



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Nuevo León

# INSTITUTO TECNOLÓGICO DE NUEVO LEÓN

## División de Estudios Profesionales



### Trabajo de Titulación

#### Opción TI Tesis

Proyecto: "Análisis dinámico temporal al contaminante Atmosférico PM10 mediante el exponente de Hurst"

**ALUMNO(S):**

Miguel Angel Rodriguez Gonzalez

**No. CONTROL:**

17480886

**CARRERA:**

Ingeniería en Mecatrónica

**ASESOR DE TESIS:**

Dr. Francisco Benavides Bravo

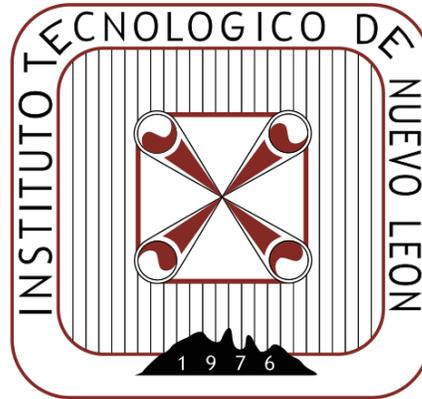
Guadalupe, N.L.

09 Septiembre, 2022

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE NUEVO LEÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES



ANÁLISIS DINÁMICO TEMPORAL AL CONTAMINANTE  
ATMOSFÉRICO  $PM_{10}$  MEDIANTE EL EXPONENTE DE HURST

POR

MIGUEL ÁNGEL RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO GERARDO BENAVIDES BRAVO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

GUADALUPE, NUEVO LEÓN, OCTUBRE 2021

*A mis padres*

*Que son guías de mi senda.*

*Les dedico con mucho amor y cariño  
todo el esfuerzo puesto en este trabajo.*

*Sin ustedes nada de esto sería posible.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Resumen</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	2
1.2. Justificación del problema . . . . .	6
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	7
1.4. Objetivos . . . . .	7
1.4.1. Objetivo General . . . . .	7
1.4.2. Objetivos Específicos . . . . .	7
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
2.1. Generalidades sobre el material particulado . . . . .	8
2.2. Variograma . . . . .	9
2.3. Exponente de Hurst . . . . .	10
<b>3. Metodología</b>	<b>13</b>
3.1. Obtención de datos . . . . .	13

---

3.2. Obtención del Variograma Experimental . . . . .	14
3.3. Calculo del Exponente de Hurst . . . . .	15
<b>4. Resultados</b>	<b>17</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>23</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>25</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

3.1. Estaciones de monitoreo ambiental pertenecientes a la red SIMA. a) Estación Norte, b) Estación Noreste, c) Estación Noroeste, d) Estación centro, e) Estación Noroeste, f) Estación Sureste, g) Estación Noroeste2. Tomada y editada de [1]. . . . .	14
4.1. Comparación entre las series de tiempo de la media mensual del contaminante $PM_{10}$ de la Estación Noroeste2 y a) Estación Norte, b) Estación Noreste, c) Estación Noroeste, d) Estación centro, e) Estación Suroeste, f) Estación Sureste. VV=Very poor air quality and very high health risk, PH=Poor air quality and high health risk, AM=Acceptable air quality and moderate health risk, GL=Good air quality and low health risk and WHO=Good air quality and low health risk. Tomada y editada de [1].	21
4.2. Comparación de la estación Noroeste 2 con respecto a las otras seis estaciones. La línea roja es la recta de ajuste. Tomada y editada de [1]. . . . .	22

# ÍNDICE DE TABLAS

---

4.1. Etiquetas para definir la calidad del aire y el riesgo a la salud. La última columna corresponde a los intervalos $PM_{10}$ . Basada en [1]. . . . .	19
4.2. Coeficiente de Hurst acompañado de parámetros geográficos de cada estación de medición y su media de $PM_{10}$ de estaciones de monitoreo ambiental de la AMM. Basada en [1]. . . . .	20

# RESUMEN

---

Miguel Ángel Rodríguez González.

Candidato para obtener el grado de Ingeniería en Mecatrónica.

Tecnológico Nacional de México.

Instituto Tecnológico de Nuevo León.

Título del estudio: ANÁLISIS DINÁMICO TEMPORAL AL CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO  $PM_{10}$  MEDIANTE EL EXPONENTE DE HURST.

Número de páginas: 33.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Uno de los temas sobre contaminación atmosférica más concurridos en tiempos de actualidad ha sido buscar la solución a la mala calidad del aire que respiramos, esto siendo más grave en grandes ciudades o metrópolis. En la presente tesis se analiza desde un método estadístico el comportamiento temporal del contaminante  $PM_{10}$  en el Área Metropolitana de Monterrey, esto durante el periodo que comprende enero 2010 hasta diciembre 2018. Esto con el fin de examinar las tendencias de las series de tiempo por medio de variogramas y visualización científica a los gráficos, esto para determinar la variabilidad del contaminante y su comportamiento de manera general a lo particular. A su vez, se analiza la persistencia de las series y su relación con los parámetros geográficos en donde se sitúan las estaciones como una primera aproximación para caracterizar la zona de estudio por medio del exponente fractal de Hurst. Los resultados sugieren una disminución lineal de la concentración del contaminante  $PM_{10}$  a lo largo del

tiempo, a su vez envuelto en una ciclicidad anual, teniendo el semestre otoño-invierno como el más contaminado y al semestre primavera-verano como el menos, durante el periodo de tiempo estudiado en la región.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Francisco Gerardo Benavides Bravo

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

La conducta de las diversas variables que interaccionan en la atmósfera han llamado la atención del ser humano desde la antigüedad, ya que estas ponen las pautas de las condiciones del medio ambiente en el cual se desarrollan las actividades diarias. Estas mismas se ven afectadas de manera indirecta cuando la población se ve afectada en su salud debido a agentes volátiles en el aire que respiran [2].

En las ciudades más pobladas de México, al igual que en otras del mundo, el material particulado representa el principal problema que incide directamente en la calidad del aire [3]. Generar temas de investigación en torno a estas problemáticas ya no es algo que pudiera ser un agregado, se requiere trabajos que logren conducir a soluciones que puedan ser de utilidad tanto para las autoridades correspondientes como para la población en general.

Un enfoque por el cual se puede hacer frente a la problemática a partir de la perspectiva de matemáticas aplicadas es desde el análisis de datos. Este estudio en profundidad a la serie de datos histórica del material particulado volátil presente en el aire, que todo respiramos, pudiera arrojar información importante para el entendimiento de estos agentes.

Más adelante en la Sección 1.1 indagaremos en el panorama que precede a la problemática actual, posteriormente se hará un estudio sobre temas referentes a la materia para un mejor entendimiento sobre el tema en el Capítulo 2, en el Capítulo 3 se indica

la metodología aplicada en el análisis. Y finalmente, en los Capítulos 4 y 5, mostraré los resultados y conclusiones.

## 1.1 ANTECEDENTES

El estudio del comportamiento de los contaminantes se ha convertido en un tema de vital relevancia en el desarrollo de una sociedad que aspira a mejorar la calidad de vida tanto de sus ciudadanos como del medio ambiente [4, 5]. Se denomina contaminación atmosférica [6] cuando una o más sustancias químicas en concentraciones suficientemente elevadas en el aire pueden hacer daño a los seres humanos, animales, vegetación, e incluso a los materiales [7, 8, 9]. Entre los contaminantes que son estudiados y medidos se encuentran Ozono ( $O_3$ ), Dióxido de azufre ( $SO_2$ ), Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), Monóxido de carbono ( $CO$ ), Plomo ( $Pb$ ) y el material particulado ( $PM$ ). En la NOM-025-SSA1-2014 [10] se describe al  $PM$  como una mezcla de sustancias en estado sólido o líquido, que permanecen suspendidas en la atmósfera. Cada partícula independiente puede llegar a presentar una gran variedad de cualidades características. Por esto mismo, para su mejor estudio, este material se clasifica en dos conjuntos de acuerdo a su tamaño:  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , los cuales son menores a  $2.5 \mu m$  y  $10 \mu m$ , respectivamente [6, 11, 12, 13].

Una forma de analizar el impacto de los contaminantes en el ambiente es a través de su serie de tiempo. Diversas metodologías se han utilizado para ello, entre las que destacan Arreola Contreras and González [14] donde con ayuda del análisis espectral efectuado a las series de tiempo encontraron que el viento está correlacionado con los niveles de  $PM_{10}$  registrados. Así mismo, Lee et al. [15] encontraron buenos resultados al emplear "Box counting" como una herramienta para caracterizar las variaciones espacio-temporales del  $PM_{10}$ .

El variograma  $\gamma(h)$ , visto como un modelado temporal, estimador de la varianza poblacional y de análisis estructural, describe la relación de observaciones por pares que están separadas entre sí por una distancia  $h$ . Específicamente, el método consiste en es-

timar la diferencia cuadrada prevista entre variables aleatorias vecinas separadas por diversos valores de  $h$  a lo largo de toda la serie de tiempo, dando un soporte fundamental y permitiendo representar cuantitativamente dicha relación, así como determinar aspectos importantes de la serie como la distancia a la que sucede la máxima variabilidad, si existe ciclicidad o no y realizar una interpolación o kriging [16, 17]. Diversos autores han estudiado la variabilidad temporal del  $PM_{10}$  en distintas condiciones geográficas [18, 19, 20, 21, 22, 23]. En estos estudios se correlaciona la variabilidad espacio-temporal con otras variables atmosféricas, a las que probablemente puedan estar asociadas con las variaciones de índices de  $PM_{10}$ , tales como la dirección del viento, temperatura, el ciclo diurno, altitud, etc. Serna [24] explica cómo el variograma puede tener ciertas aplicaciones prácticas, como por ejemplo, cuando no se está muy seguro si una serie de tiempo puede ser estacionaria o no estacionaria. Es una técnica geoestadística, la cual permite una medida cuantitativa de la persistencia a largo plazo en series de tiempo no estacionarias. Establece correlaciones a través del tiempo a un fenómeno regionalizado en el espacio, generando patrones que pueden ser utilizados para describir el comportamiento de un conjunto de observaciones.

A su vez, al efectuar un análisis de rango reescalado mediante el índice fractal de Hurst o exponente de fractalidad de Hurst,  $Hrs$  [25] mide la fractalidad de la serie de tiempo, relacionándose con la persistencia o memoria de largo plazo de la serie a manera que, a mayor valor del exponente, mayor persistencia. Por un lado, los análisis a distintos contaminantes atmosféricos en busca de indicios de dependencia de memoria a largo plazo oculta por medio de  $Hrs$  han sido reportados en la literatura [26, 27, 28, 29, 30]. Este indicador fue utilizado como una herramienta y en general los resultados obtenidos en dichas investigaciones marcan una correlación a largo plazo, por lo menos en los resultados obtenidos del  $PM_{10}$ .

Acercas de las normas y los estudios realizados en México, a inicios de los setenta, la contaminación del aire se comenzó a abordar como una problemática seria y compleja. Al día de hoy se siguen diseñando más y nuevas técnicas para su estudio [31, 32, 33]. Entre dichos estudios destaca el de Audelo-Vucovich et al. [34], donde utilizan el exponente de

Hurst entre otras herramientas para determinar la persistencia en concentración de  $PM_{10}$  y su relación con acciones de pre contingencia ambiental, observando que para  $Hrs > 0.3$ , aumenta la probabilidad de alcanzar un evento de pre contingencia.

En la Zona Metropolitana del Valle de México se encontró la tendencia de los índices de la dinámica no lineal en una pre contingencia ambiental por  $PM_{10}$ , se aplicaron las herramientas de la teoría del caos, para determinar las coincidencias en su comportamiento dinámico y se seleccionó el periodo de estudio del 15 de diciembre al 7 de enero de 2014. Los resultados obtenidos para persistencia, divergencia y auto-correlación dependen de la concentración de  $PM_{10}$ . El exponente de Hurst nos permitió encontrar la mejor coincidencia con las partículas  $PM_{10}$ , y observamos que por encima de un valor de 0,3 aumentaba la probabilidad de alcanzar el evento preliminar. [34].

Profundizando en el área de estudio, diferentes estrategias han sido establecidas en el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) dadas las características de la ciudad y su acelerado crecimiento urbano. A mediados de la década de los noventa, los contaminantes  $PM_{10}$  y  $O_3$  registraron valores frecuentes que sobrepasaron la cota establecida por la norma de la calidad del aire [35]. En este contexto, el Gobierno del Estado de Nuevo León, a través del Plan Estatal de Medio Ambiente 1995-2020, estableció las directrices para desarrollar el Programa de Administración de la Calidad del Aire del AMM 1997-2000 [36]. Como consecuencia de esto, la región cuenta con un Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) que se encarga de monitorear la calidad del aire basado en los contaminantes, criterio ( $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $O_3$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ). Recientemente, González-Santiago et al. [37] analizaron la contaminación atmosférica de la región entre los años 2006 y 2008, comparando los niveles de  $PM_{10}$  a diferentes escalas temporales (estaciones del año y días de la semana) por medio de un método de Bootstrap para obtener submuestras a las que aplicaron T-student y análisis de la varianza. Se encontró que los niveles de  $PM_{10}$  fueron altos y excedieron el límite de  $70 \mu g/m^3$  por día establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 [10], concluyendo que esos niveles pueden tener efectos graves para la salud. El suroeste de la AMM tuvo los niveles más altos de  $PM_{10}$  durante el período estudiado. El invierno fue la estación más contaminada y el verano fue la estación

menos contaminada. Los días más contaminados fueron los jueves y viernes, mientras que el domingo fue el día menos contaminado. Las horas con mayor nivel de  $PM_{10}$  fueron de 8:00 a 10:00 a.m., mientras que durante la noche las horas eran las más limpias.

Así, dada la situación actual del AMM y la clara relación entre concentración de contaminantes y aumento de enfermedades respiratorias en la región [36], estudios recientes de la región han encontrado relación entre la exposición crónica a partículas contaminantes y plomo en la sangre y padecimientos menos comunes [38], como labio y paladar leporino [39]. Dichos estudios, unidos a la clara relación existente entre contaminantes y obesidad, la cual ha sido reportada por múltiples estudios fuera de la región [40, 41, 42], motivan a explorar y cuantificar aún más la distribución y comportamiento temporal de los contaminantes en el AMM.

En este trabajo, realizaré un análisis temporal de la contaminación por  $PM_{10}$  en el AMM tomando en cuenta los años 2010 al 2018. El análisis consiste en examinar la ciclicidad y tendencia del fenómeno por visualización directa de la serie de tiempo, y medición de la variabilidad, haciendo uso del variograma experimental. A su vez, se realiza un análisis geográfico relacionando la persistencia de la serie por medio del exponente de Hurst.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Datos poblacionales del INEGI posicionan al AMM como la segunda área metropolitana con más población en México. Con sus más de 5 millones de habitantes registrados, a día de hoy se enfrenta con un escenario poco favorable al registrarse contingencias ambientales por contaminación del aire de manera más recurrente. Dichas alertas son emitidas por el gobierno del Estado de Nuevo León, entre las cuales podemos destacar [43, 44, 45].

De acuerdo con el Artículo número 3, Fracción V Bis del Código Ambiental de Nuevo León, una alerta por contingencia ambiental de emergencia se emitirá en respuesta a una situación accidental y temporal, actividad humana o fenómenos naturales que afecten la salud y produzcan contaminantes en el aire que afecte de manera directa a la integridad física y de salud de la población o el ambiente, esto de acuerdo a las Normas Oficiales Mexicanas. [46].

Como ya se ha comentado, en el AMM se han realizado diversos estudios en materia de contaminantes por  $PM_{10}$ , siendo atacado el problema desde diferentes ramas de la ciencia. Ver el problema como un proceso estocástico, esto debido a su tipo de naturaleza y a que con anterioridad se han realizado estudios en otros países. Esto podría arrojar datos interesantes que nos ayude a encontrar que subyace entre los datos registrados de  $PM_{10}$  en el AMM.

## 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los puntos con gran área de oportunidad dentro del análisis de las muestras de datos se encuentra en el estudio fractal de estos mismos. Se han realizado diversos estudios fractales con otros fenómenos naturales; tales como la precipitación; y otros no tan naturales como el comportamiento de las acciones de una compañía que cotiza en la bolsa de valores. Un estudio a la variabilidad a los registros de emisión de  $PM_{10}$  puede permitirnos realizar ciertas aseveraciones con respecto al comportamiento de este contaminante. La presente tesis pretende aportar información relevante con relación a las siguientes incógnitas: ¿Será posible capturar la variabilidad de las muestras de datos desde un punto del análisis fractal?, ¿El exponente de Hurst y el variograma pueden ser utilizadas como otro compendio de herramientas para llevar a cabo esto?

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar un análisis temporal a los registros de las series de datos del contaminante  $PM_{10}$  del AMM, mediante el exponente de Hurst y variogramas para describir el comportamiento espacio-temporal de los índices del contaminante  $PM_{10}$ .

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Demostrar que el semivariograma puede ser aplicado para cualquier serie de muestras, en nuestro caso muestras de  $PM_{10}$ .
- Establecer una metodología para la incorporación del exponente fractalidad de Hurst al análisis estadístico.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

### 2.1 GENERALIDADES SOBRE EL MATERIAL PARTICULADO

Cuando se habla sobre material particulado se suele asociar con contaminación del aire. Este conocimiento se ha vuelto de conocimiento más general con el pasar de los años. Este contaminante en específico afecta a más personas que ningún otro. Entre los principales componentes que conforman el material particulado se encuentran los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. Este material particulado es una amalgama entre partículas sólidas y líquidas de materia orgánica e inorgánica todas y cada una de ellas suspendidas en el aire.

Para comprender mejor los daños que provoca este contaminante en el cuerpo humano se clasifica de acuerdo a su diámetro aerodinámico. Las partículas con diámetro de 10 micras o menos (PM10) pueden penetrar y alojarse profundamente en los pulmones. La otra clasificación es todo material particulado con un diámetro menor o igual a 2.5 micras (PM2.5), estas resultan aún más dañinas para la salud, ya que estas pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar a nuestro torrente sanguíneo. La exposición crónica a materia particulada contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovascular y respiratorias, así como cáncer de pulmón [47].

## 2.2 VARIOGRAMA

El variograma,  $\gamma(h)$ , es un ajuste o modelado espacial considerado como un estimador de la varianza poblacional y de análisis estructural, donde la población debe tener una tendencia de estacionalidad, se utiliza para describir la relación de observaciones pareadas separadas por una distancia  $h$  y en otros casos con una dirección.

Es una técnica geo-estadística, la cual permite una medida cuantitativa de la persistencia a largo plazo en series de tiempo no estacionarias [16, 48, 49]. Establece correlaciones a través del tiempo a un fenómeno regionalizado en el espacio, generando patrones que pueden ser utilizados para describir el comportamiento de un conjunto de observaciones.

De manera explícita, el variograma estima la diferencia cuadrada prevista entre variables aleatorias vecinas, dando un soporte fundamental y permitiendo representar cuantitativamente esta relación. Este proceso continúa para cada punto de medición.

Teniendo en cuenta una serie de tiempo  $\{X_t, t \geq 0\}$ , la función de autocovarianza en el punto  $(t, t+h)$  se define como  $C_X(t, t+h) = E[X_t X_{t+h}] - E[X_t]E[X_{t+h}]$  con  $E[X_t]$  la media del proceso en tiempo  $t$ .

Así las diferencias  $X_{t+h} - X_t$ , que se obtendría con un proceso infinitamente reproducible, son reproducidos de una manera semejante de la serie original de datos.

Por lo tanto, el valor medio de las diferencias  $X_{t+h} - X_t$  es estimado por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{t=1}^{n(h)} (x_{t+h} - x_t)^2 \quad (2.1)$$

## 2.3 EXPONENTE DE HURST

El exponente de Hurst es una herramienta muy versátil si se quiere realizar un estudio sobre la persistencia de una serie de datos ordenados. El primer estudio realizado a series fractales fue realizado por el hidrólogo británico Harold Edwin Hurst (cita), trabajó estudiando las fluctuaciones de los niveles del Río Nilo, durante largos períodos de tiempo, su interés era proyectar las capacidades de las reservas y tomar medidas de precaución en épocas de sequía. Para esto, ideó una nueva metodología estadística a la cual nombro análisis de rango reescalado  $\langle R/S \rangle$ .

El método contiene una serie de pasos básicos, que son necesarios para calcular un valor  $H$  denominado exponente de Hurst, indispensable para determinación de la persistencia o antipersistencia de una serie de tiempo, además proporciona información sobre la dimensión fractal, dato importante para el desarrollo de nuestra tesis, ya que con él configuraremos regiones con un mismo comportamiento.

Los pasos para estimar el exponente de Hurst, a partir de una serie temporal de longitud  $N$  son, dividir la serie en un conjunto de  $d$ -subseries de tiempo más cortas, cada una de longitud  $m$ , efectuando los siguientes pasos para cada subserie desde  $n=1, \dots, d$ :

Calcular la media  $E_n$ , y la desviación estándar  $S_n$ ; Normalizar los datos ( $X_{in}$ ), sustrayendo a cada uno, la media de la subserie;

$$Z_{in} = X_{in} - E, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2.2)$$

Obtener las sumas parciales para cada serie de tiempo.

$$Y_{in} = \sum_{j=1}^i Z_{in}, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2.3)$$

Calcular el rango de cada subserie;

$$R_n = \max_{i=1:m}(Y_{in}) - \min_{i=1:m}(Y_{in}) \quad (2.4)$$

Se reescala o normaliza el rango calculando;

$$\frac{R_n}{S_n} \quad (2.5)$$

Una vez calculados los reescalados para cada subserie de longitud  $m$  se promedian:

$$\left\langle \frac{R}{S} \right\rangle_m = \frac{1}{d} \sum_{n=1}^d \frac{R_n}{S_n} \quad (2.6)$$

Hurst[12] encuentra que la relación del estadístico  $(R/S)$  está dado por la siguiente ley de potencia:

$$\left\langle \frac{R}{S} \right\rangle_m \approx c * m^H \quad (2.7)$$

donde  $H$ , es el exponente de Hurst y  $c$  es una constante positiva.

Dos factores que intervienen en la determinación del coeficiente de Hurst son: la forma en que la serie temporal es dividida en un conjunto de subseries, donde el rango de los valores de  $t$  sobre el cual la pendiente de  $\log(\langle R/S \rangle_t)$  y  $\log(t)$  es calculado y el segundo factor que interviene en la determinación de  $H$ , es el resultado del comportamiento asintótico del rango reescalado, es decir, cuando el valor de  $t$  tiende a infinito.

El análisis reescalado  $\langle R/S \rangle_t$  sobre varios valores de  $t$ , es estimado aplicando  $\log/\log$  a la expresión dada, esto es:

$$\log \left( \left\langle \frac{R}{S} \right\rangle_m \right) = \log(c) + H \log(m) \quad (2.8)$$

Para obtener el coeficiente  $H$ , se lleva a cabo un ajuste lineal de los puntos de la relación  $\langle R/S \rangle_t$  vs.  $\log(t)$  por el método de mínimos cuadrados.

La pendiente de dicha línea es entonces el *coeficiente de Hurst, H*.

Este exponente es un índice fractal que proporciona información sobre una medida de memoria a las correlaciones a largo plazo que se presentan en las series de tiempo.

En la practica el coeficiente de Hurst resulta en valores de 0 a 1. Apoyado en dicho valor [50], se pueden caracterizar las series de tiempo y de acuerdo a lo siguiente:

- Anti-persistente: Para todo valor donde  $H < 0.5$ . Donde para un incremento en la magnitud de la serie de datos es más probable que sea seguido por un decremento, y viceversa. Creando condiciones de alta volatilidad, lo que traducido a la práctica no permite poder realizar un pronóstico acertado al comportamiento de los datos (ruido rosa).
- Persistente: Donde el rango de valores debe tender a  $H > 0.5$  y menores a 1. Ante un incremento es muy probable que le siga un incremento, y a un decremento es muy probable un decremento. Donde prácticamente cualquier valor está correlacionado con valores anteriormente registrados, generando con esto la repetición de ciertos patrones en los datos (ruido negro).
- Aleatoria: Para valores de  $H = 0.5$ . Esta cualidad corresponde a falta de correlación en la serie (ruido blanco o movimiento browniano).

En la práctica podemos encontrar diferentes fenómenos que nos ayude a comprender estas distinciones del comportamiento fractal. Como lo puede ser en el caso del comportamiento hídrico en los captadores pluviales de las estaciones de monitoreo.

## CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

---

Las series de tiempo usadas comprenden el periodo Enero 2010 - Diciembre 2018. Se seleccionó como límite al 2018, esto debido a que se realizaron cambios en la manera en cómo se hacía difusión de los datos en los reportes a partir de Junio 2019. De esta manera, cada serie de tiempo está compuesta por alrededor de 109 datos, lo cual corresponde a 9 años.

### 3.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Los datos fueron extraídos y cotejados de los reportes mensuales publicados en la web del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental [51] (SIMA) del Estado de Nuevo León. Tales datos son de libre acceso y consulta en su sitio web. Para el estudio se recolectó la información de siete estaciones elegidas de las catorce que actualmente están en servicio. Estas mismas fueron previamente seleccionadas por tener más registros que las demás. La Figure 3.1 muestra las estaciones a analizar en este estudio.

Para la medición de unidades de PM10 en el aire, el SIMA cuenta con unidades de muestreo de alto volumen. Esto acorde a la NOM-035-SEMARNAT-1993 [52] la cual esta basada en el método oficial establecido por el Código de las Regulaciones Federales de Estados Unidos [53].



entre pares de observaciones de concentraciones separados por distancias temporales  $h$ , tal que [54, 55]:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= \frac{1}{2} \text{Var}(X_{t+h} - X_t) \\ &= \frac{1}{2} E[(X_{t+h} - X_t - E[X_{t+h} - X_t])^2] \\ &= \frac{1}{2} E[(X_{t+h} - X_t)^2]\end{aligned}\quad (3.1)$$

Nosotros usamos la versión discretizada del estimador en la Ecuación (3.1) para completar los semivariogramas de nuestras series de concentración de  $\text{PM}_{10}$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{t=1}^{n(h)} (x_{t+h} - x_t)^2 \quad (3.2)$$

donde  $n(h)$  se refiere al número de distancias temporales existentes con una longitud de  $h$  para la serie de tiempo  $X_t$ .

### 3.3 CALCULO DEL EXPONENTE DE HURST

Se elaboró el cálculo del exponente de Hurst mediante el método de rango reescalado (*Hrs*) para cada serie de tiempo  $X$  de longitud  $N$  [56, 57]. El procedimiento contempla la siguiente metodología. Los datos previamente tienen que ser preparados antes de comenzar con el cálculo del rango, tal y como vimos en la sección 2.3. La serie de tiempo  $X$ , se divide en  $d$  sub-series. Se obtiene el respectivo rango de cada sub-serie mediante:

$$R_m = \max_{i=1:d} Y_j - \min_{i=1:d} Y_j, \quad m = 1, \dots, d, \quad (3.3)$$

donde  $E_m$  es la media de la sub-serie  $X_m$ , y  $Y_j = \sum_{j=1}^i (X_{jm} - E_m)$  representa la serie acumulativa de desviaciones considerando los valores de cada una de las sub-series  $j$ .

Entonces, se reescala y promedia el rango mostrado en la Ecuación (3.3), tal que:

$$\left\langle \frac{R_m}{S_m} \right\rangle = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d \frac{R_m}{S_m}, \quad (3.4)$$

donde  $S_m$  es la desviación estándar de la serie  $X_m$ .

Finalmente,  $Hrs$  es el exponente  $H$  que satisface la ley de potencia:

$$\left\langle \frac{R}{S} \right\rangle_m = cm^H \quad (3.5)$$

donde  $c > 0$  y  $H$  es una constante adimensional. De una manera práctica,  $H$  se calcula al aplicar la función logaritmo a la ecuación (3.5), obteniendo

$$\log\left(\left\langle \frac{R}{S} \right\rangle_m\right) = \log(c) + H \log(m) \quad (3.6)$$

La Ecuación (3.6) permite obtener el coeficiente  $H$  mediante un ajuste lineal por el método de mínimos cuadrados.

Un punto clave que interviene en la correcta determinación del coeficiente de Hurst es el número  $m$  de subseries en el que la serie temporal es dividida. En este trabajo tomamos  $m = 12$  tomando en cuenta la ciclicidad anual de los datos proveídos por los reportes.

Dos elementos que intervienen en la determinación del coeficiente de Hurst son: la forma en que la serie temporal es dividida en un conjunto de subseries, donde el rango de los valores de  $t$  sobre el cual la pendiente de  $\log(\langle R/S \rangle_t)$  y  $\log(t)$  es calculado y el segundo factor que interviene en la determinación de  $H$ , es el resultado del comportamiento asintótico del rango reescalado, es decir, cuando el valor de  $t$  tiende a infinito.

## CAPÍTULO 4

# RESULTADOS

---

En la Figura 4.1 se pueden observar las series de tiempo de los valores mensuales promedio de emisiones  $PM_{10}$  para las estaciones de monitoreo ambiental situadas en la zona de estudio. En la figura se logra apreciar seis gráficos individuales, en los que se compara el comportamiento de la variable con respecto a la estación Noroeste 2. Por último, se marcan los umbrales establecidos para clasificar la calidad del aire por las normas mexicanas NOM-025-SSA1-1993 [58] y NOM-025-SSA1-2014 [10] por medio de líneas rojas horizontales; ver Tabla 4.1 para el significado de las etiquetas de calidad del aire. El límite GL muestra una discontinuidad en el año 2015, ya que hubo una disminución el criterio de clasificación en la normativa NOM-025-SSA1-2014 [10], la cual entró en vigor a partir de ese año. La línea horizontal punteada es el límite para la buena calidad del aire establecida por la OMS [59].

De acuerdo al gráfico, se puede apreciar un comportamiento de movimiento cuasiperiódico lo que revela que a lo largo del tiempo este fenómeno tiene cierto grado de ciclicidad.

El histórico de los datos comienza desde enero 2010 y termina hasta diciembre del 2018. En el fondo del gráfico se observa un grabado de 2 colores diferentes, esto con la finalidad de poder distinguir dos periodos durante el año. El primero periodo correspondiente a primavera-verano representado con el color gris y el segundo correspondiente a las estaciones otoño-invierno, esta será representado con las barras verticales verdes. Ca-

da periodo contiene una línea horizontal que indica el valor medio de  $PM_{10}$  para dicho periodo.

En el gráfico se destaca la estación Noroeste 2 al ser comparada contra cada una de las demás estaciones. El pico máximo de contaminación por  $PM_{10}$  se encuentra en la estación Noroeste 2.

Se confirmó que la estación con mayores concentraciones de  $PM_{10}$  es la Noroeste 2 ubicada en el municipio de García. Las estaciones Norte y Sureste fueron las que tuvieron los valores en sus valles más bajos del resto de las demás. En el dato número veinticinco, ubicado en el eje de las abscisas, se puede apreciar una discontinuidad en los datos, dicha discontinuidad fue compensada por vía interpolación lineal.

El rango de la media de todas series de datos está entre  $54.50 \mu gr/cm^3$  hasta  $85.11 \mu gr/cm^3$ . El promedio de contaminación de todas las estaciones es  $68.54 \mu gr/cm^3$ .

De acuerdo a la Tabla 4.1 el estatus de la calidad del aire de las estaciones analizadas está en un rango donde no es apta para la salud del ciudadano promedio. Consiguiendo con esto cinco estaciones dentro del rango AM (Aceptable) y dos estaciones en la categoría MA (Mala). En ninguna estación se encontró calidad del Aire dentro de los rangos de BB (Buena) como de MM (Muy Mala). Dados los resultados se puede establecer que en su mayoría la calidad del aire en el AMM es Aceptable; sin embargo, no es la más óptima para no reflejar efectos nocivos en la salud de la población.

Realizando un análisis por periodos de estaciones se puede apreciar que en invierno suelen ser los periodos con mayores índices de contaminación. Esto se podría asociar debido a las bajas temperaturas y al incremento en las rachas de viento que ocasionan que el material particulado que está en reposo vuelva a estar en contacto libre con la atmósfera, tal y como mencionan Celis H. y Morales P. en su estudio de contaminación del aire en la ciudad Chillán de Chile, encontraron que los niveles con mayor índice de contaminación fueron en los meses marzo-agosto correspondiente al periodo invernal [60].

El gráfico en una primera instancia nos indica que los valores típicos de los índices

del contaminante tienden a disminuir.

En la Tabla 4.1 se observa de manera gráfica los intervalos para la clasificación de la buena calidad del aire de acuerdo a la NOM-025-SSA1-2014 [10].

La Tabla 4.2 presenta los resultados de promedios anuales obtenidos a partir de las series de tiempo, y el exponente de Hurst ( $Hrs$ ) obtenido a partir de los procedimientos anteriormente descritos. A su vez, se presenta la información geográfica correspondiente a cada estación.

El exponente de Hurst mantuvo las mismas condiciones de  $H > 0.5$  Lo que nos lleva a entrever que al menos en el AMM el contaminante  $PM_{10}$  tiene un comportamiento persistente en el periodo de tiempo estudiado. Esto nos permite vislumbrar que el  $PM_{10}$  puede tener un comportamiento con memoria de largo alcance. Es decir que los valores mantienen una correlación a lo largo del tiempo de muestreo de contaminante  $PM_{10}$ .

Las estaciones con un valor más cercano a  $H = 1$  fueron las estaciones Noroeste 2 y Sureste. Para trabajos futuros sería importante tratar de asociar una variable que tengan en común ambas estaciones para obtener valores muy cercanos a 1.

<b>Etiqueta</b>	<b>Calidad del aire</b>	<b>Riesgo a la salud</b>	<b>Intervalo <math>PM_{10}</math> (<math>\mu g/m^3</math>)</b>
BB	Buena	Bajo	0 – 40
AM	Aceptable	Moderado	40 – 75
MA	Mala	Alto	75 – 155
MM	Muy mala	Muy alto	155 – 235
WHO	Buena	Bajo	0 – 15

Tabla 4.1: Etiquetas para definir la calidad del aire y el riesgo a la salud. La última columna corresponde a los intervalos  $PM_{10}$ . Basada en [1].

<b>Nombre</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Altitud (m)</b>	<b>Media de PM<sub>10</sub></b>	<b>Calidad</b>	<b>Hurst</b>
Norte	25.80	-100.34	528	55.86	AM	0.87
Noreste	25.75	-100.26	476	69.22	AM	0.76
Noroeste	25.76	-100.37	571	76.35	MA	0.72
Centro	25.68	-100.34	560	57.91	AM	0.80
Suroeste	25.68	-100.46	694	80.83	MA	0.73
Sureste	25.67	-100.25	492	54.50	AM	0.89
Noroeste 2	25.78	-100.59	716	85.11	AM	0.89

Tabla 4.2: Coeficiente de Hurst acompañado de parámetros geográficos de cada estación de medición y su media de PM<sub>10</sub> de estaciones de monitoreo ambiental de la AMM. Basada en [1].

En la figura 4.2 se puede apreciar seis gráficas individuales en las que se compara el variograma de la estación Noroeste 2 con el de las demás estaciones. Además, se muestra un ajuste lineal indicando la tendencia general (suavizando el fenómeno oscilatorio) de cada estación. Dicha suavización nos permite confirmar ciertas características que en algunos gráficos no son tan perceptibles a simple vista en las series de tiempo, tales como: presencia de ciclicidad y conservación de la memoria tras ser modificada de manera temporal por distancias de longitud  $h$ .

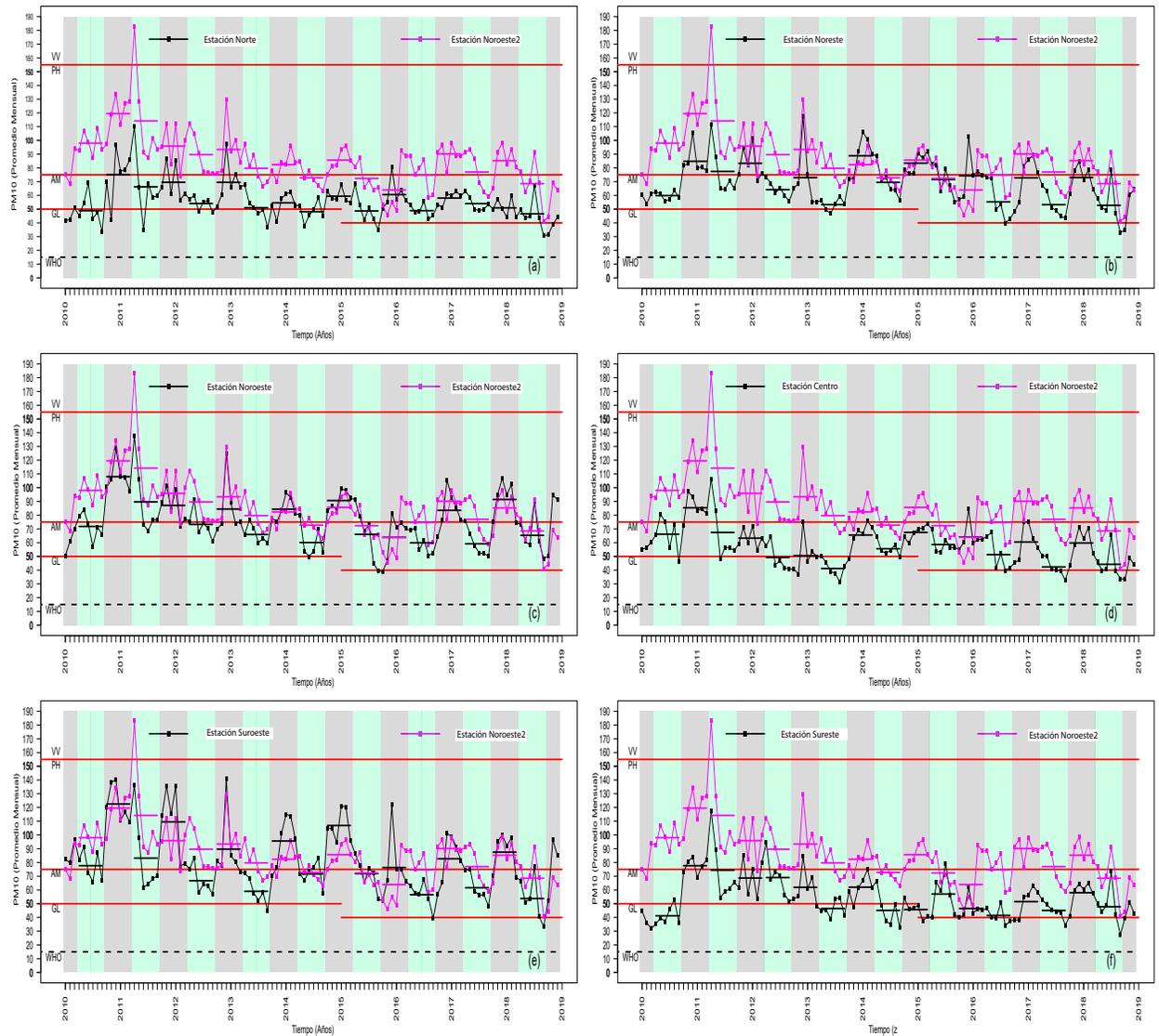


Figura 4.1: Comparación entre las series de tiempo de la media mensual del contaminante PM<sub>10</sub> de la Estación Noroeste2 y a) Estación Norte, b) Estación Noreste, c) Estación Noroeste, d) Estación centro, e) Estación Suroeste, f) Estación Sureste. VV=Very poor air quality and very high health risk, PH=Poor air quality and high health risk, AM=Acceptable air quality and moderate health risk, GL=Good air quality and low health risk and WHO=Good air quality and low health risk. Tomada y editada de [1].

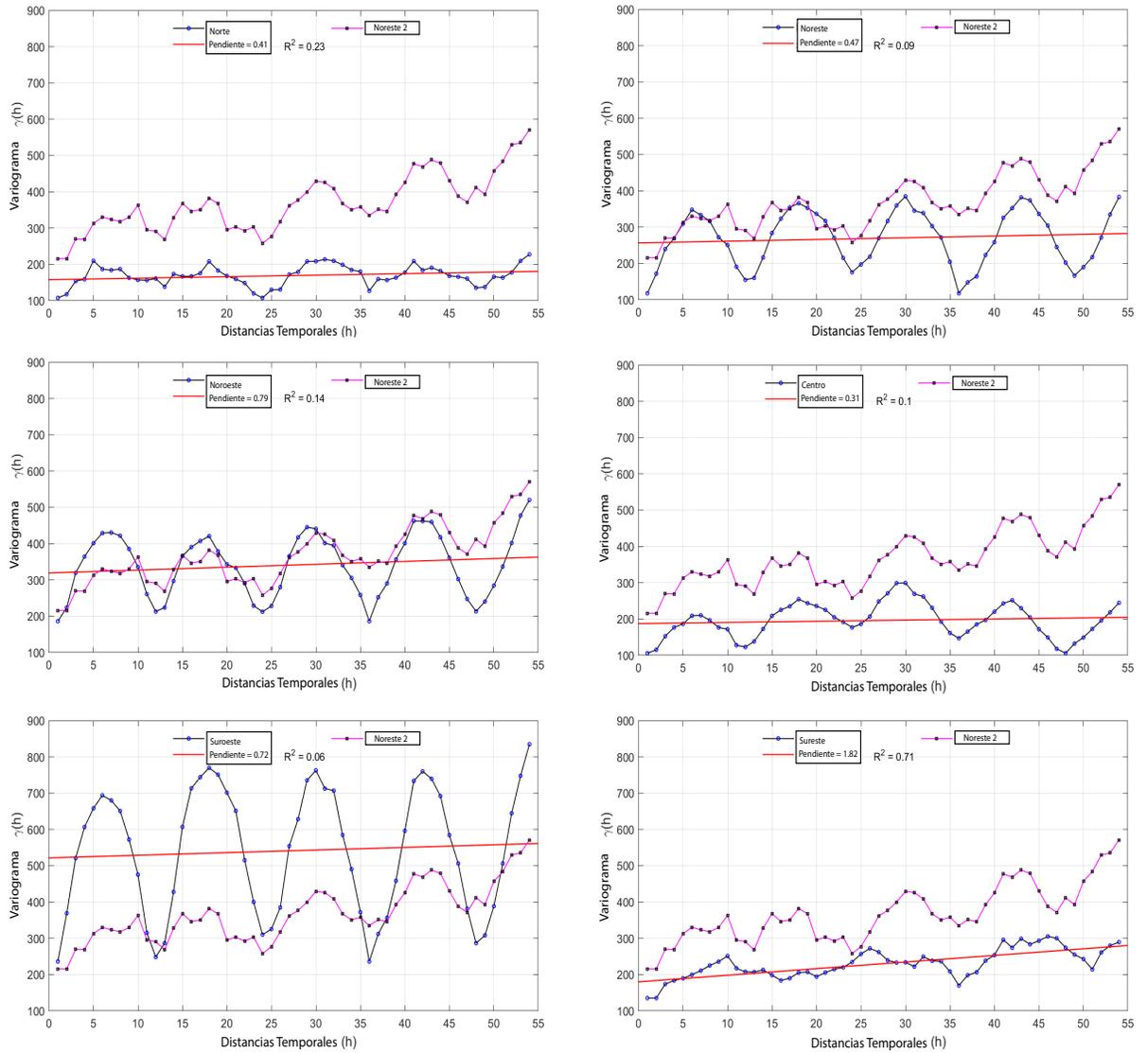


Figura 4.2: Comparación de la estación Noroeste 2 con respecto a las otras seis estaciones.

La línea roja es la recta de ajuste. Tomada y editada de [1].

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

Para el estudio se realizó un análisis la información proporcionada por siete estaciones de monitoreo ambiental de catorce disponibles. Dichas estaciones se encuentran dentro del área metropolitana de la ciudad de Monterrey, en el estado de Nuevo León, México. A lo largo de este proceso se pudo encontrar diversos puntos que podrían ser de relevancia para la población en general. Para que así el gobierno del estado de Nuevo León o cualquier organismo responsable de salvaguardar la salud de los habitantes del AMM puedan contar con más herramientas para ayudarles a encontrar los puntos en donde pueden redoblar los esfuerzos.

Se constató en conjunto con estudios previos realizados en la región, que nuevamente se encontró un comportamiento cíclico anual en el  $PM_{10}$ . Este se mantiene para el tiempo estudiado, del año 2010 al 2018, teniendo la mayor contaminación durante los periodos comprendidos de otoño-invierno y la menor contaminación durante primavera-verano. Lo cual es un fenómeno que ya se ha registrado anteriormente en la región, esto se ha atribuido anteriormente a condiciones propias del periodo, tales como la disminución de la humedad en el ambiente en conjunto con las inversiones térmicas. Crean condiciones en las que el material particulado tiende a estar suspendido en el aire durante más tiempo que en otras épocas del año.

Se encontró que las concentraciones del material particulado en el ambiente con un tamaño dinámico menor a 10 micras ( $PM_{10}$ ) se han reducido más y más con el paso del

tiempo. Sin embargo, pese a la disminución de los promedios  $PM_{10}$  las estaciones siguen sin poder entrar dentro de los estándares de las normas mexicanas para poder catalogar el aire que respiran los neoleoneses como bueno. Esto no necesariamente representa algo negativo, si las condiciones siguen prevaleciendo la teoría indica que podríamos disminuir nuestros índices de contaminación aún más con el tiempo.

Se pudo constatar que para las estaciones ubicadas al Oeste del AMM y particularmente algunas que se encuentran a una mayor altitud, registraron los promedios más altos de contaminación. Lo anterior pudiera ser asociado a que la dirección del viento en el AMM es proveniente desde el Este y continua en dirección al Oeste. Valdría la pena para trabajos futuros poder asociar variables geográficas tales como la altitud, longitud y la latitud. Esto con la finalidad de sí tienen correlación con el índice de  $PM_{10}$  para cada estación. De resultar esto, podría ser un buen punto de partida para saber en qué zonas enfocar los recursos.

El tratamiento realizado a las series de datos indican un grado de persistencia alto entre los datos de las series de tiempo, lo que a términos prácticos nos dice que el valor registrado el día de hoy tendrá efecto en el futuro (ruido negro). Lo que podría traducirse a repetir ciertos patrones registrados con anterioridad, esto último permitiendo condiciones de ciclicidad en las series de tiempo.

El uso de variogramas y el exponente fractal de Hurst calculado mediante el método de rango reescalado fueron útiles para poder encontrar la dimensión fractal y a su vez calcular el grado de persistencia, aleatoriedad y volatilidad en nuestros datos. Proporcionaron resultados prácticos en el análisis de las series de tiempo, por lo que pudieran seguirse utilizando estas herramientas en conjunta de nuevas técnicas de estudio para encontrar más información subyacente de los datos. Lo que combinado con la adición de más parámetros meteorológicos e inclusive geográficos permitiría conocer a más profundidad el comportamiento no solo del material particulado sino de otros contaminantes dispersos en el ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Mario A. Aguirre-López, Miguel Angel Rodríguez-González, Roberto Sotovillalobos, Laura Elena Gómez-Sánchez, Ángela Gabriela Benavides-Ríos, Francisco Gerardo Benavides-Bravo, Otoniel Walle-García, y María Gricelda Pamanés-Aguilar. Statistical analysis of pm10 concentration in the monterrey metropolitan area, mexico (2010-2018). *Atmosphere*, 13(2), 2022. ISSN 2073-4433. doi: 10.3390/atmos13020297. URL <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/2/297>.
- [2] Tania Gavidia, Jenny Pronczuk, y Peter D Sly. Impactos ambientales sobre la salud respiratoria de los niños: Carga global de las enfermedades respiratorias pediátricas ligada al ambiente. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 25:99 – 108, 00 2009. ISSN 0717-7348.
- [3] Horacio Riojas-Rodríguez, Urinda Álamo Hernández, José Luis Texcalac-Sangrador, y Isabelle Romieu. Health impact assessment of decreases in pm 10 and ozone concentrations in the mexico city metropolitan area. a basis for a new air quality management program. *Salud Pública de México*, 56, 2014.
- [4] S Ramos-Herrera, R Bautista-Margulis, y A Valdez-Manzanilla. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de chiapas, méxico. *Universidad y Ciencia*, 26:65–80, 2010. URL <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=15416251005>.
- [5] A Campos, R Gómez, L Licon, J Carrillo, E Ramírez, y E F Herrera. Monitoreo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de chihuahua (norte de méxico) como

- una herramienta para la gestión de la calidad del aire. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4:357–366, 2008.
- [6] United States National Air Pollution Control Administration. Air quality criteria for particulate matter : summary and conclusions., 1969.
- [7] E. Alonso, W. Martínez, J. C. Rubio, F. Velasco, H. L. Chávez, C. Ávalos, M. and Lara, y E Cervantes. Calidad del aire en cuatro ciudades demichoacán, méxico: Su efecto sobre materiales de construcción. *Revista de la Construcción*, 2007. URL <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619405007>.
- [8] Chak K. Chan y Xiaohong Yao. Air pollution in mega cities in china. *Atmospheric Environment*, 42(1):1–42, 2008. ISSN 1352-2310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.003>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007007911>.
- [9] Susan J. Elliott, Donald C. Cole, Paul Krueger, Nancy Voorberg, y Sarah Wakefield. The power of perception: Health risk attributed to air pollution in anurban industrial neighbourhood. *Risk Analysis*, 19(4):621–634, 1999. doi: 10.1111/j.1539-6924.1999.tb00433.x.
- [10] Secretaria de Salud. Norma oficial mexicana nom-025-ssa1-2014, salud ambiental. valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas pm10 y pm2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación., 2014.
- [11] Ana Santurtún Zarrabeitia. *Contaminación atmosférica, tipos de tiempo y procesos respiratorios en Santander y Zaragoza*. PhD thesis, 3 2014. URL <http://hdl.handle.net/10902/4587>.
- [12] Dra Elvira, Palacios Espinoza, Ing Claudia, y Espinoza Molina. Contaminación del aire exterior cuenca - ecuador, 2009 - 2013. posibles efectos en la salud. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de Cuenca*, 32:6–17, 2014.
- [13] World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team. Guías

de calidad del aire de la oms relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: actualización mundial 2005, 2006.

- [14] José Luis Arreola Contreras y Graciela González. Análisis espectral del viento y de partículas menores de 10 micrómetros (pm10) en el área metropolitana de monterrey, méxico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 1999. URL <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37015205>.
- [15] C.-K. Lee, D.-S. Ho, C.-C. Yu, y C.-C. Wang. Fractal analysis of temporal variation of air pollutant concentration by box counting. *Environmental Modelling I& Software*, 18(3):243–251, 2003. ISSN 1364-8152. doi: [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00078-6). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364815202000786>.
- [16] Annette Witt y Bruce D. Malamud. Quantification of long-range persistence in geophysical time series: Conventional and benchmark-based improvement techniques. *Surveys in Geophysics*, 34:541–651, 2013.
- [17] Alfonso Gutiérrez-López, Aldo I Ramirez, Thierry Lebel, Oscar Santillán, y Carlos Fuentes. El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (59):193–202, 2011.
- [18] José Cervantes Martínez. Aplicación del modelaje geoespacial en geomática para estimar los niveles de partículas suspendidas pm10 en la cuenca atmosférica del valle de méxico. Master's thesis, 2011. URL <http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/39>.
- [19] Marina Paez, Dani Gamerman, y Victor de oliveira. Interpolation performance of a spatio-temporal model with spatially varying coefficients: Application to pm10 concentrations in rio de janeiro. *Environmental and Ecological Statistics - ENVIRON ECOL STAT*, 12:169–193, 06 2005. doi: 10.1007/s10651-005-1040-7.

- [20] Benedikt Graeler, Lydia Gerharz, y Edzer Pebesma. Spatio-temporal analysis and interpolation of pm 10 measurements in europe. 03 2013.
- [21] No-Wook Park. Time-series mapping of pm10concentration using multi-gaussian space-time kriging: A case study in the seoul metropolitan area, korea. *Advances in Meteorology*, 2016:1–10, 2016. doi: 10.1155/2016/9452080.
- [22] Baca Cabrera y Juan. A geostatistical method for the analysis and prediction of air quality time series: application to the aburrá valley region. Master's thesis, 2016.
- [23] A. Gallardo. Geostadística. *Ecosistemas*, 15(3), ene. 2007. URL <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/161>.
- [24] Jorge Mendoza Serna. Modelos estadístico-espaciales de contaminantes del aire en el Área metropolitana de monterrey. Master's thesis, 2020. URL <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/21121>.
- [25] Benoit B. Mandelbrot y James R. Wallis. Some long-run properties of geophysical records. *Water Resources Research*, 5(2):321–340, 1969. doi: <https://doi.org/10.1029/WR005i002p00321>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR005i002p00321>.
- [26] M. Meraz, E. Rodriguez, R. Femat, J.C. Echeverria, y J. Alvarez-Ramirez. Statistical persistence of air pollutants (o3,so2,no2 and pm10) in mexico city. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 427:202–217, 2015. ISSN 0378-4371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.02.009>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437115001065>.
- [27] Dimitrios Nikolopoulos, Konstantinos Moustiris, Ermioni Petraki, Dionysios Koulougliotis, y Demetrios Cantzos. Fractal and long-memory traces in pm10 time series in athens, greece. *Environments*, 6(3), 2019. ISSN 2076-3298. doi: 10.3390/environments6030029. URL <https://www.mdpi.com/2076-3298/6/3/29>.
- [28] Francis Krampah, Newton Amegbey, Samuel Ndur, Yao Yevenyo Ziggah, y Philip K. Hopke. Fractal analysis and interpretation of temporal patterns of tsp and pm10

- mass concentration over tarkwa, ghana. *Earth Systems and Environment*, 5(3):635–654, Sep 2021. ISSN 2509-9434. doi: 10.1007/s41748-021-00237-2. URL <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00237-2>.
- [29] H.L. Windsor y R. Toumi. Scaling and persistence of uk pollution. *Atmospheric Environment*, 35(27):4545–4556, 2001. ISSN 1352-2310. doi: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00208-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00208-4). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231001002084>.
- [30] Jian Wang, Wei Shao, y Junseok Kim. Multifractal detrended cross-correlation analysis between respiratory diseases and haze in south korea. *Chaos, Solitons & Fractals*, 135:109781, 2020. ISSN 0960-0779. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109781>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960077920301831>.
- [31] Gustavo Garza. Uncontrolled air pollution in mexico city. *Cities*, 13(5):315–328, 1996. ISSN 0264-2751. doi: 10.1016/0264-2751(96)00019-4. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0264275196000194>.
- [32] Julio Cesar Morales Hernández, Ana Lexie Montes López, Oscar Frausto Martinez, Bartolo Cruz Romero, Cynthia Lizeth González Mercado, y Fátima Maciel Carrillo González. Contaminación del aire en puerto vallarta, méxico. *Bitácora Urbano Territorial*, 31, 4 2021. ISSN 2027-145X. doi: 10.15446/bitacora.v31n2.87800.
- [33] Cynthia Balderas-Mora, Mildret Navarro-Parga, Jorge Muñiz-Acuña, Carolina Villarreal-Morales, Renee Gamboa-Quezada, Aldo Ramírez Castillo, Evangelina Ramírez-Lara, & Ulrico, y J López Chuken. Estudio de la calidad microbiológica del aire en el Área metropolitana de monterrey nl méxico. *Revista de Ciencias Farmacéuticas y Biomedicina*, 2020.
- [34] Estela Audelo-Vucovich, Carlos Vazquez-Cruz, y Fernando Beristain. Tendencia de la dinámica no-lineal en una precontingencia ambiental causada por partículas en suspensión. *Información tecnológica*, 26:21 – 28, 08 2015. doi: 10.4067/S0718-07642015000400004.

- [35] Dirección de la calidad del aire. Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del área metropolitana de monterrey 2008-2012, Diciembre 2012.
- [36] Elías Vázquez Godina. Evaluación de la política pública estatal para el control de la contaminación del aire en el área metropolitana de monterrey, nuevo león 2008-2014. Master's thesis, 2018. URL <http://eprints.uanl.mx/16360/1/1080291942.pdf>.
- [37] Omar González-Santiago, Christian T. Badillo-Castañeda, Jonathan D.W. Kahl, Evangelina Ramírez-Lara, y Isaías Balderas-Renteria. Temporal analysis of PM10 in metropolitan monterrey, méxico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(5):573–579, May 2011. doi: 10.3155/1047-3289.61.5.573.
- [38] Jesús Santos-Guzmán, Claudia Madrigal-Ávila, José Ascención Hernández-Hernández, Gerardo Mejía-Velázquez, Irma Elisa Eraña-Rojas, Leticia Elizondo-Montemayor, y Luis Villela. Una década de monitoreo de plomo en sangre en niños escolares del área metropolitana de monterrey, nl. *Salud Pública de México*, 56(6):592–602, nov. 2014. doi: 10.21149/spm.v56i6.7385. URL <https://www.saludpublica.mx/index.php/spm/article/view/7385>.
- [39] Francisco Manuel Gasca-Sanchez, Jesus Santos-Guzman, Ricardo Elizondo-Dueñaz, Gerardo Manuel Mejia-Velazquez, Cecilia Ruiz-Pacheco, Deborah Reyes-Rodriguez, Elsie Vazquez-Camacho, José Ascencion Hernandez-Hernandez, Rosa del Carmen Lopez-Sanchez, Rocio Ortiz-Lopez, Daniel Olvera-Posada, y Augusto Rojas-Martinez. Spatial clusters of children with cleft lip and palate and their association with polluted zones in the monterrey metropolitan area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14), 2019. doi: 10.3390/ijerph16142488.
- [40] Yongjie Wei, Junfeng (Jim) Zhang, Zhigang Li, Andrew Gow, Kian Fan Chung, Min Hu, Zhongsheng Sun, Limin Zeng, Tong Zhu, Guang Jia, Xiaoqian Li, Marlyn Duarte, y Xiaoyan Tang. Chronic exposure to air pollution particles increases the risk of obesity and metabolic syndrome: findings from a natural experiment in beijing. *The*

- FASEB Journal*, 30(6):2115–2122, 2016. doi: 10.1096/fj.201500142. URL <https://faseb.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1096/fj.201500142>.
- [41] Nichapa Parasin, Teerachai Amnuaylojaroen, y Surasak Saokaew. Effect of air pollution on obesity in children: A systematic review and meta-analysis. *Children*, 8(5), 2021. ISSN 2227-9067. doi: 10.3390/children8050327. URL <https://www.mdpi.com/2227-9067/8/5/327>.
- [42] Rosalie van Zelm, Mark A.J. Huijbregts, Henri A. den Hollander, Hans A. van Jaarsveld, Ferd J. Sauter, Jaap Struijs, Harm J. van Wijnen, y Dik van de Meent. European characterization factors for human health damage of pm10 and ozone in life cycle impact assessment. *Atmospheric Environment*, 42(3):441–453, 2008. ISSN 1352-2310. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.072>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007008667>.
- [43] Aracely Garza. Activan alerta ambiental en nl por ‘extremadamente mala’ calidad del aire, 2022. URL <https://www.excelsior.com.mx/nacional/activan-alerta-ambiental-en-nuevo-leon-calidad-aire-mala/1502569>. [En línea; Recuperado 12-Marzo-2022].
- [44] Daniela Garcia. Nuevo león activa alerta ambiental por mala calidad del aire, 2021. URL <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2021/12/30/nuevo-leon-activa-alerta-ambiental-por-mala-calidad-del-aire-366073.html>. [En línea; Recuperado 12-Marzo-2022].
- [45] Yolanda Chio. Activan alerta ambiental en nuevo león por mala calidad del aire, 2022. URL <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/01/15/estados/activan-alerta-ambiental-en-nuevo-leon-por-mala-calidad-del-aire/>. [En línea; Recuperado 12-Marzo-2022].
- [46] Lilia Olivares. Contingencias ambientales, 2022. URL <http://www.hcnl.gob.mx/glpn/2022/02/contingencias-ambientales.php>. [En línea; Recuperado 10-Marzo-2022].

- [47] Organización Mundial de la Salud. Contaminación del aire ambiente (exterior), 2021. URL [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [En línea; Recuperado 18-Febrero-2022].
- [48] John Haslett. On the sample variogram and the sample autocovariance for non-stationary time series. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, 46(4):475–485, 1997. ISSN 00390526, 14679884. URL <http://www.jstor.org/stable/2988596>.
- [49] Edited by. In Renata Dmowska y Barry Saltzman, editors, *Long-Range Persistence in Geophysical Time Series*, volume 40 of *Advances in Geophysics*, page iii. Elsevier, 1999. doi: [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60289-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60289-7). URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065268708602897>.
- [50] Benoit B. Mandelbrot y James R. Wallis. Robustness of the rescaled range  $r/s$  in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resources Research*, 5(5):967–988, 1969. doi: <https://doi.org/10.1029/WR005i005p00967>. URL <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR005i005p00967>.
- [51] Sistema Integral de Monitoreo Ambiental. Reportes mensuales del estado de la calidad del aire en el Área metropolitana de monterrey, 2021. URL [https://aire.nl.gob.mx/rep\\\_mensual.html](https://aire.nl.gob.mx/rep\_mensual.html). [Online; accessed 4-October-2021].
- [52] Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma oficial mexicana nom-035-semarnat-1993 que establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición., 1993.
- [53] Code of Federal Regulations. Title 40 protection of environment, part 50, appendix b., 1990. URL <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2021-title40-vol2/pdf/CFR-2021-title40-vol2-part50.pdf>. [En línea; Recuperado 20-Marzo-2022].

- [54] F. Benavides-Bravo, F. Almaguer, R Soto-Villalobos, V. Tercero-Gómez, y J. Morales-Castillo. Clustering of Rainfall Stations in RH-24 Mexico Region Using the Hurst Exponent in Semivariograms. *Mathematical Problems in Engineering* , 2015.
- [55] BP Marchant y RM Lark. Estimating variogram uncertainty. *Mathematical Geology*, 36(8):867–898, 2004.
- [56] H. E. Hurst. Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 116(1):770–799, 1951. doi: 10.1061/TACEAT.0006518. URL <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/TACEAT.0006518>.
- [57] Esperanza Ardilla, Diego Luengas, y Jhon Freddy Trujillo Moreno. Metodología en interpretación del coeficiente de hurts. *ODEON*, 5, Jul 2010.
- [58] Secretaria de Salud. Norma oficial mexicana nom-025-ssa1-1993, salud ambiental. criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a material particulado., 2021.
- [59] World Health Organization. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, 2021.
- [60] José Celis H y José Morales P. Estudio de la contaminación del aire urbano en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile). *Atenea (Concepción)*, pages 165 – 182, 00 2007. ISSN 0718-0462. URL [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-04622007000100010&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-04622007000100010&nrm=iso).