



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología

“Desarrollo de prototipo de medición de contaminantes gaseosos a través de sensores de bajo costo basados en sistemas Arduino.”

Seminario de Título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

Tomás Antonio Claramunt Ancavil

Director de Tesis

Dr. Richard Toro A.

Co-Director de Tesis

Dr. Mauricio Canales A.



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias
Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología

INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TÍTULO

Se informa a la Escuela de Pregrado de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el Sr. Tomás Antonio Claramunt Ancavil

“Desarrollo de prototipo de medición de contaminantes gaseosos a través de sensores de bajo costo basados en sistemas Arduino.”

Ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico Ambiental.

Director de Tesis:

Dr. Richard Toro A.

Co-Director de Tesis:

Dr. Mauricio Canales A.

Comisión Revisadora y Evaluadora

Presidente de comisión:

Dr. Álvaro Aliaga Cerón

Evaluador

Dr. Carlos Manzano Dávila

AGRADECIMIENTOS

Quiero partir agradeciendo a mi familia quienes no me han dejado de apoyar sin importar el momento que estuviéramos pasando y a quienes las palabras que pudiera dedicarles serian insuficiente para demostrarles todo lo que siento por ellos.

Al grupo guías y scout Nua Mana por todo el apoyo ofrecido en los primeros años de Universidad y por sobre todo al ayudarme a darme cuenta de que una de las cosas que más me gusta es el medio ambiente.

A mis amigos de la universidad, con los cuales e compartido trabajos, tardes de estudios, informes y momentos inolvidable académicos como no académicos durante esta vida universitaria.

A los profesores que han pasado por mi vida debido que gracias a sus enseñanzas es que en estos momentos me encuentro escribiendo mi seminario de título el cual en un momento se veía muy lejano.

A todas las personas que me han apoyado en mi vida personal como académica y que por sobre todo han creído en mí en todo momento, incluso en momentos en los cuales yo no lo podía hacer.

Agradezco a los profesores Carlos Manzano y Manuel Leiva por toda la ayuda que me han brindado durante el desarrollo de este seminario sin ser mis directores de tesis, como también agradecerles a mis compañeros de laboratorio.

Agradezco profundamente a mis directores de seminario, al profesor Mauricio Canales y al profesor Richard Toro por confiar en mi para desarrollar este tema, además de agradecer todo su apoyo, consejos y guía que me han ofrecido.

Finalmente, agradezco al proyecto FONDECYT N°11150931, marco en el cual se desarrolló esta investigación

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	x
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Sensores de bajo costo	4
1.2.1. Experiencias a nivel mundial con sensores de bajo costo	5
1.2.1.1. Proyecto CURMOS.	5
1.2.1.2. Proyecto Life + Respira	7
1.2.1.3. Proyecto Smairt	8
1.3. Sensores de óxidos metálicos semiconductores (MOS)	9
1.4. Sistema Arduino	12
1.5. Objetivos	14
1.5.1. Objetivo general	14
1.5.2. Objetivos específicos	14
2. METODOLOGÍA	16

2.1.	Funcionamiento de un Sistema Arduino	16
2.2.	Funcionamiento de componentes del prototipo.....	16
2.3.	Diseño y construcción del prototipo	20
2.3.1.	Diseño del prototipo.....	20
2.3.2.	Construcción del prototipo.	20
2.4.	Campañas de medición y análisis de datos.	21
2.4.1.	Campaña de medición.....	21
2.4.2.	Análisis de datos.	21
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
3.1.	Funcionamiento de un Sistema Arduino	23
3.1.1.	Búsqueda bibliográfica.	23
3.1.2.	Proyecto de inicio	23
3.2.	Funcionamiento de componentes del prototipo.....	26
3.2.1.	Shield Data Logger para Arduino Uno Mega	26
3.2.2.	Regulador De Voltaje Lm2596 DC-DC	27
3.2.3.	Sensor 811	27
3.2.4.	Sensor 6814.....	28
3.2.4.1.	Prueba para R1	30
3.2.4.2.	Prueba para R2	32
3.2.4.3.	Prueba para R3	34
3.3.	Diseño y construcción del prototipo	37

3.3.1.	Diseño.....	37
3.3.2.	Construcción	37
3.4.	Análisis de la campaña de medición.....	39
3.4.1.	Series de tiempo.....	39
4.	CONCLUSIONES.....	50
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	52
6.	ANEXO.....	55
6.1.	Anexo 1: Software Prototipo.....	55
6.2.	Anexo2: Series de tempo mayo – junio	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Concentración de algunos contaminantes gaseosos de la atmosfera terrestre (Raúl G. E. S. Morales, 2006)	1
Tabla 2: Normas primarias para calidad del aire en Chile	2
Tabla 3: Metodologías de medición establecidas por las normas primarias de calidad del aire en Chile.....	3
Tabla 4: Principales ventajas de los distintos dispositivos en los que se basan los sensores MOS(Filippini et al., 2013)	10
Tabla 5. Gases detectables por los sensores MOS a utilizar	19
Tabla 6: Pruebas de funcionamiento.....	20
Tabla 7: Resumen de montajes descritos en el foro Arduino	28
Tabla 8: Resumen de valores de concentración y voltaje para CO	36
Tabla 9: Resumen de valores de concentración y voltaje para NH ₃	36
Tabla 10: Resumen de valores de concentración y voltaje para NO ₂	36
Tabla 11: Variación generada por perturbaciones*	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dispositivo de ciclistas voluntarios (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)	6
Figura 2: Dispositivo fijo (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)	6
Figura 3: Dispositivo en carros de correo (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)	6
Figura 4: Dispositivo del proyecto Life + Respira.(life + respira, 2017)	7
Figura 5: Estación de monitoreo del proyecto Smairt(Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016)	8
Figura 6: Sensor del proyecto Smairt(Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016)	9
Figura 7: Visión intergranular de un óxido de metal.	11
Figura 8: Placa Arduino UNO(<i>Arduino Uno Rev3 Arduino Official Store</i> , 2020)	13
Figura 9: Proyecto de Inicio “Controlando un LED” (Proserquisa, 2016)	16
Figura 10: Shield Data Logger para Arduino Uno Mega(AFEL, 2020)	17
Figura 11: Sensor 811(Your Cee, s. f.)	18
Figura 12: Sensor 6814(ModuleLive, 2020)	18
Figura 13: Mi power bank 2S 10000 mAh(PROPHONELTDA, 2020)	18
Figura 14: Regulador De Voltaje Lm2596 Dc-DC(ESHOP YAGUZ, 2020)	19
Figura 15: Montaje del proyecto de inicio (Proserquisa, 2016)	24
Figura 16: Programación para el proyecto de inicio	25
Figura 17: Montaje del Shield Data Logger para Arduino Uno Mega(Bill Earl, 2013)	26
Figura 18: Montaje del sensor 811(ams, 2016)	27
Figura 19: Montaje para las pruebas de R3, R2 y R1	29
Figura 20: Pruebas para resistencia R1 para la señal CO	31

Figura 21: Prueba para resistencia R2 para la señal NH ₃	33
Figura 22: Pruebas de resistencia R3 para señal NO ₂	35
Figura 23: Diseño del prototipo	37
Figura 24: Construcción del prototipo	38
Figura 25: Sensor de oxidación del sensor 6814 para medir NO ₂	40
Figura 26: Sensor de amoníaco del sensor 6814 para medir NH ₃ , C ₃ H ₈ y C ₄ H ₁₀	41
Figura 27: Sensor de reducción del sensor 6814 para medir CO, CH ₄ , H ₂ y C ₂ H ₅ OH... ..	42
Figura 28: Sensor 811 para medir eCO ₂ , TVOC y temperatura.....	44
Figura 29: Comparación del CO en ppm con la temperatura en °C	46
Figura 30: Comparación del NO ₂ en ppm con la temperatura en °C	47
Figura 31: Comparación del eCO ₂ en ppm con la temperatura en °C	48
Figura 32: Comparación de los TVOC en ppm con la temperatura °C	49
Figura 33: Medición de la concentración en ppm del CO en función del tiempo	62
Figura 34: Medición de la concentración en ppm del H ₂ en función del tiempo	63
Figura 35: Medición de la concentración en ppm del CH ₄ en función del tiempo	63
Figura 36: Medición de la concentración en ppm del C ₂ H ₅ OH en función del tiempo... ..	64
Figura 37: Medición de la concentración en ppm del NH ₃ en función del tiempo	64
Figura 38: Medición de la concentración en ppm del C ₃ H ₈ en función del tiempo	65
Figura 39: Medición de la concentración en ppm del C ₄ H ₁₀ en función del tiempo.....	65
Figura 40: Medición de la concentración en ppm del NO ₂ en función del tiempo	66
Figura 41: Medición de la concentración en ppm del eCO ₂ en función del tiempo	66
Figura 42: Medición de la concentración en ppb del TVOC en función del tiempo.....	67
Figura 43: Medición de la temperatura en °C en función del tiempo	67

RESUMEN

El alto costo de equipos de medición de la calidad del aire que se encuentran aprobados o certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) o por las Directivas de la Comunidad Europea (EU), han hecho difícil lograr un monitoreo de la calidad del aire con amplia cobertura por parte de las distintas autoridades en el mundo. En el último tiempo han surgido diversos sensores que permiten realizar un monitoreo de la calidad del aire, los cuales pueden costar una fracción mínima del costo de los equipos de referencia certificados.

En la actualidad, se han desarrollado diversos proyectos de monitoreo de calidad del aire en el mundo, tanto con dispositivos fijos como móviles. Como lo son el proyecto CURMOS (Correos Urban Mobile Sensors) en el ayuntamiento de Málaga, España, Life + Respira en el ayuntamiento de Pamplona, España y el proyecto Smairt en el ayuntamiento de Guadalajara, España. Los cuales han permitido evidenciar que la contaminación atmosférica no es homogénea y al mismo tiempo, han permitido determinar el grado de exposición de algunos grupos de personas como ciclistas, peatones, carteros, entre otros.

El objetivo de este Seminario de Título es diseñar y construir un prototipo de equipo portátil de medición de gases de bajo costo, a través de una plataforma Arduino y sensores de óxidos metálicos semiconductores (sensores MOS) CJMCU-6814 y CJMCU-811 para medir CO, H₂, CH₄, C₂H₅OH, NH₃, C₃H₈, C₄H₁₀, NO₂, eCO₂, TVOC y temperatura ambiental.

Para esto, se realizó una búsqueda de bibliografía y de material audiovisual sobre distintos proyectos con placas Arduino disponibles para conocer el correcto funcionamiento sobre estas placas. Consecutivamente se procedió a probar el funcionamiento de cada uno de los componentes del prototipo para conocer el software y el circuito eléctrico necesario para su funcionamiento de manera individual, en donde se descubrió que para el funcionamiento de los sensores MOS se requieren de unos componentes externos denominadas resistencias pull up, en donde se requieren de 3 resistencias pull up para el sensor CJMCU-6814 de valores 1 M Ω , 330 K Ω y 20 K Ω (valores obtenidos a través de distintas pruebas) y de 2 resistencias pull up para el sensor CJMCU-811 ambas de un valor de 4,7 K Ω (valor obtenido de bibliografía).

Posteriormente se procedió a compilar los softwares de los componentes en un solo software para el prototipo y montar el sistema completo de tal manera que todos los componentes puedan funcionar en simultáneo. Para comprobar que el prototipo se encuentra funcionando correctamente, se realizaron diversas pruebas en las cuales se buscaba un funcionamiento continuo del prototipo y que este reaccionara a distintas perturbaciones (perturbaciones de incienso, vela, papel incinerado y body spray), en donde se encontró que para el funcionamiento continuo el sistema demanda una batería cargada en su totalidad y que además esté conectada al suministro eléctrico, además las perturbaciones generaron distintas variaciones en las mediciones generadas por el prototipo, con lo cual es un indicador que el prototipo se encuentra operando.

Finalmente se realizó una campaña de monitoreo de dos meses para analizar el funcionamiento del prototipo, en donde se encontró que el prototipo no presentó ningún inconveniente durante campaña de medición, que el continuo funcionamiento del sensor por un tiempo prolongado genera una micro isla de calor alterando las mediciones de la

temperatura ambiental, la baja concentración de los distintos contaminantes gaseosos presentes en un ambiente interior urbano resulta indetectables para el prototipo, y solo a través de algunas perturbaciones es posible apreciar señales para estos, debido al funcionamiento que presenta el prototipo para detectar los distintos gases, además se puede estar sobreestimando algunas mediciones que estén relacionadas con el sensor de reducción y de amoníaco, ya que los sensores no diferencian los gases que se miden en estos sensores.

Con lo cual se concluye que se logró el desarrollo de un prototipo de equipo portátil de medición de gases de bajo costo, a través de una plataforma Arduino y sensores MOS, el cual puede ser utilizado en interior como en exterior en diversos ambientes urbanos, rurales como industriales, siendo en el ambiente industrial el más recomendado debido a la gran riqueza de información disponible de contaminantes gaseosos en estas zonas. Antes de ser implementado de manera apropiada el prototipo desarrollado debe ser validado en condiciones controladas de laboratorio con concentraciones estándar o a través de la comparación con equipos que se encuentran aprobados o certificados por la USEPA y/o la UE, como lo son los THERMO 42i para medir NO, NO₂ y NO_x, THERMO 48i para medir CO, entre otros.

ABSTRACT

The high cost of air quality measurement equipment that is approved or certified by the United States Environmental Protection Agency (USEPA) or by the Directives of the European Community (EU), have made it difficult to achieve a monitoring of the quality of the air with wide coverage on the part of the different authorities in the world. In recent times, various sensors have emerged that allow monitoring of air quality, which can cost a minimal fraction of the cost of reference certificate equipment.

At present, various air quality monitoring projects have been developed in the world, both with fixed and mobile devices. As are the CURMOS project (Correos Urban Mobile Sensors) in the city of Malaga, Spain, Life + Respira in the city of Pamplona, Spain and the Smairt project in the city of Guadalajara, Spain. Which have made it possible to show that air pollution is not homogeneous and at the same time, have made it possible to determine the degree of exposure of some groups of people such as cyclists, pedestrians, postmen, among others.

The objective of this Title Seminar is to design and build a prototype of low-cost portable gas measurement equipment, through an Arduino platform and semiconductor metal oxide sensors (MOS sensors) CJMCU-6814 and CJMCU-811 to measure CO, H₂, CH₄, C₂H₅OH, NH₃, C₃H₈, C₄H₁₀, NO₂, eCO₂, TVOC and room temperature.

For this, a bibliography and audiovisual material search was carried out on different projects with Arduino boards available to know the correct operation on these boards. Consecutively, the operation of each of the prototype components was tested to know the software and the electrical circuit necessary for its operation individually, where it was

discovered that for the operation of the MOS sensors, external components called pull up resistors, where 3 pull up resistors are required for the CJMCU-6814 sensor with values of 1 M Ω , 330 K Ω and 20 K Ω (values obtained through different tests) and 2 pull up resistors for the CJMCU-811 sensor both have a value of 4,7 K Ω (value obtained from bibliography).

Subsequently, the software for the components was compiled into a single software for the prototype and assembled the complete system in such a way that all the components could work simultaneously. To verify that the prototype is working correctly, various tests were carried out in which a continuous operation of the prototype was sought and that it would react to different disturbances (disturbances of incense, candle, incinerated paper and body spray), where it was found that For continuous operation, the system requires a fully charged battery that is also connected to the electrical supply, furthermore the disturbances generated different variations in the measurements generated by the prototype, which is an indicator that the prototype is operating.

Finally, a two-month monitoring campaign was carried out to analyze the operation of the prototype, where it was found that the prototype did not present any inconvenience during the measurement campaign, that the continuous operation of the sensor for a long time generates a micro heat island altering In environmental temperature measurements, the low concentration of the different gaseous pollutants present in an urban interior environment is undetectable for the prototype, and only through some disturbances it is possible to appreciate signals for these, due to the operation that the prototype presents to detect the different gases, in addition, some measurements that are related to the reduction and ammonia sensor may be overestimated, since the sensors do not differentiate the gases that are measured in these sensors.

With which it is concluded that the development of a prototype of low-cost portable gas measurement equipment was achieved, through an Arduino platform and MOS sensors, which can be used indoors and outdoors in various urban and rural environments. as industrial, being in the industrial environment the most recommended due to the great wealth of information available on gaseous pollutants in these areas. Before being properly implemented, the developed prototype must be validated in controlled laboratory conditions with standard concentrations or through comparison with equipment that is approved or certified by USEPA and / or the EU, such as the THERMO 42i for measure NO, NO₂ and NO_x, THERMO 48i to measure CO, among others.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La atmosfera urbana como la industrial, está compuesta por diversos gases como N₂, O₂, Ar, H₂O y contaminantes gaseosos (CO, CH₄, H₂, NH₃, entre otros) los cuales se encuentran en concentraciones que van desde las partes por trillón (ppt) a partes por millón (ppm), ver Tabla 1.

Tabla 1: Concentración de algunos contaminantes gaseosos de la atmosfera terrestre .(Raúl G. E. S. Morales, 2006)

Gas contaminante	Concentración
CO	50 – 200 ppb
CH ₄	1.7 ppm
H ₂	0.55 ppm
NH ₃	10 ppt – 1 ppb

Los contaminantes gaseosos son emitidos por distintas fuentes antropogénicas como por fuentes naturales. En general, las fuentes antropogénicas ubicadas en las zonas industriales son las que presentan una mayor emisión de estos contaminantes.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) los contaminantes se relacionan con diversos efectos adversos para la salud de las personas(Organización Mundial de la Salud, 2021). Estos efectos pueden ir desde una leve irritación al sistema respiratorio hasta la muerte de las personas dependiendo de la exposición y de la concentración de los contaminantes.

Diversos organismos internacionales como la OMS han confeccionado directrices de calidad del aire para “ofrecer una evaluación de los efectos sanitarios derivados de la

contaminación del aire, así como de los niveles de contaminación perjudiciales para la salud”(Organización Mundial de la Salud, 2018)

Además de las directrices anteriores, varios países han confeccionados leyes y decretos que buscan establecer límites de concentración sobre algunos contaminantes gaseosos. En Chile, se han establecido cinco Decretos Supremos (D.S) relacionados con contaminantes gaseosos desde el año 2002, en donde sólo cuatro de ellos se encuentran vigentes. Estos D.S. han establecido normas primarias de calidad de aire para distintos gases, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Normas primarias para calidad del aire en Chile

Normas primarias de aire para	D.S	Estado del D. S
O ₃	N° 112/2002 (DTO-112, 2003)	Vigente
SO ₂	N° 113/2002 (DTO-113, 2003)	Derogado
	N° 104/2018 (DTO-104, 2019)	Vigente
NO ₂	N° 114/2002 (DTO-114, 2003)	Vigente
CO	N° 115/2002 (DTO-115, 2002)	Vigente

Los D.S. indican definiciones, niveles de normativa, validación de la información, fiscalización de la normativa, implementación de la normativa, pero por sobre todo las metodologías validas que se deben utilizar para medir los distintos contaminantes gaseosos, las cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Metodologías de medición establecidas por las normas primarias de calidad del aire en Chile

D.S	Metodología
N° 112/2003 (DTO-112, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> I. Quimiluminiscencia con etileno. II. Fotometría de absorción ultravioleta. III. Cromatografía líquida gas/sólido. IV. Espectrometría de absorción óptica diferencial, con calibración in situ. V. Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.
N° 113/2003 (DTO-113, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> I. Fluorescencia ultravioleta II. Espectrometría de absorción diferencial con calibración in situ III. Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.
N° 104/2019 (DTO-104, 2019)	<ul style="list-style-type: none"> I. Las metodologías de medición para el control de la presente norma de calidad serán establecidas por la Superintendencia del Medio Ambiente mediante resolución que se publicará en el Diario Oficial, previo informe del Ministerio del Medio Ambiente.
N° 114/2003 (DTO-114, 2003)	<ul style="list-style-type: none"> I. Quimiluminiscencia. II. Los que se basen en el método modificado de Griess-Saltzman. III. Espectrometría de absorción óptica diferencial, con calibración in situ. IV. Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea
N° 115/2002 (DTO-115, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> I. Fotometría infrarroja no dispersiva. II. Un método de medición de referencia o equivalente designado o aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos o por las Directivas de la Comunidad Europea.

Según los distintos D.S las metodologías señaladas en Tabla 3 deben ser aplicadas a través de aparatos que “hayan sido reconocidos, aprobados o certificados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) o por las Directivas de la Comunidad Europea (EU)”(DTO-112, 2003).

El Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire (SINCA) señala que en Chile se utilizan equipos como el THERMO 43i (fluorescencia pulsante) para medir SO_2 , THERMO 42i (quimioluminiscencia en fase gaseosa) para medir NO , NO_2 y NO_x , THERMO 48i (fotometría IR de filtro de correlación de gas) para medir CO y el THERMO 49i (fotometría UV) para medir O_3 .

Estos equipos cuentan con una alta precisión y exactitud en sus mediciones, sin embargo, un alto costo de adquisición, llegando a costar alrededor de USD\$20000 cada equipo para medir un gas contaminante normado.

Debido al alto costo de estos instrumentos, no todas las estaciones de monitoreo pertenecientes al Estado de Chile presentan equipos de monitoreo para medir los contaminantes gaseosos, con los cuales se determina la calidad del aire según los distintos D.S mencionados.

Esto genera una baja medición espacial de la calidad del aire en Chile, llegando a un desconocimiento de esta en distintas localidades y que las decisiones para solucionar los problemas de contaminación debido a contaminantes gaseosos lleguen tarde, cuando la salud de las personas ya se ha visto afectada.

1.2. Sensores de bajo costo

El problema relacionado a la baja cobertura territorial de las mediciones generada por el alto costo de los equipos no solo afecta a Chile si no que a todos los países que se encuentran interesados o preocupados por la contaminación atmosférica en el mundo.

Para solucionar este problema, se han desarrollado sensores que permitan medir la calidad del aire y parámetros ambientales con una precisión, exactitud y precio muy variado, y en donde los sensores más populares son los sensores de temperatura,

humedad (José Pichel, 2019) y material particulado (ejemplo DHT22 para medir humedad y temperatura y el Plantower PMS7003/G7 para medir material particulado) .

Los sensores pueden ser categorizados a través de su costo , en donde los sensores de menor costo son llamados sensores de bajo costo, que presentan un valor en el mercado igual o inferior a USD\$118 (Arroyo et al., 2019) o \$79.196 (Banco Central de Chile, 2019) .

1.2.1. Experiencias a nivel mundial con sensores de bajo costo

En los últimos años los sensores de bajo costo han sido utilizados por algunos países, investigadores como organizaciones para la realización de distintos proyectos relacionados con el funcionamiento y evaluación de estos sensores (como el *Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise*) y proyectos relacionados con la medición de calidad del aire de algunas ciudades. Entre estos proyectos se puede encontrar el proyecto CURMOS (Correos Urban Mobile Sensors) en el ayuntamiento de Málaga, España, el proyecto Life + Respira en el ayuntamiento de Pamplona, España y el proyecto Smart en el ayuntamiento de Guadalajara, España.

1.2.1.1. Proyecto CURMOS.

El proyecto CURMOS consistió en instalar 40 dispositivos en ciclistas voluntarios (Figura1), 3 dispositivos fijos (Figura 2) y 15 dispositivos en carros de correo (urban clouds, 2019) (Figura 3).

Estos dispositivos empleados permitieron conocer la calidad del aire sobre distintos contaminantes atmosféricos (MP_{10} , $MP_{2.5}$, MP_1 , O_3 , CO y NO_2), y a diferencia de las estaciones de monitoreo tradicionales, al ser principalmente portátiles (55 dispositivos

de 58), permitieron conocer de mejor manera la distribución de los distintos contaminantes atmosféricos presentes en la ciudad,



Figura 1: Dispositivo de ciclistas voluntarios (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)



Figura 2: Dispositivo fijo (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)



Figura 3: Dispositivo en carros de correo (proyecto CURMOS)(urban clouds, 2019)

1.2.1.2. Proyecto Life + Respira

El proyecto Life + Respira tuvo como objetivo “determinar el grado de exposición de los ciclistas y peatones en la ciudad de Pamplona a los principales contaminantes urbanos”(life + respira, 2017). Se utilizaron más de 200 ciclistas voluntarios, que utilizaron un dispositivo portátil en sus bicicletas (ver Figura 4).

Estos dispositivos permitieron medir CO, NO_x, O₃ y partículas en suspensión, ayudando a la caracterización de la “distribución de contaminantes Urbanos en la ciudad complementando así los datos proporcionados por las estaciones de calidad del aire existentes”(life + respira, 2017), que al ser estaciones fijas no logran obtener una medición espacial completa de la ciudad.



Figura 4: Dispositivo del proyecto Life + Respira.(life + respira, 2017)

1.2.1.3. Proyecto Smairt

El proyecto Smairt tiene como objetivo el desarrollo e implantación de un piloto de sensores de bajo coste para la monitorización en tiempo real de las principales variables medioambientales en el entorno del eje cultural del ayuntamiento de Guadalajara (Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2015).

Para esto se instalaron 3 estaciones de monitoreo fijas (Figura 5) con sensores de bajo costo (Figura 6), permitiendo la medición de contaminantes como el SO₂, NO₂, CO, O₃, MP₁₀ (Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016). Ofreciendo a los ciudadanos una información en tiempo real de la calidad del aire que se encuentran respirando”(Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016), al ingresar a la página web www.smairt.es.



Figura 5: Estación de monitoreo del proyecto Smairt(Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016)



Figura 6: Sensor del proyecto Smart(Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes, 2016)

1.3. Sensores de óxidos metálicos semiconductores (MOS)

Además de los proyectos mencionados, podemos encontrar otros sensores de bajo costo como lo son los sensores de óxidos metálicos semiconductores (MOS).

Los sensores MOS son de los más utilizados para medir compuestos orgánicos volátiles (COV), esto debido a que presentan un tamaño reducido, un bajo precio de adquisición y su consumo de energía es bajo”(Arroyo et al., 2019) . Además de medir COV estos sensores permiten detectar otros contaminantes gaseosos como CO, H₂, NH₃, NO₂, C₂H₅OH, CH₄, C₃H₈ y C₄H₁₀ (iso – butano)(SGX Sensortech Limited, 2015), entre otros.

Estos sensores como su nombre lo indican están compuestos por óxidos de metal como: el dióxido de titanio (TiO₂), dióxido de estaño (SnO₂), dióxido de silicio (SiO₂), entre otros, y según de como este ensamblado el sensor es posible distinguir tres dispositivos como se muestra en la Tabla 4, en donde el dispositivo híbrido es el más utilizado ya que compatibiliza las ventajas de ambos dispositivos.

Tabla 4: Principales ventajas de los distintos dispositivos en los que se basan los sensores MOS (Filippini et al., 2013)

Dispositivo	Ventaja
dispositivos medidos sobre oblea	- Simplicidad del montaje
dispositivos con calefactor integrado	- Presencia de calefactor
dispositivos híbridos	- Simplicidad del montaje. - Presencia de calefactor.

Las características de los sensores MOS como sensibilidad, selectividad y reproducibilidad, dependen principalmente de la distribución y tamaño del óxido de metal, área superficial específica de este¹³ y de la temperatura de operación (Castañeda-Aviña, L, 2018) la cual debe estar entre 100 y 500 °C (Barsan & Weimar, 2001).

Su funcionamiento consiste en el recubrimiento de una capa formada por la ionosorción molecular del oxígeno (O_2^-) y/o por la ionosorción atómica del oxígeno (O^- y O^{2-}), que se forma a partir de un sitio de quimisorción desocupado del óxido de metal (S) y el oxígeno presente en la atmósfera, como se muestra en las siguientes ecuaciones (Ec.1, Ec.2, Ec.3 y Ec.4).



Siendo el O^- el que se encuentra que se encuentra adsorbido principalmente en el sitio de quimisorción, como se muestra en la Figura 7, el que reaccionara con los distintos contaminantes gaseosos de la atmósfera, como el CO, a través de los sitios de superficie

adyacente o en los sitios de superficie única como se aprecia en las siguientes ecuaciones (Ec.5, Ec.6, Ec.7, Ec.8, Ec.9, Ec.10, Ec.11 y Ec. 12).

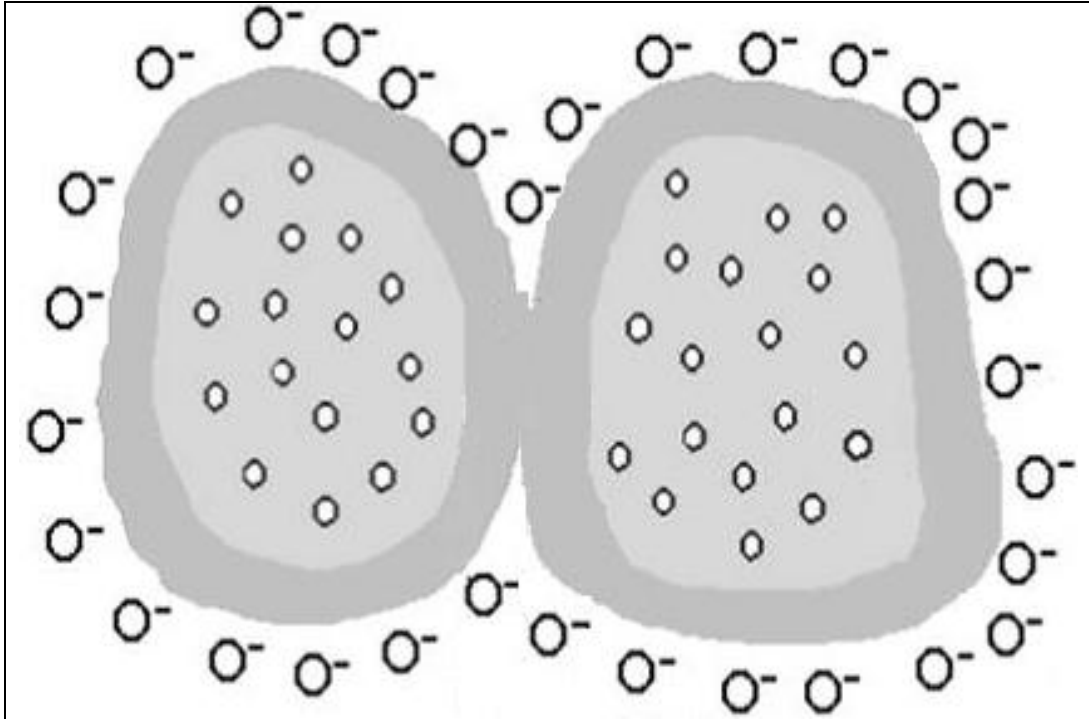
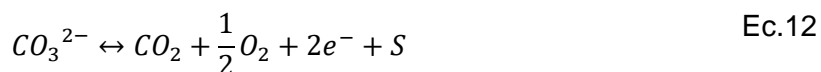


Figura 7: Visión intergranular de un óxido de metal.





En donde los electrones generados a través de estas reacciones serán recibidos por un par de electrodos que se encuentran parcialmente embebidos en el óxido del metal, midiendo un cambio de voltaje que puede ser leído por placas diseñadas para interpretar este cambio de voltaje (como las placas Arduino) en alguna información que se desee conocer.

Además de esto, la cantidad de electrones generados se encuentran relacionados con la con la presión parcial del contaminante gaseo que se está midiendo, como se muestra en la ecuación 13 (Ec.13), en donde se relaciona la cantidad de electrones generados en los sitios de quimisorción del oxido de metal (n_s) con la presión parcial del CO (P_{CO}) y de la especie de oxígeno adsorbido con la cual el CO haya reaccionado(en donde β representa al oxígeno molecular si toma un valor de 2 o oxígeno atómico si toma un valor de 1, mientras α representa las formas ionizadas del oxígeno tomando valores de 1 o 2) (Barsan & Weimar, 2001)

$$n_s \sim P_{CO}^{\beta/\alpha+1} \quad \text{Ec.13}$$

1.4. Sistema Arduino

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto basada en hardware (diagramas y especificaciones) y software libre (códigos de programación).

Dependiendo del tipo de proyecto que se quiera realizar es posible encontrar una gran cantidad de placas, las cuales varían en forma, tamaño, color y precio. La placa más utilizada por la facilidad que ofrece para su uso y su bajo costo es la placa Arduino UNO (Figura 8).



Figura 8: Placa Arduino UNO(Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store, 2020)

La placa Arduino UNO está compuesta por distintos componentes en donde los de mayor interés para el diseño de un proyecto son:

- microcontrolador ATMEL: que es en donde se graban las instrucciones.
- Pines de entrada: estos pueden ser digitales (0 al 13) y analógicos (A0 al A5), siendo los que se encargan de recibir las señales eléctricas de los dispositivos conectados a estos pines (ej: cámaras, sensores teclados, entre otros).

- Pines de salida: son pines digitales (0 al 13), son los que se encargan de enviar las señales eléctricas a los dispositivos conectados a estos pines (ej: altavoces, pantallas, controladores, entre otros).
- Pines de alimentación: son pines que alimentan distintos controladores a través de 5 voltios (pin 5V) y 3.3 voltios (pin 3.3V).
- Pin GND: corresponde al pin de tierra.
- jack de alimentación: sirve para alimentar la placa Arduino usando un voltaje de 7 a 12 Voltios
- puerto USB: sirve para gravar información en el microcontrolador ATMEL y también para alimentar la placa Arduino.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Confeccionar un prototipo de equipo portátil de medición de contaminantes gaseosos de bajo costo, que permitan realizar un monitoreo continuo y de una alta resolución temporal a través de una placa Arduino y sensores MOS

1.5.2. Objetivos específicos

- Revisión de literatura y material audiovisual sobre las placas Arduino y su implementación en diversos proyectos que permitan comprender su funcionamiento.
- Probar el funcionamiento de los distintos componentes del prototipo, mediante instrucciones de comandos en programa Arduino IDE que permita el respaldo y visualización de datos.
- Diseñar y construir un prototipo de equipo portátil de medición de gases de bajo costo funcional, que contenga sensores MOS para medir TVOC, eCO₂ (ams,

2016), CO, H₂, NH₃, NO₂, C₂H₅OH, CH₄, C₃H₈ y C₄H₁₀ (iso – butano) y una placa Arduino.

- Aplicar el prototipo en una campaña de monitoreo, para analizar su funcionamiento en condiciones ambientales.

2. METODOLOGÍA

2.1. Funcionamiento de un Sistema Arduino

Se realizó una búsqueda de material literario y audiovisual con, la finalidad de conocer el funcionamiento de una placa Arduino. Para posteriormente lograr programar y montar un proyecto de inicio, como lo es el proyecto de “Controlando un LED” (Figura 9), que sirviera como base para proyectos más complejos

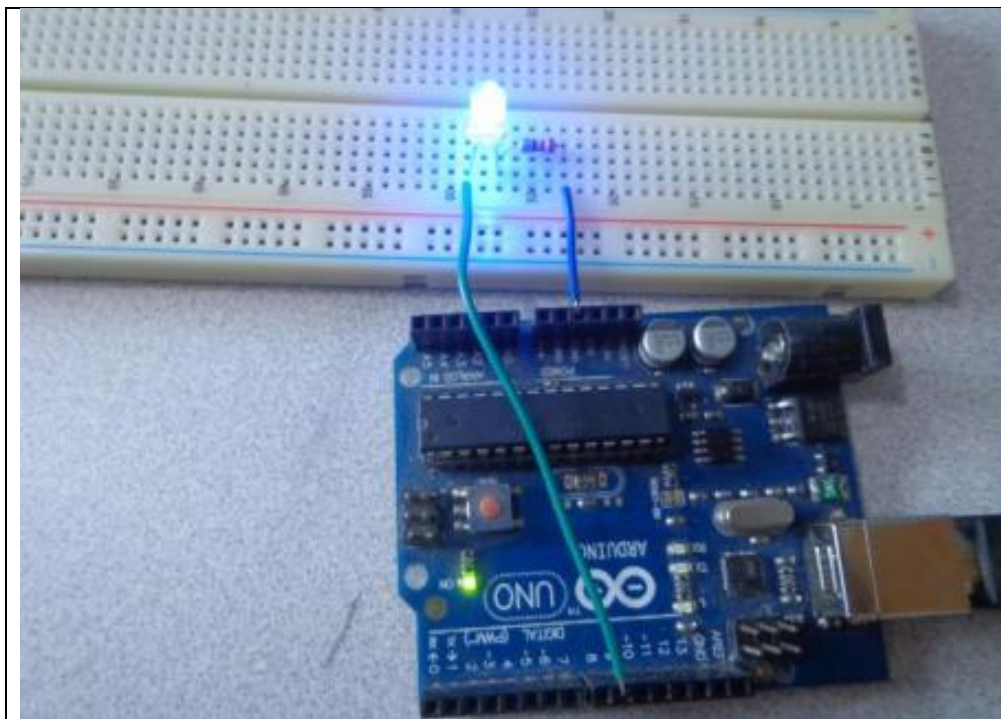


Figura 9: Proyecto de Inicio “Controlando un LED” (Proserquisa, 2016)

2.2. Funcionamiento de componentes del prototipo

Una vez comprendido el funcionamiento de las placas Arduino se procedió a la búsqueda bibliográfica y audiovisual, sobre el montaje y de los distintos softwares necesarios para el funcionamiento de los distintos componentes que se utilizaron para el montaje del prototipo de equipo portátil de medición de gases de bajo costo (prototipo)

Los componentes utilizados son:

- plataforma Arduino Uno R3 (Figura 8)
- Shield Data Logger para Arduino Uno Mega (Figura 10)
- dos sensores de bajo costo: CJMCU-811 (Figura 11) llamado 811 y CJMCU-6814 (Figura 12) llamado 6814
- batería de Ion Litio recargable 2S 10000 mAh (Figura 13)
- Regulador De Voltaje Lm2596 DC-DC (Figura 14)

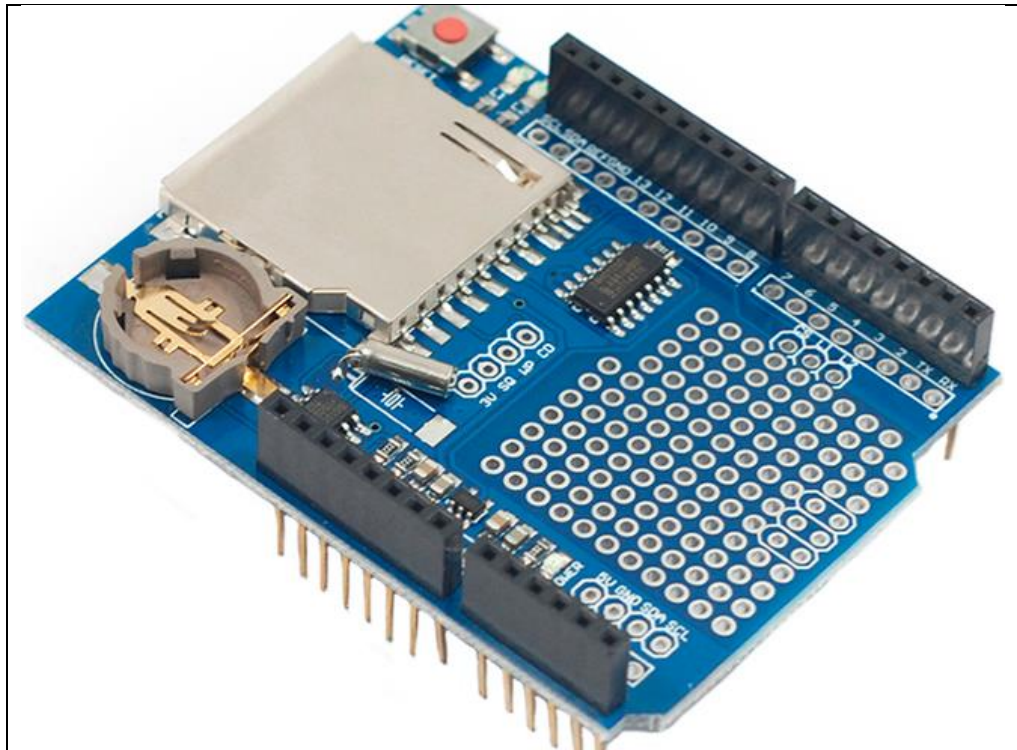


Figura 10: Shield Data Logger para Arduino Uno Mega(AFEL, 2020)

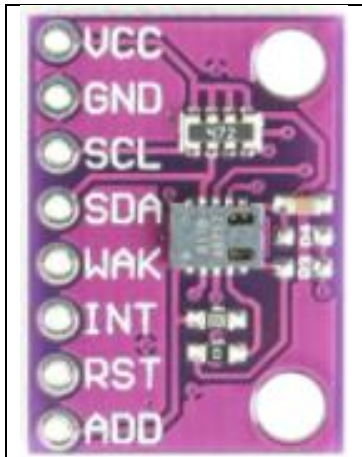


Figura 11: Sensor 811(Your Cee, 2020)

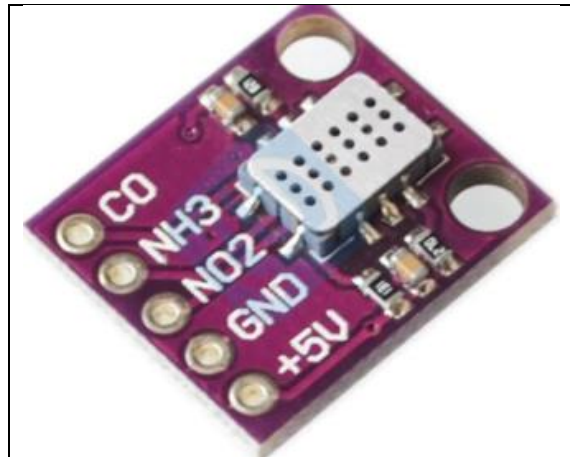


Figura 12: Sensor 6814(ModuleLive, 2020)



Figura 13:Mi power bank 2S 10000 mAh(PROPHONELTDA, 2020)



Figura 14: Regulador De Voltaje Lm2596 DC-DC(ESHOP YAGUZ, 2020)

Estos componentes permiten grabar toda la información en una tarjeta SD o microSD, registrar fecha y hora, como distintos contaminantes gaseosos (Tabla 5), además de poder alimentar y regular la energía de alimentación a los componentes del prototipo.

Tabla 5. Gases detectables por los sensores MOS a utilizar

CJMCU-6814, de óxido de Silicio (SGX Sensortech Limited, 2015)		CJMCU-811(ams, 2016)	
Gas	Rango de medición*	Gas	Rango de medición*
CO	1 – 1000 ppm	eCO ₂	400 – 8192 ppm
NO ₂	0,05 – 10 ppm		
C ₂ H ₅ OH	10 – 500 ppm		
H ₂	1 – 1000 ppm		
NH ₃	1 – 500 ppm	TVOC	0 – 1187 ppb
CH ₄	> 1000 ppm		
C ₃ H ₈	> 1000 ppm		
C ₄ H ₁₀ **	> 1000 ppm		

*rango de medición indicado por los fabricantes.

** Iso-butano

2.3. Diseño y construcción del prototipo

Una vez conocido el funcionamiento de los componentes, se procedió al diseño del sistema eléctrico y del software necesario para el funcionamiento del prototipo, como la construcción de éste.

2.3.1. Diseño del prototipo.

El diseño del sistema eléctrico del prototipo consistió en la generación de un diagrama en donde se conectarán todos los componentes en la placa Arduino de manera que estos utilizarán diferentes pines para que las señales de los componentes no interfieran entre ellas y que el montaje requiera de una cantidad mínima de cables.

2.3.2. Construcción del prototipo.

La construcción del sistema eléctrico consistió en montar el diseño del sistema previamente diseñado, y de la realización de distintas pruebas (Tabla 6), las cuales tuvieron la finalidad de comprobar el diseño y construcción del prototipo haya sido el adecuado o si requería de modificaciones.

Tabla 6: Pruebas de funcionamiento.

Prueba	Descripción
1	Funcionamiento continuo de 1 semana.
2	Funcionamiento y registro frente a estímulos (como lo fueron: medición de la inflamación de diferentes combustibles y uso de body spray).

2.4. Campañas de medición y análisis de datos.

2.4.1. Campaña de medición.

Se realizó una campaña de monitoreo en un ambiente interior entre los meses de mayo y junio del año 2020, en que el prototipo fue sometido a distintas fuentes de gases.

2.4.2. Análisis de datos.

El análisis de datos de la campaña de medición se realizó en 3 etapas.

a) Promedio de 1 minuto.

Se realizó un promedio de 1 minuto con los valores obtenidos para cada variable medida de la campaña de monitoreo de corta duración, a través del programa Excel.

b) Series de tiempo.

Con los promedios de 1 minuto para cada variable, se procedió a realizar series de tiempo a través de la librería OpenAir del programa RStudio, para evaluar el correcto funcionamiento del prototipo.

c) Comparación con la temperatura ambiental.

Utilizando la librería OpenAir del programa RStudio, se procedió a realizar series de tiempo simultáneas entre los contaminantes gaseosos que hayan tenido concentraciones entre los rangos de mediciones descritos por los fabricantes y la temperatura ambiental registrada por el prototipo, con la finalidad de observar si la temperatura medida por el prototipo tiene algún efecto sobre las variables de los gases contaminantes, si la

concentración de los contaminantes tiene algún efecto sobre la temperatura medida por el prototipo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Funcionamiento de un Sistema Arduino

3.1.1. Búsqueda bibliográfica.

A través de la búsqueda bibliográfica y audiovisual se encontró que existen diferentes placas Arduino, las cuales están diseñadas dependiendo de la complejidad y objetivo de los proyectos que se desean realizar. A pesar de estos las placas presentan el mismo funcionamiento, esto debido a que se basan en el mismo microcontrolador (microcontrolador ATMEL).

Este microcontrolador es el que maneja la placa y es reprogramable, sus principales funciones consisten en enviar o decodificar distintas señales enviadas por dispositivos externos que se encuentren conectados a la placa

La programación del microcontrolador se realiza a través de un programa llamado Arduino IDE el cual es gratuito y es compatible con Windows, MacOS y GNU/Linux. Este programa utiliza el lenguaje de programación AVR C y puede ser expandido por librerías C++.

3.1.2. Proyecto de inicio

Como complemento a la búsqueda bibliográfica y audiovisual se seleccionó un proyecto de inicio el cual cumpliera con las siguientes características:

- Que el montaje del sistema eléctrico sea fácil de montar.
- Que la programación necesaria para su funcionamiento se encuentre en línea y que sea fácil de comprender

En donde el proyecto seleccionado fue el “encendido y apagado de un led” el cual tiene un montaje del sistema eléctrico sencillo como se muestra en la Figura 15 y la programación necesaria para su funcionamiento se encuentra en línea y es fácil de comprender como se ilustra en la Figura 16.

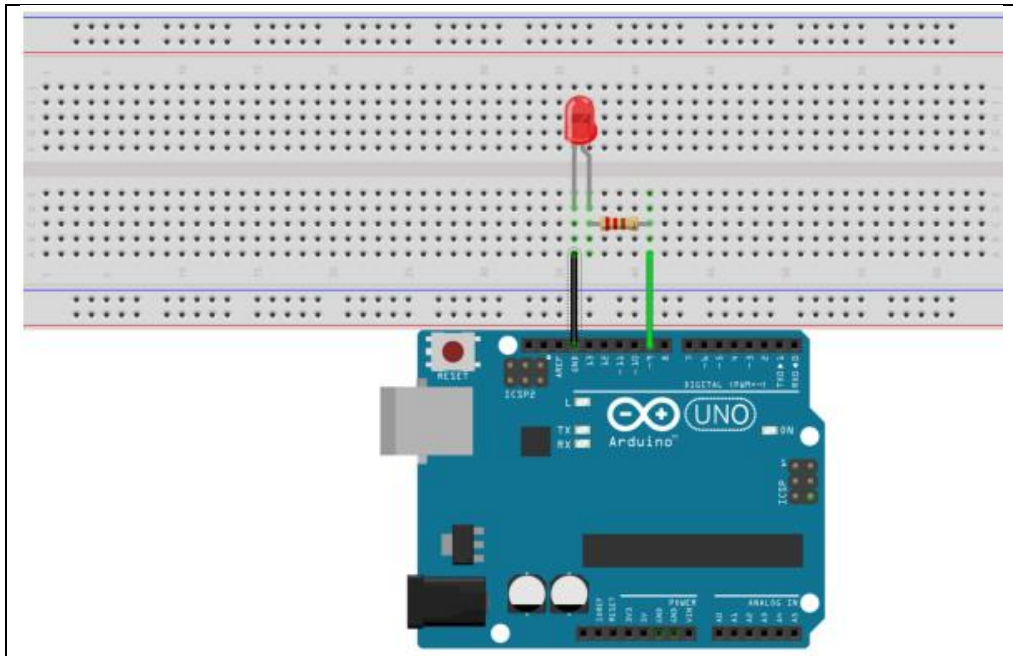


Figura 15: Montaje del proyecto de inicio (*Proserquisa, 2016*).



```
proyecto_led Arduino 1.8.9
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
proyecto_led
int led=9;

void setup() {
  pinMode(led,OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(led,HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(led,LOW);
  delay(500);
}

Compilado
El Sketch usa 942 bytes (2%) del espacio de almacenamiento de prog...
Las variables Globales usan 9 bytes (0%) de la memoria dinámica, d...
11 Arduino/Genuino Uno en COM5
```

Figura 16: Programación para el proyecto de inicio

En la Figura 16 se logra apreciar que la programación de un microcontrolador está compuesta por tres secciones, las cuales son Encabezado, Void setup y Void loop, estas secciones presentan las siguientes características:

- Encabezado: es en donde informaremos las librerías que se desean utilizar como las variables que controlaran los pines (pines de entrada como de salida) de la placa Arduino (ejemplo: `int led=9`).
- Void setup: Constituye la preparación del programa y la declaración de las variables

- Void loop: se incluye el código que se estará ejecutando continuamente por la placa Arduino

3.2. Funcionamiento de componentes del prototipo

3.2.1. Shield Data Logger para Arduino Uno Mega

Se realizó una búsqueda en la internet sobre la programación necesaria para el correcto funcionamiento de este componente externo, esta programación se encontraba en las librería RTCLib-master y sdfatlib, para el funcionamiento del reloj RTC y lector de tarjeta SD respectivamente.

Este componente va insertado sobre la placa Arduino UNO utilizando todos los pines de esta, como se muestra en la Figura 17, en donde los pines incrustados en el componente reemplazan a los de la placa manteniendo su funcionamiento

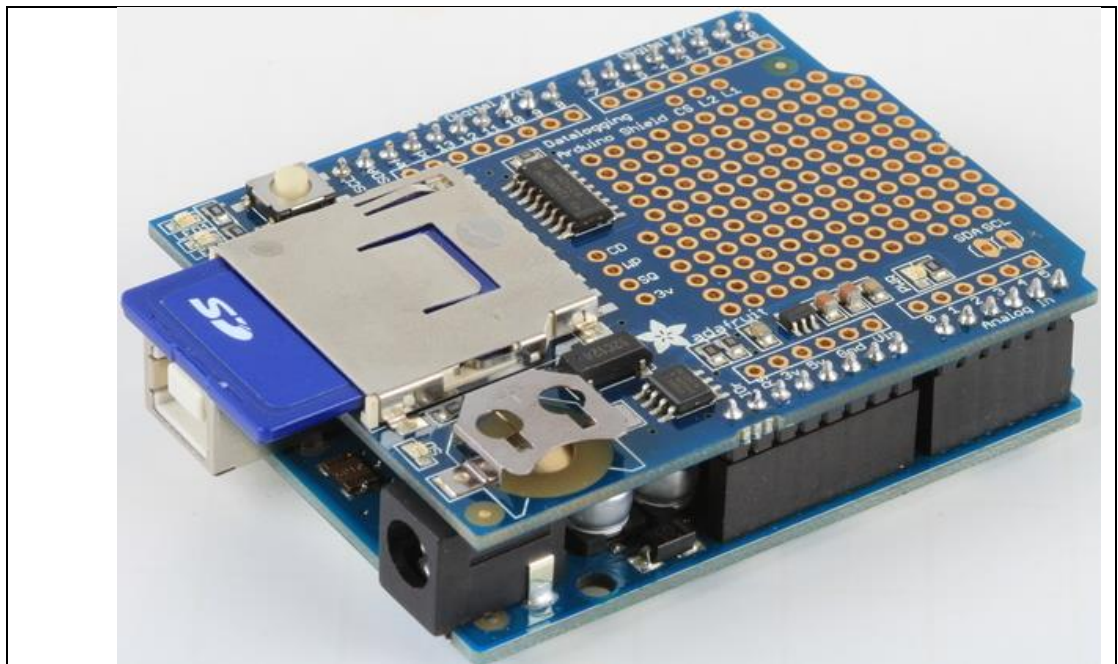


Figura 17: Montaje del Shield Data Logger para Arduino Uno Mega(Bill Earl, 2013)

3.2.2. Regulador De Voltaje Lm2596 DC-DC

Es un componente externo que no requiere de software para su funcionamiento. Este componente se le soldaron cables con un conector USB en la entrada del componente (IN+ y IN-) y cables con un conector macho en la salida del componente (OUT+ y OUT-) para facilitar la conexión al protoboard.

Una vez soldados todos los cables al componente se procedió a regular el voltaje de salida de este, para lo cual se conectó la entrada USB a la batería y los cables de salida a un multímetro, y con la ayuda de un destornillador se ajustó la salida de voltaje del componente a 5V.

3.2.3. Sensor 811

El fabricante del sensor 811 entrega las bibliotecas y software necesario para su funcionamiento a través del sitio web de GitHub, mientras que el montaje para su correcto funcionamiento fue extraído de la hoja técnica del sensor, ver Figura 18.

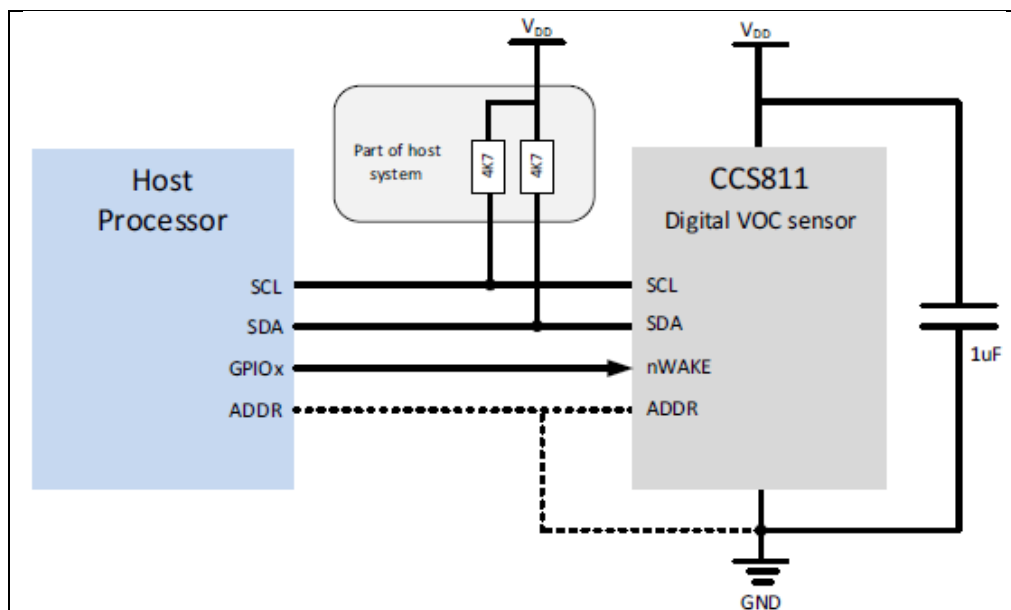


Figura 18: Montaje del sensor 811(ams, 2016)

En esta hoja técnica se indica que se deben utilizar componentes externos, estos componentes resultan ser las resistencias Pull up de 4,7 K Ω , las cuales se utilizan para la eliminación de la influencia de factores externos como lo es el ruido electrónico.

3.2.4. Sensor 6814.

El fabricante del sensor 6814 no entrega las bibliotecas, software ni montaje necesario para el correcto funcionamiento de este, debido a esto se procede a la búsqueda de esta información a través de foros y proyectos que se encuentren disponibles en internet.

A través de esta búsqueda se encontraron las bibliotecas y software necesarios para el funcionamiento en el foro de Arduino, en donde además se comentaban distintos montajes para el funcionamiento de este sensor con distintos resultados.

Para encontrar el montaje ideal para el funcionamiento del sensor 814, se seleccionaron 5 montajes descrito en el foro, los cuales variaban en la utilización o no de resistencias pull up, el valor de estas resistencias utilizadas y el voltaje de alimentación de estas mismas se pueden ver en la Tabla 7.

Tabla 7: Resumen de montajes descritos en el foro Arduino

Montaje	Utilización de Componentes externo	Valores de las resistencias pull up	Voltaje de alimentación
1	No	-	-
2	Si	1 M Ω / 330 K Ω / 20 K Ω	5 V
3	Si	1 M Ω / 330 K Ω / 20 K Ω	3.3 V
4	Si	47 K Ω / 47 K Ω / 47 K Ω	5 V
5	Si	47 K Ω / 47 K Ω / 47 K Ω	3.3 V

En donde el primer valor de las resistencias mostradas en la Tabla 7 corresponde a la salida de CO (R3), el segundo corresponde a la salida NH3 (R2) y el tercer valor corresponde a la salida NO2 (R1).

Una vez seleccionados los montajes descritos para el funcionamiento del sensor, se procedió a realizar las pruebas correspondientes para determinar el montaje ideal para el funcionamiento del sensor, en donde se considera que cada montaje separadamente como si fuera una prueba (Ej: montaje 1 = prueba 1), en donde el tiempo de duración de cada prueba es de media hora (30 min) y el montaje a utilizar para realizar las pruebas es el mostrado en la Figura 19.

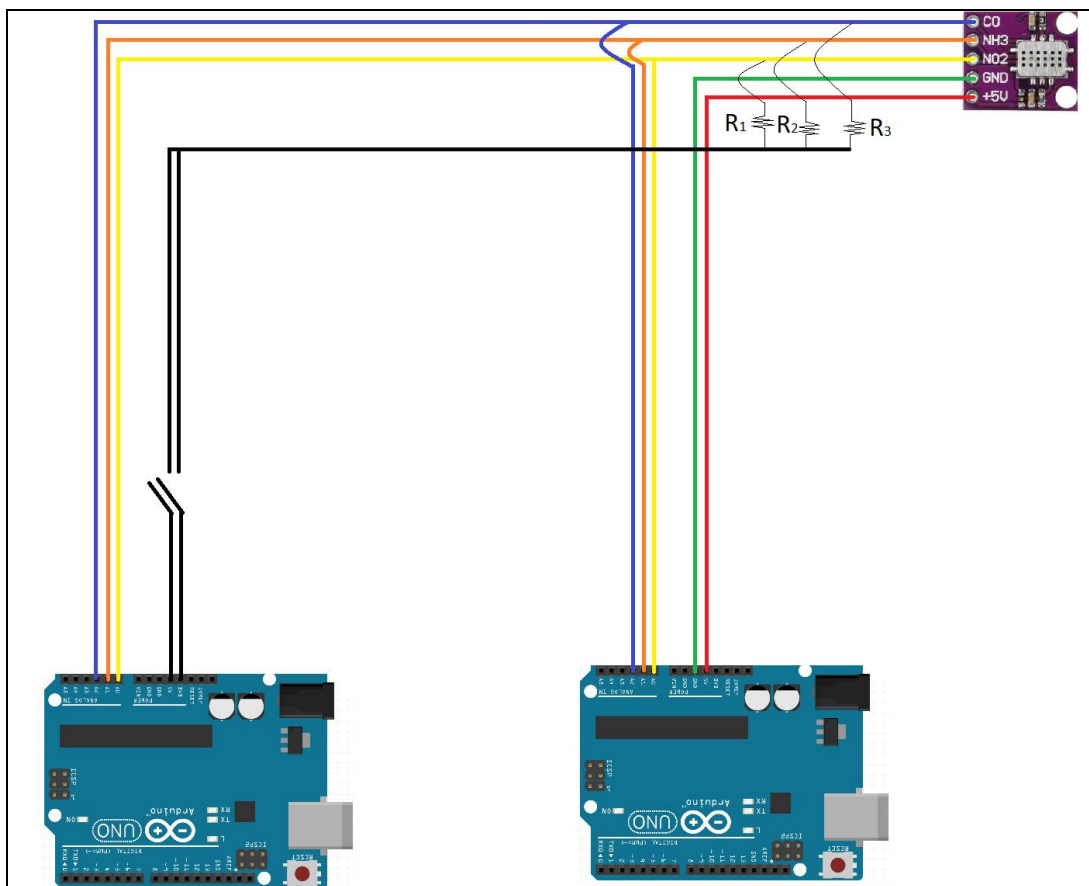


Figura 19: Montaje para las pruebas de R3, R2 y R1

3.2.4.1. Prueba para R1

En la Figura 20 es posible observar el comportamiento de cada una de las pruebas realizadas para determinar el valor de resistencia de R1 como su voltaje de alimentación, utilizando la regresión de demming para calcular valores de R^2 y de p-valor correspondiente a cada prueba.

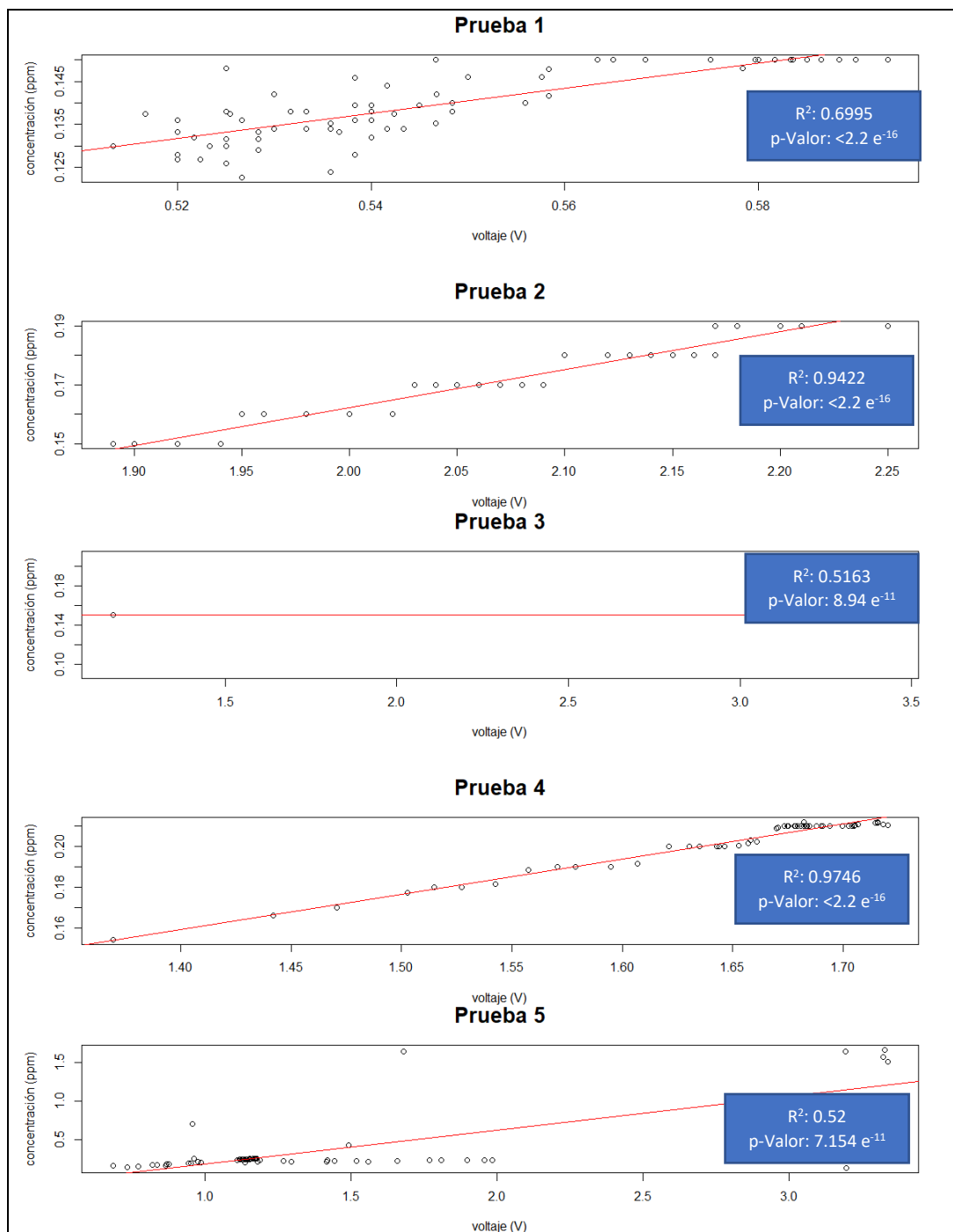


Figura 20: Pruebas para resistencia R1 para la señal CO

Al comparar las pruebas mostradas en la Figura 20 es posible apreciar que en todas las pruebas los valores de concentración de CO están sobre el mínimo indicado por el

fabricante (1 ppm), además de esto en las pruebas 2 y 4 son las que presentan un mejor comportamiento al comparar R^2 , p-valor, Δ concentración y Δ voltaje

3.2.4.2. Prueba para R2

En la Figura 21 es posible observar el comportamiento de cada una de las pruebas realizadas para determinar el valor de resistencia de R2 como su voltaje de alimentación, utilizando la regresión de demming para calcular valores de R^2 y de p-valor correspondiente a cada prueba.

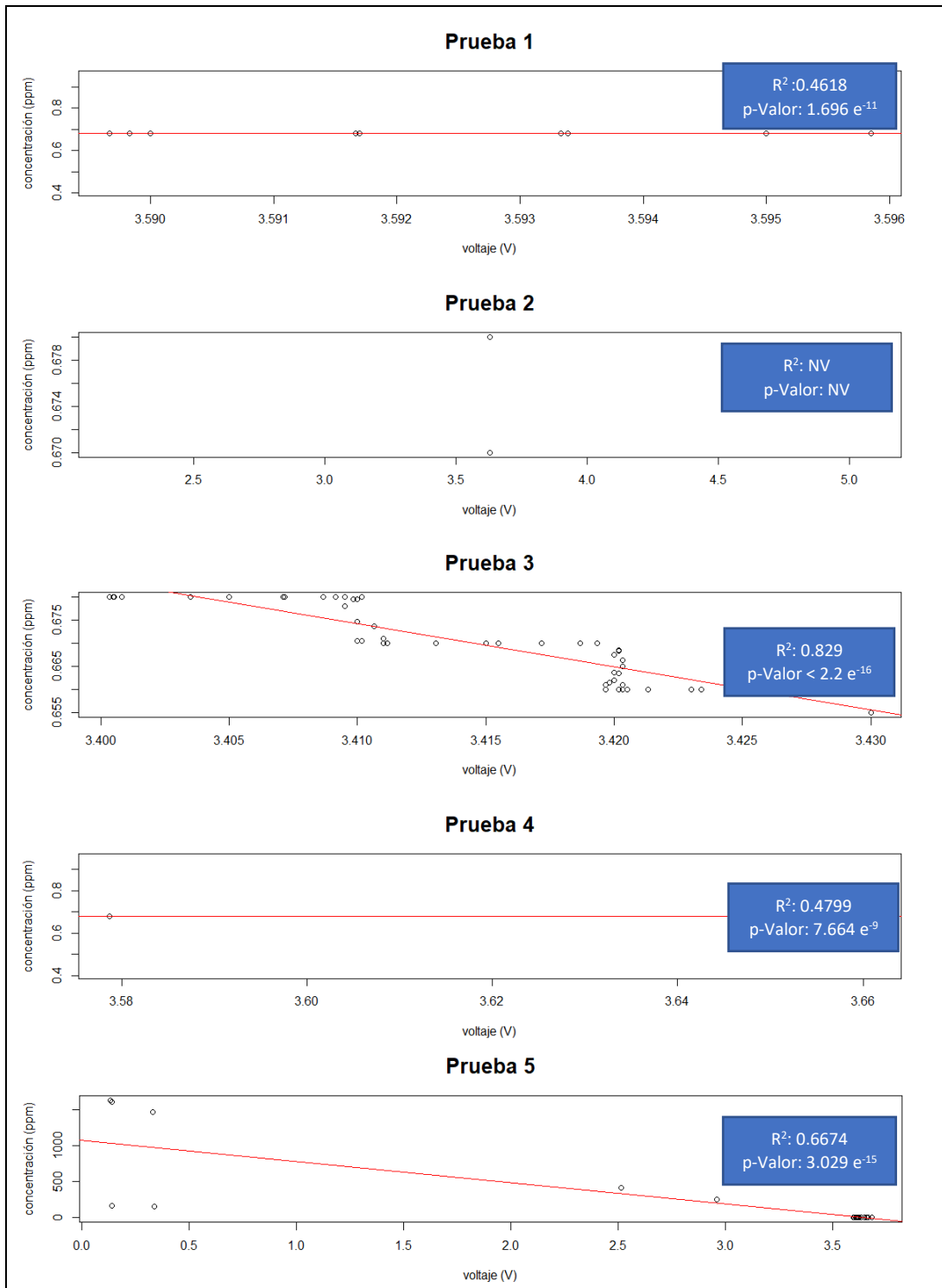


Figura 21: Prueba para resistencia R2 para la señal NH₃

Al comparar las pruebas mostradas en la Figura 21 es posible apreciar que solo la prueba 5 está por sobre el valor mínimo indicado por el fabricante (1 ppm), pero los valores entregados por esta prueba son $3,5 * 10^6$ veces la concentración normal de NH_3 en la atmosfera, con lo cual el funcionamiento en esta prueba no es ideal.

3.2.4.3. Prueba para R3

En la Figura 22 es posible observar el comportamiento de cada una de las pruebas realizadas para determinar el valor de resistencia de R1 como su voltaje de alimentación, utilizando la regresión de demming para calcular valores de R^2 y de p-valor correspondiente a cada prueba.

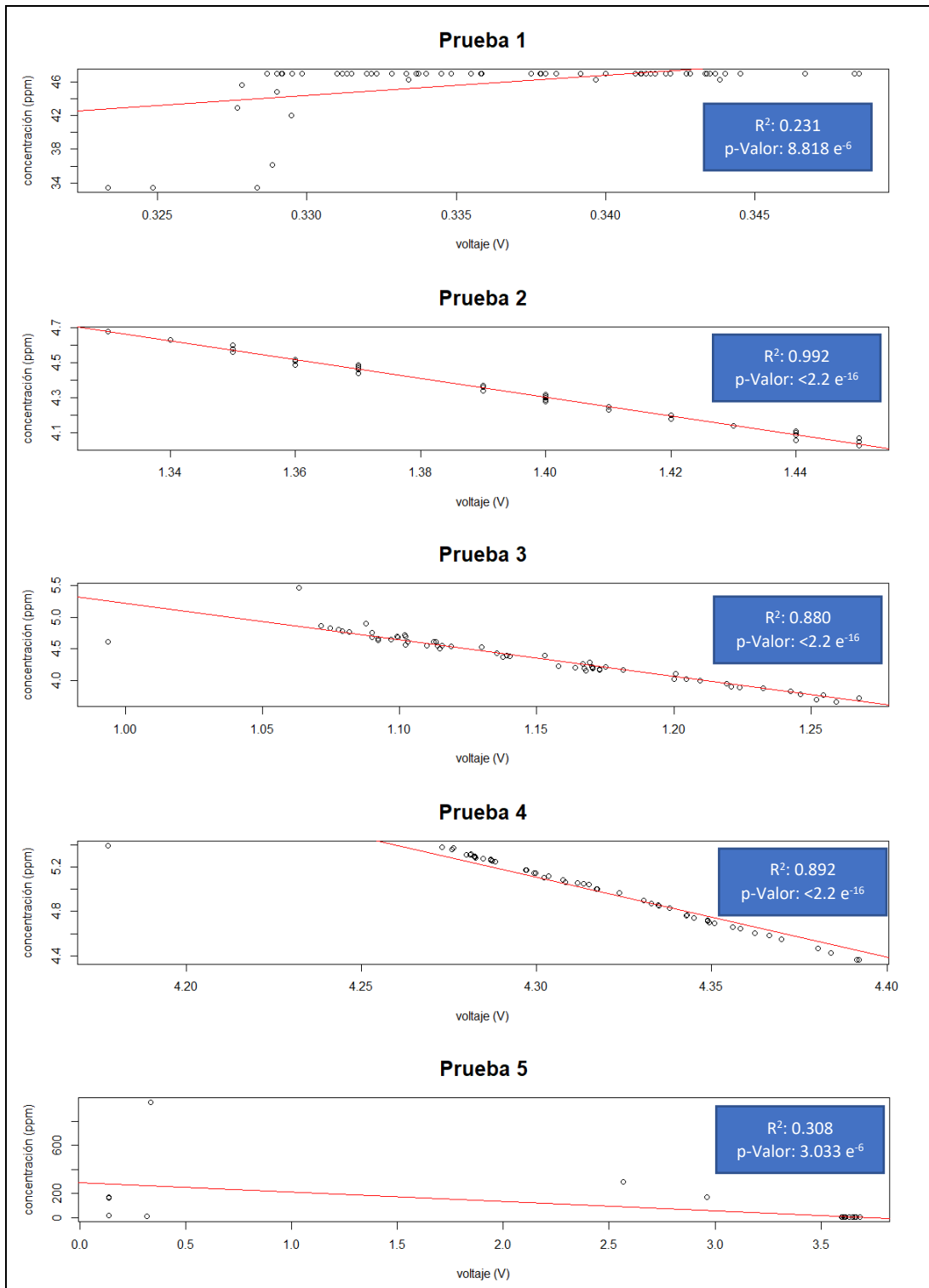


Figura 22: Pruebas de resistencia R3 para señal NO₂

Al comparar las pruebas mostradas en la Figura 22 es posible apreciar que todas las pruebas están sobre el mínimo indicado por el fabricante, además las pruebas 2 y 4 son las que presentan un mejor comportamiento al comparar R^2 , p-valor, Δ concentración y Δ voltaje

Con lo cual los montajes para las pruebas 2 y 4 son en donde el sensor 6814 presentan un mejor comportamiento, al comparar los Δ concentración y Δ voltaje (como se muestra en la Tabla 8, 9 y 10) podemos apreciar que el montaje realizado para la prueba 4 nos ofrece un rango de medición más amplio que la prueba 2, con lo cual será el montaje que se utilizará para la confección del prototipo.

Tabla 8: Resumen de valores de concentración y voltaje para CO

	concentración			voltaje		
	Máximo	Mínimo	Δ concentración	Máximo	Mínimo	Δ voltaje
Prueba 2	4.68	4.03	0.65	1.45	1.33	0.12
Prueba 4	4.37	5.40	1.03	4.39	4.18	0.21

Tabla 9: Resumen de valores de concentración y voltaje para NH₃

	concentración			voltaje		
	Máximo	Mínimo	Δ concentración	Máximo	Mínimo	Δ voltaje
Prueba 2	0.68	0.67	0.01	3.63	3.63	0.00
Prueba 4	0.68	0.68	0.00	3.66	3.58	0.08

Tabla 10: Resumen de valores de concentración y voltaje para NO₂

	concentración			voltaje		
	Máximo	Mínimo	Δ concentración	Máximo	Mínimo	Δ voltaje
Prueba 2	0.15	0.19	0.04	2.25	1.89	0.36
Prueba 4	0.21	0.15	0.06	1.72	1.37	0.35

3.3. Diseño y construcción del prototipo

3.3.1. Diseño.

Una vez conocido el montaje individual que requiere cada componente a utilizar, se procedió a diseñar el montaje del prototipo, en el cual se busca la utilización mínima de cables para la conexión entre la placa Arduino Uno y los componentes, ver Figura 23.

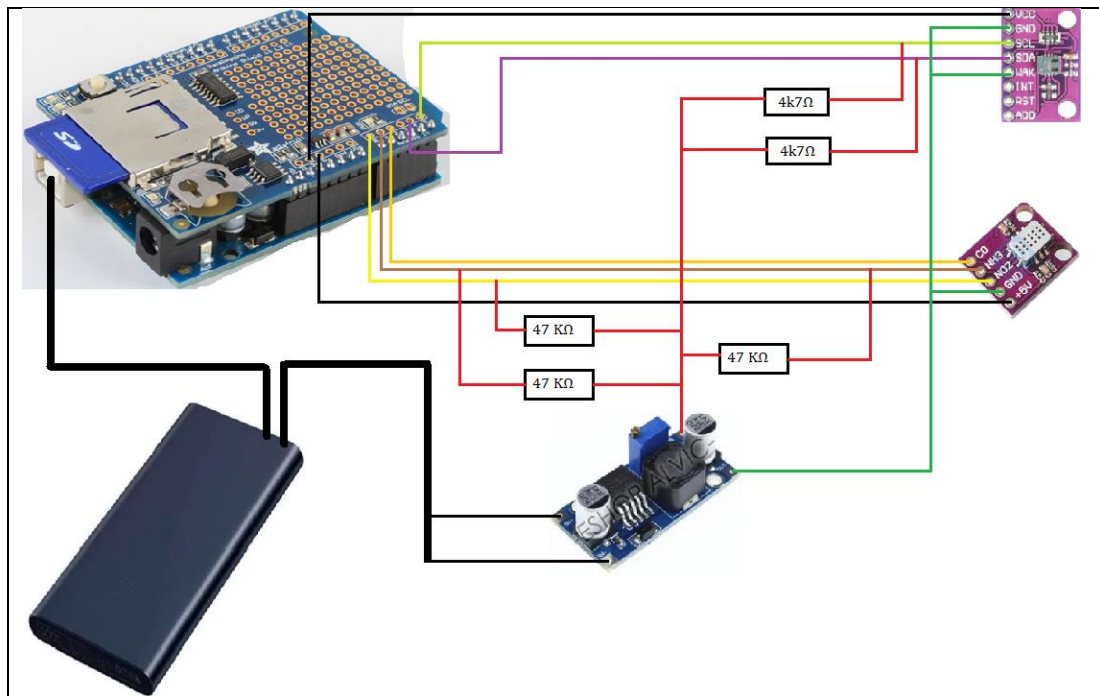


Figura 23: Diseño del prototipo

3.3.2. Construcción

Una vez diseñado el prototipo se procedió al montaje del circuito eléctrico (ver Figura 24), el cual fue sometido a diversas perturbaciones (incienso, vela, papel incinerado y body spray), esperando que con estas perturbaciones el sensor reaccione generando un aumento en las concentraciones que este se encuentra midiendo.

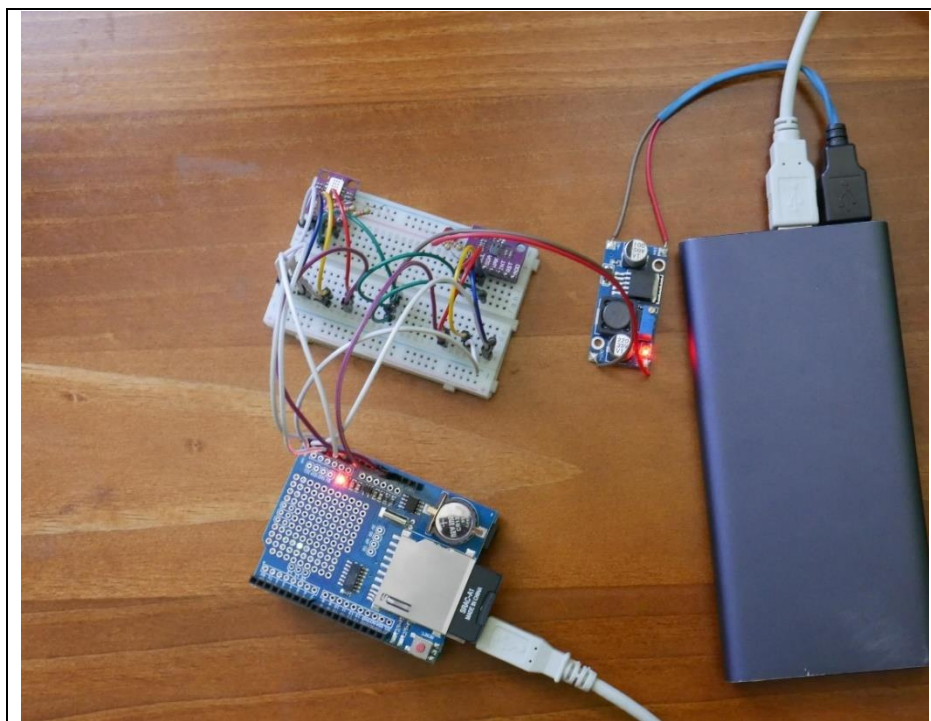


Figura 24: Construcción del prototipo

En la Tabla 11 es posible apreciar el aumento generado por cada perturbación para cada gas y temperatura medida con el prototipo, en donde se registró un mayor aumento de NO_2 cuando el estímulo era la vela, para la temperatura cuando el estímulo correspondía al body spray y para el resto de los gases cuando el estímulo era el papel quemado.

Tabla 11: Variación generada por perturbaciones*

Gas	Incienso	vela	Papel incinerado	body spray**
CO	0.74	0.64	16.87	11.99
NH ₃	0.00	0.00	0.02	0.00
NO ₂	0.13	0.21	0.00	0.01
C ₂ H ₅ OH	0.37	0.31	11.32	8.04
CH ₄	506.45	358.57	402212.60	141703.60
C ₃ H ₈	0.24	1.10	21.52	1.01
C ₄ H ₁₀	0.45	0.50	11.25	0.66
H ₂	0.19	0.16	7.72	5.23
TVOC	26.30	58.96	1052.99	176.79
eCO ₂	173.20	386.76	6912.83	1160.69
temperatura	0.66	1.72	0.32	2.76

*Diferencia entre promedio de mediciones antes de la perturbación y el máximo de la perturbación

**uso combinado de body spray contenido en un tubo de ensayo y un encendedor para calentar la solución, facilitando la liberación de gases.

3.4. Análisis de la campaña de medición

3.4.1. Series de tiempo

Las Figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 y 43 que se muestran en el anexo 2 se logra apreciar la campaña de medición completa que se realizó durante los meses de mayo y junio del año 2020 en la comuna de la Granja de la región metropolitana para los siguientes gases contaminantes: CO, H₂, CH₄, C₂H₅OH, NH₃, C₃H₈, C₄H₁₀, NO₂, eCO₂ y TVOC como para temperatura ambiental.

Esta campaña de medición se realizó en una habitación de unas dimensiones de 9 m², que no contaba con calefacción y gran parte del día contaba con una persona en su interior. Para modificar el ambiente de la habitación se abría o cerraba la ventana o se realizaban las mismas perturbaciones realizadas para evaluar la construcción del prototipo.

Debido a que el funcionamiento del prototipo durante la campaña de medición no se aprecian grandes cambios de concentraciones de los gases, se decidió analizar el mes con los cambios de concentraciones más grandes registradas durante los meses de mayo y junio las cuales están relacionadas con las perturbaciones realizadas, en donde el mes seleccionado es el mes de junio del 2020.

En las figuras 25, 26, 27 y 28 es posible observar las mediciones durante el mes de junio del 2020 para el sensor de oxidación, sensor de amoníaco, sensor de reducción y sensor 811 respectivamente.

Como se observa en la Figuras 25, la concentración de NO_2 en el período de junio, la concentración del gas se mantiene por sobre el valor mínimo que puede medir el sensor según el fabricante, es posible apreciar que el sensor de oxidación para medir NO_2 reacciona a perturbaciones como la perturbación 1 la cual está relacionada con la perturbación de la vela, a pesar de esto el sensor de oxidación para medir NO_2 es muy sensible con la auto calibración la cual si no es eficiente generara que el sensor indique que existe una concentración mayor de NO_2 en el ambiente, como lo muestra durante las fechas del 20 al 25 de junio.

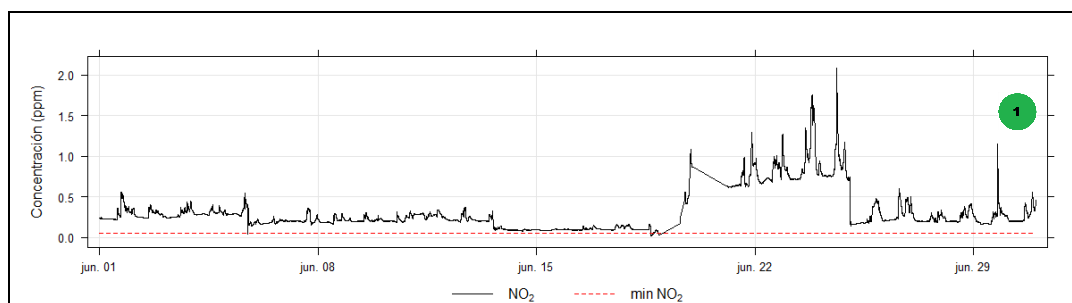


Figura 25: Sensor de oxidación del sensor 6814 para medir NO_2 .

Como se observa en la Figura 26, la concentración de NH_3 , C_3H_8 y C_4H_{10} en el período de junio, la concentración de NH_3 , C_3H_8 y C_4H_{10} no superó la concentración mínima que puede medir el sensor según el fabricante, además no se aprecian reacciones a las distintas perturbaciones realizadas.

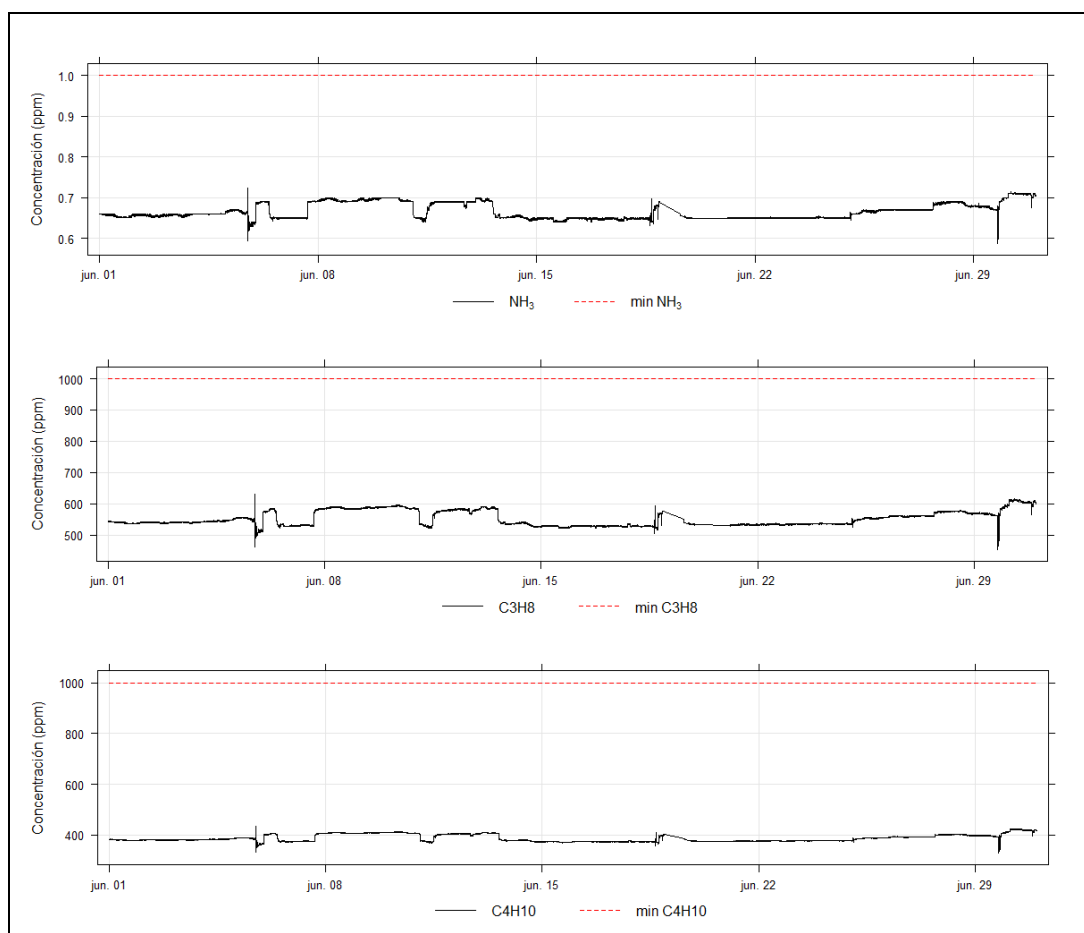


Figura 26: Sensor de amoníaco del sensor 6814 para medir NH_3 , C_3H_8 y C_4H_{10}

Como se observa en las Figuras 27, la concentración de CO , CH_4 , H_2 y $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ en el período de junio, la concentración de CO se mantiene por sobre el valor mínimo indicado por el fabricante y reacciona a estímulos, mientras que la concentración de CH_4 , H_2 y $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ solo las variaciones de concentraciones relacionadas a las perturbaciones están sobre el valor mínimo indicado por el fabricante, como se observa en las perturbaciones

2, 3, 4 y 5 relacionadas a body spray, papel quemado, body spray y incienso respectivamente.

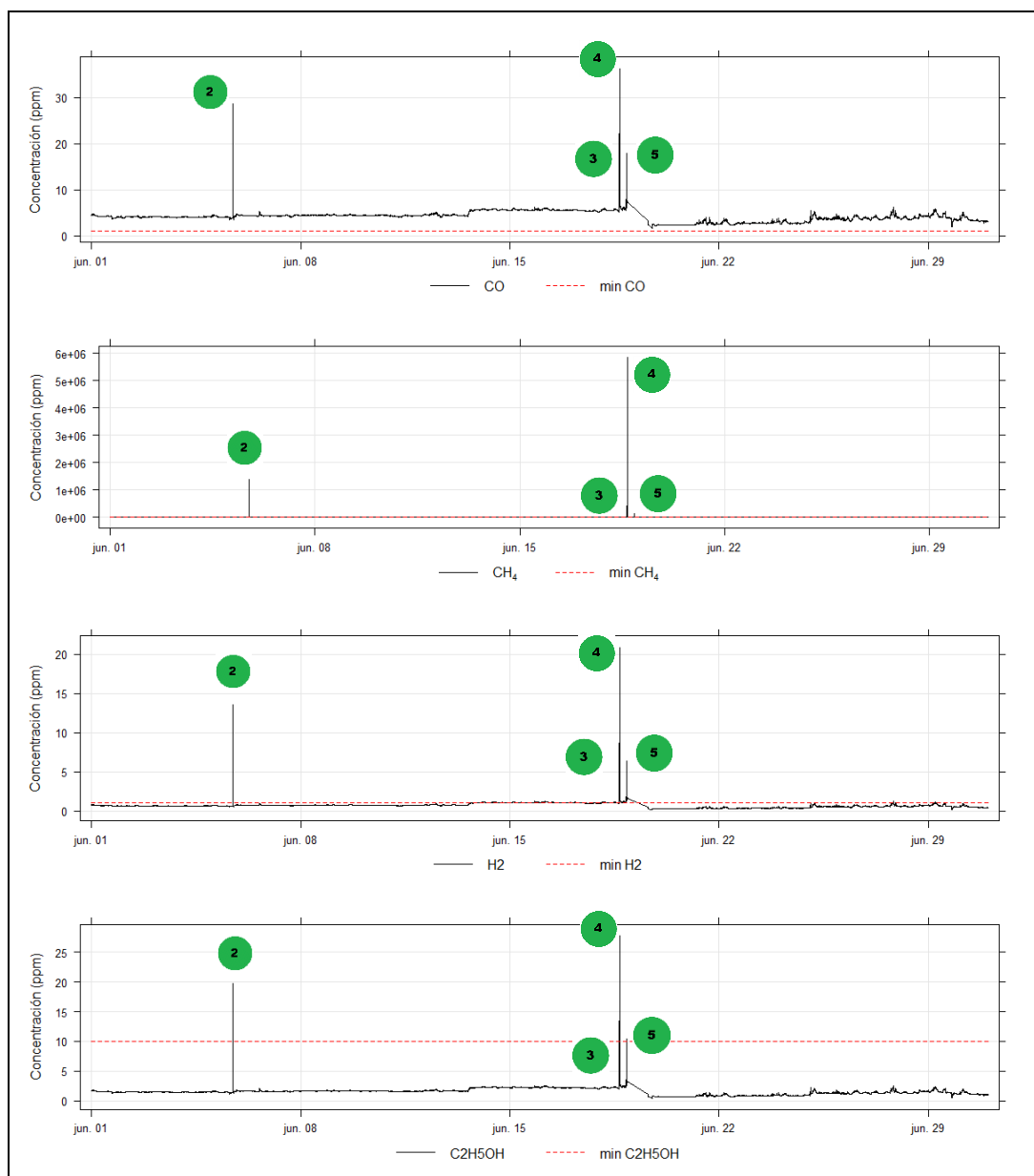


Figura 27: Sensor de reducción del sensor 6814 para medir CO, CH₄, H₂ y C₂H₅OH

Como se observa en las Figuras 28, la concentración de eCO_2 y TVOC como la temperatura durante el período de junio, se encuentran sobre el valor mínimo y bajo el valor máximo indicado por el fabricante.

Al comparar la temperatura ambiental mostrada en la Figura 43 es posible apreciar un comportamiento más variado al inicio de la campaña (mes de mayo) en comparación al término de la campaña de medición (mes de junio) lo cual se puede deber que al término de la campaña a través del constante funcionamiento del prototipo se haya generado una isla de calor a microescala, lo cual se aprecia de mejor manera en la Figura 28.

Respecto al eCO_2 y TVOC no se aprecia ninguna diferencia en el comienzo como en el final de la campaña ya que la medición de estos gases se aprecia una fluctuación constante durante la campaña de medición, siendo estas fluctuaciones en el rango de medición descrito por el fabricante del sensor

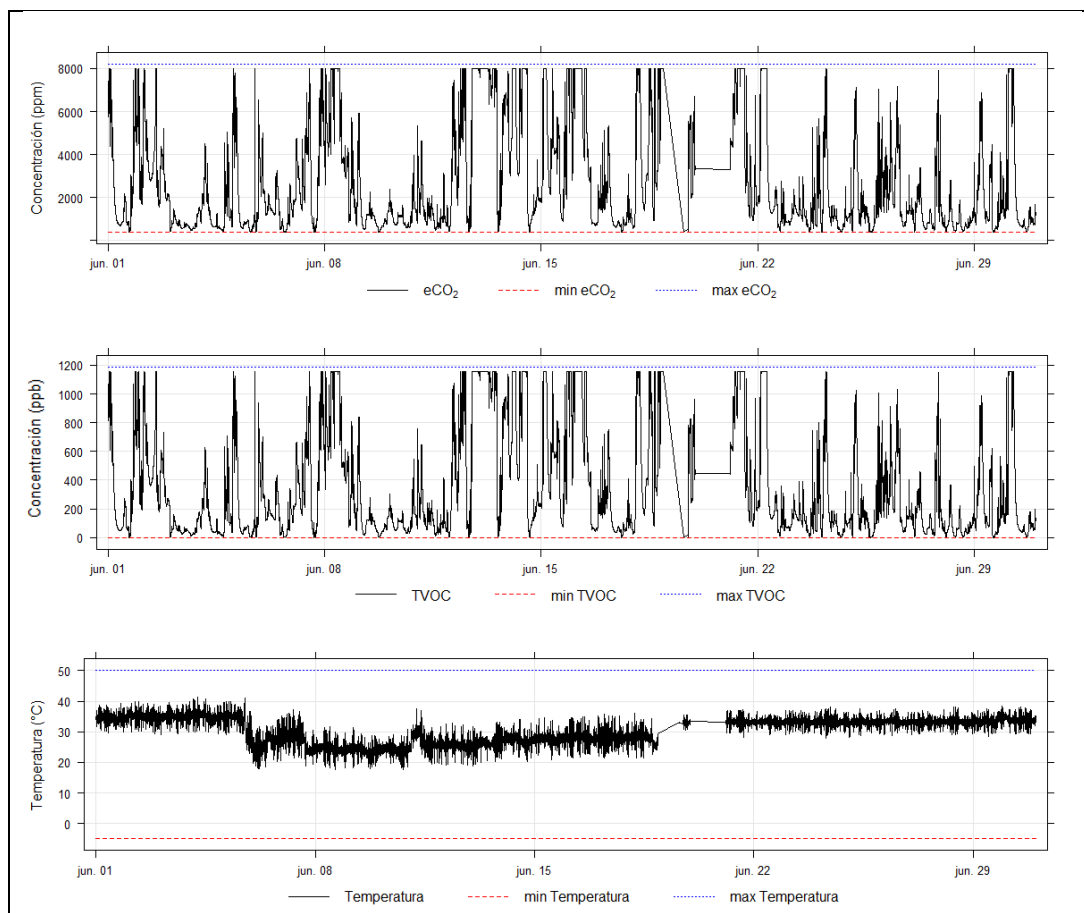


Figura 28: Sensor 811 para medir eCO₂, TVOC y temperatura

Debido al funcionamiento del prototipo mostrado en las Figuras (Figura 25, 26, 27 y 28) es posible apreciar que el prototipo no distingue los distintos contaminantes medidos a través del sensor de reducción, debido a que los gases medidos por los sensores presentan el mismo comportamiento, mismo fenómeno que ocurre con el sensor de ní amónico. A pesar de esto es posible analizar distintos usos para el prototipo por uno o varios gases medidos por el prototipo, estos usos son:

- 1- Mediciones en zonas urbanas (interior/ exterior): esto debido a que el prototipo reacciona a contaminantes como el NO₂ el cual es generado por vehículos.

- 2- Mediciones en zonas rurales (interior/exterior): esto debido a que el prototipo reacciona a contaminantes como el CO el cual es generado por la combustión incompleta, la cual se puede asociar a la quema de leña.
- 3- Mediciones en zonas industriales (interior/exterior): esto debido a que el prototipo mide distintos contaminantes gaseosos que se generan en esta zona, como las altas concentraciones de estos contaminantes entrando en los rangos de medición del prototipo como es el caso de CH₄, entre otros.

De los tres posibles usos mencionados para el prototipo, el uso más adecuado para este correspondería a las mediciones en zonas industriales en interiores como en exteriores, esto debido a la diversidad de contaminantes gaseosos conocidos de estas zonas, debido a las distintas declaraciones de reporte único de emisiones atmosféricas (RUEA) de las empresas, como a la alta concentración de estos, lo cual facilita la detección de gases por parte de sensores que miden altas concentraciones, como es el caso del prototipo

3.4.2. Dependencia de la respuesta de los sensores con variables ambientales.

En las Figuras 29, 30, 31 y 32, se aprecian comparaciones entre variables ambientales (temperatura ambiente) que registraba el prototipo con los gases que superaron el mínimo indicado por los fabricantes de los sensores, los cuales son el CO, NO₂, eCO₂ y TVOC respectivamente.

En la Figura 29 se observa la comparación entre el CO y la temperatura, en la cual se aprecia que ante una gran variación en la concentración de CO se genera un aumento o disminución de la temperatura medida por el prototipo.

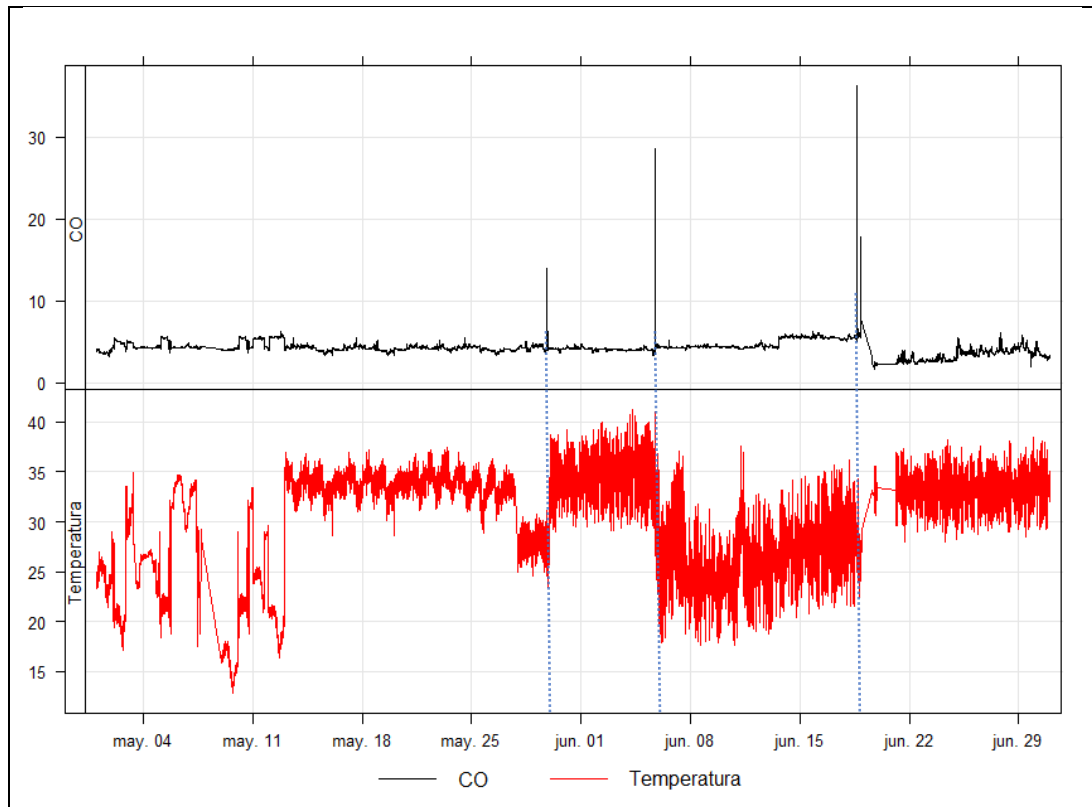


Figura 29: Comparación del CO en ppm con la temperatura en °C

En la Figura 30 se observa la comparación entre el NO_2 y la temperatura, en la cual no se logra apreciar ningún cambio de temperatura generado por el aumento o disminución de la concentración de NO_2

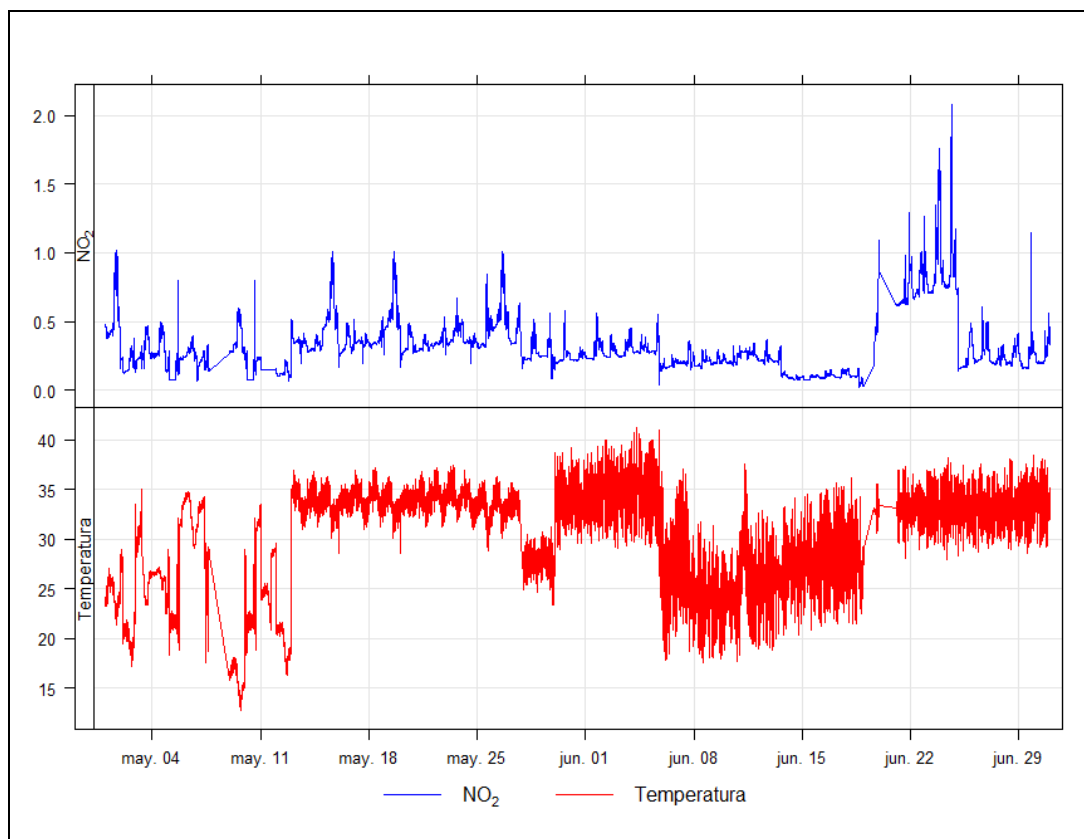


Figura 30: Comparación del NO₂ en ppm con la temperatura en °C

En la Figura 31 se observa la comparación entre el eCO₂ y la temperatura, en la cual no se logra apreciar ningún cambio de temperatura generado por el aumento o disminución de la concentración de eCO₂

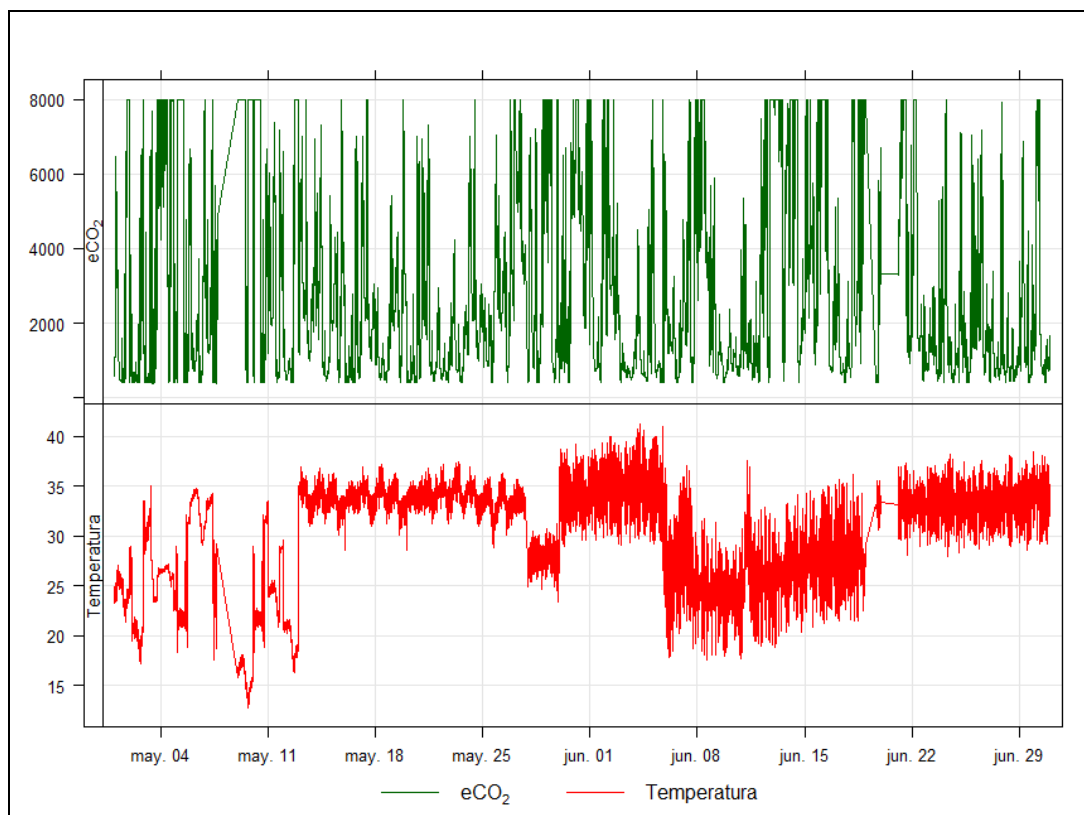


Figura 31: Comparación del eCO₂ en ppm con la temperatura en °C

En la Figura 32 se observa la comparación entre el TVO y la temperatura, en la cual no se logra apreciar ningún cambio de temperatura generado por el aumento o disminución de la concentración de TVOC.

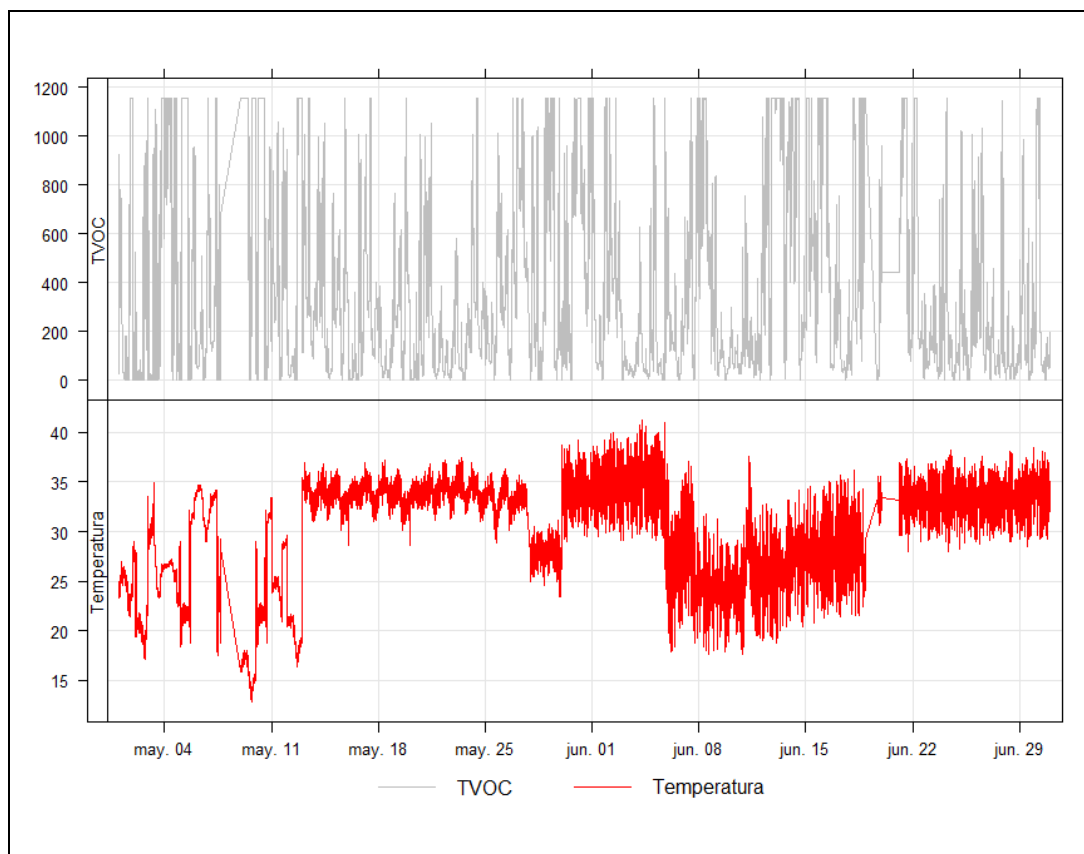


Figura 32: Comparación de los TVOC en ppm con la temperatura °C

Al comparar la temperatura ambiental con los distintos gases solo se apreció que frente a grandes cambios de concentración de CO generado por las distintas perturbaciones se generaron cambios en la temperatura.

A pesar de que los cambios ocurren cuando existió la perturbación, el aumento o disminución de la temperatura continuo hasta que se registra la siguiente perturbación, lo cual puede significar que estas variaciones hayan generado algún tipo de interferencia en el sensor que mide temperatura.

4. CONCLUSIONES

- La revisión de distintos materiales literarios, audiovisuales de distintos proyectos, como la realización de un proyecto de inicio (encendido y apagado de un led), permiten la comprensión básica sobre el funcionamiento de las placas Arduino.
- El correcto funcionamiento de los distintos componentes del prototipo se encuentra determinado a través de la información del montaje y de las instrucciones básicas que se tengan sobre componente a analizar, como de las distintas pruebas preliminares que se realicen sobre el componente que permiten determinar de la utilización de un componente externo (resistencias pull up).
- El diseño de un prototipo debe tener en consideración cuales son los componentes que utilizara y como estos deben ir conectados para su correcto funcionamiento sin generar interferencias entre sí.
- La prueba constante del prototipo permite observar si el diseño realizado previamente cumple con la finalidad de evitar interferencias entre los distintos componentes como permitir el correcto funcionamiento del prototipo, además de comprobar conexiones, soldaduras realizadas, entre otros.
- Se logro generar un prototipo de equipo de medición de calidad del aire de bajo costo basado en Arduino siendo este fijo como portátil, el cual permite medir distintos contaminantes gaseosos como CO, H₂, CH₄, C₂H₅OH, NH₃, C₃H₈, C₄H₁₀, NO₂, eCO₂ y TVOC, además de permitir medir variables ambientales como la temperatura en intervalos de 3 segundos con 53 decisegundos.
- Las fortalezas del prototipo se encuentran principalmente en la alta resolución temporal, su bajo costo, su reducido tamaño, su versatilidad para medir en interior

como en el exterior y medir concentraciones en distintas zonas (rural, urbano e industrial).

- Las debilidades del prototipo se encuentran principalmente en la medición de la temperatura ambiental por largos lapsos de tiempo, esto debido a que los calefactores integrados en los sensores modifican la temperatura generando una micro isla de calor, además de esto la medición de algunos gases como NH_3 , C_3H_8 , C_4H_{10} , CH_4 , H_2 y $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ que requieren de altas concentraciones para que entren en el rango de medición indicado por el fabricante del sensor 6814.
- Dentro de las proyecciones a considerar para el trabajo realizado son:
 - Incluir sensores que midan variantes ambientales (como humedad y temperatura), como un módulo Wifi Bluetooth para la obtención de la información de manera remota como en tiempo real.
 - Creación de una página web y/o una aplicación de teléfono móvil que permitan la visualización de las mediciones a tiempo real del prototipo.
 - Realizar una validación del prototipo a través de un método de referencia.
 - Creación de una red de prototipos que permitan conocer la concentración de varios lugares en simultaneo.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AFEL. (2020, agosto 27). *Shield Data Logger para Arduino Uno Mega*.
<https://afel.cl/producto/shield-data-logger-arduino-uno-mega/>
- ams. (2016). *CCS811_Datasheet-DS000459.pdf*. ams.
- Arduino Uno Rev3 | Arduino Official Store. (2020, agosto 21).
<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- Arroyo, P., Herrero, J. L., Suárez, J. I., & Lozano, J. (2019). Wireless Sensor Network Combined with Cloud Computing for Air Quality Monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/s19030691>
- Banco Central de Chile. (2019, septiembre 6). *Inicio*. <https://www.bcentral.cl/>
- Barsan, N., & Weimar, U. (2001). *Conduction Model of Metal Oxide Gas Sensors*. 25.
- Bill Earl. (2013, abril 12). *Adafruit Data Logger Shield*. Adafruit Learning System.
<https://learn.adafruit.com/adafruit-data-logger-shield/overview>
- Castañeda-Aviña, L. (2018). *Sensores de gases basados en semiconductores*. 6.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-97532018000300004&lng=es&tlng=es.
- Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes. (2015). *Proyecto Smairt*.
<http://www.smairt.es/informacionProyecto.php>
- Centro de Innovación de Infraestructuras Inteligentes. (2016). *SMairT*.
<http://www.fci3.es/smairt/>
- DTO-104. (2019, mayo 16). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.
<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1131641>
- DTO-112. (2003, marzo 6). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.
<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=208198>

DTO-113. (2003, marzo 6). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.

<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=208200>

DTO-114. (2003, marzo 6). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.

<https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=208185>

DTO-115. (2002, septiembre 10). Ley Chile - Biblioteca del Congreso Nacional.

https://www.leychile.cl/Navegar/index_html?idNorma=202437

ESHOP YAGUZ. (2020, septiembre 3). *Regulador De Voltaje Lm2596 Dc-dc Buck*

Regulable Arduino. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-539355988-regulador-de-voltaje-lm2596-dc-dc-buck-regulable-arduino-_JM

Filippini, D., Aragón, R., & Weimar, U. (2013). DESARROLLO Y MEDICIÓN DE SENSORES DE GASES BASADOS EN CAPACITORES MOS. *ANALES AFA*, 12(1). <https://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/791>

José Pichel. (2019, marzo 24). *La polémica de los sensores «low cost»: Por qué estamos midiendo mal la calidad del aire*. El Confidencial.

https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2019-03-24/sensores-low-cost-calidad-aire-contaminacion_1900134/

life + respira. (2017). *INFORME LAYMAN Medidas para reducir la exposición de los ciclistas a los principales contaminantes atmosféricos urbanos*.

ModuleLive. (2020, agosto 27). *Módulo CJMCU 6814 Sensor de Gas de MICS 6814 calidad del aire CO VOC NH3 Sensor de Gas de óxidos de nitrógeno placa 1000ppm[Sensores de presión]*. aliexpress.com.

[//es.aliexpress.com/item/32959036821.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://es.aliexpress.com/item/32959036821.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=)

Organización Mundial de la Salud. (2018, mayo 2). *Calidad del aire y salud*. WHO.

[https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de la Salud. (2021, enero 12). *Contaminación del aire*. WHO; World Health Organization.

http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/air_pollution/es/

PROPHONELTDA. (2020, agosto 30). *Xiaomi Mi Power Bank 2s 10000 Mah Negro*—

Prophone. https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-456914753-xiaomi-mi-power-bank-2s-10000-mah-negro-prophone-_JM

Proserquisa. (2016, octubre 5). *Tutorial 1: Introducción a Arduino*.

<http://cursoarduino.proserquisa.com/2016/10/05/introduccion/>

Raúl G. E. S. Morales. (2006). *Contaminación atmosférica urbana: Episodios críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago*. Edit. Universitaria.

SGX Sensortech Limited. (2015). *The MiCS-6814 is a compact MOS sensor with three fully.pdf*.

urban clouds. (2019). *Informe CURMOS MALAGA Correos Urban Clouds 2018*.

Your Cee. (2020, agosto 27). *Módulo de detección de dióxido de carbono, Sensor de detección CCS811 CO2 eCO2 TVOC, detección de calidad de aire, salida I2C CJMCU 811 [27-8-2020]*. aliexpress.com.

[//es.aliexpress.com/item/33058004405.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=](https://es.aliexpress.com/item/33058004405.html?src=ibdm_d03p0558e02r02&sk=&aff_platform=&aff_trace_key=&af=&cv=&cn=&dp=)

6. ANEXO

6.1. Anexo 1: Software Prototipo

A continuación, es posible apreciar el software que se construyó para el funcionamiento del prototipo, en el cual se compilaron los distintos softwares de los componentes de este (Shield Data Logger para Arduino Uno Mega, Sensor 811 y sensor 6814).

```
#include <SD.h>
#include <math.h>
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>
#include "RTClib.h"
#include "Adafruit_CCS811.h"
File myFile;
RTC_DS1307 rtc;
Adafruit_CCS811 ccs;
int segundo, minuto, hora, dia, mes;
long anio;
DateTime HoraFecha;
enum channel {
CH_NH3, CH_RED, CH_OX
};
typedef enum channel channel_t;
enum gas {
CO, NO2, NH3, C3H8, C4H10, CH4, H2, C2H5OH
};
typedef enum gas gas_t;
#define NH3PIN A1
#define COPIN A2
#define OXPIN A0
uint16_t NH3baseR;
uint16_t REDbaseR;
uint16_t OXbaseR;
uint16_t getResistance(channel_t channel) {
unsigned long rs = 0;
int counter = 0;
switch (channel) {
case CH_NH3:
for(int i = 0; i < 100; i++) {
rs += analogRead(NH3PIN);
```

```
counter++;
delay(2);
}
return rs/counter;
case CH_RED:
for(int i = 0; i < 100; i++) {
rs += analogRead(COPIN);
counter++;
delay(2);
}
return rs/counter;
case CH_OX:
for(int i = 0; i < 100; i++) {
rs += analogRead(OXPIN);
counter++;
delay(2);
}
return rs/counter;
}
return 0;
}
void calibrateMICS() {
uint8_t seconds = 10;
uint8_t delta = 2;
uint16_t bufferNH3[seconds];
uint16_t bufferRED[seconds];
uint16_t bufferOX[seconds];
uint8_t pnrNH3 = 0;
uint8_t pnrRED = 0;
uint8_t pnrOX = 0;
uint16_t fltSumNH3 = 0;
uint16_t fltSumRED = 0;
uint16_t fltSumOX = 0;
uint16_t curNH3;
uint16_t curRED;
uint16_t curOX;
bool NH3stable = false;
bool REDstable = false;
bool OXstable = false;
for (int i = 0; i < seconds; ++i) {
bufferNH3[i] = 0;
bufferRED[i] = 0;
bufferOX[i] = 0;
}
do {
delay(1000);
Serial.print(".");
unsigned long rs = 0;
delay(50);
```



```

for (int i = 0; i < 3; i++) {
  delay(1);
  rs += analogRead(NH3PIN);
}
curNH3 = rs/3;
rs = 0;
delay(50);
for (int i = 0; i < 3; i++) {
  delay(1);
  rs += analogRead(COPIN);
}
curRED = rs/3;
rs = 0;
delay(50);
for (int i = 0; i < 3; i++) {
  delay(1);
  rs += analogRead(OXPIN);
}
curOX = rs/3;
fltSumNH3 = fltSumNH3 + curNH3 - bufferNH3[pntrNH3];
fltSumRED = fltSumRED + curRED - bufferRED[pntrRED];
fltSumOX = fltSumOX + curOX - bufferOX[pntrOX];
bufferNH3[pntrNH3] = curNH3;
bufferRED[pntrRED] = curRED;
bufferOX[pntrOX] = curOX;
NH3stable = abs(fltSumNH3 / seconds - curNH3) < delta;
REDstable = abs(fltSumRED / seconds - curRED) < delta;
OXstable = abs(fltSumOX / seconds - curOX) < delta;
pntrNH3 = (pntrNH3 + 1) % seconds ;
pntrRED = (pntrRED + 1) % seconds;
pntrOX = (pntrOX + 1) % seconds;
if(!NH3stable) {
  Serial.print("(NH3:");
  Serial.print(abs(fltSumNH3 / seconds - curNH3));
  Serial.print(")");
}
if(!REDstable) {
  Serial.print("(RED:");
  Serial.print(abs(fltSumNH3 / seconds - curRED));
  Serial.print(")");
}
if(!OXstable) {
  Serial.print("(OX:");
  Serial.print(abs(fltSumNH3 / seconds - curOX));
  Serial.print(")");
}
} while (!NH3stable || !REDstable || !OXstable);
NH3baseR = fltSumNH3 / seconds;
REDbaseR = fltSumRED / seconds;

```

```

OXbaseR = fltSumOX / seconds;
}
uint16_t getBaseResistance(channel_t channel) {
switch (channel) {
case CH_NH3:
return NH3baseR;
case CH_RED:
return REDbaseR;
case CH_OX:
return OXbaseR;
}
return 0;
}
float getCurrentRatio(channel_t channel) {
float baseResistance = (float) getBaseResistance(channel);
float resistance = (float) getResistance(channel);
return resistance / baseResistance * (1023.0 - baseResistance) / (1023.0 -
resistance);
return -1.0;
}
float measureMICS(gas_t gas) {
float ratio;
float c = 0;
switch (gas) {
case CO:
ratio = getCurrentRatio(CH_RED);
c = pow(ratio, -1.179) * 4.385;
break;
case NO2:
ratio = getCurrentRatio(CH_OX);
c = pow(ratio, 1.007) / 6.855;
break;
case NH3:
ratio = getCurrentRatio(CH_NH3);
c = pow(ratio, -1.67) / 1.47;
break;
case C3H8:
ratio = getCurrentRatio(CH_NH3);
c = pow(ratio, -2.518) * 570.164;
break;
case C4H10:
ratio = getCurrentRatio(CH_NH3);
c = pow(ratio, -2.138) * 398.107;
break;
case CH4:
ratio = getCurrentRatio(CH_RED);
c = pow(ratio, -4.363) * 630.957;
break;
case H2:

```

```

ratio = getCurrentRatio(CH_RED);
c = pow(ratio, -1.8) * 0.73;
break;
case C2H5OH:
ratio = getCurrentRatio(CH_RED);
c = pow(ratio, -1.552) * 1.622;
break;
}
return isnan(c) ? -1 : c;
}
void setup()
{
Serial.begin(9600);
rtc.begin();
Serial.print("Iniciando SD ...");
if (!SD.begin(10)) {
Serial.println("No se pudo inicializar");
return;
}
Serial.println("inicializacion exitosa");
Serial.println("MICS-6814 Sensor Test v0.1");
Serial.print("Calibrating Sensor");
calibrateMICS();
Serial.println("OK!");
Serial.println("CCS811 test");
if(!ccs.begin()){
Serial.println("Failed to start sensor! Please check your wiring.");
while(1);
}
while(!ccs.available());
float temp = ccs.calculateTemperature();
ccs.setTempOffset(temp - 25.0);
if(!SD.exists("datalog.csv"))
{
myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
if (myFile) {
Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado(fila 1)");
myFile.println("Fecha,NH3,NO2,CO,C3H8,C4H10,CH4,H2,C2H5OH,CO2,TVOC
,temp");
myFile.close();
} else {
Serial.println("Error creando el archivo datalog.csv");
}
}
}
void loop()
{
HoraFecha = rtc.now();
segundo=HoraFecha.second();

```

```
minuto=HoraFecha.minute();
hora=HoraFecha.hour();
dia=HoraFecha.day();
mes=HoraFecha.month();
anio=HoraFecha.year();
if(ccs.available()){
float temp = ccs.calculateTemperature();}
myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
if (myFile) {
Serial.print("Escribiendo SD: ");
myFile.print(hora);
myFile.print(":");
myFile.print(minuto);
myFile.print(":");
myFile.print(segundo);
myFile.print(" ");
myFile.print(dia);
myFile.print("/");
myFile.print(mes);
myFile.print("/");
myFile.print(anio);
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(NH3));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(NO2));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(CO));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(C3H8));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(C4H10));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(CH4));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(H2));
myFile.print(",");
myFile.print(measureMICS(C2H5OH));
myFile.print(",");
myFile.print(ccs.getCO2());
myFile.print(",");
myFile.print(ccs.getTVOC());
myFile.print(",");
myFile.println(ccs.calculateTemperature());
myFile.close();
Serial.print("hora = ");
Serial.print(hora);
Serial.print(":");
Serial.print(minuto);
Serial.print(":");
```

```
Serial.print(segundo);
Serial.print(" Fecha = ");
Serial.print(dia);
Serial.print("/");
Serial.print(mes);
Serial.print("/");
Serial.print(ano);
Serial.print("NH3: ");
Serial.print(measureMICS(NH3));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("NO2: ");
Serial.print(measureMICS(NO2));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("CO: ");
Serial.print(measureMICS(CO));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("C3H8: ");
Serial.print(measureMICS(C3H8));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("C4H10: ");
Serial.print(measureMICS(C4H10));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("CH4: ");
Serial.print(measureMICS(CH4));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("H2: ");
Serial.print(measureMICS(H2));
Serial.print("ppm ");
Serial.print("C2H5OH: ");
Serial.print(measureMICS(C2H5OH));
Serial.print("ppm ");
if(!ccs.readData()){
Serial.print("CO2: ");
Serial.print(ccs.getCO2());
Serial.print("ppm, TVOC: ");
Serial.print(ccs.getTVOC());
Serial.print("ppb");
Serial.print(", temp");
Serial.println(ccs.calculateTemperature());
}
else{
Serial.println("ERROR!");
while(1);
}
} else {
Serial.println("Error al abrir el archivo");
}
}
delay(100);
}
```

6.2. Anexo2: Series de tiempo mayo – junio

A continuación se presentan las figuras correspondientes a la campaña de medición durante los meses de Mayo y junio del 2020, en donde las Figuras 33, 34, 35 y 36 corresponden a la medición de CO, H₂,CH₄ y C₂H₅OH medidos a través del sensor de reducción del sensor 6814, las Figuras 37, 38 y 39 corresponden a la medición de NH₃, C₃H₈ y C₄H₁₀ medidos a través del sensor de amoníaco del sensor 6814, Figura 40 correspondiente a la medición de NO₂ medido a través del sensor de oxidación del sensor 6814 y las Figuras 41, 42 y 43 correspondientes a la medición de eCO₂, TVOC y temperatura ambiental medidos a través del sensor 811.

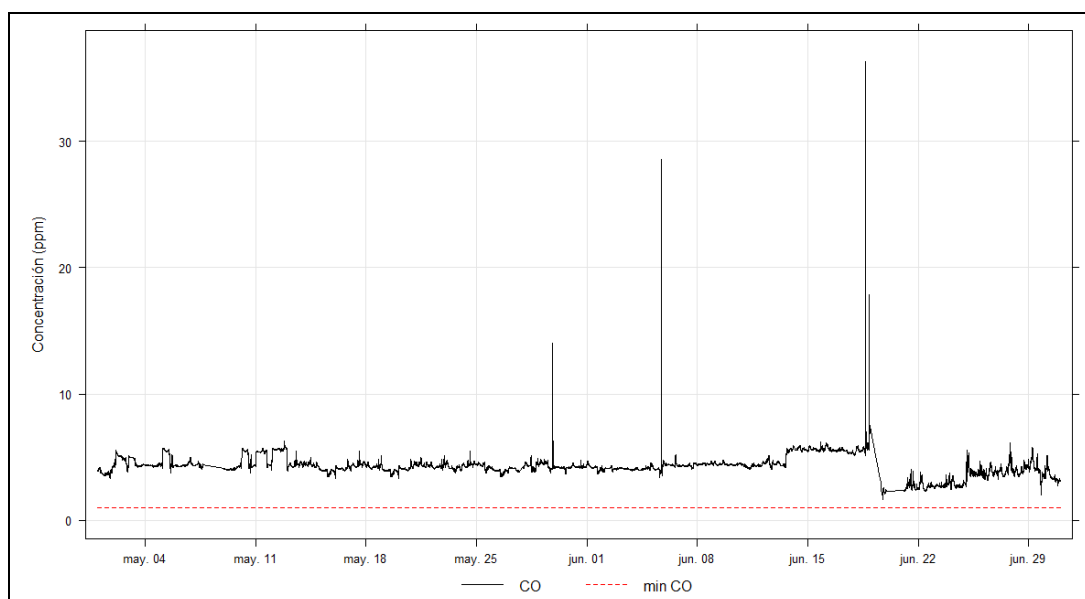


Figura 33: Medición de la concentración en ppm del CO en función del tiempo

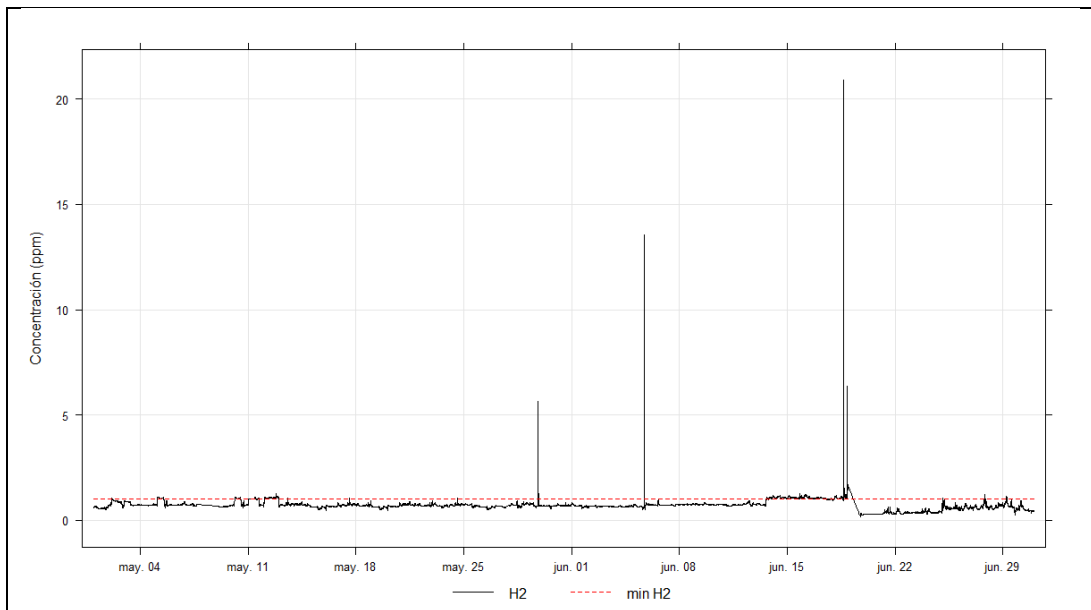


Figura 34: Medición de la concentración en ppm del H₂ en función del tiempo

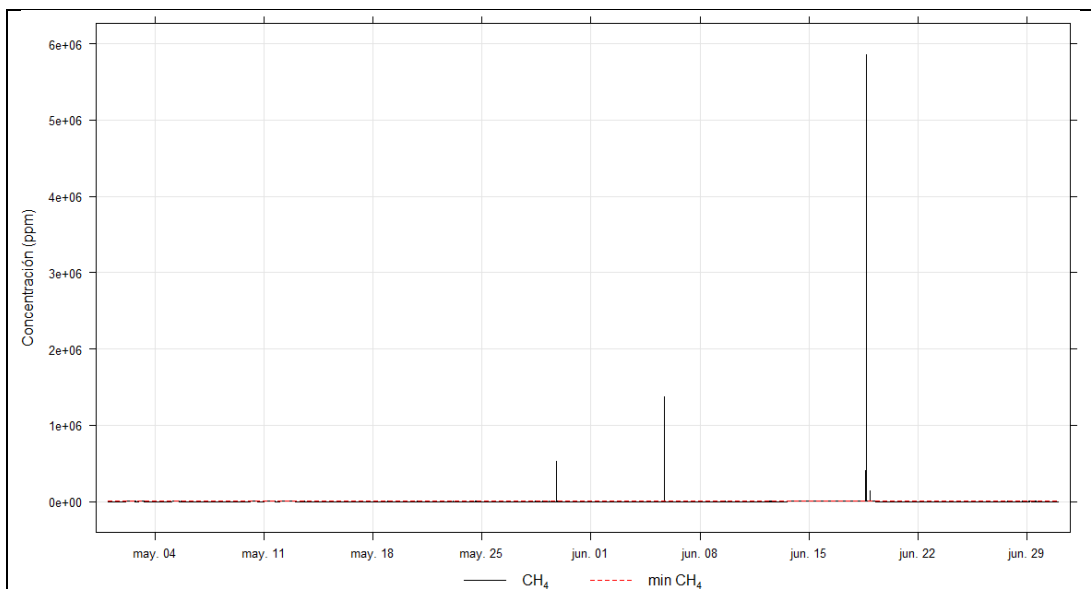


Figura 35: Medición de la concentración en ppm del CH₄ en función del tiempo

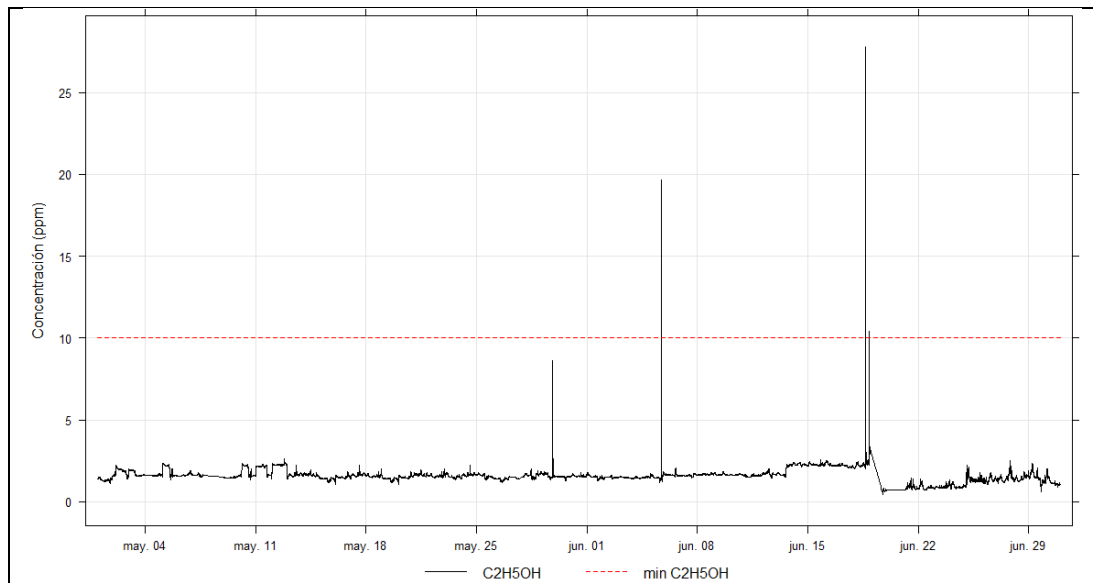


Figura 36: Medición de la concentración en ppm del C_2H_5OH en función del tiempo

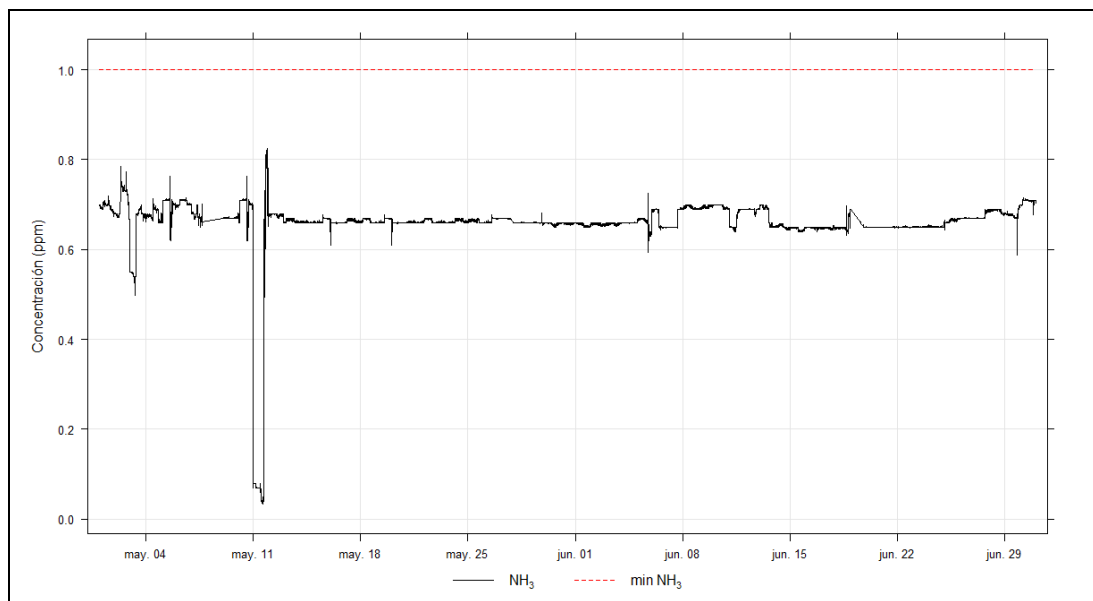


Figura 37: Medición de la concentración en ppm del NH_3 en función del tiempo

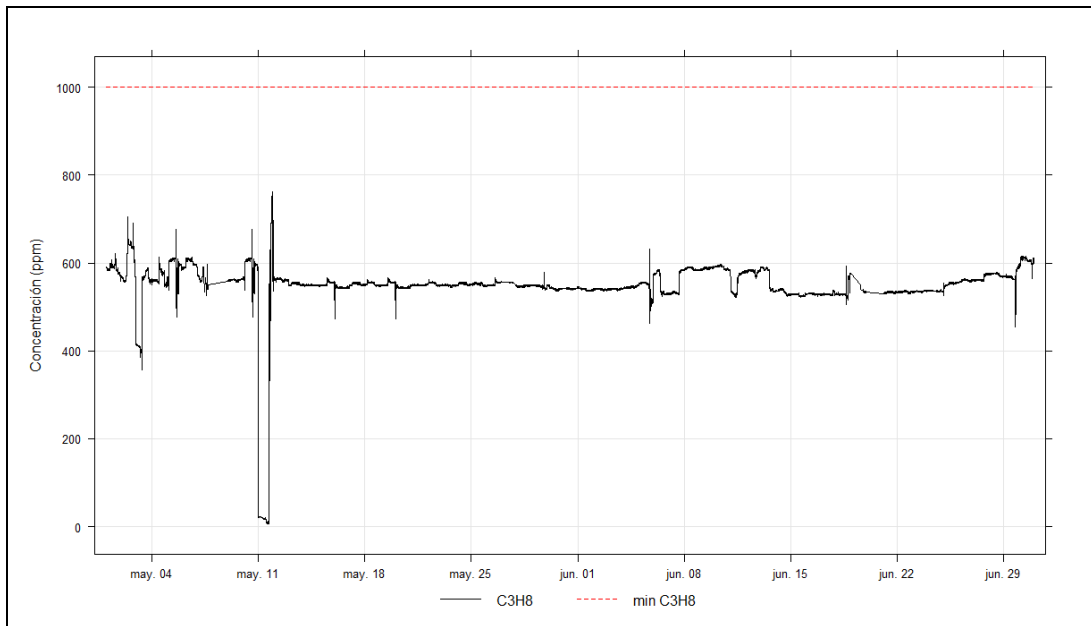


Figura 38: Medición de la concentración en ppm del C_3H_8 en función del tiempo

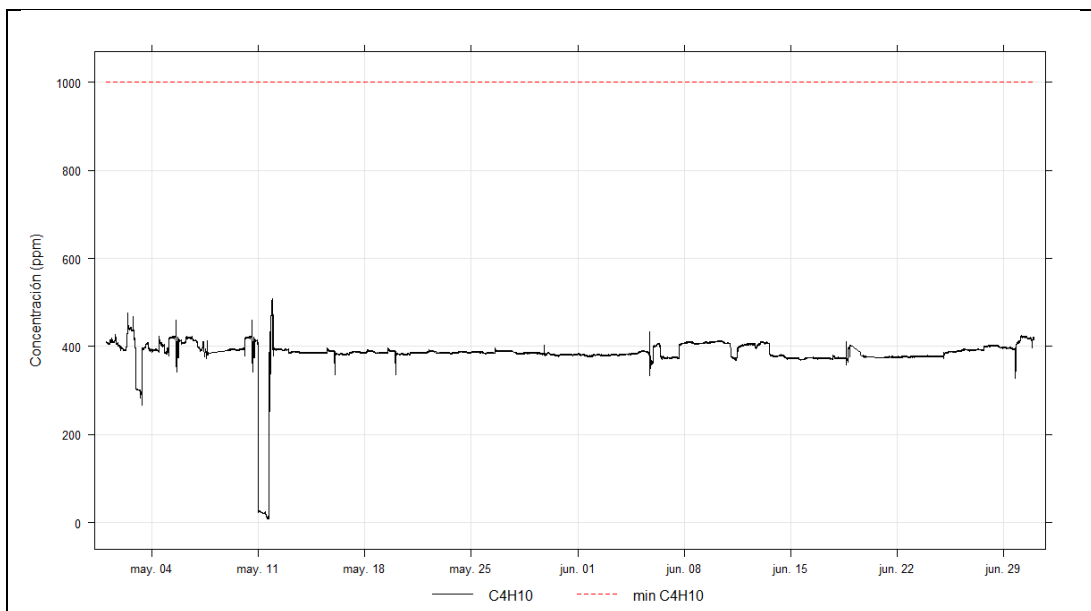


Figura 39: Medición de la concentración en ppm del C_4H_{10} en función del tiempo

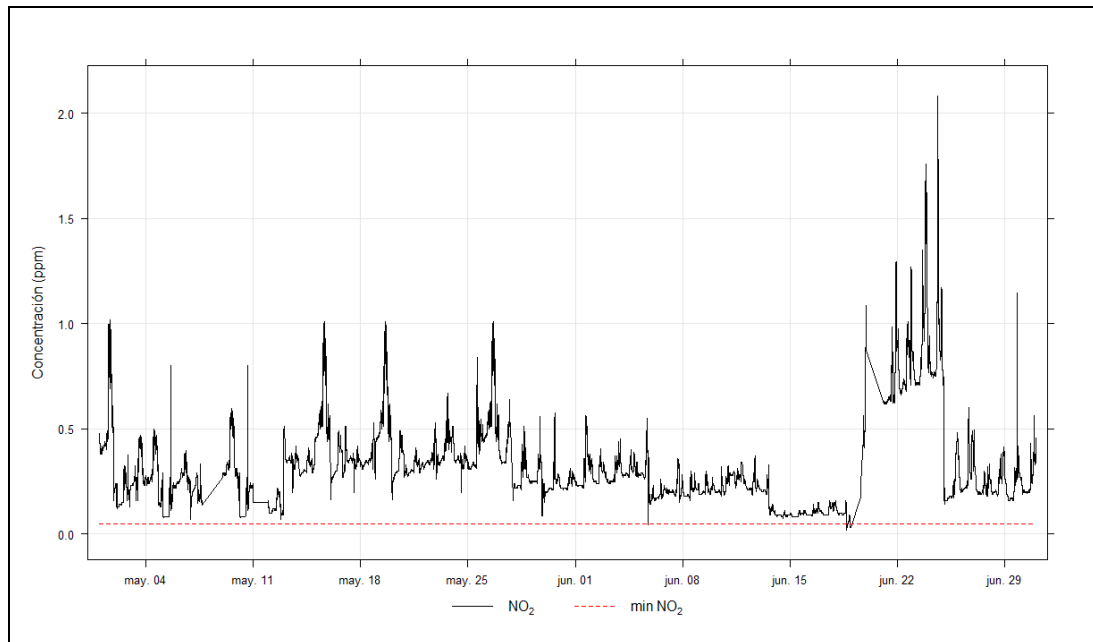


Figura 40: Medición de la concentración en ppm del NO₂ en función del tiempo

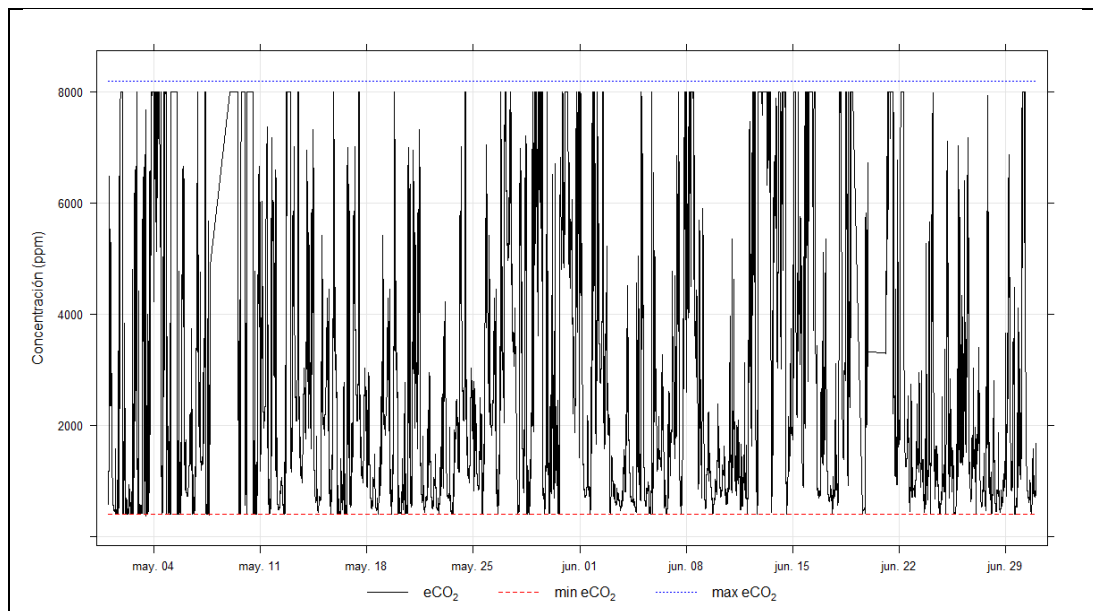


Figura 41: Medición de la concentración en ppm del eCO₂ en función del tiempo

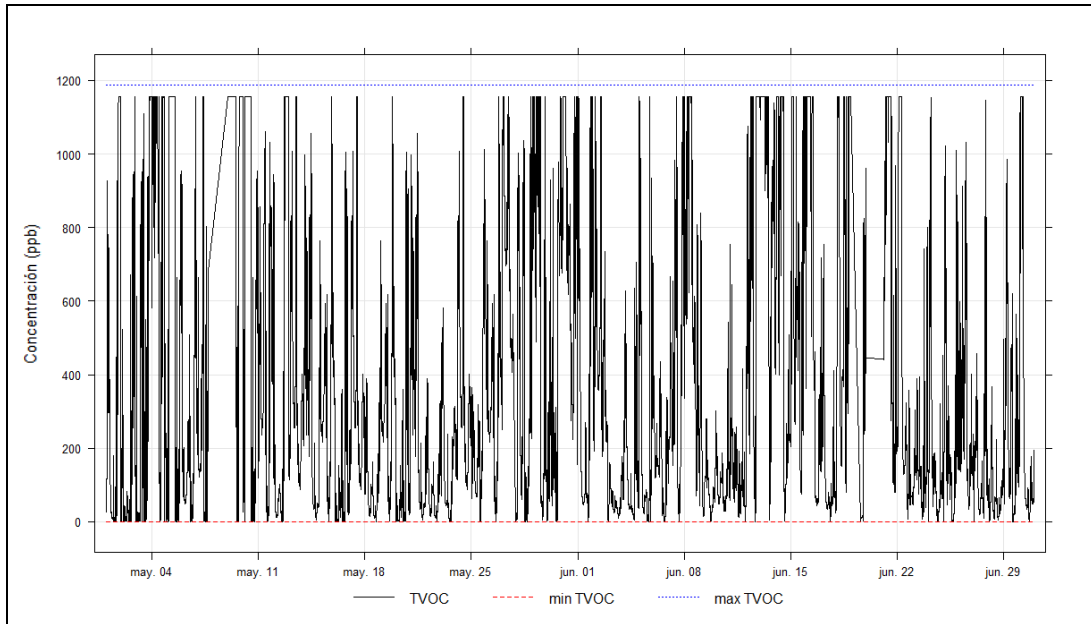


Figura 42: Medición de la concentración en ppb del TVOC en función del tiempo

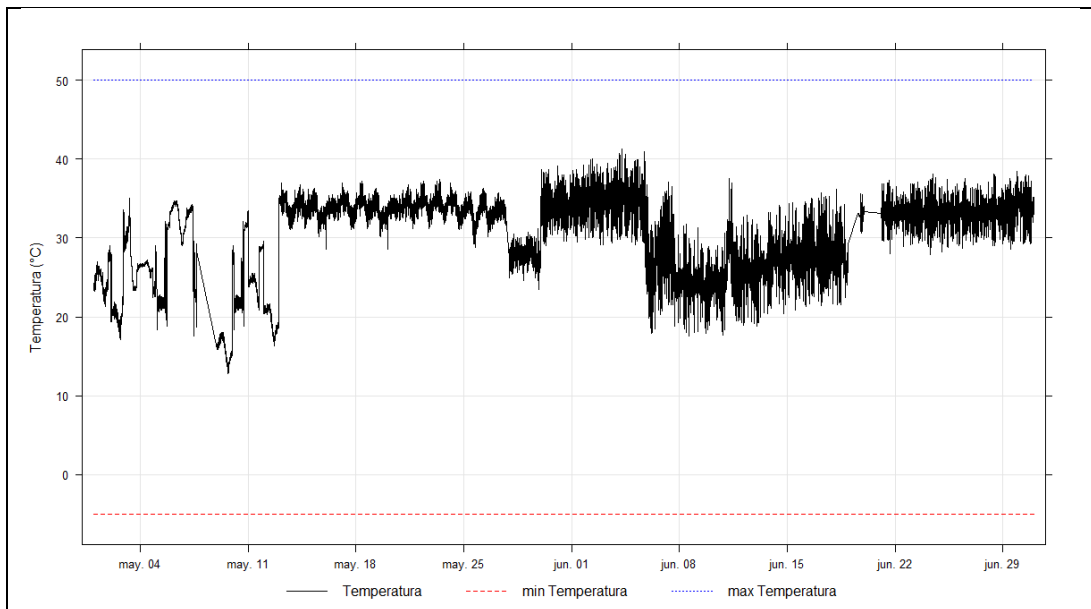


Figura 43: Medición de la temperatura en °C en función del tiempo