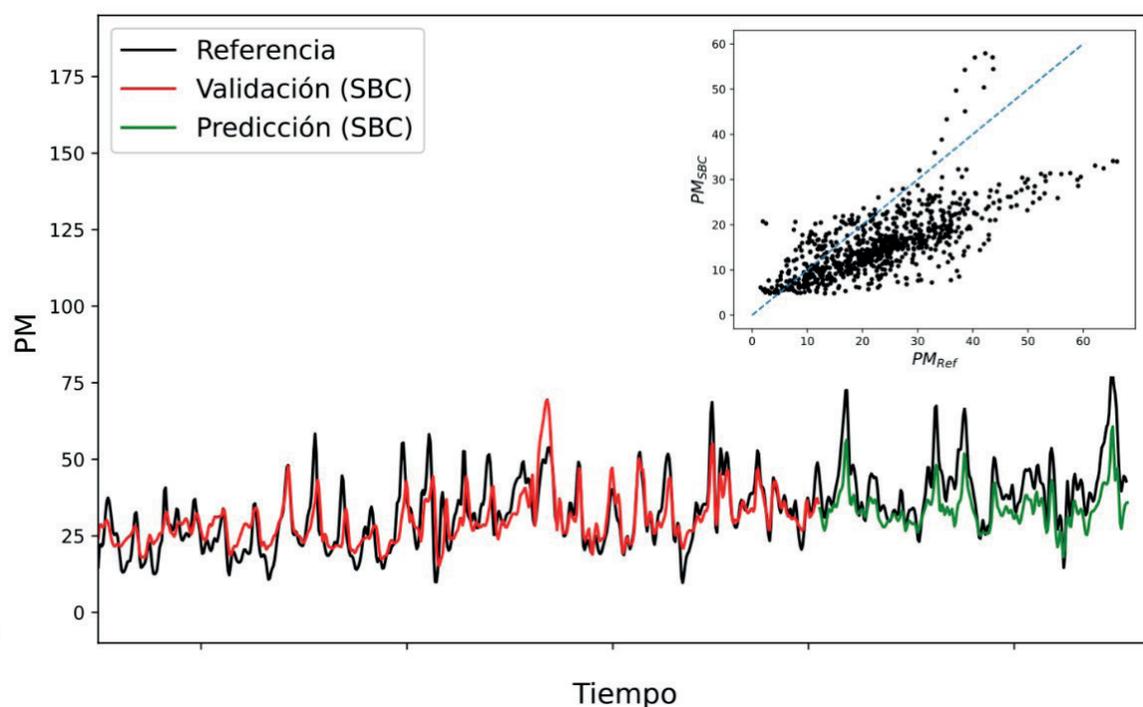


¿La inteligencia artificial puede contribuir a mejorar la calidad del aire?

Sensor de Referencia



Sensor de Bajo Costo (SBC)



Fidel Montoya Molina
J. Antonio Moreo-Razo
Departamento de Física,
Universidad Autónoma Metropolitana,
Marco A. Mora-Ramírez
Facultad de Ciencias Químicas,
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla



Resumen

Actualmente, existen diversas áreas donde se emplea la inteligencia artificial (IA). En este trabajo se revisan algunas de las aplicaciones más populares de la IA con el objetivo de reflexionar sobre su impacto actual en la sociedad. Posteriormente se presentan algunos acontecimientos históricos que dieron pie al surgimiento de la IA y también se muestra en general la estructura de los algoritmos que la IA emplea. Por último, se describe el empleo de algunos algoritmos que son utilizados en la calibración de sensores de bajo costo (SBC), los cuales nos permiten medir contaminantes atmosféricos con excelente precisión. Este trabajo está orientado a robustecer el sistema de monitoreo de la calidad del aire en México.

Palabras clave: Pronóstico meteorológico, contaminación atmosférica, sensores de bajo costo, inteligencia artificial

Abstract

Currently, there are several areas where artificial intelligence (AI) is used. This paper reviews some of the most popular applications of AI in order to reflect on its current impact on society. Subsequently, some historical events that gave rise to the emergence of AI are presented and the structure of the algorithms that AI employs is also shown in general. Finally, we describe the use of some algorithms that are used in the calibration of low-cost sensors (SBC), which allow us to measure atmospheric pollutants with excellent accuracy. This work is oriented to strengthen the air quality monitoring system in Mexico.

Keywords: Weather forecast, air pollution, low-cost sensors, artificial intelligence

La IA hoy en día.

Los teléfonos, bocinas, relojes inteligentes o incluso los chats de servicios al cliente son ejemplos de dispositivos y aplicaciones que emplean IA para realizar algunas de sus funciones. Así mismo, existen otras aplicaciones que permiten la redacción de ensayos, generación de imágenes, entre otras. El generador de imágenes de *Microsoft Designer*, (<https://designer.microsoft.com/>) crea fotografías o diseños artísticos nuevos a partir de palabras clave que provee un usuario. Por ejemplo, si se introducen las palabras clave “PM2.5, tecnología, aire”, se genera la imagen mostrada en la Figura 1(a). Si se refina esta entrada, agregando la palabra “peatón, exposición y México” se obtiene la imagen mostrada en la Figura 1(b).

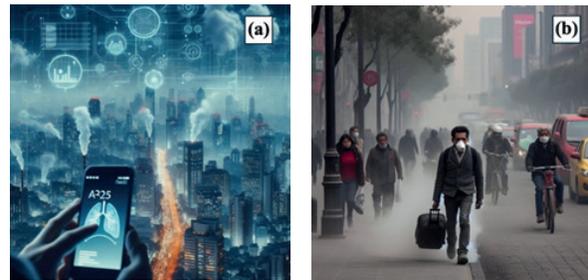


Figura 1. Ejemplos de imágenes generadas con IA (*Microsoft Designer*), 19 de mayo de 2024, 10:41 a.m.

Chat GPT, (<https://chatgpt.com/>) es otra de las aplicaciones actuales más populares donde el usuario proporciona una frase o un conjunto de palabras en forma de instrucción o pregunta (conocido como *prompt*) y la aplicación genera una respuesta. Existen diversas versiones de esta aplicación como Chat GPT-3 que es la versión gratuita con funcionalidades limitadas, en cambio, Chat GPT-4 es la versión no-gratuita con funcionalidades ilimitadas capaz de generar imágenes, código y gráficos. La versión más recién-

te es Chat GPT-4o (donde se agrega la “o” por “ovni”) y permite al usuario interactuar con la aplicación a través de vídeo en tiempo real. Recientemente se han agregado funciones que se asemejan a una interacción entre humanos, como *el enseñar* a un niño de primaria a resolver problemas de matemáticas, emulando de cierta forma la actividad que realizaría un profesor con su alumno. O incluso se pueden obtener recomendaciones sobre la vestimenta del usuario, donde se simula una recomendación que una persona le haría a otra durante una video-llamada.

Por otro lado, Chat GPT también se utiliza de manera recurrente por alumnos para obtener una orientación respecto a ciertas tareas. Por ejemplo, si se desea resolver la ecuación $x^2 + 2 = 0$, se escribe el *prompt*:

Resolver $x^2 + 2 = 0$

y arroja la siguiente información:

Para resolver la ecuación $x^2 + 2 = 0$, primero restamos 2 a ambos lados de la ecuación:

$$x^2 = -2$$

Luego, tomamos la raíz cuadrada de ambos lados de la ecuación. Recuerda que al hacer esto, debemos considerar tanto la raíz positiva como la raíz negativa:

$$x = \pm\sqrt{-2}$$

Recordemos que $\sqrt{-1} = i$, por lo tanto:

$$\sqrt{-2} = \sqrt{2} \cdot i$$

Entonces, la solución a la ecuación original $x^2 + 2 = 0$ son dos números complejos conjugados:

$$x = \pm\sqrt{2}i$$

Por lo tanto, las soluciones son $x = \sqrt{2}i$ y $x = -\sqrt{2}i$.

En cualquiera de las versiones de Chat GPT de hoy en día, introduciendo la frase: “*Exposición personal de peatones a material particulado (PM) y uso de sensores de bajo costo*”, la aplicación despliega una serie de párrafos entorno a ese tema, como se muestra a continuación:

La exposición personal de peatones al material particulado (PM) y el uso de sensores de bajo costo son áreas emergentes de investigación y preocupación en salud ambiental. Aquí te doy una estructura para una exposición personal y cómo los sensores pueden ayudar:

Exposición Personal a Material Particulado

1. Fuentes de Material Particulado:

- **Ambientales:** Emisiones de vehículos, industrias, construcción.
- **Domésticas:** Quemado de biomasa, cocinas a leña, cigarrillos.

2. Factores que Afectan la Exposición:

- **Ubicación:** Áreas urbanas vs. rurales, cerca de carreteras o fuentes industriales.
- **Actividades:** Caminar, correr, ciclismo, estar al aire libre.
- **Condiciones Climáticas:** Viento, lluvia, estacionalidad.

3. Impactos en la Salud:

- **Respiratorios:** Asma, irritación pulmonar, enfermedades respiratorias crónicas.
- **Cardiovasculares:** Incremento del riesgo de enfermedades cardiovasculares.
- **Otros:** Efectos en la piel, efectos sistémicos debido a la absorción de toxinas.

Sensores de Bajo Costo para Monitoreo Personal

1. Funcionamiento de los Sensores:

No compartas información confidencial. Los chats se pueden revisar y utilizar para entrenar a nuestros modelos. [Obtener más información](#)

Hasta el momento, estos son ejemplos destacados de la aplicación de la IA en actividades recreativas, artísticas y educativas. La Tabla 1 ofrece un resumen detallado de los diversos campos en los que se emplea la IA, demostrando su presencia en una amplia gama de áreas.

Por otra parte, la ejecución de este tipo de aplicaciones amigables para el usuario, implica el desarrollo y uso de código, funciones, bases de datos, y software donde generalmente el usuario final no está involucrado. Esto implica un trabajo considerable de empresas, ingenieros y profesionales en distintas áreas. La Figura 2, muestra un resumen gráfico donde se agrupan las principales compañías del mundo que implementan IA en diversos rubros como lo son temas de ingeniería, seguridad de datos, industria, manufactura, comercio digital, operaciones financieras, entre otras. En el caso de Estados Unidos, un desarrollador de software para IA cuenta con un salario base promedio de \$123,775 dólares por año, un ingeniero en aprendizaje automático promedia un

Tema	Uso
Compras en línea	Promueve el comercio digital, mediante: chats, asistentes virtuales, entre otros.
Vehículos autónomos	Mejorar el nivel de seguridad y tecnología de los autos que se conducen solos.
Reconocimiento facial	Evaluar los puntos y métricas del rostro de una persona para confirmar su identidad.
Contratación y empleo	Las compañías, especialmente las que reciben una cantidad importante de solicitudes de empleo, pueden usar software basado en IA para hacer la contratación más eficiente. La IA puede escanear las solicitudes para determinar si estas califican para el puesto.
Videojuegos	Las compañías de videojuegos usan la IA para crear juegos más realistas y emocionantes. Durante el proceso de creación y puesta a punto de los videojuegos se usa la IA para predecir el comportamiento de los jugadores durante el juego, de esta manera se pueden diseñar los juegos de forma que no representen un reto para el jugador.
Redes sociales	Colectan datos sobre los usuarios, como la actividad en la plataforma o patrones de consumo con lo cual mejoran sus experiencias de navegación y también enganchan al consumo de algunos productos.
Robótica	Permite a las máquinas operar sin la intervención del humano y aprender de errores, mejorando la producción por ejemplo en fabricas dedicadas al ensamble de autos.

Tabla 1. Lista de los temas donde actualmente se usa y desarrolla la IA.

salario alrededor de \$161,590 dólares y los ingenieros en IA contratados en empresas grandes (OpenAI) llegan a obtener hasta \$925,000 dólares al año (<https://www.akkio.com/post/cost-of-ai>).

Aunado a esto, cabe subrayar que, recientemente (17/05/2024) un grupo de senadores

de Estados Unidos presento un plan para investigar y regular la IA con un costo propuesto de \$32,000 millones de dólares (Moreno, 2024), debido a problemáticas relacionadas con el tema de los derechos de autor, de cuestiones éticas, del manejo de los datos personales y seguridad nacional, entre otras muchas aristas asociadas con usos de IA.



Figura 2. Empresas que utilizan y desarrollan la IA en diversas tareas y áreas (ICCSI, 2024).

Hasta este punto podemos figurar un panorama de la cantidad de recursos económicos y de infraestructura relacionada con IA, el número de usuarios de esta tecnología en el mundo y las aplicaciones diversas que involucran una cantidad sobresaliente de empresas dedicadas al desarrollo y operación de esta tecnología. Entonces, debería ser una razón de peso y suficiente para motivar el interés del lector sobre los orígenes de esta tecnología, conocer si existe una definición de la IA y revisar algunos conceptos entorno a la IA para entender cómo funciona esta *inteligencia*.

Inicios de la IA

El primer caso sobresaliente de IA es la máquina de Alan Turing construida en 1936 para reproducir el algoritmo de acción de los ejércitos enemigos, durante la

segunda guerra mundial, para descifrar códigos de guerra encriptados (Hodges, 2009), el objetivo era crear una máquina que pudiera aprender de la experiencia modificando sus propios algoritmos. En 1948, Turing escribió un reporte titulado *Intelligent Machinery*, donde introdujo muchos de los conceptos centrales utilizados hoy en día sobre IA y se argumentaba que “*la inteligencia al nivel humano podría ser evidenciada por una computadora adecuadamente programada*” (Turing, 1948).

Años posteriores, en 1952 se creó un software capaz de aprender a jugar ajedrez. Después, en 1956 John McCarty, acuñó el término inteligencia artificial durante una conferencia en Dartmouth, Estados Unidos, ver Figura 3. Es curioso, que en esa conferencia se hicieron algunos pro-

nósticos de cosas que podrían suceder en la década siguiente, sin embargo, al no cumplirse estos pronósticos, el tema de la IA se abandonó casi por completo durante los siguientes 10 años. En 1971, John McCarty recibió el Premio Turing por sus contribuciones al tema; donde consideró el uso de redes neuronales en las computadoras basándose en el funcionamiento de una neurona biológica. En 1957 Frank Rosenblatt, siguiendo las ideas de McCarty introduce el perceptrón, configuración de las redes neuronales más sencillas, la unidad básica o neurona artificial.



Figura 3. Participantes de la conferencia de Dartmouth en Estados Unidos, incluyendo a Marvin Minsky (al centro), Claude Shannon (primero por la derecha) y Ray Solomonoff (tercero por la izquierda).

Fuente: Cortesía de la familia Minsky.

Estructura general de los algoritmos de IA

En IA, la estructura más sencilla se define como *perceptrón* que es una neurona artificial que pertenece y es la unidad fundamental para la construcción de una red neuronal, parecido a lo que ocurre el cerebro humano y sus neuronas. El objetivo de un *perceptrón* es reproducir y generar información a partir de datos conocidos.

Esto es similar a lo que una neurona biológica hace. Una neurona recibe señales a través de sus dendritas, procesa esta información y envía una señal eléctrica (potencial de acción) a través del axón hacia otras neuronas. De manera similar una neurona artificial (*perceptrón*) recibe entradas (*inputs*), las pondera con ciertos pesos, suma estas entradas y pasa el resultado a través de una *función de activación* para producir una salida (*output*) como se ve en la Figura 4. Las *funciones de activación* dependen del problema que se desea resolver, estas pueden ser lineales, logísticas, sigmoides, entre otras. La forma más simple de un algoritmo de aprendizaje automático o *Machine Learning* (ML) proviene de emplear una función de activación lineal (una regresión lineal) junto con otras técnicas de optimización y regularización. Por lo tanto, se encuentran funciones matemáticas que puedan modelar y predecir el comportamiento de los datos que se brindan.

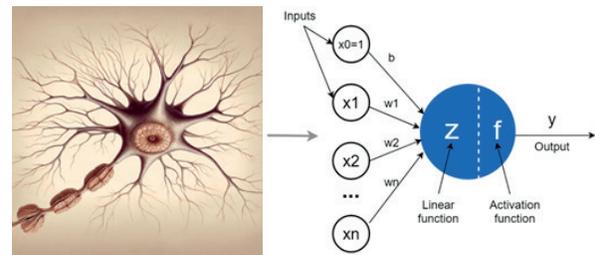


Figura 4. Izquierda: Comparación entre una neurona biológica (imagen generada con Chat-GPT4o). Derecha: Un perceptrón.

Entonces, cuando hacemos uso de ML, el *perceptrón* calcula combinaciones lineales de las entradas (x_1, x_2, \dots, x_n) para producir una salida (y) que se compara con algunos datos de referencia. Si la salida (y) no es adecuada, entonces se vuelven a asignar pesos (w_1, w_2, \dots, w_n) hasta lograr que la salida (y) concuerde con los da-

tos de referencia. En general estos son los pasos a seguir (entrenamiento):

1. Inicializar el vector de pesos (w_1, w_2, \dots, w_n) con valores aleatorios.
2. De manera iterativa aplicar el perceptrón a cada conjunto de datos.
3. Modificar el vector de pesos cuando no satisfaga los requerimientos.
4. Continuar el proceso hasta que los datos de entrada y los pesos logren generar salidas confiables.

Una neurona artificial puede entrenarse con ciertos procesos para dar resultados con precisión o incluso se pueden usar diversas neuronas, formando así una red neuronal que analiza la información de entrada que puede aprender y generalizar a una mayor escala. A esto último, en conjunto con otros procesos para mejorar la red se le conoce como aprendizaje profundo o *Deep Learning* (DL). DL se utiliza por ejemplo, en la identificación o clasificación de imágenes y el procesamiento de lenguaje natural. Para ahondar en este tema el lector interesado puede consultar el sitio de *Tensorflow* y manipular una red neuronal con fines educativos (<https://playground.tensorflow.org>).

El resultado que genera una o varias neuronas artificiales se le define como modelo entrenado, pero dicho modelo debe cumplir con la condición de ser *parsimonioso*, es decir, que dicho modelo sea simple y preciso. Para lograrlo se utilizan diversos métodos de regularización por ejemplo la técnica LASSO, Ridge Regression entre otras, y en optimización la validación cruzada (Cross Validation) o

el frente de Pareto. Estos métodos lo que realizan es una evaluación de los modelos obtenidos y los van perfeccionando. El desarrollo de los modelos entrenados se basa en algoritmos que involucran conceptos de álgebra lineal, cálculo diferencial (vectorial), y estadística. Para poder aplicar estos conceptos se requieren programas, librerías y paquetes computacionales, entre ellos los más recurrentes son: NumPy, Matplotlib, Pandas, PyTorch, TensorFlow, que ayudan sustancialmente a realizar diversos cálculos y simplificar tareas, así como la visualización de los resultados.

Uso de la IA para medir concentraciones de PM

En las principales ciudades del mundo los gobiernos emplean estaciones de monitoreo para medir las concentraciones de PM en el ambiente y prevenir la exposición de la población a este contaminante. Se estima que en el mundo ocurren alrededor de 7 millones de muertes prematuras por exposición a PM (Wu et al., 2022). Sin embargo, las estaciones de monitoreo son generalmente insuficientes y no necesariamente reflejan el riesgo de exposición a PM de los peatones. En este contexto la tecnología emergente brinda la posibilidad de usar SBC para determinar las concentraciones de PM. Actualmente muchas ciudades en el mundo, todas ellas con problemas de contaminación del aire, están optando por utilizar SBC para medir PM y robustecer sus sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Existe una gran variedad de SBC para monitorear la calidad del aire, dado que son bastante portables y con una alta eficiencia energética y por lo tanto representan una oportunidad invaluable para formar redes de monitoreo. Sin embargo, el proceso de medición con estos sensores y también el

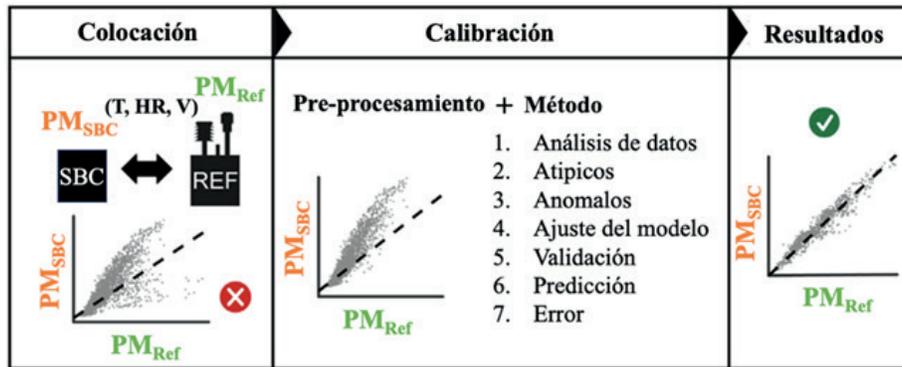


Figura 5. Etapas de calibración de los SBC con algoritmos de IA basados en regresión multivariable y Random Forest (Aix, 2023).

análisis de datos es complejo y propenso a errores. Al ser una tecnología emergente, los SBC no cumplen con los requisitos de precisión que requiere el monitoreo regulatorio, o de referencia, que realizan los sitios de monitoreo convencionales, y estarían entonces limitados a proporcionar mediciones informativas. Es aquí donde los algoritmos de IA son utilizados para obtener modelos matemáticos que permitan calibrar de forma precisa a los sensores de bajo costo en función de datos recolectados por sensores de referencia que incluyen temperatura, humedad y las concentraciones de PM.

La Figura 5 muestra de forma esquemática el proceso que se infiere en nuestro grupo de investigación para calibrar los SBC. En la primera etapa, se colocan SBC junto a los sensores de referencia en los sitios de monitoreo oficiales del gobierno para coleccionar datos de concentraciones de PM_{2.5}, temperatura, humedad, intensidad y dirección del viento. Se construyen gráficos de correlación de PM_{2.5} entre los SBC y los de referencia. La segunda etapa consiste realizar una calibración de los SBC usando en primera instancia una neurona artificial junto con algoritmos de regresión y empleado un método de siete pasos, que incluyen: el análisis de los datos, remover datos atípicos, ajustar

el modelo, la validación del modelo, obtener predicciones y el error con el fin de minimizar este último y lograr mejorar la correlación entre las mediciones de los SBC y las correspondientes de referencia.

Siguiendo esta metodología, mostramos los resultados obtenidos de nuestro análisis utilizando IA. Se colocaron SBC (de elaboración propia) junto a la estación de monitoreo LAA de la Red de Monitoreo Automático de la calidad del aire de la Ciudad de México durante el periodo comprendido entre el 4 de marzo de 2024 y el 10 de mayo de 2024. La Figura 6 muestra los datos de concentraciones de PM de tamaño menor a dos micrómetros (PM_{2.5}) coleccionados en la estación de monitoreo LAA que serán denominados de *referencia* y los datos de concentración PM_{2.5} obtenidos con el SBC. Los datos del SBC subestiman hasta en un 40% a los datos de concentraciones horarias de PM_{2.5} del sitio de referencia, pero las tendencias de los datos del SBC son similares a las del sensor de referencia.

Continuando con el proceso de calibración de los datos del SBC, se señala que la serie de tiempo de las concentraciones de PM_{2.5} presenta muchos picos, lo que dificulta el uso de algoritmos de calibración. Por esta

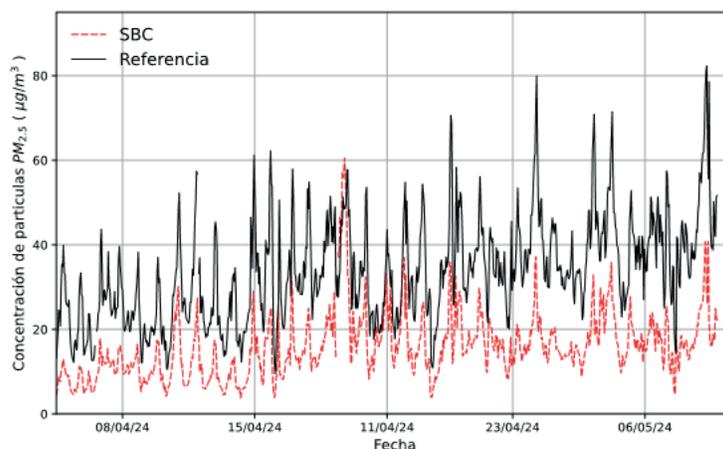


Figura 6. Concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$) del sitio de referencia LAA y del sensor de bajo costo (SBC) en el periodo del 4 de marzo al 10 de mayo de 2024.

razón, todas las series temporales se *sua-*
vizan, promediando a distintos intervalos
de horas (1h, 2h, 4h, 6h, 8h, etc.) para pos-
teriormente realizar una interpolación de
los datos promediados y así producir una
serie temporal continua, que se utiliza
para realizar la calibración de los senso-
res. Analizando la correlación de los datos
con el sensor de referencia, algunos datos
del SBC se pueden eliminar, bajo un um-
bral en el nivel de concentraciones de par-
tículas, debido a que estos corresponden

a variaciones drásticas en el ambiente o
sensibilidad del sensor, lo cual no repre-
senta un cambio significativo en la serie
temporal. Este enfoque permite una re-
presentación más manejable y precisa de
las variaciones ambientales a lo largo del
tiempo, facilitando análisis y modelos más
robustos para la calibración. La Figura 7
muestra las concentraciones de $PM_{2.5}$ del
sensor de referencia (negro) junto con los
datos calibrados del SBC (rojo) siguiendo
el proceso de la Figura 5.

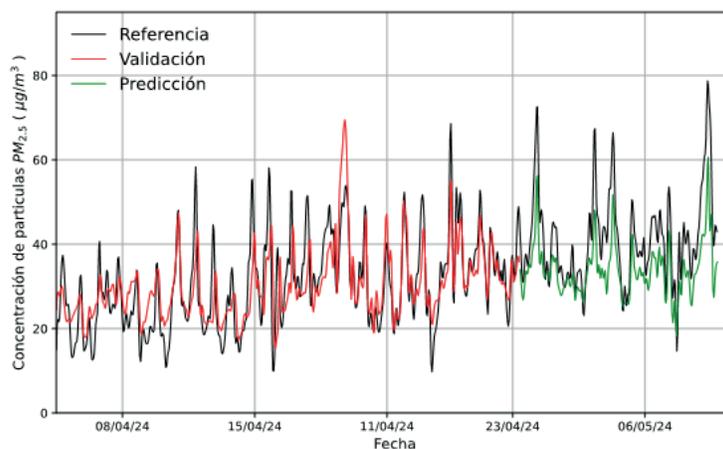


Figura 7. Concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g m}^{-3}$), promediadas cada 2 horas, del sitio de referencia LAA y del sensor de bajo costo calibrado mediante algoritmos de ML en el periodo del 4 de marzo al 10 de mayo de 2024.

En el periodo del 4 al 23 de abril los datos calibrados se ajustan bastante bien al comportamiento respecto al sensor de referencia. En el segundo periodo del 23 de abril al 10 de mayo empiezan a existir diferencias entre el SBC calibrado y el sensor de referencia. Es importante notar que esta es una primera prueba, bastante prometedora. Posteriormente se busca optimizar la calibración usando una red neuronal más amplia utilizando más datos recolectados de contaminantes y factores meteorológicos, investigando también la relevancia que tenga cada uno de ellos en nuestras funciones de calibración.

Conclusiones y perspectivas de trabajo

Las aplicaciones de IA que dominan en el mercado global se emplean generalmente para el entretenimiento, uso comercial. En este documento se intenta motivar al lector respecto al funcionamiento de los algoritmos de IA y cómo funciona esta “inteligencia artificial”. Se presentaron resultados preliminares sobre la calibración de SBC para medir la calidad del aire por partículas finas ($PM_{2.5}$). En este contexto nos complace comunicar que en el Departamento de Física de la UAM-I en conjunto con colegas de Cuerpo Académico “De Investigación en Biodiversidad Alimentación y Cambio Climático” del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla estamos trabajando de manera que en un futuro cercano podamos contribuir a robustecer los sistemas de monitoreo de la calidad del aire en México, especialmente en la CDMX y Puebla. Se desarrolla una línea de investigación que se enfoca en mejorar la precisión de los SBC, respecto a otras propuestas presentadas en la literatura para calibrar SBC, haciendo

uso de otros algoritmos de ML para encontrar modelos robustos y así contribuir al mejoramiento de las mediciones de la calidad del aire. Con base en los resultados preliminares de calibración de SBC requerimos de datos horarios de concentraciones de PM por al menos 12 días, para poder calibrar los SBC por casi un mes. El uso de datos de referencia solo es necesario cuando se usa por primera vez un SBC, ya que se implementan programas computacionales y técnicas de inteligencia artificial que, en automático, con los datos que se van recolectando realizan una calibración sin estar sujeto tener un sensor de referencia.

Agradecimientos

Agradecemos a la Dra. Olivia Rivera Hernández a cargo de la Dirección de Monitoreo de Calidad del Aire Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA), y al Mtro. Miguel Sánchez Rodríguez responsable del Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) por permitirnos instalar los SBC en el LAA.

Bibliografía

- Aix, M. L., Schmitz, S., & Bicout, D. J. (2023). Calibration methodology of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter. *Science of The Total Environment*, 889, 164063.
- Guo, W., Gao, G., Dai, J., & Sun, Q. (2022). Prediction of lung infection during palliative chemotherapy of lung cancer based on artificial neural network. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 1, pp. 4312117.
- Hodges, Andrew. Alan Turing and the Turing test. Springer Netherlands, 2009, pp.13-22.

ICCSI. (2024). Empresas que utilizan inteligencia artificial: Cómo están aprovechando esta tecnología. Recuperado el 24 de mayo de 2024, de <https://iccsi.com.ar/empresas-que-usen-inteligencia-artificial/?shared=false>

Moreno, K., 2024. El Senado de Estados Unidos busca invertir USD 32.000 millones anuales para investigar y regular la IA [WWW Document]. Infobae. URL <https://www.infobae.com/estados-unidos/2024/05/17/el-senado-de-estados-unidos-busca-inver->

[tir-usd-32000-millones-anuales-para-investigar-y-regular-la-ia/](#)

Turing, Alan. "Intelligent machinery (1948)." B. Jack Copeland, 2004, pp.395-432.

Wu, H., Zhang, B., Wei, J., Lu, Z., Zhao, M., Liu, W., Bovet, P., Guo, X., Xi, B.,(2022), Short-term effects of exposure to ambient PM1, PM2.5, and PM10 on ischemic and hemorrhagic stroke incidence in Shandong Province, China. *Environ. Res.* 212 (Pt C), p.113350.