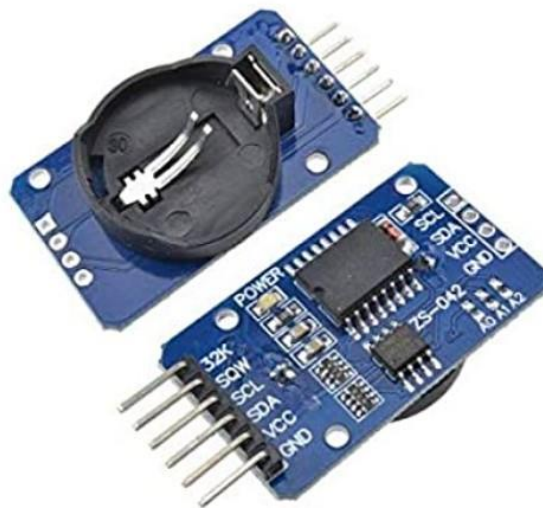


Ilustración 17. RTC DS3231SN (FlyRobo, 2019).

Las características principales (FlyRobo, 2019):

- Reloj de tiempo real que cuenta hora, minuto, segundo, día, mes, año.
- Batería de respaldo CR1220.
- Voltajes de alimentación: 2V a 5.5V.
- Interfaz I2C.
- Indicador de voltaje.
- Temperatura de operación: 40°C a 85°C.
- Dimensiones: 4.0 cm x 1.5 cm x 0.7 cm.
- Peso: 5g.

3.2.4 GSM SIM800L

El SIM800L es un módulo GSM que trabaja en las bandas de 850, 900, 1800 y 1900 MHz. Este pequeño dispositivo permite enviar o recibir voz, SMS y datos a cualquier proyecto, en especial con Arduino (Eneka, 2014). En nuestro caso también es funcional con el microcontrolador ESP32 y realiza la función de conectividad móvil en los medidores.



Ilustración 18. GSM SIM800L EVB (Hi-Fi Electronica, 2023).

Las características principales (Eneka, 2014):

- Voltaje de Operación es de 3.4V a 4.4V DC.
- Nivel Lógico es de 3V a 5V.
- Consumo de corriente máxima es de 500 mA.
- Consumo de corriente en reposo es de 0.7 mA.
- Interfaz Serial UART.
- Enviar y recibir mensajes SMS.
- Enviar y recibir datos GPRS (TCP/IP, HTTP, etc.).
- Controlado por Comandos AT.
- Velocidades de transmisión serial desde 1200bps hasta 115200bps.

3.2.5 *Batería MI*

El modelo de la batería es Mi Power Bank 3 10000 mAh Ultra Compact, fabricado y distribuido por la compañía Xiaomi. Esta batería portátil tiene un diseño compacto, alta capacidad de almacenamiento de energía, cuenta con un núcleo de alta calidad y carga rápida inteligente (Mi, 2023). Permite que los medidores sean móviles, al no depender de una fuente de alimentación fija.



Ilustración 19. Batería Mi 10000mAh (Amazon, 2023).

Las características principales (Mi, 2023):

- Diseño compacto y ligero, pesa 200g.
- Alta capacidad de almacenamiento de energía.
- Carga simultanea de hasta 3 dispositivos.
- Carga rápida bidireccional USB-C.
- Compatible con carga de baja corriente.
- Chips CI de alta calidad para mayor seguridad.
- Indicador LED para el nivel de carga de la batería.

3.3 SOFTWARE UTILIZADO

Thonny es un programa enfocado a la programación fácil en Python. Proporciona una interfaz intuitiva para crear archivos y crear aplicaciones futuras. Opcionalmente, hay un depurador de código para registrar errores. Además, funciona muy bien y de manera fácil con el microcontrolador ESP32, siempre y cuando se instale el driver adecuado (Quintero, 2023). Es por eso que fue el utilizado para la programación de los dispositivos de medición.



```
Thonny - C:\Users\ricky\Desktop\TBE115\boot.py @ 125 : 20
File Edit View Run Tools Help
boot.py X
1 #PMS5003ST
2 import time
3 import struct
4 from machine import UART
5 import ds1307
6 from machine import SoftI2C, Pin
7
8 PMS = UART(1, baudrate=9600, tx=2,rx=4) #Puerto de comunicacion UART PMS
9 PMS.init(baudrate=9600, bits=8, parity=None, stop=1) #Inicia Comunicacion con UART 8N1
10
11 gsm = UART(2, baudrate=9600, tx=25,rx=26) #Puerto de comunicacion UART SIM800L
12 i2c = SoftI2C(scl=Pin(18), sda=Pin(19))
13
14 while True:
15     #Establecer conexión con el proveedor de red
16     gsm.write('AT\r')
17     time.sleep(1)
18     ...
Shell X
Unable to connect to COM5: port not found
MicroPython (ESP32) - COM5
```

Ilustración 20. Interfaz del software Thonny.

3.4 PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

Después de seleccionar y tener listos todos los componentes electrónicos a utilizar, procedemos a dibujar el circuito en Eagle, un programa conocido para dibujar circuitos impresos.

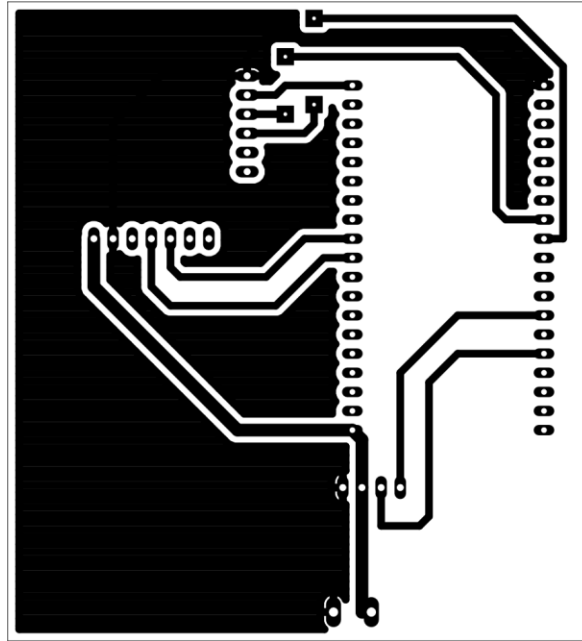


Ilustración 21. Diagrama esquemático dibujado en Eagle.

Posteriormente, el dibujo del circuito se mandó a imprimir en una placa.

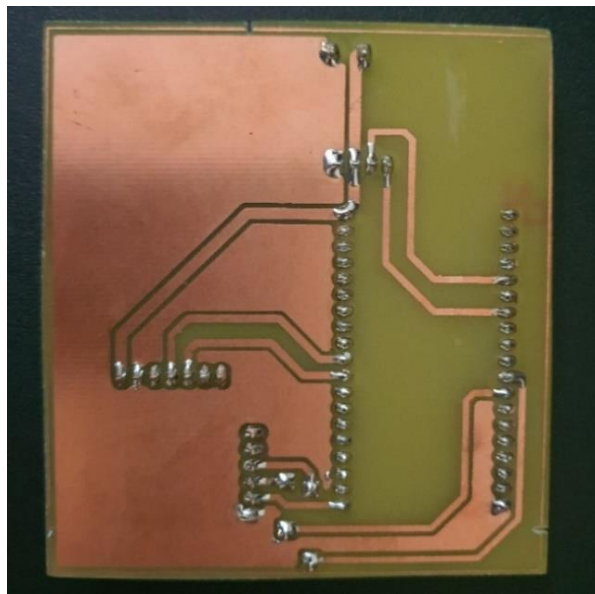


Ilustración 22. Placa de circuito impreso.

Para que los componentes sean de montar y desmontar fácilmente, se soldaron pines hembra en la placa de cobre. Con todo esto evitamos falsos contactos por cables y se tiene una mayor seguridad en su correcto funcionamiento. Resultado se muestra en la siguiente ilustración:

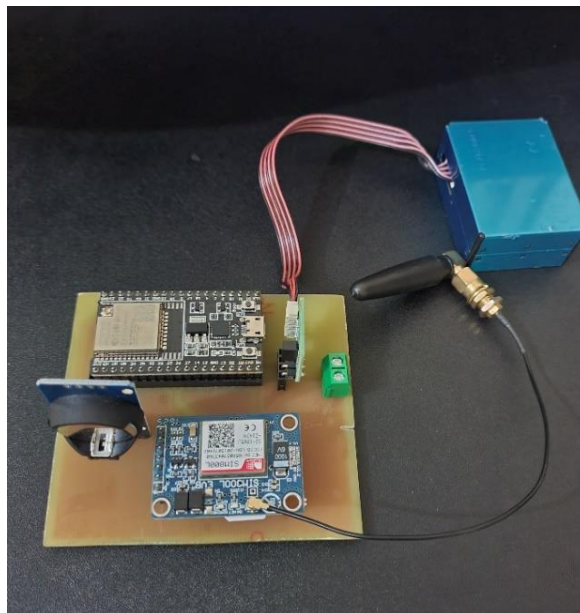


Ilustración 23. Componentes montados en los pines de placa de circuito impreso.

Todo el circuito con la batería se adaptó dentro de una caja de registro tipo plexo de 150x110x70 mm de plástico con protección IP65 para evitar daños en los componentes por rayos ultravioletas, humedad y polvo.



Ilustración 24. Caja plástica utilizada.

Se perforó una parte de la tapa de la caja para dejar el sensor expuesto y captar las mediciones de forma correcta. En la siguiente ilustración se muestra el proceso de corte y adaptación de la placa.

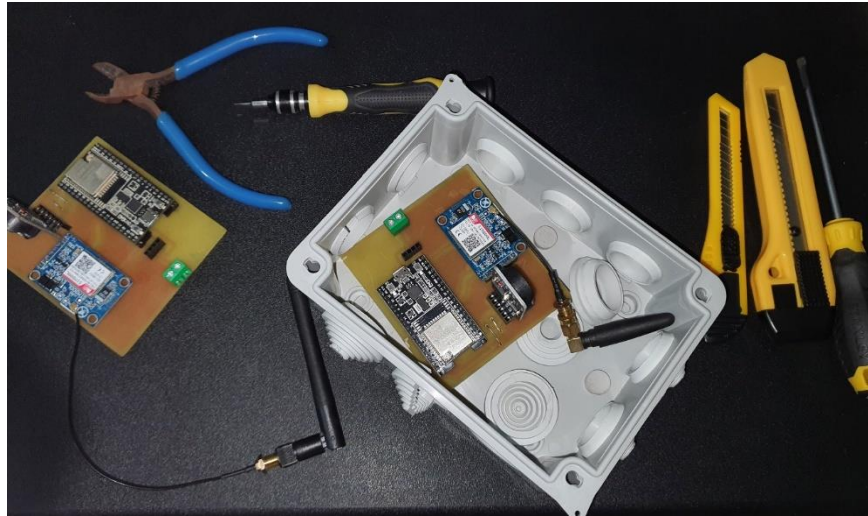


Ilustración 25. Proceso de adaptación de la placa en la caja plástica.

Se procede a realizar lo mismo para los otros 2 dispositivos. Se puede ver la placa ajustada y también el sensor en la ranura perforada para quedar de forma expuesta al aire.



Ilustración 26. Los 3 medidores con la placa y sensor ajustados.

Luego se acomodó la batería junto con los demás componentes de manera que todo quedará bien fijo y seguro para evitar fallas en un futuro.

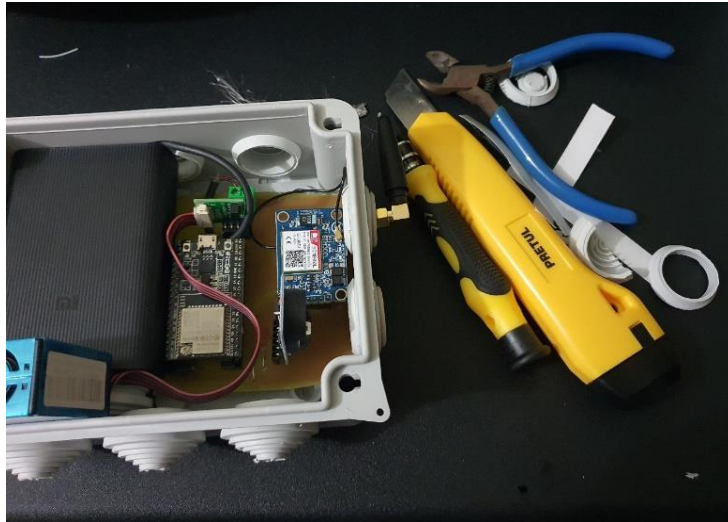


Ilustración 27. Medidor con la batería colocada.

Realizamos el mismo procedimiento con los medidores restantes. Se puede ver que son réplicas exactas.

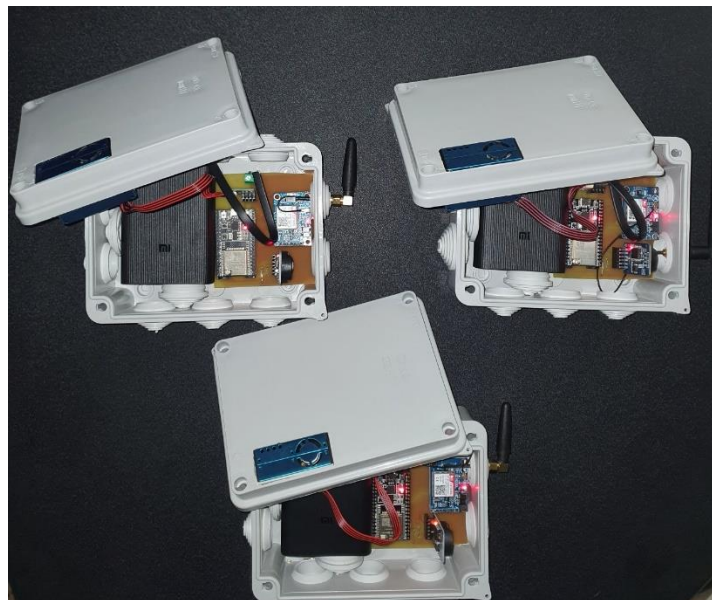


Ilustración 28. Los 3 medidores con la batería colocada.

Se hizo una prueba final para verificar si todo funciona correctamente y no hubo daño o desconexión de alguno de los componentes.

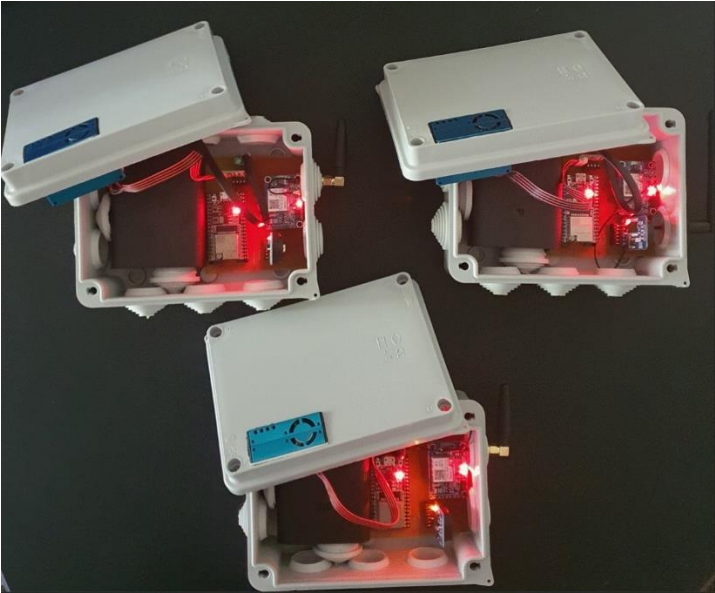


Ilustración 29. Prueba final después de terminar de armar todo el dispositivo.

Después de verificar el funcionamiento, cerramos y aseguramos las tapas. Nos queda el siguiente diseño:



Ilustración 30. Diseño final de los medidores.

La batería al no detectar una carga de consumo considerable, automáticamente se apaga. Tiene un modo de bajo consumo, pero solamente dura 2 horas y vuelve al modo normal donde necesita una mayor carga. Para solventar este problema se utilizó un diodo led en cada dispositivo, el cual hace una doble función, ser una carga permanente para que la batería no se apague y un indicador para saber si sigue encendido.

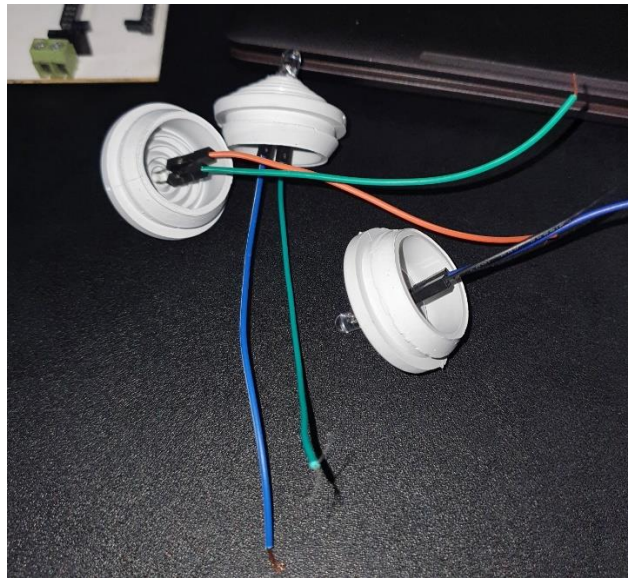


Ilustración 31. Diodos LED listos para ser conectados.

A continuación se muestra un dispositivo en funcionamiento y midiendo la calidad del aire.



Ilustración 32. Medidor ubicado en Santa Ana.

3.5 ALMACENAMIENTO DE DATOS

Para el almacenamiento de los datos nos apoyamos de herramientas de Google, mientras se están tomando las mediciones, los datos recolectados por las estaciones son almacenados en la nube en una hoja de Google Sheet, por medio de una app script indicamos cómo será el llenado. Se pueden ver las columnas de las 6 variables medidas cada 00:12:20.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Fecha	Hora Real	Estación	PM1.0	PM2.5	PM10	Temperatura [°C]	Humedad [%]	Formaldehido
114	2023/01/01	00:08:29	Santa_Ana	137	204	209	24.0	57.0	2
115	2023/01/01	00:14:17	Cojutepeque	207	425	426	21.7	76.2	8
116	2023/01/01	00:17:10	San_Salvador	145	243	247	21.9	72.0	2
117	2023/01/01	00:20:49	Santa_Ana	309	483	500	23.7	58.6	9
118	2023/01/01	00:26:37	Cojutepeque	77	119	124	21.7	75.9	1
119	2023/01/01	00:29:30	San_Salvador	236	420	432	21.7	72.9	8
120	2023/01/01	00:33:09	Santa_Ana	264	421	441	23.6	59.1	7
121	2023/01/01	00:38:57	Cojutepeque	170	265	270	21.5	77.2	2
122	2023/01/01	00:41:50	San_Salvador	237	450	462	21.6	73.0	6
123	2023/01/01	00:45:29	Santa_Ana	294	516	543	23.5	59.7	13
124	2023/01/01	00:57:49	Santa_Ana	306	556	576	23.4	60.6	8
125	2023/01/01	01:03:37	Cojutepeque	204	342	355	21.5	76.6	4
126	2023/01/01	01:06:31	San_Salvador	257	490	505	21.5	73.7	10
127	2023/01/01	01:10:09	Santa_Ana	256	436	450	23.4	60.5	7

Ilustración 33. Datos almacenados en la nube.

Enlace: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1AozfWCahi5AbMK-G48EaiRL1QXAysAJSSQ0i3Ppzri8/edit#gid=995596413>

3.6 PRESENTACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

Teniendo los datos almacenados en la hoja de cálculo, es necesario presentar la información al usuario de manera más ordenada y poder hacer una búsqueda más fácil. Para eso nos apoyamos de otra herramienta de Google, llamada Looker Studio, es una herramienta gratuita que convierte los datos en informes y paneles claros, totalmente personalizables y fáciles de consultar y compartir.

El diseño de la pizarra o dashboard consta de 3 filtros: por estación, fecha y hora. Además, muestra el total de mediciones realizadas, los valores máximos de cada una de las 6 variables de medición y una gráfica para cada variable muestreada. Toda esta información es tomada de la hoja de Google Sheet, luego procesada y presentada en un dashboard de la siguiente forma:

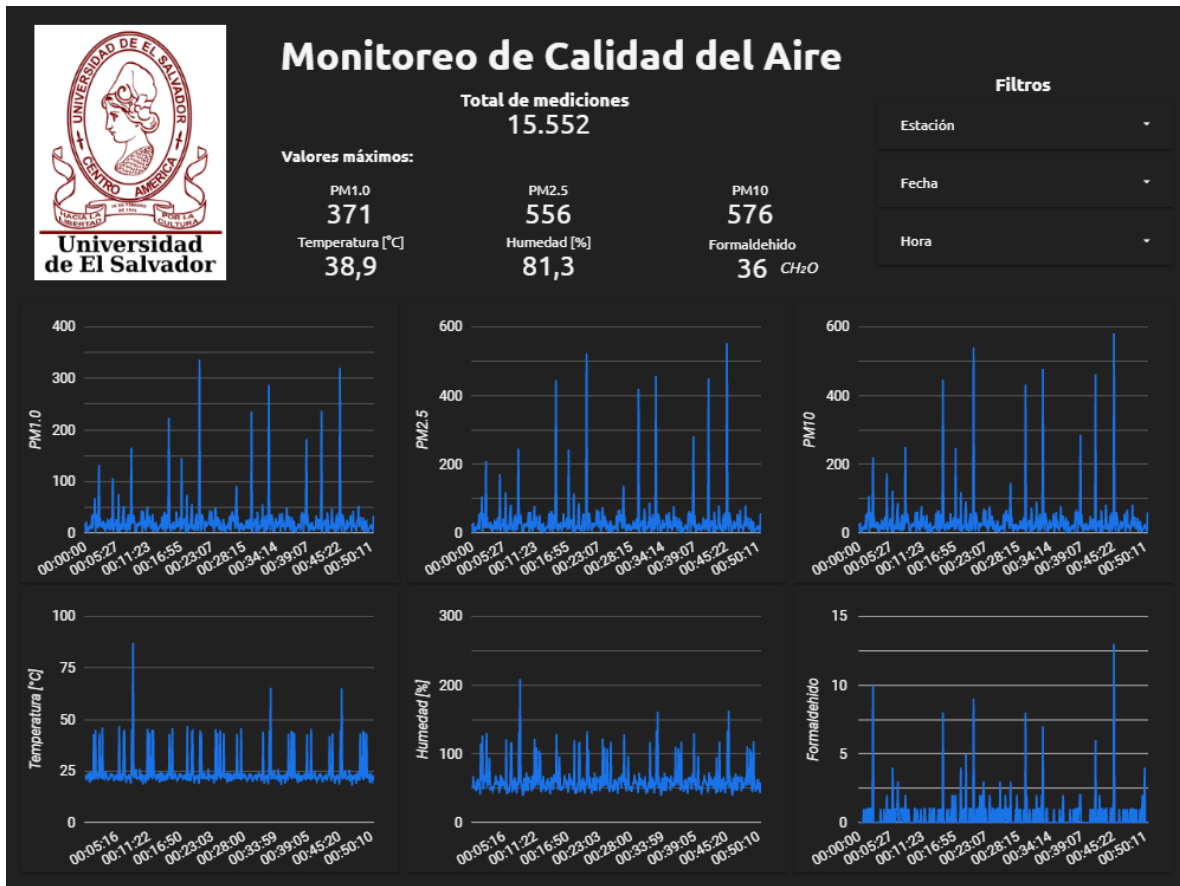


Ilustración 34. Presentación de los datos en dashboard.

Enlace: <https://lookerstudio.google.com/reporting/c8a51c73-1d27-481a-b116-0492f2f44a31>

3.7 PRESUPUESTO POR MEDIDOR

Se ha mencionada anteriormente que uno de los objetivos es tener un medidor de calidad del aire de bajo costo, por lo cual es necesario sacar costos reales. En la siguiente tabla se muestra el precio de cada componente o material utilizado y el monto total gastado por cada medidor.

COSTO POR MEDIDOR		
No	ELEMENTO	PRECIO
1	ESP32 WROOM-32E	\$7.50
2	Sensor PMS5003ST	\$32.57
3	SIM800L	\$20.90
4	RTC	\$5.00
5	Powerbank Mi	\$33.99
6	Placa con circuito	\$12.00
7	Caja para exteriores	\$5.95
8	Pines y conectores	\$2.24
9	Led + Jumpers	\$0.72
10	Tarjeta sim + saldo	\$2.10
11	Bateria para RTC	\$2.50
TOTAL		\$125.47

Tabla 3. Presupuesto detallado por cada medidor.

3.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS MEDIDORES

Como todo dispositivo es necesario tener algunas características, físicas y técnicas. Sin embargo, como son varios componentes y cada uno tiene su hoja de datos, se ha anexado en este documento lo más importante de cada componente. Con los medidores armados, se tomaron algunas características físicas y de batería.

- Dimensiones: 150x110x70 mm
- Peso: 580 gramos
- Rendimiento Batería:
 - Duración a máximo rendimiento = 46:20:00
 - Duración promedio = 52:00:00
 - Tiempo de Carga rápida = 03:40:00
 - Tiempo de Carga normal = 05:10:00

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como punto de partida de nuestra toma de datos es el 31 de diciembre del 2022, ya que este día se festeja el último día del año, y la población lo celebra con la vieja tradición de quema de pólvora y fuegos artificiales, en palabras simples, la quema de pólvora es contaminación inmediata al aire que respiramos.

A continuación, presentamos las gráficas de la concentración de las partículas PM1.0, PM2.5 y PM10 las cuales son los principales niveles de contaminación de las 3 estaciones de medición.

4.1 COMPORTAMIENTO DEL 31 DE DICIEMBRE

4.1.1 Santa Ana

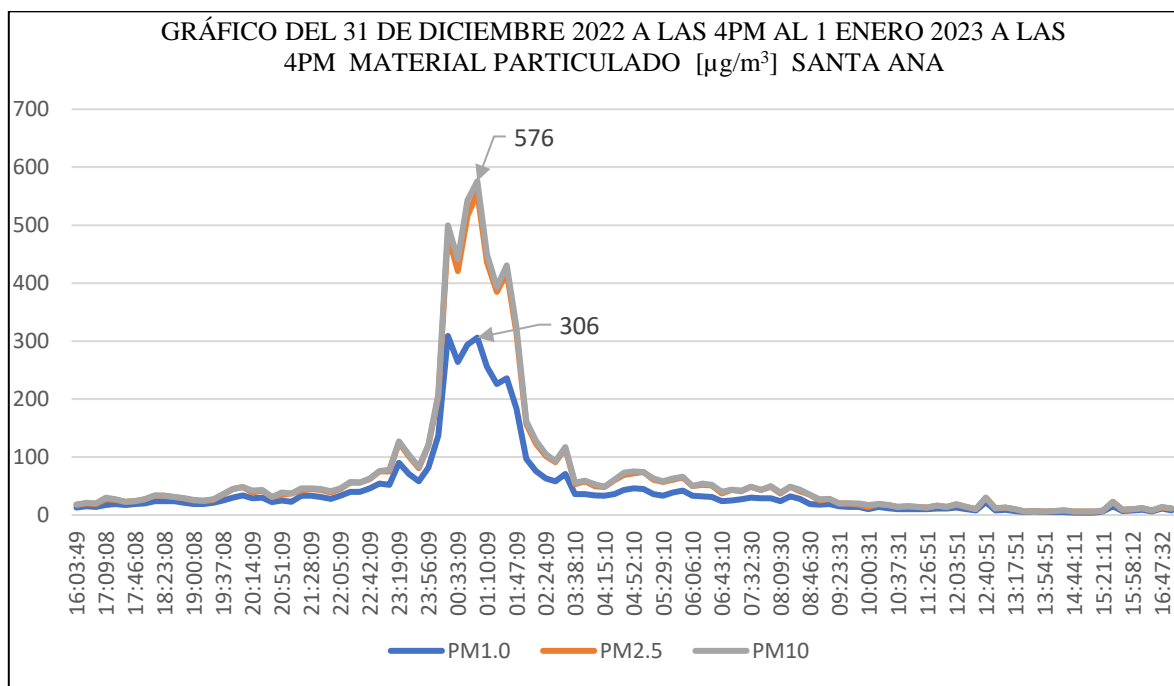


Ilustración 35. Gráfica de PM del 31 de diciembre Santa Ana.

En la ilustración 35 de las mediciones de la estación Santa Ana, las lecturas incrementan desde las 23 horas, luego de unos minutos llegan a un valor máximo a las 0:00 del día 1 de enero llegando a un pico de 576 PM10 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] que es igual a las PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y 306 PM1.0 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

HORA	PROMEDIO DE PM2.5	CALIDAD DEL AIRE	ICCA
16:00 - 22:00	32	Moderada	84
22:00 - 23:00	61	Dañina a la salud de los grupos sensibles	141
23:00 - 0:00	100.4	Dañina a la salud	169
0:00 - 1:00	436	Peligroso	448
1:00 - 2:00	342	Peligroso	373
2:00 - 6:00	72	Dañina a la salud	154
6:00 - 16:00	21	Moderada	62

Tabla 4. Índice de calidad del aire 31 de diciembre Santa Ana.

En la tabla anterior se resume el comportamiento de PM2.5 en intervalos específicos con su respectiva calidad del aire y su ICCA. Los Índices de calidad del aire para este día varían, ya que, en la media noche se presentan los niveles de peligrosos con un ICCA superiores a 300.

4.1.2 San Salvador

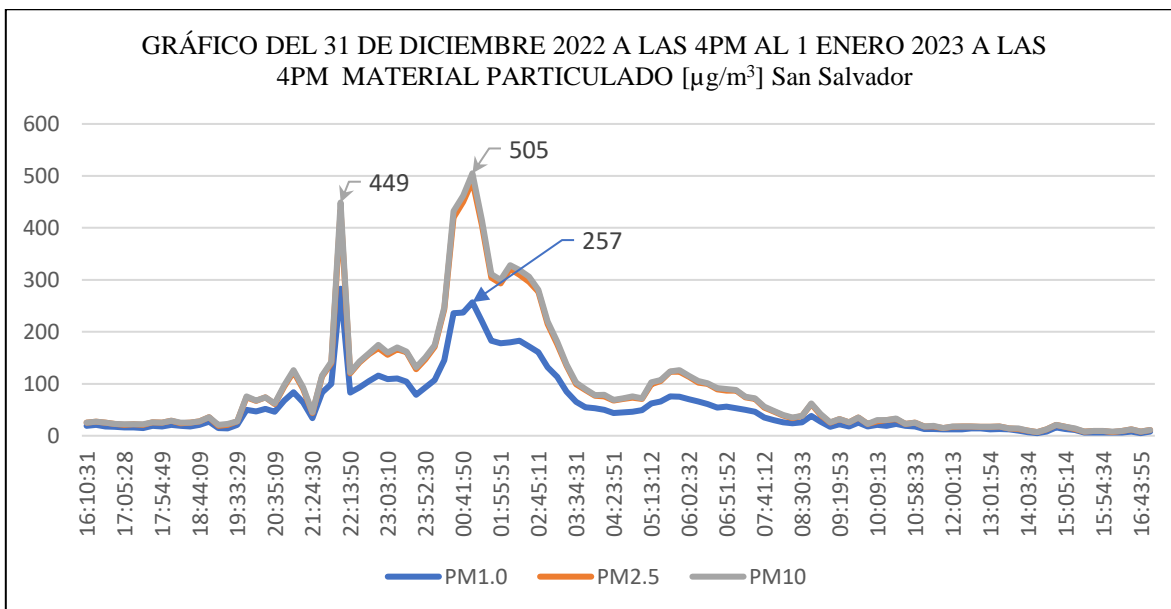


Ilustración 36. Gráfica de PM del 31 de diciembre San Salvador.

En la ilustración 36 de las mediciones de la estación San Salvador, las lecturas incrementan desde las 20 horas en unos minutos se produce el primer pico de datos llegando a 449 PM10 [µg/m³], luego de un tiempo llegan a un pico a las 1:06 del día 1 de enero llegando a un pico de 505 PM10 [µg/m³] que es igual a las PM2.5 [µg/m³] y 257 PM1.0 [µg/m³].

HORA	PROMEDIO DE PM2.5	CALIDAD DEL AIRE	ICCA
16:00 - 22:00	48	Dañina a la salud de los grupos sensibles	116
22:00 - 23:00	204	Muy dañina a la salud	249
23:00 - 0:00	151	Dañina a la salud	196
0:00 - 1:00	321	Peligroso	357
1:00 - 2:00	372	Peligroso	398
2:00 - 6:00	147	Dañina a la salud	194
6:00 - 16:00	33	Moderada	86

Tabla 5. Índice de calidad del aire 31 de diciembre San Salvador.

Como era de esperar en intervalo de horas donde San Salvador registra niveles Dañinos y Peligrosos para la salud están focalizados entre las 23 horas del 31 de diciembre hasta las 6 horas del 1 de enero del 2023.

4.1.3 Cojutepeque

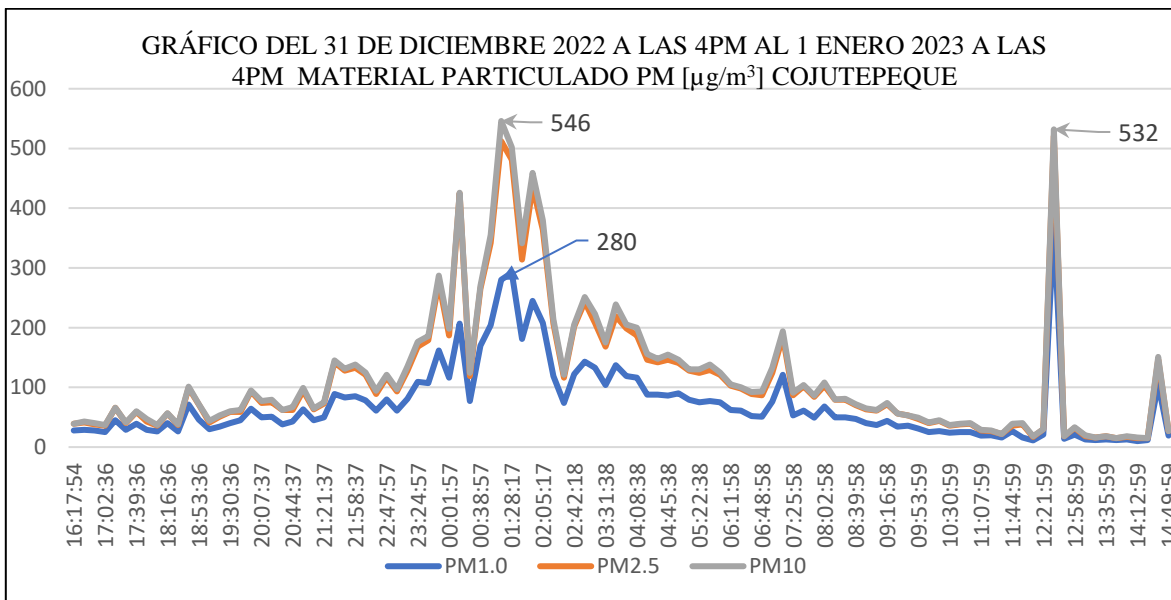


Ilustración 37. Gráfica de PM del 31 de diciembre Cojutepeque.

Se observa que cerca de la media noche hay un incremento en las 3 variables, este aumento de los datos se debe a que a las 12 de la media noche la quema de pólvora se incrementa en gran medida, llegando a niveles de PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] altos, lo cual incrementa la concentración de partículas dañinas para el sistema respiratorio este nivel es gran riesgo. Si una persona permanece un tiempo prolongados a estos niveles de contaminación. Minutos más tarde los

niveles de concentración de partículas bajan, pero aún a estos niveles de concentración pueden dañar a las personas sensibles o con problemas respiratorios. Tenemos que esperar cerca de las 5 am del 1 de enero del 2023 para tener un nivel aceptable de concentración de PM [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

HORA	PROMEDIO DE PM2.5	CALIDAD DEL AIRE	ICCA
16:00 - 22:00	67	Dañina a la salud	151
22:00 - 23:00	105	Dañina a la salud	172
23:00 - 0:00	169	Muy dañina a la salud	211
0:00 - 1:00	249	Muy dañina a la salud	299
1:00 - 2:00	417	Peligroso	433
2:00 - 6:00	177	Muy dañina a la salud	220
6:00 - 16:00	67	Dañina a la salud	151

Tabla 6. Índice de calidad del aire 31 de diciembre Cojutepeque.

4.1.4 Formaldehido del 31 de diciembre

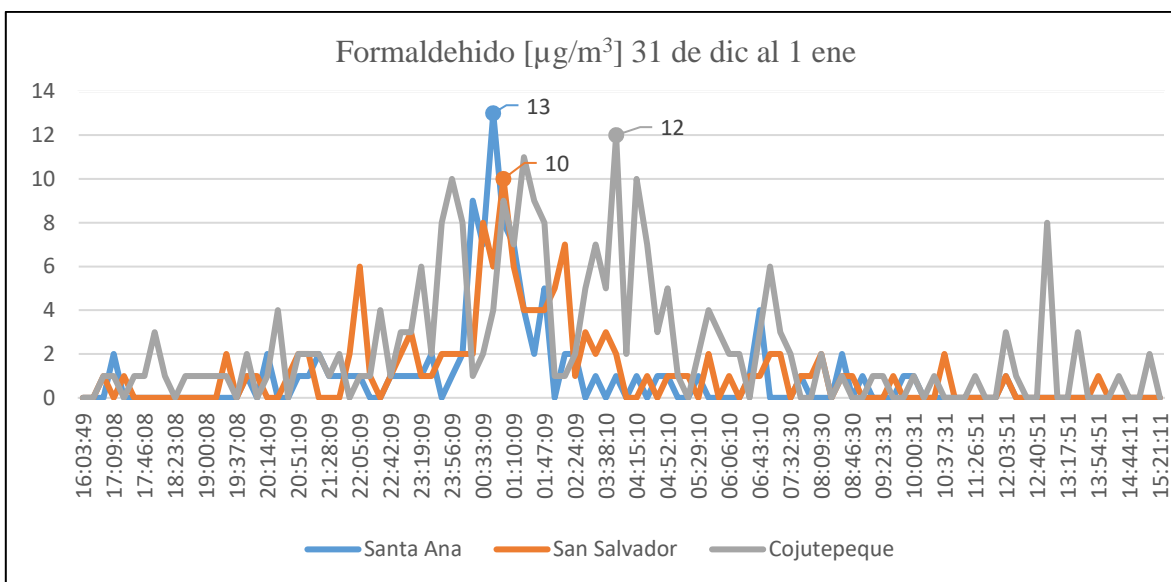


Ilustración 38. Formaldehido del 31 de diciembre de las 3 estaciones.

Se observa en la ilustración 38, los datos de Formaldehído. El comportamiento es fluctuante tanto para las 3 estaciones, cada una de ellas tiene un pico en diferente hora; Santa Ana tiene un pico de 13 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] a las 0:45, San Salvador 0:57 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] y Cojutepeque con un valor de 12 a las 3:50 horas.

Recordemos que los niveles de peligro para Formaldehído según La OSHA (Ocupacional Safety and Health Administration) es de 0.75 ppm lo que es equivalente según factores de conversión a 919.32 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. Y es que, el Formaldehído lo encontramos principalmente en la industria de elaboración de productos para limpieza, madera y en otros lugares como salas de belleza, talleres de fundición de metales, laboratorios y hospitales (limpieza, desinfección) (NIH, 2011).

Al hacer mediciones al aire libre y en un lugar donde no sea los anterior mencionados, no obtendremos mediciones altas que representen un peligro para las personas en dicho entorno, sin embargo.

En las siguientes páginas se mostrarán las gráficas producto de las mediciones de los meses de enero y febrero de este año 2023.

RESUMEN DEL MES DE ENERO 2023 DE CADA ESTACIÓN

Para resumir todos los datos medidos en el mes de enero, ordenamos todas las muestras tomadas por hora y se hace el promedio de cada una de ellas en todo el mes, teniendo un total de 24 horas al día con su respectivo promedio de todo el mes. Como se puede ver a continuación para cada una de las estaciones.

4.1.5 Santa Ana

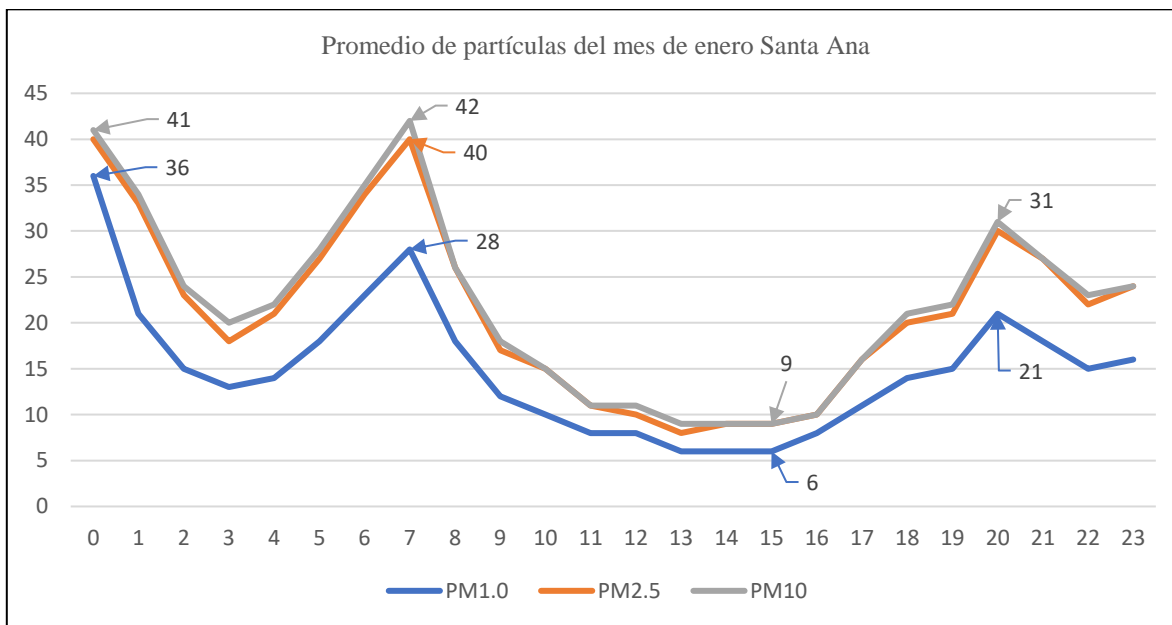


Ilustración 39. Promedio de PM enero Santa Ana.

Los comportamientos de las mediciones de PM de la estación de Santa Ana presentan una tendencia clara como se ve en la gráfica, siendo los puntos de mayor cantidad de PM a las 0, 7 y 20 horas y en el intervalo del día de 10 a las 16 horas los niveles con menor cantidad de PM.

Los niveles de Calidad del aire y el ICCA se resume en la tabla siguiente:

Resumen del mes de enero PM2.5 Santa Ana			
Hora Real	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Calidad del aire	ICCA
0	40	Moderada	100
1	33	Moderada	86
2	23	Moderada	66
3	18	Moderada	56
4	21	Moderada	62
5	27	Moderada	74
6	34	Moderada	88
7	40	Moderada	100

8	26	Moderada	72
9	17	Moderada	54
10	15	Buena	49
11	11	Buena	36
12	10	Buena	33
13	8	Buena	26
14	9	Buena	29
15	9	Buena	29
16	10	Buena	33
17	16	Moderada	52
18	20	Moderada	60
19	21	Moderada	62
20	30	Moderada	80
21	27	Moderada	74
22	22	Moderada	64
23	24	Moderada	68

Tabla 7. Resumen del índice de calidad del aire enero Santa Ana.

Con la gráfica y la tabla resumen, podemos ver más claro el panorama para la estación de Santa Ana, La tabla resumen se elaboró para PM2.5 ya que este tipo de partículas con diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetro es mayormente peligroso para las personas y puede causar efectos negativos en personas con enfermedades respiratorias.

Santa Ana no presenta un horario el cual sea alarmante ya que en promedio de todo el mes la mayor parte del día la calidad del aire permanece en Moderada y una tercera parte del día esta con Buena calidad del aire. Las cuales son aceptables y no hay peligro para personas sensibles.

4.1.6 San Salvador

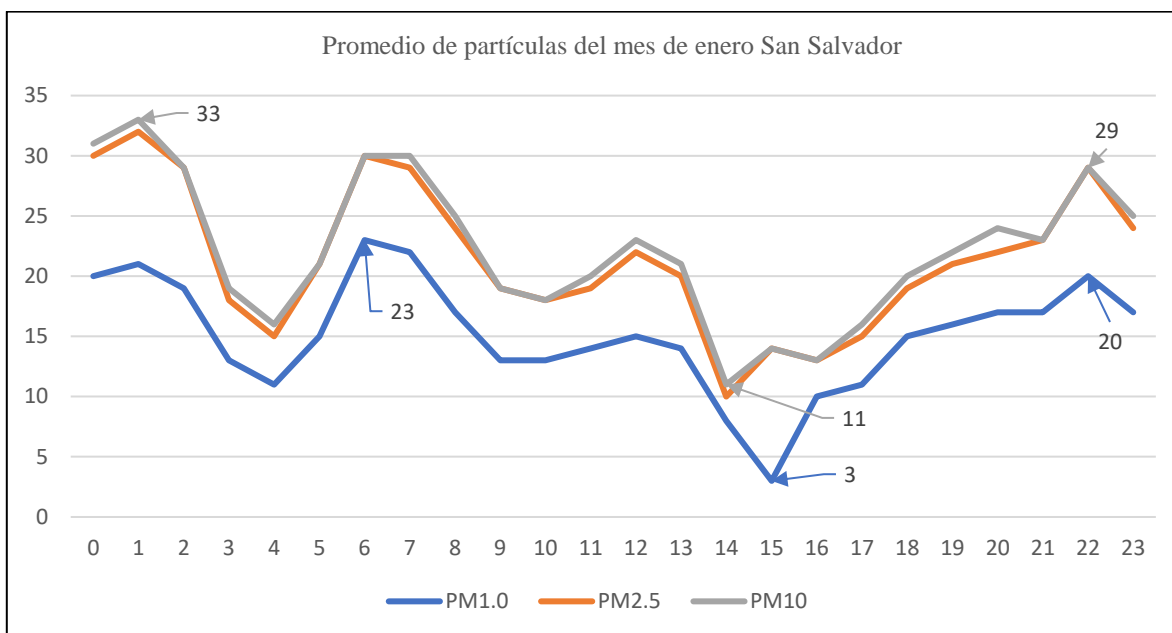


Ilustración 40. Promedio de PM enero San Salvador.

En la ilustración 40 las líneas tienen muchos quiebres, sin embargo, los niveles más altos corresponden a las primeras y últimas horas del día, teniendo picos a las 1:00 y 6:00 y 22:00 horas con 33 PM10 y 2.5 [µg/m³], 23 PM1.0 [µg/m³] y 29 PM10 y 2.5 [µg/m³]. Respectivamente. El punto más bajo ocurre a las 15:00 con 11 PM10 y 2.5 [µg/m³] y 3 PM1.0 [µg/m³].

Resumen del mes de enero PM2.5 San Salvador			
Hora Real	PM2.5 [µg/m³]	Calidad del aire	ICCA
0	30	Moderada	80
1	32	Moderada	84
2	29	Moderada	78
3	18	Moderada	56
4	15	Buena	49
5	21	Moderada	62
6	30	Moderada	80
7	29	Moderada	78
8	24	Moderada	68

9	19	Moderada	58
10	18	Moderada	56
11	19	Moderada	58
12	22	Moderada	64
13	20	Moderada	60
14	10	Buena	33
15	14	Buena	46
16	13	Buena	42
17	15	Buena	49
18	19	Moderada	58
19	21	Moderada	62
20	22	Moderada	64
21	23	Moderada	66
22	29	Moderada	78
23	24	Moderada	68

Tabla 8. Resumen del índice de calidad del aire enero San Salvador.

En San Salvador al igual que Santa Ana, presenta una calidad del aire de Moderada en la mayor parte del día teniendo horas con un ICA de Buena pertenecientes a las horas de la tarde. No hay riesgo en líneas generales para San Salvador.

4.1.7 Cojutepeque

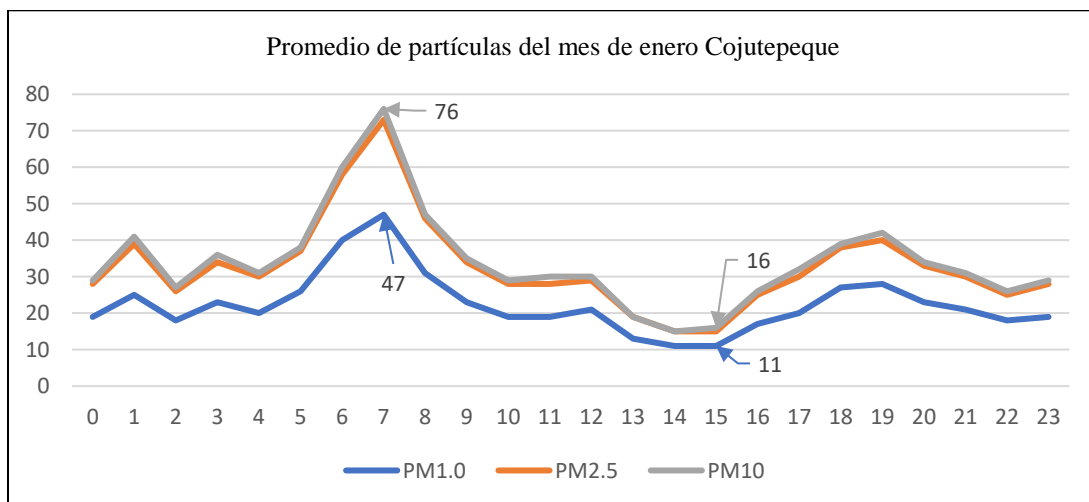


Ilustración 41. Promedio de PM enero Cojutepeque.

Resumen del mes de enero PM2.5 Cojutepeque			
Hora Real	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Calidad del aire	ICCA
0	28	Moderada	76
1	39	Moderada	98
2	26	Moderada	72
3	34	Moderada	88
4	30	Moderada	80
5	37	Moderada	94
6	58	Dañina a la salud de los grupos sensibles	135
7	73	Dañina a la salud	155
8	46	Dañina a la salud de los grupos sensibles	112
9	34	Moderada	88
10	28	Moderada	76
11	28	Moderada	76
12	29	Moderada	78
13	19	Moderada	58
14	15	Moderada	50
15	15	Moderada	50
16	25	Moderada	70
17	30	Moderada	80
18	38	Moderada	96
19	40	Moderada	100
20	33	Moderada	86
21	30	Moderada	80
22	25	Moderada	70
23	28	Moderada	76

Tabla 9. Resumen del índice de calidad del aire enero Cojutepeque.

Al analizar en conjunto la gráfica promedio de niveles de PM y la tabla resumen de Cojutepeque para el mes de enero. Se observa un evento peculiar, debido a que en la gráfica se muestra un pico de datos que ocurre a las 7 horas teniendo un valor de 73 PM_{2.5} y el resto del día una tendencia similar a las otras estaciones. Siguiendo la hora donde sucede el pico (7 am) en la tabla resumen podemos ver: de 6 a 8 am. El índice de calidad del aire es de Dañina a la salud de los grupos sensibles y Dañina, el resto del día la calidad del aire se mantiene en moderada.

4.1.8 Formaldehido, Del Mes De Enero De Las 3 Estaciones

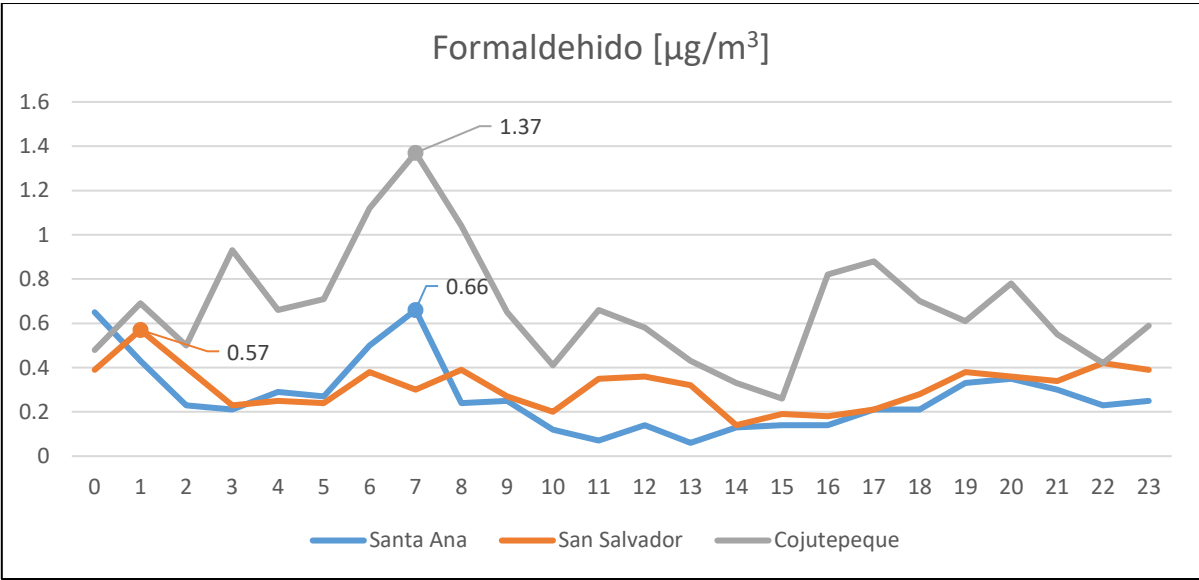


Ilustración 42. Formaldehido enero las 3 estaciones.

En la ilustración 42 se muestra la tendencia de cada una de las estaciones de la variable Formaldehido. Cada línea tiene una tendencia marcada con valores altos pero normales en las primeras horas del día. Y valores deseables en el resto de día. Recordemos que en nuestro entorno (lugar de medición de las estaciones) están al aire libre lejos de algún tipo de laboratorio o industria especializada en elaborar productos para limpieza o madera. Por ello los valores promedio de las 3 estaciones no representan un riesgo y queda registrado las mediciones promedio de este gas que en altas concentraciones y estar expuestos a ellas se puede desarrollar enfermedades crónicas. Al analizar los gráficos de las 3 estaciones, podemos determinar los tramos en los cuales los niveles de concentración de partículas son

más altos, estos tramos tienden a estar en las horas donde la temperatura baja y la humedad sube como podemos observar en el siguiente gráfico. De modo contrario, los horarios donde hay un nivel de contaminación bajo equivalen a las horas con temperaturas altas y humedad baja.

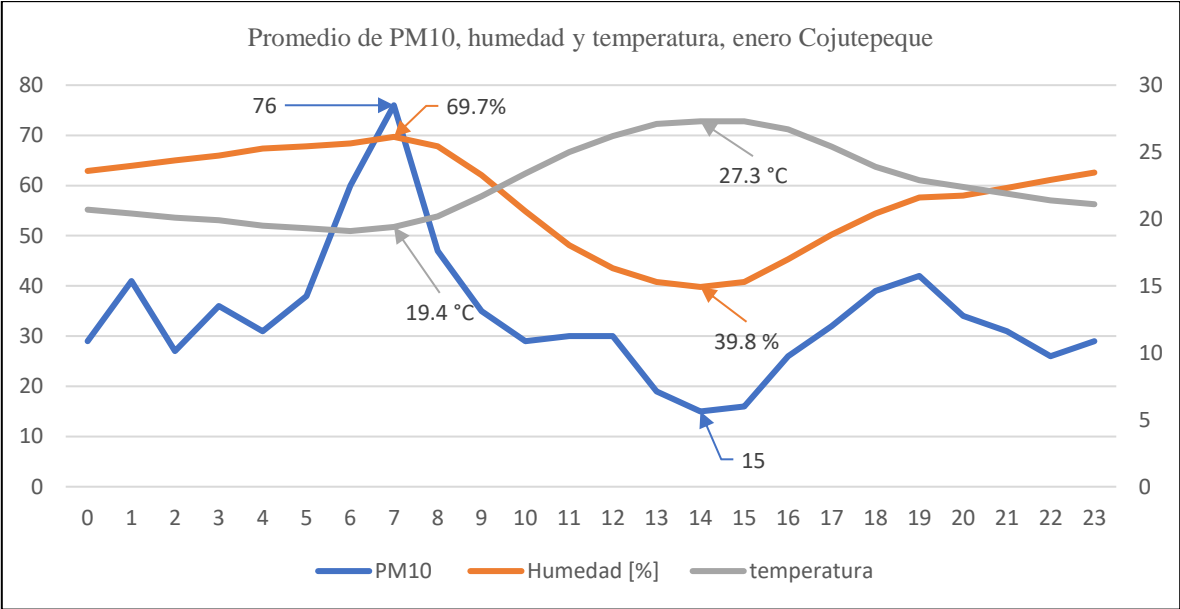


Ilustración 43. Promedio de PM10 vs temperatura vs humedad Cojutepeque.

En la ilustración 43 se muestra que el periodo donde ocurre los niveles más bajo de contaminación está relacionado con los periodos donde la temperatura del ambiente aumenta y en el mismo tiempo la humedad disminuye.

Es importante tener en mente que el lugar donde se hicieron todas las mediciones. Los lugares donde se instaló el dispositivo fueron en casas, ubicadas en colonias un poco retiradas de carreteras y de calles donde circula el transporte público pesado.

Al analizar la gráfica que compara PM10, temperatura y humedad. Se puede decir en pocas palabras que mientras la temperatura sea baja y la humedad alta, los niveles de PM serán altos y esto tiene una explicación. Ya que, la humedad contribuye en gran parte a crear un ambiente en donde las bacterias pueden desarrollarse y moverse en el ambiente que nos rodea.

4.2 RESUMEN DEL MES DE FEBRERO 2023 DE CADA ESTACIÓN

Luego de realizar mediciones y analizar los resultados del mes de enero 2023, se tomó la tarea de seguir recolectando datos en el mes de febrero, para hacer comparaciones en los niveles de concentración de PM, Temperatura, Humedad y Formaldehído. Con el fin de determinar si los datos recolectados en enero siguen una tendencia o si hay posibilidad de tener intervalos parecidos a lo largo de todos los días. De manera que, hacemos resumen del mes de febrero con los datos de las 3 estaciones y las compararemos con los datos del mes de enero.

4.2.1 Santa Ana

La estación santaneca registró un total de 1,521 mediciones de las 6 variables a lo largo del mes de febrero, teniendo un promedio diario de 54 tomas de lecturas, para resumir y observar el comportamiento tenemos las siguientes gráficas.

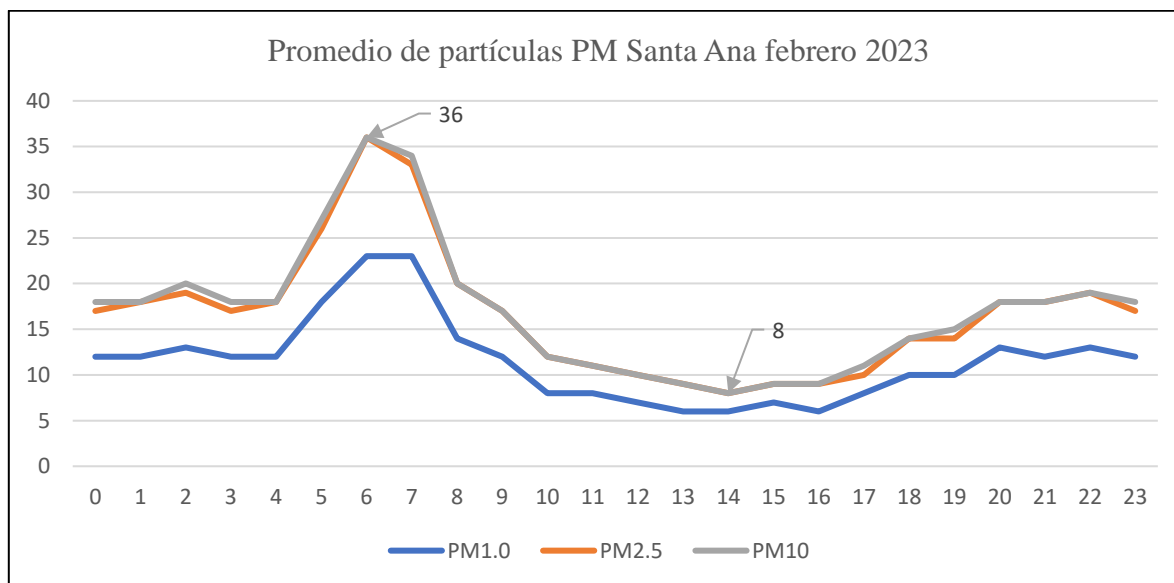


Ilustración 44. Promedio de PM febrero Santa Ana.

Se muestra el comportamiento de las partículas PM1.0, PM2.5 y PM10 de color azul, naranja y gris, respectivamente. Como se esperaba, hay un pico de valores que se mantiene por una hora que equivalen a las horas con temperatura más bajas y humedad alta de 6:00 a 7:00 horas. Se observa que desde el mediodía hasta las 16:00 horas los niveles de PM son bajos teniendo relación con las temperaturas altas y una humedad baja.

Resumen del mes de enero PM2.5 Santa Ana			
Hora Real	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Calidad del aire	ICCA
0	17	Moderada	54
1	18	Moderada	56
2	19	Moderada	58
3	17	Moderada	54
4	18	Moderada	56
5	26	Moderada	72
6	36	Moderada	92
7	33	Moderada	86
8	20	Moderada	60
9	17	Moderada	54
10	12	Buena	43
11	11	Buena	41
12	10	Buena	39
13	9	Buena	37
14	8	Buena	35
15	9	Buena	37
16	9	Buena	37
17	10	Buena	39
18	14	Buena	47
19	14	Buena	47
20	18	Moderada	56
21	18	Moderada	56
22	19	Moderada	58
23	17	Moderada	54

Tabla 10. Resumen del índice de calidad del aire febrero Santa Ana.

Al igual que el mes de enero Santa Ana presenta un pico a las 6 horas, sin embargo, este pico no es tan relevante debido a que su valor de PM2.5 es de 36 con un índice de calidad del aire de Moderada, En resumen, Santa Ana tiene una calidad del aire Moderada en dos tercios del día y una tercera parte presenta una calidad del aire Buena.

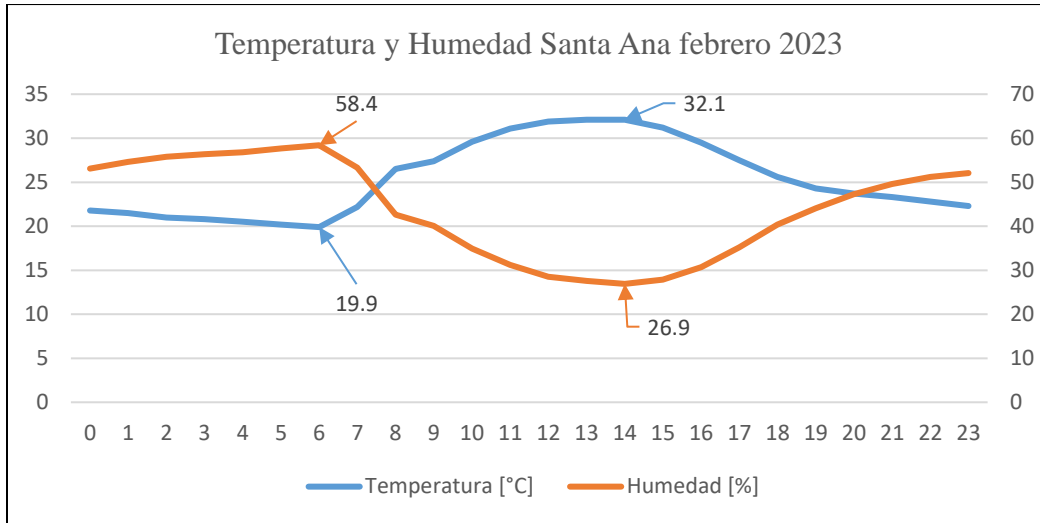


Ilustración 45. Promedio de Temperatura y Humedad febrero Santa Ana.

Santa Ana registró la temperatura más baja de 19.9 °C y la humedad más alta con 58.4 % a las 6 de la mañana. La temperatura más alta 32.1 °C y la humedad más baja 26.9% corresponden a las 14:00 horas.

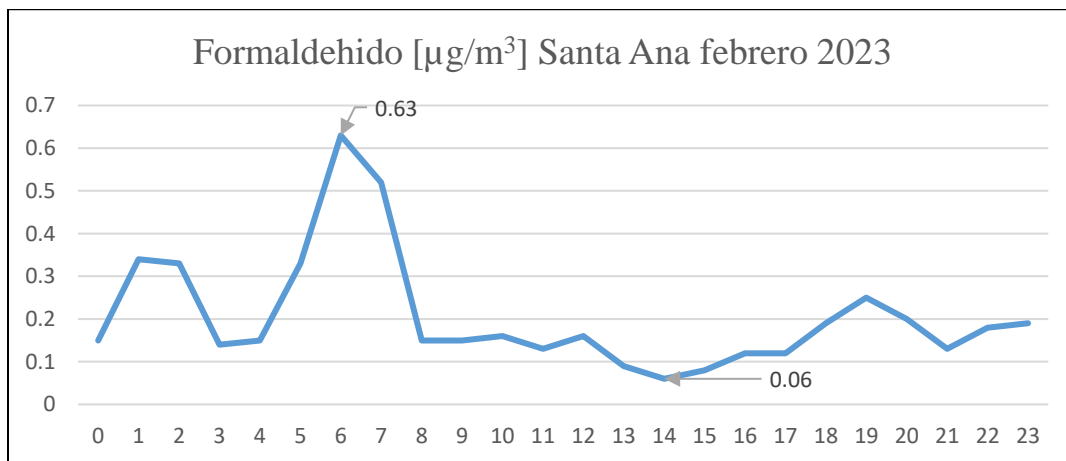


Ilustración 46. Promedio de formaldehido febrero Santa Ana.

El promedio de formaldehido en Santa Ana tiene una tendencia parecida a la de las PM, pero sin ningún valor para alarmarse.

4.2.2 San Salvador

La estación de San salvador tomó 2,533 muestras de las 6 Variables de interés, teniendo un promedio de 90 tomas de muestras diarias.

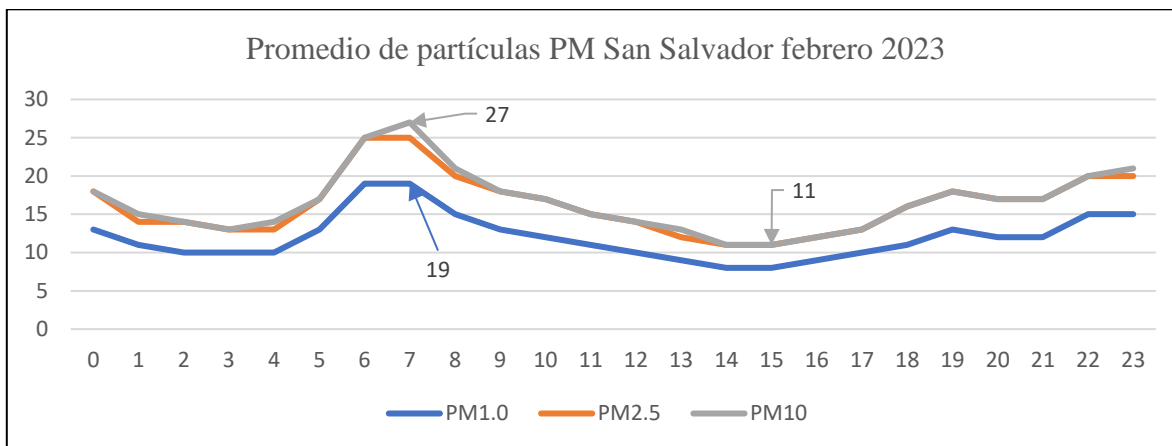


Ilustración 47. Promedio de PM febrero San Salvador.

La estación ubicada en San Salvador a lo largo del mes de febrero nos muestra un promedio diario, arrojando valores altos en PM a las 7 horas (19 PM1.0 y 27 PM10) y valores bajos a las 15 horas (11 PM10). Estos valores altos tienen relación cuando la temperatura es baja y valores bajos cuando la temperatura es alta.

Resumen del mes de enero PM2.5 San Salvador			
Hora Real	PM2.5 [µg/m³]	Calidad del aire	ICCA
0	18	Moderada	56
1	14	Buena	46
2	14	Buena	46
3	13	Buena	42
4	13	Buena	42
5	17	Moderada	54
6	25	Moderada	70
7	25	Moderada	70
8	20	Moderada	60
9	18	Moderada	56

10	17	Moderada	54
11	15	Moderada	50
12	14	Buena	46
13	12	Buena	39
14	11	Buena	36
15	11	Buena	36
16	12	Buena	39
17	13	Buena	42
18	16	Moderada	52
19	18	Moderada	56
20	17	Moderada	54
21	17	Moderada	54
22	20	Moderada	60
23	20	Moderada	60

Tabla 11. Resumen del índice de calidad del aire febrero San Salvador.

En la tabla 11 resumen podemos ver que en Febrero San Salvador tiene una Buena y Moderada calidad del aire sin ningún pico por el cual tengamos que prestar atención. En líneas generales la estación de San Salvador goza de buena calidad del aire sin riesgo para los grupos sensibles para la salud.

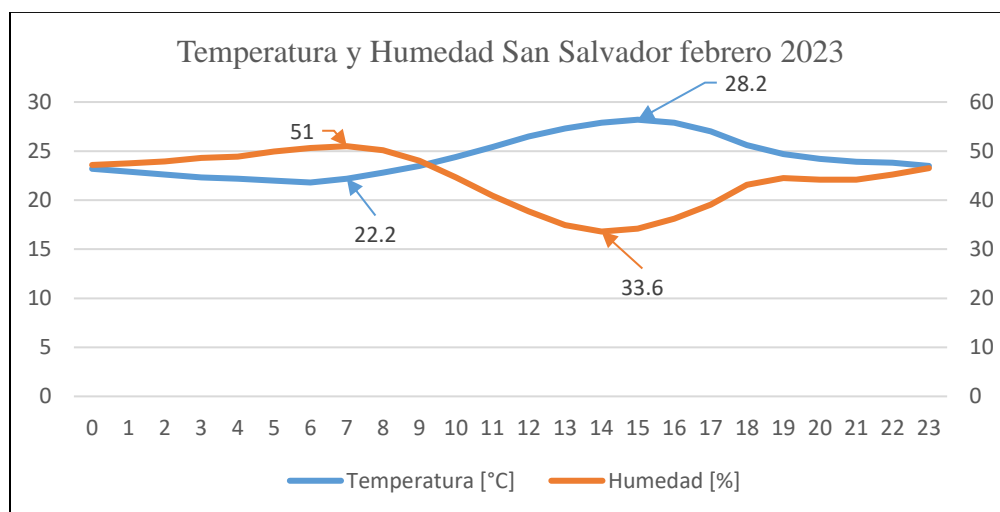


Ilustración 48. Promedio de temperatura y humedad febrero San Salvador.

En San Salvador, en promedio la temperatura más baja (22.2 °C) ocurre a las 7 horas con una humedad pico de 51% y una temperatura más alta en el horario de las 15 horas con una humedad del 33.6%. En comparación con las otras 2 estaciones San Salvador presenta en el horario de temperatura baja una humedad baja con respecto a Santa Ana y Cojutepeque.

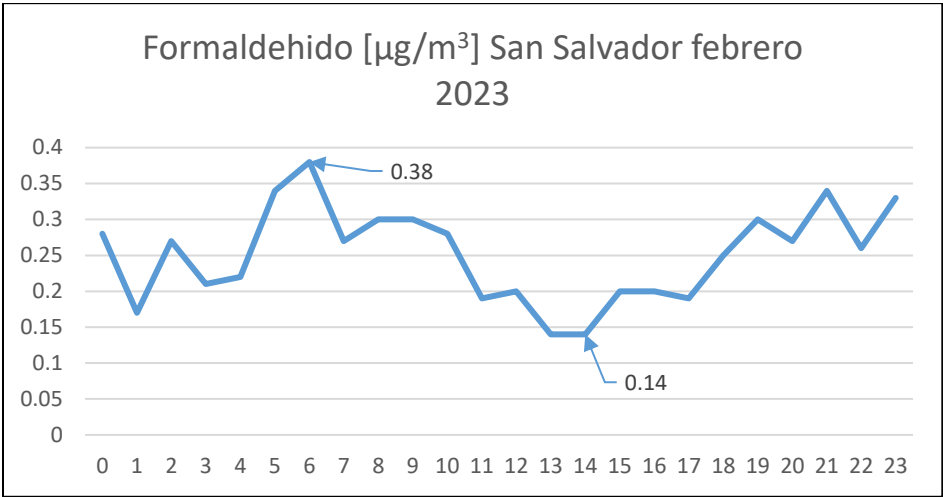


Ilustración 49. Promedio de Formaldehido febrero San Salvador.

4.2.3 Cojutepeque

Cojutepeque totalizó 1531 lecturas de cada una de las 6 variables, teniendo un promedio diario de 55 lecturas en el transcurso del día. Se muestra los resultados en las siguientes gráficas.

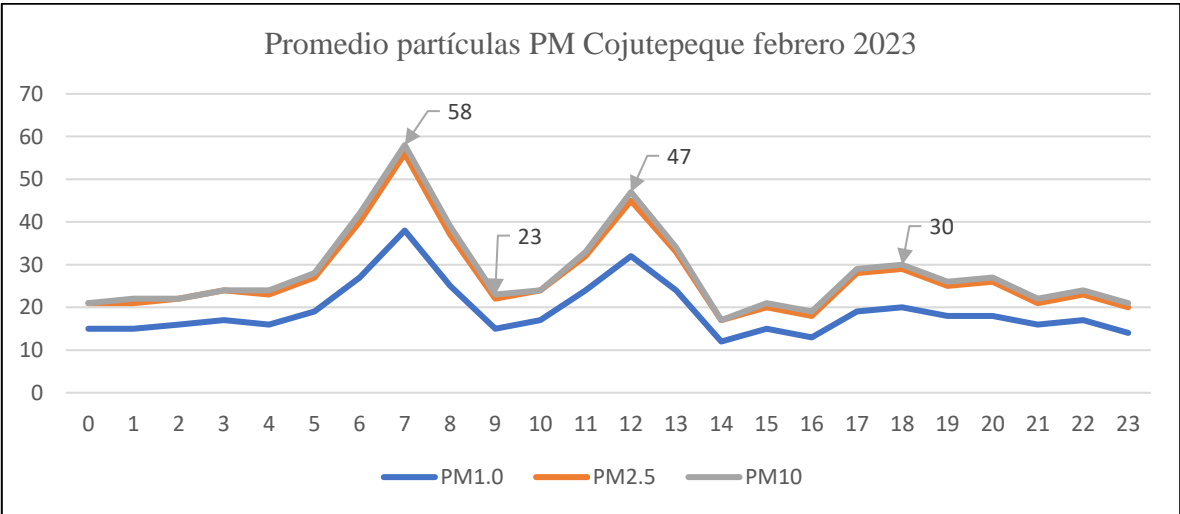


Ilustración 50. Promedio de PM febrero Cojutepeque.

Cojutepeque arroja una tendencia un tanto peculiar, ya que se esperaba que tuviera un pico de valores PM elevado por la mañana, el cual lo cumple como se puede ver en la gráfica anterior. Se presenta otro pico de datos relevante ya que este ocurre a las 12 horas saliendo un poco de lo esperado, en este horario normalmente se observa bajos niveles de PM.

RESUMEN DEL MES DE FEBRERO PM2.5 COJUTEPEQUE			
Hora Real	PM2.5 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Calidad del aire	ICCA
0	21	Moderada	62
1	21	Moderada	62
2	22	Moderada	64
3	24	Moderada	68
4	23	Moderada	66
5	27	Moderada	74
6	40	Moderada	100
7	56	Dañina a la salud de los grupos sensibles	146
8	37	Moderada	94
9	22	Moderada	64
10	24	Moderada	68
11	32	Moderada	84
12	45	Dañina a la salud de los grupos sensibles	110
13	33	Moderada	86
14	17	Moderada	54
15	20	Moderada	60
16	18	Moderada	56
17	28	Moderada	76
18	29	Moderada	78
19	25	Moderada	70
20	26	Moderada	72
21	21	Moderada	62
22	23	Moderada	66
23	20	Moderada	60

Tabla 12. Resumen del índice de calidad del aire febrero Cojutepeque.

La estación de Cojutepeque dos picos que requieren atención, uno que ocurre en el horario de las 7 horas con un índice de calidad del aire de Dañina a la salud de los grupos sensibles, este primer pico y más alto de valores PM, es aislado y ocurre cuando la temperatura es más baja y la humedad es alta. El segundo pico ocurre en punto de las 12 horas, este pico se le puede atribuir a las actividades de las personas alrededor del área donde está ubicada la estación, actividades como quema de basura, cocinar con leña, etc. De igual manera la calidad del aire en este horario es de Dañina a la salud de los grupos sensibles.

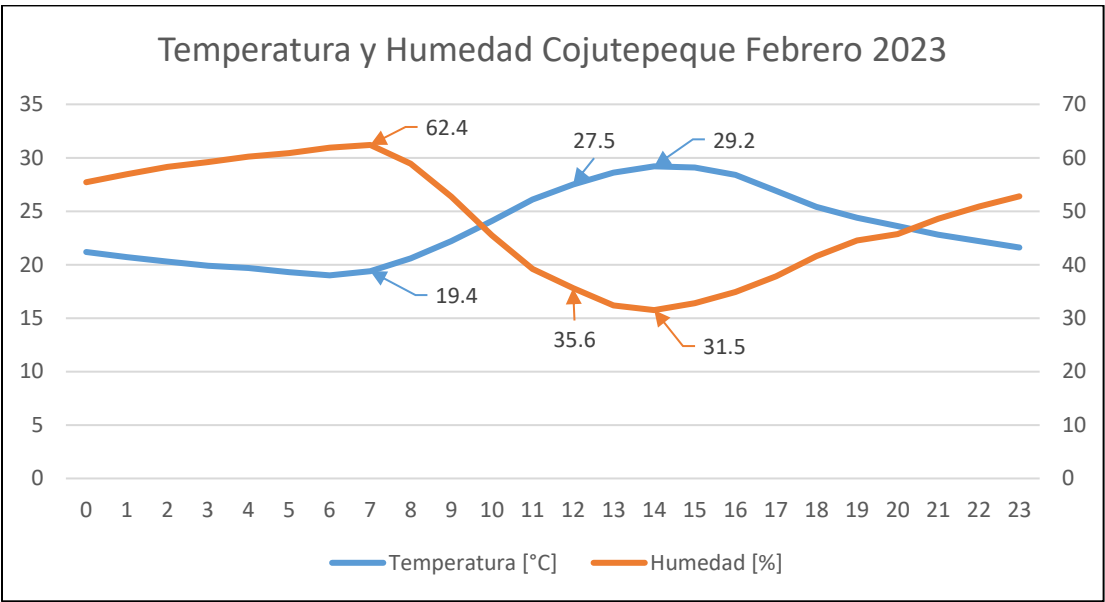


Ilustración 51. Promedio de Temperatura y Humedad febrero Cojutepeque.

Al graficar la temperatura y Humedad se sigue cumpliendo que al momento que la temperatura es más baja la humedad tiene su pico y esto ocurre por la mañana en el horario de las 7 horas luego en el transcurso del día mientras la temperatura sube la humedad llega a su punto más bajo para luego ir creciendo mediante entra la noche y la temperatura descende.

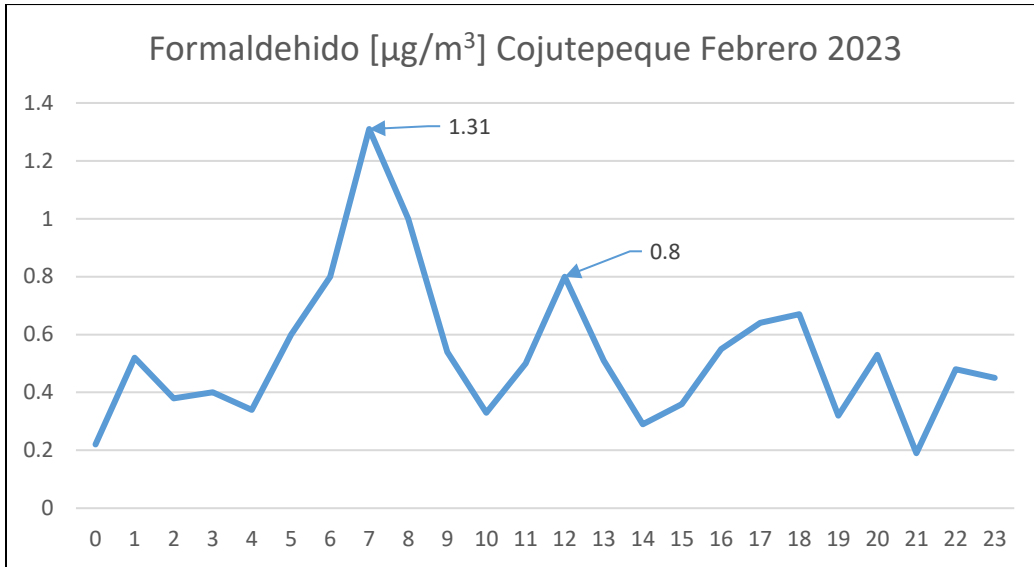


Ilustración 52. Promedio de formaldehido febrero Cojutepeque.

El promedio de formaldehido en el mes de febrero de Cojutepeque no representa ningún peligro para las personas.

4.3 COMPARACIÓN ENERO Y FEBRERO 2023

4.3.1 Santa Ana

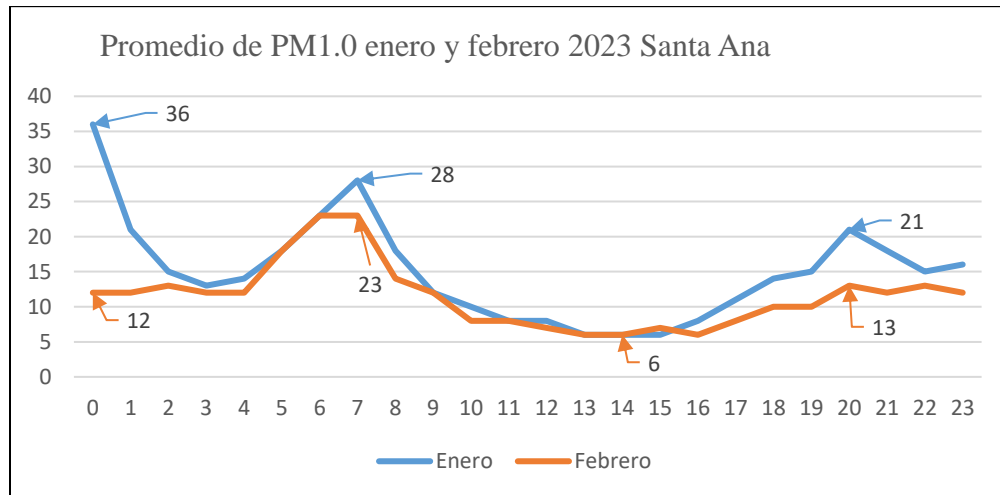


Ilustración 53. Promedio de PM1.0 enero y febrero Santa Ana.

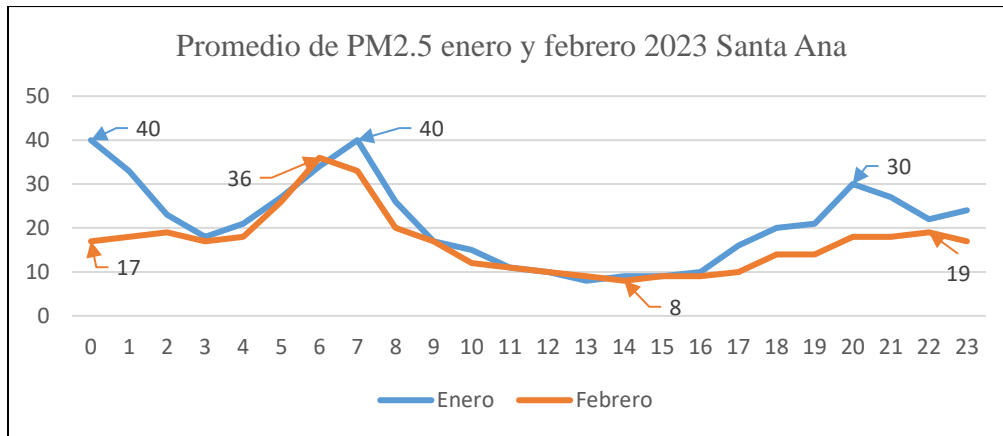


Ilustración 54. Promedio de PM2.5 enero y febrero Santa Ana.

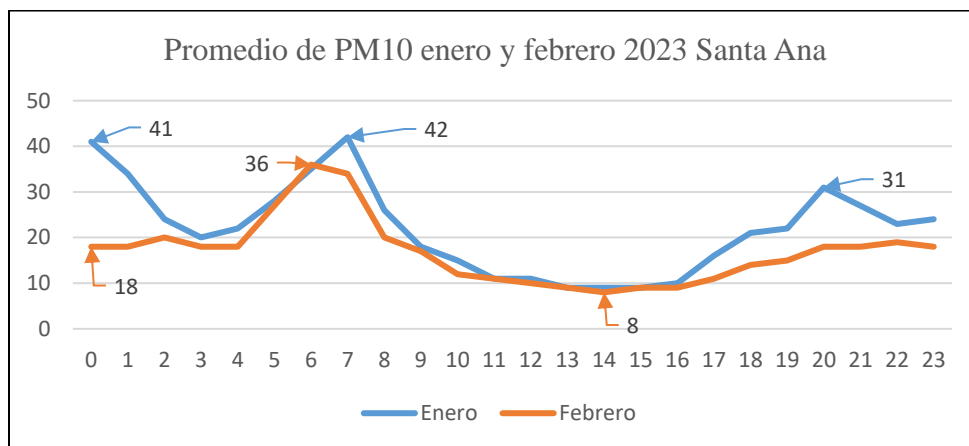


Ilustración 55. Promedio de PM10 enero y febrero Santa Ana.

Al comparar las 3 variables de PM en los meses de enero y febrero se evidencia que, en las primeras horas del día, enero presenta un alto valor en contaminación. Esto se debe a que empezando el año algunos grupos de personas lo celebran con quema de pólvora, aunque esto solo ocurre en 1 día del mes, los valores tan elevados de contaminación por la queme de pólvora influyen en el promedio mensual.

En líneas generales, los dos meses arrojan una tendencia parecida, teniendo el pico alto entre las 6 y 7 horas y por la tarde tenemos valores bajos.

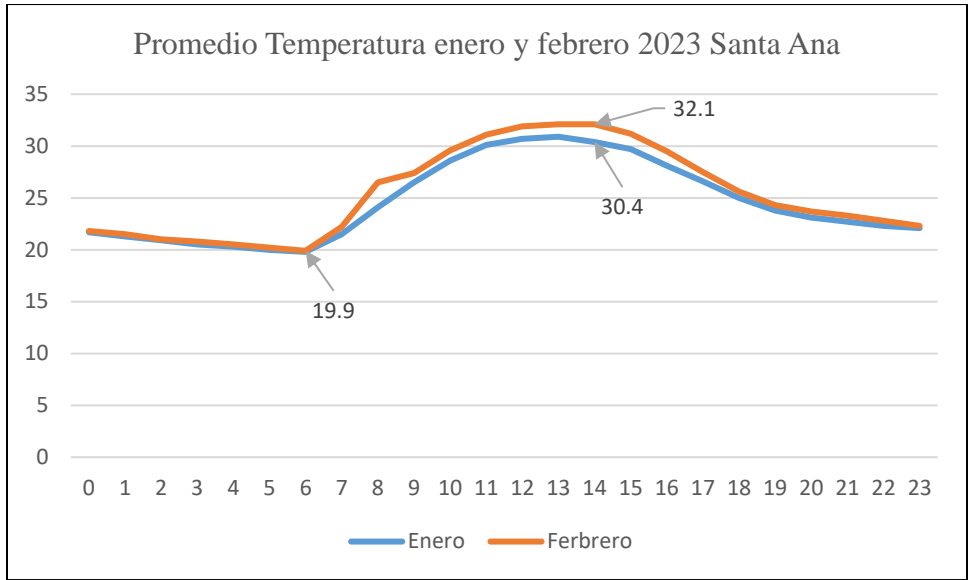


Ilustración 56. Promedio de Temperatura enero y febrero Santa Ana.

Al comprar la temperatura, se puede ver que el mes de febrero fue un poco más caliente especialmente entre las 7 y las 17 horas

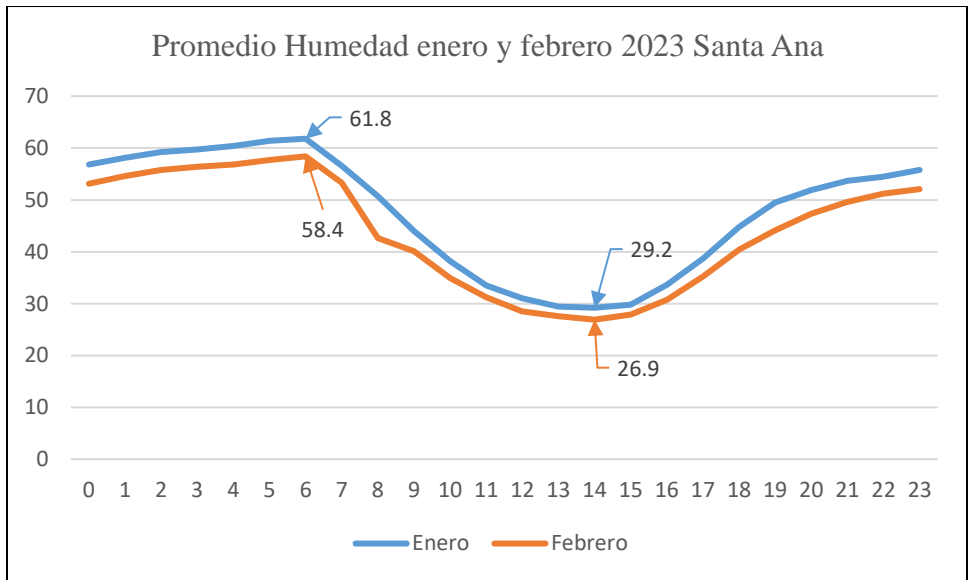


Ilustración 57. Promedio de Humedad enero y febrero Santa Ana.

Al tener temperaturas un poco más elevadas, la humedad disminuye y la comparación entre las tendencias de los dos meses es evidente que en febrero la humedad es más baja.

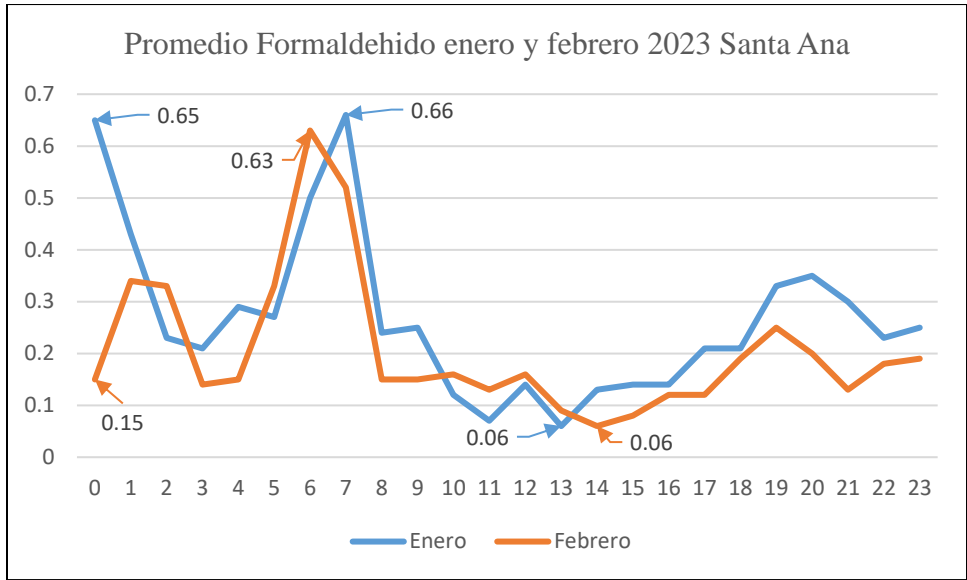


Ilustración 58. Promedio de formaldehido enero y febrero Santa Ana.

El comportamiento de formaldehido de ambos meses es muy parecido, siguiendo un comportamiento muy marcado a lo largo del día (promedio de los meses). En el mes de enero hay un valor elevado a las 0 horas y esto se debe a que el 1 de enero por la madrugada se experimenta un alto nivel de contaminación debido a la quema de pólvora.

4.3.2 San Salvador

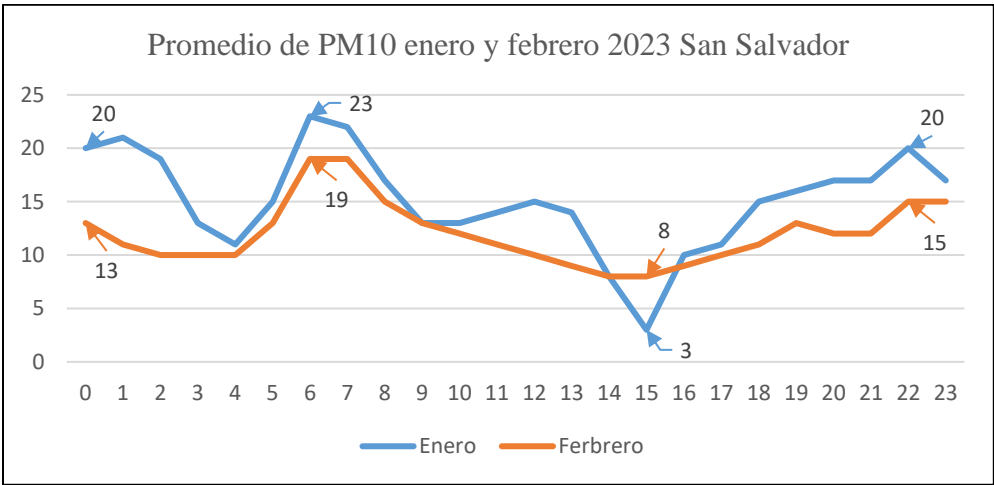


Ilustración 59. Promedio de PM1.0 enero y febrero San Salvador.

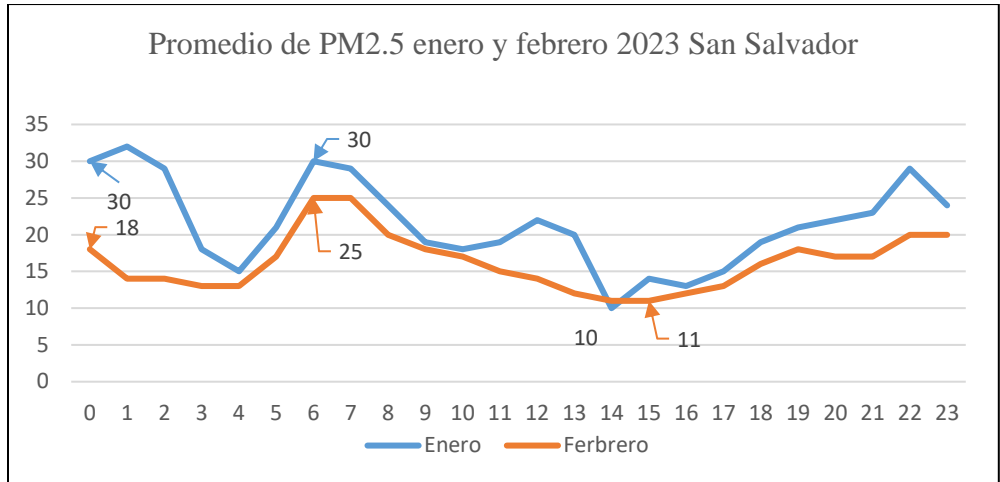


Ilustración 60. Promedio de PM2.5 enero y febrero San Salvador.

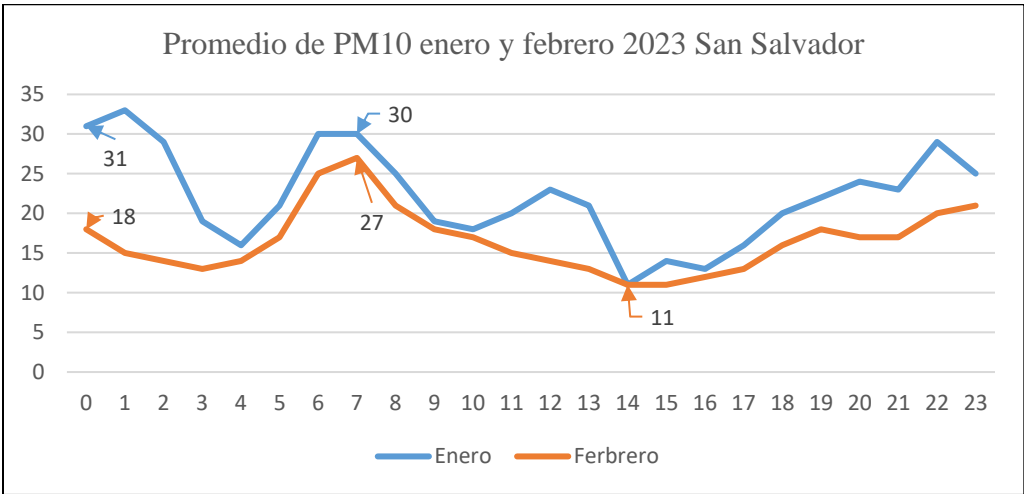


Ilustración 61. Promedio de PM10 enero y febrero San Salvador.

En San Salvador, febrero presenta una gráfica más suave y levemente por debajo de los valores promedio del mes de enero. Nótese que al igual que Santa Ana a primeras horas, existe un alto nivel de contaminación debido a la quema de pólvora en año nuevo.

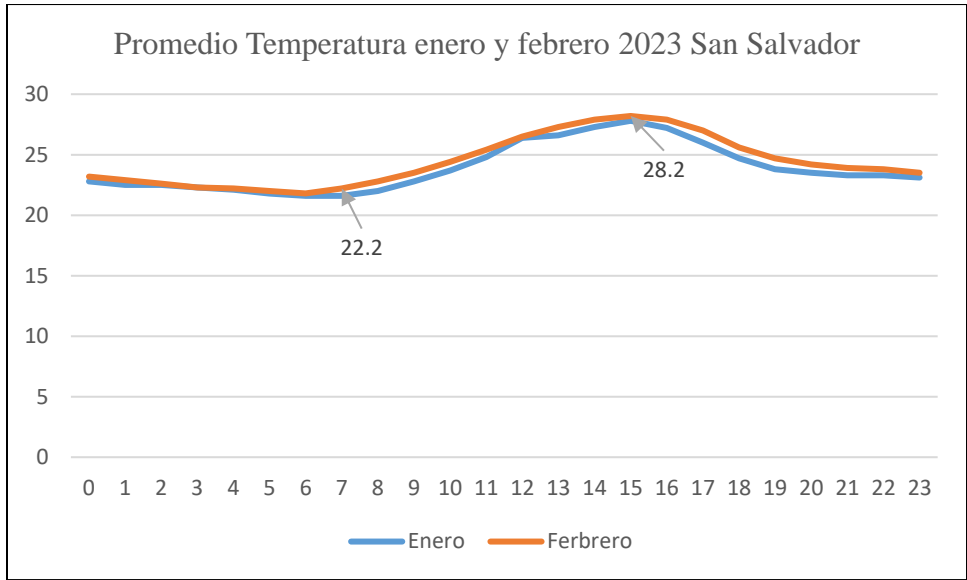


Ilustración 62. Promedio de Temperatura enero y febrero San Salvador.

En la comparación de la temperatura, San Salvador muestra 2 gráficas idénticas de los promedios de los 2 meses.

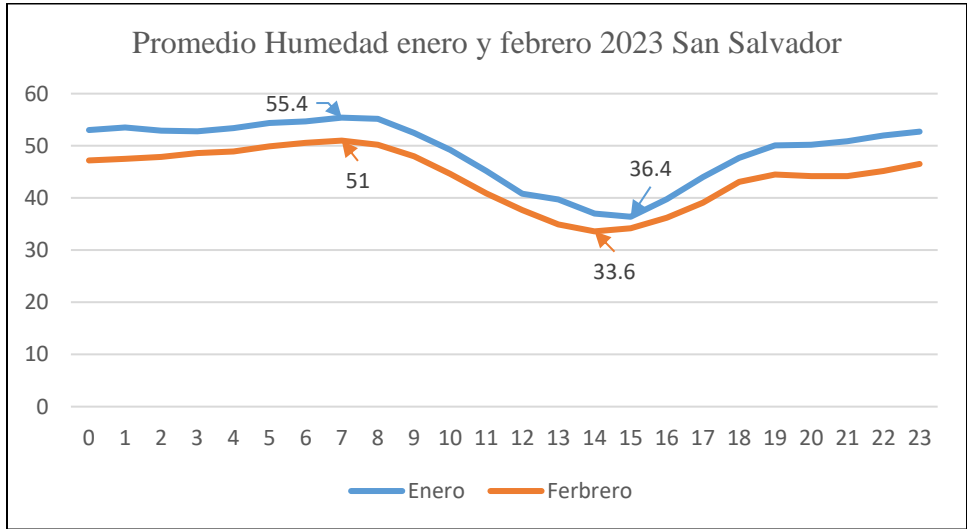


Ilustración 63. Promedio de Humedad enero y febrero San Salvador.

A diferencia de la comparación de temperatura en San Salvador, la humedad presenta cambios entre los meses, y es que, en el mes de febrero la humedad baja su línea promedio de mes con respecto a enero.

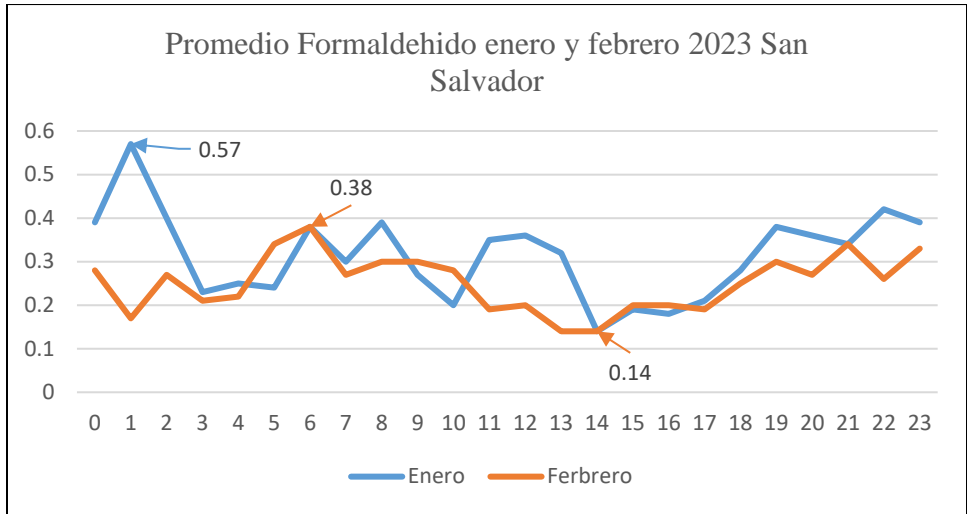


Ilustración 64. Promedio de Formaldehido enero y febrero San Salvador.

Al igual que la estación de Santa Ana. Al comparar el comportamiento del formaldehido de ambos meses, las líneas de las gráficas son muy parecidas excepto por las primeras horas del mes de enero, debido a la quema de pólvora, recordemos que estos niveles de concentración de formaldehido no son amenaza para la población.

4.3.3 Cojutepeque

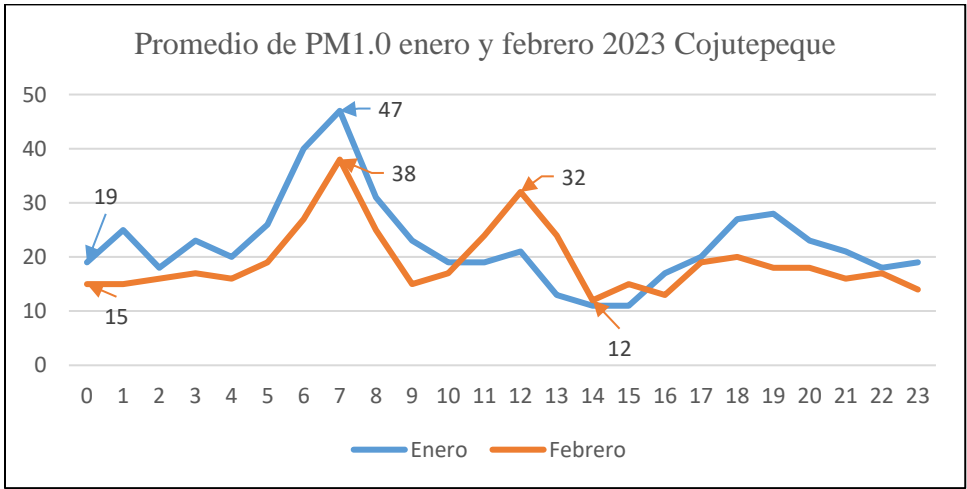


Ilustración 65. Promedio de PM1.0 enero y febrero Cojutepeque.

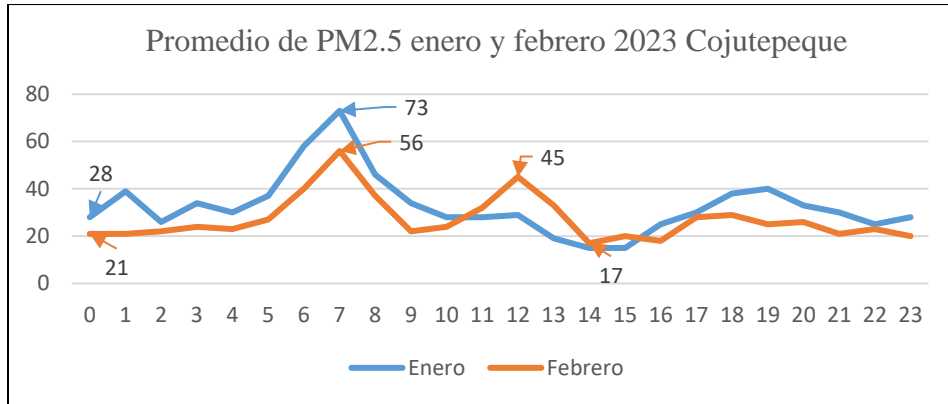


Ilustración 66. Promedio de PM2.5 enero y febrero Cojutepeque.

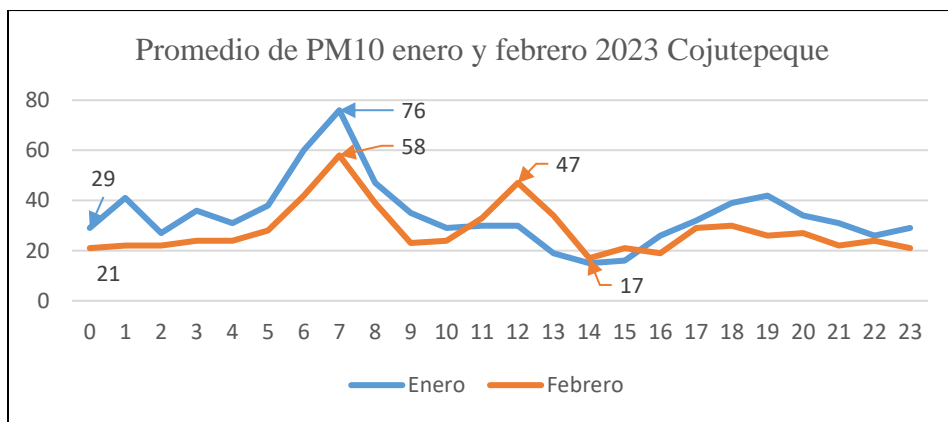


Ilustración 67. Promedio de PM10 enero y febrero Cojutepeque.

En la estación de Cojutepeque, en ambos meses se cumple el pico máximo ocurre a las 7 horas y su valor más bajo tiene lugar a las 14 horas en los promedios, ambas gráficas siguen una tendencia, con excepción que en febrero ocurre un segundo pico a las 12 horas para luego descender y mantener un bajo nivel de concentración de PM.

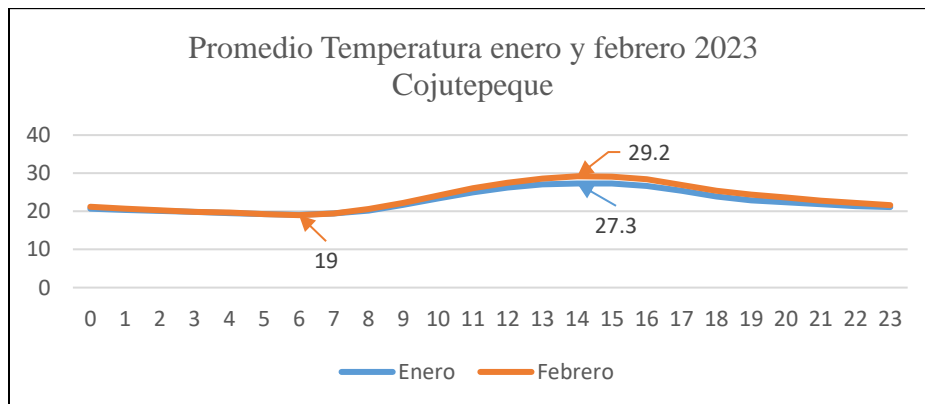


Ilustración 68. Promedio de Temperatura enero y febrero Cojutepeque.

Al comprar el promedio de temperatura de ambos meses notamos que desde las 0 a las 7 horas las curvas están una sobre la otra, pero al pasar las horas la temperatura promedio de febrero tiende a ser unos pocos grados por arriba que la de enero.

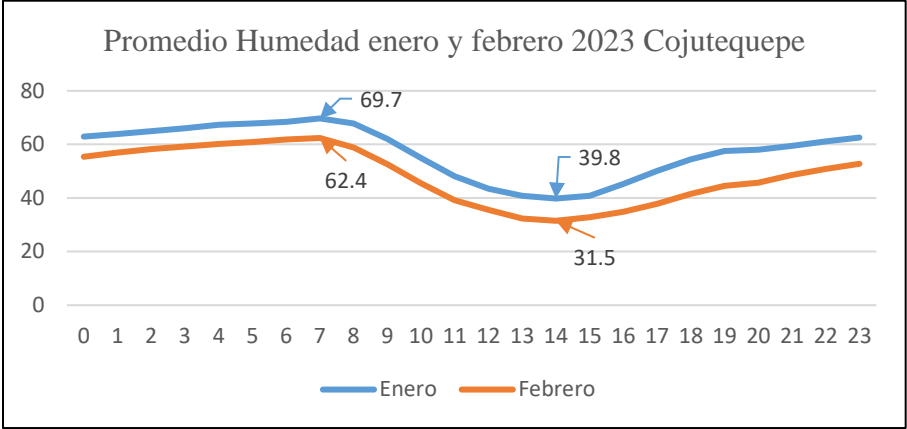


Ilustración 69. Promedio de Humedad enero y febrero Cojutepeque.

Como se ve, la humedad del mes de enero y febrero. La humedad de febrero es más baja por 7 puntos con respecto a la de enero, cabe destacar que ambas tienen la misma tendencia.

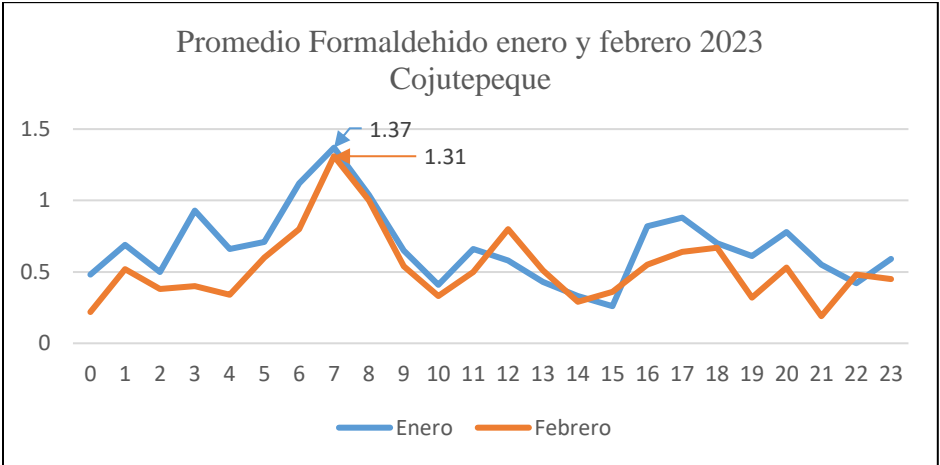


Ilustración 70. Promedio de Formaldehido enero y febrero Cojutepeque.

En Cojutepeque encontramos algo similar a las 2 estaciones anteriores, ambos meses tiene una tendencia similar ocurriendo los picos a las 7 horas en los dos meses y una tendencia marcada y consistente a lo largo de las horas (promedio del mes). Estos niveles de formaldehido no son peligrosos para la salud de la población.

CAPITULO V: RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

5.1 RECOMENDACIONES

- Adaptar una pantalla en el dispositivo que permita realizar programación en el sitio para modificar ciertos parámetros de medición, sin la necesidad de tener que conectarse a una PC.
- Que el dispositivo realice cambios automáticamente de forma adaptativa en los parámetros, es decir, que depende de las condiciones del entorno este sea capaz de realizar mediciones ya sea en periodos de tiempo más largos o más cortos.
- Realizar una adaptación de un dispositivo GPS, para que de manera automática los datos capturados realicen una geo sincronización automáticamente, y de esta forma obtener una mejor referencia de los datos.
- Optimizar el rendimiento de la batería en el dispositivo. Se recomienda utilizar un sistema de transferencia de carga con una batería de emergencia.
- Realizar mejoras en el sitio web, con un mejor procesado y presentación de los datos de forma geo referencial simulando un sistema GIS.
- Crear una memoria cache dentro del código para el almacenamiento de los datos perdidos ya sea por fallas en la conexión o caídas en la red y de esta manera ser enviadas una a una cuando se recupere la conexión sin perder un solo dato.

5.2 CONCLUSIONES

- Este prototipo tiene la capacidad para ofrecer una solución viable y confiable para realizar mediciones en tiempo real de la monitorización medioambiental. Luego de capturar mediciones por un período de más de 2 meses, se pudo verificar la buena

precisión del sensor comparándolo con los datos de las estaciones de medición cercanas del MARN, las cuales los resultados son mostrados en su sitio web.

- Con el nuevo conocimiento científico aportado, al utilizar técnicas de uso de los componentes de hardware y software para la creación de prototipos de forma rápida y eficiente, se deja una base para que puedan realizarse futuras mejoras tanto en el diseño como el software y de esta forma obtener una mayor precisión en los resultados y un mejor manejo o procesado de la información.
- Se cumplieron los objetivos principales, tener un medidor portátil, confiable y de bajo costo. La portabilidad se logró al utilizar como medio de enlace un módulo GSM. La confiabilidad al elegir un buen sensor y realizar una correcta programación para el buen funcionamiento de los componentes electrónicos. El bajo costo al buscar componentes de buena calidad y precio. El costo por medidor fue de aproximadamente US\$125. Comparando con los miles de dólares que puede costar una estación de medición, hace que tome más valor a nuestro trabajo realizado (Flores, 2019).
- Al analizar los resultados obtenidos, se puede ver primeramente como afecta la quema de pólvora al medio ambiente y a nuestra salud, el lapso de tiempo desde la noche del 31 de diciembre hasta la madrugada del año nuevo específicamente, alcanzando valores que son dañinos para la salud, incluso dañinos para grupos sensibles, por lo cual se recomienda evitar exponerse y salir a esas horas, en esa época del año.
- Los niveles más bajo de contaminación está relacionado con los periodos donde la temperatura del ambiente aumenta y al mismo tiempo la humedad disminuye. En otras palabras, mientras la temperatura sea baja y la humedad alta, los niveles de PM son altos, según el resultado de las gráficas analizadas.

REFERENCIAS

- Algoritmos . (2015). *Monitoreo de la calidad del aire* . Algoritmos y Mediciones Ambientales SpA: <https://www.algoritmospa.com/monitoreo-de-calidad-del-aire/>
- ALIEXPRESS. (2022). *Sensor láser PMS5003ST G5ST PM2.5, sensor de temperatura y humedad, formaldehído*. Recuperado el 24 de Abril de 2023, de AliExpress: <https://es.aliexpress.com/item/1005002829709161.html>
- Amazon. (2023). *Mi Ultra Compact - Batería externa de 10000 mAh*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de Amazon: <https://www.amazon.com/-/es/Mi-Ultra-Compact-dispositivos-cargador/dp/B093TYQ65Z?th=1>
- ATSDR. (Julio de 1999). *Resumen de Salud Pública: Formaldehído*. Departamento de Salud y Servicios Humanos de los EE.UU.: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs111.pdf
- Berenguer, J. (2019). Síndrome del Edificio Enfermo: factores de riesgo. *NTP 289*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, España.
- Carmenate, J. G. (2023). *ESP32 Wifi y Bluetooth en un solo chip*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de Programarfacil: <https://programarfacil.com/esp8266/esp32/>
- Carranza, R. (2004). Gestión de la calidad del aire: Causas, efectos y soluciones. *Artículo de investigación*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Castillo, E. (2015). La contaminación del aire ocasionada por el transporte público en la ciudad de San Salvador. *Trabajo de grado: Licenciado Ciencias Jurídicas* . Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador .
- DKV. (2010). Contaminación atmosférica y salud. *Artículo Médico*. Observatorio DKV de salud y medio ambiente en España, España.
- El Diario de Hoy EDH. (Agosto de 2022). *Buses y microbuses contaminan el Centro Histórico de San Salvador*. <https://www.elsalvador.com/fotogalerias/noticias-fotogalerias/buses-contaminan-el-centro-de-san-salvador/989485/2022/>
- Eneka. (2014). *Módulos Comunicación*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de Eneka: <https://www.eneka.com.uy/robotica/modulos-comunicacion/m%C3%B3dulo-gsm-gprs-sim900-7477-detail.html>
- Flores, O. (2019). Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remotas, utilizando técnicas IoT y big data. Fase I. *Colección Investigaciones 91*. Universidad Tecnológica de El Salvador, San Salvador, El Salvador.
- FlyRobo. (2019). *DS3231 RTC Precise Real Time Clock Module*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de FLYROBO: <https://www.flyrobo.in/ds3231-rtc-precise-real-time-clock-module-1>
- Hi-Fi Electronica. (2023). *[SIM800L-EVB] SIM800L 5V Wireless GSM GPRS Module Quad-Band*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de HI-FI ELECTRONICA: <https://hifisac.com/en/shop/sim800l-evb-sim800l-5v-wireless-gsm-gprs-module->

- quad-band-3173?product=product.template%283173%2C%29#attr=
- IQAir . (2023). *Calidad del aire en El Salvador*. Índice de calidad del aire (ICA) y contaminación del aire PM2.5 en El Salvador: <https://www.iqair.com/es/el-salvador>
- KUNAK SENSING ANYWHERE. (Junio de 2022). *Kunak AIR Lite* . Artículos : <https://www.kunak.es/blog/calidad-aire-tiempo-real-kunak-air-lite/>
- MARN. (2003). Calidad del aire ambiental: inmisiones atmosféricas. *Guia de inmisiones CCAD*. MINISTERIO DE MEDIOAMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, San Salvador, El Salvador. Guia de inmisiones .
- MARN. (2023). *Dirección General de Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales*. Obtenido de Informe Semanal de Calidad del Aire : <https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/monitoreo/calidad+del+aire/>
- Mi. (2023). *10000mAh Mi Power Bank 3 Ultra Compact*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de MI: <https://www.mi.com/es/product/10000mah-mi-power-bank-3-ultra-compact/>
- MINTIC. (2019). *Principales contaminantes del aire*. Obtenido de MINTIC (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones): <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/paginas/generalidades/principales-contaminantes.aspx>
- NIH. (2011). *Formaldehído y el riesgo del cancer*. Consultado el 10 de febrero de 2023, de instituto nacional del cáncer: <https://www.cancer.gov/espanol/cancer/causas-prevencion/riesgo/sustancias/formaldehido/hoja-informativa-formaldehido>
- OMS. (2021). *Dictrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire. Resumen ejecutivo*. Organización Mundial de la Salud.
- OPS. (2016). *Impactos de contaminación del aire en la salud* . Obtenido de Organización Panamericana de la Salud : <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Quintero, S. D. (2023). *Thonny*. Consultado el 24 de Abril de 2023, de aprende python_: <https://aprendepython.es/core/devenv/thonny/>
- S&P . (Junio de 2020). *Como afecta la calidad del aire interior a la salud* . Obtenido de S&P Sistemas de Ventilacion: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/calidad-aire-interior-salud/>
- Zambrano, O. (2016). Caracterización de material particulado, plomo y arsenico para la evaluación de la calidad del aire en el distrito de Islay-Matarani. *Ingeniero Ambiental*. Universidad Nacional De San Agustín, Arequipa, Perú.

ANEXOS

A. CÓDIGOS UTILIZADOS

Python

```
import time
import struct
from machine import UART
import ds1307
from machine import SoftI2C, Pin

PMS = UART(1, baudrate=9600, tx=2,rx=4)
PMS.init(baudrate=9600, bits=8, parity=None, stop=1)

gsm = UART(2, baudrate=9600, tx=25,rx=26)
i2c = SoftI2C(scl=Pin(18), sda=Pin(19))

while True:
    gsm.write('AT\r')
    time.sleep(1)
    buff = gsm.read()
    print(buff)
    gsm.write('AT+SAPBR=3,1,\"Contype\",\"GPRS\"\r')
    time.sleep(1)
    buff = gsm.read()
    print(buff)
    gsm.write('AT+SAPBR=3,1,\"APN\",\"internet.ideasclaro\"\r')
    time.sleep(1)
    buff = gsm.read()
    print(buff)
    gsm.write('AT+SAPBR=1,1\r')
    time.sleep(1)
    buff = gsm.read()
    print(buff)
    gsm.write('AT+SAPBR=2,1\r')
    time.sleep(1)
    buff = gsm.read()
    print(buff)

    i2c.scan()
    ds = ds1307.DS1307(i2c)
    d = ds.datetime()
    dia = ""
    mes = ""
    ani = ""
    seg = ""
    min = ""
    hor = ""
    if d[2]<10:
        dia= "0"+ str(d[2])
    else:
        dia = str(d[2])
    if d[1]<10:
```

```

    mes= "0"+ str(d[1])
else:
    mes= str(d[1])

if d[0]<10:
    ani= "0"+ str(d[0])
else:
    ani= str(d[0])

if d[6]<10:
    seg= "0"+ str(d[6])
else:
    seg = str(d[6])

if d[5]<10:
    min= "0"+ str(d[5])
else:
    min= str(d[5])

if d[4]<10:
    hor= "0"+ str(d[4])
else:
    hor= str(d[4])

Fecha= ani+"/"+mes+"/"+dia
Hora = hor+":":min+":":seg
print(Fecha)

if PMS.any() > 1 :
    b=PMS.read()
    iQty_of_Values = len(b)//2
    iValues = struct.unpack(f">15Hh4H", b)
    print(iValues)
    PM1=iValues[2]
    PM25=iValues[3]
    PM10=iValues[4]
    Temp=iValues[15]/10
    Hum =iValues[16]/10
    Form=iValues[13]
    print("PM 1.0 = " +str(PM1)+"\nPM 2.5 = "+str(PM25)+"\nPM 10 =
"+str(PM10)+"\nTemperatura = "+str(Temp)+" \nHumedad = "+str(Hum)+"
\nFormaldehido = "+str(Form))
    time.sleep(5)
    msg =
Fecha+", "+Hora+", "+Cuidad+", "+str(PM1)+", "+str(PM25)+", "+str(PM10)+", "+
str(Temp)+", "+str(Hum)+", "+str(Form)+", "+str(hor)+":00"
    URL =
'AT+HTTTPARA=\\"URL\\", \\"https://script.google.com/macros/s/AKfycbxosn2ddf3
eOFR7LOmgkZHxV7bTDWHQNdeKqLFRzh-
JMLw1JGpcTcEsSq9sBIvGskVx/exec?'+msg+'\\r'

gsm.write('AT+HTTTPINIT\r')
time.sleep(1)

```

```

buff = gsm.read()
print(buff)
gsm.write('AT+HTTPSSL=1\r')
time.sleep(1)
buff = gsm.read()
print(buff)
gsm.write('AT+HTTTPARA=\\"CID\\",1\r')
time.sleep(1)
buff = gsm.read()
print(buff)
gsm.write(URL)
time.sleep(1)
buff = gsm.read()
print(buff)
gsm.write('AT+HTTPACTION=0\r')
time.sleep(5)
buff = gsm.read()
print(buff)
gsm.write('AT+HTTPTERM\r')
time.sleep(1)
buff = gsm.read()
print(buff)
time.sleep(720)

```

Apps Script

```

function doGet(e) {
var parametros = JSON.stringify(e.queryString);
var fila;
var a = new Array();
var id = '1ud3V3Xnfw0CFQH55rRnJs6Y2G13F6fV3wXpBZ48d7Ro';
var sheet = SpreadsheetApp.openById(id).getActiveSheet();
var newRow = sheet.getLastRow() + 1;
parametros= parametros.replace('"', "");
parametros= parametros.replace("'", "");
parametros = parametros.split(";");
for (var i = 0; i < parametros.length; i++) {
    fila = parametros[i].split(",");
    a[i] = new Array();
    for (var j = 0; j < fila.length; j++) {
        a[i][j] = fila[j];
    }
}
if ( (a[0][3] < 1 || a[0][3] > 500) || (a[0][6] < 10 || a[0][6] >
40)) {
return ContentService.createTextOutput("error");
}else {
var newRange = sheet.getRange(newRow, 1, i, j);
newRange.setValues(a);
return ContentService.createTextOutput("ok");
}
}

```

B. HOJA DE DATOS

PMS5003ST

2016 product data manual of PLANTOWER

Digital universal particle concentration sensor

PMS5003ST series data manual

Writer	Zhou Yong	Version	V2.6
Verifier	Zheng Haoxin	Date	2017-02-01



Main characteristics

- ◆ Zero false alarm rate
- ◆ Real-time response
- ◆ Correct data
- ◆ Minimum distinguishable particle diameter :0.3 micrometer
- ◆ High anti-interference performance because of the patent structure of six sides shielding
- ◆ Optional direction of air inlet and outlet in order to adapt the different design
- ◆ Concentration of Formaldehyde output
- ◆ Temperature and Humidity output

Technical Index

Parameter	Index	unit
Particle Range of measurement	0.3~1.0; 1.0~2.5; 2.5~10	Micrometer ($\mu\text{ m}$)
Particle Counting Efficiency	50%@0.3 $\mu\text{ m}$ 98%@ $\geq 0.5\mu\text{ m}$	
Particle Effective Range (PM2.5 standard)	0~500	$\mu\text{ g/m}^3$
Particle Maximum Range (PM2.5 standard) *	≥ 1000	$\mu\text{ g/m}^3$
Particle Resolution	1	$\mu\text{ g/m}^3$
Particle Maximum Consistency Error (PM2.5 standard data)*	$\pm 10\%$ @100~500 $\mu\text{ g/m}^3$ $\pm 10\mu\text{ g/m}^3$ @0~100 $\mu\text{ g/m}^3$	
Particle Standard Volume	0.1	Litre (L)
Formaldehyde Effective Range	0~1	mg/m^3
Formaldehyde Maximum Range	0~2	mg/m^3
Formaldehyde Resolution	0.01	mg/m^3
Formaldehyde Maximum Consistency Error	$\pm 5\%$	FS
Temperature Maximum Range	-20~99	$^{\circ}\text{C}$
Temperature Resolution	0.1	$^{\circ}\text{C}$
Temperature Maximum Error	± 0.5	$^{\circ}\text{C}$
Humidity Maximum Range	0~99	%
Humidity Resolution	0.1	%
Humidity Maximum Error	± 2	%
Single Response Time	<1	Second (s)

Total Response Time	≤10	Second (s)
DC Power Supply	Typ:5.0 Min:4.5 Max: 5.5	Volt (V)
Active Current	≤100	Milliampere (mA)
Standby Current	≤200	Microampere (μ A)
Interface Level	L <0.8 @3.3 H >2.7@3.3	Volt (V)
Working Temperature Range	-10~+60	℃
Working Humidity Range	0~99%	
Storage Temperature Range	-40~+80	℃
MTTF	≥3	Year (Y)
Noise	<30@5cm	dB
Physical Size	50×38×21	Millimeter (mm)

Note 1: Maximum range means that the highest output value of the PM2.5 standard data is not less than 1000.

Note 2: "PM2.5 standard data" is the "data2" in the appendix.

Pin Definition

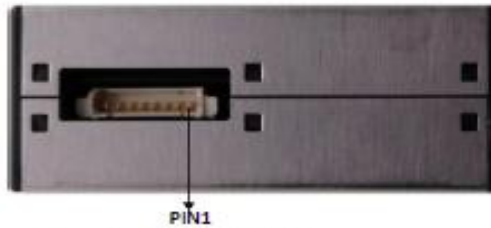
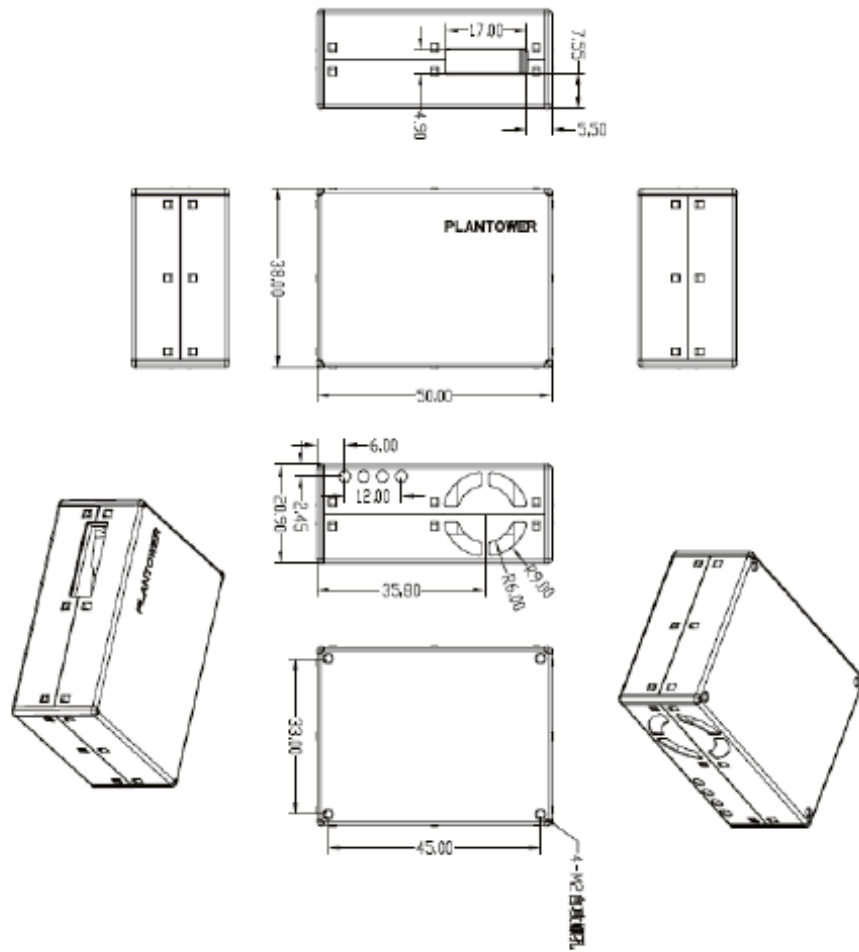


Figure 2 Connector Definition

PIN1	VCC	Positive power 5V
PIN2	GND	Negative power
PIN3	SET	Set pin /TTL level@3.3V, high level or suspending is normal working status, while low level is sleeping mode.

PIN4	RX	Serial port receiving pin/TTL level@3.3V
PIN5	TX	Serial port sending pin/TTL level@3.3V
PIN6	RESET	Module reset signal /TTL level@3.3V, low reset.
PIN7/8	NC	

Physical Size (mm)



Appendix I: PMS5003ST transport protocol-Active Mode

Default baud rate: 9600bps Check bit: None Stop bit: 1 bit

40 Bytes

Start character 1	0x42	(Fixed)
Start character2	0x4d	(Fixed)
Frame length high 8 bits	.....	Frame length=2x17+2(data+check bytes)
Frame length low 8 bits	.....
Data 1 high 8 bits	.....	Data1 refers to PM1.0 concentration unit μ g/m ³ (CF=1, standard particle) *
Data 1 low 8 bits	.....
Data2 high 8 bits	.....	Data2 refers to PM2.5 concentration unit μ g/m ³ (CF=1, standard particle)
Data2 low 8 bits	.....
Data3 high 8 bits	.....	Data3 refers to PM10 concentration unit μ g/m ³ (CF=1, standard particle)
Data3 low 8 bits	.....
Data4 high 8 bits	.....	Data4 refers to PM1.0 concentration unit * μ g/m ³ (under atmospheric environment)
Data4 low 8 bits	.....
Data5 high 8 bits	.....	Data 5 refers to PM2.5 concentration unit μ g/m ³ (under atmospheric environment)
Data5 low 8 bits	.....
Data6 high 8 bits	.....	Data 6 refers to concentration unit (under atmospheric environment) μ g/m ³
Data6 low 8 bits	.....
Data7 high 8 bits	.....	Data7 indicates the number of particles with diameter beyond 0.3 μ m in 0.1 L of air.
Data7 low 8 bits	.....
Data8 high 8 bits	.....	Data 8 indicates the number of particles with diameter beyond 0.5 μ m in 0.1 L of air.
Data8 low 8 bits	.....
Data9 high 8 bits	.....	Data 9 indicates the number of particles with diameter beyond 1.0 μ m

Data9 low 8 bits	.....	in 0.1 L of air.
Data10 high 8 bits	.....	Data10 indicates the number of particles with diameter beyond 2.5 um in 0.1 L of air.
Data10 low 8 bits	.....
Data11 high 8 bits	.....	Data11 indicates the number of particles with diameter beyond 5.0 um in 0.1 L of air.
Data11 low 8 bits	.....
Data12 high 8 bits	.....	Data12 indicates the number of particles with diameter beyond 10 um in 0.1 L of air.
Data12 low 8 bits	.....
Data13 high 8 bits	.....	Formaldehyde Concentration=Data13/1000 mg/m ³
Data13 low 8 bits	.....
Data14 high 8 bits	.....	Temperature= Data14(signed)/10 °C
Data14 low 8 bits	.....
Data15 high 8 bits	.....	Humidity= Data15/10 %
Data15 low 8 bits	.....
Data16 high 8 bits	.....	Reserved
Data16 low 8 bits	.....
Data17 high 8 bits	.....	Firmware Version
Data17 low 8 bits	.....	Error Code
Data and check high 8 bits	.....	Check code=Start character 1+ Start character 2+.....+data 13 Low 8 bits
Data and check low 8 bits	.....

Note: CF=1 should be used in the factory environment

ESP32-WROOM-32E ESP32-WROOM-32UE

Datasheet

2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE module
Built around ESP32 series of SoCs, Xtensa® dual-core 32-bit LX6 microprocessor
4/8/16 MB flash available
26 GPIOs, rich set of peripherals
On-board PCB antenna or external antenna connector



ESP32-WROOM-32E



ESP32-WROOM-32UE



Version 1.5
Espressif Systems
Copyright © 2022

3 Pin Definitions

3.1 Pin Layout

The pin layout of ESP32-WROOM-32UE is the same as that of ESP32-WROOM-32E, except that ESP32-WROOM-32UE has no keepout zone.

The pin diagram below shows the approximate location of pins on the module. For the actual diagram drawn to scale, please refer to Figure 7.1 *Physical Dimensions*.

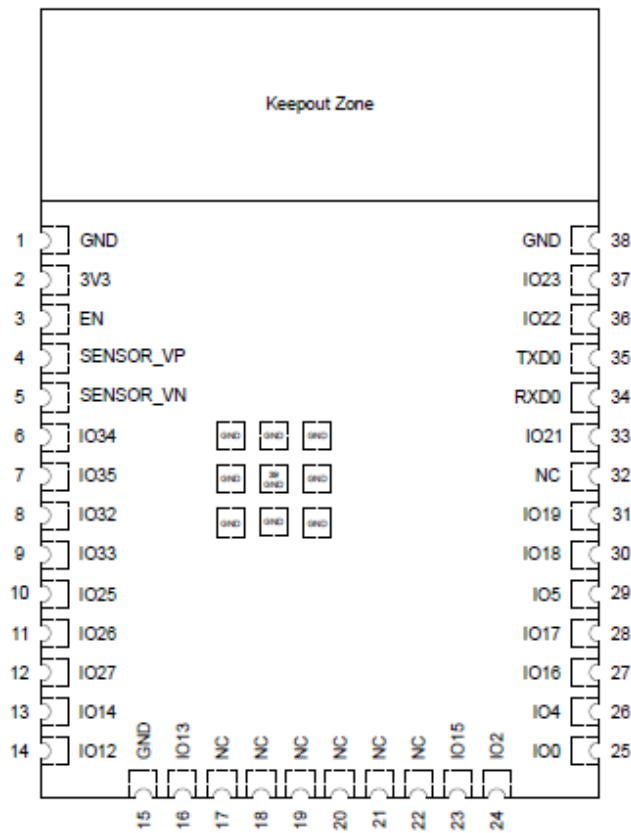


Figure 3: Pin Layout (Top View)

3.2 Pin Description

The module has 38 pins. See pin definitions in Table 3.

For peripheral pin configurations, please refer to [ESP32 Series Datasheet](#).

Table 3: Pin Definitions

Name	No.	Type ¹	Function
GND	1	P	Ground
3V3	2	P	Power supply
EN	3	I	High: On; enables the chip Low: Off; the chip powers off Note: Do not leave the pin floating.
SENSOR_VP	4	I	GPIO36, ADC1_CH0, RTC_GPIO0
SENSOR_VN	5	I	GPIO39, ADC1_CH3, RTC_GPIO3
IO34	6	I	GPIO34, ADC1_CH5, RTC_GPIO4
IO35	7	I	GPIO35, ADC1_CH7, RTC_GPIO5
IO32	8	I/O	GPIO32, XTAL_32K_P (32.768 kHz crystal oscillator input), ADC1_CH4, TOUCH9, RTC_GPIO9
IO33	9	I/O	GPIO33, XTAL_32K_N (32.768 kHz crystal oscillator output), ADC1_CH5, TOUCH8, RTC_GPIO8
IO25	10	I/O	GPIO25, DAC_1, ADC2_CH8, RTC_GPIO6, EMAC_RXD0
IO26	11	I/O	GPIO26, DAC_2, ADC2_CH9, RTC_GPIO7, EMAC_RXD1
IO27	12	I/O	GPIO27, ADC2_CH7, TOUCH7, RTC_GPIO17, EMAC_RX_DV
IO14	13	I/O	GPIO14, ADC2_CH6, TOUCH6, RTC_GPIO16, MTMS, HSPICLK, HS2_CLK, SD_CLK, EMAC_TXD2
IO12	14	I/O	GPIO12, ADC2_CH5, TOUCH5, RTC_GPIO15, MTDI, HSPIO, HS2_DATA2, SD_DATA2, EMAC_TXD3
GND	15	P	Ground
IO13	16	I/O	GPIO13, ADC2_CH4, TOUCH4, RTC_GPIO14, MTCK, HSPID, HS2_DATA3, SD_DATA3, EMAC_RX_ER
NC	17	-	See note ²
NC	18	-	See note ²
NC	19	-	See note ²
NC	20	-	See note ²
NC	21	-	See note ²
NC	22	-	See note ²
IO15	23	I/O	GPIO15, ADC2_CH3, TOUCH3, MTDO, HSPICS0, RTC_GPIO13, HS2_CMD, SD_CMD, EMAC_RXD3
IO2	24	I/O	GPIO2, ADC2_CH2, TOUCH2, RTC_GPIO12, HSPWP, HS2_DATA0, SD_DATA0
IO0	25	I/O	GPIO0, ADC2_CH1, TOUCH1, RTC_GPIO11, CLK_OUT1, EMAC_TX_CLK
IO4	26	I/O	GPIO4, ADC2_CH0, TOUCH0, RTC_GPIO10, HSPHD, HS2_DATA1, SD_DATA1, EMAC_TX_ER
IO16 ³	27	I/O	GPIO16, HS1_DATA4, U2RXD, EMAC_CLK_OUT
IO17	28	I/O	GPIO17, HS1_DATA5, U2TXD, EMAC_CLK_OUT_180
IO5	29	I/O	GPIO5, VSPICS0, HS1_DATA6, EMAC_RX_CLK
IO18	30	I/O	GPIO18, VSPICLK, HS1_DATA7

Cont'd on next page

3 Pin Definitions

Table 3 – cont'd from previous page

Name	No.	Type ¹	Function
IO19	31	I/O	GPIO19, VSPIO, U0CTS, EMAC_TXD0
NC	32	-	-
IO21	33	I/O	GPIO21, VSPHD, EMAC_TX_EN
RXD0	34	I/O	GPIO3, U0RXD, CLK_OUT2
TXD0	35	I/O	GPIO1, U0TXD, CLK_OUT3, EMAC_RXD2
IO22	36	I/O	GPIO22, VSPWP, U0RTS, EMAC_TXD1
IO23	37	I/O	GPIO23, VSPID, HS1_STROBE
GND	38	P	Ground

¹ P: power supply; I: input; O: output

4 Electrical Characteristics

4.1 Absolute Maximum Ratings

Stresses above those listed in *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

Table 6: Absolute Maximum Ratings

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	-0.3	3.6	V
T _{STOR}	Storage temperature	-40	105	°C

[†] Please see Appendix IO_MUX of [ESP32 Series Datasheet](#) for IO's power domain.

4.2 Recommended Operating Conditions

Table 7: Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
VDD33	Power supply voltage	3.0	3.3	3.6	V
I _{VDD}	Current delivered by external power supply	0.5	—	—	A
T	Operating ambient temperature	85 °C version 105 °C version	-40	— 85 105	°C

4.3 DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Table 8: DC Characteristics (3.3 V, 25 °C)

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
C _{IN}	Pin capacitance	—	2	—	pF
V _{IH}	High-level input voltage	0.75 × VDD ¹	—	VDD ¹ ± 0.3	V
V _{IL}	Low-level input voltage	-0.3	—	0.25 × VDD ¹	V
I _{IH}	High-level input current	—	—	50	nA
I _{IL}	Low-level input current	—	—	50	nA
V _{OH}	High-level output voltage	0.8 × VDD ¹	—	—	V
V _{OL}	Low-level output voltage	—	—	0.1 × VDD ¹	V

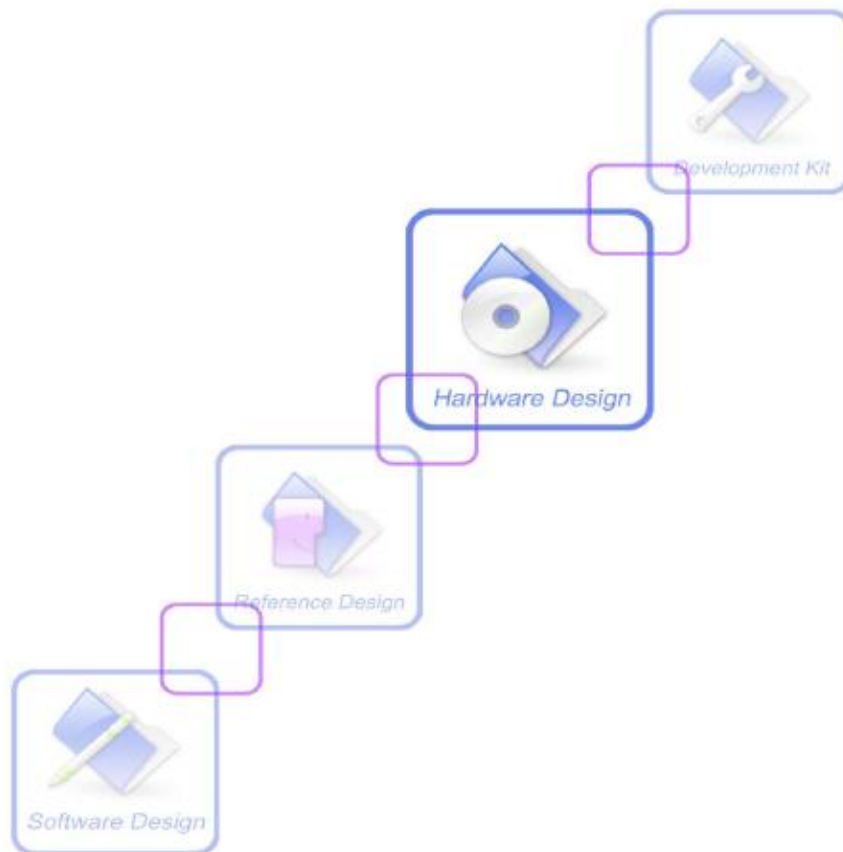
Cont'd on next page

Table 8 – cont'd from previous page

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit	
I _{OH}	High-level source current (VDD ¹ = 3.3 V, V _{OH} ≥ 2.64 V, output drive strength set to the maximum)	VDD33_CPU power domain ^{1,2}	—	40	—	mA
		VDD33_RTC power domain ^{1,2}	—	40	—	mA
		VDD_SDIO power domain ^{1,2}	—	20	—	mA
I _{OL}	Low-level sink current (VDD ¹ = 3.3 V, V _{OL} = 0.495 V, output drive strength set to the maximum)	—	28	—	mA	
R _{PU}	Resistance of internal pull-up resistor	—	45	—	kΩ	
R _{PD}	Resistance of internal pull-down resistor	—	45	—	kΩ	
V _{IL_NRESET}	Low-level input voltage of CHIP_PU to power off the chip	—	—	0.6	V	



SIM800H&SIM800L_Hardware Design_V2.02



1. Introduction

This document describes SIM800H&SIM800L hardware interface in great detail. The document can help customer to quickly understand SIM800H&SIM800L interface specifications, electrical and mechanical details. With the help of this document and other SIM800H&SIM800L application notes, customer guide, customers can use SIM800H&SIM800L to design various applications quickly.

2. SIM800H&SIM800L Overview

SIM800H&SIM800L is a quad-band GSM/GPRS module, that works on frequencies GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz and PCS1900MHz. SIM800H&SIM800L features GPRS multi-slot class 12/ class 10 (optional) and supports the GPRS coding schemes CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4.

With a tiny configuration of 17.8*15.8*2.4mm, SIM800H&SIM800L can meet almost all the space requirements in customer applications, such as smart phone, PDA and other mobile devices.

SIM800H&SIM800L is a LGA package with 88 pads, and provides all hardware interfaces between the module and customers' boards.

- Support 5*5*2 keypads
- One full modem serial port, customer can configure two serial ports
- One USB, the USB interfaces can debug, download software
- Audio channel which includes two microphone input; a receiver output and a speaker output
- Programmable general purpose input and output.
- A SIM card interface
- Support Bluetooth(only SIM800H)
- Support FM
- Support one PWM

SIM800H&SIM800L is designed with power saving technique so that the current consumption is as low as 1.04mA in sleep mode.

2.1. SIM800H&SIM800L

Table 1: Module information

	SIM800H	SIM800L
GSM	850,900,1800 and 1900MHz	850,900,1800 and 1900MHz
BT	Support	Not support
FLASH	32Mbit	16Mbit
RAM	32Mbit	32Mbit

2.2. SIM800H&SIM800L Key Features

Table 2: SIM800H&SIM800L key features

Feature	Implementation
Power supply	3.4V ~4.4V
Power saving	Typical power consumption in sleep mode is 1.04mA (BS_PA_MFRMS=9)

Frequency bands	<ul style="list-style-type: none"> ● Quad-band: GSM 850, EGSM 900, DCS 1800, PCS 1900. SIM800H&SIM800L can search the 4 frequency bands automatically. The frequency bands can also be set by AT command "AT+CBAND". For details, please refer to <i>document [1]</i>. ● Compliant to GSM Phase 2/2+
Transmitting power	<ul style="list-style-type: none"> ● Class 4 (2W) at GSM 850 and EGSM 900 ● Class 1 (1W) at DCS 1800 and PCS 1900
GPRS connectivity	<ul style="list-style-type: none"> ● GPRS multi-slot class 12 (default) ● GPRS multi-slot class 1~12 (option)
Temperature range	<ul style="list-style-type: none"> ● Normal operation: -40°C ~ +85°C ● Storage temperature -45°C ~ +90°C
Data GPRS	<ul style="list-style-type: none"> ● GPRS data downlink transfer: max. 85.6 kbps ● GPRS data uplink transfer: max. 85.6 kbps ● Coding scheme: CS-1, CS-2, CS-3 and CS-4 ● PAP protocol for PPP connect ● Integrate the TCP/IP protocol. ● Support Packet Broadcast Control Channel (PBCCH) ● CSD transmission rates: 2.4, 4.8, 9.6, 14.4 kbps
CSD	<ul style="list-style-type: none"> ● Support CSD transmission
USSD	<ul style="list-style-type: none"> ● Unstructured Supplementary Services Data (USSD) support
SMS	<ul style="list-style-type: none"> ● MT, MO, CB, Text and PDU mode ● SMS storage: SIM card
SIM interface	Support SIM card: 1.8V, 3V
External antenna	Antenna pad
Audio features	Speech codec modes: <ul style="list-style-type: none"> ● Half Rate (ETS 06.20) ● Full Rate (ETS 06.10) ● Enhanced Full Rate (ETS 06.50 / 06.60 / 06.80) ● Adaptive multi rate (AMR) ● Echo Cancellation ● Noise Suppression
Serial port and debug port	Serial port: <ul style="list-style-type: none"> ● Default one Full modem serial port ● 1200bps to 460800bps. ● Can be used for AT commands or data stream. ● Support RTS/CTS hardware handshake and software ON/OFF flow control. ● Multiplex ability according to GSM 07.10 Multiplexer Protocol. ● Autobauding supports baud rate from 1200 bps to 115200bps. ● upgrading firmware Debug port: <ul style="list-style-type: none"> ● USB_DN and USB_DP ● Can be used for debugging and upgrading firmware.
Phonebook management	Support phonebook types: SM, FD, LD, RC, ON, MC.
SIM application toolkit	GSM 11.14 Release 99
Real time clock	Support RTC

Timing functions	Use AT command set
Physical characteristics	Size: 17.8*15.8*2.4mm Weight:1.35g
Firmware upgrade	Main serial port or USB port.(recommend to use USB port)

Table 3: Coding schemes and maximum net data rates over air interface

Coding scheme	1 timeslot	2 timeslot	4 timeslot
CS-1	9.05kbps	18.1kbps	36.2kbps
CS-2	13.4kbps	26.8kbps	53.6kbps
CS-3	15.6kbps	31.2kbps	62.4kbps
CS-4	21.4kbps	42.8kbps	85.6kbps

2.3. Operating Mode

The table below summarizes the various operating modes of SIM800H&SIM800L.

Table 4: Overview of operating modes

Mode	Function
Normal operation	GSM/GPRS SLEEP Module will automatically go into sleep mode if the conditions of sleep mode are enabling and there is no on air and no hardware interrupt (such as GPIO interrupt or data on serial port). In this case, the current consumption of module will reduce to the minimal level. In sleep mode, the module can still receive paging message and SMS.
	GSM IDLE Software is active. Module is registered to the GSM network, and the module is ready to communicate.
	GSM TALK Connection between two subscribers is in progress. In this case, the power consumption depends on network settings such as DTX off/on, FR/EFR/HR, hopping sequences, antenna.
	GPRS STANDBY Module is ready for GPRS data transfer, but no data is currently sent or received. In this case, power consumption depends on network settings and GPRS configuration.
	GPRS DATA There is GPRS data transfer (PPP or TCP or UDP) in progress. In this case, power consumption is related with network settings (e.g. power control level); uplink/downlink data rates and GPRS configuration (e.g. used multi-slot settings).
Power down	Normal power down by sending AT command "AT+CPOWD=1" or using the PWRKEY. The power management unit shuts down the power supply for the baseband part of the module, and only the power supply for the RTC is remained. Software is not active. The serial port is not accessible. Power supply (connected to VBAT) remains applied.
Minimum functionality mode	AT command "AT+CFUN" can be used to set the module to a minimum functionality mode without removing the power supply. In this mode, the RF part of the module will not work or the SIM card will not be accessible, or both RF part and SIM card will be closed, and the serial port is still accessible. The power consumption in this mode is lower than normal mode.

3.3. Package Dimensions

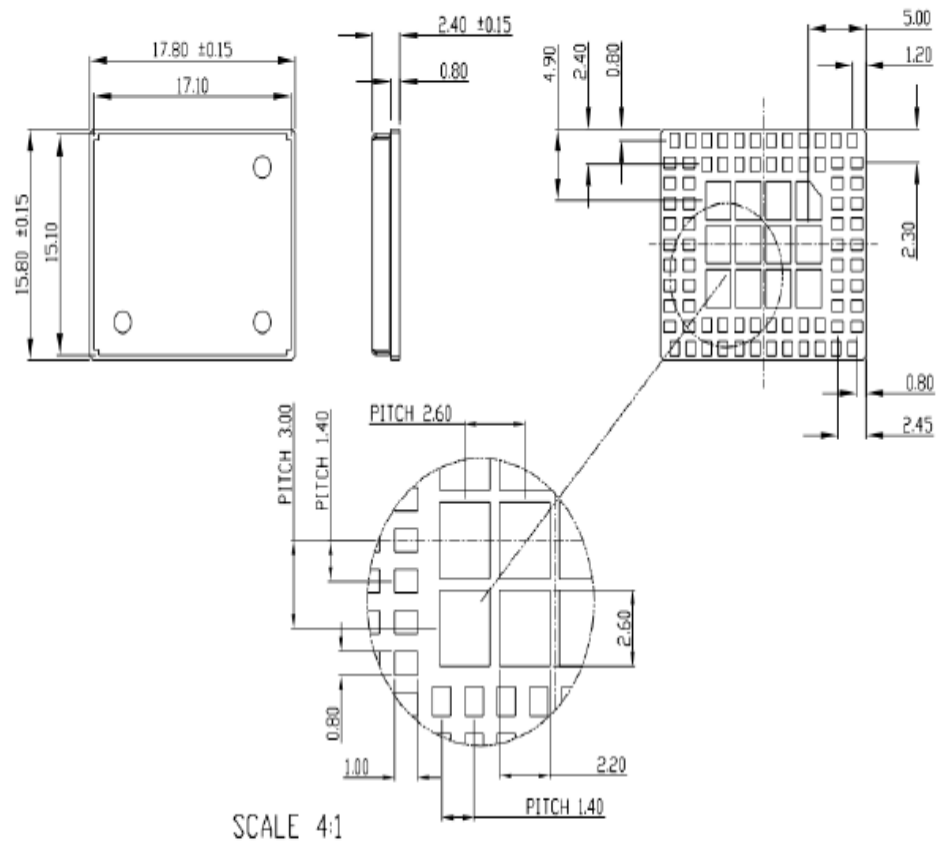


Figure 3: Dimensions of SIM800H&SIM800L (Unit: mm)

4.5. Serial Port and USB Interface

SIM800H&SIM800L default provides one unbalanced asynchronous serial ports. The module is designed as a DCE (Data Communication Equipment). The following figure shows the connection between module and client (DTE).



Table 9: Serial port and USB pin definition

	Pin name	Pin number	Function
Serial port	DTR	69	Data terminal ready
	RI	68	Ring indicator
	DCD	70	Data carrier detect
	CTS	34	Request to send
	RTS	33	Clear to send
	TXD	32	Transmit data
Debug port	RXD	31	Receive data
	VBUS	7	USB power supply
	USB_DP	59	
	USB_DN	19	

Note: Hardware flow control is disable by default. AT command "AT+IFC=2,2" can enable hardware flow control. AT command "AT+IFC=0,0" can disable hardware flow control. For more details please refer to document [1].

Table 10: Serial port characteristics

Symbol	Min	Typ	Max	Unit
V_{in}	-0.3	-	0.7	V
V_{DD}	2.1	-	3.1	V
V_{CE}	-	-	0.4	V
V_{CE1}	2.4	2.8	-	V

SIM800H&SIM800L module can support dual serial port function, that need execute AT command "AT+CMNRP=1" first. Dual serial port including one full modem serial port and one three-wire serial port, pin definition is different with standard definition of the Figure 2: Pin assignment (Top view) and Table 5: Pin description. For more details please refer to Document [2].

Note: Only B05 and later version support dual serial port function.

4.5.1 Function of Serial Port

Serial port:

- Full mode device.
- Contains data lines TXD and RXD, hardware flow control lines RTS and CTS, status lines DTR, DCD and RI.
- Serial port can be used for CSD FAX, GPRS service and AT communication. It can also be used for multiplexing function. For details about multiplexing function, please refer to table 11.
- Serial port supports the following baud rates:
1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400 and 460800bps
- Autobauding only supports the following baud rates:

1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600 and 115200bps

- The default setting is autobauding.

Autobauding allows SIM800H&SIM800L to automatically detect the baud rate of the host device. Pay more attention to the following requirements:

- **Synchronization between DTE and DCE:**

When DCE powers on with autobauding enabled, it is recommended to send "AT" or "at" or "aT" or "At" to synchronize the baud rate, until DTE receives the "OK" response, which means DTE and DCE are correctly synchronized. For more information please refer to AT command "AT+IPR".

- **Restrictions of autobauding operation:**

The DTE serial port must be set at 8 data bits, no parity and 1 stop bit.

The URC such as "RDY", "+CFUN: 1" and "+CPIN: READY" will not be reported.

Note: Customer can use AT command "AT+IPR=x" to set a fixed baud rate and the setting will be saved to non-volatile flash memory automatically. After the configuration is set as fixed baud rate, the URC such as "RDY", "+CFUN: 1" and "+CPIN: READY" will be reported when SIM800H&SIM800L is powered on.

4.5.2 Serial Interfaces

The following figure shows the connection between module and client (DTE).

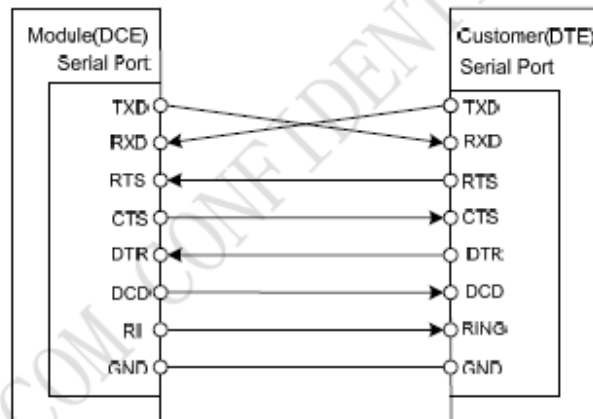


Figure 20: Connection of the serial interfaces

If the voltage of UART is 3.3V, the following reference circuits are recommended. If the voltage is 3.0V, please change the resistors in the following figure from 5.6K to 14K.

Rev 2; 6/05



Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

DS3231

General Description

The DS3231 is a low-cost, extremely accurate I²C real-time clock (RTC) with an integrated temperature-compensated crystal oscillator (TCXO) and crystal. The device incorporates a battery input, and maintains accurate timekeeping when main power to the device is interrupted. The integration of the crystal resonator enhances the long-term accuracy of the device as well as reduces the piece-part count in a manufacturing line. The DS3231 is available in commercial and industrial temperature ranges, and is offered in a 16-pin, 300-mil SO package.

The RTC maintains seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. Two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output are provided. Address and data are transferred serially through an I²C bidirectional bus.

A precision temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the status of V_{CC} to detect power failures, to provide a reset output, and to automatically switch to the backup supply when necessary. Additionally, the RST pin is monitored as a pushbutton input for generating a reset externally.

Applications

Servers	Utility Power Meters
Telematics	GPS

Pin Configuration appears at end of data sheet.

Features

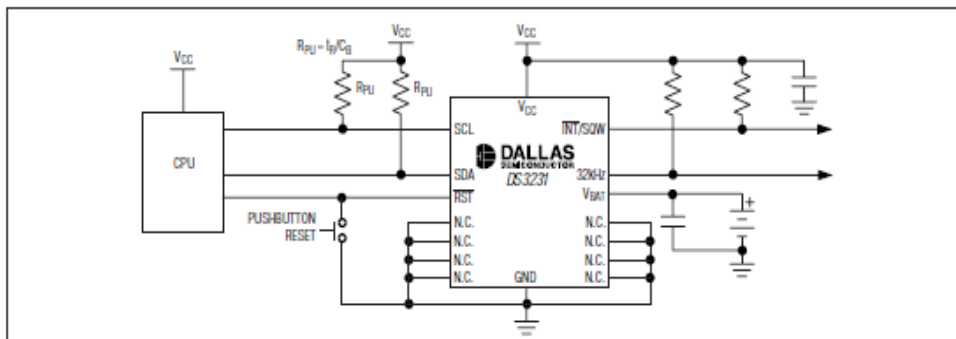
- ◆ Accuracy ±2ppm from 0°C to +40°C
- ◆ Accuracy ±3.5ppm from -40°C to +85°C
- ◆ Battery Backup Input for Continuous Timekeeping
- ◆ Operating Temperature Ranges
Commercial: 0°C to +70°C
Industrial: -40°C to +85°C
- ◆ Low-Power Consumption
- ◆ Real-Time Clock Counts Seconds, Minutes, Hours, Day, Date, Month, and Year with Leap Year Compensation Valid Up to 2100
- ◆ Two Time-of-Day Alarms
- ◆ Programmable Square-Wave Output
- ◆ Fast (400kHz) I²C Interface
- ◆ 3.3V Operation
- ◆ Digital Temp Sensor Output: ±3°C Accuracy
- ◆ Register for Aging Trim
- ◆ RST Input/Output
- ◆ UL Recognized

Ordering Information

PART	TEMP RANGE	PIN-PACKAGE	TOP MARK
DS3231S	0°C to +70°C	16 SO	DS3231
DS3231SN	-40°C to +85°C	16 SO	DS3231N
DS3231S+	0°C to +70°C	16 SO	DS3231+
DS3231SN+	-40°C to +85°C	16 SO	DS3231N+

+Denotes lead-free

Typical Operating Circuit



Purchase of I²C components from Maxim Integrated Products, Inc., or one of its sublicensed Associated Companies, conveys a license under the Philips I²C Patent Rights to use these components in an I²C system, provided that the system conforms to the I²C Standard Specification as defined by Philips.



Maxim Integrated Products 1

For pricing, delivery, and ordering information, please contact Maxim/Dallas Direct! at 1-888-629-4642, or visit Maxim's website at www.maxim-ic.com.

DS3231

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Voltage Range on V _{CC} , V _{BAT} , 32kHz, SCL, SDA, $\overline{\text{RST}}$, INT/SQW Relative to Ground.....	-0.3V to +6.0V	Storage Temperature Range.....	-40°C to +85°C
Operating Temperature Range (noncondensing).....	-40°C to +85°C	Lead Temperature (Soldering, 10s).....	+260°C/10s
Junction Temperature.....	+125°C	Soldering Temperature.....	See the <i>Handling, PC Board Layout, and Assembly</i> section.

Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS

(T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.) (Notes 1, 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Supply Voltage	V _{CC}		2.3	3.3	5.5	V
	V _{BAT}		2.3	3.0	5.5	V
Logic 1 Input SDA, SCL	V _{IH}		0.7 x V _{CC}		V _{CC} + 0.3	V
Logic 0 Input SDA, SCL	V _{IL}		-0.3		+0.3 x V _{CC}	V
Pullup Voltage (SDA, SCL, 32kHz, INT/SQW)	V _{PU}	V _{CC} = 0V			5.5V	V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{CC} = 2.3V to 5.5V, V_{CC} > V_{BAT}, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.) (Typical values are at V_{CC} = 3.3V, V_{BAT} = 3.0V, and T_A = +25°C, unless otherwise noted.) (Notes 1, 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Supply Current	I _{CCA}	(Notes 3, 4)	V _{CC} = 3.63V		200	μA
			V _{CC} = 5.5V		300	
Standby Supply Current	I _{CCS}	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off (Note 4)	V _{CC} = 3.63V		110	μA
			V _{CC} = 5.5V		170	
Temperature Conversion Current	I _{CCSCONV}	I ² C bus inactive, 32kHz output on, SQW output off	V _{CC} = 3.63V		575	μA
			V _{CC} = 5.5V		650	
Power-Fail Voltage	V _{PF}		2.45	2.575	2.70	V
Logic 0 Output, 32kHz, INT/SQW, SDA	V _{OL}	I _{OL} = 3mA			0.4	V
Logic 0 Output, $\overline{\text{RST}}$	V _{OL}	I _{OL} = 1mA			0.4	V
Output Leakage Current 32kHz, INT/SQW, SDA	I _{LO}	Output high impedance	-1	0	+1	μA
Input Leakage SCL	I _{LI}		-1		+1	μA
$\overline{\text{RST}}$ Pin I/O Leakage	I _{OL}	$\overline{\text{RST}}$ high impedance (Note 5)	-200		+10	μA
V _{BAT} Leakage Current (V _{CC} Active)	I _{BATLKG}			25	100	nA

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

DS3231

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

(V_{CC} = 2.3V to 5.5V, V_{CC} > V_{BAT}, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.) (Typical values are at V_{CC} = 3.3V, V_{BAT} = 3.0V, and T_A = +25°C, unless otherwise noted.) (Notes 1, 2)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Frequency	f _{OUT}	V _{CC} = 3.3V or V _{BAT} = 3.3V		32.768			kHz
Frequency Stability vs. Temperature (Commercial)	Δf/f _{OUT}	V _{CC} = 3.3V or V _{BAT} = 3.3V, aging offset = 00h	0°C to +40°C	±2			ppm
			>40°C to +70°C	±3.5			
Frequency Stability vs. Temperature (Industrial)	Δf/f _{OUT}	V _{CC} = 3.3V or V _{BAT} = 3.3V, aging offset = 00h	-40°C to <0°C	±3.5			ppm
			0°C to +40°C	±2			
			>40°C to +85°C	±3.5			
Frequency Stability vs. Voltage	Δf/V			1			ppm/V
Trim Register Frequency Sensitivity per LSB	Δf/LSB	Specified at:	-40°C	0.7			ppm
			+25°C	0.1			
			+70°C	0.4			
			+85°C	0.8			
Temperature Accuracy	Temp	V _{CC} = 3.3V or V _{BAT} = 3.3V		-3		+3	°C
Crystal Aging	Δf/f ₀	After reflow, not production tested	First year	±1.0			ppm
			0–10 years	±5.0			

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(V_{CC} = 0V, V_{BAT} = 2.3V to 5.5V, T_A = T_{MIN} to T_{MAX}, unless otherwise noted.) (Note 1)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Active Battery Current	I _{BATA}	E _{OSC} = 0, BBSQW = 0, SCL = 400kHz (Note 4)	V _{BAT} = 3.63V	70			μA
			V _{BAT} = 5.5V	150			
Timekeeping Battery Current	I _{BATT}	E _{OSC} = 0, BBSQW = 0, EN32kHz = 1, SCL = SDA = 0V or SCL = SDA = V _{BAT} (Note 4)	V _{BAT} = 3.63V	0.84	3.0		μA
			V _{BAT} = 5.5V	1.0	3.5		
Temperature Conversion Current	I _{BATTCC}	E _{OSC} = 0, BBSQW = 0, SCL = SDA = 0V or SCL = SDA = V _{BAT}	V _{BAT} = 3.63V	575			μA
			V _{BAT} = 5.5V	650			
Data-Retention Current	I _{BATTDR}	E _{OSC} = 1, SCL = SDA = 0V, +25°C		100			nA

Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal

Pin Description

DS3231

PIN	NAME	FUNCTION
1	32kHz	32kHz Output. This open-drain pin requires an external pullup resistor. It may be left open if not used.
2	V _{CC}	DC Power Pin for Primary Power Supply. This pin should be decoupled using a 0.1μF to 1.0μF capacitor. If not used, connect to ground.
3	INT/SQW	Active-Low Interrupt or Square-Wave Output. This open-drain pin requires an external pullup resistor. It may be left open if not used. This multifunction pin is determined by the state of the INTCN bit in the Control Register (0Eh). When INTCN is set to logic 0, this pin outputs a square wave and its frequency is determined by RS2 and RS1 bits. When INTCN is set to logic 1, then a match between the timekeeping registers and either of the alarm registers activates the INT/SQW pin (if the alarm is enabled). Because the INTCN bit is set to logic 1 when power is first applied, the pin defaults to an interrupt output with alarms disabled.
4	RST	Active-Low Reset. This pin is an open-drain input/output. It indicates the status of V _{CC} relative to the V _{PF} specification. As V _{CC} falls below V _{PF} , the RST pin is driven low. When V _{CC} exceeds V _{PF} , for t _{RST} , the RST pin is driven high impedance. The active-low, open-drain output is combined with a debounced pushbutton input function. This pin can be activated by a pushbutton reset request. It has an internal 50kΩ nominal value pullup resistor to V _{CC} . No external pullup resistors should be connected. If the crystal oscillator is disabled, the startup time of the oscillator is added to the t _{RST} delay.
5-12	N.C.	No Connection. Must be connected to ground.
13	GND	Ground
14	V _{BAT}	Backup Power-Supply Input. This pin should be decoupled using a 0.1μF to 1.0μF low-leakage capacitor. If the I ² C interface is inactive whenever the device is powered by the V _{BAT} input, the decoupling capacitor is not required. If V _{BAT} is not used, connect to ground. UL recognized to ensure against reverse charging when used with a lithium battery. Go to www.maxim-ic.com/qa/info/ul .
15	SDA	Serial Data Input/Output. This pin is the data input/output for the I ² C serial interface. This open-drain pin requires an external pullup resistor.
16	SCL	Serial Clock Input. This pin is the clock input for the I ² C serial interface and is used to synchronize data movement on the serial interface.

Detailed Description

The DS3231 is a serial RTC driven by a temperature-compensated 32kHz crystal oscillator. The TCXO provides a stable and accurate reference clock, and maintains the RTC to within ±2 minutes per year accuracy from -40°C to +85°C. The TCXO frequency output is available at the 32kHz pin. The RTC is a low-power clock/calendar with two programmable time-of-day alarms and a programmable square-wave output. The INT/SQW provides either an interrupt signal due to alarm conditions or a square-wave output. The clock/calendar provides seconds, minutes, hours, day, date,

month, and year information. The date at the end of the month is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with an AM/PM indicator. The internal registers are accessible through an I²C bus interface.

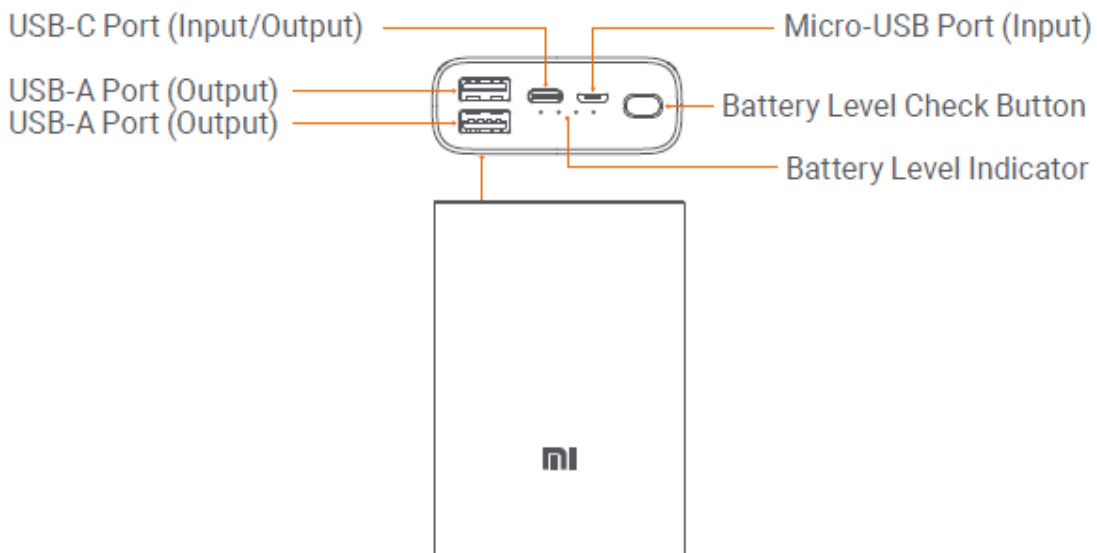
A temperature-compensated voltage reference and comparator circuit monitors the level of V_{CC} to detect power failures and to automatically switch to the back-up supply when necessary. The RST pin provides an external pushbutton function and acts as an indicator of a power-fail event.

Power Bank 10000mAh

Read this manual carefully before use, and retain it for future reference.

10000mAh Mi Power Bank 3 Ultra Compact User Manual

Thank you for choosing 10000mAh Mi Power Bank 3 Ultra Compact. This product is small and portable, supporting a maximum of 22.5 W in two-way fast charging. Equipped with high-quality lithium polymer battery cells and a charging and discharging chip, the power bank performs excellently in terms of safety, efficiency, and compatibility.



Notes:

The battery level check button is not a power button.

The power bank detects charging and discharging automatically.

Safety: This power bank is equipped with multiple safeguarding technologies to prevent overcharging, over-discharging, overheating, and short circuits in any working condition.

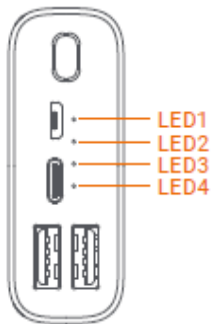
Fast Charging: USB-A single port supports 5 V/2.4 A, 9 V/2.5 A Max., 12 V/1.85 A Max. fast charging mode. USB-C single port supports 5 V/3 A, 9 V/2.5 A Max., 12 V/1.85 A Max. fast charging mode.

Compatibility: The built-in USB charge controller is compatible with most smart devices including smartphones, and tablets.

Quality: High-quality lithium polymer battery cells and a durable charging and discharging chip.

Charging

To charge the power bank, connect a Mi power charger and charging cable to its USB-C or Micro-USB port. The indicator shows the following charging status:



Battery Level	LED1	LED2	LED3	LED4
0-25%	Blinking	Off	Off	Off
25-50%	On	Blinking	Off	Off
50-75%	On	On	Blinking	Off
75-99%	On	On	On	Blinking
Fully Charged	On	On	On	On
Charging Error	Blinking	Blinking	Blinking	Blinking

Discharging

To charge devices via the power bank, connect the charging cable to the device and the power bank's USB-A or USB-C port. The indicator shows the following discharging status:

Battery Level	LED1	LED2	LED3	LED4
Undervoltage	Off	Off	Off	Off
0-25%	Blinking	Off	Off	Off
25-50%	Blinking	Blinking	Off	Off
50-75%	Blinking	Blinking	Blinking	Off
75-100%	Blinking	Blinking	Blinking	Blinking

* Low-current discharge: When the power bank is not charging, double press the battery level check button to enter the low-current discharge mode. This mode can be used to charge low-current devices such as Bluetooth headphones and smart bands. The indicator lights will turn on one by one to indicate the power bank is in low-current discharge mode. Simply press the button again to exit this mode. The power bank will automatically exit this mode after two hours.