

## Unidad de monitoreo ambiental mediante un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) para contaminantes criterio en perfiles verticales

### Environmental monitoring unit using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for criterion pollutants in vertical profiles

HERNÁNDEZ-VEGA, José Isidro†\*, PALOMARES-GORHAM, Dolores Gabriela, REYES-VARELA, Elda y HERNÁNDEZ-SANTOS, Carlos

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Nuevo León. Av. Eloy Cavazos 2001, Colonia Tolteca, C.P. 67170, Cd. Guadalupe, Nuwvo León, México*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *José Isidro, Hernández-Vega* / ORC ID: 0000-0002-2634-8828, CVU CONACYT ID: 312855

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Dolores Gabriela, Palomares-Gorham* / CVU CONACYT ID: 478498

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Elda, Reyes-Varela* / CVU CONACYT ID: 778774

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Carlos, Hernández-Santos* / ORC ID: 0000-0002-9334-1159, CVU CONACYT ID: 180152

Recibido: Septiembre 27, 2018; Aceptado: Diciembre 08, 2018

#### Resumen

El presente trabajo da a conocer el diseño y la fabricación de un prototipo de un sistema mecatrónico de monitoreo de la calidad del aire, integrando una plataforma de un VANT, instrumentado con un sistema de adquisición y transmisión de datos inalámbrico en tiempo real, conexión con una estación de tierra que permita la visualización y almacenamiento de los datos adquiridos. Una unidad de monitoreo fue diseñada para contaminantes criterio: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogeno y dióxido de nitrógeno. Para el desarrollo del proyecto se siguió un modelo basado en la construcción de prototipos, modelo cíclico representado por las siguientes etapas: análisis-diseño del prototipo, construcción-revisión de las partes del prototipo, pruebas, evaluación-retroalimentación de los resultados obtenidos. Su desarrollo está basando en plataformas de sistemas embebidos y plataformas de vuelo de hardware libre, junto con recursos software de código abierto. El artículo presenta como está integrado el prototipo, diseño de la unidad de monitoreo, partes que la conforman, así como su adaptación al VANT.

#### VANT, Contaminantes criterio, Monitoreo

#### Abstract

The present work discloses the design and manufacture of a prototype of a mechatronic air quality monitoring system, integrating a platform of a UAV, instrumented with a system of acquisition and transmission of wireless data in real time, connection with a ground station that allows the visualization and storage of the acquired data. A monitoring unit was designed for criteria pollutants: carbon monoxide, carbon dioxide, hydrogen and nitrogen dioxide. For the development of the project, a model based on the construction of prototypes was followed, a cyclic model represented by the following stages: analysis-design of the prototype, construction-review of the parts of the prototype, tests, evaluation-feedback of the results obtained. Its development is based on embedded hardware platforms and free hardware flight platforms, along with open source software resources. The article presents how the prototype is integrated, the design of the monitoring unit, its parts, as well as its adaptation to the UAV.

#### UAV, Polluting criteria, Monitoring

**Citación:** HERNÁNDEZ-VEGA, José Isidro, PALOMARES-GORHAM, Dolores Gabriela, REYES-VARELA, Elda y HERNÁNDEZ-SANTOS, Carlos. Unidad de monitoreo ambiental mediante un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) para contaminantes criterio en perfiles verticales. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018. 5-17: 7-14.

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: jose.isidro.hernandez@itnl.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La contaminación del aire constituye un problema de salud ambiental. La emisión de sustancias a la atmósfera provoca un desequilibrio en su composición original.

Las sustancias contaminantes, provenientes tanto de fuentes naturales como antropogénicas y pueden clasificarse como: contaminantes criterio y contaminantes tóxicos o no criterio. (INECC y Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, 2013).

Los principales contaminantes que afectan la salud humana y a los ecosistemas son denominados contaminantes criterio. El término contaminante criterio ha sido adoptado en varios países e incluyen los siguientes contaminantes: Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), Material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), Plomo (Pb), Monóxido de carbono (CO) y Ozono (O<sub>3</sub>), (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

El problema de la calidad del aire provoca enfermedades cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neuropatías crónicas y agudas, entre ellas el asma.

Las industrias son una de las fuentes de emisión de contaminantes que afectan el entorno biológico natural, este problema se agrava en las grandes ciudades industrializadas, debido a que hay mayor número de procesos industriales que emiten sus contaminantes a través de chimeneas, agudizando el problema de la calidad del aire.

En las ciudades con un alto índice de contaminación, se han implementado sistemas de monitoreo ambiental, los cuales vigilan los niveles de contaminación y se encargan de mantenerlos dentro de niveles establecidos por normas nacionales e internacionales, relacionadas con monitoreo de contaminantes.

Se están aplicando nuevas estrategias en el apoyo del monitoreo de las estaciones fijas, incluyen la implementación de nuevas tecnologías para el monitoreo a través de unidades móviles que no solo se desplacen a nivel terrestre.

Una alternativa es la presentada es este artículo mediante una unidad móvil aérea para el monitoreo de contaminantes, usando un Vehículo Aéreos no Tripulados (VANT), equipado con instrumentación específica para monitoreo de contaminantes, recopilando datos necesarios para poder hacer estimaciones de la calidad del aire.

## Antecedentes

En los laboratorios, China Intel IoT Joint Labs, un grupo de investigadores ha desarrollado un sistema aéreo autónomo de vigilancia de contaminantes de calidad del aire, que analiza la calidad del aire en zonas locales y que emite alarmas sonoras si la calidad es muy baja.

El sistema de medición consta de un mini monitor portátil de calidad del aire llamado miniPAM, este va conectado a un Smartphone con GPS y altavoz, ambos van montado sobre un VANT tipo cuadricóptero modelo AR. DRONE 2.0, (Yun Cheng, 2013). Las desventajas más significativas de este prototipo son: tiempos cortos de vuelo, diseño poco robusto para condiciones de vuelos con ráfagas de viento rápidas.

En el Centro de Investigación de Cambios Ambientales, en la academia Sínica, Taipéi 11529, en Taiwán, Un sistema llamado lightweight remote controlled whole air sampling component (WASC), que quiere decir, componente ligero de muestreo de aire controlado a distancia, integrado en un VANT de tipo multirrotor de fácil maniobrabilidad para llevar a cabo el muestreo de aire en chimeneas que están sobre el túnel Hsuehshan (Chih-Chung Chang, 2016).

La desventaja más significativa de este prototipo es que solo toma muestras de campo, el análisis e interpretación de datos se tiene que realizar en laboratorios especializados con equipo para medición de calidad de aire.

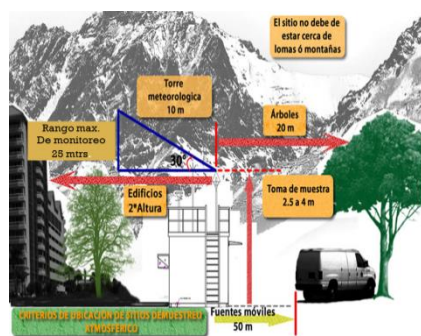
Una investigación de la Pontificia Universidad Católica del Perú, (Abarca, 2013), presenta un trabajo denominado "Vehículo Aéreo No Tripulado con Sistema de Medición de Calidad del Aire y Radiaciones Ionizantes, La propuesta integra en un solo vehículo al sistema de detección y monitoreo de los gases contaminantes del aire y de partículas de polvo.

Asimismo, integra al sistema de detección de radiaciones ionizantes en el aire; el cual incluye sensor de radiaciones alfa, beta y gamma. La desventaja de este prototipo es su costo de desarrollo, tamaño y peso.

La propuesta de nuestro prototipo es trabajar con plataformas de sistemas embebidos y plataformas de vuelo de hardware libre, junto con recursos software de código abierto, favoreciendo el desarrollo de la investigación y la reducción de costos con respecto a los sistemas comerciales. Desarrollar un sistema de adquisición de datos con sensores calibrados, tarjeta de bajo consumo eléctrico y enlace con diferentes tipos de sistemas de comunicación inalámbrica.

### Definición del problema

Una estación de monitoreo fija tienen un alcance de altura máximo de detección de 25 metros sobre el nivel del suelo para el monitoreo de contaminantes como se muestra en la figura 1, a partir de ese nivel las concentraciones de contaminantes en el aire resultan difícil de ser monitoreadas por las estaciones. Al estar distribuidas en puntos estratégicos en un área de manera fija, cuando se detectan variaciones de concentraciones altas de contaminantes es difícil determinar de forma rápida la ubicación de las posibles fuentes fijas que están emitiendo estas cantidades y poder aplicar los protocolos de contingencia o normas necesarias de acuerdo al caso.



**Figura 1** Criterios técnicos de ubicación y alcance de monitoreo de estaciones fijas

Fuente: (Argullin, 2016)

El no poder identificar las fuentes que están sobrepasando los límites permisibles de emisión de manera rápida, puede causar que los niveles de contaminación alcancen niveles de contingencia en que sea dañino respirar el aire.

La hipótesis propuesta fue que es factible construir una unidad de monitoreo para contaminantes criterio integrada en un VANT de arquitectura abierta para realizar el monitoreo de contaminantes.

### Justificación

La contaminación del aire causa graves daños a la salud humana principalmente en las vías respiratorias y actividad cerebral si se expone durante tiempos prolongados o a altas concentraciones. Es necesario proponer alternativas tecnológicas que permitan tomar mejores planificaciones para el monitoreo de contaminantes y las contingencias que provocan.

El proyecto fue desarrollando para el apoyo al monitoreo fijo de contaminantes, suma y agiliza las labores de monitoreo y detección de fuentes fijas como las chimeneas industriales una de las principales fuentes que afectan la calidad del aire.

Su desarrollo fue basando en plataformas de sistemas embebidos y plataformas de vuelo de hardware libre, junto con recursos software de código abierto, lo que favorece al desarrollo de la investigación y la reducción de costos con respecto a los sistemas comerciales.

### Objetivo de la investigación

Implementar la tecnología disponible en el mercado para el diseño y la fabricación de un prototipo de un sistema mecatrónico de monitoreo de la calidad del aire, integrando una plataforma de un VANT, instrumentado con un sistema de adquisición y transmisión de datos inalámbrico en tiempo real, conexión con una GCS que permita la visualización y almacenamiento de los datos adquiridos

### Secciones del artículo

El artículo está organizado como sigue. Primero, en la Sección 2, presentamos un fundamento teórico de los conceptos principales usados en el proyecto. En segundo lugar, presentamos en la Sección 3, la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto. En tercer lugar, en la Sección 4, se presentan resultados obtenidos al momento en la investigación.

En cuarto lugar, en la Sección 5, conclusiones y posibilidades de mejora del proyecto. Finalmente en quinto lugar, en la Sección 6, agradecimientos por los apoyos otorgados al proyecto.

## Fundamento Teórico

### Concepto de Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)-

El término VANT se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazar el término de vehículo aéreo pilotado remotamente, Remotely Piloted Vehicle (RPV). Un VANT es un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo a un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, puede ser recuperable y puede transportar una carga. No se considera VANT a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería (Ezcurra y Díaz, 2015).

Un UAV es esencialmente un robot que vuela. Puede ser controlado vía remota o puede volar de manera autónoma a través de un plan de vuelo controlados por el software que está integrado al sistema y el cual trabaja en conjunto con el GPS.

Además, un VANT es capaz de mantenerse en vuelo por medios aerodinámicos, es pilotado de forma remota o incluye un programa de vuelo automático, es reutilizable.

### Concepto adquisición de datos (DAQ)-

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido, (National Instruments Corporation, 2015).

Un sistema DAQ consiste en sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable, ver Figura 2, donde se muestra una entidad que adquiere la señal del medio físico, una entidad que la procesa y una computadora que la manipula de manera digital.



**Figura 2** Partes que componen un sistema DAQ de monitoreo de variables físico-eléctricas

*Fuente: (National Instruments Corporation, 2015)*

### Concepto de sensor

Los sensores son dispositivos capaces de convertir una magnitud física, como la temperatura, la presión, el valor de PH, medición de un gas, entre otras magnitudes, en una diferencia de potencial o una variación de intensidad. Es decir, realizan una conversión de energías y suministran información sobre el estado y tamaño de la magnitud.

Los sensores de medición de gas se clasifican de acuerdo con sus principios operativos, siendo los más comunes los sensores electrocatalíticos, de estado sólidos, electroquímicos, potenciométricos, infrarrojos no dispersivo (NDIR), amperométricos, térmicos, conductométricos y ópticos (Liu, Cheng, Liu, Hu, Zhang, Ning, 2012).

Los sensores empleados en el prototipo fueron los electroquímicos, estos sensores tienen un electrodo sensor (cátodo) y un contra electrodo (ánodo) separados por una delgada capa de electrolito. El gas que entra en contacto con el sensor reacciona sobre la superficie del electrodo sensor generando una reacción de oxidación o reducción. Los materiales del electrodo, específicamente desarrollados para el gas de interés, catalizan estas reacciones.

### Metodología del proyecto

Para el desarrollo del proyecto se siguió un modelo basado en la construcción de prototipos, modelo cíclico representado por las siguientes etapas: análisis-diseño del prototipo, construcción-revisión de las partes del prototipo, pruebas, evaluación-retroalimentación de los resultados obtenidos. Todas estas etapas se realizaron en conjunto para alcanzar el objetivo de desarrollar un prototipo de una unidad móvil de monitoreo aérea de contaminantes criterio.

El prototipo está compuesto por los elementos mostrados en el diagrama a bloques de la Figura 3, en el diagrama, la unidad de monitoreo móvil está compuesta en dos módulos principales, la plataforma VANT y la unidad de monitoreo de calidad del aire.



**Figura 3** Diagrama de bloques de los componentes del prototipo

Fuente: Elaboración propia

La plataforma VANT está compuesto por la aviónica, es decir toda la electrónica necesaria para que este vuele. Por otra parte la unidad de monitoreo de calidad del aire está constituida por dos partes, la primera que es el sistema de adquisición de los datos a través de los sensores de medición de gases contaminantes, las tarjetas de acondicionamiento de señal y las tarjetas de procesamiento de los datos, sumado a esto se encuentra la segunda parte que es el sistema de transmisión de datos inalámbrico a una estación de tierra, necesario para poder ver el comportamiento en tiempo real de los sensores con respecto a las concentraciones a las que estarán expuestos.

### Material y equipo usado para el proyecto

Se seleccionaron los sensores electrocatalíticos comercialmente conocidos como MQ. Estos sensores varían su resistencia cuando se exponen a determinados gases, se seleccionaron los que podían medir contaminantes criterio los cuales fueron: el sensor MQ-7 monóxido de carbono, MQ-8 Hidrogeno, MQ-131 Ozono y MQ-135 Dióxido de carbono.

Para la selección del sistema de adquisición de datos de los sensores seleccionados se tomaron las recomendaciones del fabricante, tomando como sistema embebido la placa Arduino mega 2560, soporta las librerías para la programación del procesamiento de las señales obtenidas por sensores.

Para el sistema de transmisión de datos se utilizó una comunicación inalámbrica compatible con la plataforma, XBee Shield para Arduino.

La plataforma para el VANT fue un hexacoptero modelo Tarot S550, mostrado en la Figura 4.



**Figura 4** Plataforma VANT tipo hexacoptero modelo Tarot S550 con autopiloto Pixhawk con interfaz de comunicación diseñada

Fuente: Elaboración propia

### Especificaciones técnicas del prototipo desarrollado

A continuación se da información técnica relacionada para el diseño del prototipo desarrollado.

Parámetro	Especificación
Peso	1861 gr.
Tamaño	550 mm
Velocidad máxima	5 m/s
Empuje máximo de motores	6 motores x 850 grs = 5100 gr.
Empuje mínimo requerido por motor para mantener la aeronave en el aire	620 gr.
Tiempo de vuelo con empuje máximo	3.57 min.
Batería tipo Lipo	5000 mAh V= 11.1 volts Tasa de descarga= 30 C
Consumo de corriente por motor	14A máx.
Numero de motores	6
Consumo total de corriente	84A
Distancia máxima que el prototipo puede alcanzar	432.3 metros

**Tabla 1** Especificaciones técnicas del prototipo desarrollado

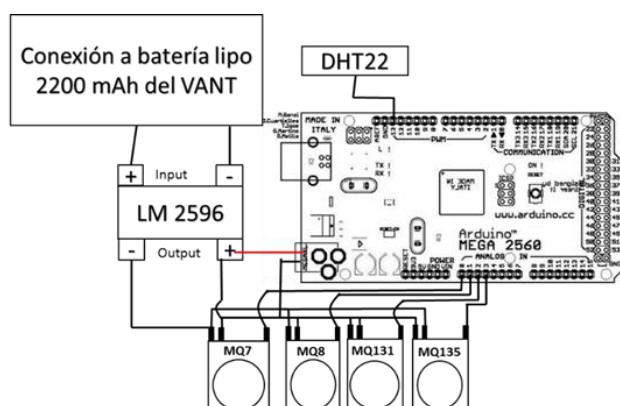
Fuente: Elaboración propia



## Resultados

### Unidad de monitoreo

El ensamble de los componentes electrónicos para la unidad de monitoreo, se realizó por separado para facilitar pruebas de conexión, en la figura 5 se muestra un diagrama de conexión de los componentes.



**Figura 5** Diagrama de conexión de componentes electrónicos que forman la unidad de monitoreo montada en la plataforma VANT

Fuente: Elaboración propia

La unidad consta de los sensores y la tarjeta Arduino, fuente de alimentación, un convertidor de voltaje regulado a partir de una fuente de alimentación para el uso de microcontroladores o Arduinos. es una fuente de alimentación conmutada

### Estructura soporte para la unidad de monitoreo

En la figura 6 se marca con el numero uno el lugar donde van ubicados los sensores, con el número dos donde va ubicada la antena GPS que utiliza el autopiloto, esta ubicación le da mayor fijación a la plataforma, sufre de menos vibración durante el vuelo y menor obstrucción por ruido electrónico de los demás componentes que están sobre la plataforma, esto nos da una mayor precisión de ubicación del VANT.

Con el número tres está marcado el lugar donde esta sujeta la tarjeta Arduino junto al módulo y antenas XBee, esta va dentro de la estructura para protegerla de posibles golpes durante el vuelo y cerca de los sensores para hacer sencilla la conexión entre estos y la tarjeta. En número cuatro muestran los soportes para sujetarlos en el VANT



**Figura 6** Diseño de estructura para soporte de unidad

Fuente: Elaboración propia

### Prototipo desarrollado

El prototipo de la unidad de monitoreo propuesta se muestra en la figura 7, marcado con el número uno se muestra el tren de aterrizaje, con el numero dos se señala la estructura soporte que sostiene los componentes de la unidad de monitoreo unidos a la plataforma y marcado con el número tres se señala el centro de la plataforma del VANT Tarot S550.



**Figura 7** Diseño en software CAD de unidad de monitoreo en VANT

Fuente: Elaboración propia



**Figura 8** Diseño físico del prototipo unidad de monitoreo ambiental mediante un VANT

Fuente: Elaboración propia

## Pruebas desarrolladas con el prototipo

En la experimentación con el prototipo con carga útil de 700 gr se obtuvieron en promedio un tiempo de 7 min de vuelo. Tiempo necesario para realizar recorridos de hasta 800 metros lineales en condiciones óptimas y una altura de 100 metros para que los sensores realicen hasta 30 tomas.

Se estableció exitosamente la conexión VANT-GCS (estación de tierra) en los que se recibieron los datos del estado del VANT y los sensores de prueba. A continuación se muestran las tomas realizadas con el prototipo y los sensores.

Humedad	Temp.	CO	H	O3	CO <sub>2</sub>	Fecha	Hora
0	0	0	0	0	0	27/08/18	12:56
43	20	4	227	2	1	27/08/18	12:56
47	20	4	266	2	1	27/08/18	12:56
47	24	4	271	2	1	27/08/18	13:01
48	24	4	271	2	1	27/08/18	13:01
51	28	4	271	2	1	27/08/18	13:01
0	0	0	0	0	0	27/08/18	13:06
0	0	0	0	0	0	27/08/18	13:06
0	0	0	0	0	0	27/08/18	13:06
47	24	4	271	3	1	27/08/18	13:11
49	24	4	271	3	1	27/08/18	13:11
49	23	4	271	3	1	27/08/18	13:11
49	24	4	271	2	1	27/08/18	13:16
49	24	4	271	2	1	27/08/18	13:16
49	24	4	271	2	1	27/08/18	13:16

**Tabla 2** Datos transmitidos del prototipo desarrollado y almacenados en tabla

Fuente: *Elaboración propia*

Se tomó como referencia un tiempo de 5 segundos por cada muestra tomada, a una velocidad máxima de desplazamiento de 4 metros por segundo, para alcanzar una altura de 30 metros y tomar una muestra de calidad del aire. Se puede observar como cada sensor alcanza su estabilidad de acuerdo a su parámetro de medición especificada por el fabricante.

## Conclusiones

La plataforma tipo hexacoptero modelo Tarot S550 se comportó de manera estable durante las pruebas de vuelo. El prototipo final llegó a tener un peso de 1861 gramos, las diferentes implementaciones integradas a la plataforma original tienen un peso de 561.6 gramos valor que está dentro del margen de estabilidad teórico para el vuelo de esta plataforma. El tren de aterrizaje del prototipo que se diseñó para el VANT fue exitoso en superficies de terrenos irregulares.

La implementación de una batería dedicada especialmente a la unidad de monitoreo solucionó el problema de la descarga excesiva que los sensores demandaban a la batería principal que utiliza la plataforma VANT para el vuelo.

En las pruebas de medición con los sensores, se observó que no se obtuvieron cambios significativos a través de la medición en el perfil vertical (altura), la variación de la medición en el caso del sensor MQ7 es muy drástica, existe inestabilidad en la medición del sensor, el rango de detección y exactitud solo se logró saber que existe presencia de algún componente en baja, media y alta concentra de acuerdo al rango de detección del sensor.

Los sensores MQ no cuentan con algún método de calibración normalizado o certificación de algún proceso o procedimiento que prueben sus mediciones, por lo que se concluye realizar un análisis de sensores que cumplan con criterios de certificados bajo un laboratorio que valide su funcionamiento.

## Agradecimiento

Se agradece al Programa de Desarrollo Profesional Docente (PRODEP), al Tecnológico Nacional de México y al Instituto Tecnológico de Nuevo León por el valioso apoyo brindado para la realización de este proyecto.

## Referencias

- Abarca, M. S. (2013). qAIRa: Drones para monitoreo la calidad del medio ambiente. Peru: Congreso Internacional de dirección de proyectos.
- Argullin, Gerardo. (2016). Taller gestión de la calidad del aire, modelos ambientales. Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. Monterrey, México. .
- Chih-Chung Chang, J.-L. W.-Y.-C.-R. (2016). Development of a multicopter-carried whole air sampling apparatus and its applications in environmental studies. ELSEVIER, 484-492.
- Ezcurra, A., Díaz L. (2015). Aplicaciones el control de la calidad del aire, Los drones y sus aplicaciones en la ingeniería civil, Madrid, pp. 59-65.
- HERNÁNDEZ-VEGA, José Isidro, PALOMARES-GORHAM, Dolores Gabriela, REYES-VARELA, Elda y HERNÁNDEZ-SANTOS, Carlos. Unidad de monitoreo ambiental mediante un Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT) para contaminantes criterio en perfiles verticales. Revista de Aplicaciones de la Ingeniería. 2018

INECC y Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental. (2013). Informe nacional de la calidad del aire 2013, México.

Liu, X., Cheng, S., Liu, H., Hu, S., Zhang, D., & Ning, H. (2012). A survey on gas sensing technology. *Sensors*, 12(7), 9635-9665.

National Instruments Corporation. (2015). Complete Guide to Building a Measurement System. Sitio web: Consultada el 27 de mayo de 2018, de: [http://download.ni.com/evaluation/daq/Measurement\\_System\\_Build\\_Guide.pdf](http://download.ni.com/evaluation/daq/Measurement_System_Build_Guide.pdf)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. Consultada el 4 de junio de 2018, de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>

Yun Cheng, X. L. (2013). An Autonomous Aerial System for Air-Quality Surveillance and Alarm. Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '13., (pp. 491-492). New York, NY,.