UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

"ELABORACIÓN DE UN EQUIPO DE BAJO COSTO PARA LA MEDICIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS Y VARIABLES METEOROLÓGICAS USANDO EL MICROCONTROLADOR ARDUINO"

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

SICHA HUAMAN RUDY GABRIEL

LIMA-PERÚ

2020

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN 1

II. REVISIÓN LITERARIA 2

2.1. Contaminación del aire 2

2.1.1. Óxidos de nitrógeno 2

2.1.2. Anhidrido sulfuroso 2

2.1.3. Ozono 2

2.1.4. Material particulado (PM 2.5) 3

2.2. Meteorología 3

2.2.1. Temperatura 3

2.2.2. Humedad 4

2.2.3. Presión Atmosférica 4

2.2.4. Radiación solar 4

III. METODOLOGÍA 6

3.1. Datos 6

3.2. Área de estudio 6

3.3. Métodos 7

3.3.1. Elaboración de un equipo de calidad de aire y variables meteorológicas con tecnología *Low Cost* 7

3.3.2. Evaluación del comportamiento temporal y espacial de la calidad del aire en el distrito de Lurigancho-Chosica 8

3.3.3. Determinación la relación de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas 10

IV. RESULTADOS Y DISCUCIÓN 11

4.1. Equipo de calidad de aire y variables meteorológicas con tecnología Low Cost.....11

4.2. Comportamiento temporal y espacial de la calidad del aire en el distrito de Lurigancho-Chosica.....14

4.2.1. Comportamiento temporal de la información base 15

4.2.2. Comportamiento horario 17

4.2.3. Comportamiento diario 20

4.2.4. Comportamiento semanal.....22

4.2.5. Comportamiento espacial.....25

4.3. Relación de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas.....32

V. CONCLUSIÓN 37

VI. RECOMENDACIONES.....38

VII. BIBLIOGRAFÍA.....39

VIII. ANEXOS.....40

8.1. Anexo 1 Script en IDE Arduino 40

8.2. Anexo 2 Hoja de datos de los sensores.....42

8.2.1. Sensor MICS 6814 NO2 42

8.2.2. Sensor H2S12.....42

8.2.3. Sensor MQ131.....43

8.2.4. Sensor PM 2.5 44

8.2.5. sensor BME 280 44

8.3. Anexo 3 Diseño y ubicación del equipo *Low Cost*.....45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Balance radiactivo del sistema tierra-atmósfera. Fuente: Rodríguez J., R. M. et al. 2004. 5
Figura 2. Ubicación del área de estudio, donde la figura circular de 2km de diámetro incluye en su centro el punto de monitoreo, y la figura irregular el distrito de Lurigancho-Chosica. Fuente: Elaboración Propia. 6
Figura 3. Partes en el diseño del equipo Low Cost. Fuente: Elaboración propia.....7
Figura 4. Lado izquierdo (LI) script del equipo low cost en el IDE ARDUINO, lado derecho (LD) características de la hoja de datos del sensor MICS 6814.....11
Figura 5. Conexiones de los sensores con el microcontrolador ESP32, (a) ESP32 con protoboard, (b) conexiones entre ESP32 y sensores. Fuente: Elaboración propia 11
Figura 6. Fases en el diseño del equipo *Low Cost*. (a) caja de paso y kit de herramientas. (b) *Soldimix* y pintura. (c) Vista general del diseño con soporte y ventilador. (d) diseño final del equipo *Low Cost*. Fuente: Elaboración propia 12
Figura 7. Ubicación de las zonas de interés, punto del equipo Low Cost y posibles influencias en contaminación. Fuente: Adaptado de Google Earth Pro. 13
Figura 8. (a) característica del entorno de la zona de monitoreo. (b) ubicación del equipo en el techo de la vivienda. Fuente: Elaboracion propia. 13
Figura 9. Plataforma ThingSpeak para el almacenamiento de las variables de medición, sólo se observa 250 datos de cada variable. Fuente: Elaboración propia 14
Figura 10. Serie temporal de la información base de las variables. Fuente: Elaboración propia .15
Figura 11. Diagrama de cajas de la información base. Fuente: Elaboración propia 16
Figura 12. Comportamiento temporal horaria de las variables. Fuente: Elaboración propia.....17
Figura 13. Diagrama de cajas del comportamiento horario. Fuente: Elaboración propia.....18
Figura 14. Comportamiento temporal diario de las variables. Fuente: Elaboración propia.....20
Figura 15. Diagrama de cajas del comportamiento diario. Fuente: Elaboración propia.....21
Figura 16. Comportamiento temporal semanal de las variables. Fuente: Elaboración propia.....23
Figura 17. Diagrama de cajas del comportamiento semanal. Fuente: Elaboración propia 24

Figura 18. Información de la regresión lineal del contaminante NO2. Fuente: Elaboración propia 26
Figura 19. Información de la regresión lineal del contaminante SO2. Fuente: Elaboración propia 27
Figura 20. Información de la regresión lineal del contaminante O3. Fuente: Elaboración propia28
Figura 21. Información de la regresión lineal del contaminante PM 2.5. 29
Figura 22. Relación entre el valor observado y el método lineal de los contaminantes atmosféricos. Fuente: Elaboración propia 30
Figura 23. Comportamiento espacial promedio de la contaminación del aire con el satélite Sentinel 5P basado en el INCA. Fuente: Elaboración propia.....31
Figura 24. Correlación de la información base. Fuente: Elaboración propia.....32
Figura 25. Correlación horaria de las variables. Fuente: Elaboración propia 33
Figura 26. Correlación diaria de las variables. Fuente: Elaboración propia 34
Figura 27. Correlación semanal de las variables. Fuente: Elaboración propia 35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de la información horaria.....19
Tabla 2. Descripción de la información diaria. 22
Tabla 3. Descripción de la información semanal. 25
Tabla 4. Descripción de correlaciones de la información base 33
Tabla 5. Descripción de correlación horaria. 34
Tabla 6. Descripción de correlación diaria.....35
Tabla 7. Descripción de correlación semanal.....36

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el distrito de Lurigancho-Chosica desde el cinco hasta el 20 de abril del 2020, se inició elaborando un equipo de calidad de aire, además, se determinó el comportamiento temporal y espacial de los contaminantes atmosféricos y luego su relación con las variables meteorológicas. El equipo se elaboró mediante la parte hardware y software utilizando la tecnología *Low Cost*, microcontrolador ESP32 y el IDE de Arduino respectivamente, seguido se utilizó la plataforma ThingSepak donde se almacenó toda la información y se obtuvo el comportamiento temporal horario, diario y semanal utilizando el software Python, después se utilizó la colección de imágenes del satélite Sentinel 5P disponible en Google Earth Engine (GEE) utilizando su API de Python aplicándole un ajuste lineal. La relación entre los contaminantes y variables meteorológicas consistió en desarrollar una matriz de colores y tablas de correlaciones. Los resultados mostraron que es viable la elaboración de un equipo *Low Cost* con la capacidad de medir NO2, SO2, O3, PM2.5, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar. Además, la serie temporal evidenció que el quince de abril se presentaron las mayores concentraciones de NO2, SO2 y O3 las cuales fueron de 47.6 ug/m3, 66.0 ug/m3 y 333.5 ug/m3 respectivamente, respecto al PM 2.5 se presentó la mayor concentración el dieciocho de abril con 21.18 ug/m3. La regresión lineal entre el equipo Low Cost y la colección de imágenes del Sentinel 5P presentó una correlación de -0.2, 0.1, 0.28 y -0.46 en el NO2, SO2, O3 y PM2.5 respectivamente, por otro lado, espacialmente el SO2, O3 y PM 2.5 presentaron una buena calidad de aire, sin embargo, el NO2 presentó una moderada calidad de aire. Por último, la correlación positiva más alta se da entre el NO2 y la presión atmosférica a nivel horario y diario con valores de 0.69 y 0.84 respectivamente, a nivel semanal el O3 y la temperatura presentan la correlación positiva más alta y baja con valores de 0.75 y -0.6 respectivamente. asimismo, entre contaminantes el NO2 y SO2 presentaron la mayor correlación positiva a nivel horario, diario y semanal con valores de 0.51, 0.67 y 0.88 respectivamente.

Palabras clave

Contaminación atmosférica, Comportamiento temporal y espacial., Equipo Low Cost, Sentinel 5P y API de Python de GEE

ABSTRACT

The present work of investigation was developed in the district of Lurigancho-Chosica from April 5 to April 20, 2020, it began elaborating an air quality equipment, in addition, the temporary and spatial behavior of the atmospheric pollutants was determined and then its relation with the meteorological variables. The equipment was developed through the hardware and software part using the Low Cost technology, ESP32 microcontroller and Arduino's IDE respectively, followed by the ThingSepak platform where all the information was stored and the hourly, daily and weekly temporal behavior was obtained using the Python software, then the Sentinel 5P satellite image collection available in Google Earth Engine (GEE) was used using its Python API applying a linear adjustment. The relationship between pollutants and meteorological variables consisted in developing a color matrix and correlation tables. The results showed that it is feasible to develop a low cost equipment with the ability to measure NO2, SO2, O3, PM2.5, temperature, relative humidity, atmospheric pressure and solar radiation. In addition, the time series showed that on April 15th the highest concentrations of NO2, SO2 and O3 were presented, which were 47.6 ug/m3, 66.0 ug/m3 and 333.5 ug/m3 respectively, with respect to PM 2.5 the highest concentration was presented on April 18th with 21.18 ug/m3. The linear regression between the Low Cost equipment and the Sentinel 5P image collection showed a correlation of -0.2, 0.1, 0.28 and -0.46 for NO2, SO2, O3 and PM2.5 respectively, on the other hand, spatially SO2, O3 and PM 2.5 showed good air quality, however, NO2 showed moderate air quality. Finally, the highest positive correlation is found between NO2 and atmospheric pressure at an hourly and daily level with values of 0.69 and 0.84 respectively, at a weekly level O3 and temperature present the highest and lowest positive correlation with values of 0.75 and -0.6 respectively.

Keywords

Atmospheric pollution, Temporal and Spatial Behavior, Low Cost Equipment, Sentinel 5P and GEE Python API

I. INTRODUCCIÓN

Se observa que a nivel mundial las personas tienden a concertarse en ciudades convirtiéndolas en megaciudades sobrepobladas, la razón principal es conseguir un futuro mejor para sus familias. Esto genera impactos negativos de contaminación atmosférica en las megaciudades, según Molina y Molina, 2004.

Al pasar de los años han existido grandes revoluciones producto de esta concentración, partiendo desde la mecanización energética hasta estos días con el sistema ciberfísico, esto generó un mayor deterioro de los recursos naturales, incluyendo el aire.

El recurso aire es uno de los más grandes problemas medioambientales en todo el mundo, específicamente en las ciudades con mayor densidad de población, así también, Lima se encuentra inmerso en este rubro de contaminación atmosférica que causa malestar y problemas respiratorio desde estornudos hasta la muerte.

Por esta razón, en la presente investigación se plantea los siguientes objetivos, el objetivo general, determinación de la calidad del aire y las variables meteorológicas mediante tecnología de bajo costo en el distrito de Lurigancho-Chosica. Además, los objetivos específicos son, elaborar un equipo de calidad de aire y variables meteorológicas con tecnología *Low Cost*, evaluar el comportamiento temporal y espacial de la calidad del aire en el distrito de Luricgancho-Chosica y por último determinar la relación de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1. Contaminación del aire

La contaminación del aire es la presencia de sustancias que una concentración específica genera daños a la salud de las personas, impactos negativos en los ecosistemas. Según Nevers, 2019. Estos contaminantes provienen de fuentes que se encuentran lejos del control humano.

2.1.1. Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno: dióxido de nitrógeno (NO2), óxido nítrico (NO) y nitroso (N2O) identificados globalmente como NOx se forman en las combustiones a alta temperatura y/o presión con exceso de aire. Carnicer, J.M. 2007.

2.1.2. Anhidrido sulfuroso

El anhidrido sulfuroso (S02) se forma por la combustión del azufre presente en el combustible con el oxígeno aportado por el comburente. Para los combustibles líquidos principalmente los derivados del petróleo las técnicas preventivas pasan por la desulfuración en refinería de estos. Carnicer, J.M. 2007.

2.1.3. Ozono

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno. Su fórmula química es 03. En condiciones normales es un gas incoloro de olor picante característico. Posee un gran poder oxidante y gran tendencia a

transformarse en oxígeno. Las concentraciones de ozono a nivel del suelo son muy pequeñas, incrementándose rápidamente con la altura.

2.1.4. Material particulado (PM 2.5)

El material particulado respirable presente en la atmósfera de nuestras ciudades en forma sólida o líquida (polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen, entre otras) se puede dividir, según su tamaño, en dos grupos principales. A las de diámetro aerodinámico igual o inferior a los 10 µm o 10 micrómetros (1 µm corresponde a la milésima parte de un milímetro) se las denomina PM10 y a la fracción respirable más pequeña, PM2,5. Estas últimas están constituidas por aquellas partículas de diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2,5 micrómetros, es decir, son 100 veces más delgadas que un cabello humano. Linare G.C y Díaz J. J. s.f.

2.2.**Meteorología**

Ciencia encarga de estudiar los propiedades y fenómenos atmosféricas, basándose en las variables meteorológicas en una escala espacial y temporal. Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

2.2.1. Temperatura

Magnitud que está vinculada con la rapidez del movimiento de partículas que constituyen la materia, por ejemplo, a mayor agitación o rapidez mayor será la temperatura. Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

2.2.2. Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Esa cantidad no es constante, sino que dependerá de diversos factores, como si ha llovido recientemente, si estamos cerca del mar, si hay plantas, etc. Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

2.2.3. Presión Atmosférica

El aire que nos rodea, aunque no lo notemos, pesa y, por tanto, ejerce una fuerza sobre todos los cuerpos debida a la acción de la gravedad. Esta fuerza por unidad de superficie es la denominada presión atmosférica, cuya unidad de medida en el Sistema Internacional es el Pascal (1 Pascal = 1N/m2). Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

2.2.4. Radiación solar

La energía transferida por el Sol a la Tierra es lo que se conoce como energía radiante o radiación. Ésta viaja a través del espacio en forma de ondas que llevan asociada una determinada cantidad de energía. Según lo energéticas que sean estas ondas se clasifican en lo que se conoce como el espectro electromagnético. Las ondas más energéticas son las correspondientes al rango del ultravioleta, seguidas por la luz visible, infrarroja y así hasta las menos energéticas que corresponden a las ondas de radio.

La cantidad de radiación solar recibida en un punto se mide mediante un aparato denominado piranómetro. Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

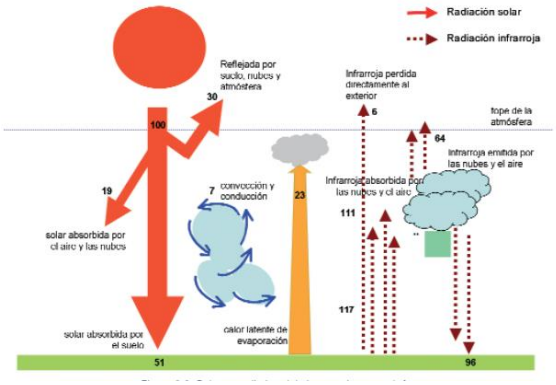


Figura 1. Balance radiactivo del sistema tierra-atmósfera. Fuente: Rodríguez J., R. M. et al. 2004.

III. METODOLOGÍA

3.1. Datos

Los datos de la presente investigación fueron registrados y almacenados en el periodo 4/05/20 al el 20/05/20 en un intervalo de cinco minutos con los sensores *Low Cost*, además se utilizó las imágenes satelitales del Sentinel 5P filtrado en dos secciones, la primera una circunferencia de 2km de diámetros respecto al punto de monitoreo, y la segunda el distrito de Lurigancho-Chosica, ambos en el periodo 04/05/20 al 20/05/20 a escalda diaria.

3.2. Área de estudio

El área de estudio engloba el distrito de Lurigancho-Chosica perteneciente al país de Perú, departamento de Lima, por el lado este se tiene la cordillera de los Andes, por el norte, sur y oeste continente.

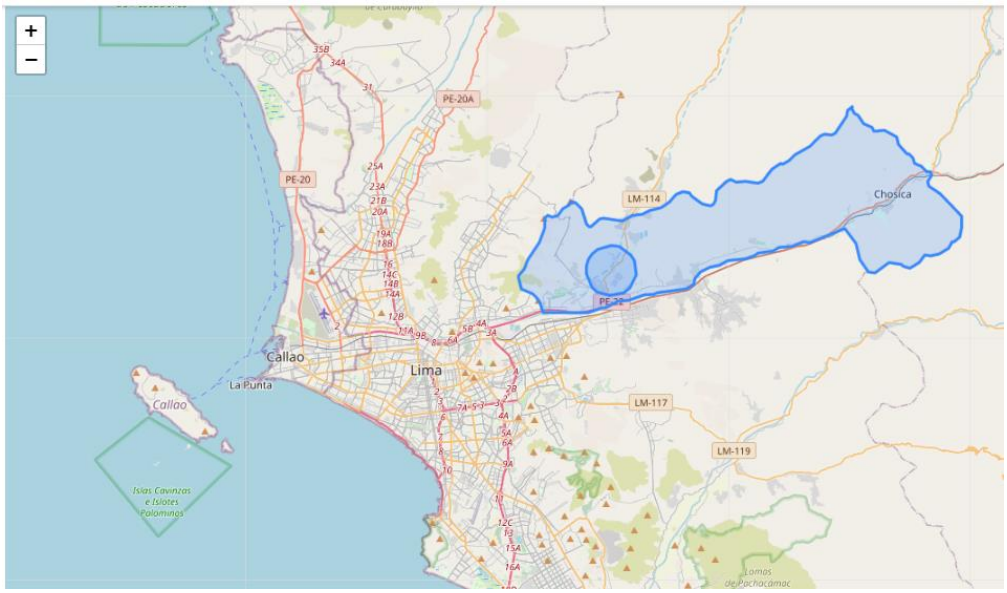


Figura 2. Ubicación del área de estudio, donde la figura circular de 2km de diámetro incluye en su centro el punto de monitoreo, y la figura irregular el distrito de Lurigancho-Chosica. Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Métodos

3.3.1. Elaboración de un equipo de calidad de aire y variables meteorológicas con tecnología *Low Cost*

Los sensores utilizados respecto a la contaminación fueron el SHARP GP2Y14, H2S12, MICS6814 y el MQ131 que registraron PM2.5, SO2, NO2 y O3 respectivamente, respecto a las variables meteorológicas el BME280 (tres variables) y el ML8511 que registraron temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar respectivamente. Así también se utilizó el ESP32, *protoboard*, ventilador de 12V, caja de paso, juego de tubo de agua, *Solidimik*, pistola de silicona, 5 barras de silicona, pistola de soldar, pasta para soldar, soldadura y Tecnopor.

Primero se utilizó la información de las hojas de datos de los sensores (Anexo 2), obteniendo los requisitos (voltaje y amperaje) que requieren, seguido las conexiones de los sensores *Low Cost* con el microcontrolador ESP32, se utilizó cables Jumper de 5 y 10 cm, además de cable N°20 en las conexiones de 30 cm a más. luego se ejecutó el script en el IDE Arduino.

Segundo, se diseñó el equipo con la siguiente figura:

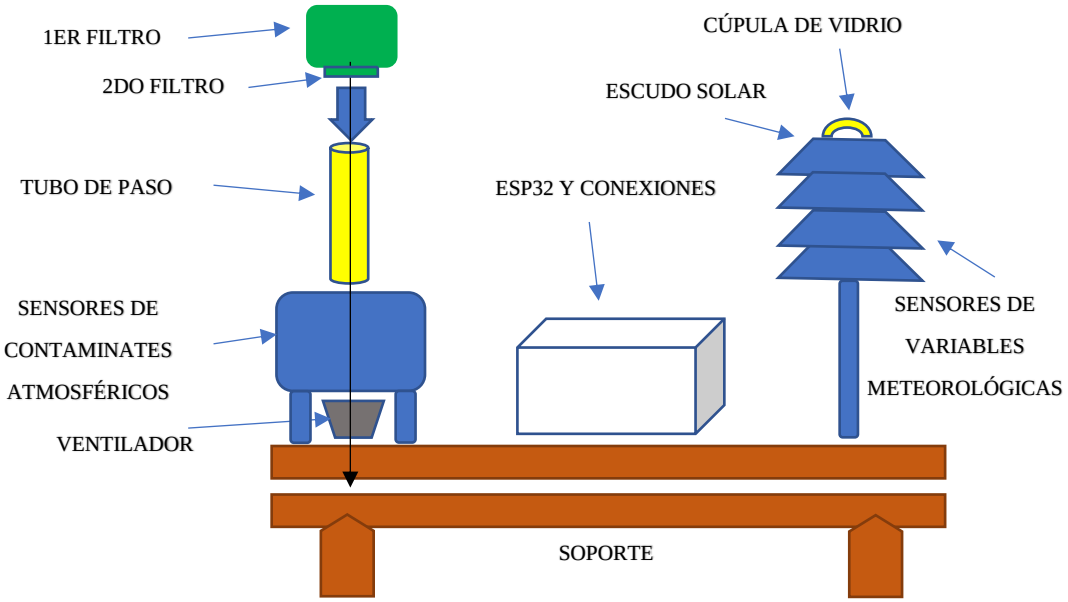


Figura 3. Partes en el diseño del equipo Low Cost. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la fuente de alimentación, se contará con una extensión de 5 metros, la energía se obtendrá de la red eléctrica de 220V, además se utilizó un cargador de celular que disminuya el voltaje a 5 voltios y 1 amperaje.

Tercero, el equipo, se instaló en el punto -76.9020978°W y -11.9913014°S, en el techo de una vivienda muy cercana a empresa de Cemento Inka y al costado de la carretera Cajamarquilla en el Asentamiento Humano "Las praderas de Huachipa".

3.3.2. Evaluación del comportamiento temporal y espacial de la calidad del aire en el distrito de Lurigancho-Chosica

Toda la información registrada directamente se denominará información cruda, separadas en variables de contaminantes y meteorológicas.

En los contaminantes se utilizó el método de reescalación, consiste en usar la información de la hoja de datos de los sensores y transformar el rango de las lecturas analógicas a contaminantes usando las siguientes ecuaciones, aunque en el caso del PM2.5 y ozono se utilizó dos ecuaciones diferentes.

$$K = 0.082 * \frac{temperatura + 273.15}{\frac{presión\ atmosférica * 100}{101325}} \quad (1)$$

$$NO2_{RAW} = analogRead(CMJU_{NO2}) \quad (2)$$

$$NO2_{COV} = 0.05 + NO2_{RAW} * ((10 - 0.05)/4095) \quad (3)$$

$$NO2_{ug/m3} = NO2_{COV} * 48 * \frac{1000}{K} \quad (4)$$

$$SO2_{COV} = 1 + SO2_{RAW} * \frac{499}{4095} \quad (5)$$

$$SO2_{ug/m3} = SO2_{COV} * 64 * \frac{1000}{K} \quad (6)$$

$$OZONO_{VOLTAJE} = OZONO_{RAW} * \frac{5}{4095} \quad (7)$$

$$R_{S_{OZONO}} = 1000 * ((5 - OZONO_{VOLTAJE})/OZONO_{VOLTAJE}) \quad 8$$

$$OZONO_{ug/m^3} = OZONO_{VOLTAJE} * 48 * \frac{1000}{K} \quad 9$$

$$calVoltage = voMeasured * \frac{5}{1024} \quad 10$$

$$dustDensity = (0.14 * calcVoltage - 0.1) \quad 11$$

Las ecuaciones 2,3,4,5 y 6 utilizan el método de reescalación, la ecuación 7, 8 y 9 utilizan la ecuación según Rojas García, J.F. 2019. La ecuación 10 y 11 está referida a la determinación de PM2.5 mediante el microcontrolador Arduino, la cual trabaja con 10 bits (1024), en el caso del ESP32 trabaja con 12 bits (4096), por esta razón la ecuación es solo referencial en el trabajo de investigación.

El $NO2_{RAW}$, $SO2_{RAW}$, $OZONO_{RAW}$ y $voMeasured$ son las lecturas analógicas directas del sensor, así también, el $NO2_{COV}$, $SO2_{COV}$ y $R_{S_{OZONO}}$ es el resultado de la reescalación, por otro lado $calVoltage$ es la transformación de analógico a voltaje y por último el $NO2_{ug/m3}$, $SO2_{ug/m3}$ y $OZONO_{ug/m^3}$ es la información transformada a $^{ug}/_{m^3}$ y el $dustDensity$ en $^{mg}/_{m^3}$.

Las variables meteorológicas utilizaron las ecuaciones según De la Fuente Raíz, S. 2019.

$$temperatura = bme.readTemperautre() - 0.97 \quad 11$$

$$Humedad\ Relativa = bme.readHumidity() + 5.45 \quad 12$$

$$Presión\ Atmosférica = \frac{(bme.readPressure() - 360)}{100} \quad 13$$

Luego de tener la nueva información se desarrolló un control mediante un diagrama de cajas, seguido se eliminó los valores *outliers* de la temperatura, humedad, presión, radiación y material particulado.

El resultado de este control se denominó información base, donde se desarrolló un análisis estadístico que consistió en series de tiempo y diagramas de cajas.

Segundo, se determinó el comportamiento horario, diario, horario y semanal, para los contaminantes, desarrollando el promedio de la información base, luego se elaboró el análisis estadístico.

El comportamiento espacial se desarrolló mediante el promedio de los dieciséis días, donde se inició con la conexión entre GEE y Python, seguido, se extrajo las imágenes satelitales de NO2, SO2, O3 e índice de aerosol.

Para corroborar la información del satélite se comparó con el equipo de campo, por tal motivo, se creó el punto de monitoreo (-76.9020978°W y -11.9913014°S con un *buffer* de 2km), después se usó el paquete *ipygee* para extraer series temporales de aquellas.

La primera serie temporal que se extrajo fue con una reducción del punto de monitoreo, donde se comparó la información mediante una regresión lineal con el paquete *statsmodels*, donde se mostró el R^2, los parámetros (pendiente e intercepción) y la ecuación lineal, no se consideró la importancia de la correlación, sino la finalidad es transformar las unidades de las imágenes satelitales a ug/m3. Luego se graficó la dispersión de los datos observador (equipo *low cost*) y los datos transformados (Sentinel 5P)

Por último, se redujo las imágenes satelitales al contorno del distrito de Lurigancho Chosica usando la función *clip()* y *mean()* sobre la colección de imágenes transformadas por la ecuación lineal y se graficó usando la función *madisplay*.

3.3.3. Determinación la relación de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas

Se determinó la correlación existente a nivel de la información base (información tratada), horario, diario y semanal, se utilizó un gráfico de correlación con un rango de colores de azul blanco y rojo donde azul está referido a valores negativo y rojos a valores positivos, además se mostró una tabla de correlaciones.

IV. RESULTADOS Y DISCUCIÓN

4.1. Equipo de calidad de aire y variables meteorológicas con tecnología Low Cost

Primero se muestra una parte del código del funcionamiento de conexiones entre sensores con el microcontrolador ESP32. El código completo está en el Anexo 1 y los datasheet en el Anexo 2.

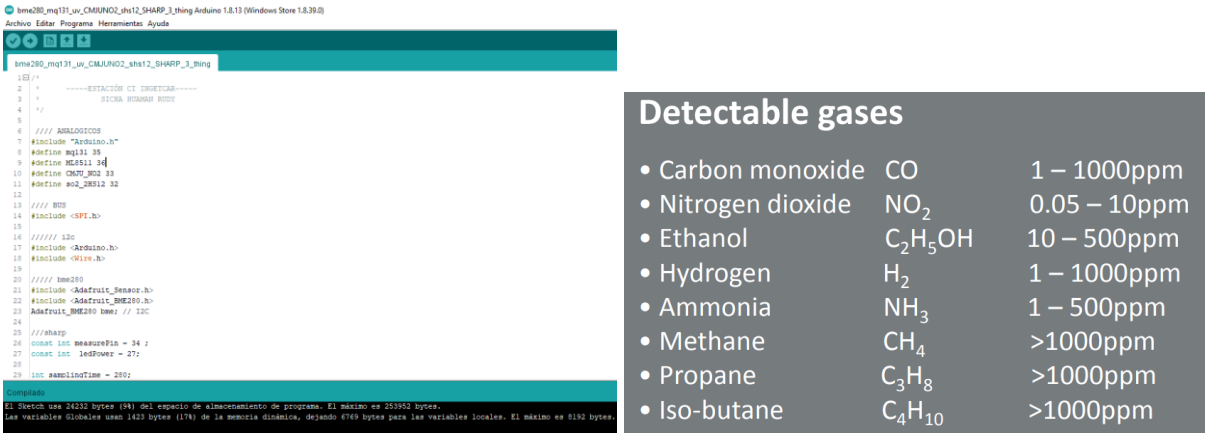


Figura 4. Lado izquierdo (LI) script del equipo low cost en el IDE ARDUINO, lado derecho (LD) características de la hoja de datos del sensor MICS 6814

Después se procedió a armar la estructura y conexiones entre el ESP32 y los sensores

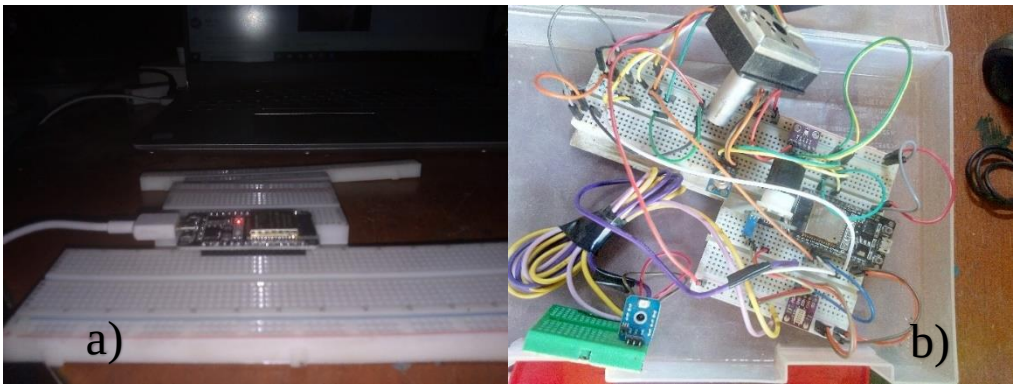


Figura 5. Conexiones de los sensores con el microcontrolador ESP32, (a) ESP32 con protoboard, (b) conexiones entre ESP32 y sensores. Fuente: Elaboración propia

Desarrollo de la segunda parte, diseño del equipo y sus componentes requeridos. También se agregan etapas intermedias en el Anexo 3.

Figura 6. Fases en el diseño del equipo *Low Cost*. (a) caja de paso y kit de herramientas. (b) *Soldimix* y pintura. (c) Vista general del diseño con soporte y ventilador. (d) diseño final del equipo *Low Cost*. Fuente: Elaboración propia

El flujo de aire estará a cargo del ventilador de 12V, el primer filtro fue una malla metálica y el segundo filtro una malla metálica más tupida, los sensores se ubicaron en la parte inferior del equipo, montados en un soporte metálico encima del ventilador. El equipo requirió dos puntos de conexión de energía, el primero en el ESP32 con cargador de celular de 5V y 1 A, el segundo en el ventilador mediante un cargador de 12V y 2 A, aquí se utilizó un adaptador entre los cables positivos y negativos con el enchufe del cargador.

El ESP32, *protoboard* y conexiones se colocaron dentro de la cada de paso, por último, el soporte general debe sostener el diseño y permitir que el flujo de viento no influencia en las tomas de muestras de aire.

Tercera parte, por seguridad de instalo en una vivienda en el asentamiento humando Las praderas de Huachipa perteneciente al distrito de Lurigancho-Chosica. Se ubicó en el techo a unos 10 metros de la pista sin asfalto, a 20 metros de la pista asfaltada y a 40 metros de la empresa Cementos Inka.

Figura 7. Ubicación de las zonas de interés, punto del equipo Low Cost y posibles influencias en contaminación.
Fuente: Adaptado de Google Earth Pro.

Figura 8. (a) característica del entorno de la zona de monitoreo. (b) ubicación del equipo en el techo de la vivienda.
Fuente: Elaboracion propia.

La investigación se llevo a cabo en medio de la cuarentena, por tal motivo no existió mucha influencia de los sectores transporte e industria, sino más bien por las condiones meteorológicas, específicamente el viento que perturba el polvo del suelo al igual que la temperatura.

4.2. Comportamiento temporal y espacial de la calidad del aire en el distrito de Lurigancho-Chosica

La información cruda se almacenó en la nubes mediante la plataforma ThingSpeak, a continuación se observan las variables.

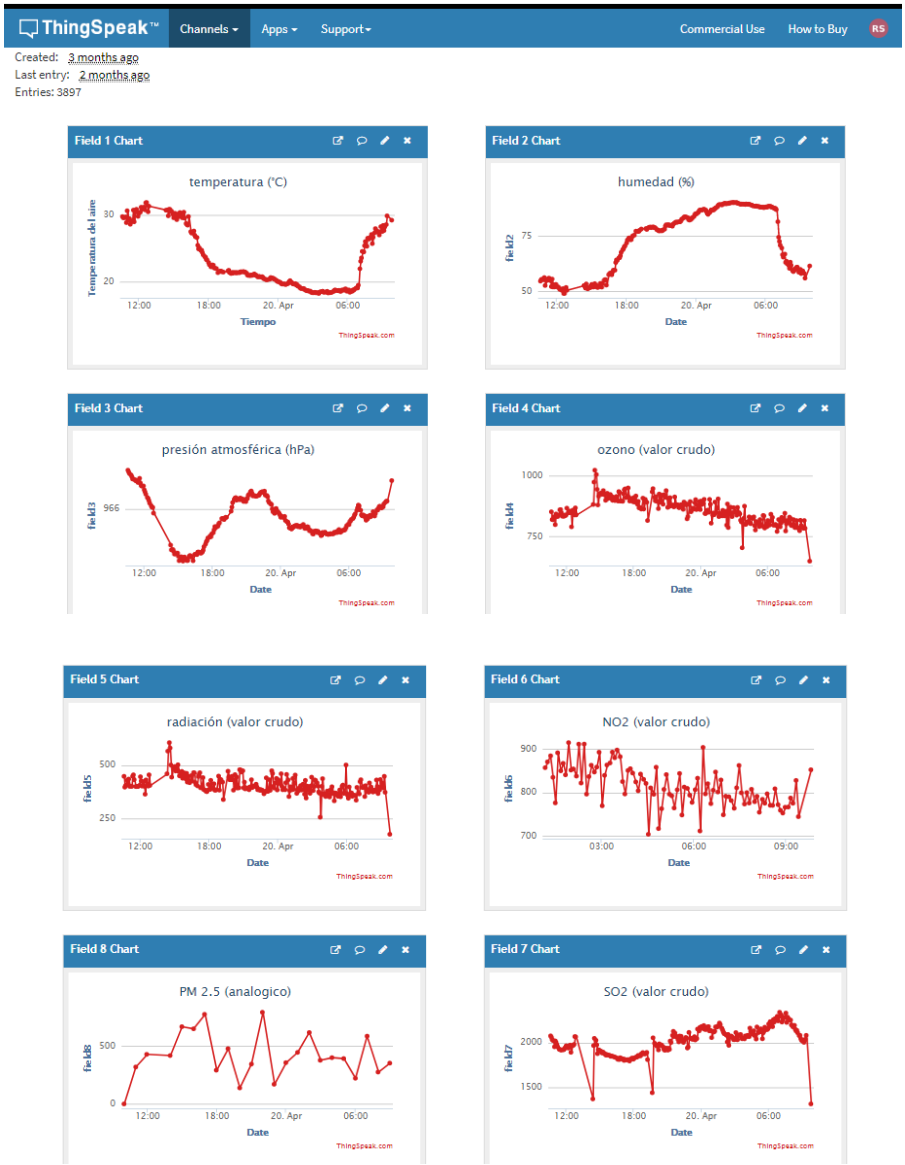


Figura 9. Plataforma ThingSpeak para el almacenamiento de las variables de medición, sólo se observa 250 datos de cada variable. Fuente: Elaboración propia

4.2.1. Comportamiento temporal de la información base

La información cruda (anexo 4) con 3897 filas y 14 columnas como salida del ThingSpeak, mediante el análisis estadístico se transformó y redujo a 1287 filas y 9 columnas definiéndola como la información base, a continuación, se graficó esta serie temporal. Además, por cuestiones de criterio se dividió los resultados del NO2 y PM2.5 entre 100, el SO2 y O3 entre 10000 con la finalidad de que la información sea más convincente respecto a las circunstancias del estudio.

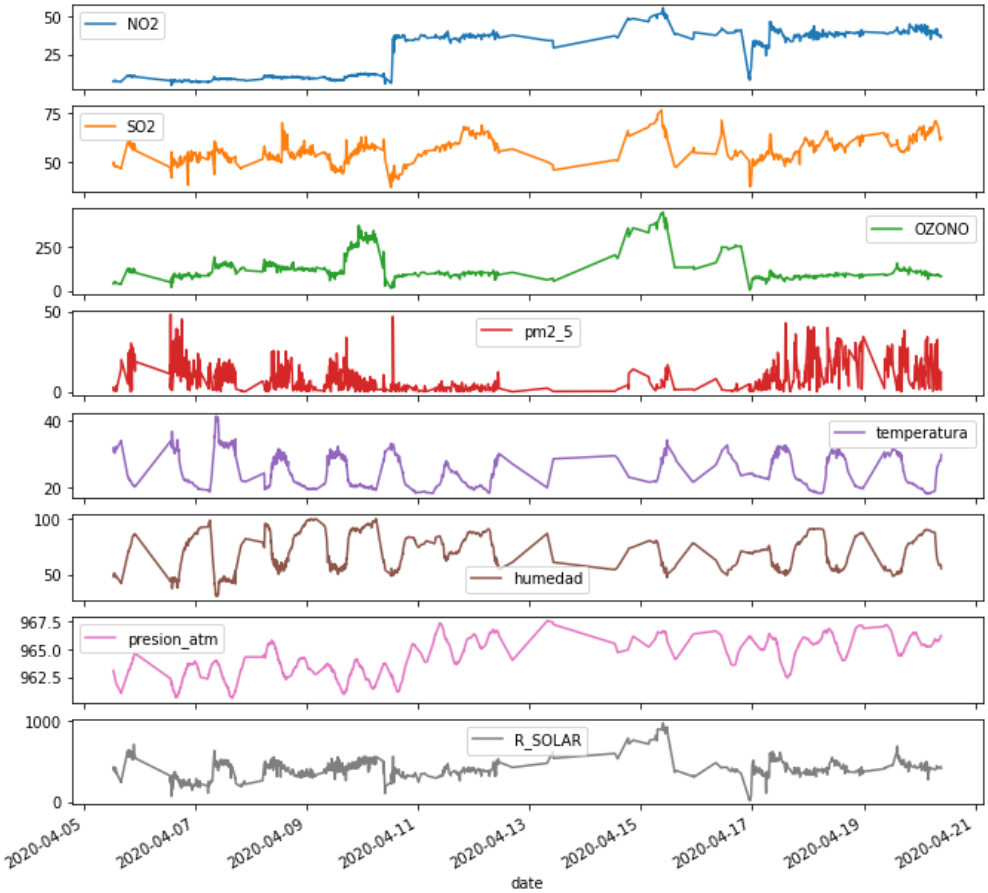


Figura 10. Serie temporal de la información base de las variables. Fuente: Elaboración propia

La información mostró variaciones durante el día, sin embargo, al trabajar con la nube y por la gran saturacion del internet en el periodo de medición debido a la cuarentena existieron momentos en donde el equipo registró pero no subió la información a la nube generando datos perdidos.

Diagrama de cajas de la información base

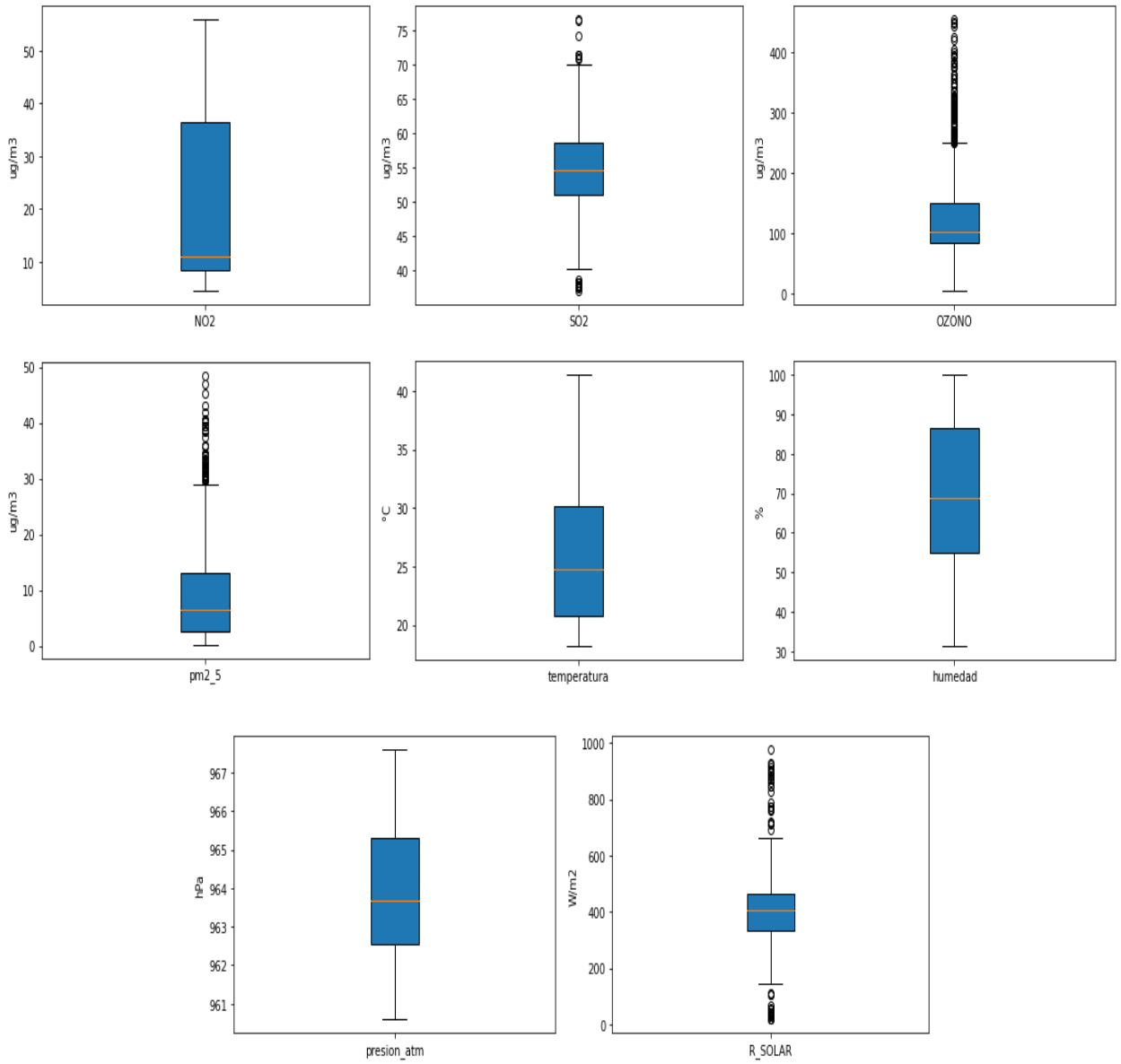


Figura 11. Diagrama de cajas de la información base. Fuente: Elaboración propia

Se observa que el NO2, temperatura, Humedad y presión atmosférica no presentan valores de *outliers*, los demás presentan una gran cantidad de datos *outliers* a expeción del SO2 que presenta en menor cantidad. Los outliers pueden tener dos orígenes, la primera es la condición de de la atmosfera en un incremento o disminución de la contaminción o de las condiciones meteorológicas.

La segunda esta referida a la fuente de energía y el uso eficiente de este, al ser equipos electrónicos tienden a presentar variaciones por el tipo de energía suministrada, por ellos es muy importante calcular la potencia óptima (voltaje y amperaje) en la cual trabaja el equipo.

4.2.2. Comportamiento horario

Es el resultado del promedio de la información básica por hora, a continuación, se muestra la serie temporal horaria.

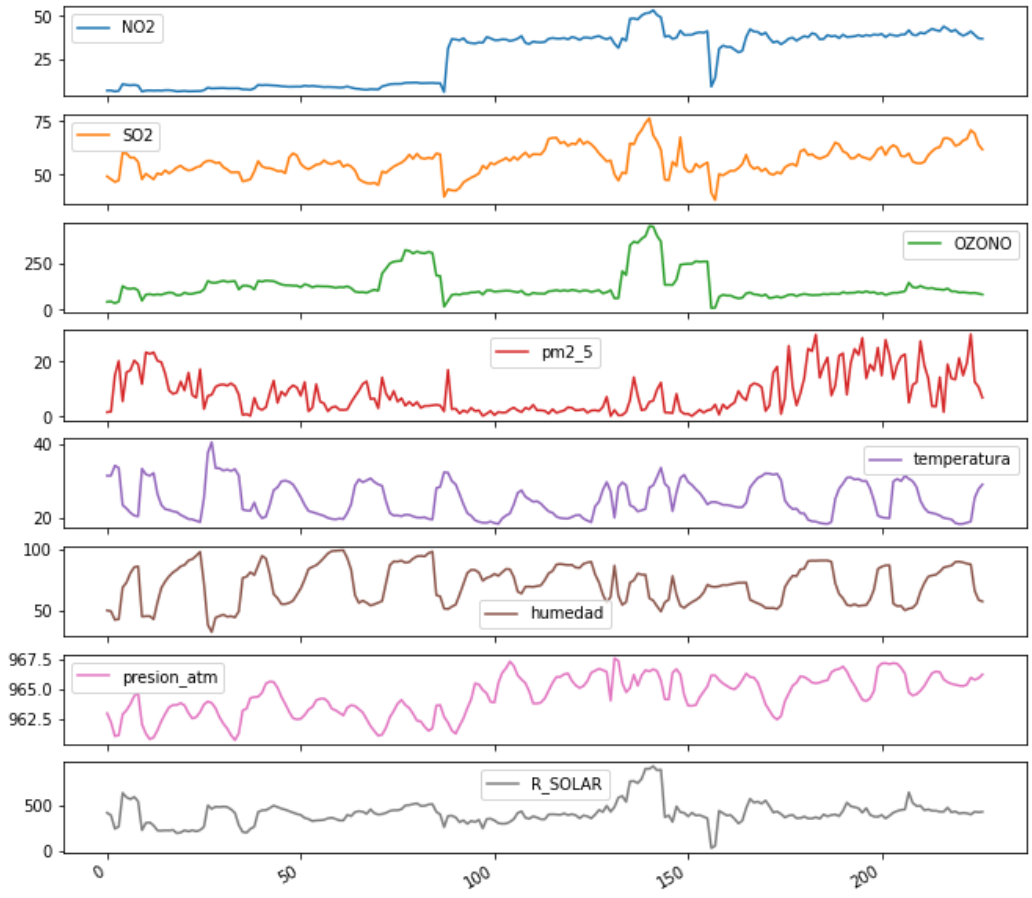


Figura 12. Comportamiento temporal horaria de las variables. Fuente: Elaboración propia.

Se observa el comportamiento similar entre el NO2, SO2, O3 y la radiación solar, la temperatura y la humedad presentan una relación inversa.

Diagrama de cajas de la información horaria.

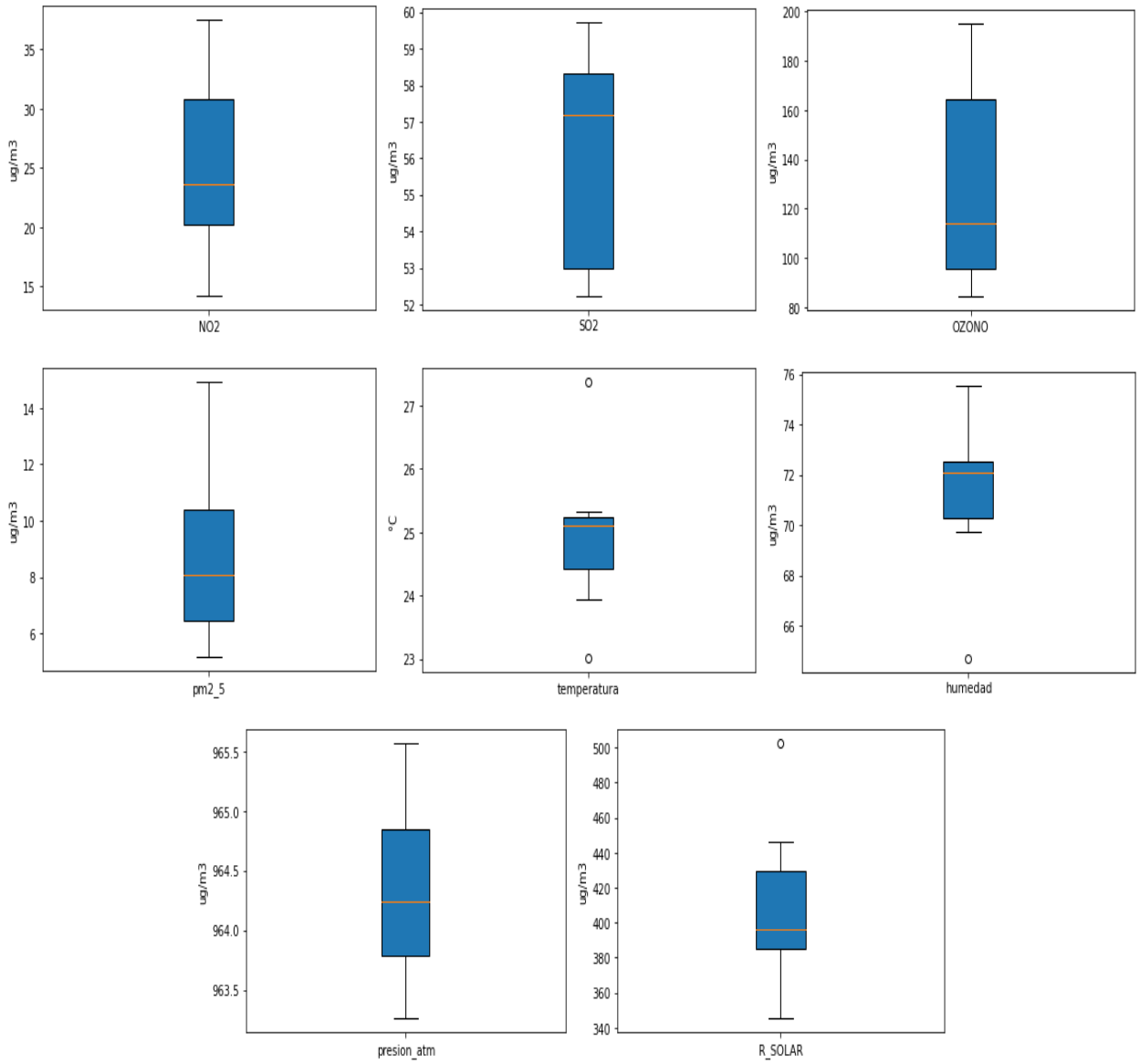


Figura 13. Diagrama de cajas del comportamiento horario. Fuente: Elaboración propia

Se observa una menor cantidad de *outliers* respecto a la información base, donde el SO2 presenta una mayor dispersión por el rango alcanzado en su box plot.

Visualización de la descripción de la información horaria

Tabla 1. Descripción de la información horaria

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
count	227.000000	227.000000	227.000000	227.000000	227.000000	227.000000	227.000000	227.000000
mean	24.809912	71.559471	964.441894	127.774714	411.798634	26.832115	56.112423	8.700132
std	4.804738	15.715154	1.654566	78.373627	126.415716	14.775718	6.427894	7.368263
min	18.330000	32.530000	960.730000	9.850000	31.680000	6.420000	38.100000	0.270000
25%	20.580000	56.855000	963.255000	85.205000	352.210000	9.620000	51.745000	2.525000
50%	23.510000	72.520000	964.570000	100.160000	400.580000	35.360000	55.710000	6.460000
75%	29.150000	85.860000	965.770000	131.000000	454.165000	38.575000	59.900000	12.845000
max	40.470000	99.370000	967.580000	444.740000	924.500000	53.370000	76.520000	30.000000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que se obtiene 227 datos horarios, el NO2 está entre el rango de 6.42 a 76.52 ug/m3, el SO2 entre 38.1 a 76.5 ug/m3, el O3 entre 9.9 a 444.7 ug/m3 y el PM2.5 entre 0.27 a 30 ug/m3.

4.2.3. Comportamiento diario

Es el resultado del promedio de la información básica durante un día, a continuación, se muestra la serie temporal diaria.

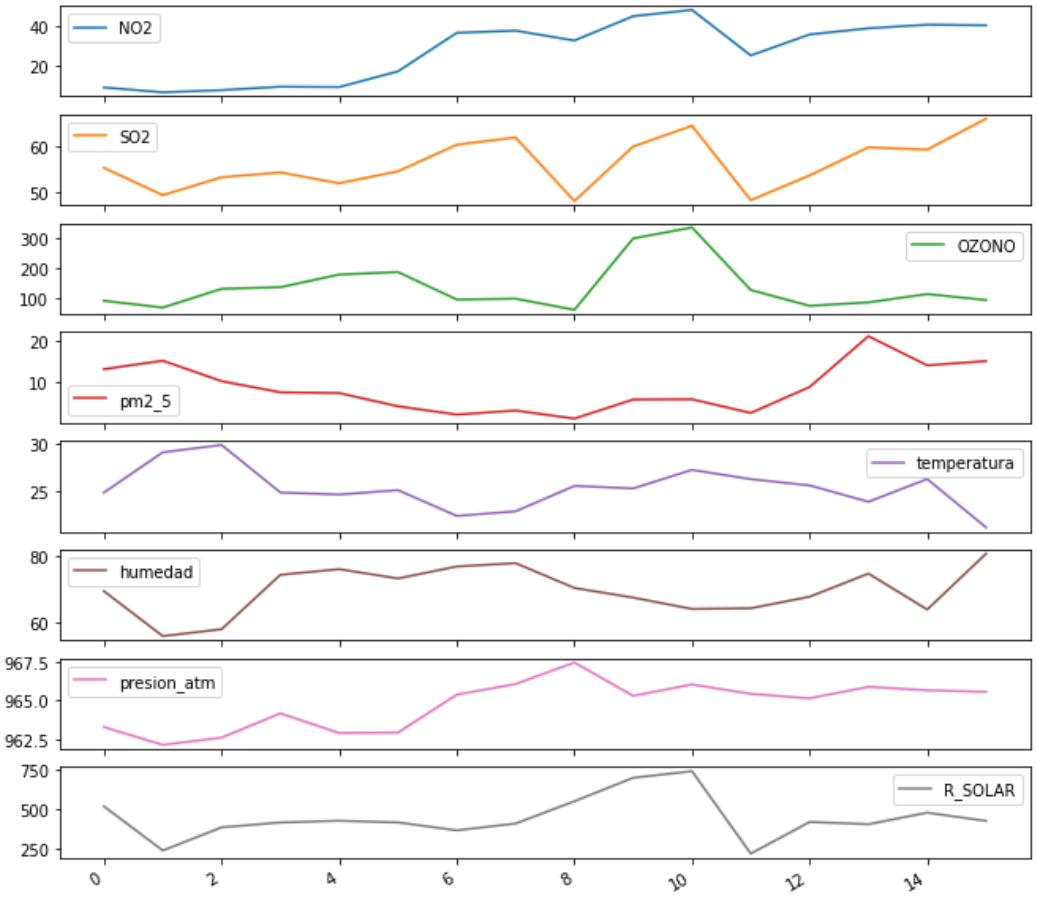


Figura 14. Comportamiento temporal diario de las variables. Fuente: Elaboración propia

Se obversa una mejor similitud en el comportamiento del NO2, SO2, O3 y la radiación solar, el máximo valor de la presión atmosférica se relaciona con el mínimo valor de todos los contaminantes. El PM2.5 presenta una variación relacionada indirectamente a la temperatura y radiación solar, además una relación directa a la humedad relativa

El día 10 que sería el 15/04/20 presenta los mayores valores de contaminación en gases a nivel horario. Respecto al pm 2.5 fue el 13 que sería 18/04/20.

Diagrama de cajas del comportamiento diario

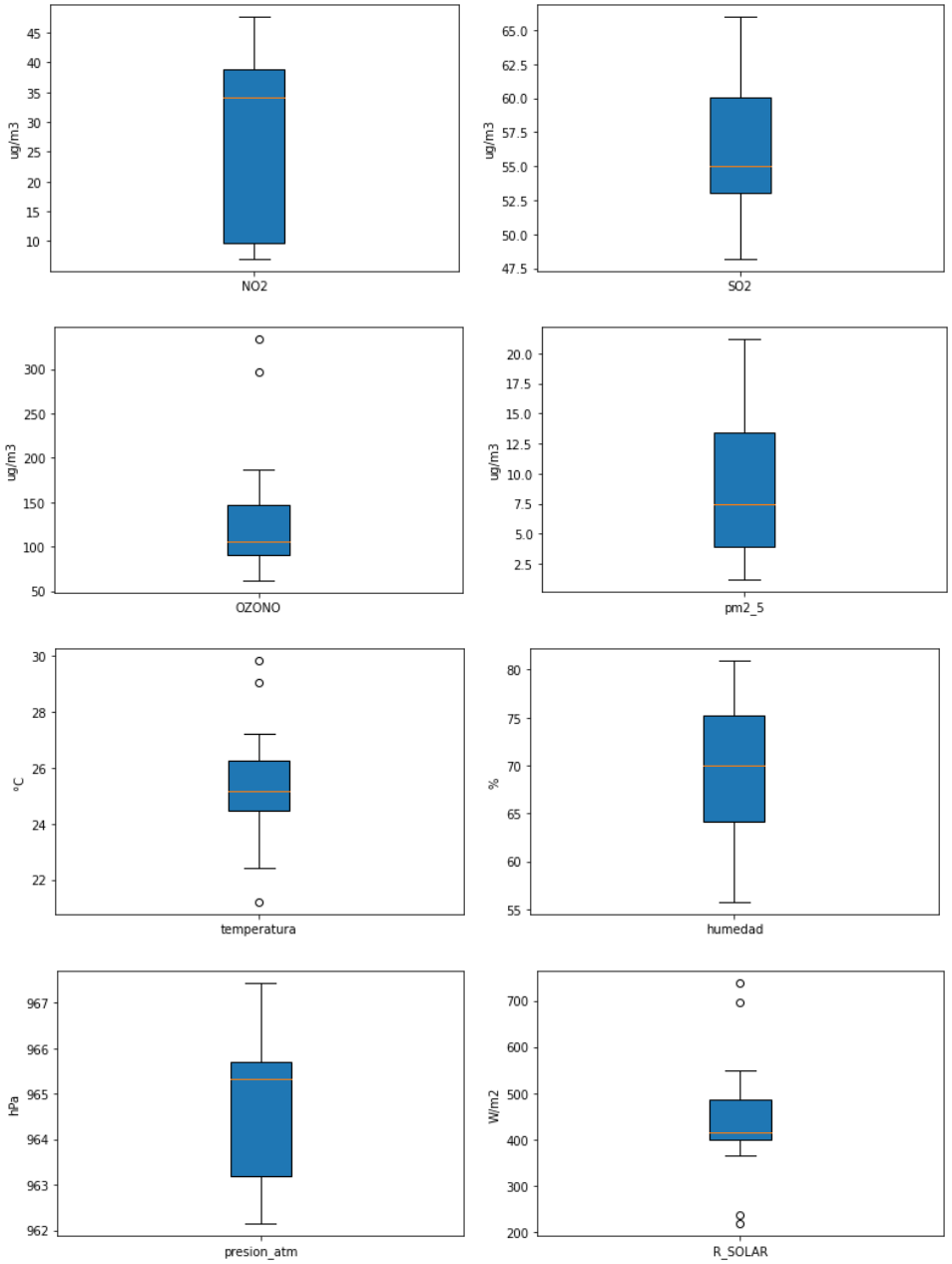


Figura 15. Diagrama de cajas del comportamiento diario. Fuente: Elaboración propia

Se obversa una gran disminución de los *outliers* respecto a la información base, por otro lado, el O3, temperatura y radiación solar presentan algunos valores de *outliers*, esto está referido a que en la información base estas variables presentaban la mayor cantidad de datos *outliers*.

Visualización de la descripción de la información diaria

Tabla 2. Descripción de la información diaria.

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
count	16.000000	16.000000	16.000000	16.000000	16.000000	16.000000	16.000000	16.000000
mean	25.301875	69.745625	964.740625	136.033750	443.308750	27.470625	56.330000	8.611875
std	2.225376	7.272463	1.525929	78.650544	135.540538	14.755858	5.527331	5.772548
min	21.200000	55.760000	962.150000	61.850000	218.880000	7.040000	48.190000	1.180000
25%	24.450000	64.207500	963.202500	90.402500	399.002500	9.765000	53.007500	3.912500
50%	25.190000	69.970000	965.330000	106.225000	416.690000	34.030000	54.995000	7.465000
75%	26.252500	75.187500	965.705000	146.872500	486.530000	38.940000	60.067500	13.412500
max	29.830000	80.920000	967.430000	333.470000	737.380000	47.620000	65.970000	21.180000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el rango diario, respecto al NO2 los valores están entre 7.0 a 47.6 ug/m3, el SO2 entre 48.2 a 66.0 ug/m3, el O3 entre 61.9 a 333.47 ug/m3 y el PM 2.5 entre 1.2 a 21.2 ug/m3.

4.2.4. Comportamiento semanal

Es el resultado del promedio de la información básica durante un día, además del promedio de cada día de la semana de todo el periodo de estudio, a continuación, se muestra la serie temporal diaria.

La ecuación que se utilizó

$$D\acute{I}A_{PROMEDIO} = \frac{D\acute{I}A_1_{SEMANA\ 1} + DIA_1_{SEMANA\ 2} + D\acute{I}A_1_{SEMANA\ 3} \ldots + D\acute{I}A_1_{SEMANA\ N}}{N} \qquad 14$$

- $D\acute{I}A_{PROMEDIO}$: $Día\ de\ interés\ (L, M, M, J, V, S\ y\ D)$

- $D\acute{I}A_1_{SEMANA\ N}: Día\ de\ interés\ de\ la\ semana\ N$
- N: Número de semana

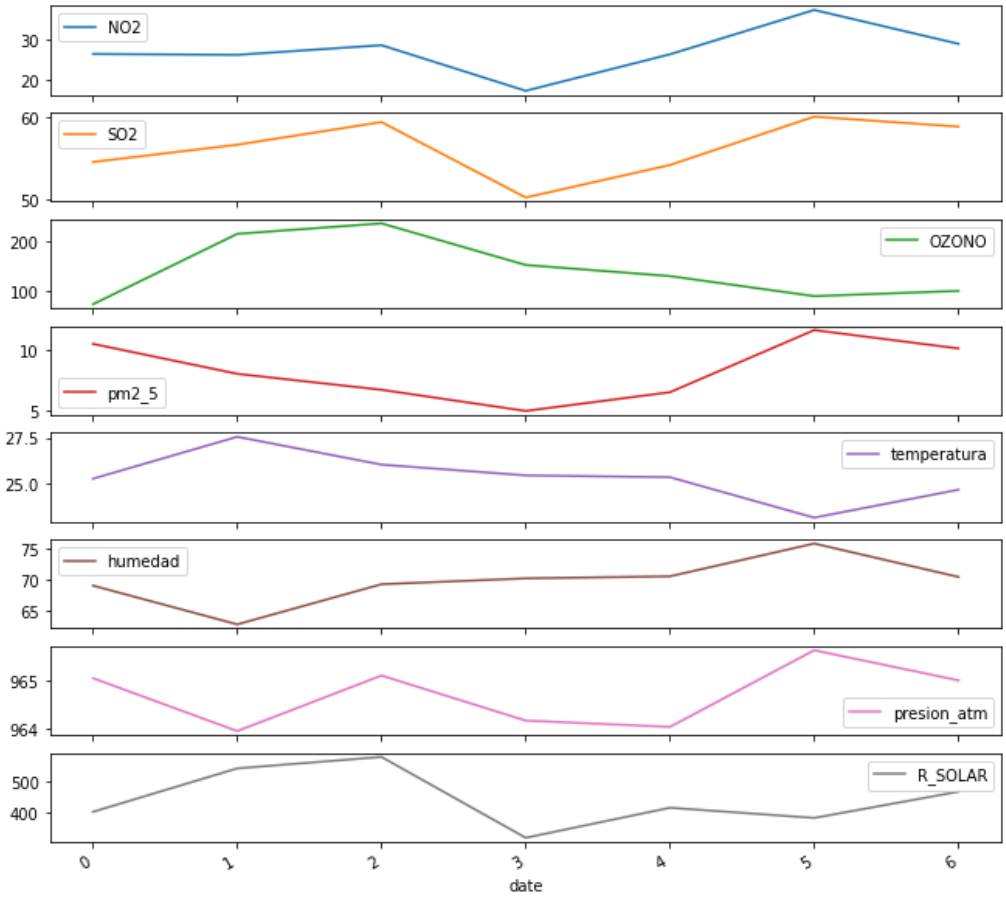


Figura 16. Comportamiento temporal semanal de las variables. Fuente: Elaboración propia

Se observa un comportamiento semejante entre las variables NO2, SO2, PM2.5, humedad relativa y presión atmosférica. El O3 presenta un comportamiento semejante con la temperatura y radiación solar

El día 5 que sería el sábado presenta mayor contaminación respecto al NO2 y SO2, además el día 2 que corresponde al miércoles presenta concentraciones altas para todos los gases. Respecto al PM2.5 se observó la mayor concentración el sábado.

Diagrama de cajas del comportamiento semanal

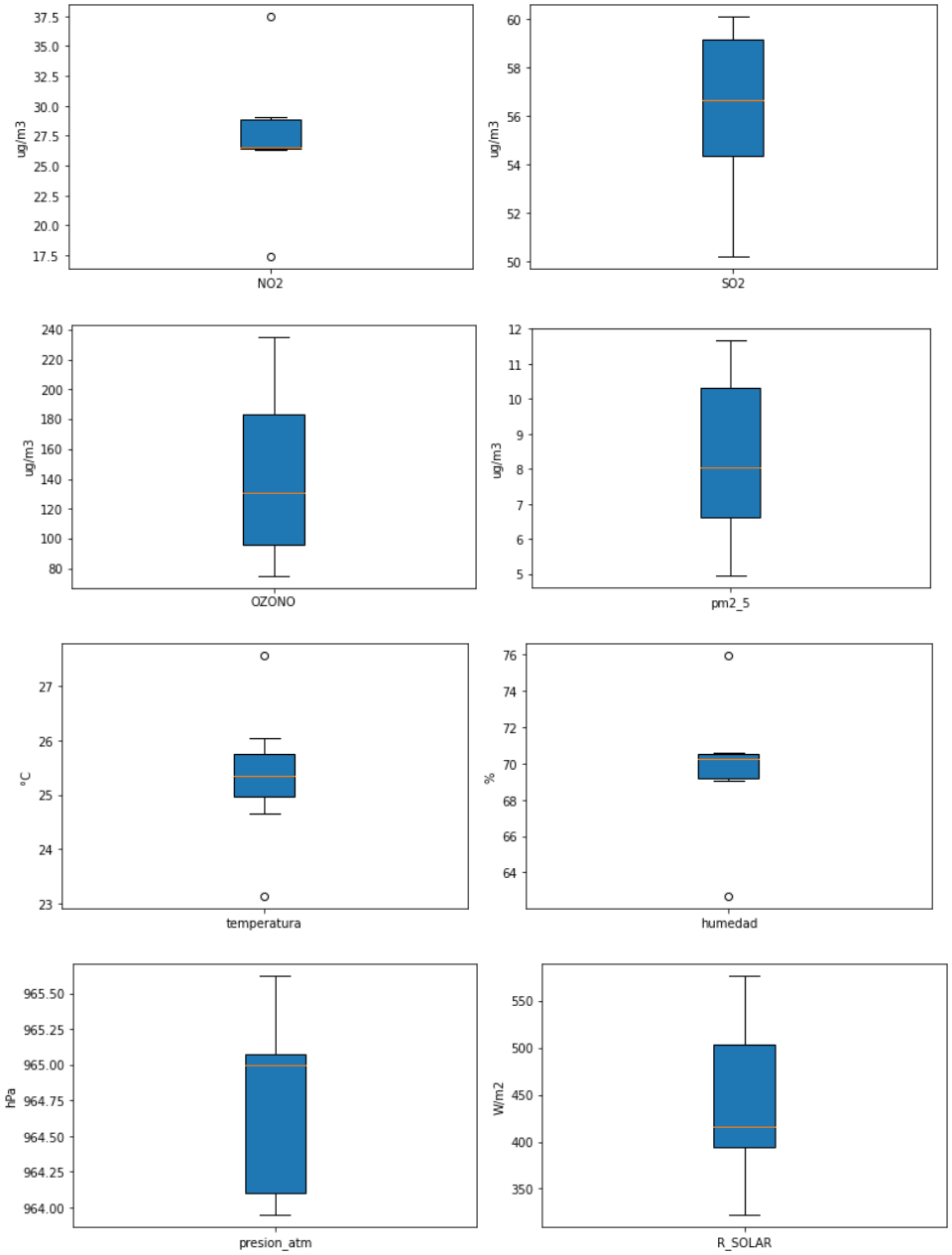


Figura 17. Diagrama de cajas del comportamiento semanal. Fuente: Elaboración propia

Visualización de la descripción de la información semanal.

Tabla 3. Descripción de la información semanal.

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
count	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000	7.000000
mean	25.350156	69.743641	964.701273	142.862769	444.430003	27.423866	56.277317	8.364636
std	1.336168	3.880865	0.645954	61.662628	89.385195	5.885903	3.541344	2.469705
min	23.137410	62.688379	963.948849	75.058549	322.305536	17.417412	50.212968	4.957587
25%	24.965491	69.156127	964.100574	96.236443	394.295898	26.391697	54.363190	6.612189
50%	25.346064	70.229729	964.997491	130.701397	416.692514	26.541888	56.652098	8.038351
75%	25.741109	70.515744	965.070280	183.425011	503.634445	28.888635	59.137418	10.333192
max	27.554418	75.943638	965.620861	234.956532	576.151283	37.447096	60.074940	11.665749

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el NO2 presenta un rango entre 17.4 a 37.5 ug/m3, el SO2 entre 50.2 a 60.1 ug/m3, el O3 entre 75.1 a 235.0 ug/m3.

4.2.5. Comportamiento espacial

Se desarrolló cuatro regresiones lineales con el paquete *statsmodels* entre la información diaria del equipo *Low Cost* (variable dependiente) y la serie de tiempo de las imágenes satelitales del Sentinel 5P (variable independiente) obtenidos mediante la API de Python de Google Earth Engine (GEE) usando el paquete *ipygee*. Las imágenes satelitales según su información en GEE presentan unidades de mol/m2 siendo multiplicado 10^6 para convertirlo a umol/m2, sin embargo, las unidades de contaminación están en ug/m3, por tal razón fue necesario utilizar la regresión lineal y poder expresarlos en unidades de contaminación.

$$CONTAMINANTE_{ug/m^3} = A * SENTINEL\ 5P + B \qquad 15$$

Donde

- $CONTAMINANTE_{ug/m^3}$: Contaminante transformado de umol/m2 a ug/m3
- $SENTINEL\ 5P$: Buffer de 2 km respecto al punto de monitoreo de las imágenes satelitales
- A y B: Donde A es la pendiente y B es el intercepto

Resultados de la regresión lineal del contaminante NO2

```
datos generales del NO2
                            OLS Regression Results
==============================================================================
Dep. Variable:                    NO2   R-squared:                       0.037
Model:                            OLS   Adj. R-squared:                 -0.032
Method:                 Least Squares   F-statistic:                    0.5392
Date:                Sun, 05 Jul 2020   Prob (F-statistic):              0.475
Time:                        00:23:18   Log-Likelihood:                -64.951
No. Observations:                  16   AIC:                             133.9
Df Residuals:                      14   BIC:                             135.4
Df Model:                           1
Covariance Type:            nonrobust
==============================================================================
                 coef    std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
------------------------------------------------------------------------------
Intercept     38.0413     14.876      2.557      0.023       6.136      69.947
NO2_S5        -0.1655      0.225     -0.734      0.475      -0.649       0.318
```

Figura 18. Información de la regresión lineal del contaminante NO2. Fuente: Elaboración propia

La ecuación del NO2 es la siguiente:

$$NO2_{ESTIMADO} = -0.1655 * NO2_{SENTINEL\ 5P} + 38.0413 \qquad 16$$

Donde el $NO2_{SENTINEL\ 5P}$ es la imagen satelital reducida en el punto de monitoreo con un *buffer* de 2 km, el $NO2_{ESTIMADO}$ es el resultado de la transformación de las imágenes satelitales en ug/m3

Resultados de la regresión lineal del contaminante SO2

```
datos generales del SO2
                            OLS Regression Results
==============================================================================
Dep. Variable:                    SO2   R-squared:                       0.001
Model:                            OLS   Adj. R-squared:                 -0.076
Method:                 Least Squares   F-statistic:                    0.01512
Date:                Sun, 05 Jul 2020   Prob (F-statistic):              0.904
Time:                        19:46:43   Log-Likelihood:                -46.632
No. Observations:                  15   AIC:                             97.26
Df Residuals:                      13   BIC:                             98.68
Df Model:                           1
Covariance Type:            nonrobust
==============================================================================
                 coef    std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
------------------------------------------------------------------------------
Intercept     56.0029      1.576     35.531      0.000      52.598      59.408
SO2_S5         0.0006      0.005      0.123      0.904      -0.010       0.011
==============================================================================
```

Figura 19. Información de la regresión lineal del contaminante SO2. Fuente: Elaboración propia

La ecuación del SO2 es la siguiente:

$$SO2_{ESTIMADO} = 0.006 * SO2_{SENTINEL\ 5P} + 56.0029 \qquad 17$$

Donde el $SO2_{SENTINEL\ 5P}$ es la imagen satelital reducida en el punto de monitoreo con un *buffer* de 2 km, el $SO2_{ESTIMADO}$ es el resultado de la transformación de las imágenes satelitales en ug/m3

Resultados de la regresión lineal del contaminante O3

```
datos generales del OZONO
                            OLS Regression Results
==============================================================================
Dep. Variable:                  OZONO   R-squared:                       0.077
Model:                            OLS   Adj. R-squared:                  0.011
Method:                 Least Squares   F-statistic:                     1.170
Date:                Sun, 05 Jul 2020   Prob (F-statistic):              0.298
Time:                        19:46:43   Log-Likelihood:                -91.385
No. Observations:                  16   AIC:                             186.8
Df Residuals:                      14   BIC:                             188.3
Df Model:                           1
Covariance Type:            nonrobust
==============================================================================
                 coef    std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
------------------------------------------------------------------------------
Intercept  -1943.0053   1922.370     -1.011      0.329   -6066.079    2180.068
OZONO_S5       0.0186      0.017      1.082      0.298      -0.018       0.056
==============================================================================
```

Figura 20. Información de la regresión lineal del contaminante O3. Fuente: Elaboración propia

La ecuación del O3 es la siguiente:

$$OZONO_{ESTIMADO} = 0.0186 * OZONO_{SENTINEL\ 5P} - 1943.0053 \qquad 16$$

Donde el $OZONO_{SENTINEL\ 5P}$ es la imagen satelital reducida en el punto de monitoreo con un *buffer* de 2 km, el $OZONO_{ESTIMADO}$ es el resultado de la transformación de las imágenes satelitales en ug/m3

Resultados de la regresión lineal del contaminante PM 2.5

```
datos generales del PM 2.5
                            OLS Regression Results
==============================================================================
Dep. Variable:                  pm2_5   R-squared:                       0.209
Model:                            OLS   Adj. R-squared:                  0.153
Method:                 Least Squares   F-statistic:                     3.707
Date:                Sun, 05 Jul 2020   Prob (F-statistic):             0.0748
Time:                        19:46:43   Log-Likelihood:                -48.357
No. Observations:                  16   AIC:                             100.7
Df Residuals:                      14   BIC:                             102.3
Df Model:                           1
Covariance Type:            nonrobust
==============================================================================
                 coef    std err          t      P>|t|      [0.025      0.975]
------------------------------------------------------------------------------
Intercept      3.3086      3.058      1.082      0.298      -3.250       9.867
AEROSOL_S5 -5.244e-06   2.72e-06     -1.925      0.075   -1.11e-05    5.98e-07
==============================================================================
```

Figura 21. Información de la regresión lineal del contaminante PM 2.5.

La ecuación del PM 2.5 es la siguiente:

$$\text{PM 2.5}_{\,ESTIMADO} = -0.000005244 * AEROSOL_{SENTINEL\ 5P} + 3.3086 \qquad 17$$

Donde el $AEROSOL_{SENTINEL\ 5P}$ es la imagen satelital reducida en el punto de monitoreo con un *buffer* de 2 km, el PM 2.5 $_{ESTIMADO}$ es el resultado de la transformación de las imágenes satelitales en ug/m3

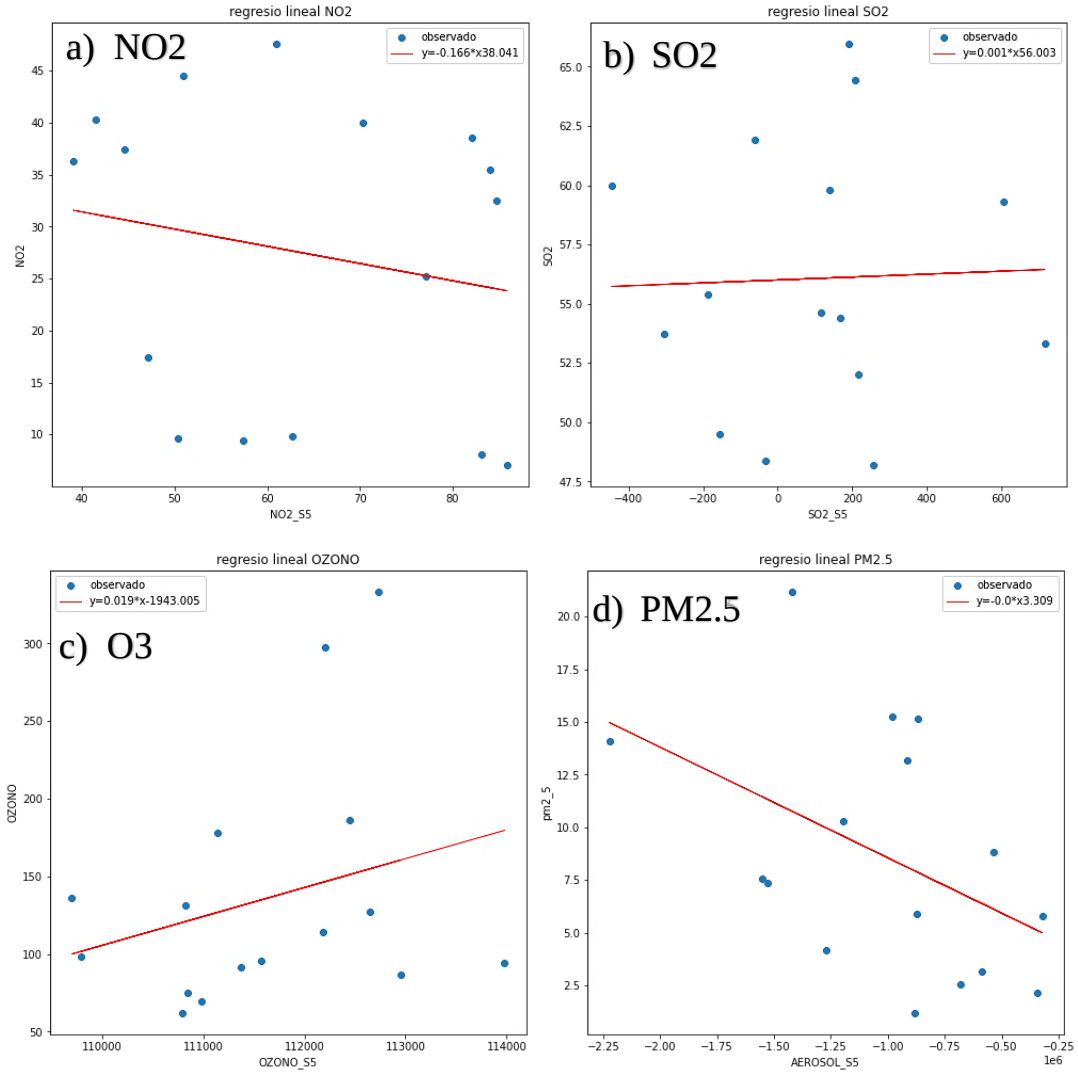


Figura 22. Relación entre el valor observado y el método lineal de los contaminantes atmosféricos.

Fuente: Elaboración propia

Se observa en (a) que no tiene una buena semejanza los datos observados del equipo *Low Cost* con los datos transformados del Sentinel 5P respecto al NO2, esto debido a que el R^2 fue de 0.037 y un r de -0.2.

Se observa en (b) que no existe semejanza entre la información observada y transformada de las imágenes satelitales respecto al SO2. Esto se debe a que presentan un R^2 de 0.01 y un r de 0.1.

Se observa en (c) que no existe semejanza entre la información observada y transformada de las imágenes satelitales respecto al O3. Esto se debe a que presentan un R^2 de 0.077 y un r de 0.28.

Se observa en (d) una relación negativa entre las imágenes satelitales del aerosol con el PM2.5 del equipo *Low Cost*, además presenta un R^2 de 0.209 y un r de -0.46.

Luego de obtener las ecuaciones de transformación, se obtuvo el promedio de la colección de imágenes reducido para el distrito de Lurigancho-Chosica.

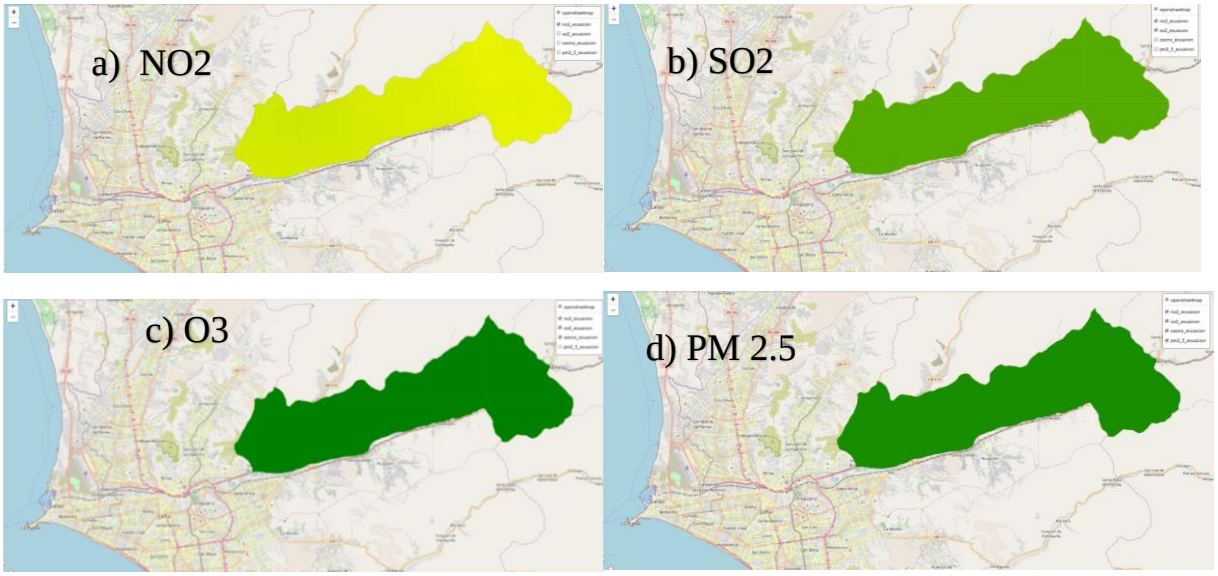


Figura 23. Comportamiento espacial promedio de la contaminación del aire con el satélite Sentinel 5P basado en el INCA. Fuente: Elaboración propia

Se usó el Índice Nacional de la Calidad del Aire (INCA) según la Resolución Ministerial N°181-2016-MINAM basado en el Estándar de Calidad de Aire (ECA) según el Decreto Supremo N°003-2017 MINAM, sin embargo, por cuestiones de facilidad en el script se definió los siguientes rangos.

Se observa el comportamiento de los contaminantes a escala espacial, donde los colores usados en el script fueron verdes, amarillo, anaranjado y rojo, indicando desde calidad de aire bueno $0 < x < 50$, moderado $51 < x < 100$, malo $101 < x < 150$ y VUEC* $151 < x < 200$ respectivamente.

Respecto al NO2 se observa que se presentó una moderada calidad de aire, en el caso del SO2, O3 y PM2.5 también se observa una buena calidad de aire.

4.3. Relación de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas

Se elaboró la correlación de la información base

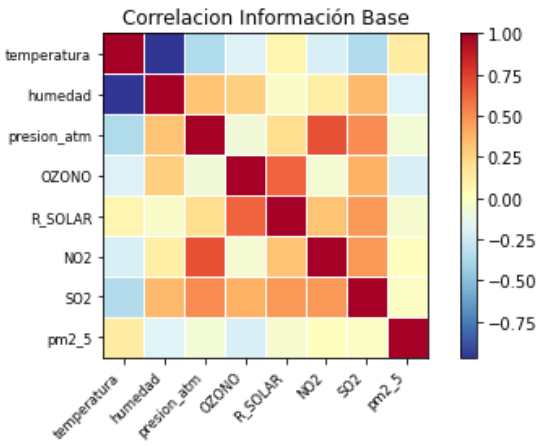


Figura 24. Correlación de la información base. Fuente: Elaboración propia

Se observa que el número de cuadros de color anaranjado a rojo presenta un número de casilleros respecto a los azules, indicando que existe mayores correlaciones positivas en la información base.

En la tabla 4,5 y 6 Se resaltó de color rojo las correlaciones positivas más altas, de color azul las correlaciones negativas más altas y de color verde las correlaciones más altas entre los mismos contaminantes.

Tabla 4. Descripción de correlaciones de la información base

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
temperatura	1.000000	-0.968618	-0.355796	-0.188138	0.070411	-0.203328	-0.346989	0.131677
humedad	-0.968618	1.000000	0.317147	0.276514	-0.018060	0.114639	0.355131	-0.179557
presion_atm	-0.355796	0.317147	1.000000	-0.075516	0.215336	0.686503	0.512260	-0.063820
OZONO	-0.188138	0.276514	-0.075516	1.000000	0.632319	-0.045851	0.389362	-0.206012
R_SOLAR	0.070411	-0.018060	0.215336	0.632319	1.000000	0.323073	0.471618	-0.045527
NO2	-0.203328	0.114639	0.686503	-0.045851	0.323073	1.000000	0.473486	0.016233
SO2	-0.346989	0.355131	0.512260	0.389362	0.471618	0.473486	1.000000	-0.001070
pm2_5	0.131677	-0.179557	-0.063820	-0.206012	-0.045527	0.016233	-0.001070	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el NO2 con la presión atmosférica presentan la mayor correlación positiva la cual fue de 0.69, el SO2 con la temperatura presentan la mayor correlación negativa la cual fue de -0.35 y la mayor correlación entre contaminantes fue de NO2 con el SO2 con 0.47.

Seguido se desarrolló la correlación de la serie temporal horaria.

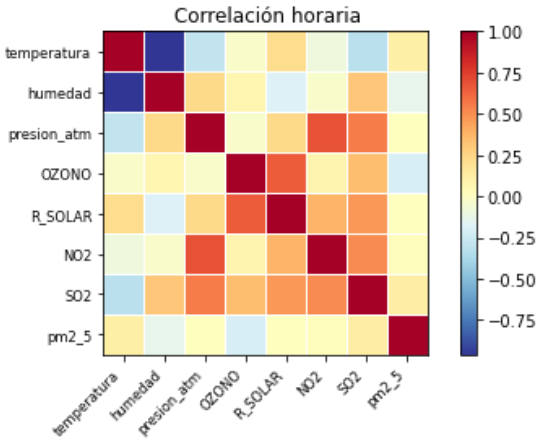


Figura 25. Correlación horaria de las variables. Fuente: Elaboración propia

De igual forma que en la figura 24 se observa una mayor cantidad de correlaciones positivas.

Tabla 5. Descripción de correlación horaria.

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
temperatura	1.000000	-0.960465	-0.285746	-0.015579	0.223644	-0.082419	-0.314086	0.116620
humedad	-0.960465	1.000000	0.237121	0.078199	-0.182040	-0.024205	0.316412	-0.131013
presion_atm	-0.285746	0.237121	1.000000	-0.025723	0.239201	0.689255	0.556243	0.021269
OZONO	-0.015579	0.078199	-0.025723	1.000000	0.662336	0.082101	0.341814	-0.205630
R_SOLAR	0.223644	-0.182040	0.239201	0.662336	1.000000	0.378082	0.472191	0.022583
NO2	-0.082419	-0.024205	0.689255	0.082101	0.378082	1.000000	0.512787	0.033826
SO2	-0.314086	0.316412	0.556243	0.341814	0.472191	0.512787	1.000000	0.131257
pm2_5	0.116620	-0.131013	0.021269	-0.205630	0.022583	0.033826	0.131257	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

Se observó que la correlación positiva más alta fue de 0.69 entre el NO2 y la presión atmosférica, la correlación negativa más alta fue de -0.31 entre el SO2 y la temperatura, además la correlación más alta entre contaminantes es de 0.51 entre el NO2 y SO2.

Después se desarrolló la correlación de la serie temporal diaria.

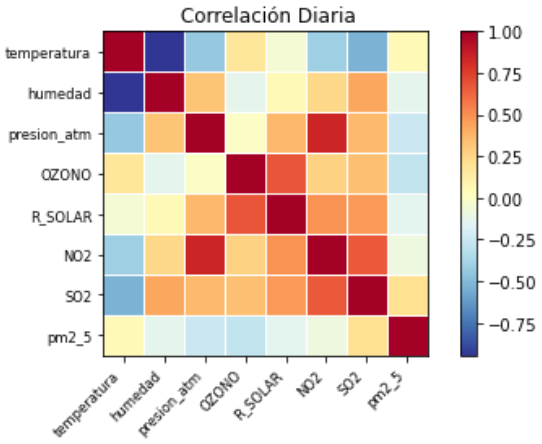


Figura 26. Correlación diaria de las variables. Fuente: Elaboración propia

Se observa al igual que la figura 24 y 25, una mayor cantidad de correlaciones positivas.

Tabla 6. Descripción de correlación diaria.

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
temperatura	1.000000	-0.946731	-0.434039	0.178503	-0.044637	-0.405252	-0.522564	0.064635
humedad	-0.946731	1.000000	0.328851	-0.128392	0.057787	0.249236	0.432539	-0.128358
presion_atm	-0.434039	0.328851	1.000000	0.003972	0.374361	0.842592	0.362957	-0.244144
OZONO	0.178503	-0.128392	0.003972	1.000000	0.685477	0.274676	0.345965	-0.276941
R_SOLAR	-0.044637	0.057787	0.374361	0.685477	1.000000	0.497019	0.468069	-0.138605
NO2	-0.405252	0.249236	0.842592	0.274676	0.497019	1.000000	0.665432	-0.084780
SO2	-0.522564	0.432539	0.362957	0.345965	0.468069	0.665432	1.000000	0.213200
pm2_5	0.064635	-0.128358	-0.244144	-0.276941	-0.138605	-0.084780	0.213200	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la correlación positiva más alta es de 0.84 entre el NO2 y la presión atmosférica, la correlación más negativa es de -0.52 entre el SO2 y la temperatura, además la mayor correlación entre contaminantes es de 0.67 entre el NO2 y SO2.

Después se desarrolló la correlación de la serie temporal semanal

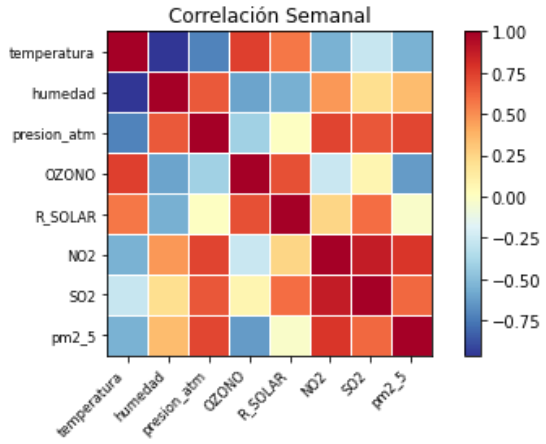


Figura 27. Correlación semanal de las variables. Fuente: Elaboración propia

En la figura 27 se observa una gran diferencia respecto a las figuras 24, 25 y 26, donde las correlaciones positivas (colores anaranjados y rojos) ya no superan alas correlaciones negativas (colores azules), esto se debe a que la información promedio presenta otra distribución, como se indica en la ecuación 14.

Tabla 7. Descripción de correlación semanal.

	temperatura	humedad	presion_atm	OZONO	R_SOLAR	NO2	SO2	pm2_5
temperatura	1.000000	-0.963871	-0.714922	0.748563	0.572045	-0.545241	-0.268908	-0.549338
humedad	-0.963871	1.000000	0.664085	-0.595898	-0.550757	0.477410	0.216127	0.350224
presion_atm	-0.714922	0.664085	1.000000	-0.407542	0.005368	0.733855	0.675594	0.726114
OZONO	0.748563	-0.595898	-0.407542	1.000000	0.695936	-0.262994	0.072583	-0.631621
R_SOLAR	0.572045	-0.550757	0.005368	0.695936	1.000000	0.249441	0.605098	-0.019434
NO2	-0.545241	0.477410	0.733855	-0.262994	0.249441	1.000000	0.880906	0.782030
SO2	-0.268908	0.216127	0.675594	0.072583	0.605098	0.880906	1.000000	0.622350
pm2_5	-0.549338	0.350224	0.726114	-0.631621	-0.019434	0.782030	0.622350	1.000000

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la presión atmosférica presenta los mayores valores de correlaciones positivas con el NO2, SO2 y PM 2.5, en el caso del O3 con la temperatura. Los mayores valores de correlaciones negativas con el NO2, SO2 y PM2.5 con la temperatura, en el caso del O3 es con la humedad. La mayor correlación entre los contaminantes es de 0.88 entre el NO2 y SO2.

V. CONCLUSIÓN

El diseño del equipo de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas es óptimo y eficaz en gastos, programación y armado, logrando medir NO2, SO2, O3, PM2.5, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar.

El quince de abril se presentaron las mayores concentraciones diarias del NO2, SO2 y O3 las cuales fueron de 47.6 ug/m3, 66.0 ug/m3 y 333.5 ug/m3 respectivamente, el cuatro de abril las menores concentraciones respecto al NO2, SO2 y O3 con concentraciones de 7.0 ug/m3, 48.2 ug/m3 y 61.9 ug/m3, respecto al PM 2.5 el dieciocho y trece de abril se dio la mayor y menor concentración con 21.18 ug/m3 y 1.18 ug/m3 respectivamente, según la escala semanal el sábado se presentaron las mayores concentraciones del NO2, SO2 y PM2.5 con 37.5 ug/m3, 60.1 ug/m3 y 11.7 ug/m3 respectivamente, el jueves las menores concentraciones del NO2, SO2 y PM2.5 con 17.4 ug/m3, 50.2 ug/m3 y 5.0 ug/m3 respectivamente. Respecto al O3 el miércoles y sábado se presentó la mayor y menor concentración con 234.95 ug/m3 y 75.1 ug/m3 respectivamente.

La regresión lineal entre el equipo *Low Cost* y la colección de imágenes del Sentinel 5P presentó una correlación de -0.2, 0.1, 0.28 y -0.46 en los contaminantes NO2, SO2, O3 y PM2.5 respectivamente, por otro lado, se observa en el distrito de Lurigancho- Chosica que el SO2, O3 y PM 2.5 presentan una buena calidad de aire, aunque, el NO2 presenta una moderada calidad de aire.

A nivel horario y diario la correlación positiva más alta se da entre el NO2 y la presión atmosférica con valores de 0.69 y 0.84 respectivamente, así también la correlación negativa más alta se da entre el SO2 y la temperatura con valores de -0.31 y -0.22 respectivamente, a nivel semanal la correlación positiva más alta y baja se da entre el O3 y la temperatura con valores de 0.75 y -0.6 respectivamente. Además, los contaminantes que presentaron la mayor correlación positiva a nivel horario, diario y semanal fueron el NO2 y SO2 con valores de 0.51, 0.67 y 0.88 respectivamente.

VI. RECOMENDACIONES

Es necesario saber el consumo de energía del equipo previa conexiones, es importante identificar los puntos de caídas de tensión con el fin de reforzarlo.

El diseño del equipo debe tener la facilidad de intercambiar piezas sin necesidad de perjudicar otras en el proceso.

Es importante comparar los equipos *Low Cost* con equipos equivalente o de referencia en calidad de aire.

Se debe manejar una mayor cantidad de información con la finalidad de incrementar el número de comparaciones con la información satelital.

Se tiene que saber la hora de medición de las imágenes satelital, con la finalidad de comparar con la información disponible en ese momento, mas no con el promedio diario.

Se debe elaborar un calendario de calidad de aire con la información disponible.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Rojas García, J. F. (2019). Monitoreo de cuatro contaminantes atmosféricos a nivel individual. Universidad Veracruzana. Xalapa. Facultad de ciencias químicas. Disponible en https://cdigital.uv.mx/handle/1944/49406

De la Fuente Ruiz, S. 2019. IMPLANTACIÓN, ESTUDIO Y CONTROL DE CALIDAD DE VARIABLES CLIMÁTICAS EN EL AMBITO DE METROLOGÍA 4.0. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES. Valadolid. Disponible en: http://uvadoc.uva.es/handle/10324/37849

Rodríguez J., R. M., Benito C. A. y Portela L., A. (2004). METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA. Semana de la Ciencia y la Tecnología 2004. FUNDACIÓN ESPAÑOLA CIENCIA Y TECNOLOGÍA(FECIT). Disponible en: https://cab.inta-csic.es/uploads/culturacientifica/adjuntos/20130121115236.pdf

Linares Gil, C. y Díaz Jiménez, J. (s.f). ¿Qué son las PM 2?5 y cómo a nuestra salud? Ecologista en acción. N°58. Ecologista. Disponible en: https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/

Carnicer, J, M. (2007). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. MÓDULO I: CONTAMINACIÓN AMBIENTAL. EOI.

Molina M.J., Molina E.T., (2004). Megacities and Atmospheric Pollution. Journal of the Air and Waste Management Association, 54, 64 – 80

Nevers, N. (2009). *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

VIII. ANEXOS

8.1. Anexo 1 Script en IDE Arduino

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8.13 (W

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
/*
 *      -----ESTACIÓN CI INGETCAR-----
 *              SICHA HUAMAN RUDY
 */


 //// ANALOGICOS
#include "Arduino.h"
#define mq131 35
#define ML8511 36
#define CMJU_NO2 33
#define so2_2HS12 32

//// BUS
#include <SPI.h>

////// i2c
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>

///// bme280
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BME280.h>
Adafruit_BME280 bme; // I2C

///sharp
const int measurePin = 34 ;
const int  ledPower = 27;

```

Compilando programa...

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.39.0)

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
const int  ledPower = 27;

int samplingTime = 280;
int deltaTime = 40;
int sleepTime = 9620;

float voMeasured = 0;
float calcVoltage = 0;
float dustDensity = 0;
float smoothDensity = 0;

/// esp32 y thingspeak
#include "ThingSpeak.h"
#include "WiFi.h"
WiFiClient cliente;

const char* ssid = "[redacted]";                    //SSID de vuestro router.
const char* password = "[redacted]";                //Contraseña de vuestro router.

unsigned long channelID = 1022759;                  //ID de vuestro canal.
const char* WriteAPIKey = "2Z26EQ9C4FNV9BGN";       //Write API Key de vuestro canal.


void setup() {
  Serial.begin(115200);
///// sharp
  pinMode(ledPower,OUTPUT);
  pinMode(measurePin, INPUT);

```

Compilando programa...

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
  pinMode(measurePin, INPUT);

/////////// 2HS12
 pinMode(so2_2HS12, INPUT);

////// CMJU_NO2
   pinMode(CMJU_NO2, INPUT);

  //// mq131
  pinMode(mq131,INPUT);

  /// ML8511
  pinMode(ML8511,INPUT);
  /////// esp32 y thingspeak
  Serial.println("Test de sensores:");

  WiFi.begin(ssid,password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("Wifi conectado!");

  ThingSpeak.begin(cliente);

  //// bme280
bool status;

  // default settings
```

Compilado

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.39.0)

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
  // (you can also pass in a Wire library object like &Wire2)
  status = bme.begin(0x76);
  if (!status) {
    Serial.println("Could not find a valid BME280 sensor, check wiring!");
    while (1);
  }
}

void loop() {
  delay(2000);
  leer();

  ThingSpeak.writeFields(channelID,WriteAPIKey);
  Serial.println("Datos enviados a ThingSpeak!");
  //delay(30000);
  delay(300000);
}

void leer() {

//////sharp
  digitalWrite(ledPower,LOW); // power on the LED
  delayMicroseconds(samplingTime);
  voMeasured = analogRead(measurePin); // read the dust value

  delayMicroseconds(deltaTime);
  digitalWrite(ledPower,HIGH); // turn the LED off
  delayMicroseconds(sleepTime);
//  calcVoltage = voMeasured * 5 / 4095 ;
```

Compilado

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
  delayMicroseconds(sleepTime);
//  calcVoltage = voMeasured * 5 / 4095 ;
//  dustDensity = (0.17 * calcVoltage - 0.1)*100 + 5 ;
/////  smoothDensity = dustDensity * 0.05 + smoothDensity * 0.95;
//
//   if(dustDensity <= 0){
// dustDensity = 5;
// delay(500);
//
// }


    ////////////////////
  float t2 = bme.readTemperature() - 0.97 ;
  float h2 = bme.readHumidity() + 5.45 ;
  float pre = ( (bme.readPressure() - 360) / 100);

 if(t2 <= 0){
  t2 = bme.readTemperature() - 0.97 ;
 }
if(h2 = 105.45){
  h2 = bme.readHumidity() + 5.45 ;
 }
 if(pre > 1139){
  pre = ( (bme.readPressure() - 360) / 100);
 }


//  float ozono_resistencia = analogRead(mq131);
```

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1.8.13 (Windows Store 1.8.39.0)

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
//  float ozono_resistencia = analogRead(mq131);
//  float ozono_voltaje = ozono_resistencia*(5/4095);
//  float ozono_RS = ((5-ozono_voltaje)/ozono_voltaje);
  float ozono = analogRead(mq131);

  float radiacion = analogRead(ML8511);

  float NO2_raw = analogRead(CMJU_NO2); //no2  33
  float NO2_conv = 0.05+ NO2_raw*((5-0.05)/1024);
  float K = 0.082*(t2+273)/(pre*100/101325) ;
  float NO2 = NO2_conv *( 48*100 / K ) ;

  float  so2 = analogRead(so2_2HS12);


//  while (isnan(t2) || isnan(h2) || isnan(pre) || isnan(ozono)|| isnan(radiacion)|| isnan(NO2) ){
//    Serial.println("Lectura fallida en el sensor DHT22, repitiendo lectura...");
//    delay(2000);
//
//   t2 = bme.readTemperature() - 0.97 ;
//   h2 = bme.readHumidity() + 5.45 ;
//   pre = ( (bme.readPressure() - 360) / 100);
//
//  ozono = analogRead(mq131);
//
//   radiacion = analogRead(ML8511);
//
//   NO2_raw = analogRead(CMJU_NO2); //no2  33
//   NO2_conv = 0.05+ NO2_raw*((10-0.05)/4095);
```

Compilado

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino 1

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```
//   K = 0.082*(t2+273)/(pre*100/101325) ;
//   NO2 = NO2_conv *( 48*100 / K ) ;
//
//   so2 = analogRead(so2_2HS12);
//  }

  Serial.print("Temperatura : ");
  Serial.print(t2);
  Serial.println(" °C.");

  Serial.print("Humedad : ");
  Serial.print(h2);
  Serial.println(" %.");

  Serial.print("Presion hPA: ");
  Serial.print(pre);
  Serial.println(" %.");

  Serial.print("ozono: ");
  Serial.print(ozono);
  Serial.println(" ");

  Serial.print("Radiación solar: ");
  Serial.print(radiacion);
  Serial.println(" ");

  Serial.print("NO2 ppm = ") ;
  Serial.println(NO2_raw);
  Serial.println(NO2);
```

Compilado

PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing Arduino

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

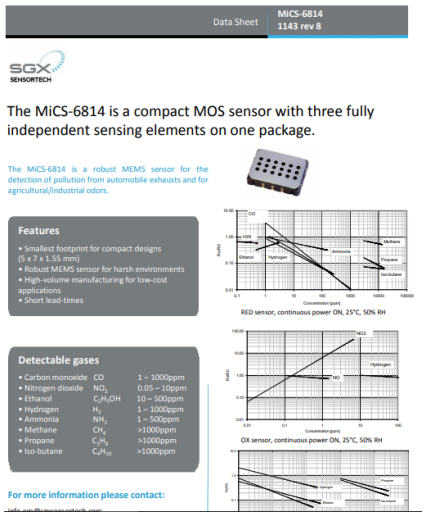
PARTE2_bme280_mq131_uv_CMJUNO2_shs12_SHARP_4_thing

```

  Serial.print("NO2 ppm = ") ;
  Serial.println(NO2_raw);
  Serial.println(NO2);
  Serial.println(" ");

  Serial.print("so2: ");
  Serial.print(so2);
  Serial.println(" ");

  Serial.print("Raw Signal Value (0-1023): ");
  Serial.println(voMeasured);
//  Serial.print(" - Dust Density corregido: ");
//  Serial.println(dustDensity);
//  Serial.println(" ");
//
  Serial.println("-----------------------");

  ThingSpeak.setField (1,t2);
  ThingSpeak.setField (2,h2);
  ThingSpeak.setField (3,pre);
  ThingSpeak.setField (4,ozono);
  ThingSpeak.setField (5,radiacion);
  ThingSpeak.setField (6,NO2);
  ThingSpeak.setField (7,so2);
  ThingSpeak.setField (8,voMeasured);


}
```

Compilado

8.2. Anexo 2 Hoja de datos de los sensores

8.2.1. Sensor MICS 6814 NO2



Data Sheet | MiCS-6814 1143 rev 8

SGX SENSORTECH

The MiCS-6814 is a compact MOS sensor with three fully independent sensing elements on one package.

The MiCS-6814 is a robust MEMS sensor for the detection of pollution from automobile exhausts and for agricultural/industrial odors.

Features

- Smallest footprint for compact designs (5 x 7 x 1.55 mm)
- Robust MEMS sensor for harsh environments
- High-volume manufacturing for low-cost applications
- Short lead-times

Detectable gases

• Carbon monoxide	CO	1 – 1000ppm
• Nitrogen dioxide	NO_2	0.05 – 10ppm
• Ethanol	C_2H_5OH	10 – 500ppm
• Hydrogen	H_2	1 – 1000ppm
• Ammonia	NH_3	1 – 500ppm
• Methane	CH_4	>1000ppm
• Propane	C_3H_8	>1000ppm
• Iso-butane	C_4H_{10}	>1000ppm

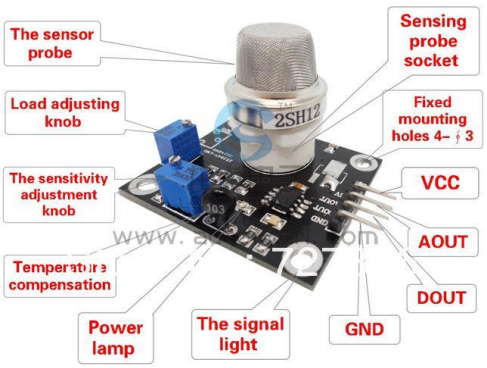
For more information please contact:

RED sensor, continuous power ON, 25°C, 50% RH

OX sensor, continuous power ON, 25°C, 50% RH

Disponible en https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2015/02/1143_Datasheet-MiCS-6814-rev-8.pdf

8.2.2. Sensor H2S12



De parámetros

1. Voltaje de calefacción: 5±0,2 V (ca. DC)

2, corriente de funcionamiento: 150mA

3. Voltaje del circuito: cc 5 V (máx. CC 24 V)

4. Resistencia de carga: 10 K (ajustable)

5. Rango de concentración de prueba: 1-500 ppm

6. Aire Limpio voltaje:≤1,5 V

7 sensibilidad:≥3%

8. Tiempo de respuesta:≤1 S (3-5 minutos de calentamiento, tiempo de precalentamiento de la teoría 48 horas)

9. Tiempo de respuesta:≤30 S

10. Consumo de energía del componente:≤0,8 W

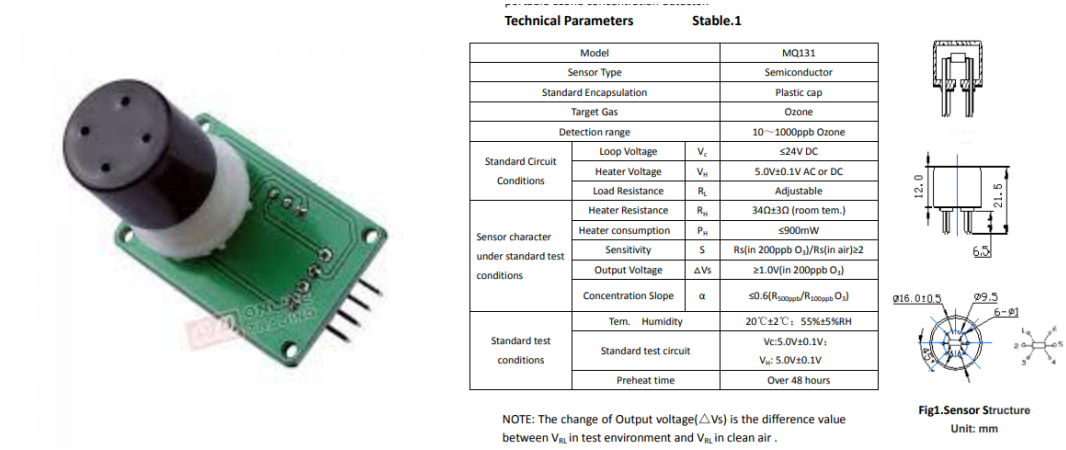
11, temperatura de funcionamiento:-10 ~ 50ºC (temperatura nominal 20ºC)

12, humedad: 95% RH (humedad nominal 65% RH)

13. Vida: 5 años

Disponible en https://es.aliexpress.com/item/32811212086.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.387c47714045tl&algo_pvid=98f6f65a-51fc-4f4e-ba2a-0630d6a380a1&algo_expid=98f6f65a-51fc-4f4e-ba2a-0630d6a380a1-51&btsid=0ab6f8221594011555273897 7e0e78&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_

8.2.3. Sensor MQ131



Technical Parameters **Stable.1**

Model			MQ131
Sensor Type			Semiconductor
Standard Encapsulation			Plastic cap
Target Gas			Ozone
Detection range			10~1000ppb Ozone
Standard Circuit Conditions	Loop Voltage	V_c	≤24V DC
	Heater Voltage	V_H	5.0V±0.1V AC or DC
	Load Resistance	R_L	Adjustable
Sensor character under standard test conditions	Heater Resistance	R_H	34Ω±3Ω (room tem.)
	Heater consumption	P_H	≤900mW
	Sensitivity	S	Rs(in 200ppb O_3)/Rs(in air)≥2
	Output Voltage	ΔVs	≥1.0V(in 200ppb O_3)
	Concentration Slope	α	≤0.6(R_{500ppb}/R_{100ppb} O_3)
Standard test conditions	Tem. Humidity		20℃±2℃; 55%±5%RH
	Standard test circuit		Vc:5.0V±0.1V; V_H: 5.0V±0.1V
	Preheat time		Over 48 hours

NOTE: The change of Output voltage(△Vs) is the difference value between V_{RL} in test environment and V_{RL} in clean air .

Fig1.Sensor Structure
Unit: mm

Disponible en https://aqicn.org/air/view/sensor/spec/o3.winsen-mq131.pdf

8.2.4. Sensor PM 2.5

SHARP GP2Y1010AU0F

■ **Absolute Maximum Ratings**

(T_a=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V_{CC}	−0.3 to +7	V
*1 Input terminal voltage	V_{LED}	−0.3 to V_{CC}	V
Operating temperature	T_{OP}	−10 to +65	°C
Soldering temperature	T_{sol}	−20 to +80	°C

*1 Open drain drive input

■ **Electro-optical Characteristics**

(T_a=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Sensitivity	K	*1 *2 *3	0.35	0.5	0.65	V/(0.1mg/m³)
Output voltage at no dust	V_{OC}	*2 *3	0	0.9	1.5	V
Output voltage range	V_{OH}	*2 *3 R_L =4.7kΩ	3.4	–	–	V
LED terminal current	I_{LED}	*2 LED terminal voltage = 0	–	10	20	mA
Consumption current	I_{CC}	*2 R_L =∞	–	11	20	mA

*1 Sensitivity is specified by the amount of output voltage change when dust density changes by 0.1 mg/m³.
And the dust density for detection is a value of the density of cigarette (MILD SEVEN®) smoke measured by the digital dust monitor (P-5L2 manufactured by SIBATA SCIENTIFIC TECHNOLOGY LTD.)
*2 Input condition is shown in Fig. 1
*3 Output sampling timing is shown in Fig. 2

Disponible en https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/412700/SHARP/GP2Y1010AU0F.html

8.2.5. sensor BME 280

BME280
Digital humidity, pressure and temperature sensor

Key features

- Package — 2.5 mm x 2.5 mm x 0.93 mm metal lid LGA
- Digital interface — I²C (up to 3.4 MHz) and SPI (3 and 4 wire, up to 10 MHz)
- Supply voltage — V_{DD} main supply voltage range: 1.71 V to 3.6 V; V_{DDIO} interface voltage range: 1.2 V to 3.6 V
- Current consumption — 1.8 µA @ 1 Hz humidity and temperature; 2.8 µA @ 1 Hz pressure and temperature; 3.6 µA @ 1 Hz humidity, pressure and temperature; 0.1 µA in sleep mode
- Operating range — -40…+85 °C, 0…100 % rel. humidity, 300…1100 hPa
- Humidity sensor and pressure sensor can be independently enabled / disabled
- Register and performance compatible to Bosch Sensortec BMP280 digital pressure sensor
- RoHS compliant, halogen-free, MSL1

Key parameters for humidity sensor

- Response time ($\tau_{63\%}$) — 1 s
- Accuracy tolerance — ±3 % relative humidity
- Hysteresis — ±1% relative humidity

Key parameters for pressure sensor

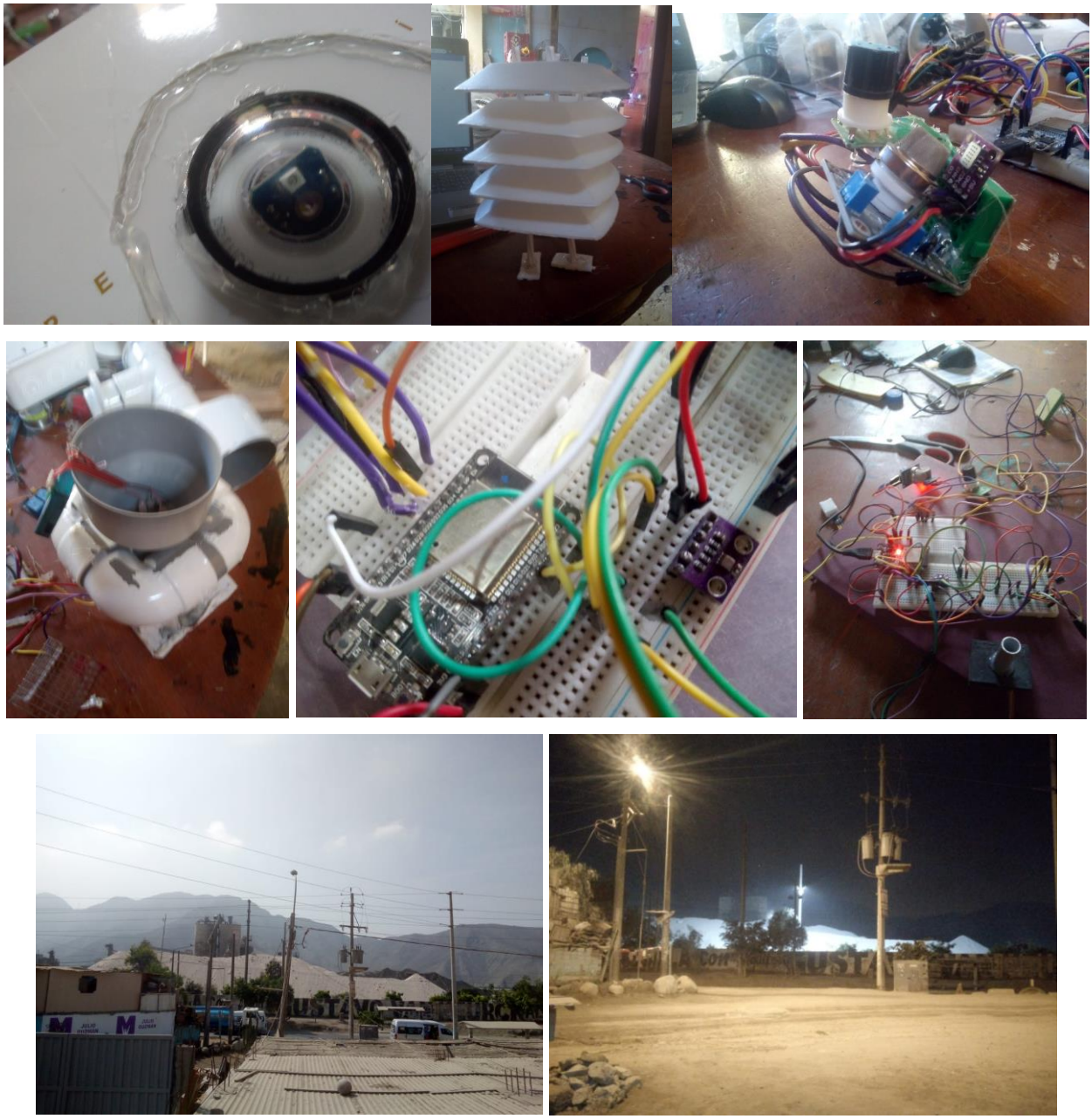
- RMS Noise — 0.2 Pa, equiv. to 1.7 cm
- Offset temperature coefficient — ±1.5 Pa/K, equiv. to ±12.6 cm at 1 °C temperature change

Typical application

- Context awareness, e.g. skin detection, room change detection
- Fitness monitoring / well-being
  - Warning regarding dryness or high temperatures
  - Measurement of volume and air flow
- Home automation control
  - control heating, venting, air conditioning (HVAC)

Disponible en https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BME280-DS002.pdf

8.3. Anexo 3 Diseño y ubicación del equipo *Low Cost*



Fuente: Elaboración propia.