



*Análisis descriptivo para el dióxido de azufre medido en el centro de Quito
usando análisis funcional*

*Descriptive analysis for sulfur dioxide measured in downtown Quito using
functional analysis*

*Análise descritiva para dióxido de enxofre medido no centro de Quito usando
análise funcional*

Fabián Allauca-Pancho ^I

fabian.allauca@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7668-3053>

Edgar Salazar-Álvarez ^{II}

edgar.salazar@esPOCH.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0988-0641>

Kleber Jaramillo-Galarza ^{III}

kjaramillo@unach.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1488-5412>

Patricio Villagómez-Arellano ^{IV}

rodrigo.villagomez@educacion.gob.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8490-272X>

Correspondencia: fabian.allauca@esPOCH.edu.ec

Ciencias Naturales.
Artículo de Investigación.

* **Recibido:** 23 de enero de 2023 * **Aceptado:** 12 de febrero de 2023 * **Publicado:** 16 de marzo de 2023

- I. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Unidad Educativa Fiscomisional Río Upano, Sucua, Ecuador.

Resumen

El objetivo del estudio es analizar los datos funcionales del dióxido de azufre medidos en el año 2019 y 2020 en el centro histórico de Quito; para este fin se utilizó el software estadístico RStudio, con el paquete "fda.usc" (Análisis de datos funcionales y utilidades para la computación estadística) versión 2.0.2. Se obtuvieron gráficos exploratorios, curvas atípicas, gráficas mensuales, gráficas con curvas medias y bandas de confianza. Los resultados obtenidos del estudio indicaron que el comportamiento del dióxido de azufre es irregular a lo largo del día, presentándose valores más altos alrededor de las 07:00 llegando a alcanzar aproximadamente los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para poder observar este comportamiento, se tuvo que eliminar las curvas atípicas; encontrándose 26 curvas atípicas. Al graficar las curvas medias mensuales para el año 2019 se observó que las medias más altas corresponden a los meses de enero, febrero, marzo, abril y mayo; mientras que el mes con media más baja corresponden al mes de agosto. La gráfica de la curva media con un entorno de confianza bootstrap al 95% indicó una tendencia irregular de este contaminante a lo largo del día, presentando un valor máximo de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:00.

Palabras Clave: Contaminación del aire; dióxido de azufre; software estadístico R; paquete fda.usc; análisis funcional.

Summary

The objective of the study is to analyze the functional data of sulfur dioxide measured in 2019 and 2020 in the historic center of Quito; For this purpose, the statistical software RStudio was used, with the package "fda.usc" (Analysis of functional data and utilities for statistical computing) version 2.0.2. Exploratory graphs, atypical curves, monthly graphs, graphs with mean curves and confidence bands were obtained. The results obtained from the study indicated that the behavior of sulfur dioxide is irregular throughout the day, presenting higher values around 07:00, reaching approximately 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. In order to observe this behavior, the atypical curves had to be eliminated; finding 26 atypical curves. When graphing the monthly average curves for the year 2019, it was observed that the highest averages correspond to the months of January, February, March, April and May; while the month with the lowest average corresponds to the month of August. The graph of the mean curve with a 95% bootstrap confidence setting indicated an irregular trend of this pollutant throughout the day, presenting a maximum value of 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ at 07:00.

Keywords: Air pollution; sulfur dioxide; R statistical software; fda.usc package; functional analysis.

Resumo

O objetivo do estudo é analisar os dados funcionais do dióxido de enxofre medidos em 2019 e 2020 no centro histórico de Quito; Para tanto, foi utilizado o software estatístico RStudio, com o pacote "fda.usc" (Análise de dados funcionais e utilitários para computação estatística) versão 2.0.2. Foram obtidos gráficos exploratórios, curvas atípicas, gráficos mensais, gráficos com curvas médias e faixas de confiança. Os resultados obtidos com o estudo indicaram que o comportamento do dióxido de enxofre é irregular ao longo do dia, apresentando valores mais elevados por volta das 07h00, atingindo aproximadamente 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para observar esse comportamento, as curvas atípicas tiveram que ser eliminadas; encontrando 26 curvas atípicas. Ao traçar as curvas médias mensais para o ano de 2019, observou-se que as maiores médias correspondem aos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio; enquanto o mês com menor média corresponde ao mês de agosto. O gráfico da curva média com 95% de confiança de bootstrap indicou uma tendência irregular deste poluente ao longo do dia, apresentando um valor máximo de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ às 07:00.

Palavras-chave: Contaminação do ar; dióxido de enxofre; software estatístico R; pacote fda.usc; Análise funcional.

Introducción

Las ciudades modernas medianamente y altamente pobladas sufren por contaminación proveniente de los vehículos automotores, entre los principales gases que emanan los tubos de escape de vehículos con motores de combustión interna se encuentra el dióxido de azufre.

El dióxido de azufre es el principal causante de la lluvia ácida ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico. Es liberado en muchos procesos de combustión ya que los combustibles como el carbón, el petróleo, el diésel o el gas natural contienen ciertas cantidades de compuestos azufrados. Por estas razones se intenta eliminar estos compuestos antes de su combustión por ejemplo mediante la hidrosulfuración en los derivados del petróleo o con lavados del gas natural haciéndolo más dulce (Ministerio de Ambiente de Colombia , 2021).

En el inventario de emisiones del Distrito Metropolitano de Quito 2003 indica que se generaron 6 009 toneladas anuales de dióxido de azufre, el 56% de las cuales tuvieron su origen en las fuentes

móviles, principalmente a diésel (40%); las fuentes fijas contribuyeron con el 44%, la mayor parte de lo cual (25,7%) corresponde a las centrales de generación termoeléctrica (Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito, 2006).

Al ser el dióxido de azufre un contaminante peligroso para la salud de las personas, a este gas hay que monitorearlo diariamente para que este no exceda los límites permisibles impuestos por la Organización Mundial de la Salud; para este fin el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito crea la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) para registrar y monitorear los contaminantes del aire presentes en el distrito.

Numerosos estudios utilizan el análisis funcional de datos para describir ciertos fenómenos físicos, teniendo como base datos meteorológicos, como temperatura, radiación solar, humedad, velocidad del viento, presión, entre otras; donde se utiliza el software estadístico de libre distribución R, con énfasis en el uso de las librerías `fda` y `fda.usc` para su descripción. (Allauca Pancho, 2021)

Metodología

El paradigma utilizado en la presente investigación es el paradigma positivista, con enfoque cuantitativo, el diseño utilizado es el diseño no experimental transversal.

Los datos con los que se desarrolló la presente investigación son los obtenidos en la base de datos de la Red Metropolitana de Monitores Atmosférico de Quito (REMMAQ) para los años 2019 y 2020.

La población son los datos del contaminante (dióxido de azufre) presentes en el aire en todo momento, mientras que la muestra son los datos registrados por la REMMAQ cada hora del día para los años 2019 y 2020.

El procesamiento de la información fue realizado de la siguiente manera:

- -Selección de datos de este contaminante para los años 2019 y 2020.
- -Creación de una hoja de cálculo en Microsoft Excel con los datos seleccionados.
- -Disposición de los datos en filas de manera cronológica para los días y en columnas para las horas del día.

- -Llenado de datos faltantes por medio de interpolación lineal.
- -Lectura de la hoja de Microsoft Excel en el software estadístico RStudio.
- -Suavizar la base de datos en el software RStudio.
- -Realizar el gráfico exploratorio de los datos funcionales del contaminante con ggplot2.
- -Hallar los datos atípicos.
- -Graficar las curvas medias mensuales de los datos funcionales del contaminante.
- -Determinar la curva media y la banda de confianza.

Resultados

Los resultados del estudio son presentados a continuación:

Curvas diarias:

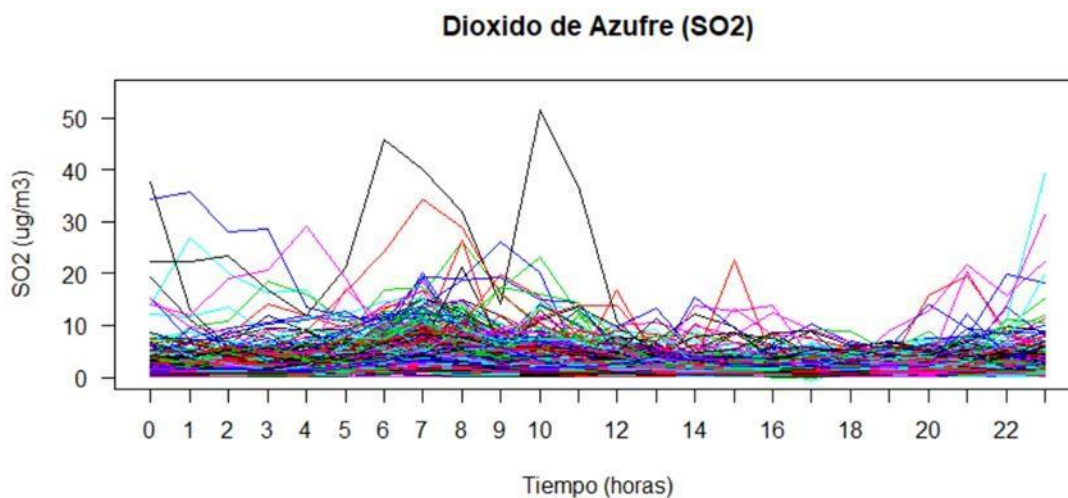


Figura 1: Curvas diarias del dióxido de azufre para los años 2019 y 2020

Realizado por: Allauca Fabián, 2021

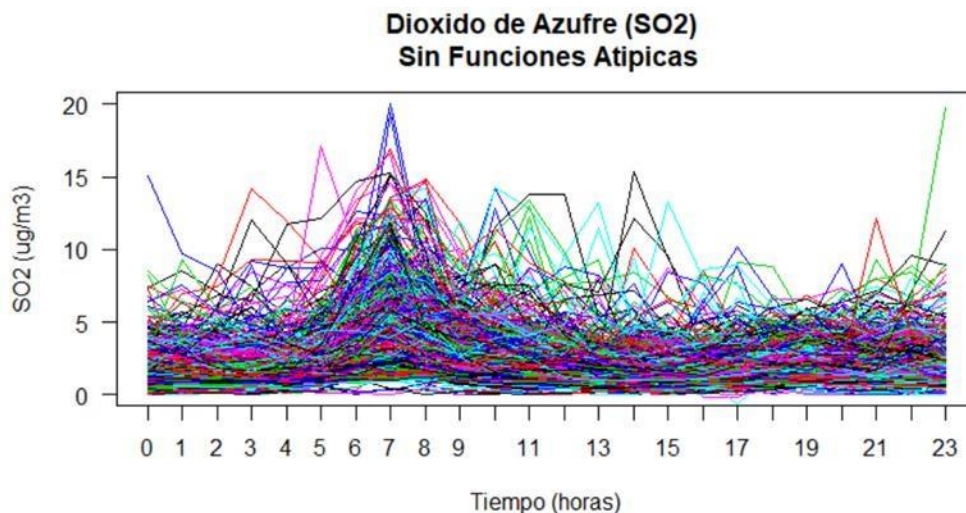


Figura 2: Curvas diarias del dióxido de azufre sin curvas atípicas

Realizado por: Allauca Fabián, 2021

Valores atípicos funcionales:

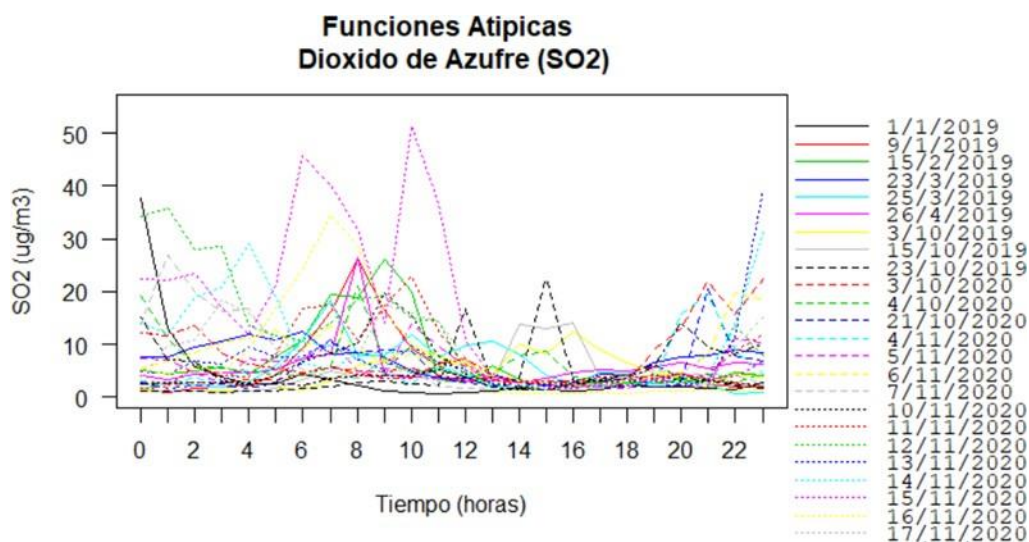


Figura 3: Funciones atípicas del dióxido de azufre para los años 2019 y 2020

Realizado por: Allauca Fabián, 2021

Curvas medias mensuales:

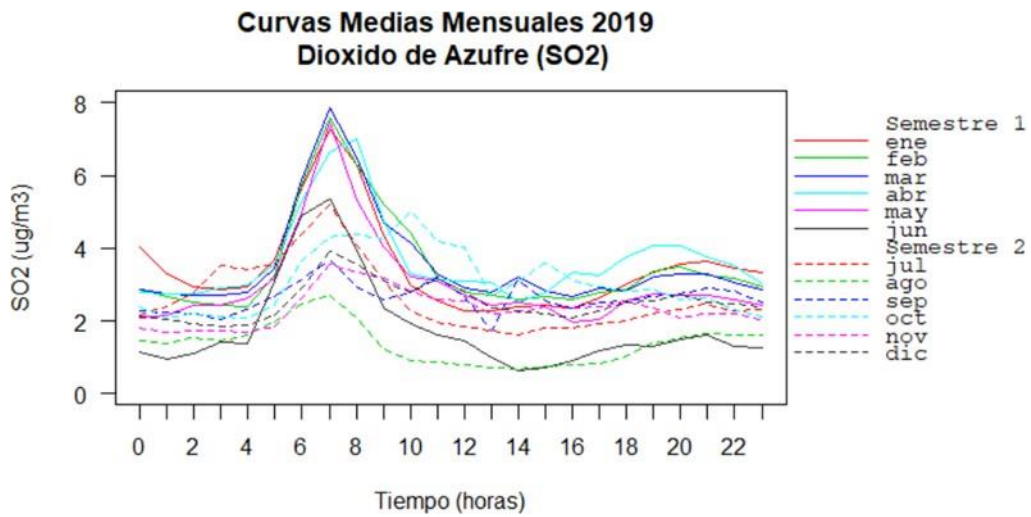


Figura 4: Curvas medias mensuales del dióxido de azufre para el año 2019
Realizado por: Allauca Fabián, 2021

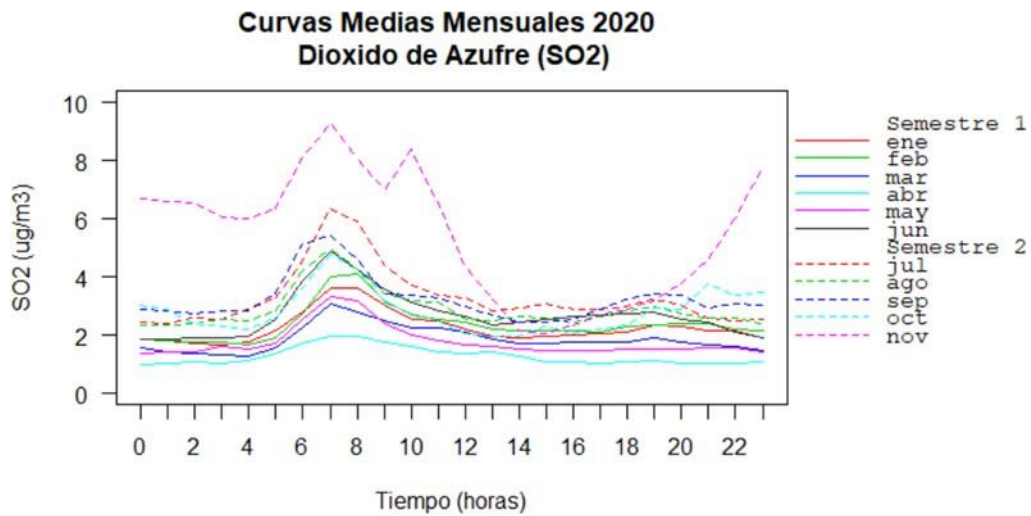


Figura 5: Curvas medias mensuales del dióxido de nitrógeno para el año 2020
Realizado por: Allauca Fabián, 2021

Curva media funcional con entorno de confianza bootstrap al 95%:

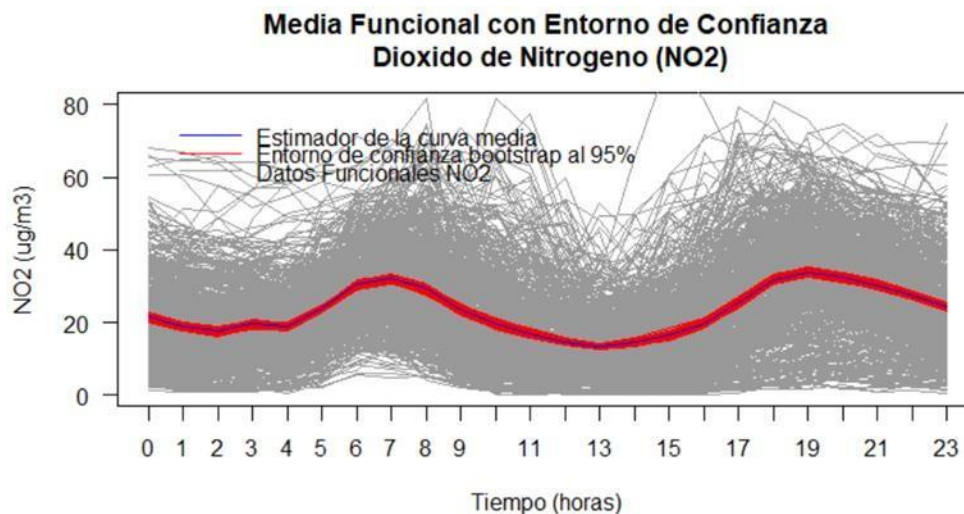


Figura 6: Estimador de curva media con entorno de confianza bootstrap al 95% del dióxido de azufre para los años 2019 y 2020

Realizado por: Allauca Fabián, 2021

Discusión

Curvas diarias:

En la Figura 1, se puede observar las 700 curvas diarias del dióxido de nitrógeno correspondiente a los años 2019 y 2020, en la cual se aprecia una tendencia de doble montaña, la primera teniendo como cumbre un valor aproximado de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 7 a 8 de la mañana, y la segunda teniendo como cumbre el mismo valor aproximado de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 5 a 6 de la tarde; correspondiendo estos picos o cumbres exactamente con las horas de máxima circulación vehicular. Cabe mencionar que el dióxido de nitrógeno tiene como una de sus fuentes de origen los procesos de combustión interna de motores diésel y gasolina de vehículos, representando el 80% para la ciudad de Quito en el año 2006. (Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito, 2006). Por este motivo se explicaría la tendencia que están tomando los datos de este contaminante.

Para tener una mayor visualización de la tendencia de la distribución de los datos funcionales para el dióxido de nitrógeno, se grafica sin curvas atípicas, la Figura 2, muestra la gráfica exploratoria sin estas curvas atípicas, pudiéndose apreciar de mejor manera la tendencia de doble montaña que

están tomando los datos, presentando sus cumbres alrededor de las 7 a 8 de la mañana y alrededor de las 5 a 6 de la tarde.

Valores atípicos funcionales:

Las curvas de los días atípicas corresponden a los siguientes días:

20, 22 y 24 de marzo de 2019

21 de septiembre de 2019

24 de octubre de 2019

14 de mayo de 2020

6, 7, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 23 y 27 de noviembre de 2020

La Figura 3 muestra 16 curvas de los días atípicos, estas curvas no concuerdan con la tendencia de la distribución de los datos para el dióxido de nitrógeno, ya que en algunas horas del día muestran valores más altos en comparación a las otras curvas. Se observa que el mes de noviembre de 2020 posee 10 días atípicos, pudiéndose deber posiblemente alguna falla del equipo recolector de datos o algún motivo que incremento la concentración de este contaminante.

Curvas medias mensuales:

Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas de las medias mensuales del dióxido de nitrógeno para los años 2019 y 2020 respectivamente. En la figura correspondiente al año 2019 se aprecia que las medias más altas corresponden a los meses de marzo y abril; mientras que los meses con medias más bajas corresponden a los meses de julio y agosto; coincidiendo de alguna manera con los meses de vacaciones escolares.

En la Figura 5 se aprecia un comportamiento de las medias, menor, sobre todo para los meses de marzo, abril y mayo de 2020 en comparación con las curvas del 2019, exceptuando el mes de noviembre de 2020, donde se pudo apreciar 10 días atípicos. Este comportamiento de las medias, menor en comparación con el año 2019, se puede deber a que en el año 2020 se produjo la pandemia

de covid-19, trayendo consigo un aislamiento y por ende a una menor circulación vehicular sobre todo en los meses de marzo, abril y mayo.

Curva media funcional con entorno de confianza bootstrap al 95%:

La media funcional para los datos del dióxido de nitrógeno se puede apreciar en la Figura 6, como también el entorno de confianza bootstrap al 95%. La curva media mostrada en color azul indica la tendencia vista anteriormente de doble montaña, donde las cumbres llegan a un valor de 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 6 a 8 de la mañana y un valor de 33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ alrededor de las 6 a 8 de la noche, y tomando un valor de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en su punto más bajo.

La Organización Mundial de la Salud recomienda una concentración media anual de dióxido de nitrógeno de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para que no exista daño a la salud de las personas. (Organización Mundial de la Salud, 2021). De acuerdo a la media funcional obtenida en esta investigación, la curva media no sobrepasa este valor, pero se está muy cerca de este valor medio. La temperatura ambiente y la presión atmosférica promedio a la que fueron tomados los datos son de 14.86°C y 0.718 atm. respectivamente.

Conclusiones

Los datos del dióxido de azufre (SO_2) describieron un comportamiento casi regular a lo largo del día, se visualizó picos alrededor de las 07:00 llegando a alcanzar aproximadamente los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observó 26 curvas atípicas, estas curvas no concuerdan con la tendencia de la distribución de los datos para el dióxido de azufre; el mes de noviembre de 2020 posee 13 días atípicos, pudiéndose deber posiblemente alguna falla del equipo recolector de datos o algún motivo que incremento la concentración de este contaminante.

La curva media para los datos del SO_2 llegó a un valor máximo de 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 07:00 y un valor aproximado de 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 19:00 y 21:00. Estos valores no representan daño para la salud de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud que recomienda una concentración media de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Referencias

1. LUMITOS AG. (19 de Febrero de 2021). QUIMICA.ES. Obtenido de https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%93xido_de_azufre_%28IV%29.html
2. Aguilera del Pino, M., & Aguilera Morillo, C. (2013). *Introducción al Análisis de Datos Funcionales con R*. Cádiz: Universidad de Cádiz. Dpto. Estadística e Investigación Operativa.
3. Arias Odón, F. (2012). *El proyecto de investigación. Introducción a la metodología científica*. Caracas: Editorias Episteme.
4. Benalcazar, G. (2005). *Espacios Normados y Aplicaciones*. Quito.
5. Consejería de Salud de la Región de Murcia. (21 de Junio de 2021). Murcia Salud. Obtenido de <http://www.murciasalud.es/pagina.php?id=180398#>
6. Córdoba, D., & Ramos, J. (2001). *Monóxido de Carbono*. Bogotá: Editorial el Manual Moderno.
7. Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito. (2006). *Inventario de emisiones del Distrito Metropolitano de Quito - 2003*. Quito: PPL Impresores. 2529 762-Quito.
8. Escudero Villa, A. I. (2014). *Análisis exploratorio funcional de los datos de radiación solar 2011 como soporte para la simulación de su comportamiento*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
9. Espín Mayorga, M. E., & Veloz Cuichán, S. M. (2013). *Evaluación de los efectos de la Calidad del Aire en la productividad de los cultivos en los barrios La Morita, La Tola, El Arenal, La Esperanza y Collaquí ubicados en la parroquia de Tumbaco, cantón Quito, provincia de Pichincha*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
10. Foster, M., & Costa, D. (2005). *Air Pollutants and the Respiratory Tract*. Lung Biology in Health and Disease.
11. Fundación Aquae. (3 de Febrero de 2021). AQUAE FUNDACIÓN. Obtenido de www.fundacionaquae.org/causas-contaminacion-ambiental/
12. Gobierno de España. (19 de Febrero de 2021). Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidoss-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>
13. Grajales, T. (25 de Septiembre de 2017). *Tipos de Investigación*. Recuperado el 27 de 3 de 2000, de <http://tgrajales.net/investipos.pdf>

14. Granda, J. B. (2015). Manual de metodología de la investigación científica. Chimbote - Perú: Universidad Católica los Ángeles Chimbote.
15. Guerrón Varela, E. R. (2015). Análisis de datos meteorológicos del Valle de los Chillos usando datos funcionales. Quito: Universidad San Francisco de Quito.
16. Gutiérrez, J., Romieu, I., Corey, G., & Fortoul, T. (1997). Contaminación del aire, riesgos para la salud. México DF: UNAM/El Manual Moderno.
17. Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación. México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
18. Instituto para la Salud Geoambiental. (19 de Febrero de 2021). Instituto para la Salud Geoambiental - Un ser vivo, un entorno sano. Obtenido de <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-nitrogeno-no2>
19. Kreyszig, E. (1978). Introductory Functional Analysis with Applications. New York: University of Windsor.
20. Meneses, E., Turtós, L., & Molina, E. (2004). Mejoras en la estimación de las externalidades de la generación eléctrica en Cuba. Revista electrónica Ecosolar, 7. Obtenido de <http://www.cubasolar.org/biblioteca/ecosolar.htm>
21. Ministerio de Ambiente de Colombia . (19 de Febrero de 2021). IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/los-agentes-precursores-de-la-lluvia-acida>
22. Ministerio de Educación. (24 de Junio de 2021). Ministerio de Educación. Obtenido de <https://educacion.gob.ec/calendario-escolar/>
23. Ministerio de Salud Pública. (24 de Junio de 2021). Ministerio de Salud Pública. Obtenido de <https://www.salud.gob.ec/noticias/>
24. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (3 de Febrero de 2021). Secretaría de Ambiente. Obtenido de <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/politicas-y-planeacion-ambiental/red-de-monitoreo>
25. Navarro Pérez, V. (2004). Análisis de Datos Funcionales. Implementación y Aplicaciones. Catalunya: Universidad Politécnica de Catalunya.
26. Organización Mundial de la Salud. (22 de Junio de 2021). Organización Mundial de la Salud. Obtenido de [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)

27. Organización Panamericana de la Salud. (3 de Enero de 2005). Contaminación ambiental. Obtenido de <http://www.paho.org>
28. Pérez Montilla, A. (2018). Métodos avanzados de análisis de Datos Funcionales. Puerto Real: Universidad de Cádiz.
29. Pérez Plaza, S. M. (2020). Estudio y aplicación de técnicas de Análisis de Datos Funcionales de geoposicionamiento. Puerto Real: Universidad de Cádiz.
30. Picón Llamas, D. M. (2019). Análisis de Datos Funcionales aplicado a datos de temperatura en España. Valladolid: Universidad de Valladolid.
31. Ricoy Lorenzo, C. (2006). Contribución sobre los paradigmas de investigación. Revista do Centro de Educação, 11-22.
32. Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, 44.
33. Salini Calderón, G. A. (2014). Estudio Acerca del Material Particulado Emitido en Ciudades de Tamaño Medio al Sur de Santiago de Chile. Revista INGE CUC, 97-108.
34. Sanchiz, J. (2014). El ozono atmosférico. Revista Tiempo y Clima, 15.
35. Torres, W. (2002). Biología de las especies de oxígeno reactivas. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
36. U.S Environmental Protection Agency. (2001). National air quality 2001 status and trends. Carbon Monoxide. Washington, D.C: EPA.
37. Yassi, A., Kjellstrom, T., de Kok, T., & Guidotti. (2002). Salud Ambiental Básica. Maxico DF: PNUMA.