

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Estudio de la fiabilidad de un sensor de particulado de bajo coste





Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

Autor Principal: Pablo Juan Verdoy (Universidad Jaume I)

Otros autores: Sergio Trilles Oliver (Universidad Jaume I); Ana Belén Vicente Fortea (Universidad Jaume I); Sergi Meseguer Costa (Universitat Jaume I); Laura Serra Saurina (Universidad de Girona)

ÍNDICE

1. Título	2
2. Palabras Clave	2
3. Resumen	2
4. Introducción	3
5. Metodología	4
5.1. Low-Cost Sensor	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1. The Laser Particulate Matter Sensor: HM-3301	5
5.2. Reference Sampler: LVS3.....	7
5.3. Sampling Conditions.....	8
5.4. Statistical Models Used for Validation	¡Error! Marcador no definido.
6. Resultados.....	10
7. Discusión	16
8. Conclusiones.....	16
9. Bibliografía	17

1. TÍTULO

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

2. PALABRAS CLAVE

Sensores de bajo coste; calidad del aire; PM10; PM2,5

3. RESUMEN

El conocimiento en tiempo real de la calidad del aire permite alertar a la población frente a los episodios de alta concentración de una forma rápida y directa. Los recientes avances en el campo de la sensorización, y las tecnologías y ciencias de la computación, han facilitado el despliegue de sensores de bajo coste, mejorando la resolución espacial y temporal de los datos de calidad del aire. El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio de fiabilidad de un sensor de bajo coste de partículas en suspensión (PM2.5 y PM10) en ambientes interiores y exteriores, con la finalidad de conocer si puede ser candidato a poder ser utilizado en Planes de Gestión de la Calidad del Aire. El sensor láser seleccionado (HM-3301), hasta el momento, no ha sido evaluado en condiciones ambientales reales, y la calidad de los datos generados no se encuentra documentada. Para posibilitar este estudio, el sensor HM-3301 ha sido integrado en una plataforma del Internet de las Cosas, con el objetivo de establecer una conexión permanente a Internet. La fiabilidad del sensor se ha establecido mediante la comparación con un equipo de referencia (LVS3 de Derenda) según el método estándar EN12341:2014. La fiabilidad ha sido diseñada desde el punto de vista estadístico y sin considerar las condiciones ambientales. La metodología estadística utilizada ha sido un modelo lineal ordinario, un modelo lineal generalizado, un suavizado de trazado de dispersión estimado localmente y modelos aditivos generalizados para comparar y contrastar los resultados. Los resultados obtenidos, apuntan que el sensor HM-3301 está altamente correlacionado con la medida de referencia (con correlación superior al 70%), especialmente para PM2.5, que obtiene un valor de precisión muy alto. Además, existe una relación positiva entre las dos mediciones, las que pueden ser ajustadas adecuadamente a través del modelo de suavizado de diagrama de dispersión estimado localmente.

4. INTRODUCCIÓN

Numerosos estudios científicos apoyan que la contaminación del aire es perjudicial para la salud pública [1–6]. Por tanto, la evaluación de las concentraciones de contaminantes es fundamental para evaluar el riesgo [7]. Un conocimiento adecuado y rápido de la calidad del aire permite alertar a la población en términos de altas concentraciones de contaminantes. Un contaminante que presenta un alto riesgo es el material particulado (PM), debido a su gran potencial para llegar al interior del pulmón [8]. El método de referencia (EN12341: 2014) establecido por la Unión Europea para determinar estos contaminantes se basa en la recolección de partículas en filtros con una exposición de 24 h (Directiva 2008/50 / EC [9], modificada por la Directiva de la Comisión 2015/1480 / EC [10]). Esto dificulta la actuación rápida cuando hay episodios de altas concentraciones de contaminantes. Por otro lado, existe una limitación en el uso de equipos de referencia debido a los altos costes económicos que implica y, en consecuencia, una menor granularidad de estaciones de control.

Los avances recientes en los campos de la sensorización y las tecnologías de computación, como el movimiento del Internet de las cosas (IoT) y el hardware abierto y de bajo costo, han dado lugar a la oportunidad de implementar plataformas de sensorización con costes aceptables para el despliegue masivo. Asimismo, el impulso hacia las ciudades inteligentes ha generado una mayor penetración e implantación de estos sensores [11]. Entre muchos más, uno de los retos más importantes de las ciudades inteligentes es el campo de la vigilancia ambiental. Donde se masificado la instalación de estas soluciones de monitorización, entre las que destaca el control de la calidad del aire exterior, caracterizado por mejorar la resolución espacial como temporal [12], además de incrementar la eficacia en la evaluación de riesgos.

Este trabajo está enfocado en la monitorización ambiental de los niveles de partículas en el aire. Actualmente existen algunas soluciones de sensorización en el mercado para medir este fenómeno. La mayoría de estos sensores se basan en la dispersión óptica de la luz mediante un láser y la aplicación de la teoría de Mie sobre la luz dispersa, para determinar el tamaño de las partículas [13]. De esta manera, se pueden medir diferentes tamaños de partículas como PM_{2.5} (menos de 2.5 μm) y PM₁₀ (menos de 10 μm). Estos sensores se pueden instalar tanto en entornos interiores como exteriores [14]. El tamaño de estos sensores es contenido y el consumo de energía es bajo (admitiendo un modo de suspensión). Estos sensores pueden operar con altas tasas de muestreo (incluso más altas que las soluciones profesionales), y su precio oscila entre los 5 y los 100 euros [15].

Los sensores de PM se utilizan ampliamente en instrumentos de detección de partículas, electrodomésticos inteligentes, detección de aire interior y exterior y evaluaciones de salas limpias. En la literatura, estos sensores se han utilizado en una larga lista de aplicaciones [16], por ejemplo, en equipos de prueba de calidad del aire, purificadores de aire / acondicionadores de aire, detección y análisis de polvo y humo, análisis de partículas industriales, contadores de partículas multicanal y equipo de pruebas. Hay varias soluciones de sensores de PM de bajo costo en el mercado, como: Sharp GP2Y1010 [17], Wuhan Cubic PM3007 [18], Plantower PMS1003 [19], Shinyei PPD42NS [20], Nova SDS011 [21] y HM- 3001 [22] (utilizado en este trabajo). El despliegue de estos sensores puede ser realizado por organizaciones sin ánimo de lucro y científicos civiles [23]. Sin embargo, la precisión y fiabilidad de los sensores deben evaluarse de forma exhaustiva y repetible en condiciones reales antes de que se implementen

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

en grandes cantidades [24]. En la literatura, existen pocos trabajos de validación para este tipo de sensor de PM_{2.5}, y sus enfoques no responden a diferentes escalas de tiempo o diferentes entornos en interiores y exteriores [25, 26].

Este trabajo tiene como objetivo realizar una validación de uno de estos sensores de particulado (HM-3301) en el rango PM_{2.5} y PM₁₀. Para ello, se definieron pruebas exhaustivas de forma temporal combinando entornos interiores y exteriores. El sensor HM-3301 se integró en una plataforma de IoT llamada Sense Our Environment (SEnviro) [27] para proporcionar una conectividad total. La validación se realizó con un muestreador de referencia (LVS3 de Derenda) según EN12341: 2014. Otro objetivo es utilizar diferentes metodologías para ajustar las diferencias, como modelos lineales (LM), modelos lineales generalizados (GLM), suavizado de diagramas de dispersión estimados localmente (LOESS) o modelos aditivos generalizados (GAM).

5. METODOLOGÍA

5.1. Sensor de bajo coste

Como se indicó en la sección anterior, se integró un sensor de PM en una plataforma de nodo de sensorización llamada SEnviro [27]. SEnviro es una solución autónoma y de bajo costo para monitorear el medio ambiente. En 2015, se desplegaron y evaluaron algunos nodos de la plataforma SEnviro en el contexto del campus de la Universidad Jaume I [28]. Esos nodos podrían capturar tanto fenómenos meteorológicos como de calidad del aire. En 2018 se desarrolló una nueva versión de la plataforma de nodo SEnviro [29–31] para la monitorización de parcelas de viñedos. Esta nueva versión aporta algunas mejoras en comparación con la primera versión publicada en 2015. Algunas de estas mejoras fueron la conectividad 3G, la posibilidad de cambiar el comportamiento del nodo IoT mediante actualizaciones Over The Air (OTA), una gestión de energía más eficiente y más apropiada técnicas de conexión para entregar observaciones utilizando el protocolo Message Queue Telemetry Transport (MQTT). El trabajo actual se basa en la última versión de SEnviro e incluye el mencionado sensor de PM para la monitorización en ambientes interiores y exteriores. También se detalla la adaptación del sensor de PM en el nodo de IoT.

Desde el punto de vista del hardware (cómo se construye el nodo) y siguiendo los módulos definidos en [29] (Núcleo, Sensores / Actuadores, Alimentación y Comunicación), se utiliza un nuevo microcontrolador 3G denominado Particle Boron [32]. Este microcontrolador aumenta el rendimiento del anterior (Particle Electron) en términos de velocidad y permite una configuración de malla de forma natural. El módulo de comunicación utilizado es 3G y se utiliza para establecer una conexión entre el nodo de IoT y el lado del servidor. Aunque la plataforma SEnviro puede ser construida con una placa solar y dotarse de autonomía energética, para este trabajo se ha optado por el desarrollo de una versión con cable conectado directamente a la corriente eléctrica. Esta solución aumenta el rendimiento y la confiabilidad de la plataforma. En el módulo de sensor, y para este trabajo, solo se ha agregado el sensor de PM nombrado con anterioridad (Sección 5.1.1). Este sensor se une al microcontrolador mediante un conector Grove y protocolo de comunicación I2C. Finalmente, se ha diseñado una carcasa impresa con

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

impresora 3D para albergar todos los componentes y proteger los componentes electrónicos de condiciones meteorológicas desfavorables (Figura 1).

A nivel de comportamiento, siguiendo el trabajo anterior [29], el nodo IoT desarrollado se caracteriza por un diseño modular formado por siete módulos (Control, Configuración Básica, Comunicación, Detección, Actuación, Ahorro de Energía y Modo Actualización). En este trabajo, los siete módulos se han implementado de la misma forma que el trabajo nombrado, pero en este caso, los modos de ahorro energético se han desactivado debido a un suministro de energía continuo. Para validar el sensor, el módulo de detección se ajusta para tomar observaciones cada 15 minutos. Además de los mecanismos de almacenamiento utilizados en SEnviro, en este trabajo las observaciones se almacenan en una hoja de cálculo de Google Drive en tiempo real para facilitar el paso de análisis de validación.



Figura 1. La impresión en 3D de la caja del sensor de PM

5.1.1. El sensor laser de particulado: HM-3301

El sensor de PM incluido en el nodo de IoT se llama HM-3301 (Figura 2) y fue creado como una nueva generación de sensores de tipo láser desarrollados por Huaman Electronics. El sensor HM-3301 permite la exposición constante y en tiempo real del particulado en el aire en ambientes interiores y exteriores. La principal diferencia con respecto a la generación de bombeo anterior es que el sensor HM-3301 emplea aspas de ventilador para impulsar el aire, y el aire que fluye a través de la cámara de detección se utiliza como muestra para realizar una prueba en tiempo real y continua de diferentes tamaños de partículas en el aire. Este sensor sigue estándares como ISO 21501-4, ISO 14644-1 y FS209E. El sensor de HM-3301 admite una salida de seis canales de 0,3 μm , 0,5 μm , 1,0 μm , 2,5 μm , 5,0 μm y 10,0 μm . Está compuesto por un ventilador, un espejo de condensación, una fuente de láser infrarrojo, un tubo fotosensible y un circuito de clasificación y amplificación de señales. Este sensor admite modos de comunicación entre un microcontrolador que utiliza las interfaces I2C y UART. El Cuadro 1 resume todas las características del sensor de PM.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores



Figura 2. Sensor HM-3301 PM.

Cuadro 1. Parámetros técnicos del sensor HM-3301 PM.

Característica	Parámetros técnicos
Rango	1 - 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango efectivo), 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango máximo)
Tamaño del particulado	0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.5 μm , 5 μm , 10 μm
Valor de salida	PM1, PM2.5, PM10, TSP concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, número de particular (una/0.1L))
Resolución	Concentración: 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Conteo de concentración: 1 s/0.1 L 33
Consistencia	0 \leftarrow 100 $\mu\text{g}/\text{m}$: \pm 10 $\mu\text{g}/\text{m}$ @ 25 , 50% RH 33 100 \leftarrow 500 $\mu\text{g}/\text{m}$: \pm 10 $\mu\text{g}/\text{m}$ @25 ,50% RH
Tiempo de estabilización	30 s después del inicio
Sensibilidad	Refresco del dato cada segundo
Voltaje	DC5V \pm 3%
Corriente operativa	Corriente operativa media < 75 mA, Corriente pico < 120 mA
Condiciones de uso	-10 -- 60 C, 10% - 90% RH (sin condensación)
Tiempo de vida	2 años de uso en ambientes interiores
Estándares de certificación	ISO 14644-1 y FS209E
Dimensión	40 x 38 x 15 mm
Precio	27.15 euros

Fuente: Elaboración propia

El sensor HM-3301 se basa en la teoría de dispersión de Mie [13]. Cuando la luz pasa a través de partículas en la misma cantidad que la longitud de onda de la luz (o más), produce dispersión de luz (Figura 3). La luz dispersa se concentra en un fotodiodo altamente sensible, que luego es amplificado y analizado por un circuito. Con un modelo y un algoritmo matemático específico, se obtienen la concentración de recuento y las concentraciones de masa de las partículas. Para este trabajo, se utilizaron concentraciones de particulado de PM2.5 y PM10.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

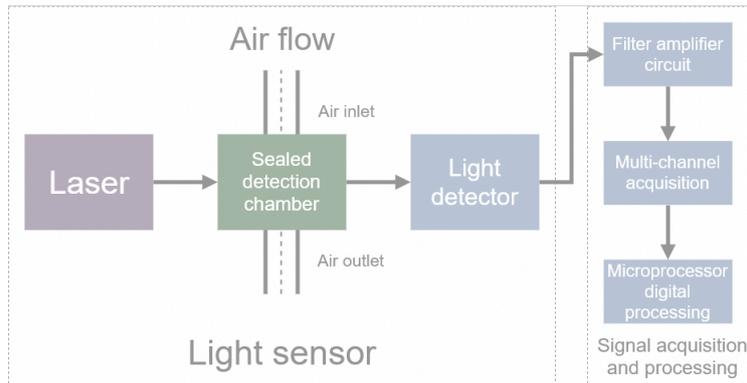


Figura 3. Representación gráfica del funcionamiento del sensor HM-3301

5.2. Muestreador de referencia: LVS3

La unidad de muestreo LVS3 se ha utilizado para recolectar partículas del aire ambiente de acuerdo con EN12341: 2014 (Figura 4). Se configuró como unidad de control juntamente a un cambiador de filtros. Este mecanismo utiliza una bomba de vacío de paletas rotativas de 4 m³ para llevar el aire cargado de partículas hacia un cabezal superior. A continuación, las partículas se clasifican por tamaño y se depositan en un filtro de fibra de cuarzo con un diámetro de 47 mm. El aire se controla con un orificio de medición que se coloca entre el filtro y la bomba de vacío. Los parámetros técnicos del muestreador LVS3 se muestran en el Cuadro 2.

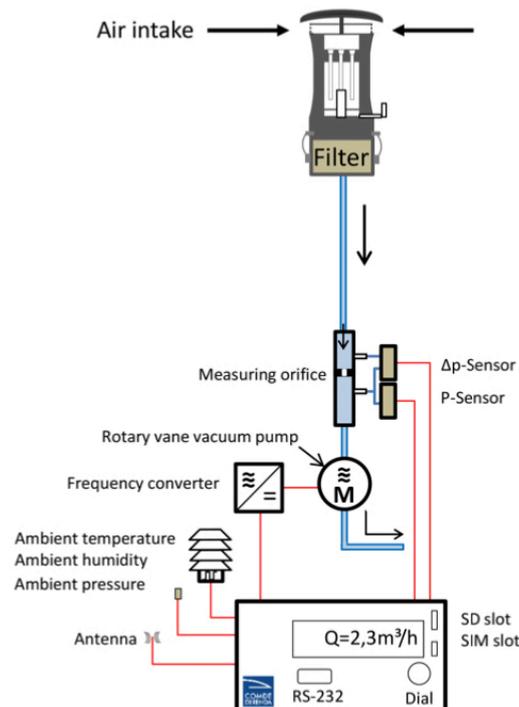


Figura 4. Partes del de referencia LVS3. Fuente: <https://bit.ly/350yNTQ>.

Las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ se determinaron por método gravimétrico basado en el peso del filtro antes y después del muestreo. Según la norma EN12341: 2014, los filtros deben conservarse durante al menos 48 horas en una cámara especial al 50% de humedad relativa y

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

20 °C de temperatura. Los filtros fueron pesados en una balanza analítica con una precisión de 0,1 mg. Los niveles de concentración de PM se determinaron mediante la Ecuación (1):

$$C_{PM} = (P_m - P_v)10^6 / V_{air} \quad (1)$$

Donde C_{PM} es la concentración de partículas en micras por metro cúbico, P_m es el peso del filtro en gramos, P_v es el peso del filtro seco en gramos y V_{air} es el volumen del aire en m^3 .

Cuadro 2. Parámetros técnicos el muestreador de referencia LVS3.

Característica	Parámetros técnicos
Tasa de flujo	1.0 - 3.5 m ³ (Nm ³ /h)
Tamaño de partícula	2.5 μm, 10 μm
Consumo de energía	240 VA
Diámetro del filtro	47 mm
Dimensiones	300 x 450 x 250 mm
Peso	17 kilogramos
Sensibilidad	Actualizar los datos una vez cada 1 s
Nivel de ruido	<31 dB (A)
Rango de temperatura de funcionamiento	- 30 a +50 °C
Rango de humedad de funcionamiento	0 - 100 rH
Tiempo de vida	2 años de uso en ambientes interiores
Precio	Aproximadamente 15,000 euros

Fuente: Elaboración propia

5.3. Condiciones del muestreador

Parámetros técnicos

El trabajo actual tiene como objetivo realizar validaciones del sensor de bajo costo denominado en dos entornos diferentes (interior y exterior) para conocer el comportamiento de equipos que miden diferentes rangos de concentraciones dentro de PM_{2.5} y PM₁₀. Una unidad de este sensor económico y dos muestreadores de referencia (uno en cada entorno) muestrearon simultáneamente en la misma ubicación, por lo que no se consideraron factores externos a la medida. Durante el período de ambiente interior, el sensor de bajo costo y el muestreador de referencia se utilizaron dentro de una oficina de la Universidad Jaime I sin presencia humana (Figura 5).

En cuanto a la validación del entorno exterior, se ha elegido Vila-real, una ciudad industrial de la provincia de Castellón (España). Esta provincia es un área estratégica en el marco del control de la contaminación de la Unión Europea. La zona de estudio tiene una alta concentración de baldosas cerámicas y fábricas, lo que representa un conglomerado fundamental con respecto a este material [33] (Figura 6). Las mediciones en interiores y exteriores no fueron simultáneas durante el mismo período de tiempo.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores



Figura 5. Medidor interior



Figura 6. Medidor exterior

5.4. Modelos estadísticos usados para validación

Los modelos lineales se describen y desarrollan de manera relativamente simple y se interpretan fácilmente. En particular, el GLM es una generalización resistente de modelos de regresión lineal ordinarios caracterizados por variables de respuesta para las cuales sus modelos de distribución de errores difieren de una distribución normal. Por tanto, este tipo de modelos permiten relacionar el modelo lineal con la variable de respuesta a través de una función de enlace y permiten que la magnitud de la varianza de cada medición sea una función de su valor predicho [34,35].

Sin embargo, dichos modelos pueden verse limitados en términos de capacidad predictiva si la relación entre variables es más complicada. Algunos de los modelos que permiten modelar relaciones no lineales intentando mantener un alto nivel de interpretabilidad son, por ejemplo, LOESS o GAM. LOESS es una regresión no lineal con un solo predictor, similar a las *splines* en términos de ajuste por regiones, pero difiere en que los intervalos pueden superponerse. Por otro lado, GAM es una extensión de LOESS para modelar múltiples predictores. En este estudio,

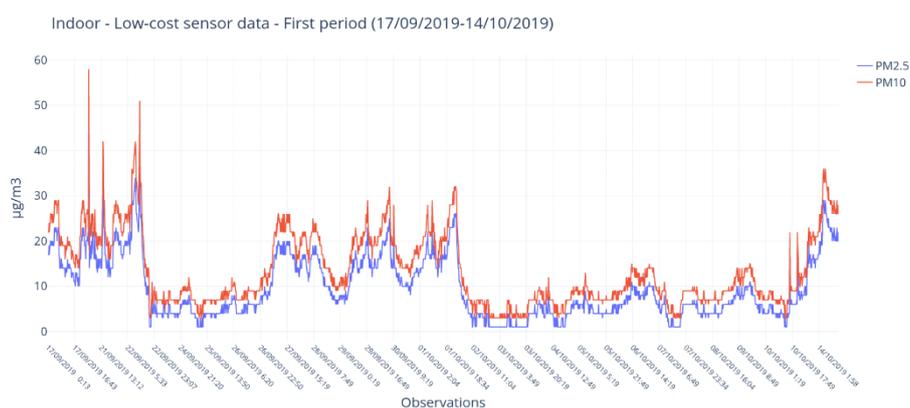
Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

se han propuesto un LM, GLM, LOESS y GAM ordinarios para comparar y contrastar sus resultados.

6. RESULTADOS

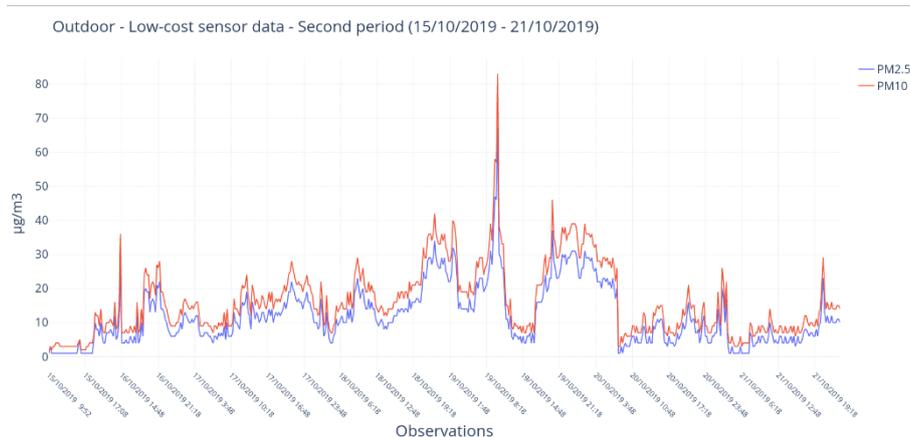
El sensor de PM HM-3301 tiene una tipología secuencial, por lo que toma medidas oportunas y parametrizables cada x minutos (15 en nuestro caso), mientras que el muestreador de referencia realiza medidas diarias utilizando filtros de un día. Por tanto, la granularidad de las observaciones es diferente; esta característica se tratará para realizar la validación.

El sensor de PM de bajo coste se instaló el 17 de septiembre de 2019, y se obtuvieron datos hasta el 12 de noviembre del mismo año, aunque hubo algunos días de inactividad. Durante este período, el sensor se ubicó tanto en ambientes interiores como exteriores. En total, se pueden identificar tres períodos diferentes. El primer período fue del 17 de septiembre al 14 de octubre, donde se instaló el sensor de PM en un ambiente interior (Figura 7a); el segundo período fue del 15 al 30 de octubre, en un ambiente al aire libre (Figura 7b); y finalmente, tercer período del 31 de octubre al 12 de noviembre, en un ambiente interior (Figura 7c). Ambos periodos de ambientes interiores fueron en un laboratorio de la universidad. En total, se recopilaban 3677 observaciones durante estos tres períodos con una tasa de refresco de 15 minutos. Cada observación contiene una marca de tiempo y valores de PM_{2.5} y PM₁₀. El conjunto de datos con todas las observaciones recopiladas se ha publicado en Zenodo [36].

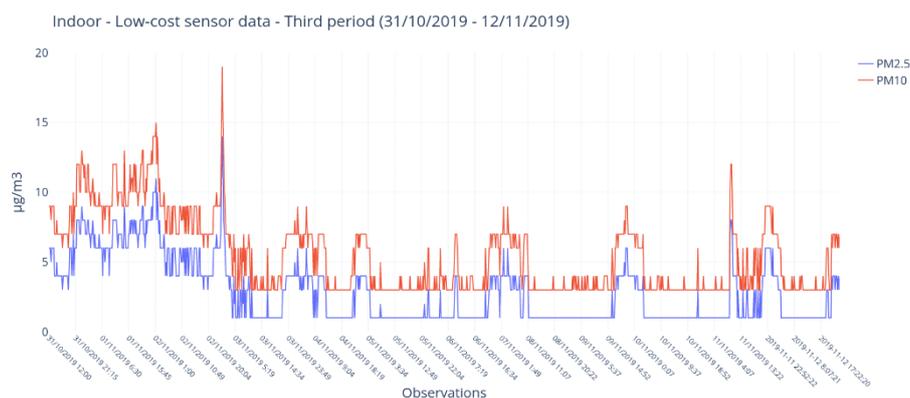


(a) Datos de interior mediante el periodo primero (del 17 de septiembre 2019 al 14 octubre 2019).. PM_{2.5}: particulado de tamaño menor 2.5 μm ; PM₁₀: particulado tamaño menor 10 μm .

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores



(b) Medidas exteriores del Segundo período (15 octubre 2019–21 octubre 2019).



(c) Medidas interiores en el tercer período (31 octubre 2019–12 noviembre 2019).

Figura 7. Datos del sensor de bajo coste

Además, se instalaron dos unidades de muestreadores de referencia (uno para PM10 y otro para PM2.5) durante varios días en los períodos del sensor HM-3301. El Cuadro 3a resume los datos recolectados usando el muestreador PM2.5 LVS3 y el Cuadro 3b para PM10.

En primer lugar, para tener una primera idea de cómo se distribuyen los datos y cuál es el grado de relación entre los valores obtenidos por el sensor HM-3301 (para PM2.5 o PM10) y los del muestreador LVS3, se realiza una exploración. Para ello, se ha realizado un análisis de los datos de cada uno por medio de un diagrama de dispersión (Figura 8). Incluso si el número de puntos es escaso, se puede observar una tendencia positiva entre las dos medidas.

Cuadro 3. Datos del muestreador de referencia interior y exterior.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

(a) Valor PM 2.5			(b) Valor de PM 10		
Fecha	Ambiente	PM2.5 (µg/m3)	Fecha	Ambiente	PM10 (µg/m3)
25/09/2019	Interior	4.8830	16/10/2019	Al aire libre	17.0293
16/10/2019	Al aire libre	13.8635	16/10/2019	Al aire libre	28.0802
17/10/2019	Al aire libre	16.8210	17/10/2019	Al aire libre	25.9058
18/10/2019	Al aire libre	16.8149	18/10/2019	Al aire libre	31.8846
21/10/2019	Al aire libre	9.2263	19/10/2019	Al aire libre	29.7107
25/09/2019	Interior	4.8830	20/10/2019	Al aire libre	9.7831
31/10/2019	Interior	9.5827	21/10/2019	Al aire libre	19.7475
05/11/2019	Interior	2.8941	31/10/2019	Interior	2.3509
07/11/2019	Interior	0.5425	07/11/2019	Interior	0,7230
11/09/2019	Interior	1.4469	11/09/2019	Interior	4.3386
11/11/2019	Interior	2.7106	11/11/2019	Interior	2.1701

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, los resultados, después de aplicar los diferentes modelos en la comparación de datos entre el muestreador LVS3 y el sensor HM-3301 para PM2.5 y PM10 (interior y exterior) se muestran en la Figura 9. Estos gráficos también incluyen envolventes (color gris) que indican un intervalo de confianza asumiendo un 95% de confianza. En la mayoría de los casos, los puntos siempre se mantienen dentro de los límites del intervalo, aunque LOESS parece ajustarse mejor a los puntos.

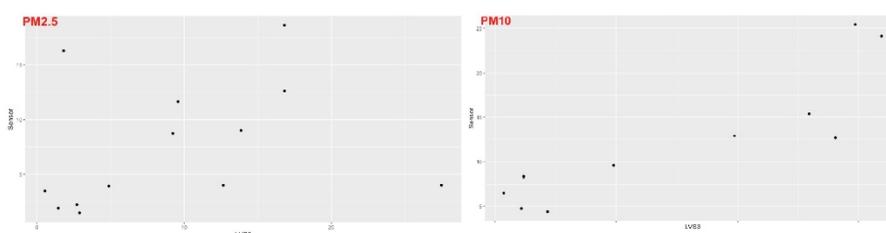


Figura 8. LVS3 vs. HM-3301 puntos del sensor, PM2.5–PM10.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

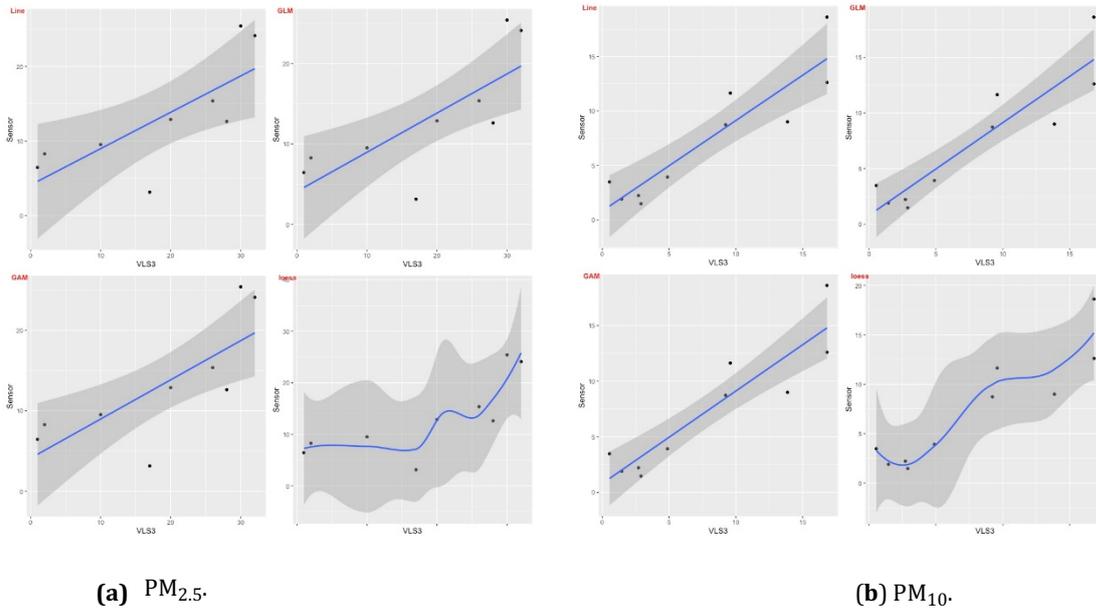


Figura 9. Modelos de PM_{2.5} y PM₁₀ de datos interiores y exteriores.

Además, la Figura 10 muestra el modelo LOESS para PM_{2.5} y PM₁₀ obtenido por el sensor HM-3301, que presenta una correlación 0.8495. Parece haber una regresión lineal porque los datos están correlacionados. Se obtiene un ajuste adecuado entre las dos medidas con el valor de correlación y el gráfico. Las correlaciones para las dos series de PM son 0.9143 en PM_{2.5} y 0.8870 en PM₁₀, por separado y frente al muestreador de referencia, mostrando valores muy similares. En todos los casos, se muestra un buen ajuste, cercano a 1.

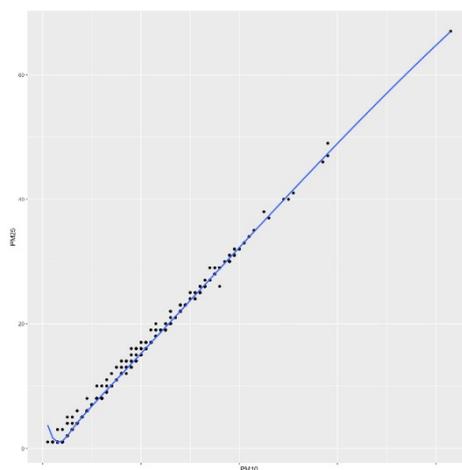
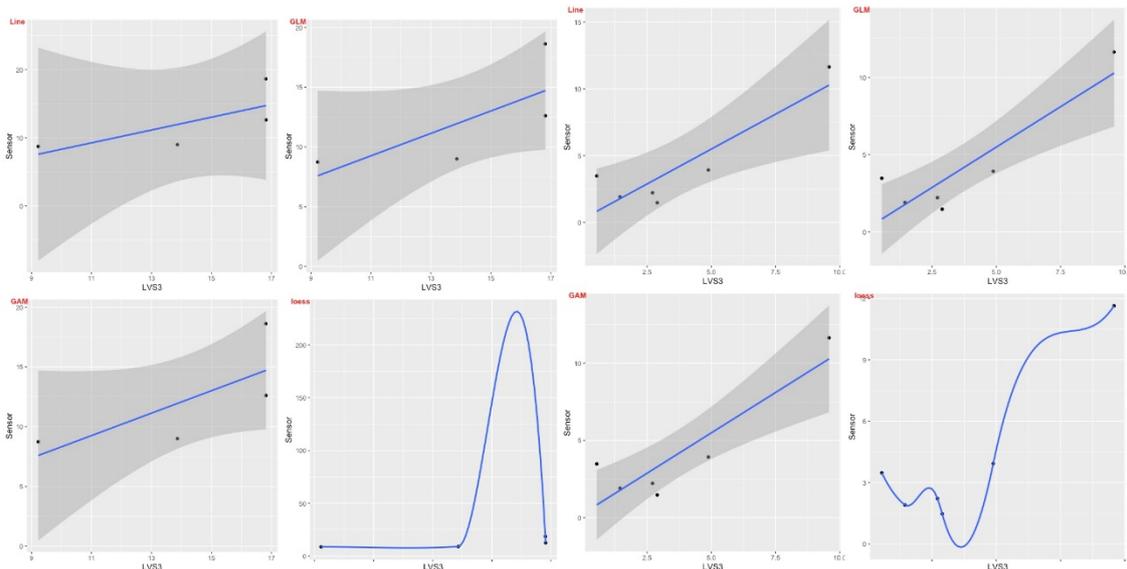


Figura 10. Modelos de PM_{2.5} y PM₁₀ de datos interiores y exteriores.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

Tras este primer análisis conjunto, se distinguen los ambientes interior y exterior. Los resultados se muestran en la Figura 11 en el caso de PM2.5. Aunque no hay demasiados puntos, se puede observar cierta tendencia sobre ellos, con correlaciones de 0,8905 y 0,7306, respectivamente.



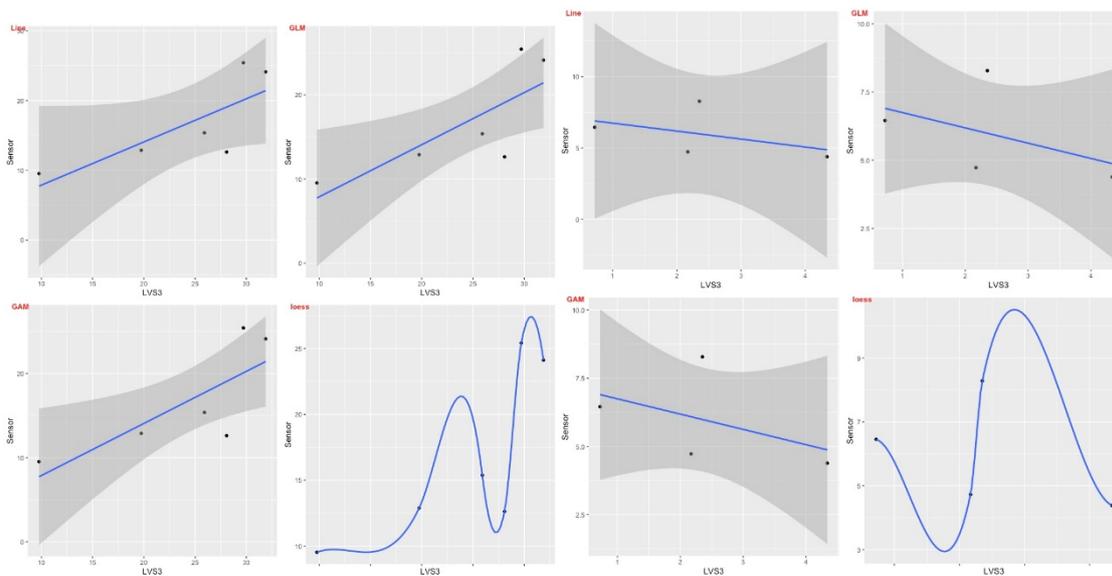
(a) Ambiente interior.

(b) Ambiente exterior.

Figura 11. Modelos de PM2.5.

Se ha realizado un proceso similar para analizar los valores de PM10. Así, considerando todos los valores juntos (medidas interiores y exteriores), se obtiene una correlación de 0,8870. Además, nuevamente, LOESS parece ser el mejor. Cuando distinguimos entre datos de interior y exterior (Figura 12) obtenemos correlaciones de 0,4644 y 0,7720, respectivamente. En el caso del primero, debido a la pequeña cantidad de datos la correlación no es significativa, por lo que aparece un valor mucho menor y negativo.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores



(a) Ambiente interior.

(b) Ambiente exterior.

Figura 12. Modelos de PM10.

Finalmente, la precisión de los datos, que proporciona información sobre la similitud entre la medición del sensor de bajo costo y los valores del muestreador de referencia, se calcula utilizando la siguiente ecuación (2) [37,38]:

$$A\% = 100 (|S - M| / M) \leftarrow 100 \quad (2)$$

donde S es la concentración promedio obtenida por los sensores durante el período de prueba y M es la concentración promedio medida por la estación oficial de monitoreo de la calidad del aire durante el período de prueba.

El valor para PM2.5 fue 80.4337 y para PM10 56.5942. Considerando que es una medida interpretada en porcentajes, estos valores indican que para PM2.5 los sensores miden 80% con respecto a las medidas de referencia, mientras que para PM10 la precisión del sensor es menor. Por lo tanto, en nuestro caso, la precisión del sensor es mejor cuando se analiza PM2.5 que PM10.

Los resultados del estudio son: (1) el sensor HM-3301 proporciona cifras casi idénticas, con correlaciones con la muestra de referencia superiores a 0,70 (VLS3 de Derenda); (2) todas las medidas muestran una linealidad bastante alta con respecto a las concentraciones medidas oficialmente de PM2.5 y PM10; y (3) la validación de datos registrada directamente en los tres sensores aumentó el valor de R2. Los resultados confirman que el uso de este tipo de sensores de bajo costo para el monitoreo de PM2.5 y PM10 en determinadas condiciones ambientales es viable.

7. DISCUSIÓN

El sensor HM-3301 ha llamado la atención recientemente debido a su apariencia y bajo costo para medir la concentración de masa de PM, que se utiliza con frecuencia como indicador de la calidad del aire. Hasta ahora, este sensor no se ha evaluado a fondo en condiciones reales y la calidad de sus datos no está bien documentada. En este estudio, se logró un monitoreo preciso de las concentraciones masivas de partículas en interiores y exteriores. Las PM_{2.5} y PM₁₀ evaluadas en nuestro estudio son cruciales para las evaluaciones de riesgos para la salud humana. Se utilizó una plataforma de IoT llamada *SEnviro* para proporcionar conexión a Internet y transmitir observaciones en tiempo real.

El bajo coste asociado a estos sensores y la posibilidad de calibrarlos para uso en ambientes reales [23], son ventajas para que esta nueva herramienta obtenga de manera confiable estimaciones de exposición continua en áreas amplias. Los resultados de este documento sugieren que, si dichos sensores se instalan tanto en interiores o exteriores, se espera que las mediciones sean razonablemente precisas y precisas. La información de un gran número de sensores en el estudio puede permitir una comprensión adicional de las exposiciones a corto plazo de PM_{2.5} o PM₁₀. La validación realizada entre el sensor HM-3301 y el muestreador de referencia VLS3, según EN12341: 2014, ha demostrado que las medidas del sensor de bajo coste se correlacionaron altamente con las medidas de referencia, especialmente para PM_{2.5}, donde se encontró un valor de precisión muy alto. Además, en general, hubo una relación positiva entre los dos tipos de medidas, que se ajustó adecuadamente a través del modelo LOESS.

Una limitación planteada durante el trabajo presentado, y especialmente en el ambiente exterior, es que este estudio se limitó a un número relativamente bajo de días en los que no hubo variaciones sustanciales en las condiciones ambientales (aunque sí hubo varios días de lluvia continua). Como se observa en [26], debemos preocuparnos por los datos capturados por este tipo de sensor cuando los valores de humedad relativa son superiores al 80% (siguiendo los parámetros técnicos del HM-3301 este valor es del 90%). Por este motivo, en trabajos futuros se incluirán parámetros meteorológicos en los modelos estadísticos. Otro aspecto que considerar, es utilizar períodos de trabajo más longevos para evaluar el desempeño a largo plazo. Aunque el fabricante afirma que el sensor tiene una vida útil de dos años en entornos al aire libre, esto debe probarse. Un período de trabajo prolongado puede causar algunos problemas para la respuesta del sensor. Uno de ellos es la formación de películas en la lente del sensor óptico. Alternativamente, podría aparecer otro problema si el sensor está ubicado en ambientes de alta concentración donde probablemente se sature y no capture los valores correctos de partículas. Ambas limitaciones pueden abordarse utilizando técnicas de corrección de los resultados [26].

8. CONCLUSIONES

Como conclusiones, el sensor analizado (HM-3301) es válido para complementar las redes reguladoras de monitorización de PM exterior (e interior) y mejorar la resolución espacial y temporal de los datos de PM_{2.5} y PM₁₀. El bajo coste y la posibilidad de uso en exteriores son ventajas para que esta nueva herramienta obtenga de manera confiable estimaciones de exposición continua en áreas más extensas como las grandes ciudades.

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

Como trabajo futuro, se planea un período más prolongado de tiempo de monitoreo para cubrir una gama más amplia de condiciones climáticas y para probar la estabilidad a largo plazo de los sensores. Se propone un estudio de seguimiento que evaluará el rendimiento del sensor utilizando al menos una serie de tiempo de un año y agregando más sensores de bajo coste en una amplia variedad de diferentes condiciones ambientales y regímenes de contaminación. Otro enfoque para tener en cuenta debería centrarse en la cuestión de si y cómo se podrían incluir otras covariables, por ejemplo, cómo la temperatura o la humedad pueden afectar el sensor y las mediciones. Estas posibilidades podrían reducir las posibles limitaciones en este tipo de sensor. El tamaño pequeño, los requisitos de baja potencia y la capacidad del sensor HM-3301 para integrarse en otros dispositivos de monitoreo como GPS o teléfonos móviles hacen de este sensor una herramienta prometedora para estudios de monitoreo personal y para proporcionar datos para respaldar nuevos estudios de investigación. Finalmente, se explorarán técnicas emergentes sobre aprendizaje automático [39] para validar este tipo de sensor de bajo costo.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Clancy, L.; Goodman, P.; Sinclair, H.; Dockery, D.W. Effect of air-pollution control on death rates in Dublin, Ireland: an intervention study. *Lancet* **2002**, *360*, 1210–1214.
- [2] Vedal, S.; Brauer, M.; White, R.; Petkau, J. Air pollution and daily mortality in a city with low levels of pollution. *Environ. Health Perspect.* **2003**, *111*, 45–52.
- [3] Kampa, M.; Castanas, E. Human health effects of air pollution. *Environ. Pollut.* **2008**, *151*, 362–367.
- [4] Torres, P.; Ferreira, J.; Monteiro, A.; Costa, S.; Pereira, M.C.; Madureira, J.; Mendes, A.; Teixeira, J.P. Air pollution: A public health approach for Portugal. *Sci. Total. Environ.* **2018**, *643*, 1041–1053.
- [5] Bayat, R.; Ashrafi, K.; Motlagh, M.S.; Hassanvand, M.S.; Daroudi, R.; Fink, G.; Künzli, N. Health impact and related cost of ambient air pollution in Tehran. *Environ. Res.* **2019**, *176*, 108547.
- [6] Kim, J.S.; Chen, Z.; Alderete, T.L.; Toledo-Corral, C.; Lurmann, F.; Berhane, K.; Gilliland, F.D. Associations of air pollution, obesity and cardiometabolic health in young adults: The Meta-AIR study. *Environ. Int.* **2019**, *133*, 105180.
- [7] Vicente, A.B.; Juan, P.; Meseguer, S.; Serra, L.; Trilles, S. Air Quality Trend of PM10. Statistical Models for Assessing the Air Quality Impact of Environmental Policies. *Sustainability* **2019**, *11*, 5857.
- [8] Unal, Y.; Toros, H.; Deniz, A.; Incecik, S. Influence of meteorological factors and emission sources on spatial and temporal variations of PM10 concentrations in Istanbul metropolitan area. *Atmos. Environ.* **2011**, *45*, 5504–5513. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.06.039.
- [9] European Parliament and Council of the European Union. *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner*

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

air for Europe; European Unions: Brussels, Belgium, 2008.

- [10] European Parliament and Council of the European Union. *Commission Directive (EU) 2015/1480 of 28 August 2015 Amending Several Annexes to Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council Laying Down the Rules Concerning Reference Methods, Data Validation and Location of Sampling Points for the Assessment of Ambient air Quality*; European Unions: Brussels, Belgium, 2015.
- [11] Degbelo, A.; Granell, C.; Trilles, S.; Bhattacharya, D.; Casteleyn, S.; Kray, C. Opening up smart cities: citizen-centric challenges and opportunities from GIScience. *ISPRS Int. J. -Geo-Inf.* **2016**, *5*, 16.
- [12] Castell, N.; Dauge, F.R.; Schneider, P.; Vogt, M.; Lerner, U.; Fishbain, B.; Broday, D.; Bartonova, A. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environ. Int.* **2017**, *99*, 293–302.
- [13] Hahn, D.W. *Light Scattering Theory*; Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Florida: Gainesville, FL, USA, 2009.
- [14] Götschi, T.; Oglesby, L.; Mathys, P.; Monn, C.; Manalis, N.; Koistinen, K.; Jantunen, M.; Hänninen, O.; Polanska, L.; Künzli, N. Comparison of black smoke and PM_{2.5} levels in indoor and outdoor environments of four European cities. *Environ. Sci. Technol.* **2002**, *36*, 1191–1197.
- [15] Zikova, N.; Masiol, M.; Chalupa, D.; Rich, D.; Ferro, A.; Hopke, P. Estimating hourly concentrations of PM_{2.5} across a metropolitan area using low-cost particle monitors. *Sensors* **2017**, *17*, 1922.
- [16] Le, K.; Tingey, K.; Becnel, T.; Giallardon, P.; Butterfield, T. Building Air Quality Sensors & Inspiring Citizen Scientists. *Chem. Eng. Educ.* **2018**, *52*, 193–201.
- [17] Sharp GP2Y1010AU0F. Available online: https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/gp2y1010au_e.pdf (accessed on 5 November 2019).
- [18] PM3007. Available online: http://www.gassensor.com.cn/product_detail_en/Particle_Sensor/PM3007 (accessed on 5 November 2019).
- [19] MS 1003. Available online: <https://aqicn.org/sensor/pms1003/es/> (accessed on 5 November 2019).
- [20] Particle Sensor Unit—PPD42NJ. Available online: <https://www.shinyei.co.jp/stc/eng/products/optical/ppd42nj.html> (accessed on 5 November 2019).
- [21] Nova SDS011. Available online: <http://www.inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/95.html> (accessed on 5 November 2019).

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

- [22] HM3301. Available online: <https://www.seeedstudio.com/Grove-Laser-PM2-5-Sensor-HM3301.html> (accessed on 5 November 2019).
- [23] Trilles, S.; Calia, A.; Belmonte, Ó.; Torres-Sospedra, J.; Montoliu, R.; Huerta, J. Deployment of an open sensorized platform in a smart city context. *Future Gener. Comput. Syst.* **2017**, *76*, 221–233.
- [24] Mukherjee, A.; Stanton, L.; Graham, A.; Roberts, P. Assessing the utility of low-cost particulate matter sensors over a 12-week period in the Cuyama valley of California. *Sensors* **2017**, *17*, 1805.
- [25] Genikomsakis, K.N.; Galatoulas, N.F.; Dallas, P.I.; Candanedo Ibarra, L.; Margaritis, D.; Ioakimidis, C.S. Development and On-Field testing of Low-Cost portable system for monitoring PM2.5 concentrations. *Sensors* **2018**, *18*, 1056.
- [26] Liu, H.Y.; Schneider, P.; Haugen, R.; Vogt, M. Performance assessment of a low-cost PM2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway. *Atmosphere* **2019**, *10*, 41.
- [27] Trilles, S.; Luján, A.; Belmonte, Ó.; Montoliu, R.; Torres-Sospedra, J.; Huerta, J. SEnviro: A sensorized platform proposal using open hardware and open standards. *Sensors* **2015**, *15*, 5555–5582.
- [28] Universitat Jaume I University. Available online: <http://www.uji.e> (accessed on 26 November 2019).
- [29] Trilles, S.; González-Pérez, A.; Huerta, J. A Comprehensive IoT Node Proposal Using Open Hardware. A Smart Farming Use Case to Monitor Vineyards. *Electronics* **2018**, *7*, 419.
- [30] Trilles Oliver, S.; González-Pérez, A.; Huerta Guijarro, J. Adapting Models to Warn Fungal Diseases in Vineyards Using In-Field Internet of Things (IoT) Nodes. *Sustainability* **2019**, *11*, 416.
- [31] Oliver, S.T.; González-Pérez, A.; Guijarro, J.H. An IoT proposal for monitoring vineyards called SEnviro for agriculture. In Proceedings of the 8th International Conference on the Internet of Things, Santa Barbara, CA, USA, 15–18 October 2018; p. 20.
- [32] Particle Boron Microcontroller. Available online: <https://docs.particle.io/datasheets/cellular/boron-datasheet/> (accessed on 5 November 2019).
- [33] Vicente, A.; Juan, P.; Meseguer, S.; Díaz-Avalos, C.; Serra, L. Variability of PM10 in industrialized-urban areas. New coefficients to establish significant differences between sampling points. *Environ. Pollut.* **2018**, *234*, 969–978.
- [34] Archontoulis, S.V.; Miguez, F.E. Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agron. J.* **2015**, *107*, 786–798.
- [35] Patón, D.; Andréu, E.; Morales, T.; Degollada, E.; Amigó, N.; Martín, C.; Molina, C.; Pajuelo, P. Análisis comparado de modelos GAM, GLM y LOESS para la determinación de mapas de distribución en cetáceos. In the proceeding of X Congreso de la SEC (Sociedad Española de

Estudio de la fiabilidad de un sensor IoT de PM de bajo coste en ambientes interiores y exteriores

Cetáceos), Valencia, Spain, 29–30 September 2017.

- [36] Trilles, S. *Particulate Matter Observations Using HM-3301 Low-cost Sensor*; Zenodo: Geneva, Switzerland, 13 November 2019. doi:10.5281/ZENODO.3540777.
- [37] Polidori, A.; Papapostolou, V.; Zhang, H. *Laboratory Evaluation of Low-Cost Air Quality Sensors*; South Coast Air Quality Management District: Diamondbar, CA, USA, 2016.
- [38] Papapostolou, V.; Zhang, H.; Feenstra, B.J.; Polidori, A. Development of an environmental chamber for evaluating the performance of low-cost air quality sensors under controlled conditions. *Atmos. Environ.* **2017**, *171*, 82–90.
- [39] Zimmerman, N.; Presto, A.A.; Kumar, S.P.; Gu, J.; Hauryliuk, A.; Robinson, E.S.; Robinson, A.L.; Subramanian, R. A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmos. Meas. Tech.* **2018**, *11*, 291–313.