

DESARROLLO/EVALUACIÓN DE MODELO PREDICTIVO PARA ESTIMAR CONCENTRACIÓN DE AEROSOL EN ATMOSFERAS DE ZONAS URBANAS

por

Rodriguez Nuñez Martin

Presentado ante la

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

para obtener el grado de

Doctor en Ciencias de la Ingeniería

de la

Universidad Nacional de Córdoba

Febrero 2023

Directora: Hebe Alejandra Carreras

Codirectora: Monica Balzarini



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0
Internacional.

Dedicacion dedicacion

Agradecimientos

Agradecimientos

Resumen

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que nueve de cada diez personas respira aire con altos niveles de contaminante y como resultado siete millones mueren cada año en el mundo por causas relacionadas (OMS, 2020). La contaminación atmosférica es considerada una de las fuentes de contaminación de mayor relevancia dado sus efectos sobre la salud, directamente vinculados con desórdenes respiratorios, cardiovasculares y circulatorios, de acuerdo a la Agencia Ambiental Europea (EEA, 2020) e informes de la OMS que evidencian los impactos de este tipo de contaminación (Organization et al., 2021). Uno de los contaminantes más preocupantes en atmósferas urbanas es el material particulado fino, objeto de estudio en esta tesis.

El objetivo principal de esta tesis fue desarrollar modelos predictivos para series temporales de concentración de material particulado fino en sitios con distinto uso de suelo ubicados dentro del área metropolitana de la provincia de Córdoba, Argentina. Sus principales aplicaciones recaen en la alerta temprana de la población ante eventos nocivos de calidad de aire, además de permitir comprender las interrelaciones existentes entre la variable respuesta y las predictoras.

Como consecuencia de que la provincia de Córdoba prescinde de un sistema de monitoreo de calidad de aire. En primera instancia fue necesario el diseño y desarrollo de un instrumento de medición que permitiese recopilar datos del contaminante. Dado a los elevados costes de los instrumentos necesarios para su medición, en esta tesis se incurrió en el estudio y desarrollo de sensores de bajo costo que lograsen recopilar la información necesaria. Además, para garantizar la integridad de las mediciones

realizadas, debió llevarse a cabo un estudio de la estabilidad entre sensores y otro de validación con respecto a una estación de referencia.

Por otra parte, se hizo necesaria la incorporación de variables predictoras que permitiesen explicar la variabilidad del contaminante en cuestión, motivo por el cual se recurrió a diversas fuentes de variables satelitales y meteorológicas. A partir de las mismas se llevó a cabo la descarga y análisis de la variabilidad conjunta de las mismas con respecto a la concentración de material particulado fino. También fue necesario un análisis de variabilidad espacio temporal del contaminante, que además de revelar sus patrones de variación, aporte información relevante a la hora de llevar a cabo el modelado predictivo. Estos estudios de variabilidad fueron posibles gracias a diferentes aplicaciones de técnicas de análisis propias de las series de tiempo, las cuales permitieron excluir los patrones temporales inherentes a las series para determinar las correlaciones existentes.

Finalmente, a partir del revelamiento y análisis de la información recopilada fue posible llevar a cabo el entrenamiento de algoritmos predictivos que permitiesen estimar con exactitud la concentración de material particulado fino. Cabe destacar que el modelado predictivo fue llevado a cabo condicionando por uso de suelo y a través de técnicas de aprendizaje automático y profundo.

Palabras claves: PM_{2.5}, series temporales, aprendizaje automático, aprendizaje profundo.

Preface

- **Capítulo 1:** introduce al lector en el concepto del **material particulado fino**, sus implicancias en la salud y la importancia de su estudio.
- **Capítulo 2:** expone el desarrollo y la validación de **sensores de bajo costo** con el objetivo de recopilar información sobre el material particulado fino.
- **Capítulo 3:** muestra el estudio de la **variabilidad espacio temporal** de la concentración de material particulado fino en sitios del área metropolitana de la provincia de Córdoba, Argentina. Además, se deriva un agrupamiento de uso de suelo a partir del patrón de emisión la concentración de material particulado fino emitida en los distintos sitios de muestreo.
- **Capítulo 4:** presenta el estudio de la variabilidad conjunta de la concentración de material particulado fino con respecto a **variables satelitales y meteorológicas** relevantes para explicar sus fluctuaciones.
- **Capítulo 5:** exhibe el procedimiento de ajuste y comparación de **modelos predictivos** para la concentración de material particulado fino en los distintos usos de suelo derivados del análisis de conglomerados.
- **Capítulo 6:** muestra las principales **conclusiones y trabajos futuros** producto de la presente tesis. Se destacan los diferentes aportes realizados al estado del arte, así como también las posibles líneas que se pueden continuar a partir de lo realizado a lo largo del doctorado.

Índice general

Capítulo 1: This is an example of a thesis setup to use the reed thesis document class	1
Capítulo 2: Introducción General	2
2.1. Introducción	2
2.2. Motivación	6
2.3. Desafíos metodológicos	7
2.3.1. Objetivo general	10
2.3.2. Objetivos específicos	10
Capítulo 3: Sensores de bajo costo	11
3.1. Introducción	12
3.2. Materiales y métodos	12
3.2.1. Desarrollo sensores	12
3.2.2. Base de datos	12
3.2.3. Protocolo estadístico	12
3.3. Resultados y discusión	12
3.3.1. Producto final	12
3.3.2. Consenso en las mediciones de los sensores de bajo costo . . .	12
3.3.3. Validación con respecto a la estación de referencia	12
3.4. Conclusión	12

Capítulo 4: Variación espacio temporal de la concentración de aerosoles 13

4.1. Introducción	15
4.2. Materiales y métodos	15
4.2.1. Área de estudio	15
4.2.2. Normativa	15
4.2.3. Base de datos	15
4.2.4. Preprocesamiento de datos	15
4.2.5. Protocolo estadístico	15
4.3. Resultados y discusión	15
4.3.1. Características temporales de la serie de $PM_{2.5}$	15
4.3.2. Análisis espacial de la concentración de $PM_{2.5}$	15
4.3.3. Análisis espacio temporal por uso de suelo	15
4.4. Conclusión	15
4.5. Introducción	15
4.6. Materiales y métodos	15
4.6.1. Base de datos	15
4.6.2. Protocolo estadístico	15
4.7. Resultados	15
4.7.1. Temperatura	15
4.7.2. Humedad relativa	15
4.7.3. Temperatura del punto de rocío	15
4.7.4. Precipitación	15
4.7.5. Velocidad del viento	15
4.7.6. Presión atmosférica	15
4.7.7. Radiación solar	15
4.7.8. Profundidad óptica de los aerosoles (AOD)	15
4.7.9. Altura de la capa límite atmosférica (PBLH)	15

4.7.10. Tráfico (Google Traffic)	15
4.7.11. Temperatura de la superficie terrestre (LST).	15
4.7.12. Rugosidad de la superficie terrestre	15
4.7.13. Integración vertical del flujo de ozono proveniente del norte . .	15
4.7.14. Tasa media de escorrentía subterránea	15
4.7.15. Integración vertical de temperatura	15
4.7.16. Presión atmosférica ajustada al nivel del mar	15
4.7.17. Disipación en la capa límite atmosférica	15
4.8. Discusión	15
4.9. Conclusión	15
4.10. Introducción	15
4.11. Materiales y métodos	15
4.11.1. Enfoque de trabajo	15
4.11.2. Base de datos	15
4.11.3. Protocolo estadístico	15
4.12. Resultados y discusión	15
4.12.1. Modelado urbano	15
4.12.2. Modelado industrial	15
4.12.3. Modelado agrícola/ área verde	15
4.12.4. Variación en el paradigma de modelado	15
4.13. Conclusión	15
Capítulo 5: Comentarios finales	16
5.1. Principales conclusiones	16
5.2. Trabajos futuros	18
Capítulo 6: Anexo	19
6.1. Primera sección: procedimiento de análisis de series temporales	21

6.1.1.	Temperatura	21
6.1.2.	Humedad relativa	21
6.1.3.	Temperatura del punto de rocío	21
6.1.4.	Precipitación convectiva	21
6.1.5.	Velocidad del viento	21
6.1.6.	Presión atmosférica	21
6.1.7.	Radiación solar	21
6.1.8.	Profundidad óptica de aerosoles	21
6.1.9.	Altura de la capa límite atmosférica	21
6.1.10.	Tráfico	21
6.1.11.	Temperatura de la superficie terrestre	21
6.1.12.	Rugosidad de la superficie terrestre	21
6.1.13.	Integración vertical flujo ozono norte	21
6.1.14.	Tasa media de escorrentía subterránea	21
6.1.15.	Integración vertical de temperatura	21
6.1.16.	Presión atmosférica al nivel del mar	21
6.1.17.	Disipación en la capa límite atmosférica	21
6.1.18.	Resumen relaciones	21
6.2.	Segunda sección: Listado de variables meteorológicas y satelitales involucradas	21
6.2.1.	Base de datos completa	21
6.2.2.	Base de datos reducida	21
6.2.3.	Descripción de cada una de las variables	21
Bibliografía		22

Capítulo 1

This is an example of a thesis setup
to use the reed thesis document
class

Placeholder

Important!

When compiling gitbook, comment following 4 lines to get references

Capítulo 2

Introducción General

2.1. Introducción

El crecimiento desmedido de la población y la ambición de la sociedad por mejorar su calidad de vida, han resultado en un creciente deterioro del ambiente. La atmósfera no es ajena a este deterioro que acaba empeorando la calidad del aire, impactando en la calidad de vida de las personas. Se considera contaminante atmosférico a cualquier sustancia emitida al aire desde una fuente biogénica, geogénica o antropogénica, que es ajena a la composición natural del aire, o que se presenta en concentraciones superiores a las naturales, y que puede poner en riesgo a los seres vivos en un corto o largo plazo (Fuzzi et al., 2015; Seinfeld y Pandis, 1998).

Uno de los contaminantes más preocupantes en atmósferas urbanas son los aerosoles atmosféricos, suspensiones relativamente estables de partículas sólidas o líquidas en un gas y que presentan un diámetro menor a $10\ \mu m$. Distinto es a lo que refiere el término material particulado (PM), el cual define un conjunto de materia en estado sólido y/o líquido presente en suspensión en la atmósfera, excluyendo el agua pura (Meszaros et al., 1999; Salameh et al., 2015). Los aerosoles engloban tanto las partículas en suspensión como la masa de aire en la que se encuentran (Finlayson-Pitts y Pitts Jr,

1999; VandenBoer et al., 2013). A pesar de su diferencia semántica que demuestra que no son equivalentes, estos términos son utilizados indistintamente.

Los cambios en la calidad del aire no siempre están ligados a la intervención del ser humano, de esta forma las fuentes de emisión de partículas pueden clasificarse en antropogénicas y naturales. Las fuentes antropogénicas son originadas como resultado de la actividad humana, este grupo aglomera por ejemplo procesos industriales, mecánicos y de combustión, construcción y demolición, agricultura y ganadería, entre otros. Por otra parte, las emisiones naturales comprenden las partículas generadas como consecuencia de procesos naturales como lo son las erupciones volcánicas, incendios como consecuencia de rayos, re suspensión de partículas como consecuencia del viento, entre otras (Jiménez-Guerrero et al., 2008; Pey Betrán, 2008).

Sus propiedades aerodinámicas engloban las características físicas de mayor relevancia para este contaminante. Estas determinan el tipo de transporte y remoción en la atmósfera, así como su deposición en el sistema respiratorio y la identificación de la fuente que le dio origen. La propiedad de mayor importancia es su diámetro aerodinámico, que es el diámetro de una esfera de densidad unitaria ($1 \frac{kg}{cm^3}$) con las mismas características aerodinámicas que la partícula bajo consideración. Según este pueden clasificarse en tres grandes grupos: gruesas (PM_{10} : 2,5-10 μm), finas ($PM_{2.5}$: menor a 2,5 μm) y ultrafinas ($PM_{0.1}$: menor a 0,1 μm) (Gopalakrishnan et al., 2015; Kulkarni et al., 2011).

De acuerdo a su mecanismo de formación, los aerosoles atmosféricos pueden clasificarse en partículas primarias y secundarias. Las partículas primarias son aquellas emitidas de forma directa a la atmósfera y que permanecen en ella de la misma forma en que fueron emitidas. Mientras que las partículas secundarias son aquellas que han estado sujetas a cambios químicos o bien son producto de reacciones de dos o más contaminantes primarios en la atmósfera (Finlayson-Pitts y Pitts Jr, 1999; VandenBoer et al., 2013).

De acuerdo con los informes de la Organización Mundial de la Salud, el PM es considerado uno de los contaminantes atmosféricos más perjudiciales para las personas (WHO, 2005). La presencia de este contaminante en la atmósfera tiene un impacto significativo en el desarrollo de la sociedad dado que afecta múltiples componentes con los que interactúa el ser humano, además de su salud, se destaca el efecto que tiene en los ecosistemas y en clima.

La vía de ingreso de las partículas al cuerpo humano es a través del sistema respiratorio y su impacto en la salud depende de factores como el tamaño, componentes adsorbidos, composición química, intensidad y duración de la exposición y condición sanitaria del individuo expuesto. A medida que el tamaño disminuye, su potencial impacto sobre la salud aumenta, dada su capacidad de penetrar más profundamente en el sistema respiratorio y su mayor facilidad para ser respiradas. Las partículas gruesas se depositan en la tráquea, bronquios y bronquiolos, mientras que las finas y ultrafinas son capaces de alcanzar los alvéolos pulmonares, donde pueden disolverse o depositarse (Kim et al., 2015; Schlesinger, 2007). Además, su capacidad de generar efectos adversos a la salud también se encuentra ligado a los componentes adsorbidos que transporta, entre los más nocivos se destacan metales y microorganismos patógenos (Blanco Becerra, 2006; Nordberg et al., 2014). Por otra parte, se destaca su composición química, la cual determina el carácter cancerígeno y mutagénico de la partícula, los mayores referentes en cuanto a su capacidad de generar adversidades a la salud son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (IARC, 2004, 2010). Finalmente, los efectos varían con la intensidad y duración de la exposición a la que se ven sometidos los individuos, además de su condición sanitaria y edad. La parte de la población más susceptible de sufrir efectos adversos a la salud incluye a niños, embarazadas, personas mayores de 65 años y personas con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias (Sacks et al., 2011; Zhao et al., 2020).

El impacto en los ecosistemas deriva de la deposición de los aerosoles en la

superficie de las plantas, generando abrasión y calentamiento radiativo, conduciendo a una reducción de la capacidad fotosintética. Además, si los compuestos depositados son ácidos o alcalinos, pueden causar lesiones en la superficie de la hoja (Rai, 2016; Rai y Panda, 2014). Por otra parte, el PM depositado de forma directa en el suelo puede intervenir en el ciclado de nutrientes en los ecosistemas, afectando principalmente el ciclo del nitrógeno, a través de sus efectos en las bacterias y hongos de la rizosfera. Adicionalmente, los animales resultan afectados de una forma equivalente a la población humana, variando el impacto en función de la sensibilidad de cada especie.

La influencia de los aerosoles atmosféricos en el clima puede estar vinculado a múltiples causas. En primer lugar resalta su influencia en el balance radiativo de la tierra dado a la absorción y dispersión de la radiación solar incidente. En segundo lugar, se relaciona con su participación en la formación de nubes y precipitaciones, derivada de su capacidad de actuar como núcleos de condensación. De esta forma, los aerosoles influyen en el equilibrio térmico de la tierra y el cambio climático global. Además, esta influencia en la radiación está ligada a sus propiedades fisicoquímicas, dando lugar a efectos de enfriamiento y calentamiento de la atmósfera terrestre. Las partículas compuestas por sulfatos se caracterizan por generar un enfriamiento de la atmósfera, mientras que aquellas con una proporción notable de carbono en estado elemental y partículas de polvo tienen un efecto de calentamiento de la misma (Chen et al., 2021). Por otra parte, la influencia en el balance radiativo de la tierra a través de la formación de nubes, genera que un aumento en el número de partículas, desencadene un aumento del espesor óptico de las nubes, que actúa disminuyendo la radiación solar superficial neta incidente. Cabe destacar que partículas más pequeñas disminuyen la eficiencia del proceso de precipitación, prolongando de este modo la vida media de las nubes (Unkašević et al., 2003). Además, aerosoles atmosféricos antropogénicos como el hollín actúan afectando el contenido de agua de las nubes causando un forzamiento radiativo negativo (Solomon et al., 2007). Por otro lado, dada la naturaleza de los

aerosoles y su participación en un gran número de reacciones secundarias, afectan la concentración y distribución de gases traza atmosféricos, alterando los ciclos de nitrógeno, azufre y oxidantes atmosféricos (Meszaros et al., 1999; Salameh et al., 2015).

2.2. Motivación

Estudios previamente realizados en la ciudad de Córdoba han demostrado que se convive con elevadas concentraciones de PM, especialmente en la zona céntrica, cuya principal fuente de emisión se vincula al transporte (Amarillo et al., 2021; H. Carreras et al., 2006; H. Carreras y Pignata, 2001). También se ha demostrado la asociación entre los niveles de PM y los riesgos de enfermedades respiratorias en la población de la ciudad de Córdoba (Busso et al., 2021; H. A. Carreras et al., 2009; Mateos et al., 2018). Además, se ha estudiado la relación existente entre los niveles de PM y variables meteorológicas y satelitales para el sitio de interés (Amarillo et al., 2021; Della Ceca et al., 2018). Sin embargo, ninguno de estos estudios ha analizado la variable respuesta con una frecuencia de variación horaria, tampoco se han analizado los datos como series temporales y ninguno ha tenido por objetivo el desarrollo de un modelo predictivo de contaminación de aire, con el objetivo de generar un sistema de alerta temprana ante condiciones adversas de calidad de aire.

Actualmente, existe abundante información respecto de los efectos nocivos del PM en la salud del hombre, su composición y fuentes de emisión y sus relaciones con otras covariables. A pesar de que la mayoría de estos estudios se han realizado en países de Europa y América del Norte, en los últimos años ha ocurrido una creciente contribución a esta área en el resto del mundo, permitiendo comparar diferentes situaciones en cuanto a niveles y tipos de emisión, así como respecto a las condiciones socioeconómicas de la población. Dado que las condiciones meteorológicas, topográficas y las actividades antropogénicas de un sitio determinado modifican los patrones de

emisión de PM, se ve justificada la realización de estudios de monitoreo in situ. Hasta el día de hoy, en la ciudad de Córdoba, se han desarrollado estudios que demuestran los impactos en la salud de este contaminante, además de su relación con covariables y la identificación de su fuente de emisión dada su composición (Amarillo et al., 2021; Busso et al., 2021; Mateos et al., 2018, 2019).

Contar con información sobre la variabilidad del PM y su relación con variables meteorológicas y satelitales en diversas escalas temporales en distintos sitios del área metropolitana de la provincia de Córdoba, permitirá caracterizar tanto espacial como temporalmente este contaminante. Además, estos resultados son el punto de partida para el desarrollo de modelos estadísticos de elevada capacidad predictiva. Esto permitirá la creación de un sistema de alerta, cuyo objetivo principal es advertir ante condiciones adversas de calidad de aire, reforzando así los pilares en los que se sustenta la salud pública, garantizando una mejor calidad de vida a la población. Finalmente, la disponibilidad de nuevos datos paliará la falta de acceso a información de contaminación de aire en la provincia.

2.3. Desafíos metodológicos

Los procesos de contaminación atmosférica varían de manera continua en el tiempo y en el espacio. Por este motivo, resulta de interés predecir la concentración de contaminantes atmosféricos referenciados a un determinado momento de tiempo y ubicación geográfica. Los datos que alimentan estos análisis son series temporales condicionadas a una locación espacial, o bien una colección de observaciones recogidas secuencialmente en el tiempo georreferenciadas a un sitio determinado. Cabe destacar que la variabilidad espacio temporal de los contaminantes no se encuentra determinada solo por las características espaciales y temporales de los datos recopilados, sino por múltiples covariables que también varían espacial y temporalmente como lo son

variables meteorológicas y satelitales.

En parte, la novedad del análisis recae en el análisis de series temporales de PM cuya frecuencia de observación es horaria, es decir, que los datos se encuentran equiespaciados por un intervalo de tiempo igual a una hora, algo nunca antes realizado para la provincia de Córdoba. El primer impedimento a esta investigación es la ausencia de un sistema de medición y seguimiento de este tipo de contaminante en esa escala temporal, de público acceso. Como consecuencia, para poder recopilar los datos, es necesario el desarrollo de sensores que permitan realizar las mediciones de PM en la frecuencia temporal de interés. Estos deben ser diseñados desde cero, así atravesando todas las etapas transversales a la creación de un sensor, desde el desarrollo del algoritmo y la creación del software hasta el ensamblado de los prototipos finales y la validación de los resultados obtenidos con un sistema de referencia.

Una vez obtenidos los datos del contaminante de interés debe llevarse a cabo la limpieza y tratamiento de acuerdo a las características espaciales y temporales particulares de cada dato. Por este motivo es inevitable un análisis que condicione tanto por ubicación geográfica como por momento de tiempo, garantizando de esta forma una limpieza exclusiva para cada uno de los sitios y periodos considerados. Como consecuencia se vuelve necesario el estudio de la variabilidad explicada por cada una de las variables temporales derivadas, con el objetivo de determinar las que mayor porcentaje de la variabilidad explican.

El estudio de series temporales tiene como característica principal la dependencia que vincula observaciones contiguas, además esta dependencia puede verse influenciada por comportamientos estacionales. Es importante determinar cuáles factores temporales son los que desencadenan la estacionalidad que influencia la serie temporal, para así contar con las herramientas necesarias para explicar su variabilidad. Además, las características propias de las series temporales son las que nos permitirán encontrar relaciones entre las distintas ubicaciones espaciales donde los datos fueron recopilados.

Como se mencionó anteriormente, no basta con variables derivadas de las características espaciales y temporales para explicar la variabilidad del contaminante en cuestión. Como consecuencia, el análisis debe incluir covariables que permitan describir como varían los datos espacio temporalmente. Por este motivo es necesaria la adquisición de variables que varíen conjuntamente con la concentración del PM durante el período de muestreo, en la misma frecuencia de temporal y ubicación geográfica en que los datos fueron recopilados por los sensores desarrollados. De esta forma se vuelve imprescindible el estudio de diversas fuentes de datos meteorológicos y satelitales para poder llevar a cabo la descarga y el análisis conjunto.

El modelado estadístico permite representar la variable respuesta con el objetivo de captar su variación y obtener predicciones. El análisis de variabilidad conjunta entre las covariables y la variable respuesta permitirá identificar un subconjunto de datos que maximice la explicación logrando una reducción de la dimensionalidad, de esta forma disminuyendo la complejidad del método aplicado. Además, este análisis se complementa con la creación de nuevas características a partir de los datos existentes, algo que permitirá la introducción de nuevas covariables que garanticen una mejor representación de la variable respuesta. Finalmente, es fundamental el estudio de múltiples algoritmos y modelos estadísticos, con el objetivo de determinar cuál de ellos es el que mejor logra captar la variabilidad presente en los datos y garantice obtener predicciones de mayor exactitud.

Este trabajo de tesis tiene por objetivo determinar cuáles son las covariables que mejor representan la variabilidad de la concentración de PM horaria. Además, se investigan distintas metodologías para el modelado de datos de contaminación de aire, de modo de determinar cuál de los mismos es el óptimo para implementar a la hora de desarrollar un modelo de alerta que garantice accesibilidad a datos de contaminación de aire.

2.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo predictivo de concentración de aerosoles para el área metropolitana de la provincia de Córdoba en función de variables: satelitales, de acceso público, meteorológicas, temporales y de uso de suelo, y validar el empleo de sensores de bajo costo para determinar partículas finas en áreas urbanas.

2.3.2. Objetivos específicos

1. Describir la variación espacio temporal de la concentración de aerosoles colectados en zonas del Área Metropolitana de Córdoba.
2. Evaluar la utilidad de sensores de bajo costo para el estudio de aerosoles en zonas urbanas del Área Metropolitana de Córdoba.
3. Analizar la influencia de variables meteorológicas y satelitales en los patrones de variación temporal de aerosoles en el Área Metropolitana de Córdoba.
4. Estimar la contribución relativa de productos satelitales para predecir la concentración de material particulado en el Área Metropolitana de Córdoba.
5. Estimar un modelo predictivo que incluya variables de uso de suelo, meteorológicas y satelitales para la estimación de la concentración de aerosoles en el Área Metropolitana de Córdoba.

Capítulo 3

Sensores de bajo costo

Placeholder

3.1. Introducción

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Desarrollo sensores

3.2.2. Base de datos

3.2.3. Protocolo estadístico

Validación del consenso entre las mediciones de los sensores de bajo costo

Comparación con una estación de referencia

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Producto final

3.3.2. Consenso en las mediciones de los sensores de bajo costo

3.3.3. Validación con respecto a la estación de referencia

3.4. Conclusión

Capítulo 4

Variación espacio temporal de la concentración de aerosoles

Placeholder

4.1. Introducción

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Área de estudio

4.2.2. Normativa

4.2.3. Base de datos

4.2.4. Preprocesamiento de datos

4.2.5. Protocolo estadístico

Conglomerados de las series temporales

4.3. Resultados y discusión

Filtrado *outliers* globales.

Filtrado *outliers* temporales.

4.3.1. Características temporales de la serie de $PM_{2.5}$

Análisis horario

Análisis diario

Análisis semanal

Análisis mensual

Análisis estacional

4.3.2. Análisis espacial de la concentración de $PM_{2.5}$

Descripción de la concentración anual de $PM_{2.5}$

Descripción de la concentración promedio por sitio de muestreo

Análisis de conglomerados a partir del patrón de emisión

Capítulo 5

Comentarios finales

5.1. Principales conclusiones

Los sensores de bajo costo presentaron una alta consistencia en sus mediciones, obteniendo registros similares independientemente del sensor utilizado. La consistencia existente entre los datos es un indicador de la fiabilidad de los sensores y sugiere que los datos recopilados por cada uno de ellos, en cada uno de los distintos usos de suelo son comparables entre si.

Los sensores de bajo costo lograron representar la misma tendencia que las mediciones otorgadas por una estación de referencia, de esta manera se determinó que las mediciones obtenidas por los sensores en los distintos usos de suelo fueron representativas de lo que estaba sucediendo con la concentración del contaminante en la atmósfera en un momento determinado.

La concentración de $PM_{2.5}$ observada para la provincia de Córdoba fue menor a la informada en otras ciudades del mundo, como: Riohacha (Colombia), Río de Janeiro y Porto Alegre (Brasil) y Estambul (Turquía). A pesar de esto, los estándares de calidad de aire establecidos por las normativas consideradas (Tabla ??) fueron superados en múltiples ocasiones tanto en la escala anual como de promedio de 24 horas. Una vez

discriminados los datos en función del uso de suelo representativo del sitio de muestreo se demostró una notable coincidencia entre la cantidad de veces que se superan estos límites y las características de cada uno de los clústeres encontrados (agrícola/área verde, urbano e industrial).

Los patrones espaciales y temporales descriptos poseen un gran potencial para explicar la variabilidad total de la concentración de material particulado fino, además la variación de las condiciones meteorológicas a lo largo de las distintas escalas temporales demostró de la misma forma tener una gran capacidad para explicar la variación de la variable en cuestión independientemente del uso de suelo que se este considerando.

Las variables satelitales y meteorológicas demostraron una notable capacidad para explicar la variabilidad espacio temporal del material particulado fino. De esta forma se garantiza que su inclusión en el modelado predictivo lograra captar la variabilidad de la variable respuesta y obtener buenas estimaciones de la concentración de material particulado fino.

Los resultados obtenidos indican que los modelos predictivos desarrollados lograron captar las interrelaciones existentes desenmascaradas en el capítulo 4 entre la concentración del material particulado fino y las variables satelitales.

El correcto desempeño del mejor algoritmo predictivo ajustado para cada uno de los usos de suelo, sugieren que estos poseen gran potencial para cumplir su objetivo de alertar a la población ante condiciones adversas de calidad de aire.

Las características propias de la variabilidad de cada una de las series temporales en los distintos usos de suelo y de aprendizaje de cada uno de los modelos predictivos evaluados, fueron determinantes en el tipo de algoritmo que demostró mayor exactitud para cada uno de los usos de suelo. De esta forma, en usos de suelo con series de baja frecuencia de picos con respecto a su media, los algoritmos de aprendizaje automático del tipo de arboles aleatorios se desempeñaron mejor que los algoritmos

de aprendizaje profundo. Mientras que estos permitieron obtener modelos de mayor exactitud predictiva en usos de suelo donde la serie de material particulado fino se visualiza como una de alta frecuencia de variaciones respecto de su media.

5.2. Trabajos futuros

En primera instancia se propone como futuro lineamiento de continuación de esta tesis el desarrollo de una caracterización completa de la concentración de $PM_{2.5}$ contemplando su composición química inorgánica, análisis morfométrico, distribución de tamaño y de fases cristalinas.

En segundo lugar, se promueve hacer hincapié en la comparación del desempeño del modelo predictivo desarrollado con algoritmos predictivos que implementen otro tipo de dato, como por ejemplo imágenes satelitales.

Finalmente, se propone la implementación del modelo predictivo en producción, este inciso persigue el objetivo de poner en funcionamiento el modelo desarrollado, permitiendo la consulta de datos por medio de la población, paleando la inaccesibilidad a datos de contaminación atmosférica.

Capítulo 6

Anexo

Placeholder

6.1. Primera sección: procedimiento de análisis de series temporales

6.1.1. Temperatura

6.1.2. Humedad relativa

6.1.3. Temperatura del punto de rocío

6.1.4. Precipitación convectiva

6.1.5. Velocidad del viento

6.1.6. Presión atmosférica

6.1.7. Radiación solar

6.1.8. Profundidad óptica de aerosoles

6.1.9. Altura de la capa límite atmosférica

6.1.10. Tráfico

6.1.11. Temperatura de la superficie terrestre

6.1.12. Rugosidad de la superficie terrestre

6.1.13. Integración vertical flujo ozono norte

6.1.14. Tasa media de escorrentía subterránea

6.1.15. Integración vertical de temperatura

6.1.16. Presión atmosférica al nivel del mar

6.1.17. Disipación en la capa límite atmosférica

6.1.18. Resumen relaciones

Bibliografía

10 Amarillo, A., Carreras, H., Krisna, T., Mignola, M., Busso, I. T., y Wendisch, M. (2021). Exploratory analysis of carbonaceous PM_{2.5} species in urban environments: Relationship with meteorological variables and satellite data. *Atmospheric Environment*, 245, 117987.

Blanco Becerra, L. C. (2006). Caracterización microbiológica del material particulado como factor de riesgo sobre la salud en la localidad de Puente Aranda, Bogotá DC Colombia. *Acta Nova*, 3(2), 257-285.

Busso, I. T., Núñez, M. R., Amarillo, A. C., Mettan, F., y Carreras, H. A. (2021). Modeling air pollution-related hospital admissions employing remote sensing and geographical information systems. *Atmospheric Environment*, 261, 118502.

Carreras, H. A., Wannaz, E. D., y Pignata, M. L. (2009). Assessment of human health risk related to metals by the use of biomonitors in the province of Córdoba, Argentina. *Environmental Pollution*, 157(1), 117-122.

Carreras, H., y Pignata, M. (2001). Comparison among air pollutants, meteorological conditions and some chemical parameters in the transplanted lichen *Usnea amblyoclada*. *Environmental Pollution*, 111(1), 45-52.

Carreras, H., Pignata, M., y Saldiva, P. (2006). In situ monitoring of urban air in Córdoba, Argentina using the *Tradescantia-micronucleus* (Trad-MCN) bioassay. *Atmospheric Environment*, 40(40), 7824-7830.

Chen, S.-L., Chang, S.-W., Chen, Y.-J., y Chen, H.-L. (2021). Possible warming

effect of fine particulate matter in the atmosphere. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1-9.

Della Ceca, L. S. et al. (2018). *Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado* [Mathesis].

EEA. (2020). *Air pollution: how it affects our health*. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/health-impacts-of-air-pollution>

Finlayson-Pitts, B. J., y Pitts Jr, J. N. (1999). *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*. Elsevier.

Fuzzi, S., Baltensperger, U., Carslaw, K., Decesari, S., Denier van der Gon, H., Facchini, M. C., Fowler, D., Koren, I., Langford, B., Lohmann, U., et al. (2015). Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric chemistry and physics*, 15(14), 8217-8299.

Gopalakrishnan, R., McMurry, P. H., y Hogan Jr, C. J. (2015). The bipolar diffusion charging of nanoparticles: A review and development of approaches for non-spherical particles. *Aerosol Science and Technology*, 49(12), 1181-1194.

IARC. (2004). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. *IARC, Lyon, 1*, 1-1452.

IARC. (2010). Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans and others. *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, 92, 1.

Jiménez-Guerrero, P., Jorba, O., Baldasano, J. M., y Gassó, S. (2008). The use of a modelling system as a tool for air quality management: Annual high-resolution simulations and evaluation. *Science of the total environment*, 390(2-3), 323-340.

Kim, K.-H., Kabir, E., y Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143.

Kulkarni, P., Baron, P. A., y Willeke, K. (2011). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. John Wiley & Sons.

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Carreras, H. A., y Gonzalez, C. M. (2018). Land use and air quality in urban environments: Human health risk assessment due to inhalation of airborne particles. *Environmental research*, 161, 370-380.

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Tavera Busso, I., y Carreras, H. A. (2019). Influence of meteorological variables and forest fires events on air quality in an urban area (Córdoba, Argentina). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 77(2), 171-179.

Meszaros, E. et al. (1999). *Fundamentals of atmospheric aerosol chemistry*. Akadémiai kiadó.

Nordberg, G. F., Fowler, B. A., y Nordberg, M. (2014). *Handbook on the Toxicology of Metals*. Academic press.

OMS. (2020). *Air pollution*. <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>

Organization, W. H. et al. (2021). *Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report*. World Health Organization. Regional Office for Europe.

Pey Betrán, J. (2008). *Caracterización Físico-Química de los Aerosoles atmosféricos en el mediterraneo occidental*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Rai, P. K. (2016). Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and environmental safety*, 129, 120-136.

Rai, P. K., y Panda, L. L. (2014). Leaf dust deposition and its impact on biochemical aspect of some roadside plants of Aizawl, Mizoram, North East India. *International Research Journal of Environment Sciences*, 3(11), 14-19.

Sacks, J. D., Stanek, L. W., Luben, T. J., Johns, D. O., Buckley, B. J., Brown, J. S., y Ross, M. (2011). Particulate matter-induced health effects: who is susceptible?

Environmental health perspectives, 119(4), 446-454.

Salameh, D., Detournay, A., Pey, J., Pérez, N., Liguori, F., Saraga, D., Bove, M. C., Brotto, P., Cassola, F., Massabò, D., et al. (2015). PM_{2.5} chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study. *Atmospheric Research*, 155, 102-117.

Schlesinger, R. B. (2007). The health impact of common inorganic components of fine particulate matter (PM_{2.5}) in ambient air: a critical review. *Inhalation toxicology*, 19(10), 811-832.

Seinfeld, J. H., y Pandis, S. N. (1998). From air pollution to climate change. *Atmospheric chemistry and physics*, 1326.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Averyt, K., y Marquis, M. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC* (Vol. 4). Cambridge university press.

Unkašević, M., Vukmirović, Z., Tošić, I., y Lazić, L. (2003). Effects of uncontrolled particulate matter release on precipitation under warfare conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 10(2), 89-97.

VandenBoer, T. C., Brown, S. S., Murphy, J. G., Keene, W. C., Young, C. J., Pszenny, A., Kim, S., Warneke, C., Gouw, J. A. de, Maben, J. R., et al. (2013). Understanding the role of the ground surface in HONO vertical structure: High resolution vertical profiles during NACHTT-11. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17), 10-155.

WHO, E. (2005). WHORO: Air Quality Guidelines global update. *Report on a Working Group meeting. In. Bonn, Germany*.

Zhao, Y., Cai, J., Zhu, X., Donkelaar, A. van, Martin, R. V., Hua, J., y Kan, H. (2020). Fine particulate matter exposure and renal function: A population-based study among pregnant women in China. *Environment international*, 141, 105805.