

Soluciones para SmartCities: propuesta de un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en una red LoRaWAN con sensores portátiles

Agustin Candia
Laboratorio de Investigación en
Nuevas Tecnologías Informáticas,
UNLP
La Plata, Argentina
acandia@linti.unlp.edu.ar

Miguel Ángel Luengo
Laboratorio de Investigación en
Nuevas Tecnologías Informáticas,
UNLP
La Plata, Argentina
mluengo@info.unlp.edu.ar

Soledad Natacha Represa
Centro de Investigaciones del
Medioambiente, CONICET-UNLP
La Plata, Argentina
Grupo de Cartografía GeoAmbiental y
Teledetección, UPV
Valencia, España
solrepresa@quimica.unlp.edu.ar

Andrés Atilio Porta
Centro de Investigaciones del
Medioambiente, CONICET-UNLP
La Plata, Argentina
aporta@quimica.unlp.edu.ar

Daniela Giuliani
Centro de Investigaciones del
Medioambiente, CONICET-UNLP
La Plata, Argentina
danielag_sm32@hotmail.com

Luis Armando Marrone
Laboratorio de Investigación en
Nuevas Tecnologías Informáticas,
UNLP
La Plata, Argentina
lmarrone@linti.unlp.edu.ar

Resumen—La exposición continua a elevados niveles de contaminantes atmosféricos puede generar efectos adversos sobre la salud y el ambiente. Los avances tecnológicos en redes de comunicación y en sensores de contaminación del aire permiten el desarrollo de sistemas de bajo costo para la gestión de la calidad del aire en ciudades. El despliegue de un gran número de sensores puede proveer una mejor resolución geográfica y temporal complementando las redes de monitoreo tradicionales. En este trabajo presentamos una experiencia en la ciudad de La Plata, Argentina, donde se ha montado un sistema de monitoreo de la calidad del aire para áreas urbanas basado en una red LoRaWAN, utilizando entornos de hardware y software libre. El conjunto de la información sensada es transmitida a una plataforma escalable para IoT en la nube, desde donde se puede procesar el conjunto de los datos recibidos, monitorear el estado de la red y generar estadísticas. En esta primera experiencia, se realizaron pruebas con sensores de 3 modelos distintos (Nova SDS011, Nova SDS021 y SHINYEI PPD42) junto a un equipo muestreador de material particulado de bajo volumen MiniVol TAS Airmetrics. Los resultados obtenidos al momento proporcionan un aporte a la construcción de futuras ciudades inteligentes.

Palabras claves— sensores bajo costo, IOT, LoRaWAN, monitoreo de calidad de aire.

I. INTRODUCCION

Un reciente estudio de United Nations Department of Economic and Social Affairs (2018) informa que un 55% de la población mundial vive en zonas urbanas, ubicando a Latinoamérica como la segunda región del mundo con la mayor tasa de urbanización (81%). El consumo de recursos y energía, y la generación de residuos, en torno a las ciudades genera un deterioro de la calidad del aire entre otros problemas ambientales urbanos [1].

La exposición continua a elevados niveles de contaminantes atmosféricos provoca efectos adversos sobre la salud de la población. Se estima que la contaminación del aire causa el 36% de las muertes por cáncer de pulmón, el 27% de los infartos al corazón, el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 35% de las muertes por insuficiencias

respiratorias [2]. Por otra parte, se ha encontrado un vínculo entre la mala calidad del aire y el cambio climático que expone a gran parte del planeta de desastres ambientales [3]. En este sentido, resulta sumamente importante contar con sistemas continuos de vigilancia que den cuenta de la gravedad de la calidad del aire y que brinden información clara para la toma de acciones [4].

El material particulado (MP) es una mezcla de partículas sólidas y líquidas de distintos tamaños que se encuentran suspendidas en el aire. El MP de menor tamaño, con diámetro de partícula inferior a 10 μm (MP₁₀) y 2.5 μm (MP_{2.5}), constituye un peligroso agente carcinógeno [5]. Los niveles de MP se ven influenciadas por factores naturales y antrópicos, como son la temperatura, la humedad y la ubicación, entre otros [6]. La elevada variabilidad espacial y temporal que posee el MP en el aire urbano convierten a su monitoreo en un interesante desafío.

El surgimiento de protocolos de comunicación de bajo consumo y con altas prestaciones, junto a los últimos avances en hardware, establecen un óptimo contexto para el desarrollo de redes inalámbricas de sensores (WSNs) para el monitoreo y la vigilancia. Sin embargo, el uso de las redes WSN en el monitoreo de la calidad del aire no ha sido explotado al máximo [7].

El desarrollo de sensores de bajo costo aparece como una posible solución a la necesidad de redes altamente densificadas. La posibilidad de adquirir dispositivos pequeños, económicos y portátiles, puede mejorar ampliamente la capacidad para caracterizar las concentraciones de MP en distintos puntos y de forma simultánea [8]. Como limitación de esta tecnología, en el mercado se presentan una gran variedad de equipos de diferente gama, cuyas mediciones pueden tener distintos niveles de calidad [9].

En Argentina existen estudios previos que dan cuenta de la calidad del aire en zonas urbanas [10] [11] y de los efectos en la salud de la población [12] [13]. Sin embargo, son pocas las ciudades que presentan un monitoreo sistemático en el tiempo y únicamente la Ciudad Autónoma de Buenos Aires

cuenta con una red de monitoreo continuo de la calidad del aire, desconociéndose la calidad del aire para la mayoría de las áreas urbanas de Argentina.

Desde el enfoque del "internet de las cosas" (IOT), distintos trabajos muestran la potencialidad de las redes LoRaWAN con sensores portátiles para desarrollar sistemas de alerta temprana para la gestión de la calidad del aire [14] [15]. Mediante la tecnología de detección a distancia, la conectividad, el procesamiento de datos y la generación de información de fácil interpretación, es posible generar redes de monitoreo que contribuyan en la transformación de las áreas urbanas a ciudades inteligentes [16].

En base a esto, en este trabajo compartiremos una solución bajo el paradigma IOT para smart cities atacando la problemática de la calidad del aire. Se propone un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en una red LoRaWAN con sensores portátiles, tomando como caso de aplicación la ciudad de La Plata, Argentina.

II. METODOLOGIA

Como metodología de trabajo se confeccionó un prototipo de red de monitoreo de calidad de aire para la región del Gran La Plata (Sección II.A) utilizando una red de baja potencia y largo alcance LoRaWAN (Sección II.B). Los datos fueron concentrados y visualizados mediante un software específico (Sección II.C). A su vez, se recopilaron datos con un nodo compuesto por sensores de bajo costo de monitoreo de MP₁₀ y MP_{2.5} (Sección II.D) en 4 campañas, y se evaluó frente a un método de referencia (Sección II.E y II.F).

A. Sitio de Aplicación

La ciudad de La Plata (34° 56' 00" S 57° 57' 00" O) se encuentra dentro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Está ubicada sobre la pampa húmeda. El clima del área es de tipo templado-húmedo, con precipitaciones medias anuales de 1079 mm.año, humedad relativa de 77% y temperatura media de 15°C [17].

La Plata, junto con las ciudades de Ensenada y Berisso, conforman la región del Gran La Plata, con una población al 2010 de 793.365 habitantes (INDEC 2010). Si bien La Plata es el municipio con mayor cantidad de habitantes, locales industriales y puestos de trabajo de la microrregión, Ensenada cuenta con establecimientos fabriles de gran envergadura, como son la Empresa Ternium-Siderar, el Astilleros Río Santiago, la Petroquímica y Destilería General Mosconi y la Central Térmica Ensenada de Barragán [18]. Estas características hacen de la Región del Gran La Plata un interesante campo de estudio de la calidad del aire.

B. Red de comunicaciones LPWAN (low power Wide área Network)

El protocolo de red seleccionado fue LoRaWAN. La arquitectura se implementa en una topología de estrellas en la que dispositivos repetidores (gateways) retransmiten mensajes entre los dispositivos finales (sensores) y un servidor de red central [19]. Los gateways están conectados al servidor de red a través de conexiones IP estándar y actúan simplemente convirtiendo paquetes de RF en paquetes IP y viceversa. Se seleccionó considerando las ventajas que ofrece en un entorno inalámbrico de área amplia: comunicaciones de largo alcance manteniendo el bajo consumo de energía (2km a 5km en entornos urbanos y hasta 15km en zonas

despejadas); operación en bandas de frecuencias no licenciadas (ISM) como 915MHz; servicios de red para confirmación de mensajes, encriptación, multicasting y activación/registro en la red "over the air", no presentando limitaciones en el número de paquetes transferidos. Por último, los costos de despliegue y operación son bajos en comparación con otras tecnologías similares y en el mercado existe disponibilidad de equipos y operadores.

Para evaluar el alcance y la capacidad de la red para transmitir datos se utilizó un nodo portátil. A su vez, se desarrolló un software que permite visualizar en un mapa la potencia recibida en los recorridos realizados de prueba y estimar la zona de alcance de la señal (Fig. 2).

C. Plataforma de Software para red de sensores

Para el monitoreo en tiempo real y analítica de los datos recolectados, se diseñó una solución de software (Fig. 1) que brinde soporte a una heterogeneidad de sensores, formatos y tecnologías de comunicación. La solución deberá permitir escalar para trabajar con un volumen alto de datos orientado a series de tiempo y georeferenciados. Finalmente, deberá pensarse en una interfaz que facilite al usuario final interpretar la complejidad de los datos ambientales y que garantice su exportación a un formato estándar, para casos donde se requiera un procesamiento complementario con otras herramientas (tipo Matlab o R).

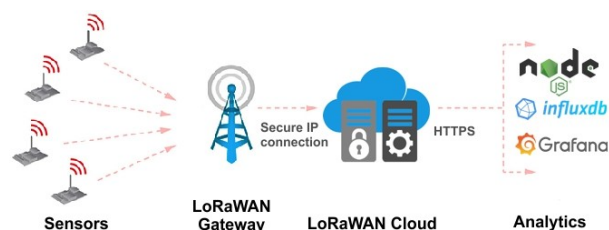


Fig. 1. Arquitectura de software desplegada

Para recolección de datos y desarrollo de conectores multiprotocolo, se hizo uso de la herramienta NodeRed [20], la cual permite un desarrollo ágil y hereda el potencial del modelo no bloqueante y asíncrono de NodeJS [21].

Para consolidación de la información recolectada se utilizó el motor InfluxDB [22], una base de datos orientada a series de tiempo para un almacenamiento rápido y de alta disponibilidad. Su uso está pensado para campos tales como monitoreo de operaciones, métricas de aplicaciones, datos de sensores de Internet y análisis en tiempo real.

Finalmente, para presentación de los datos se empleó el entorno Grafana [23]. Éste permite importar datos dinámicamente desde múltiples backends y el armado de tableros de monitoreo (dashboards) en un entorno web, tanto para visualización en tiempo real como para datos históricos.

D. Nodos de monitoreo con sensores de bajo costo

En este trabajo se implementó un nodo basado en Arduino Mega en donde se incorporaron sensores de bajo costo para la medición de MP₁₀ y MP_{2.5} y de otros parámetros ambientales de interés en el estudio de la calidad del aire. Para la subida de datos se utilizaron el integrado ESP8266 para comunicaciones vía WiFi y el integrado Feather 32u4 RFM95 915mhz para uso de la red LoRaWAN, de similares características al utilizado en las pruebas de alcance de la red (sección III.A).

Con el fin de comparar el comportamiento entre los distintos modelos de hardware, se seleccionaron los siguientes sensores: Nova SDS011, Nova SDS021 y SHINYEI PPD42. Se trabajó con la unidad de concentración másica $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para lo cual fue preciso convertir las mediciones que informa el sensor SHINYEI PPD42. Para esto se utilizó la fórmula de calibración sugerida por el fabricante.

E. Monitoreo de la calidad de aire

Diferentes estudios [24], dan cuenta de la importancia en la calibración de los sensores de bajo coste para el escenario particular donde se despliegan. La calibración en aplicaciones de monitoreo ambiental se realiza con instrumentos de referencia ubicados en el mismo sitio [25].

Para evaluar la calidad de las mediciones del nodo, se realizaron 4 campañas donde se registraron los valores de MP_{10} , $\text{MP}_{2.5}$, temperatura, humedad, dirección del viento, velocidad y luminosidad. Se eligió como punto para monitorear una terraza en un primer piso ($34^{\circ}55'02.1''\text{S}$ $57^{\circ}56'38.7''\text{O}$), ubicada a 50m de una avenida de alto tránsito de la ciudad de La Plata.

Para calibrar las lecturas brutas y evaluar las variaciones entre los sensores de MP, se colocó junto a los mismos un equipo muestreador de MP de bajo volumen MiniVol TAS Airmetrics. Se realizaron de forma alternada, mediciones integradas de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$, a un flujo constante de 5 l/min, con una duración de 3 y 5 días respectivamente. La razón de la extensión del muestreo es obtener una masa crítica medible por gravimetría [26]. Los sensores realizaron mediciones cada 1 min y fueron transmitidas mediante WiFi.

F. Procesamiento y análisis de las mediciones quations

Para el tratamiento estadístico, los datos fueron descargados en formato .csv a través de la plataforma web desarrollada. En base a las recomendaciones del fabricante, los datos medidos con una humedad superior al 95% fueron descartados. Luego, las series de tiempo fueron agregadas en promedios de 1 hora, suavizando los valores atípicos para facilitar su interpretación. Tras esto, se realizó un análisis exploratorio, se estudió la falta de datos y la correlación entre los sensores. Por último, se calculó el error relativo (ER) entre las mediciones de los sensores y las mediciones realizadas por el método de referencia. Todo el análisis estadístico se realizó utilizando el lenguaje R [27].

III. RESULTADOS

A. Análisis de la red de monitoreo

En esta experiencia piloto se desplegó una red LoRaWAN usando la infraestructura de torres de la UNLP y el backbone de fibra óptica que las conecta. Se utilizaron 5 dispositivos marca Kerlink modelo iBTS [28] con antenas omnidireccionales, en distintos puntos de la región de estudio tal como puede verse en la Fig. 2. Estos puntos fueron seleccionados buscando el mejor alcance para un casco urbano densamente edificado y en zonas con menor obstaculización de la señal como lo son los partidos de Berisso y Ensenada. Como resultado, se logró obtener una amplia cobertura del casco urbano de La Plata y gran parte de la ciudad de Berisso y Ensenada (Fig. 2). La red LoRaWAN resultó ser suficiente en términos de alcance y área de cobertura, observándose una mejor recepción de señal en áreas residenciales (gateways

ubicados en Gonnet y Berisso), en comparación a zonas urbanizadas (gateway en centro de la ciudad).

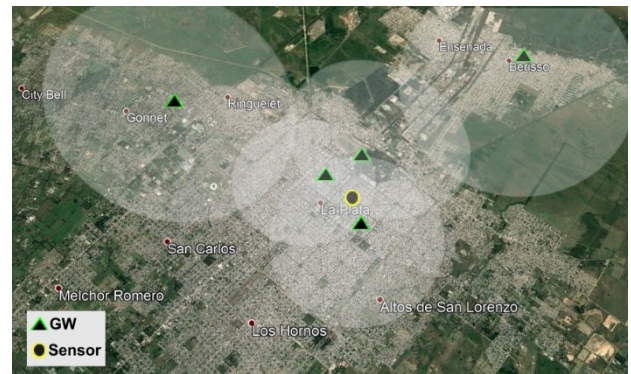


Fig.2 Mapa de cobertura red LoRaWAN. El mapa muestra los gateways junto con el área de cobertura. El círculo representa la ubicación del sensor de calidad de aire.

B. Armado y evaluación de nodo de monitoreo

Para esta prueba piloto se elaboró un nodo con 3 modelos distintos de sensores utilizando Arduino [29]. Esta plataforma de hardware permite un desarrollo ágil y a la vez gestionar múltiples sensores en simultáneo, implementar rutinas de verificación internas y tener conectividad con un amplia gama de tecnologías inalámbricas.

Los sensores incluidos en este estudio presentan un método de dispersión de luz para la detección del MP, el cual es susceptible a las condiciones meteorológicas [30] [31]. Para evitar pérdidas o errores en las mediciones fue necesario implementar un gabinete estanco que resguarde el equipamiento. Sin embargo, debido a los movimientos de traslado, el sensor SDS 011 se desconectó durante la tercer campaña de monitoreo. En futuras versiones, se avanzará en rutinas de control para dar avisos en tiempo real que puedan gestionar mejor las desconexiones o funcionamientos anómalos de los sensores. A su vez, el resguardo de registros sensados en memoria no volátil ante fallas en la red, es una opción deseable en entornos donde no se cuente con enlaces de comunicación redundantes.

C. Campañas de monitoreo de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$

Para evaluar el comportamiento de los sensores de bajo coste, se efectuaron 4 campañas de monitoreo de MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ durante el otoño del 2018, en un punto céntrico de la ciudad de La Plata. Las campañas 1, 2 y 4 fueron acompañadas con el método de referencia para MP_{10} , mientras que en la campaña 3 se utilizó un método de referencia para $\text{MP}_{2.5}$.

Se analizaron un total de 24536 registros, reduciéndose al realizar el agregado por medias horarias a 347 observaciones para cada variable. Las condiciones climáticas de los días de campaña fueron de una humedad media del 86% (50% - 100%), una temperatura de 10°C (1°C - 21°C) y una velocidad del viento de $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) - $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Tras excluir los datos donde la humedad superó el 95%, se descartaron el 21-33% de las mediciones dependiendo de cada sensor. Esto sumado a la pérdida por desconexión, se descartaron las mediciones del sensor SDS 011 para MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$ en la campaña 3 (92% de datos faltantes). En el resto de las campañas y para los distintos sensores, la falta de datos ocurrió entre el 30-40% de las observaciones totales.

En la Tabla 1 pueden observarse los estadísticos descriptivos de las mediciones de los sensores de bajo coste en cada una de las campañas. Los sensores SDS 011 y SDS 021 mostraron un comportamiento similar en todas las campañas, con rangos de mediciones próximos y similares funciones de distribución muestrales. Por otra parte, el sensor PPD 42 presentó un mayor rango en los registros, alcanzando medidas de concentración más elevadas que los otros sensores y registrando un mayor número de valores cercanos al cero.

Campaña 1: 21/05/2018 al 24/05/2018					
	Sensor	Prom	Median	Min	Max
MP _{2.5}	PPD42	42.1	45.3	0.6	135
	SDS011	12.4	8.4	1.1	35.9
	SDS021	15.0	9.4	1.7	39.5
MP ₁₀	SDS011	16.9	13.3	3.1	40.4
	SDS021	18.5	13.3	4.0	42.9
Campaña 2: 05/06/2018 al 08/06/2018					
	Sensor	Prom	Median	Min	Max
MP _{2.5}	PPD42	26.5	3.2	0.6	94.7
	SDS011	9.8	10.3	2.7	22.8
	SDS021	10.8	9.9	2.6	26.6
MP ₁₀	SDS011	15.3	14.5	5.5	31.4
	SDS021	14.4	12.7	6.4	32.2
Campaña 3: 22/06/2018 al 28/06/2018					
	Sensor	Prom	Median	Min	Max
MP _{2.5}	PPD42	29.7	23.5	0.6	112.0
	SDS011	-	-	-	-
	SDS021	11.0	7.8	0.2	42.3
MP ₁₀	SDS011	-	-	-	-
	SDS021	15.0	11.3	0.3	48.2
Campaña 4: 02/07/2018 al 05/07/2018					
	Sensor	Prom	Median	Min	Max
MP _{2.5}	PPD42	24.1	18.4	0.6	82.6
	SDS011	4.3	2.9	1.2	12.8
	SDS021	5.0	3.3	2.1	15.8
MP ₁₀	SDS011	9.8	8.7	4.3	21.2
	SDS021	10.0	8.6	5.7	21.7

Tabla 1. Media, mediana, mínimo y máximo de las mediciones de MP₁₀ y MP_{2.5} realizadas por los sensores de bajo coste en cada una de las campañas de monitoreo. Las concentraciones se expresan en $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

Al analizar la correlación, los sensores SDS 011 y SDS 021 mostraron una muy buena correlación para MP₁₀ (0.96, $p < 0.001$, $n = 122$) y para MP_{2.5} (0.99, $p < 0.001$, $n = 123$). La correlación disminuye pero se mantiene significativa entre el PPD 42 y el SDS 011 (0.70, $p < 0.001$, $n = 136$) y entre el PPD 42 el SDS 021 (0.68, $p < 0.001$, $n = 209$) para MP_{2.5} (Fig. 3).

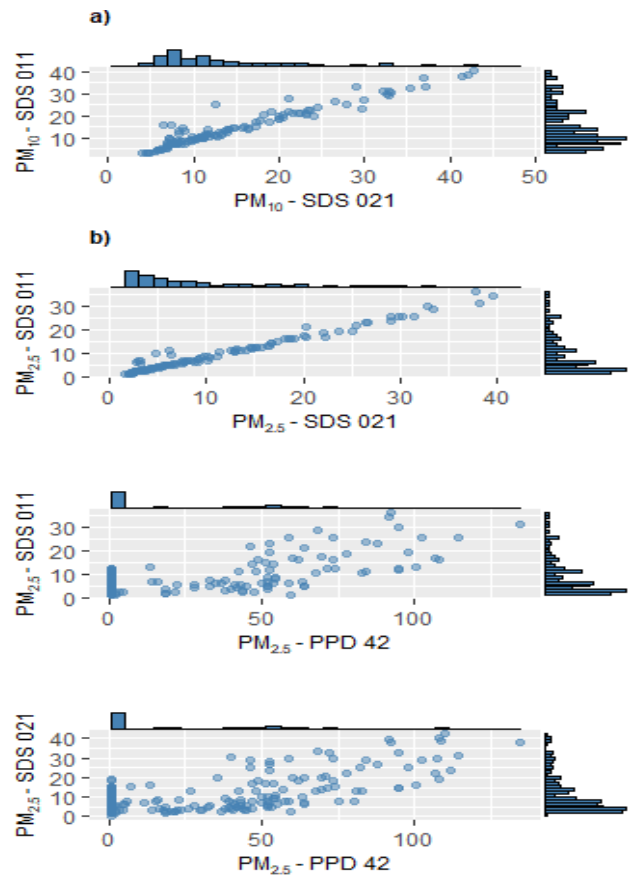


Fig. 3 Gráficos de dispersión de las mediciones realizadas con los sensores SDS 021, SDS 011 y PPD 42 para a) MP₁₀ y b) MP_{2.5}

Finalmente, se compararon las mediciones realizadas con un método de referencia (Figura 4). El ER de las mediciones de MP₁₀ se mantuvo cercano a lo largo de las distintas campañas: campaña 1: 54% -50%, campaña 2: 53% - 56% y campaña 4: 58% - 57% para SDS 011 y SDS 021, respectivamente. Por otra parte, el sensor PPD 42 mostró un ER de 58%, mientras que el SDS 021 presentó un ER de 41% para MP_{2.5}.

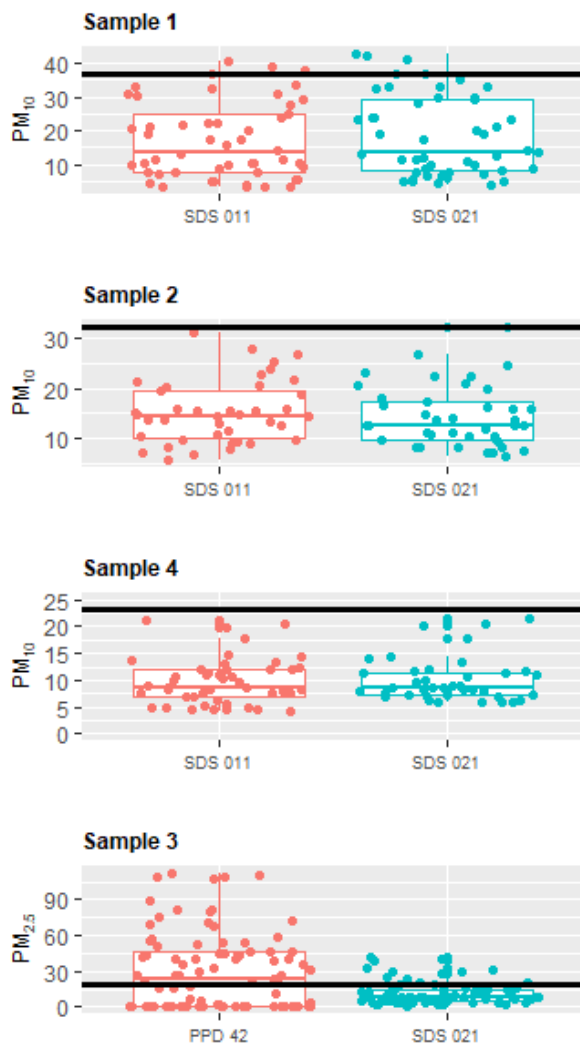


Fig.4 Comparación entre las mediciones realizadas con los sensores SDS 021, SDS 011 y PPD 42 en las distintas campañas junto la medida de referencia (línea negra)

IV. DISCUSION

El despliegue de gateways en las antenas seleccionadas, cubrió de forma satisfactoria el área de interés, incluso utilizando una baja densidad de equipos. Análisis sobre la performance de este tipo de redes puede verse en [32]. En cuanto a la escalabilidad, y pensando en un escenario futuro con miles de dispositivos conectados transmitiendo para diferentes verticales, algunos autores [33], [34] plantean ciertas restricciones y posibles acciones que deberán tenerse en cuenta para escalar soluciones en redes LoRaWAN.

Otros casos de uso con dispositivos bajo coste sobre redes de sensores inalámbricas, plantean aplicaciones para determinar exposiciones personales o redes de monitoreo móviles como Aclima (<http://insights.aclima.io>), OpenSense (<http://opensense.epfl.ch>) y AirCasting (<http://aircasting.org>). Pensando en este tipo de escenarios, podría hacerse uso de la potencialidad de LoRaWAN para la geolocalización de paquetes y evitarse el uso de módulos GPS. Esto traería claros beneficios en términos de reducción en costos de fabricación y ahorro energético en el nodo [35].

El surgimiento de dispositivos económicos para la medición de contaminantes y su proliferación en proyectos de ciencia ciudadana, ha dado lugar a que prestigiosas instituciones se involucren en analizar su performance [30].

En todos los casos, se presentan las limitaciones de su uso y la necesidad de realizar calibraciones tanto en un entorno de laboratorio como en escenarios reales [31]. En este tipo de estudios se utilizan distintos instrumentos de referencia y se analiza principalmente la precisión y la influencia de la temperatura y humedad en las mediciones [36]. En general, se observa una considerable diferencia entre los estudios de laboratorio y escenarios reales, principalmente por la variedad en tamaño, composición y rango de concentración de las partículas. Resultando altamente recomendable calibrar los equipos en el entorno donde se utilicen [24].

Por último, otro de los desafíos que se plantean en el uso de los equipos de bajo coste, es su durabilidad frente al deterioro ocasionado por el paso del tiempo. Al igual que con los equipos más costosos, se esperaría un desgaste de los componentes electrónicos de los sensores. Esto requiere incluir dentro del mantenimiento periódico, la calibración regular, sumándose la complejidad de un despliegue masificado en una área de cobertura mayor [37].

V. CONCLUSION

En este trabajo presentamos los avances en la construcción de un sistema de monitoreo de la calidad del aire para áreas urbanas basado en WSN, utilizando entornos de hardware y software libre. La información sensada es transmitida a una plataforma escalable para IoT en la nube, desde donde se puede procesar el conjunto de los datos recibidos, monitorear el estado de la red y generar estadísticas, partiendo del almacenamiento histórico de tramas en una base de datos diseñada para tal fin.

El prototipo de la red de monitoreo fue desarrollado para la ciudad de La Plata, Argentina, y se realizó una evaluación del alcance de la red como del funcionamiento de los sensores. También, se realizaron distintas mediciones de referencia para conocer el error relativo de las mediciones.

La red LoRaWAN mostró un óptimo alcance, resultando correcta la elección de este protocolo de trabajo. El hecho de poder desplegar gateways en antenas propias, permitió adaptar la solución a las necesidades del proyecto. Por otra parte, las plataformas de software escogidas agilizaron el desarrollo de la solución, sumando un antecedente más a su creciente divulgación en entornos para IOT.

Respecto a los sensores, se obtuvo un ER dentro del orden de lo esperado para los niveles de humedad de la ciudad de La Plata y en concordancia con los resultados citados en estudios previos.

Se desprende de los resultados y de la bibliografía analizada, que aún queda mucho trabajo para integrar estas tecnologías en el marco de las ciudades inteligentes y que no deberán sustituir el uso de equipos y dispositivos convencionales de monitoreo de la calidad del aire, sino complementarlos, aportando un mayor número de medidas que permitan dar cuenta de la distribución espacial y con una elevada frecuencia temporal, siendo este su principal potencial a futuro. A su vez, se deberá avanzar en un esquema de normalización y certificación de los sensores de bajo coste, que permita al usuario final escoger un sensor acorde a las necesidades de su aplicación y objetivos.

Así pues, el sistema de monitoreo propuesto resulta una herramienta viable para la medición de los niveles de contaminantes y otras métricas de interés para el estudio de la

calidad del aire. Avanzar en este sentido permitirá el desarrollo y validación de modelos de predicción de alta resolución espacial, la evaluación del impacto de las emisiones industriales y la toma estratégica de decisiones para la planificación a largo plazo.

REFERENCES

- [1] B. R. Gurjar, K. Ravindra y A. S. Nagpure, «Air pollution trends over Indian megacities and their local-to-global implications. Atmospheric Environment.» 2016, pp. 142, 475-495..
- [2] World Health Organization (WHO), «Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease,» Geneva, Switzerland, 2016.
- [3] A. Tai, L. Mickley y D. Jacob, «Correlations between fine particulate matter (PM2.5) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM2.5 to climate change,» *Atmospheric Environment*, vol. 44, n° 44, pp. 3976-3984, 2010.
- [4] S. Gulia, I. Khanna, M. Khare y S. S. Nagendra, «Urban air quality management-A review,» *Atmospheric Pollution Research*, vol. 6, n° 6, pp. 286-304, 2015.
- [5] IARC, International Agency for Research on Cancer, «Agents Classified by the IARC Monographs, Volumes 1-122,» 2017.
- [6] M. Moskalik, J. Cwiakala, W. Szczuciński, A. Dominiczak, O. Glowacki, K. Wojtysiak y P. Zagórski, «Spatiotemporal changes in the concentration and composition of suspended particulate matter in front of Hansbreen, a tidewater glacier in Svalbard,» 2018.
- [7] S. Mansour, N. Nasser, L. Karim y A. Ali, «Wireless Sensor Network-based Air Quality Monitoring System,» de *International Conference on Computing, Networking and Communications, Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*, 2014.
- [8] E. G. Snyder, T. H. Watkins, P. A. Solomon, E. D. Thoma, R. W. Williams, G. S. W. Hagler, D. Shelow, D. A. Hindin, V. J. Kilaru y P. W. Preuss, «The changing paradigm of air pollution monitoring,» *Environmental Science & Technology*, vol. 47, n° 20, pp. 11369-11377, 2013.
- [9] D. M. Holstius, A. Pillariseti, K. R. Smith y E. Seto, «Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California,» *Atmospheric Measurement Techniques (AMT)*, vol. 7, pp. 605-632, 2014.
- [10] M. Achad, M. L. López, S. Ceppi, G. G. Palancar, G. Tirao y B. M. Toselli, «Assessment of fine and sub-micrometer aerosols at an urban environment of Argentina,» *Atmospheric environment*, vol. 92, pp. 522-532, 2014.
- [11] B. S. Sosa, A. Porta, J. E. C. Lerner, R. B. Noriega y L. Massolo, «Human health risk due to variations in PM10-PM2.5 and associated PAHs levels,» *Atmospheric environment*, vol. 160, pp. 27-35, 2017.
- [12] S. Martin, L. Dawidowski, P. Mandalunis, F. Cereda-Balic y D. R. Tasat, «Characterization and biological effect of Buenos Aires urban air particles on mice lungs,» *Environmental research*, vol. 105, n° 3, pp. 340-349, 2007.
- [13] I. T. Busso, A. Vera, A. C. Mateos, A. C. Amarillo y H. Carreras, «Histological changes in lung tissues related with sub-chronic exposure to ambient urban levels of PM2.5 in Córdoba, Argentina,» *Atmospheric Environment*, vol. 167, pp. 616-624, 2017.
- [14] D. Ahlers, P. Driscoll, F. Kraemer, F. Anthonisen y J. Krogstie, «A Measurement-Driven Approach to Understand Urban Greenhouse Gas Emissions in Nordic Cities,» de *NIK-2016 conference*, Norway, 2016.
- [15] J. V. Luna, M. L. Acosta y G. S. Guzmán, «Monitoreo de concentración de monóxido de carbono usando tecnología Long-Range,» *Ingenius: Revista de Ciencia y Tecnología*, n° 18, pp. 73-83, 2017.
- [16] Y. Zheng, F. Liu y H. P. Hsieh, «U-Air: When urban air quality inference meets big data,» de *KDD 2013 - 19th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Chicago, United States, 2013.
- [17] E. Fucks, G. D'amico, M. F. Pisano y G. Nuccetelli, «Evolución geomorfológica de la región del gran la plata y su relación con eventos catastróficos,» *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 74, n° 2, pp. 141-154, 2017.
- [18] D. Arturi, F. Langard y H. L. & Adriani, «La industria del Gran La Plata según el último Censo Nacional Económico,» *Estudios Socioterritoriales*, vol. 12, 2012.
- [19] LoRa Alliance, «<https://lora-alliance.org/>,» [En línea]. Available: <https://lora-alliance.org/>.
- [20] Node-Red, «<http://nodered.org/>,» [En línea].
- [21] NodeJS, «<https://nodejs.org/>,» [En línea]. Available: <https://nodejs.org/>.
- [22] InfluxDB, «http://influxdb.com,» [En línea]. Available: <http://influxdb.com>.
- [23] Grafana, «<http://grafana.org/>,» [En línea]. Available: <http://grafana.org/>.
- [24] W. Jiao, G. Hagler, R. Williams, R. Sharpe, R. Brown, D. Garver, R. Judge, M. Caudill, J. Rickard, M. Davis, L. Weinstock, S. Zimmer-Dauphinee y K. Buckley, «Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States,» *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 9, pp. 5281-5292, 2016.
- [25] M. Gao, J. Cao y E. Seto, «A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2.5 in Xi'an, China,» *Environmental pollution*, vol. 199, pp. 56-65, 2015.
- [26] J. C. Lerner, A. Morales, M. Aguilar, P. Barrionuevo, J. Ditondo, A. Porta, L. Massolo y V. Doderó, «Calidad Del Aire En Áreas Urbanas E Industriales En La Provincia De Buenos Aires. Estudio Comparativo Entre La Plata Y Bahía Blanca,» de *Contribuciones de la III Reunión Anual PROMCA*, Buenos Aires, 2011.
- [27] R Core Team, «<https://www.R-project.org/>. A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria,» [En línea]. Available: <https://www.R-project.org/>.
- [28] Kerlink, «<https://www.kerlink.com/>,» [En línea]. Available: <https://www.kerlink.com/>.
- [29] Plataforma Arduino, «<https://www.arduino.cc/>,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [30] R. Williams, A. Kaufman, T. Hanley, J. Rice y S. Garvey, «Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors,» EPA, Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2014.
- [31] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang y P. Biswas, «Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement,» *Aerosol Science and Technology*, vol. 49, n° 11, pp. 1063-1077, 2015.
- [32] T. Petrić, M. Goessens, L. Nuaymi, L. Toutain y A. Pelov, «Measurements, Performance and Analysis of LoRa FABIAN, a real-world implementation of LPWAN,» de *PIMRC 2016 : 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*, Valencia, 2016.
- [33] O. Georgiou y U. Raza, «Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?,» *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, n° 2, pp. 162-165, 2017.
- [34] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui y T. Watteyne, «Understanding the Limits of LoRaWAN,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, n° 9, pp. 34-40, 2017.
- [35] B. C. Fargas y M. N. Petersen, «GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs,» de *2017 Global Internet of Things Summit (GIoTS)*, Geneva, Switzerland, 2017.
- [36] L. Morawska, P. K. Thai, X. Liu, A. Asumadu-Sakyi, G. Ayoko, A. Bartonova, A. Bedini, F. Chai, B. Christensen, M. Dunbabin, J. Gao, G. S. Hagler, R. Jayaratne, P. Kumar, A. K. Lau y P. K. Loui, «Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitoring and exposure assessment: How far have they gone?,» *Environment International*, vol. 116, pp. 286-299, 2018.
- [37] E. Austin, I. Novosselov, E. Seto y M. G. Yost, «Laboratory evaluation of the Shinyei PPD42NS low-cost particulate matter sensor,» *PloS one*, vol. 10, n° 9, 2015.