



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**Máster en Física**

**Investigación acerca de un núcleo urbano como  
foco y sumidero de contaminantes**

***Autora: Nely Cruz Martínez***

***Tutor/es:***

***Isidro Alberto Pérez Bartolomé y María Ángeles García Pérez***

## Tabla de contenido

ABSTRACT/RESUMEN.....	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. Objetivos .....	6
1.2. Antecedentes.....	7
1.2.1. Análisis de contaminantes .....	7
1.2.2. Contaminación del aire urbano .....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	8
2.1. Contaminación atmosférica .....	9
2.2. Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	10
2.3. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	10
2.4. Material Particulado .....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
3.1. Indicadores estadísticos .....	12
3.1.1. Área de estudio .....	12
3.1.2. Recopilación de datos .....	13
3.1.3. Procesamiento de datos.....	13
3.1.4. Cálculo de la mediana.....	14
3.1.5. Cálculo del rango intercuartil .....	14
3.1.6. Cálculo del índice Yule-Kendall .....	15
3.1.7. Cálculo de la curtosis robusta .....	15
3.2. Análisis de tendencia temporal.....	15
3.3. Contrastar los niveles medios de contaminantes.....	15
3.3.1. Curvas de nivel de concentración .....	16
3.4. Identificar zonas en el área de estudio que se consideran focos y sumideros .....	16
3.4.1. Definición de focos y sumideros .....	16
3.4.2. Método de identificación de focos y sumideros de contaminación .....	17
3.4.3. Validación de resultados .....	17
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	18
4.1. Cálculo de los diferentes indicadores estadísticos .....	18
4.2. Análisis de la tendencia temporal de los niveles de contaminación atmosférica .....	19
4.2.1. Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	19
4.2.2. Ozono troposférico O <sub>3</sub> .....	20
4.2.3. Partículas PM <sub>10</sub> .....	20
4.2.4. Partículas PM <sub>2,5</sub> .....	21
4.3. Contraste de los niveles medios de contaminantes .....	22
4.3.1. Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	23

4.3.2. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	24
4.3.3. Material particulado PM <sub>10</sub> .....	26
4.3.4. Material particulado PM <sub>2.5</sub> .....	28
4.4. Identificación de focos y sumideros en el área de estudio .....	30
4.4.1. Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	31
4.4.2. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	32
4.4.3. Material particulado PM <sub>10</sub> .....	33
4.4.4. Material particulado PM <sub>2.5</sub> .....	33
5. CONCLUSIONES .....	35
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
ANEXO A. Medianas NO <sub>2</sub> .....	40
ANEXO B. Medianas O <sub>3</sub> .....	42
ANEXO C. Medianas PM <sub>10</sub> .....	44
ANEXO D. Medianas PM <sub>2.5</sub> .....	47

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Formación de la isla del calor.	9
Figura 2. Mapa ayuntamiento, Birmingham.	13
Figura 3. Región de estudio.	14
Figura 4. Relación fuente receptor en contaminación atmosférica.	17
Figura 5. Mediana Dióxido de Nitrógeno $\text{NO}_2$ , Birmingham (2007-2011).	19
Figura 6. Mediana Ozono Troposférico $\text{O}_3$ , Birmingham (2007-2011).	20
Figura 7. Mediana partículas $\text{PM}_{10}$ , Birmingham (2007-2011).	21
Figura 8. Mediana partículas $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham (2007-2011).	22
Figura 9. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham 2007.	23
Figura 10. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham (2007-2011).	24
Figura 11. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham 2007.	25
Figura 12. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham (2007-2011).	26
Figura 13. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham 2007.	27
Figura 14. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham (2007-2011).	28
Figura 15. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham 2007.	29
Figura 16. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham (2007-2011).	30
Figura 17. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros $\text{NO}_2$ , Birmingham (2007-2011).	31
Figura 18. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros $\text{O}_3$ , Birmingham (2007-2011).	32
Figura 19. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros $\text{PM}_{10}$ , Birmingham (2007-2011).	33
Figura 20. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham (2007-2011).	34
Figura 21. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham 2008.	40
Figura 22. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham 2009.	41
Figura 23. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham 2010.	41
Figura 24. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{NO}_2$ , Birmingham 2011.	42
Figura 25. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham 2008.	43
Figura 26. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham 2009.	43
Figura 27. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham 2010.	43
Figura 28. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{O}_3$ , Birmingham 2011.	44
Figura 29. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham 2008.	45
Figura 30. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham 2009.	45
Figura 31. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham 2010.	45
Figura 32. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{10}$ , Birmingham 2011.	46
Figura 33. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham 2008.	47
Figura 34. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham 2009.	47
Figura 35. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham 2010.	48
Figura 36. Curvas de nivel de concentración Mediana $\text{PM}_{2.5}$ , Birmingham 2011.	48

## **ABSTRACT/RESUMEN**

### **ABSTRACT**

This research analyses atmospheric pollution in Birmingham and its outskirts from 2007 to 2011, focusing on NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>10</sub>. Using statistical indicators such as the median, interquartile range, Yule-Kendall index, and robust kurtosis, the distribution and temporal trends of these pollutants were assessed. Results show stability in NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> medians, with significant annual fluctuations reflected in high standard deviations. The negative trend in the Yule-Kendall index suggests improved air quality due to environmental policies and regulations.

Spatially, NO<sub>2</sub> levels are highest in central Birmingham and densely populated areas like Harborne and Kings Heath, while peripheral areas like Hagley and Stourbridge act as sinks. Tropospheric ozone (O<sub>3</sub>) has higher concentrations in peripheral zones like Shirley and Redditch, due to reduced pollutant dispersion and wind influences. The distribution of particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) does not show clear trends for specific hotspots or sinks. The research highlights the need for continuous monitoring and localized environmental control strategies, emphasizing Birmingham's suitability as a study area due to its population density and intense industrial activity.

### **RESUMEN**

Esta investigación analiza la contaminación atmosférica en Birmingham y su periferia entre 2007 y 2011, enfocándose en los contaminantes NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. A través de indicadores estadísticos como la mediana, el rango intercuartílico, el índice Yule-Kendall y la curtosis robusta, se evaluó la distribución y tendencia temporal de estos contaminantes. Los resultados indican una estabilidad en las medianas de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, aunque con fluctuaciones anuales significativas reflejadas en las desviaciones estándar altas. La tendencia negativa en el índice Yule-Kendall sugiere una mejora en la calidad del aire, atribuible a políticas y regulaciones ambientales.

Espacialmente, los niveles de NO<sub>2</sub> son más altos en el centro de Birmingham y áreas densamente pobladas como Harborne y Kings Heath, mientras que áreas periféricas como Hagley y Stourbridge actúan como sumideros. El ozono troposférico (O<sub>3</sub>) muestra mayores concentraciones en zonas periféricas como Shirley y Redditch, debido a la menor dispersión de contaminantes y la influencia de vientos. La distribución del material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) no muestra una tendencia clara para identificar focos o sumideros específicos. La investigación subraya la necesidad de un monitoreo continuo y estrategias de control ambiental adaptadas a características locales, destacando a Birmingham como un área de estudio ideal por su densidad poblacional y su intensa actividad industrial.

## 1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire representa uno de los mayores desafíos ambientales y de salud pública en la actualidad, con consecuencias devastadoras para la calidad de vida y el bienestar de las poblaciones urbanas. El reconocimiento de la relación entre la contaminación atmosférica y diversas enfermedades no transmisibles, como la cardiopatía isquémica, los accidentes cerebrovasculares y el cáncer, ha llevado a importantes iniciativas globales para abordar esta problemática. La resolución histórica emitida por la Asamblea Mundial de la Salud en 2015 sobre la calidad del aire subraya la necesidad urgente de tomar medidas para proteger la salud pública y mitigar los efectos adversos de la contaminación.

A pesar de los esfuerzos por monitorear y controlar la calidad del aire, la situación sigue siendo preocupante. Según el informe de prensa de la OMS en abril de 2022, casi la totalidad de la población mundial (99%), respira un aire que excede los límites de calidad recomendados, lo que representa un grave riesgo para la salud pública. Birmingham, como muchas otras ciudades, no está exenta de esta problemática. Aunque se han logrado avances en la vigilancia de la calidad del aire, los residentes de Birmingham aún enfrentan niveles perjudiciales de contaminantes.

Además, la OMS advierte que no existe un nivel seguro de contaminación del aire, a pesar de que las legislaciones establecen límites que no deben superarse. Esto implica que incluso los contaminantes presentes en niveles apenas por debajo del umbral legal continúan teniendo efectos negativos en la salud. Si bien algunos contaminantes son inevitables, es crucial minimizar aquellos causados por actividades humanas tanto como sea posible (Birmingham City Council, 2019).

La intensa actividad industrial y el aumento de emisiones vehiculares son factores clave que contribuyen a los altos niveles de contaminación del aire en áreas urbanas (Ding, 2024). Lo preocupante es que la mayor parte de la población mundial reside en estas zonas urbanas, donde se observan mayores concentraciones de contaminantes como  $PM_{2.5}$  en comparación con las áreas rurales (Ming et al., 2021; Yu et al., 2019). Estas partículas, en su mayoría, son generadas por actividades propias del sector urbano, lo que subraya la influencia directa de las actividades humanas en la calidad del aire (Han et al., 2024).

Por lo tanto, el presente trabajo propone abordar esta problemática específicamente en la ciudad de Birmingham, donde se evidencia una importante actividad industrial y una alta densidad de tráfico vehicular. Se toma como base de estudio esta ciudad ya que, siendo la más grande y poblada del Reino Unido fuera de Londres, representa de manera significativa la exposición típica de la población a la contaminación atmosférica, es decir, ofrece un contexto único para este análisis.

Al analizar y comprender el comportamiento de los contaminantes del aire en esta área, empleando técnicas de procesamiento y análisis estadístico clásico y espacial, se busca no solo proporcionar una visión integral de los desafíos asociados con la calidad del aire, sino identificar tanto fuentes de contaminación, como los sumideros que contribuyen a la dispersión de los contaminantes en el aire. Este enfoque metodológico permitirá tener una comprensión más profunda de la distribución espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos en la región de Birmingham.

### 1.1. Objetivos

Debido al impacto de la contaminación ambiental sobre la salud, se propone llevar a cabo una investigación utilizando métodos estadísticos clásicos y espaciales para analizar la distribución y evolución de algunos de los contaminantes más perjudiciales, incluyendo el dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), ozono ( $O_3$ ),  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ .

La investigación estará enfocada en contrastar los niveles de contaminación atmosférica entre la ciudad de Birmingham y sus áreas periféricas, con el objetivo de evaluar la distribución espacial de

los contaminantes mencionados, y determinar focos y sumideros. El análisis se centrará en explorar la distribución de los contaminantes mencionados en la zona de estudio, identificando características como valores atípicos, máximos y mínimos, distribución espacial, entre otros aspectos.

Para llevar a cabo esta investigación, se establecerán los siguientes objetivos específicos:

- Calcular los diferentes indicadores estadísticos como la mediana, el rango intercuartílico, el índice Yule-Kendall y la curtosis robusta a partir de los datos de estaciones de monitoreo.
- Analizar la tendencia temporal de los niveles de contaminación atmosférica ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{PM}_{10}$ ) en el núcleo urbano de Birmingham y sus áreas periféricas desde el 1 enero de 2007 a 31 de diciembre de 2011.
- Contrastar los niveles medios de contaminantes entre el centro urbano de Birmingham y sus áreas periféricas a lo largo del periodo de estudio.
- Identificar focos y sumideros en el área de estudio.

## 1.2. Antecedentes

Para esta investigación, se realizó una revisión de la literatura, centrándose en dos enfoques principales: el análisis de contaminantes y la contaminación del aire urbano. En el primer enfoque, se enfatizó en examinar detalladamente los contaminantes relevantes para el estudio, como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el ozono ( $\text{O}_3$ ), material particulado de diámetro aerodinámico inferior a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y material particulado de menos de  $2,5\ \mu\text{m}$  de diámetro ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Se analizó su comportamiento, sus fuentes de emisión, sus efectos en la salud humana y su impacto ambiental. Para el segundo enfoque, se exploró el comportamiento de estos contaminantes en entornos urbanos y su periferia. Se examinaron las diferencias en la concentración de contaminantes entre las áreas urbanas densamente pobladas y las zonas periféricas menos densas. Además, se investigaron los patrones de dispersión y acumulación de contaminantes en áreas urbanas, considerando factores como la topografía, la actividad industrial, el tráfico vehicular y la densidad de población.

### 1.2.1. Análisis de contaminantes

Los estudios revisados proporcionan un panorama completo de la dinámica y los efectos de la contaminación atmosférica en diferentes contextos. Inicialmente, se exploró el comportamiento del material particulado  $\text{PM}_{10}$  a lo largo del día, considerando variables como el día de la semana y los niveles de precipitación (Reina & Olaya, 2012). Este análisis reveló patrones significativos que ayudan a comprender mejor la variabilidad temporal de la contaminación en el aire.

Posteriormente, se examinó la relación entre la temperatura y los contaminantes atmosféricos, destacando cómo las olas de calor pueden desencadenar aumentos sustanciales en los niveles de contaminantes, especialmente ozono y  $\text{PM}_{10}$ , tanto en áreas urbanas como rurales (Kalisa et al., 2018). Este hallazgo resalta la importancia de considerar factores meteorológicos al estudiar la contaminación atmosférica y sus efectos.

Además, se identificaron tendencias temporales en la concentración de ozono, donde se observa una disminución en verano en áreas menos urbanizadas y un aumento en invierno en áreas más urbanizadas (Han et al., 2023). Estas tendencias sugieren una influencia significativa del desarrollo urbano en la distribución y concentración de contaminantes atmosféricos.

En cuanto a metodologías de análisis, se destacaron enfoques estadísticos y de modelado para evaluar la contaminación del aire y su distribución de fuentes. Chen et al. (2018) desarrollaron un método de ajuste estadístico temporal para eliminar la confusión meteorológica en los datos de calidad del aire, lo que facilita la comparación temporal de las concentraciones de contaminantes. Por otro lado, Bove et al. (2014) emplearon dos enfoques para determinar la distribución de fuentes de  $\text{PM}_{2.5}$ , lo que

permitió una comprensión más detallada de la composición y el origen de estas partículas en la atmósfera de Génova.

Finalmente, se exploraron los efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana y la evolución de las emisiones de partículas a lo largo del tiempo. Estos estudios revelaron la complejidad de los impactos de la contaminación en la salud y la importancia de identificar fuentes específicas de contaminantes para desarrollar estrategias efectivas de mitigación (Daellenbach et al., 2020; Power et al., 2023).

### **1.2.2. Contaminación del aire urbano**

Los estudios revisados proporcionan una visión detallada de las complejas características temporales y espaciales de la contaminación del aire en entornos urbanos y suburbanos. Ding et al. (2024) investigaron los patrones espaciotemporales de contaminación del aire y su relación con elementos urbanos, como el tráfico vehicular, lo que resalta la importancia de comprender las interacciones entre la contaminación y la actividad humana en áreas urbanas.

Además, Pérez et al. (2024) y Cañada et al. (2017) analizaron la distribución de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en el centro de la ciudad y sus alrededores, observando una distribución opuesta entre estos contaminantes. Los hallazgos de Cañada et al. (2017), que emplearon datos registrados en estaciones de superficie y estimaciones mediante interpolación espacial, destacan la importancia de considerar la dependencia espacial entre NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> para caracterizar y diagnosticar la atmósfera urbana utilizando modelos espaciales.

Por otro lado, el estudio de Prieto et al. (2021) proporciona una perspectiva adicional sobre las distribuciones espaciotemporales de varios contaminantes en Inglaterra y Gales, identificando dos ejes de contaminación por NO<sub>2</sub> en el sur y el norte del país. Este análisis destaca la variabilidad geográfica de la contaminación atmosférica y la necesidad de medidas adaptadas a cada región.

Finalmente, el estudio de Wang (2008) en Taiwán revela la contribución significativa de las emisiones industriales a la contaminación del aire en la ciudad de Kaohsiung y sus áreas circundantes. Estos hallazgos sugieren que la reducción de las emisiones industriales en Kaohsiung podría tener un impacto positivo en la calidad del aire de toda la región, beneficiando tanto a la ciudad como a las áreas adyacentes.

En conjunto, estos estudios enfatizan la importancia de considerar tanto las dimensiones temporales como espaciales de los contaminantes.

## **2. MARCO TEÓRICO**

En este apartado se aborda el concepto de contaminación atmosférica y diferentes contaminantes como lo son NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, conceptos fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

## 2.1. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica, según lo señalado por Echeverri (2019), abarca diversas manifestaciones y causas, siendo comúnmente definida como la alteración del aire provocada por las actividades humanas, como las emisiones de gases vehiculares, industriales y domésticos, así como incendios forestales y desechos industriales y domésticos. Sin embargo, también puede surgir de fenómenos naturales, como la dispersión del polen y las erupciones volcánicas. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) la define como la presencia de sustancias extrañas en el aire, en ciertas concentraciones y períodos de tiempo, que pueden ser perjudiciales para la salud humana, animal, vegetal y el medio ambiente en general.

Por su parte, para Public Health England, la contaminación del aire se describe como una mezcla compleja de partículas y gases, tanto de origen natural como humano. Entre los componentes destacados de la contaminación del aire urbano se encuentran las partículas en suspensión (PM) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) resaltando la importancia de comprender la variedad de elementos que contribuyen a la contaminación del aire en entornos urbanos y subrayando la relevancia de identificar y abordar los contaminantes específicos presentes en estos ambientes.

Para este trabajo, es importante destacar como la presencia de núcleos urbanos influye significativamente en el movimiento de las masas de aire, reduciendo su velocidad debido a la presencia de edificios que obstaculizan su trayectoria y generan turbulencia debido a la disposición de las calles. Además, el efecto isla de calor, que se observa en las áreas urbanas, contribuye a que la temperatura en el interior de la ciudad sea considerablemente más alta que en su periferia, como se ilustra en la Figura 1, debido al calor liberado por los edificios y el pavimento. Esta diferencia de temperatura promueve la formación de brisas urbanas, que son circulaciones cíclicas de las masas de aire frío desde la periferia hacia el interior de la ciudad. Estas brisas urbanas se originan por el ascenso del aire caliente desde el interior de la ciudad, creando una situación de bajas presiones que atraen las masas de aire frío desde la periferia hacia el centro urbano. Estos fenómenos combinados dificultan considerablemente la dispersión de contaminantes en las zonas urbanas.

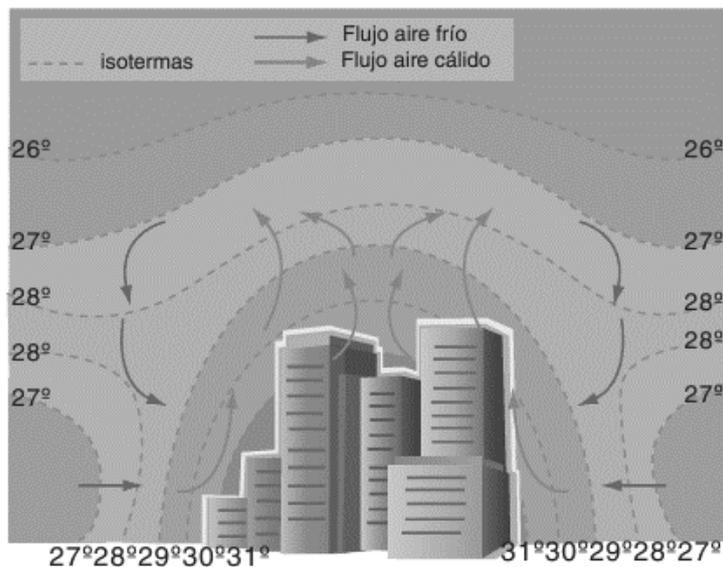


Figura 1. Formación de la isla del calor. ([www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf](http://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf))

Por lo tanto, la comprensión de la contaminación atmosférica implica no solo analizar detenidamente los distintos contaminantes que la componen, sino también considerar la ubicación y el terreno en el que se encuentran. De acuerdo con el documento sobre contaminación atmosférica (McGraw-Hill Education, 2024), la distribución de los contaminantes del aire varía significativamente según la

geografía local, la densidad de población, las fuentes de emisión y las condiciones meteorológicas. Factores como la topografía pueden influir en la dispersión y acumulación de contaminantes; por ejemplo, las áreas valladas pueden atrapar el aire contaminado, mientras que las zonas abiertas pueden facilitar su dispersión.

## **2.2. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

El NO<sub>2</sub> es un gas que se produce junto con el óxido nítrico (NO) mediante procesos de combustión. Juntos suelen denominarse óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

En el aire exterior, la principal fuente de NO (y por tanto de NO<sub>2</sub>) es el tráfico, pero también se produce por la quema de combustibles fósiles en las centrales eléctricas y por la industria. Los niveles de NO<sub>2</sub> al aire libre tienden a ser más altos en los meses de invierno y en las zonas urbanas. El NO<sub>2</sub> se considera muy preocupante con respecto a la salud. En altas concentraciones actúa como irritante y provoca inflamación de las vías respiratorias. Al afectar las células inmunitarias de los pulmones, también puede aumentar la susceptibilidad a infecciones respiratorias y alérgicas. Ha sido difícil investigar los efectos directos del NO<sub>2</sub> en la salud en concentraciones ambientales porque se emite desde las mismas fuentes (en particular el tráfico) que otros contaminantes como las partículas. El Comité sobre los Efectos Médicos de los Contaminantes del Aire (COMEAP) ha determinado que la exposición a corto plazo a niveles elevados de NO<sub>2</sub>, especialmente, puede irritar las vías respiratorias, causando síntomas como tos, producción excesiva de moco y dificultad para respirar. Estudios han asociado la exposición al NO<sub>2</sub> en el aire exterior con un desarrollo pulmonar reducido e infecciones respiratorias en la infancia temprana, así como efectos adversos en la función pulmonar en la edad adulta.

El NO<sub>2</sub> se considera a menudo como un marcador de la presencia de otros contaminantes relacionados con el tráfico. Según estimaciones del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (DEFRA) del Reino Unido, aproximadamente el 80 % de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en áreas donde se exceden los límites de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) se originan en el transporte, siendo los vehículos ligeros diésel (como coches y furgonetas) la principal fuente de emisión. Otras fuentes incluyen la generación de energía, procesos industriales y la calefacción doméstica.

Según un informe del Office for National Statistics (s.f.), en áreas urbanas como Birmingham, los niveles de dióxido de nitrógeno pueden ser 10 veces más altos en comparación con las áreas con el aire "más limpio" del Reino Unido. La fuente dominante son las emisiones del tráfico rodado, que representan dos tercios (66 %) de toda la contaminación del aire.

## **2.3. Ozono (O<sub>3</sub>)**

El O<sub>3</sub> es un gas y se encuentra tanto en la atmósfera superior de la Tierra como a nivel del suelo. En el nivel del suelo, el O<sub>3</sub> troposférico, no se emite directamente al aire, sino que se crea mediante reacciones fotoquímicas en las que participan los contaminantes precursores NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles (COV).

Por tanto, el ozono (O<sub>3</sub>) es un gas contaminante secundario, formado por reacciones fotoquímicas en las capas superiores de la atmósfera (la estratosfera) por la acción de la luz ultravioleta sobre las moléculas de oxígeno. Esto produce la capa de ozono y en este nivel el gas tiene un efecto beneficioso al actuar como filtro de luz ultravioleta. En la atmósfera inferior, el O<sub>3</sub> se produce por el efecto fotoquímico de la luz solar sobre los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles producidos por los vehículos de motor y la industria. Estas reacciones tienen lugar durante períodos de varias horas o incluso días. Una vez formado, el O<sub>3</sub> puede viajar largas distancias, acumularse y

alcanzar altas concentraciones, a menudo lejos de las fuentes de los contaminantes originales. El  $\text{NO}_x$  emitido en las ciudades reduce las concentraciones locales de  $\text{O}_3$  ya que el  $\text{NO}$  reacciona con el  $\text{O}_3$  para formar  $\text{NO}_2$ . Esto significa que los precursores de  $\text{O}_3$  generados en países con mucho tráfico y emisiones industriales pueden afectar a países menos contaminados, y que los niveles de  $\text{O}_3$  en el aire suelen ser más altos en las zonas rurales que en las urbanas. Por ejemplo, suele ocurrir que cuando los niveles de  $\text{O}_3$  son elevados en el sudeste de Inglaterra, gran parte del  $\text{O}_3$  se origina en Europa continental.

En el Reino Unido, la mayoría del ozono presente se debe a las emisiones de metano del propio Reino Unido y al ozono generado a partir de emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{COV}$  provenientes del extranjero (Air Quality Expert Group, 2021).

La relación entre las concentraciones de ozono y sus precursores complica la evaluación y control de la exposición al ozono. Estos precursores pueden reaccionar químicamente para formar ozono, aunque otros contaminantes, como el óxido nítrico de los gases de escape de los vehículos, pueden inhibir su formación o reducir sus niveles. Es crucial considerar tanto la cantidad como la proporción de contaminantes en la atmósfera (como  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{COV}$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{CH}_4$ ) para entender los efectos colaterales de controlar otros contaminantes. Además, una vez formado, el ozono puede desplazarse a grandes distancias, alcanzando concentraciones elevadas lejos de sus fuentes originales de emisión (Department for Environment, Food & Rural Affairs, 2024).

## 2.4. Material Particulado

Respecto al material particulado (PM) se refiere a una mezcla compleja de partículas sólidas y líquidas de diversos tamaños, formas y composiciones, es decir las partículas en suspensión (PM) comprenden una diversidad de compuestos y materiales químicos presentes en el aire, excluyendo los gases. Según la OMS algunas de estas partículas, debido a su diminuto tamaño, pueden ingresar al cuerpo a través de la respiración y distribuirse por todo el organismo, alcanzando órganos vitales como el corazón, el cerebro y otros tejidos. Como resultado, la exposición a las PM puede tener consecuencias graves para la salud, especialmente en poblaciones vulnerables como los niños, los ancianos y aquellos con afecciones respiratorias.

El tamaño de las partículas y la duración de la exposición son factores clave que determinan los posibles efectos adversos para la salud. Las partículas con un diámetro superior a  $10\ \mu\text{m}$  tienden a depositarse principalmente en la nariz o la garganta, mientras que aquellas con un diámetro inferior a  $10\ \mu\text{m}$  presentan un mayor riesgo, ya que pueden penetrar más profundamente en los pulmones. La exposición a PM se ha relacionado con un aumento en la mortalidad y la morbilidad por enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como un riesgo potencial de cáncer (Chief Medical Officer's Annual Report 2022).

El informe del Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales del Reino Unido aborda la importancia de las partículas en suspensión (PM) en la calidad del aire y sus impactos en la salud pública. Las PM, clasificadas según su tamaño en  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2,5}$ , provienen tanto de fuentes naturales como de actividades humanas, siendo estas últimas responsables de la mitad de las concentraciones de PM en el Reino Unido. Las emisiones de PM están estrechamente ligadas a diversas actividades industriales y comerciales, así como a la quema de combustibles y otros procesos. El informe destaca la necesidad de reducir las emisiones de  $\text{PM}_{2,5}$  para cumplir con los compromisos internacionales, como el Protocolo de Gotemburgo, y resalta la importancia de monitorear y evaluar constantemente los niveles de emisiones para informar sobre el progreso hacia estos objetivos.

En este sentido, el Reino Unido está concentrando sus esfuerzos en calcular las fracciones de emisiones de partículas en suspensión (PM) que tienen un diámetro inferior a  $10\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y menos de  $2,5\ \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ ). Este enfoque se fundamenta en el consenso científico y en la evidencia acumulada

a lo largo del tiempo sobre cómo las partículas de diversos tamaños afectan el sistema respiratorio al ser inhaladas y absorbidas por los pulmones.

En la ciudad de Birmingham, la fuente dominante de partículas proviene de la quema doméstica de combustibles sólidos. Otras fuentes importantes incluyen las emisiones del tráfico rodado, el desgaste de los neumáticos, las pastillas de freno, los generadores diésel, las hogueras, las emisiones de las fábricas, la demolición y la construcción, la salinización de las carreteras y los trabajos en obras. Y también puede proceder de fuentes naturales como las arenas del Sahara.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo esta *investigación acerca de un núcleo urbano como foco y sumidero de contaminantes* se desarrollaron las siguientes etapas:

#### 3.1. Indicadores estadísticos

##### 3.1.1 Área de estudio

Se toma como lugar de investigación la ciudad de Birmingham, Figura 2, ya que cuenta con una rica historia industrial y desarrollo económico, tiene un escenario singular, dado que en sus áreas urbanas los niveles de dióxido de nitrógeno pueden ser 10 veces más altos en comparación con las áreas con el aire "más limpio" del Reino Unido. En esta ciudad la fuente dominante son las emisiones del tráfico rodado, que representan dos tercios (66 %) de toda la contaminación del aire, sin contar el aporte que genera otras fuentes de contaminación como calderas de biomasa, exhibidores de fuegos artificiales, generadores diésel, demolición y construcción, hogueras, estufas de leña y emisiones industriales. Esta ciudad presenta una geografía variada, que abarca desde áreas urbanas densamente pobladas hasta amplios espacios verdes. Tiene una población de más de 1 millón de residentes repartidos en un área de aproximadamente 26.777 hectáreas.

Tiene una densidad de población de 36,5 habitantes por hectárea, la ciudad experimenta una importante concentración de actividades urbanas, lo que añade complejidad a su dinámica ambiental y resalta la importancia de analizar la distribución de sus contaminantes.

Esta ciudad muestra preocupación por las partículas en suspensión como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> constituidas principalmente por diminutos fragmentos de polvo, tan pequeños que resultan invisibles a simple vista.

Para abordar esta preocupación, la ciudad ha implementado estrategias y políticas específicas basada en la legislación del Reino Unido destinadas a mitigar la contaminación del aire, ejemplo de esto es como a principios de las décadas de los 2000 Birmingham declaró oficialmente un Área de Gestión de la Calidad del Aire (AQMA) para dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), lo que llevo posteriormente introducir la Estrategia de Calidad del Aire en 2006, revisada en 2011. Además, la evaluación nacional llevada a cabo por su Gobierno, utilizando el Modelo de Mapeo Climático de Contaminación (PCM), identificó el centro de la ciudad de Birmingham como un punto crítico de contaminación del aire, trayendo consigo la implementación de medidas urgentes para reducir la contaminación, como la instauración de la Zona de Aire Limpio (Birmingham City Council, 2022).

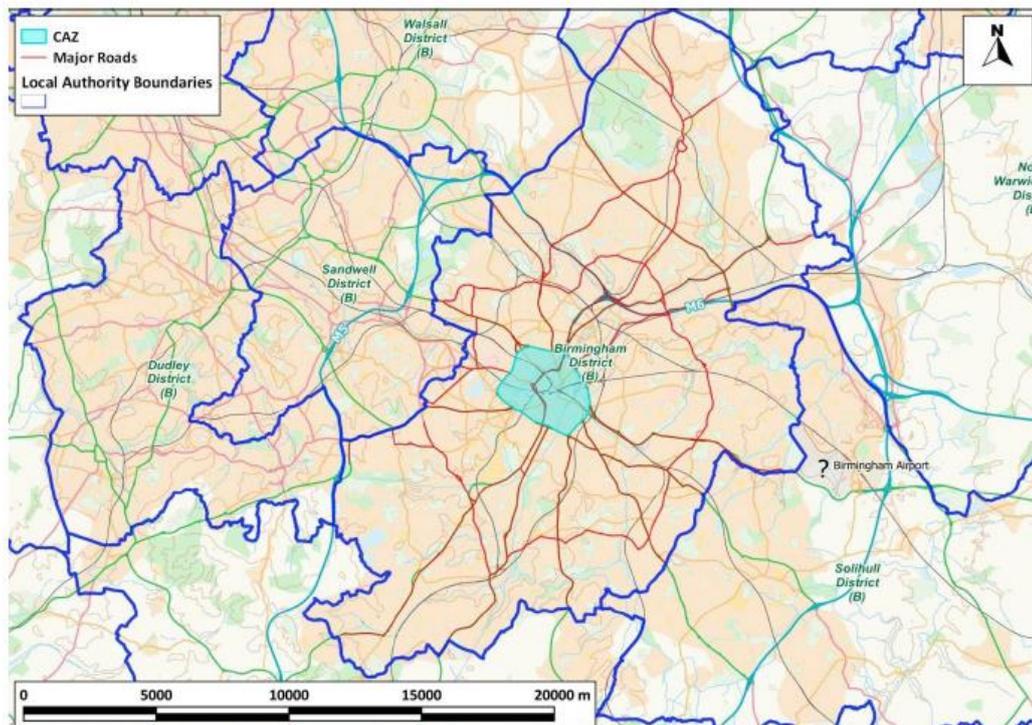


Figura 2. Mapa ayuntamiento, Birmingham. fuente: air quality action plan – 2021-2025

### 3.1.2. Recopilación de datos

La recopilación de datos se obtuvo del Medical Research Council (2020) . Los valores se obtuvieron de un modelo estadístico bayesiano complejo ( Mukhopadhyay y Sahu, 2018 ) que integra datos de monitoreo de la calidad del aire de unos 170 sitios en el Reino Unido, así como la calidad del aire en el resultado del Modelo Unificado ( Savage et al., 2013 ). En consecuencia, los datos presentan un alto grado de detalle tanto espacial como temporal.

Se han considerado específicamente cuatro tipos de contaminantes clave: dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), ozono ( $\text{O}_3$ ), material particulado de diámetro aerodinámico inferior a  $10 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ) y material particulado de menos de  $2,5 \mu\text{m}$  de diámetro ( $\text{PM}_{2.5}$ ). Las concentraciones de estos contaminantes se expresan en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), proporcionando una métrica precisa para evaluar la calidad del aire en la ciudad.

Las medidas de concentraciones de contaminación se realizaron en intervalos de un día cubriendo el período comprendido entre el 1 de enero de 2007 al 31 de diciembre de 2011. Lo que permitió un análisis espaciotemporal de las variaciones de contaminantes. Por un periodo de 5 años, se permite capturar la variabilidad de los diferentes contaminantes a lo largo de diferentes estaciones y años, proporcionando una visión más amplia y completa de los patrones de contaminación.

### 3.1.3. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos, referentes a la concentración  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ . se centró en la región  $52^\circ 10' = 52.1666^\circ \text{N}$ ,  $52^\circ 50' = 52.8333 \text{N}$  y  $1^\circ 25' \text{W} = 1.4166 \text{W}$ , así como  $2^\circ 25' \text{W} = 2.4166 \text{W}$ . (Figura 3). Estas coordenadas geográficas focalizadas proporcionaron un marco espacial concreto para el análisis estadístico, permitiendo la identificación de patrones espaciotemporales significativos en la contaminación del aire tanto en la ciudad de Birmingham como en su periferia.

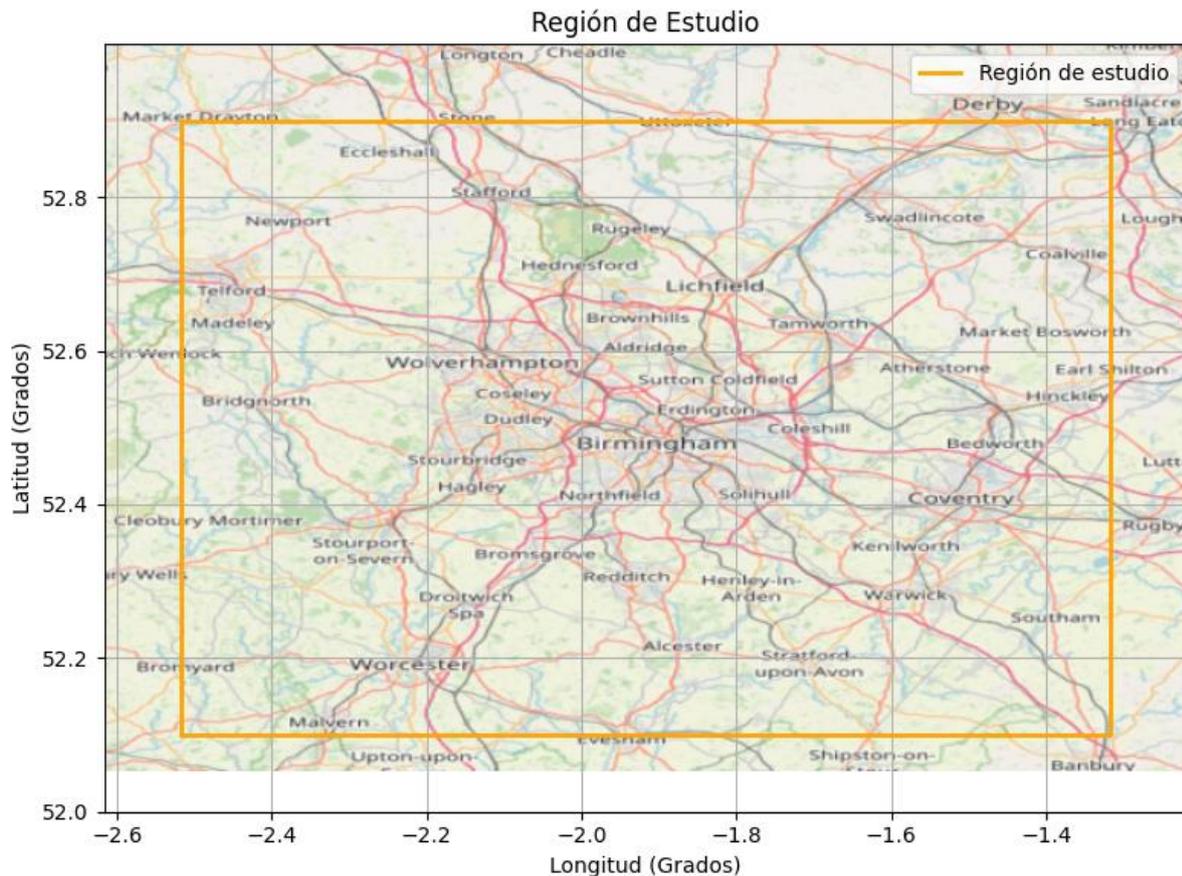


Figura 3. Región de estudio. fuente mapa base: “© openstreetmap contributors

### 3.1.4. Cálculo de la mediana

La mediana es el valor que se encuentra en el centro de una distribución, dividiendo la mitad superior e inferior de los datos. La mediana proporciona una mejor manera de describir una tendencia central de los datos y corresponde al segundo cuartil,  $q_{0.5}$ . Para un conjunto de datos ordenado  $x$  con  $n$  elementos (Wilks, 2019).

Si  $n$  es impar, el valor de la mediana es el de la posición  $(n + 1)/2$

Si  $n$  es par, la mediana es el promedio de los valores de posiciones  $n/2$  y  $(n/2) + 1$ .

### 3.1.5. Cálculo del rango intercuartil

El rango intercuartil (IQR) nos proporciona la diferencia entre el tercer cuartil ( $Q_3$ ) y el primer cuartil ( $Q_1$ ). El IQR es útil para identificar la dispersión de los datos, siendo menos sensible a valores extremos que el rango completo.

$$IQR = q_{0.75} - q_{0.25}$$

### 3.1.6. Cálculo del índice Yule-Kendall

El índice de Yule-Kendall es una medida robusta para evaluar la tendencia temporal de los datos. Este índice proporciona información sobre la dirección y la fuerza de la asociación entre las observaciones. Se determina al evaluar la distancia entre la mediana y cada uno de los dos cuartiles. Cuando el 50 % de los datos se inclinan hacia la derecha, la diferencia respecto a la mediana será más notable en el cuartil superior que en el inferior, lo que resulta en un índice Yule-Kendall positivo. En contraste, si la inclinación es hacia la izquierda, el índice Yule-Kendall será negativo (Wilks, 2019).

$$\gamma_{YK} = \frac{(q_{0.75} - q_{0.50}) - (q_{0.50} - q_{0.25})}{IQR}$$

### 3.1.7. Cálculo de la curtosis robusta

La curtosis robusta, según Sachs (1982), representa el grado de aplanamiento de la distribución de datos en la región central. Esta medida se fundamenta en la utilización de cuartiles y deciles.

$$q = (q_{75} - q_{25}) / (2 * (d_{90} - d_{10}))$$

## 3.2. Análisis de tendencia temporal

Según the Health Protection Agency for the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP), algunos contaminantes tienen una distribución regional, mientras que otros están más influenciados por fuentes locales, es decir no todos los contaminantes siguen la misma distribución espacial a nivel del suelo. Los contaminantes primarios del tráfico serán más altos cerca de las carreteras con mucho tráfico, mientras que el ozono tiende a ser más bajo cerca de las carreteras y más alto en áreas rurales.

Algunos componentes de la mezcla de partículas se distribuyen de manera bastante uniforme sobre grandes regiones. Ocurren variaciones similares en el tiempo. Las concentraciones de contaminación variarán a lo largo de horas y días dependiendo del patrón temporal de las fuentes (como el tráfico), así como de los factores meteorológicos que influyen en la dispersión de contaminantes y la química atmosférica. En conjunto, esta variación temporal y espacial implica que la concentración real experimentada por los individuos probablemente sea más o menos que la indicada por el índice de calidad del aire.

En este sentido se examina las variaciones temporales de los indicadores estadísticos a lo largo del periodo de estudio, es decir, se busca patrones estacionales, cambios a lo largo de los años y eventos significativos que puedan influir en la contaminación del aire.

Además, se evalúan las correlaciones entre los indicadores estadísticos de diferentes contaminantes, se busca identificar posibles relaciones entre las concentraciones de distintos contaminantes y cómo estas relaciones cambian espaciotemporalmente, para finalmente sintetizar los resultados obtenidos e identificar patrones espaciotemporales significativos en la contaminación del aire.

## 3.3. Contrastar los niveles medios de contaminantes

Se contrastan los niveles medios de contaminantes presentes en el aire, con el objetivo de identificar las variaciones en sus concentraciones. Este tipo de análisis permite entender cómo cambian los niveles de contaminación en distintas ubicaciones, proporcionando una visión clara de las áreas más afectadas y de las posibles fuentes de emisión.

### **3.3.1. Curvas de nivel de concentración**

La distribución espacial de los contaminantes del aire se ve significativamente influenciada por la ubicación y las características de los sitios de monitoreo, así como por el entorno circundante. Muchos estudios han analizado las correlaciones espaciales entre diferentes factores ambientales y los contaminantes del aire, destacando cómo estos factores interactúan y afectan las concentraciones de contaminantes en diversas áreas (Chi et al., 2023).

En este sentido para este trabajo se utilizan curvas de nivel de concentración para visualizar la distribución geográfica de los contaminantes atmosféricos. Estas curvas representan líneas de igual concentración de contaminantes en un mapa, lo que permite identificar áreas con niveles más altos o bajos de contaminación de manera clara y precisa. Al trazar estas curvas en un mapa, podemos visualizar la forma en que los contaminantes se dispersan en el entorno y cómo varía su concentración a lo largo del espacio. Esto es especialmente útil para identificar áreas con concentraciones preocupantes de contaminantes, así como para delinear patrones de dispersión y posibles fuentes de emisión.

Además de proporcionar una representación gráfica de la distribución geográfica de los contaminantes, las curvas de nivel también permiten realizar análisis espaciales detallados. Al examinar la forma, la densidad y la orientación de las curvas de nivel, podemos inferir la dirección y la intensidad de los flujos de contaminantes, así como identificar posibles patrones de acumulación o dispersión. Esto nos proporciona información valiosa para comprender la dinámica de la contaminación atmosférica en un área específica.

### **3.4. Identificar zonas en el área de estudio que se consideran focos y sumideros**

En la investigación es importante identificar y analizar las zonas que actúan como focos y sumideros dentro del área de estudio. Los focos y sumideros desempeñan roles opuestos, pero igualmente importantes en la dinámica de la contaminación del aire. Los focos son las fuentes principales de emisión de contaminantes, mientras que los sumideros son áreas o procesos que absorben o eliminan estos contaminantes de la atmósfera Echeverri (2019). Comprender la ubicación y las características de estos focos y sumideros es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de gestión y mitigación de la contaminación atmosférica.

#### **3.4.1. Definición de focos y sumideros**

Según Echeverri (2019), en el contexto de la contaminación atmosférica, los "focos" se refieren a las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos. Estas fuentes pueden incluir, por ejemplo, industrias, vehículos de motor, actividades agrícolas y residenciales, entre otros. Son puntos específicos o áreas donde se produce la liberación de contaminantes a la atmósfera, Figura 4.

El concepto de "sumidero" abarca tanto la contaminación atmosférica como el cambio climático. Según Echeverri (2019), en el contexto de la contaminación atmosférica, un sumidero se refiere a procesos o áreas donde los contaminantes atmosféricos son absorbidos o eliminados de la atmósfera. Esto puede incluir la deposición atmosférica en cuerpos de agua o suelos, la absorción por la

vegetación, entre otros mecanismos. Por otro lado, según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 1992, un sumidero es cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o elimina de la atmósfera gases de efecto invernadero, aerosoles o precursores de gases de efecto invernadero. Esta ampliación del concepto de sumidero refleja su importancia en la mitigación del cambio climático al considerar tanto los contaminantes convencionales como los gases de efecto invernadero.

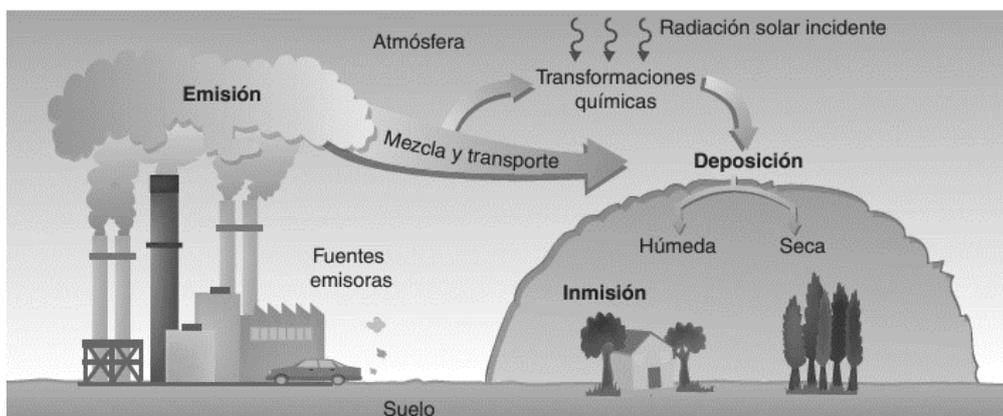


Figura 4. Relación fuente receptor en contaminación atmosférica.  
fuente: <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf>

### 3.4.2. Método de identificación de focos y sumideros de contaminación

Utilizaremos los valores más altos encontrados en las curvas de nivel como indicadores principales para la identificación de focos y sumideros de contaminación atmosférica. Este enfoque nos permitirá destacar las áreas con concentraciones más elevadas de contaminantes, lo que probablemente señale la presencia de fuentes de emisión significativas o procesos de absorción intensos. Además, la identificación de focos y sumideros se basará en los umbrales definidos por los percentiles 25 y 75, lo cual es una herramienta útil en la comprensión de la distribución espacial de la contaminación atmosférica en Birmingham. Estos percentiles nos permitirán identificar áreas que consistentemente muestran niveles más altos o bajos de contaminación.

### 3.4.3. Validación de resultados

En la fase de validación de los resultados, se realizará una búsqueda bibliográfica exhaustiva para contextualizar y corroborar la presencia de actividades industriales, residenciales o cualquier otro factor relevante en las áreas identificadas con los valores más altos o bajos de contaminantes atmosféricos. Esta búsqueda nos permitirá comprender mejor el entorno local y evaluar si las concentraciones observadas se correlacionan con la presencia de fuentes de emisión conocidas o con factores naturales que puedan influir en la calidad del aire. Además, examinaremos estudios previos realizados en la zona para comparar nuestros hallazgos con investigaciones anteriores y validar la precisión de nuestra metodología. Este enfoque nos brindará una base sólida para interpretar los resultados obtenidos y respaldar la fiabilidad de nuestro análisis de identificación de focos y sumideros de contaminación atmosférica en la ciudad de Birmingham.

## 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 4.1. Cálculo de los diferentes indicadores estadísticos

Se calcularon diversos indicadores estadísticos, como la mediana, el rango intercuartil, el índice Yule-Kendall y la curtosis robusta, a partir de los datos. La Tabla 1 muestra la mediana de cada uno de los contaminantes por año, organizando los valores de forma ascendente. Respecto al rango Intercuartil (IQR), se calculó el primer cuartil (Q1) y el tercer cuartil (Q3), y luego se restó Q1 de Q3 para obtener el rango intercuartil. El primer cuartil es el valor que deja el 25% de los datos por debajo, mientras que el tercer cuartil es el valor que deja el 75% de los datos por debajo. En cuanto al Índice Yule-Kendall, se logró medir la asociación o dependencia entre dos variables.

El cálculo se hizo a través de Python ya que esta herramienta ofrece una amplia gama de bibliotecas y herramientas especializadas para el análisis de datos, lo que lo convierte en una opción adecuada para manejar conjuntos de datos grandes y complejos. Con bibliotecas como NumPy, pandas y SciPy, se accede a funciones predefinidas que facilitan el cálculo de estos indicadores de manera eficiente y precisa. Además, Python es un lenguaje de programación de código abierto, lo que significa que se puede personalizar y adaptar fácilmente nuestras implementaciones según las necesidades específicas de nuestro estudio. Es un instrumento que nos brinda la flexibilidad necesaria para explorar diferentes enfoques analíticos y ajustar nuestros cálculos según sea necesario. En resumen, al elegir Python para el análisis estadístico, podemos aprovechar su poder computacional, su amplia comunidad de desarrolladores y su capacidad de personalización para obtener resultados confiables y significativos a partir de nuestros datos.

Tabla 1. Indicadores estadísticos Birmingham (2007-2011).

Contaminante	Año	Mediana ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Mínimo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Máximo ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Curtosis robusta	Índice Yulle- Kendall
NO <sub>2</sub>	2007	27,50	22,51	64,34	6,84	0,037	0,006660
	2008	27,26	23,84	63,32	6,50	0,063	0,000478
	2009	31,24	24,37	66,45	5,34	0,042	-0,024523
	2010	30,41	27,27	67,42	6,69	0,028	-0,061514
	2011	26,54	23,08	59,84	6,22	0,015	-0,134668
O <sub>3</sub>	2007	62,72	47,25	65,01	5,12	-0,019	-0,258708
	2008	66,31	50,35	67,96	5,57	-0,080	-0,319490
	2009	63,67	49,09	66,90	4,82	-0,067	-0,088269
	2010	61,67	46,51	63,79	5,07	-0,178	-0,205981
	2011	64,63	49,73	67,03	5,15	-0,022	-0,143929
PM <sub>10</sub>	2007	18,55	17,64	19,75	0,27	0,014	-0,054306
	2008	15,56	14,96	16,38	0,17	0,028	-0,061975
	2009	16,01	15,45	17,06	0,15	-0,017	-0,213954
	2010	17,10	16,35	18,03	0,23	0,080	-0,083904

	2011	17,27	15,84	18,60	0,56	0,116	-0,213475
PM <sub>2.5</sub>	2007	11,76	7,44	12,81	1,08	-0,090	0,007860
	2008	11,18	8,93	11,76	0,52	-0,048	-0,079096
	2009	9,94	9,26	10,32	0,18	-0,101	-0,198731
	2010	11,51	10,29	12,14	0,38	0,045	-0,047524
	2011	10,41	9,61	10,65	0,25	-0,033	-0,223821

## 4.2. Análisis de la tendencia temporal de los niveles de contaminación atmosférica

Para realizar un análisis de la tendencia temporal de los niveles de contaminación se basó en los cálculos estadísticos lo cual permitió, determinar el comportamiento espaciotemporal de cada uno de los contaminantes.

### 4.2.1. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

La concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) a lo largo de los años revela una mediana que oscila entre 26,54 y 31,24 µg/m<sup>3</sup>, indicando una relativa estabilidad en los niveles de este contaminante atmosférico (Figura 5). Sin embargo, la desviación estándar muestra una variabilidad considerable en las concentraciones, lo que sugiere que, aunque la mediana se mantiene dentro de un rango similar, hay años en los que se observan fluctuaciones significativas en la cantidad de NO<sub>2</sub> presente en el aire. Aunque el índice Yule Kendall muestra una ligera tendencia negativa en la concentración de NO<sub>2</sub>, esta disminución puede no ser estadísticamente significativa, lo que podría requerir un análisis más profundo para confirmar cualquier cambio significativo en el tiempo. La curtosis robusta, por su parte, indica una distribución de datos que puede ser más puntiaguda alrededor de la mediana, lo que sugiere que hay años en los que las concentraciones de NO<sub>2</sub> tienden a agruparse más cerca de la mediana, mientras que en otros años la distribución puede ser más dispersa.

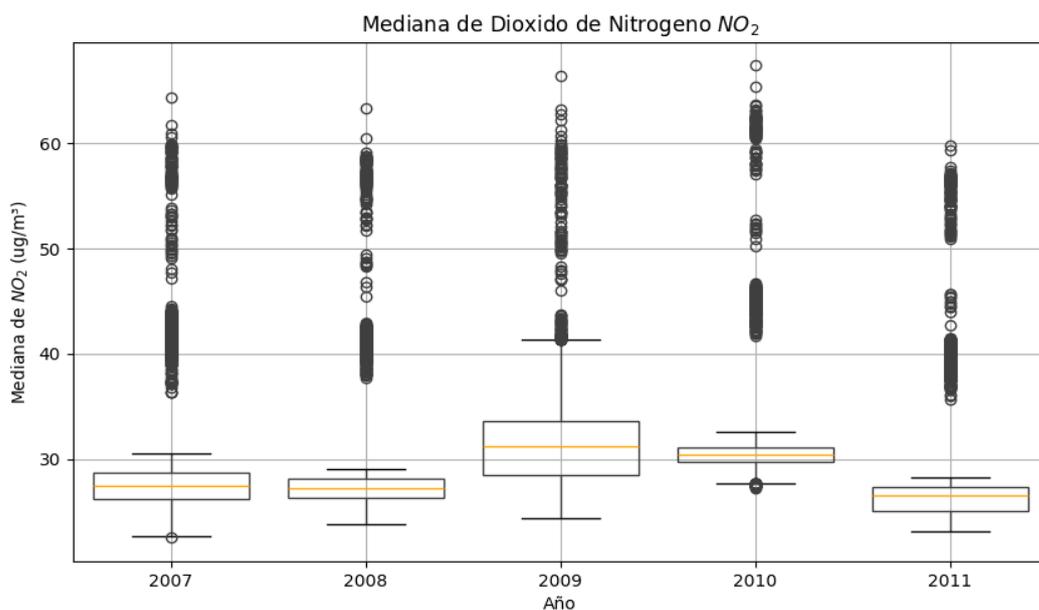


Figura 5. Mediana Dióxido de Nitrógeno NO<sub>2</sub>, Birmingham (2007-2011).

#### 4.2.2. Ozono troposférico O<sub>3</sub>

La concentración de ozono (O<sub>3</sub>) a lo largo de los años revela una mediana que se mantiene dentro de un rango estrecho, variando entre 61,67 y 66,32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 6). Este hallazgo sugiere una estabilidad relativa en los niveles de ozono en la atmósfera durante el período analizado. Además, la baja desviación estándar observada indica que las concentraciones de ozono tienden a estar cercanas a la media, lo que sugiere una consistencia en los niveles de este contaminante. Sin embargo, es importante destacar que la tendencia negativa observada en el índice Yule-Kendall indica una disminución en la concentración de ozono a lo largo del tiempo. Esta tendencia negativa podría ser el resultado de medidas implementadas para reducir la contaminación del aire, como regulaciones más estrictas sobre las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y óxidos de nitrógeno, que son precursores del ozono troposférico.

Además, la curtosis robusta sugiere que la distribución de los datos tiende a ser más puntiaguda alrededor de la mediana, lo que indica que los niveles de ozono pueden ser más consistentes en ciertos años mientras que en otros pueden fluctuar más ampliamente.

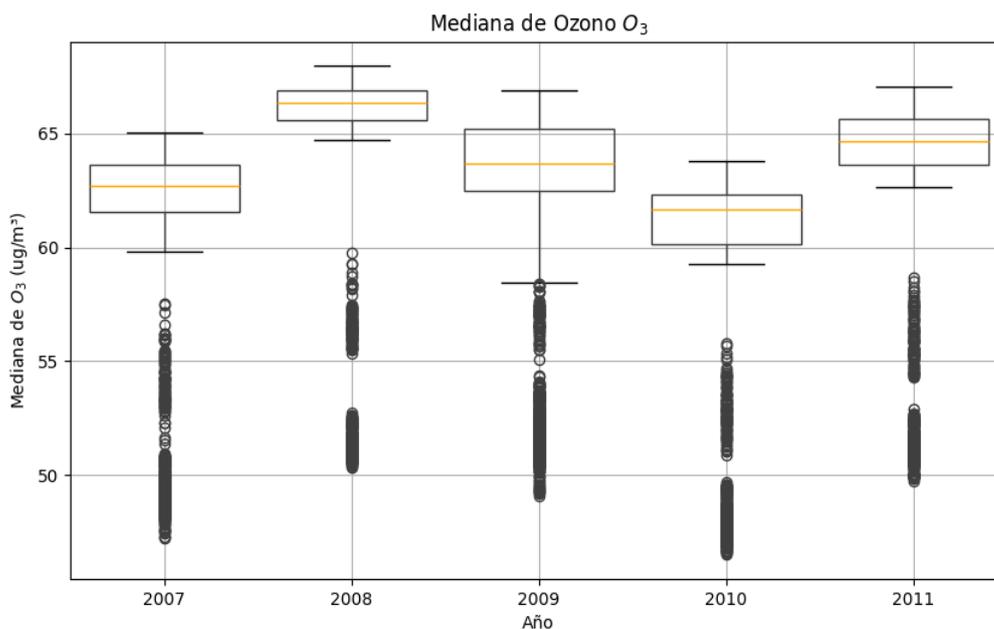


Figura 6. Mediana Ozono Troposférico O<sub>3</sub>, Birmingham (2007-2011).

#### 4.2.3. Partículas PM<sub>10</sub>

La concentración de partículas PM<sub>10</sub> a lo largo de los años revela una mediana que se mantiene dentro de un rango estrecho, variando entre 16,01 y 18,55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 7). Esto sugiere una estabilidad relativa en los niveles de partículas en suspensión durante el período analizado. Sin embargo, la amplia variación en la desviación estándar indica una alta variabilidad en las concentraciones de PM<sub>10</sub> a lo largo del tiempo. Esta variabilidad podría estar influenciada por diversos factores, como cambios estacionales, condiciones meteorológicas y actividades humanas. El índice Yule-Kendall muestra una tendencia negativa en la concentración de PM<sub>10</sub> a lo largo del tiempo, lo que sugiere una posible

mejora en la calidad del aire en términos de partículas en suspensión. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la curtosis robusta indica una distribución de datos que puede ser variable, con posibles valores atípicos que afectan la forma de la distribución. Estos valores atípicos podrían deberse a eventos o condiciones excepcionales que causan picos en la concentración de  $PM_{10}$  en ciertos años.

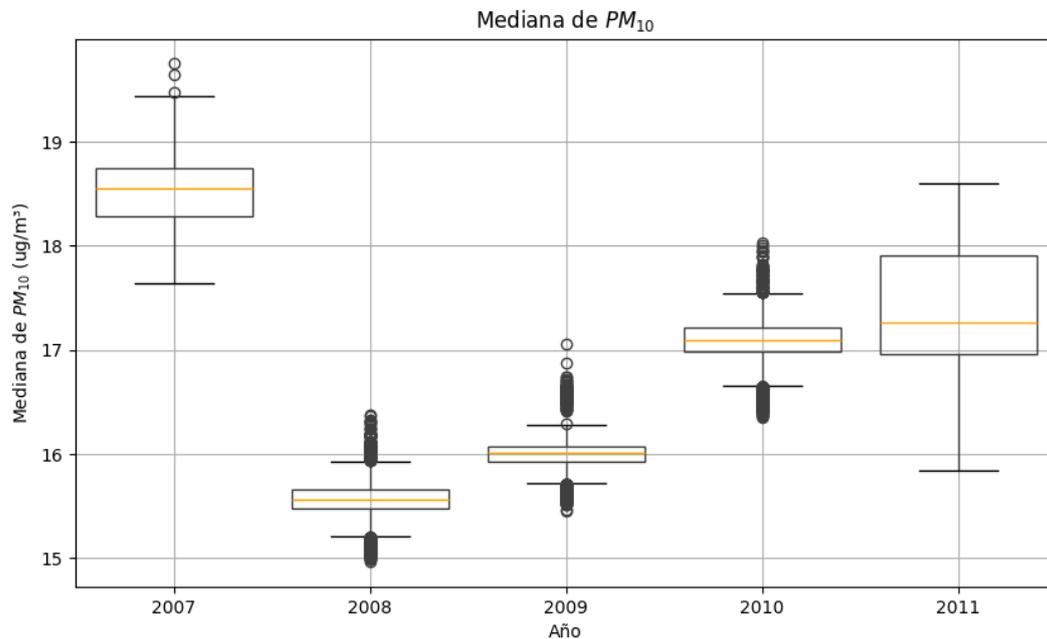


Figura 7. Mediana partículas  $PM_{10}$ , Birmingham (2007-2011).

#### 4.2.4. Partículas $PM_{2.5}$

La concentración de partículas  $PM_{2.5}$  a lo largo de los años revela una mediana que se mantiene dentro de un rango relativamente estrecho, variando entre 9.94 y 11.76  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 8). Esto indica una consistencia en los niveles de partículas ultrafinas durante el período analizado, lo que puede ser una buena señal para la calidad del aire. Sin embargo, la desviación estándar sugiere que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  tienden a variar considerablemente de un año a otro, lo que indica una alta variabilidad en los niveles de este contaminante.

El índice Yule-Kendall muestra una tendencia negativa en la concentración de  $PM_{2.5}$  a lo largo del tiempo, lo que indica una posible mejora en la calidad del aire en términos de partículas ultrafinas. Sin embargo, la curtosis robusta indica una distribución de datos que puede ser más puntiaguda o aplanada en diferentes años, lo que sugiere variaciones en la concentración de partículas suspendidas en el aire a lo largo de los años, con algunos años mostrando una distribución más uniforme y otros años mostrando una distribución más sesgada hacia valores más altos. Esta variabilidad puede ser el resultado de factores locales, como la proximidad a fuentes de emisión y la topografía del área.

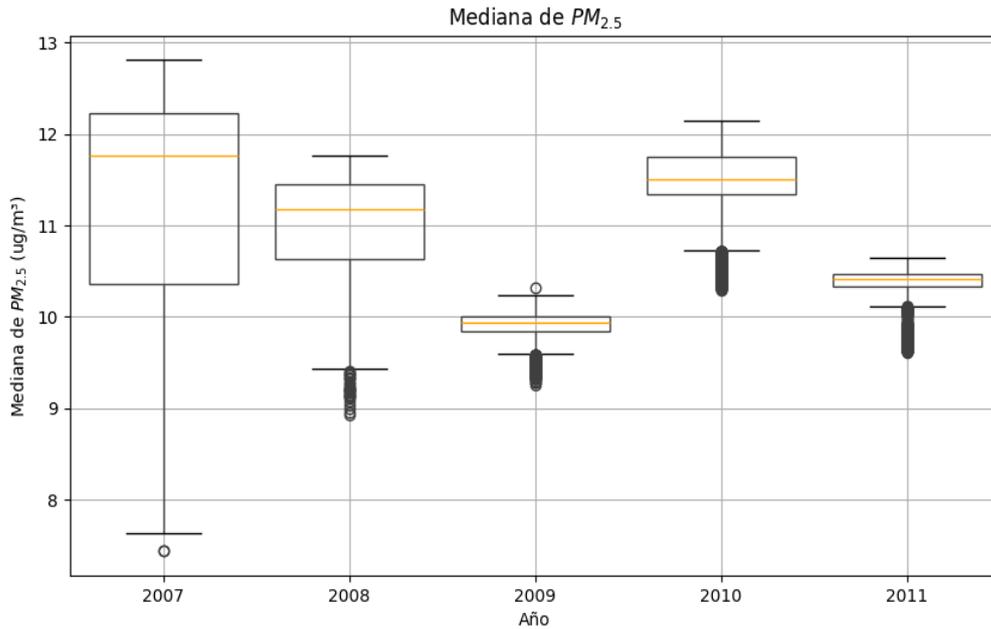


Figura 8. Mediana partículas PM<sub>2.5</sub>, Birmingham (2007-2011).

A partir de los datos de concentración de contaminantes atmosféricos a lo largo de los años revela una serie de hallazgos significativos. En primer lugar, destaca la estabilidad en los niveles de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y ozono (O<sub>3</sub>), como se evidencia por las medianas consistentes a lo largo del período estudiado, señalando una cierta uniformidad en la exposición a estos contaminantes en la región analizada. Sin embargo, la alta variabilidad en las desviaciones estándar de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> indica que, a pesar de mantenerse dentro de ciertos rangos, existen fluctuaciones considerables en las concentraciones de estos contaminantes de un año a otro, posiblemente influenciadas por factores ambientales y humanos variables. Por otro lado, la tendencia negativa observada en el índice Yule-Kendall para NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> sugiere una posible mejora en la calidad del aire en términos de estos contaminantes a lo largo del tiempo, posiblemente como resultado de políticas y regulaciones ambientales implementadas para reducir las emisiones contaminantes.

En contraste, aunque se observa una estabilidad relativa en las medianas de concentración de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, la alta variabilidad en las desviaciones estándar indica una fluctuación significativa en los niveles de estas partículas a lo largo de los años. La tendencia negativa en el índice Yule-Kendall para ambas partículas sugiere una posible mejora en la calidad del aire en términos de partículas en suspensión y partículas ultrafinas, lo que podría atribuirse a medidas regulatorias destinadas a reducir las emisiones de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, la presencia de valores atípicos, como lo indica la curtosis robusta, destaca la influencia de factores locales y eventos excepcionales en la concentración de partículas, lo que subraya la necesidad de seguir monitoreando y evaluando de cerca la calidad del aire para abordar eficazmente los desafíos ambientales en la región.

### 4.3. Contraste de los niveles medios de contaminantes

Se analizaron y contrastaron los diferentes indicadores estadísticos en el núcleo urbano de Birmingham y sus áreas periféricas desde el 1 enero de 2007 a 31 de diciembre de 2011 para identificar patrones espaciotemporales de la contaminación del aire. Se realizó la comparativa entre el centro de Birmingham y su periferia a través de curvas de nivel de concentración lo que permitió

identificar puntos focales y tendencias en el período de tiempo estudiando. Se muestran a continuación cada una de las gráficas obtenidas para el contraste de valores de contaminantes en el centro de Birmingham y la periferia.

### 4.3.1. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Al observar las curvas de nivel de la mediana de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) del año 2007 (Figura 9), las concentraciones están expresadas en microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) y se representan en un mapa de color donde las áreas de concentración varían desde 22 µg/m<sup>3</sup> hasta 62 µg/m<sup>3</sup>. Vemos valores altos en áreas cercanas al centro de Birmingham, aproximadamente en la ubicación de Kings Heath, ubicada a unos 6 km al sur del centro, y Harborne, situada a aproximadamente 5 km al suroeste. Aston, que se encuentra a unos 3 km al noreste del centro, también presenta valores altos. Bedworth, situada a unos 30 km al este de Birmingham, y Cannock, ubicada a unos 25 km al norte, igualmente registran niveles significativos de contaminantes. Además, en Coventry, que está a aproximadamente 30 km al sureste de Birmingham, se observan valores que superan los 40 µg/m<sup>3</sup>.

Las concentraciones más bajas de NO<sub>2</sub> se encuentran en la periferia de Birmingham, específicamente en el suroeste y noreste de la región de estudio. Las áreas con concentraciones alrededor de 22 µg/m<sup>3</sup> están representadas en color púrpura oscuro que corresponde a las afueras de la ciudad, como en Solihull, a unos 13 km al sureste, y Hagley, situada a unos 18 km al suroeste.

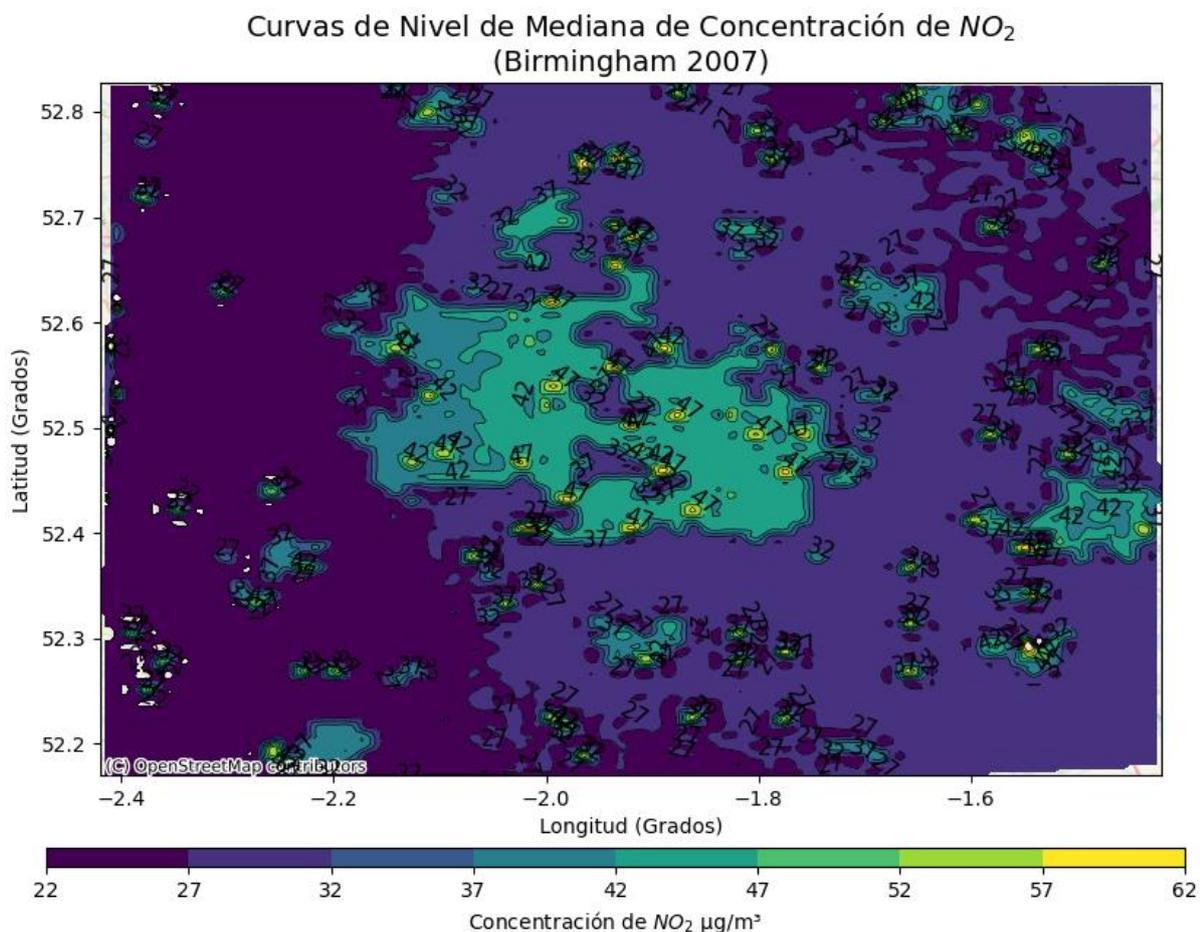


Figura 9. Curvas de nivel de concentración Mediana NO<sub>2</sub>, Birmingham 2007.

Este mismo patrón se repite a lo largo de le periodo de estudio, al observar las curvas de nivel del período de estudio 2007-2011 (Figura 10) se identifica un patrón consistente de concentraciones elevadas de contaminantes en áreas cercanas al centro de Birmingham, los valores más altos se registran por lo general cerca de Harborne, que está aproximadamente a unos 5 km del centro de Birmingham y Kings con valores sobre  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que los valores más bajos se encuentran en áreas como Chelmsley Wood, un suburbio en el noreste de Birmingham.

Los detalles específicos de cada año se pueden revisar en el Anexo A, donde se presentan las curvas de nivel de concentración detalladas para  $\text{NO}_2$  correspondientes a cada año del período de estudio.

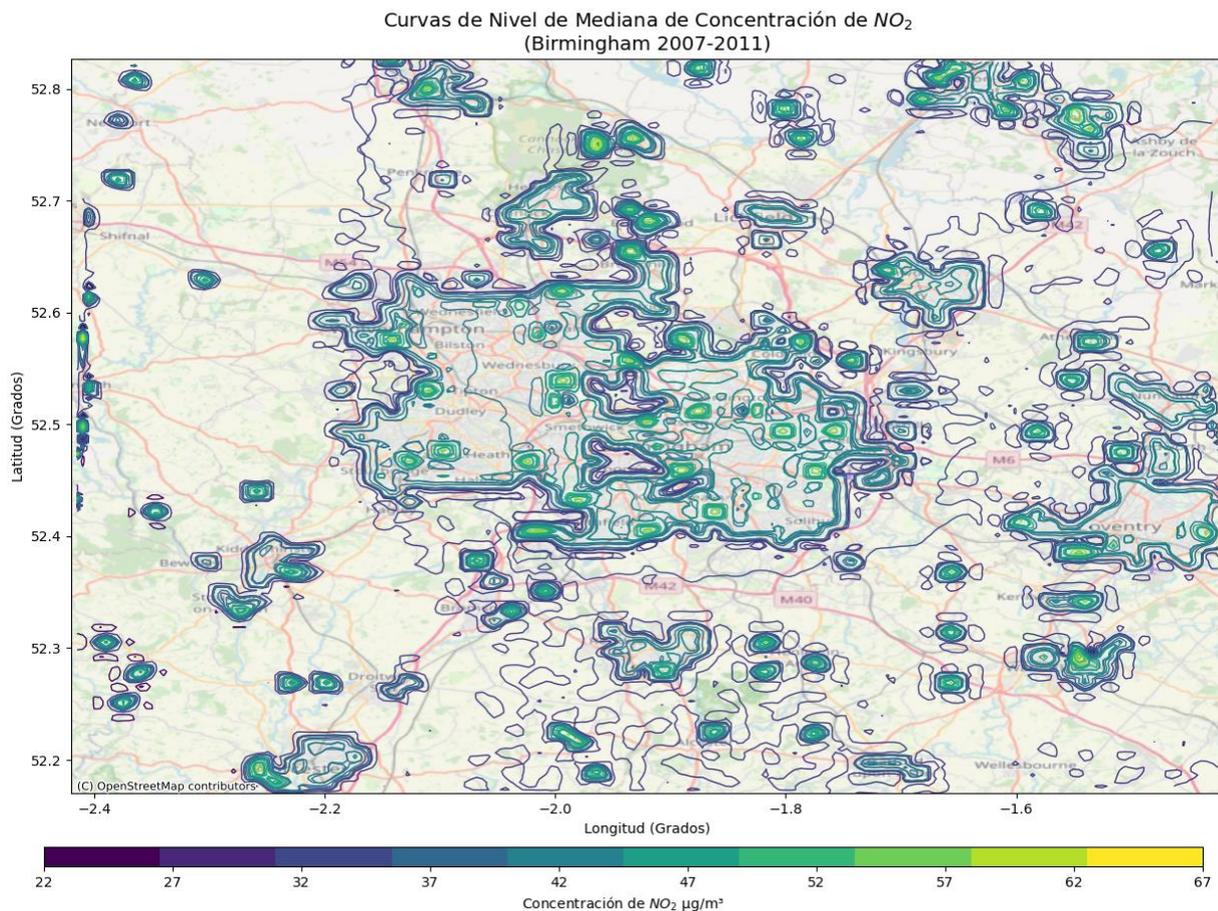


Figura 10. Curvas de nivel de concentración Mediana  $\text{NO}_2$ , Birmingham (2007-2011).

#### 4.3.2. Ozono ( $\text{O}_3$ )

Al observar las curvas de nivel de concentración de  $\text{O}_3$  del año 2007 (Figura 11), los valores de concentración de  $\text{O}_3$  varían entre  $47$  y  $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las áreas más claras y con valores más altos de concentración ( $60$ - $66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se encuentran en la periferia, particularmente hacia el norte, alrededor de Sutton Coldfield y en el este de Birmingham, cerca de Solihull. En Aston, ubicada al noreste del centro, se presentan valores cercanos a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que cerca del centro de Birmingham, los valores de  $\text{O}_3$  son relativamente altos, alrededor de  $58$ - $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las áreas periféricas, como al sur y suroeste cerca de Redditch y Bromsgrove, muestran valores más bajos, entre  $47$  y  $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto puede deberse a la menor dispersión de contaminantes en estas áreas rurales y menos densamente pobladas. En Northfield y Halesowen, situadas al suroeste, los valores alcanzan los  $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Hagley, también en la periferia suroeste, presenta valores de  $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este mismo patrón se observa en la periferia de Coventry, donde los valores son de  $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que más cerca del centro de

Coventry los valores descienden a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Podemos observar que este mismo patrón se repite en Warwick, ubicada al sureste de Birmingham, y en Tamworth y Fazeley, situadas al noreste de Birmingham. En general, la distribución espacial del  $\text{O}_3$  en Birmingham en 2007 sugiere una mayor concentración en áreas periféricas y menos en el centro urbano. Este patrón es típico debido a que el ozono troposférico se forma a partir de precursores como  $\text{NO}_x$  y COV, que reaccionan bajo la luz solar y se desplazan fuera del núcleo urbano.

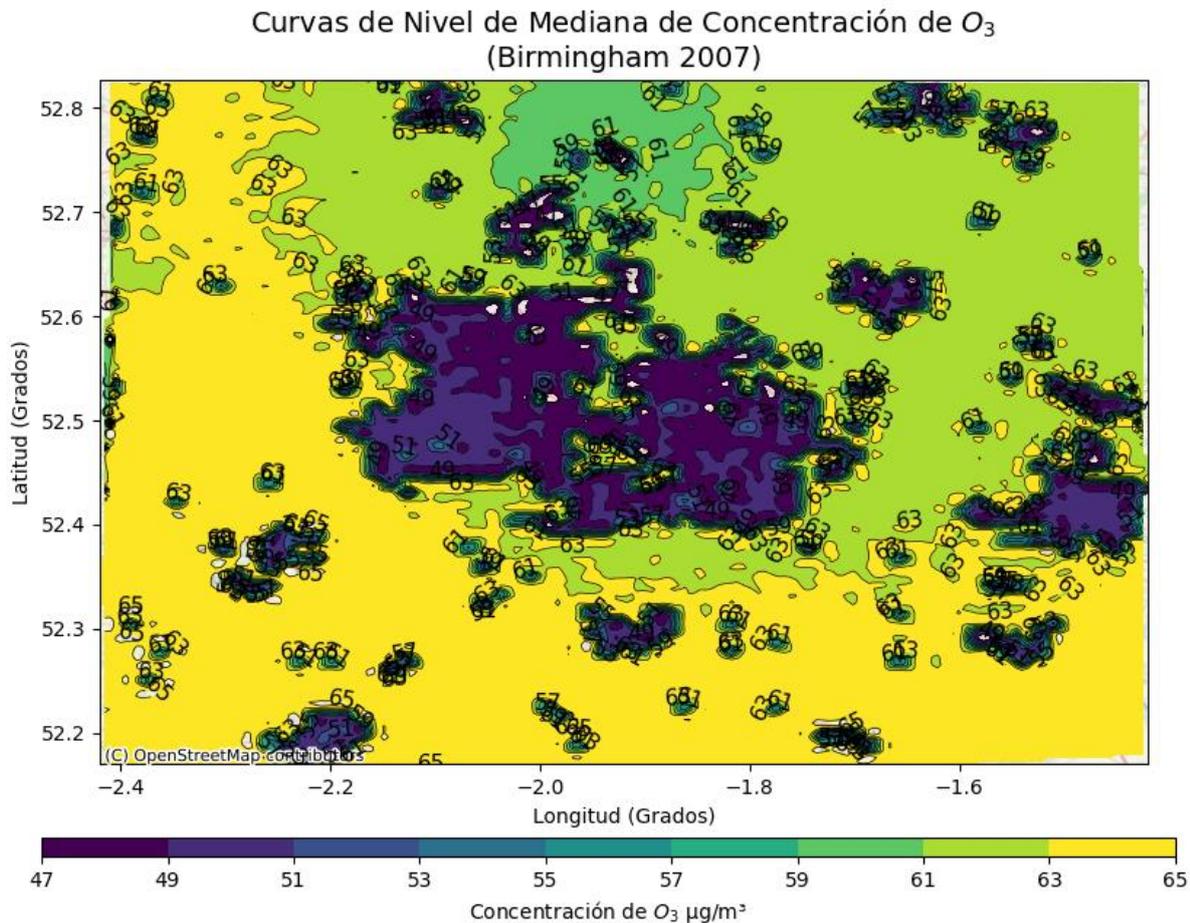


Figura 11. Curvas de nivel de concentración Mediana  $\text{O}_3$ , Birmingham 2007.

Este patrón es recurrente si analizamos todo el periodo de estudio (Figura 12) ya que las ciudades con los mayores valores de  $\text{O}_3$  son Shirley con una mediana de aproximadamente  $61,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  seguida de cerca por Redditch con una mediana de aproximadamente  $64,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y luego Stourport-on-seven con una media de aproximadamente  $64,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Las ciudades más cercanas al centro de Birmingham, como Aston, Smethwick, Harborne y Kings Heath, tienden a tener valores de  $\text{O}_3$  más bajos en comparación con las ciudades más alejadas del centro.

Las ciudades más alejadas del centro de Birmingham, como Shirley, Redditch y Stourport-on-seven, muestran valores de  $\text{O}_3$  más altos en promedio. Esto podría deberse a una combinación de factores, como una menor dispersión de contaminantes, una mayor densidad de tráfico en las áreas circundantes y patrones de viento que transportan contaminantes desde el centro hacia las áreas periféricas. Sin embargo, hay excepciones a esta tendencia general. Por ejemplo, Harborne, que está relativamente cerca del centro de Birmingham, muestra valores de  $\text{O}_3$  comparativamente altos en promedio. Esto podría atribuirse a factores locales, como la actividad industrial o patrones de viento específicos en esa área.

Los detalles específicos de cada año se pueden revisar en el Anexo B, donde se presentan las curvas de nivel de concentración detalladas para O<sub>3</sub> correspondientes a cada año del período de estudio.

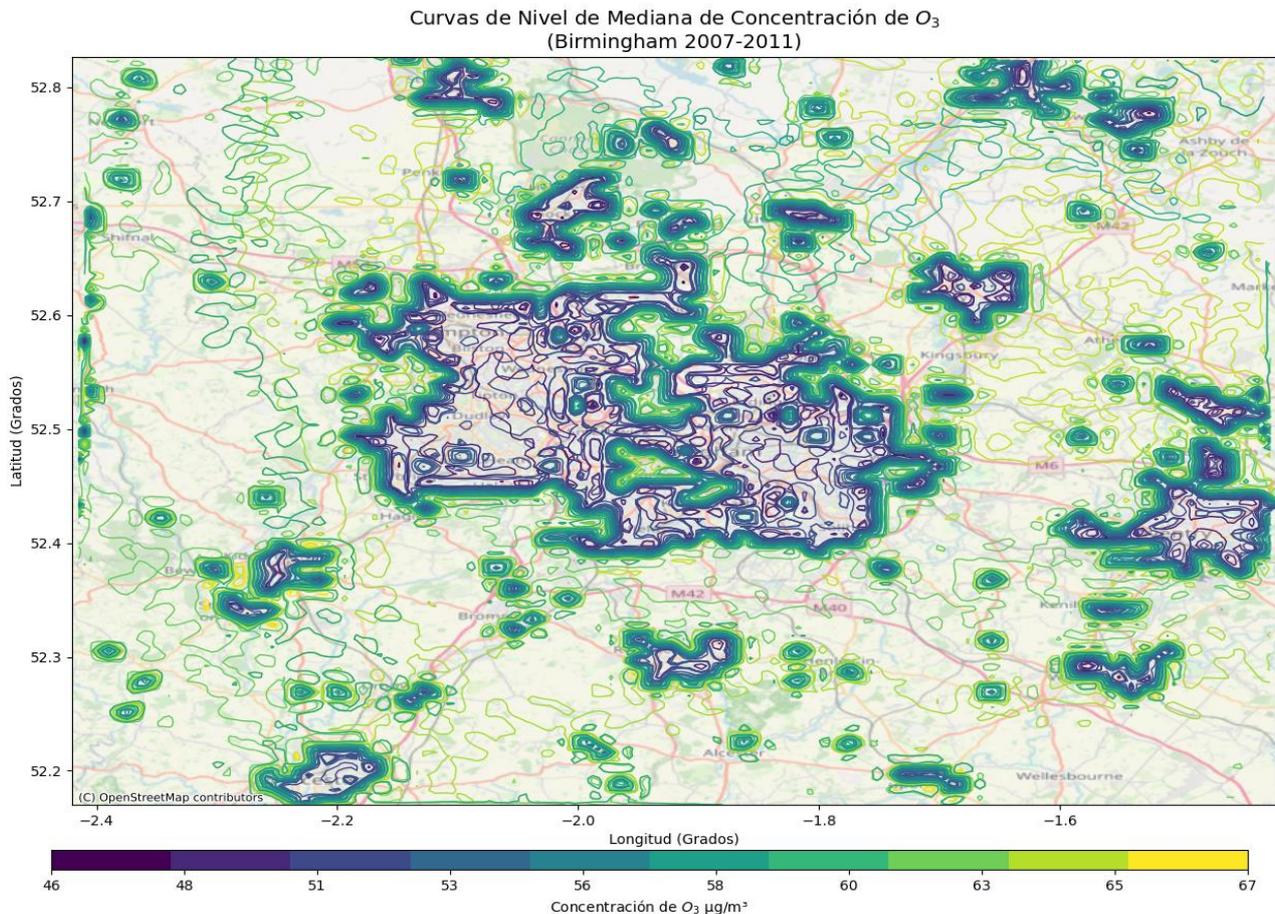


Figura 12. Curvas de nivel de concentración Mediana O<sub>3</sub>, Birmingham (2007-2011).

### 4.3.3. Material particulado PM<sub>10</sub>

La Figura 13 muestra las curvas de nivel de concentración de PM<sub>10</sub> en Birmingham para el año 2007. Las concentraciones están expresadas en microgramos por metro cúbico (µg/m<sup>3</sup>) y se representan en un mapa de color donde las áreas de concentración varían desde 17.0 µg/m<sup>3</sup> hasta 20.3 µg/m<sup>3</sup>. Las concentraciones más bajas de PM<sub>10</sub> se encuentran en las áreas del sureste y suroeste del mapa con valores aproximadamente de 18.2 µg/m<sup>3</sup>. Las concentraciones más altas se encuentran en el noreste del mapa, (representadas en color amarillo) así como en algunas áreas dispersas hacia el centro-este y suroeste.

Podríamos afirmar que en la zona periférica de Birmingham se observan las concentraciones más altas, alcanzando concentraciones de 20.3 µg/m<sup>3</sup>.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $PM_{10}$   
(Birmingham 2007)

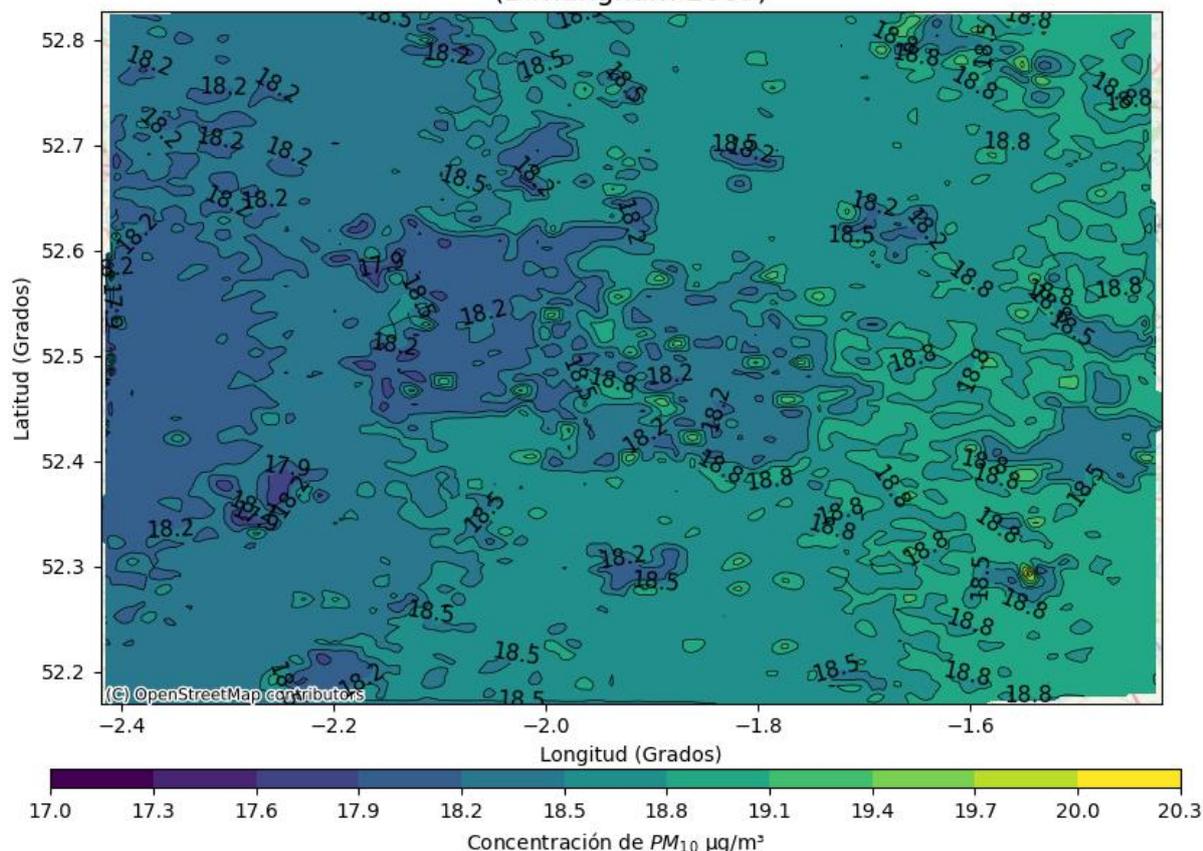


Figura 13. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham 2007.

En cuanto al material particulado de diámetro aerodinámico inferior a  $10\ \mu\text{m}$  ( $PM_{10}$ ) durante el periodo de estudio (Figura 14), se observa una distribución dispar de las concentraciones de partículas en la región circundante al centro de Birmingham. Las mayores concentraciones se registran en áreas como Smethwick, Aston y Harborne, las cuales se encuentran a una distancia relativamente corta del centro de la ciudad, estimada entre 3 y 5 km. Estos lugares, al estar más próximos al epicentro urbano, podrían estar más expuestos a las emisiones provenientes de actividades industriales, tráfico vehicular y otras fuentes contaminantes asociadas con la vida urbana intensa. Así, la proximidad geográfica al centro de Birmingham contribuye a la acumulación de contaminantes en el aire en estas zonas urbanas densamente pobladas.

Por otro lado, se observan concentraciones más bajas de partículas  $PM_{10}$  en áreas ubicadas en las afueras de Birmingham, como Wednesfield, Cannock, Scatford, Penddridge, Kidderminster, Bewdley, Stourport y Droitwich Spa, las cuales se encuentran a una distancia mayor del centro de la ciudad, aproximadamente entre 15 y 30 km. Esta distancia respecto al núcleo urbano puede resultar en una menor influencia de las emisiones urbanas, así como en una menor densidad de tráfico vehicular e industrial. Como resultado, estas áreas experimentan niveles inferiores de contaminación atmosférica, lo que sugiere que la distancia con el centro de Birmingham influye significativamente en la calidad del aire y la distribución de partículas  $PM_{10}$  en la región circundante.

En este sentido podríamos ver que la distribución de  $PM_{10}$  en el periodo estudiado muestra una tendencia a concentrarse más en las áreas periféricas del noreste y menos en el centro de la ciudad. Los detalles específicos de cada año se pueden revisar en el Anexo C, donde se presentan las curvas de nivel de concentración detalladas para  $PM_{10}$  correspondientes a cada año del periodo estudiado.

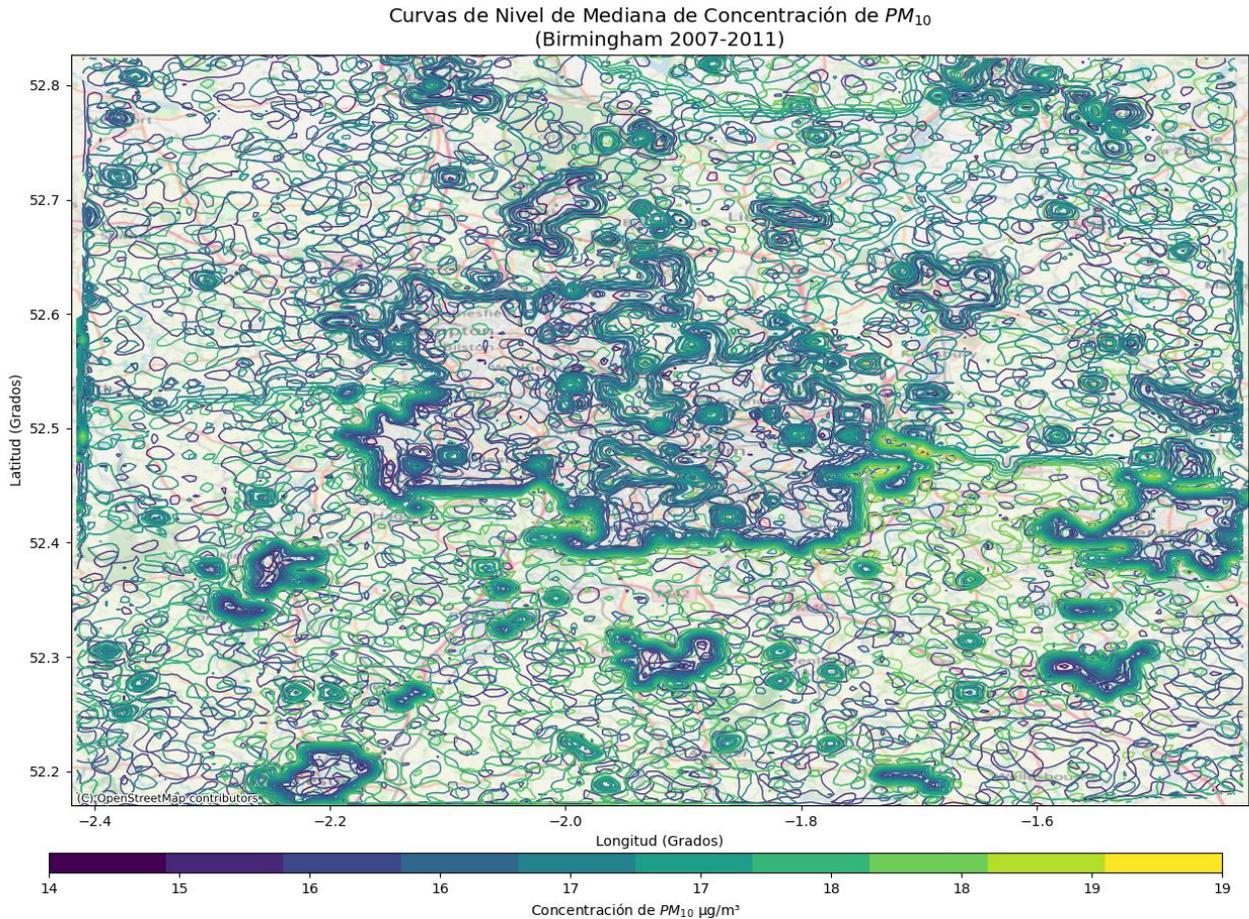


Figura 14. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham (2007-2011).

#### 4.3.4. Material particulado $PM_{2.5}$

Al analizar al material particulado de diámetro aerodinámico inferior a  $2.5 \mu\text{m}$  ( $PM_{2.5}$ ), revela un patrón distintivo en los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  en Birmingham y sus alrededores durante el período de estudio. En el año 2007, (Figura 15) se destacan valores bajos en áreas como Swadlincote, Tamworth y Fazeley, mientras que se registran picos significativos en localidades como Kingsbury, S. Henley-in-Arden, Alcester, Kidderminster, Stourport-on-Severn y Coventry, con valores que rondan entre  $11,0$  y  $11,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aproximadamente. Este contraste se mantiene en 2008, con disminuciones en Swadlincote, Tamworth y Fazeley, y aumentos notables cerca de Solihull, Northfield y Halesowen. En el año 2009, persisten valores elevados en las cercanías de Solihull, Northfield y la periferia de Coventry, con concentraciones en torno a los  $10,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Este análisis destaca la variabilidad geoespacial de la contaminación por  $PM_{2.5}$  exhibiendo tanto valores mínimos como máximos.

En el año 2010, se observa una distribución de valores significativamente elevados de concentración de  $PM_{2.5}$  en la periferia de Coventry, Redditch, Stourport-on-Severn, Bewdley, Harborne y Smethwick, con valores consistentes entre  $11,0$  y cercanos a  $12,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos datos sugieren la presencia de fuentes locales de contaminación en estas áreas durante ese período. Es notable que los niveles más altos se concentran en áreas suburbanas y cercanas a centros urbanos, lo que puede indicar la influencia de actividades industriales, tráfico vehicular y otras fuentes antropogénicas.

En contraste, para el año 2011, se observa una ligera disminución en los valores de  $PM_{2.5}$  en la periferia de Coventry, con concentraciones alrededor de  $10,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aproximadamente. Sin embargo, los valores altos persisten en las áreas circundantes a Tamworth y Fazeley. Además, en el centro de Birmingham, se registran valores ligeramente más bajos, alrededor de  $9,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con excepción de Harborne y Smethwick. Estos datos pueden sugerir cambios en las fuentes de contaminación o variaciones estacionales en los patrones de dispersión, lo que indica la importancia de continuar monitoreando y evaluando la calidad del aire en estas áreas urbanas y suburbanas.

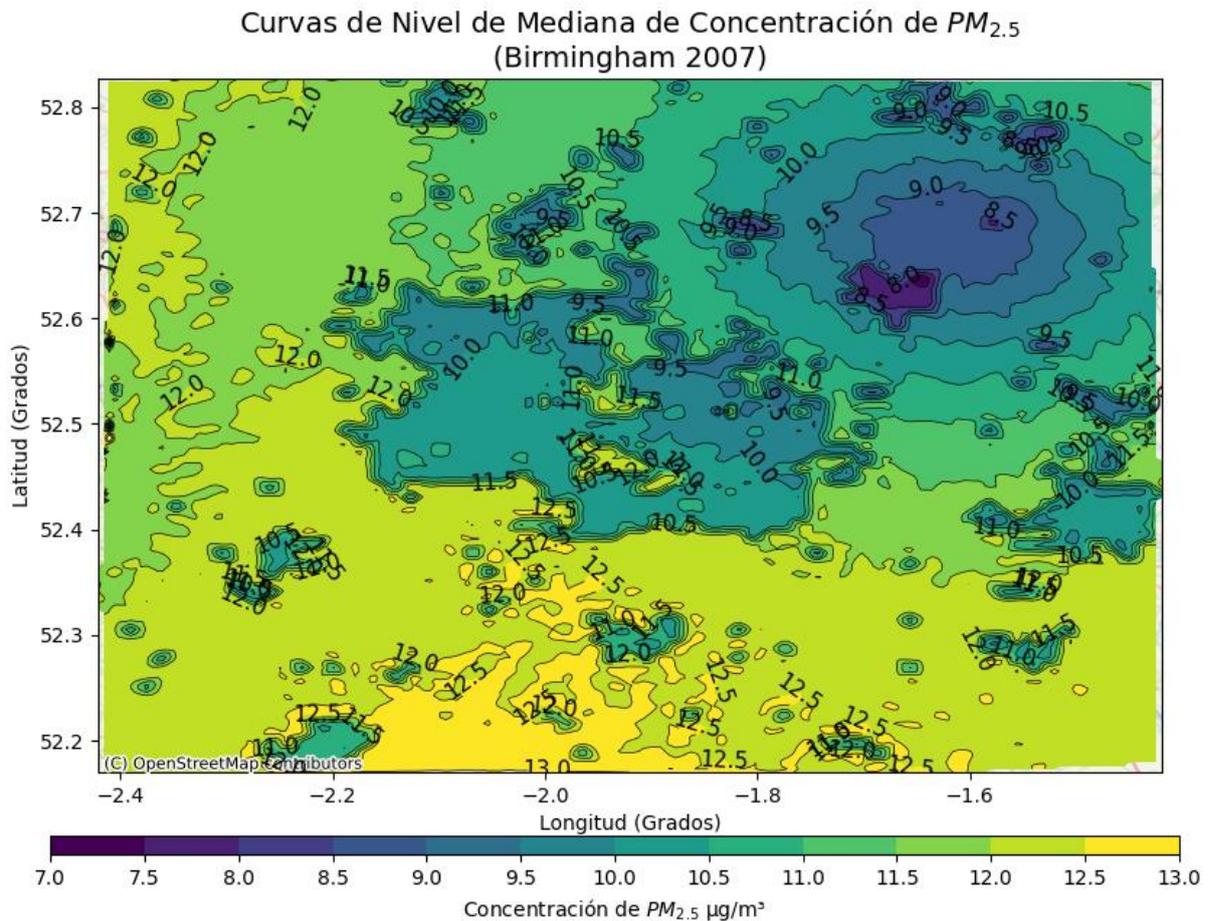


Figura 15. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{2.5}$ , Birmingham 2007.

Por lo tanto, al analizar los niveles de  $PM_{2.5}$  durante el período de estudio (Figura 16) revela una variabilidad geoespacial significativa en los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  en Birmingham y sus alrededores. Desde 2007 hasta 2009, se observa un patrón consistente de valores más bajos en ciertas áreas, como Swadlincote y Tamworth, las cuales se encuentran aproximadamente a 30 y 20 km respectivamente al sur y al noreste del centro de Birmingham. Este contraste se destaca con picos notables en localidades como Kingsbury, Alcester y Coventry, las cuales se sitúan entre 20 y 30 km al noreste y al sureste de Birmingham. Este fenómeno sugiere la presencia de diversas fuentes de contaminación y patrones de dispersión distintos en cada año.

Sin embargo, para el período comprendido entre 2010 y 2011, se destaca un aumento en los niveles de  $PM_{2.5}$  en áreas periféricas como Coventry, Redditch y Stourport-on-Severn, las cuales se encuentran entre 20 y 40 km al sureste y al suroeste de Birmingham. Esto indica una posible persistencia o intensificación de fuentes de contaminación en esas zonas. Aunque se observa una ligera disminución en 2011 en algunas áreas, como Coventry, la persistencia de valores altos en otros lugares subraya la necesidad continua de monitorear y evaluar la calidad del aire para abordar

eficazmente los problemas de contaminación atmosférica en estas comunidades urbanas y suburbanas.

Los detalles específicos de cada año se pueden revisar en el Anexo D, donde se presentan las curvas de nivel de concentración detalladas para  $PM_{2.5}$  correspondientes a cada año del período de estudio

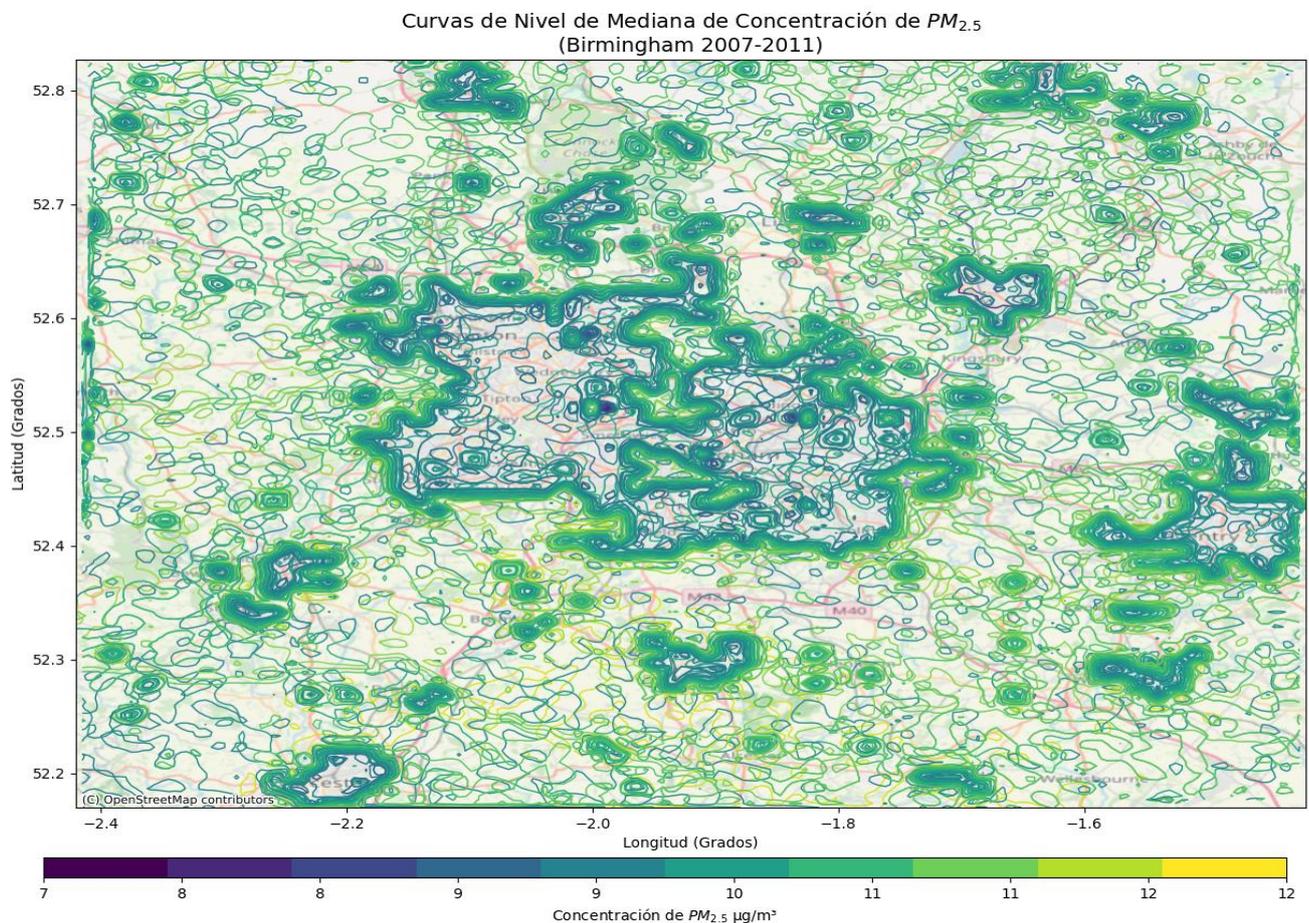


Figura 16. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{2.5}$ , Birmingham (2007-2011).

#### 4.4. Identificación de focos y sumideros en el área de estudio

La identificación de focos y sumideros de contaminación se basó en los umbrales definidos por los percentiles 25 y 75 que proporciona una herramienta útil para comprender la distribución espacial de la contaminación atmosférica en Birmingham. Las curvas de nivel clasificadas como focos, marcadas en rojo, indican áreas donde los niveles de contaminación superan el percentil 75, lo que sugiere puntos calientes de emisión de  $NO_2$ . Por el contrario, las curvas de nivel clasificadas como sumideros, marcadas en azul, representan áreas donde los niveles de contaminación están por debajo del percentil 25, lo que podría indicar zonas donde la contaminación es absorbida o dispersada de manera efectiva. A través de este enfoque podemos determinar la relación que existe entre fuente, el medio de transporte y el receptor (Echeverri 2019).

#### 4.4.1. Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)

Al analizar los niveles de NO<sub>2</sub> podemos observar que los mayores niveles se encuentran en zonas cercanas al centro de Birmingham (Figura 17), lo cual indica la presencia de fuentes de emisión significativas en estos puntos, es decir, las áreas cercanas al centro de Birmingham producen gran liberación de NO<sub>2</sub> (Focos), debido a su densidad poblacional y su actividad urbana intensa dentro del condado de West Midlands, en el corazón de Inglaterra. Estas zonas cuentan con una gran variedad de comercios, cafeterías, bares y restaurantes, siendo el mercado local de Kings Heath un punto de encuentro fundamental para la comunidad local. Además, el intenso flujo vehicular que atraviesa las calles de Harborne y Kings Heath, especialmente durante las horas pico, genera una importante fuente de emisiones de NO<sub>2</sub>. Esta situación se ve agravada por la topografía relativamente plana de la región, que no facilita la dispersión de los contaminantes atmosféricos. A pesar de la presencia de espacios verdes y áreas recreativas dispersas, estas áreas urbanas enfrentan el desafío de abordar los problemas ambientales derivados del tráfico y la contaminación atmosférica.

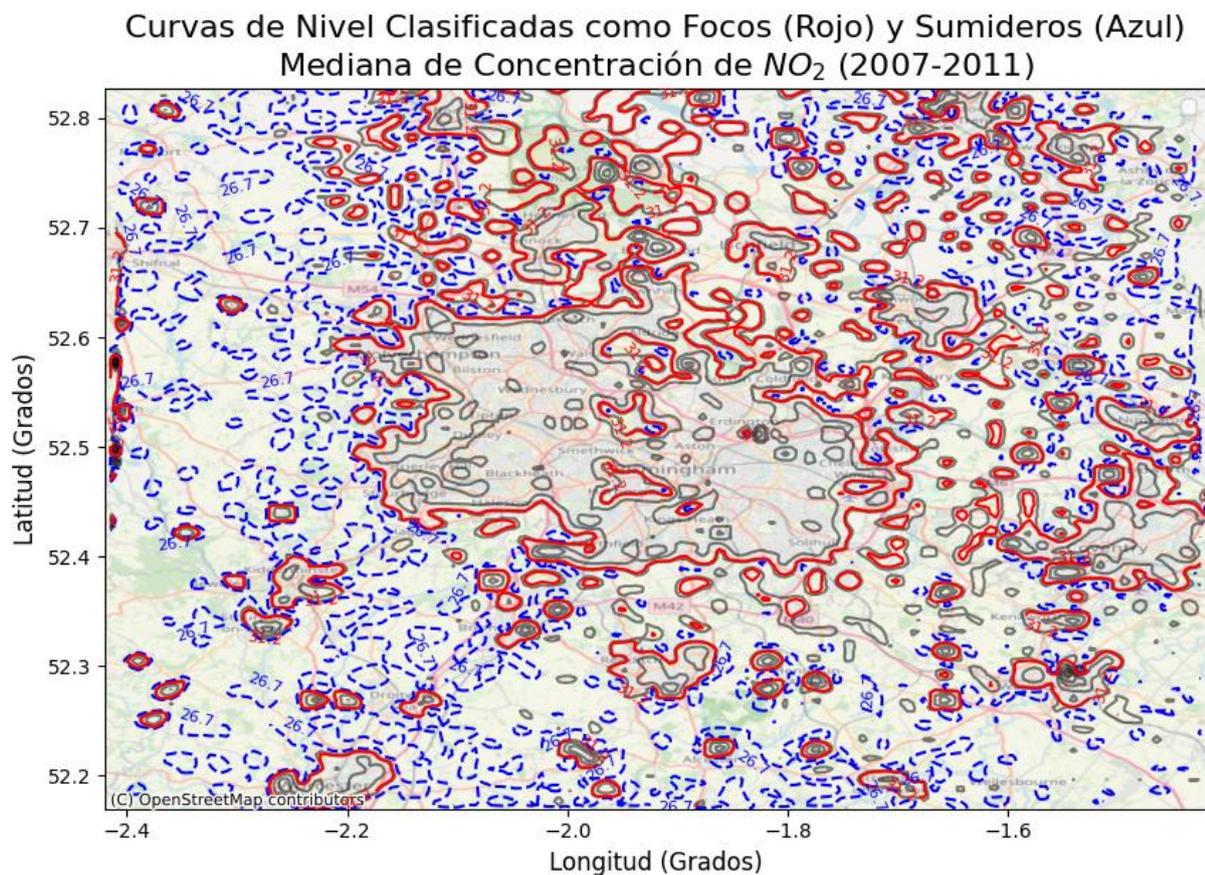


Figura 17. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros NO<sub>2</sub>, Birmingham (2007-2011).

Los valores más bajos de NO<sub>2</sub> se presentan en las áreas alejadas del centro de Birmingham, como las afueras de Hagley y Stourbridge. Este patrón persiste en zonas sin actividad urbana intensa y se repite en ciudades como Coventry, donde en su periferia se registran menores concentraciones de contaminantes. En los puntos periféricos de las ciudades, los niveles de NO<sub>2</sub> tienden a ser más bajos, ya que el NO<sub>2</sub> es absorbido o dispersado más fácilmente. Por lo tanto, estas zonas se podrían considerar como sumideros de NO<sub>2</sub>.

#### 4.4.2. Ozono (O<sub>3</sub>)

En cuanto al ozono troposférico las curvas de nivel de concentración de O<sub>3</sub> (Figura 18), muestra curvas de nivel que indican concentraciones de ozono (O<sub>3</sub>) entre 2007 y 2011. Las áreas en rojo representan focos, indicando puntos de alta concentración de ozono, posiblemente asociados con actividades industriales y tráfico vehicular intenso. En contraste, las áreas en azul señalan sumideros, ubicados principalmente en zonas menos urbanizadas o con vegetación, donde el ozono tiende a dispersarse o ser absorbido.

A partir de estos datos podemos ver que las zonas periféricas como Shirley, Redditch y Stourport-on-seven tienden a tener niveles más altos de ozono, posiblemente debido a una menor dispersión de contaminantes y a la influencia de los vientos que transportan contaminantes desde el centro. Sin embargo, hay excepciones, como Harborne, una zona relativamente cercana al centro de Birmingham, que muestra niveles elevados de ozono debido a factores locales. Esta variabilidad destaca la importancia de considerar las condiciones específicas de cada ubicación al abordar los problemas de calidad del aire en entornos urbanos.

En este sentido podemos afirmar que el centro urbano de Birmingham muestra una mezcla de focos y sumideros, reflejando la complejidad de la dinámica urbana además para el período analizado se observa una tendencia en la distribución de ozono que puede relacionarse con políticas locales de control de contaminación y cambios en las fuentes de emisión durante esos años.

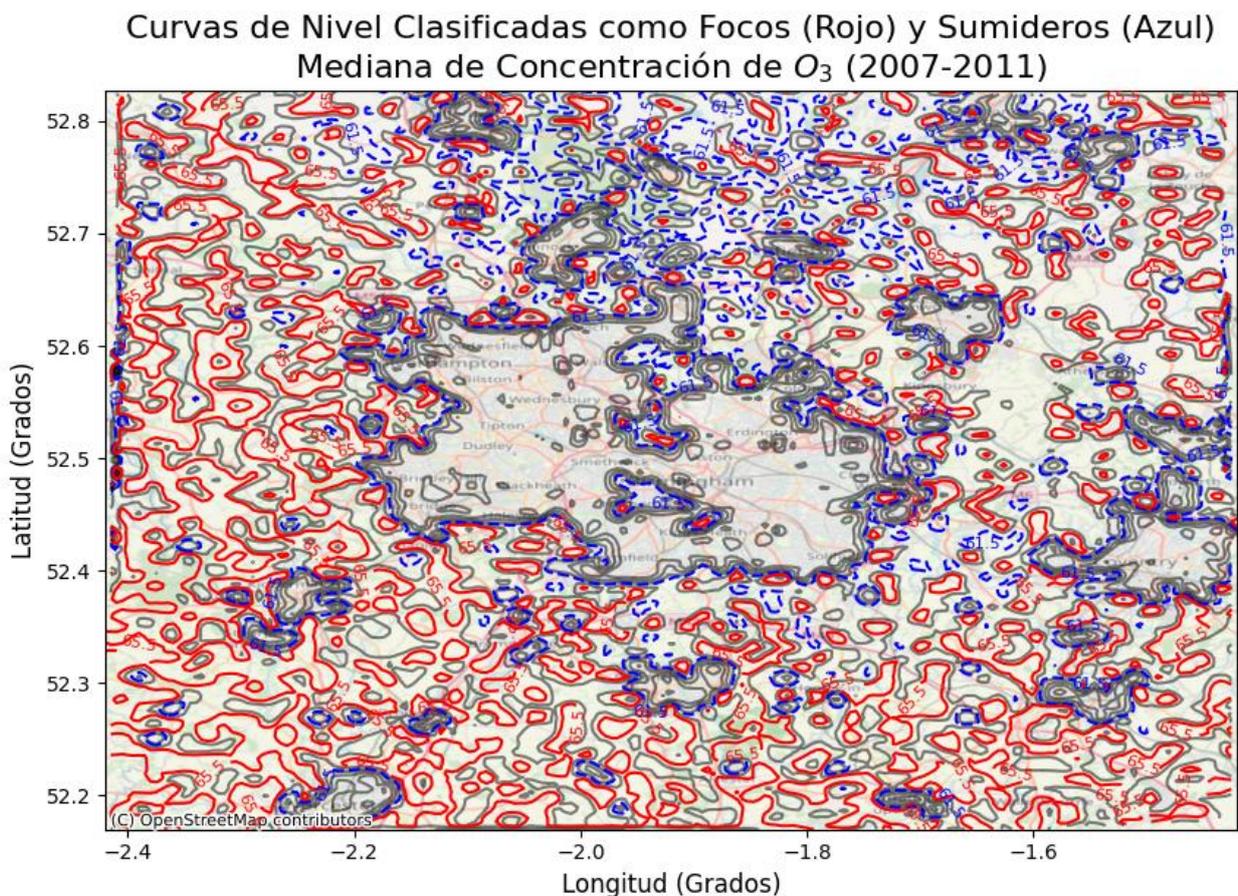


Figura 18. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros O<sub>3</sub>. Birmingham (2007-2011).

#### 4.4.3. Material particulado $PM_{10}$

El análisis del material particulado  $PM_{10}$  (Figura 19), no revela una tendencia clara que permita identificar zonas específicas como focos o sumideros. La distribución de las concentraciones de  $PM_{10}$  varía ampliamente, y esta variabilidad puede estar influenciada por diversas fuentes de emisión como la construcción, la demolición y las actividades industriales, así como por factores locales como el tráfico vehicular y las condiciones meteorológicas. Debido a estas múltiples influencias, no es posible establecer un patrón consistente en la distribución de  $PM_{10}$  en la región estudiada.

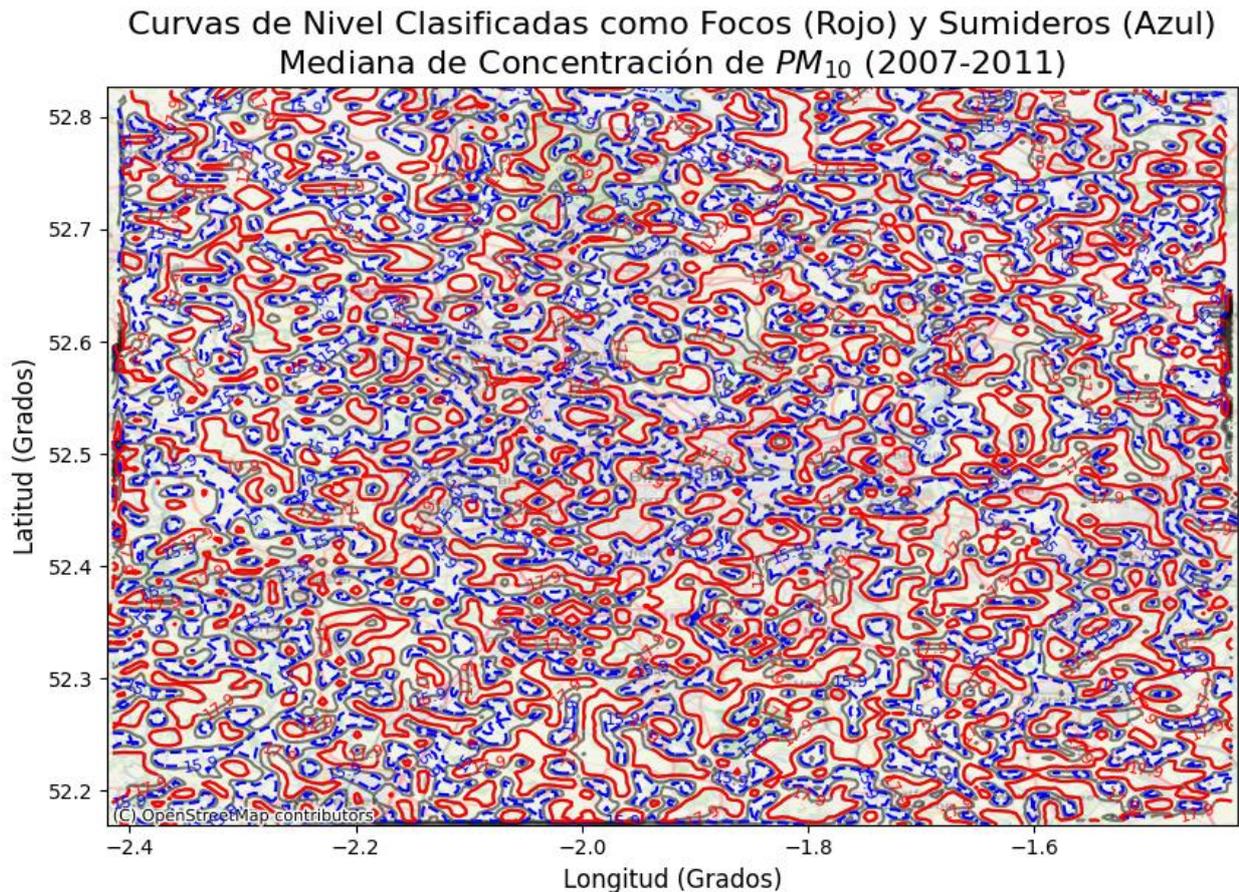


Figura 19. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros  $PM_{10}$ , Birmingham (2007-2011).

#### 4.4.4. Material particulado $PM_{2.5}$

En las zonas cercanas al centro de Birmingham, se observan niveles más bajos de  $PM_{2.5}$  (Figura 20), lo que indica que estas áreas actúan como sumideros, con excepción de Harborne y Aston, que se muestran como focos debido a sus mayores valores de  $PM_{2.5}$ . Sin embargo, en la periferia no se observa una tendencia clara, ya que hay zonas que actúan tanto como focos como sumideros. Esta variabilidad en la periferia puede deberse a la diversidad de fuentes de emisión y a factores locales como el tráfico vehicular, las actividades industriales, y las condiciones meteorológicas que afectan la dispersión y acumulación de partículas. Diferentes actividades y patrones de uso del suelo en estas áreas pueden generar concentraciones variables de material particulado.

En este sentido respecto al análisis espacial, se observa que las zonas urbanas densamente pobladas presentan más focos (rojo), sugiriendo que las actividades humanas, como el tráfico y la industria, contribuyen significativamente a los niveles elevados de  $PM_{2.5}$ . Esto es especialmente notable en el centro de Birmingham y sus alrededores, donde la densidad de focos es mayor. Las áreas suburbanas y rurales muestran más sumideros (azul), indicando una menor concentración de  $PM_{2.5}$ , posiblemente debido a menor actividad industrial y mejor dispersión de partículas.

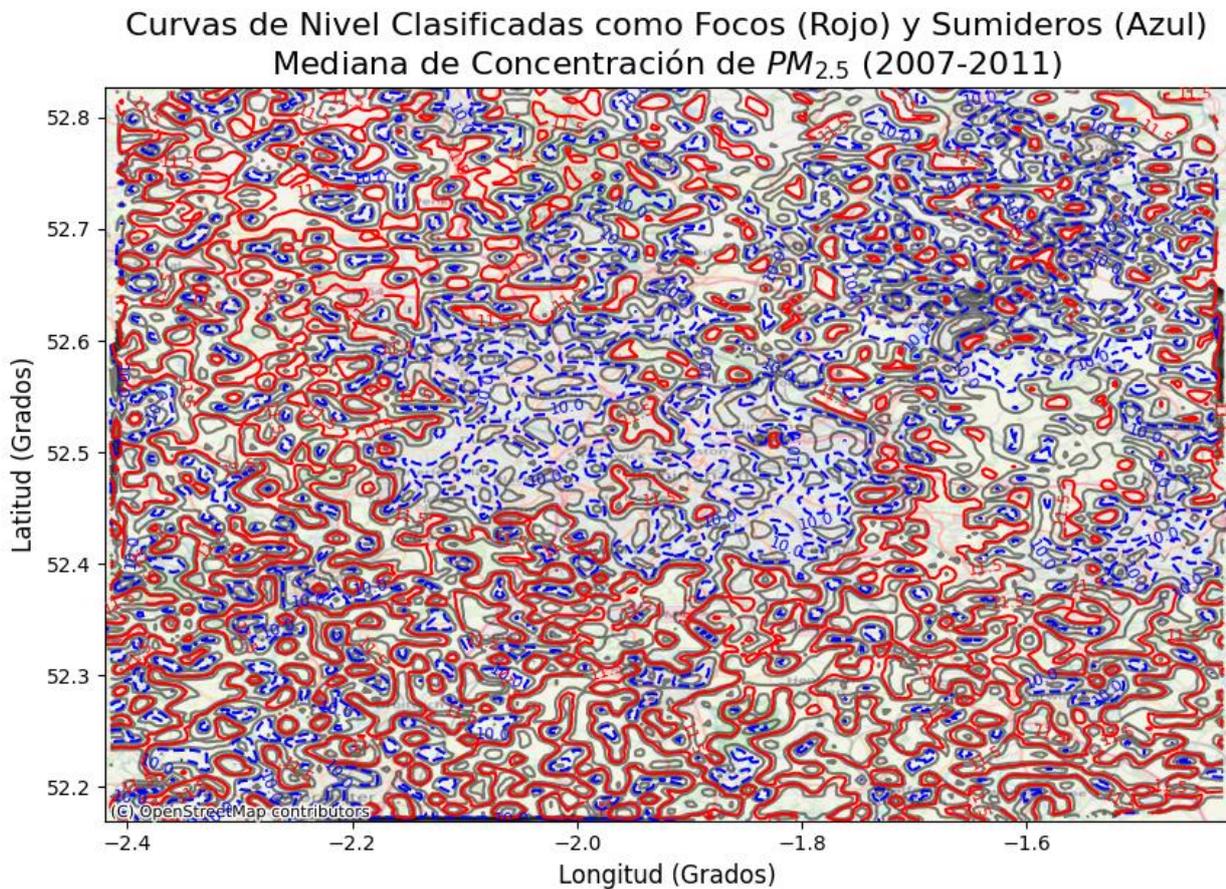


Figura 20. Curvas de nivel de concentración Focos y Sumideros  $PM_{2.5}$ , Birmingham (2007-2011).

En este sentido podemos afirmar, respecto al material particulado (Figuras 19 y 20), no se evidencia una tendencia clara que permita identificar zonas específicas como focos o sumideros. Como menciona DEFRA, diferentes fuentes de emisión pueden producir diferentes proporciones de partículas finas y gruesas. Por ejemplo, la construcción y la demolición emiten una mayor proporción de partículas gruesas ( $PM_{10}$ ), mientras que en la combustión industrial la mayoría de las emisiones de material particulado son partículas finas ( $PM_{2.5}$ ). Al observar las gráficas, no es evidente qué zonas se pueden clasificar claramente como focos o sumideros de material particulado debido a la variabilidad en las fuentes de emisión y la distribución de partículas.

## 5. CONCLUSIONES

i. Se calcularon los diferentes indicadores estadísticos como la mediana, el rango Intercuartil, el índice Yule-Kendall y la curtosis robusta a partir de los datos de estaciones de monitoreo lo que permitió obtener una evaluación completa de la distribución de los datos de contaminación del aire en Birmingham desde el 1 de enero de 2007 hasta el 31 de diciembre de 2011.

ii. Se analizó la tendencia temporal de los niveles de contaminación atmosférica ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ ) en el núcleo urbano de Birmingham y sus áreas periféricas desde el 1 de enero de 2007 a 31 de diciembre de 2011. De todo ello se han obtenido los siguientes resultados:

- Los niveles de  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  mostraron estabilidad en sus medianas a lo largo del periodo estudiado, lo que indica una exposición uniforme a estos contaminantes en la región analizada.
- Los niveles de  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$ , a pesar de su estabilidad en las medianas, sus desviaciones estándar altas, indican fluctuaciones significativas en las concentraciones anuales, posiblemente influenciadas por factores ambientales y humanos.
- La tendencia negativa en el índice Yule-Kendall para  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  sugiere una mejora en la calidad del aire respecto a estos contaminantes, posiblemente como resultado de políticas y regulaciones ambientales efectivas.
- Aunque las medianas de concentración de  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  se mantuvieron relativamente estables, las desviaciones estándar altas indican fluctuaciones significativas en los niveles de estas partículas a lo largo de los años.
- La tendencia negativa en el índice Yule-Kendall para  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  sugiere una mejora en la calidad del aire respecto a estas partículas, atribuible a medidas regulatorias para reducir las emisiones contaminantes.
- La presencia de valores atípicos, señalada por la curtosis robusta, destaca la influencia de factores locales y eventos excepcionales en las concentraciones de partículas. Esto subraya la necesidad de un monitoreo continuo y detallado para abordar los desafíos ambientales en la región de manera eficaz.

iii. Se contrastaron los niveles medios de contaminantes entre el centro urbano de Birmingham y sus áreas periféricas a lo largo del periodo de estudio, permitiendo llegar a las siguientes afirmaciones:

- La distribución espacial de los niveles de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en Birmingham durante el periodo de estudio 2007-2011 muestra un patrón consistente de concentraciones elevadas en áreas cercanas al centro de la ciudad. Zonas como Kings Heath, Harborne y Aston registran los niveles más altos de  $\text{NO}_2$ , indicando una mayor exposición en estas áreas urbanas densamente pobladas y con tráfico vehicular intenso. Por otro lado, las áreas periféricas y suburbanas, como Solihull, Hagley y Chelmsley Wood, presentan valores más bajos de  $\text{NO}_2$ , destacando una menor exposición en estas zonas. Este patrón sugiere la influencia significativa del tráfico vehicular y la actividad urbana en los niveles de  $\text{NO}_2$ .
- La distribución espacial de los niveles de ozono ( $\text{O}_3$ ) en Birmingham durante el período de estudio 2007-2011 muestra un patrón consistente de concentraciones más bajas en áreas cercanas al centro de la ciudad en comparación con la periferia. Áreas como Aston y el centro de Birmingham presentan valores de  $\text{O}_3$  relativamente bajos, mientras que zonas periféricas como Northfield, Halesowen, Hagley, y áreas cercanas a Coventry, Warwick, Tamworth, y Fazeley muestran concentraciones significativamente más altas de  $\text{O}_3$ . Este patrón recurrente indica que las ciudades más alejadas del centro, como Shirley, Redditch y Stourport-on-Severn, tienen los niveles más altos de  $\text{O}_3$ , con medianas que superan los  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No obstante, hay excepciones a esta tendencia, como Harborne, que presenta valores de  $\text{O}_3$

relativamente altos a pesar de estar cerca del centro, posiblemente debido a factores locales como la actividad industrial o patrones de viento específicos.

- La distribución de las concentraciones de  $PM_{10}$  es dispar, con niveles más altos en áreas cercanas al centro urbano como Smethwick, Aston y Harborne, y niveles más bajos en las afueras de la ciudad, como Wednesfield, Cannock y Penddridge. Esta disparidad sugiere que la proximidad geográfica al centro de Birmingham contribuye a la acumulación de contaminantes en el aire en las zonas urbanas densamente pobladas.
- En cuanto al  $PM_{2.5}$ , se identifica una variabilidad geoespacial durante el período estudiado, con concentraciones mínimas y máximas en diferentes áreas y años. Se observan valores significativamente elevados en áreas suburbanas y cercanas a centros urbanos. Se destacan cambios en los patrones de dispersión y posibles fluctuaciones estacionales en los niveles de  $PM_{2.5}$ .

iv. Se identificaron focos y sumideros en la región estudiada lo cual permitió afirmar:

- Los mayores niveles de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) se concentran en zonas urbanas densamente pobladas y con alta actividad vehicular, como el centro de Birmingham y áreas aledañas como Harborne y Kings Heath. Estas áreas pueden considerarse **focos** de  $NO_2$  debido a la intensa actividad urbana. En contraste, las zonas periféricas como Hagley, Stourbridge y la periferia de Coventry presentan menores concentraciones de  $NO_2$ , actuando como **sumideros** debido a la menor actividad urbana y mayor dispersión del contaminante.
- El ozono troposférico ( $O_3$ ) muestra un patrón inverso al del  $NO_2$ , con concentraciones más altas en las zonas periféricas como Shirley, Redditch y Stourport-on-Severn, que actúan como **focos** de  $O_3$ . En áreas urbanas céntricas, los niveles de  $O_3$  son menores debido a la reacción del  $NO_2$  con el  $O_3$ , formando  $NO_2$  y reduciendo las concentraciones locales de ozono. Sin embargo, existen excepciones como Harborne, que presenta altos niveles de  $O_3$  debido a factores locales específicos.
- La distribución de material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) y grueso ( $PM_{10}$ ) no muestra una tendencia clara para identificar zonas específicas como focos o sumideros. Esta variabilidad se debe a la diversidad de fuentes de emisión, como tráfico vehicular, actividades industriales y condiciones meteorológicas locales, lo que dificulta establecer un patrón consistente en la distribución de estos contaminantes.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Air Quality Expert Group (2021). Recent trends in surface ozone over the United Kingdom and future trajectories. Department for Environment, Food and Rural Affairs; Scottish Government; Welsh Government; Department of Agriculture, Environment and Rural Affairs in Northern Ireland. <http://uk-air.defra.gov.uk>
- Bechle, M.J., Millet, D. B., & Marshall, J. D. (2011). Effects of Income and Urban Form on Urban NO<sub>2</sub>: Global Evidence from Satellites. *Environmental Science & Technology*, 45(11), 4914-4920. <https://doi.org/10.1021/es103866b>
- Birmingham City Council (2019). Air quality annual status report 2019 containing data for 2018 [Informe en formato PDF]. Recuperado de [https://www.birmingham.gov.uk/downloads/file/15061/air\\_quality\\_annual\\_status\\_report\\_2019\\_containing\\_data\\_for\\_2018](https://www.birmingham.gov.uk/downloads/file/15061/air_quality_annual_status_report_2019_containing_data_for_2018)
- Birmingham City Council. (2020). Birmingham Air Quality Action Plan – 2020-2026. Birmingham City Council. Recuperado de [https://www.birmingham.gov.uk/info/20076/pollution/1277/what\\_causes\\_air\\_pollution/4](https://www.birmingham.gov.uk/info/20076/pollution/1277/what_causes_air_pollution/4)
- Cañada, R., Moreno, A. (2017). “El contraste intraurbano de la contaminación del aire por NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>: estudio en grandes ciudades españolas con datos observados e interpolados con SIG”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 19, p. 27-53. ISSN: 1578-515 <http://dx.doi.org/10.21138/GF.499>
- Chen, L., Guo, B., Huang, J., He, J., Wang, H., Zhang, S., & Chen, S. X. (2018). Assessing air-quality in Beijing-Tianjin-Hebei region: The method and mixed tales of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>. *Atmospheric Environment*, 193, 290-301. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.047>
- Chi, Y., Zhan, Y., Wang, K., & Ye, H. (2023). Spatial Distribution of Multiple Atmospheric Pollutants in China from 2015 to 2020. *Remote Sensing*, 15(24), 5705. <https://doi.org/10.3390/rs15245705>
- Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (2011). Review of the UK air quality index: a report by the Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. Oxon: Committee on the Medical Effects of Air Pollutants. [Accessed 09 April 2024]. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/comeap-review-of-the-uk-air-quality-index>
- Contaminación atmosférica. En: [www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf](http://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448169816.pdf) . (fecha de consulta 15/05/2024)
- Daellenbach, K.R., Uzu, G., Jiang, J., Cassagnes, L.-E., Leni, Z., Vlachou, A., ... Prévôt, A. S. H. (2020). Sources of particulate-matter air pollution and its oxidative potential in Europe. *Nature*, 587, 414–419. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2902-8>
- Department for Environment Food & Rural Affairs of UK Emissions of air pollutants in the UK – particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>). <https://www.gov.uk/government/publications/health-matters-air-pollution/health-matters-air-pollution>
- Ding, J., Ren, C., Wang, J., Feng, Z., & Cao, S. (2024). Spatial and temporal urban air pollution patterns based on limited data of monitoring stations. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140359>
- Echeverri, C.A. (2019). Contaminación atmosférica: ( ed.). Ediciones de la U. <https://elibro-net.pon-ton.uva.es/es/lc/uva/titulos/127067>
- Han, H., Zhang, L., Zehui, L., Yue, X., Shu, L., Wang, X., & Zhang, Y. (2023). Disminución de las diferencias en el ozono superficial urbano y no urbano en el hemisferio norte durante el período 1990-2020. *Medio Ambiente. Ciencia. Tecnología*. Letón, 10(5), 410–417. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00105>

- Han, L., Zhou, W., Li, W., & Li, L. (2014). Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM<sub>2.5</sub>) in Chinese cities. *Environmental Pollution*, 194, 163-170. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.022>
- Kalisa, E., Fadlallah, S., Amani, M., Nahayo, L., & Habiyaemye, G. (2018). Relación entre la temperatura y la contaminación del aire durante las olas de calor en Birmingham, Reino Unido. *Ciudades y Sociedad Sostenibles*, 43, 111-120. <https://doi-org.ponton.uva.es/10.1016/j.scs.2018.08.033>
- Ma, C., & Ding, L. (2020). Empirical research on influential factors of air pollution in Chinese provincial capital cities. *Taller Internacional sobre Energía Verde, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible*, 601, 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/601/1/012011>
- Martínez, E. (2004). Contaminación atmosférica: ( ed.). Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. <https://elibro-net.ponton.uva.es/es/lc/uva/titulos/54954>
- Naciones Unidas. (s. f.). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Recuperado el 9 de febrero de 2021, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/4>
- Office for National Statistics. (s.f.). Air pollution and COVID-19 mortality rates. Recuperado de <https://www.ons.gov.uk/releases/airpollutionandcovid19mortalityrates>
- Organización Mundial de la Salud (2023). Base de datos de la OMS sobre la calidad del aire ambiente (actualización 2023). Versión 6.0. Ginebra.
- Organización Mundial de la Salud (2023). Orientación de la Organización Mundial de la Salud sobre la contaminación del aire y la salud. Disponible en línea: <https://www.who.int/news/item/10-10-2023-monitoring-air-pollution-levels-is-key-to-adopting-and-implementing-who-s-global-air-quality-guidelines> [Consultado el 09 de febrero de 2024].
- Pérez, I.A., García, M. Á., Rasekhi, S., & Pazoki, F. (2024). The London pollution island under Lamb weather types. *Urban Climate*, 53, 101834. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101834>
- Power, A.L., Tennant, R.K., Stewart, A.G. et al. (2023) The evolution of atmospheric particulate matter in an urban landscape since the Industrial Revolution. *Sci Rep* 13, 8964. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35679-3>
- Prieto, Á.P., Pérez, I.A., García, M.Á., Sánchez, M.L., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2021). Spatial analysis and evolution of four air pollutants in England and Wales. *Science of The Total Environment*, 774, 145665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145665>
- Public Health England. (2018). Health matters: Air pollution. London: Public Health England. [Accessed 09 April 2024]. Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/health-matters-air-pollution/health-matters-air-pollution>
- Reina, J., & Olaya, J. (2012). Ajuste de curvas mediante métodos no paramétricos para estudiar el comportamiento de contaminación del aire por material particulado PM<sub>10</sub>. *Revista EIA*, Número 18, 19-31. ISSN 1794-1237.
- Simion, D. (2003). Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana: ( ed.). B - CEPAL. <https://elibro-net.ponton.uva.es/es/lc/uva/titulos/66016>
- Smith, J., & Jones, A. (2019). Urban air quality: A comprehensive review. *Environmental Science & Technology*, 53(1), 35-54. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03912>
- Wang, J., & Wang, S. (2016). Air quality modeling and source apportionment analysis for total suspended particulate matter in Taichung, Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 16(7), 1549-1561.

- Wang, W.C., & Chen, K. S. (2008). Modeling and Analysis of Source Contribution of PM<sub>10</sub> during Severe Pollution Events in Southern Taiwan. *Aerosol and Air Quality Research*, 8(3), 319-338
- Wilks, D.S. (2020). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* (4th ed.).
- World Health Organization (WHO) (2021). 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. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- Wyche, K.P., Cordell, R. L., Smith, L., Smallbone, K. L., Lyons, P., Hama, S. M. L., Monks, P. S., Staelens, J., Hofman, J., Stroobants, C., Roekens, E., Kos, G. P. A., Weijers, E. P., Panteliadis, P., & Dijkema, M. B. A. (2020). The spatio-temporal evolution of black carbon in the North-West European 'air pollution hotspot'. *Atmospheric Environment*, 243, 117874. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117874>
- Zhang, X., Wang, Y., Zhang, X., Chen, L., & Zhang, M. (2019). Effects of air pollution control measures on air quality improvement in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Management*, 246, 705-716. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.046>

## ANEXO A. Medianas NO<sub>2</sub>

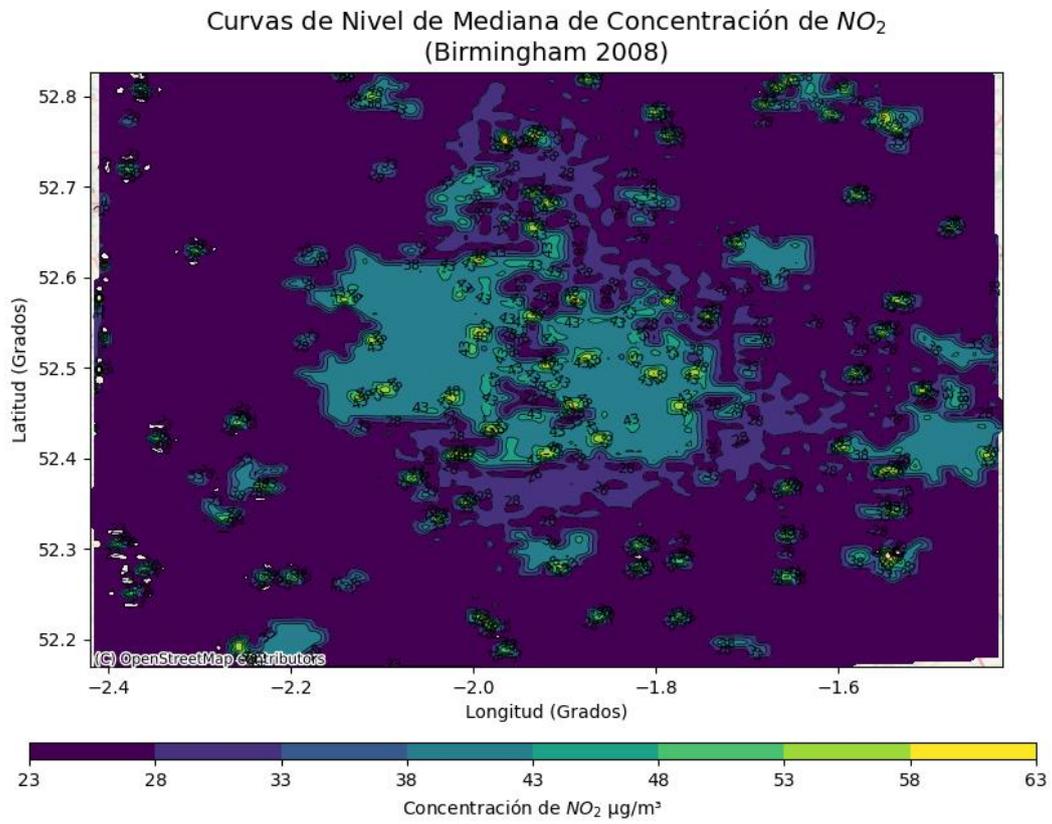


Figura 21. Curvas de nivel de concentración Mediana NO<sub>2</sub>, Birmingham 2008.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $\text{NO}_2$   
(Birmingham 2009)

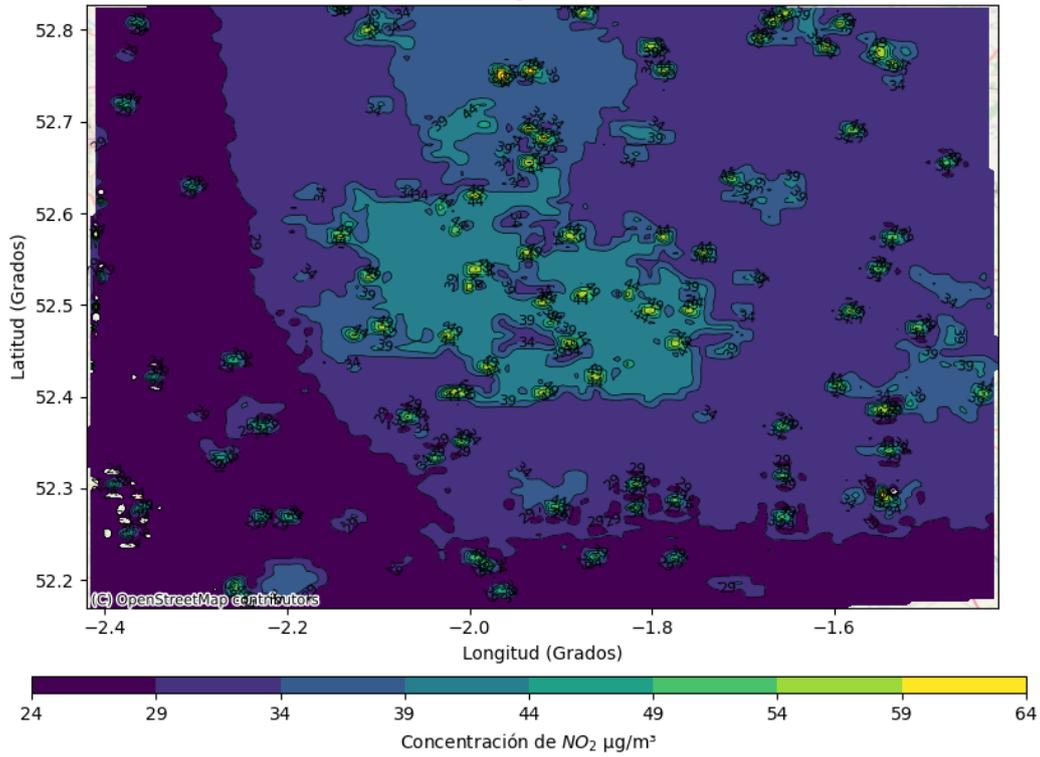


Figura 22. Curvas de nivel de concentración Mediana  $\text{NO}_2$ , Birmingham 2009.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $\text{NO}_2$   
(Birmingham 2010)

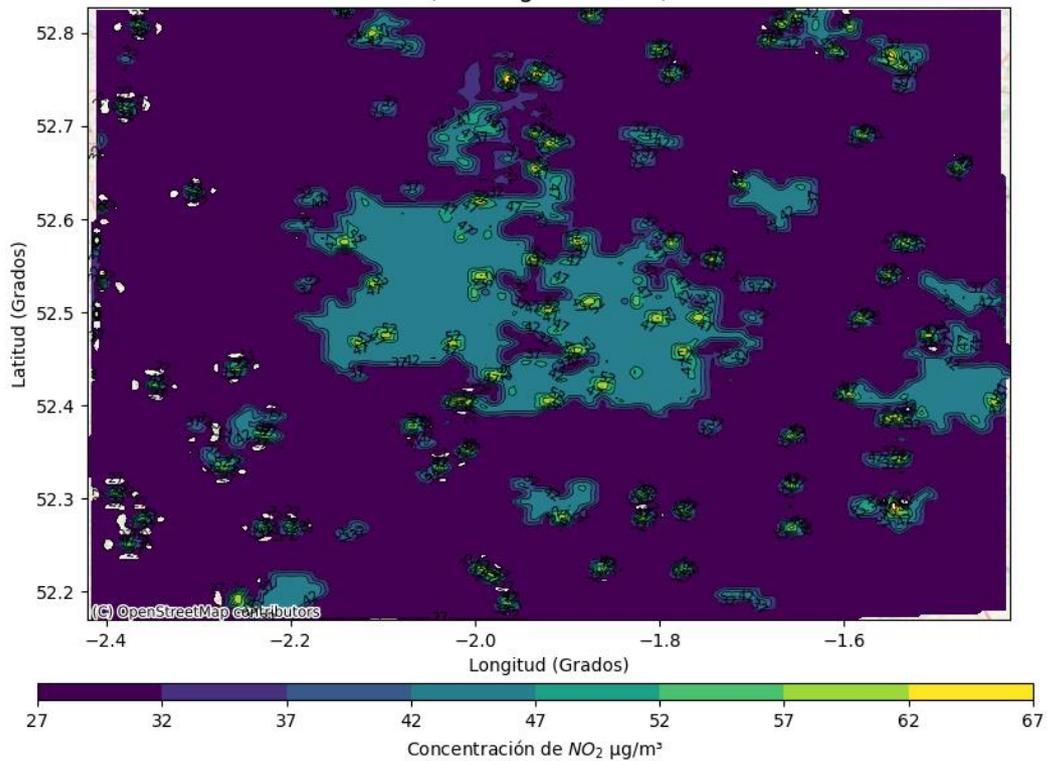


Figura 23. Curvas de nivel de concentración Mediana  $\text{NO}_2$ , Birmingham 2010.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $\text{NO}_2$   
(Birmingham 2011)

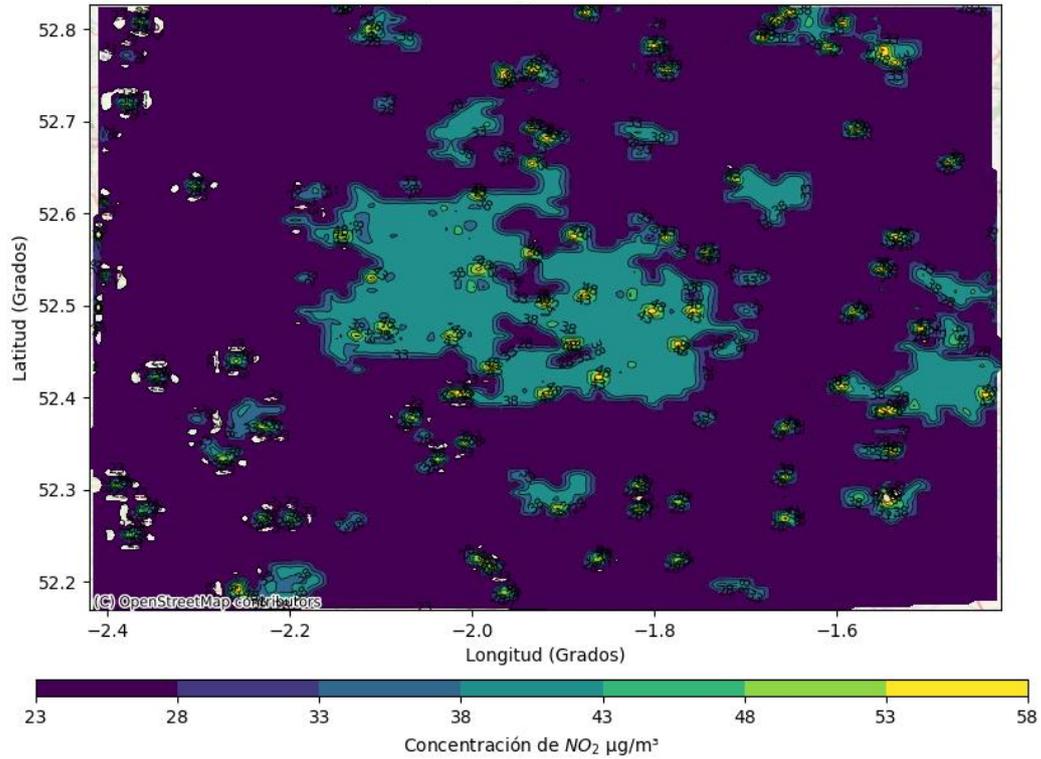


Figura 24. Curvas de nivel de concentración Mediana  $\text{NO}_2$ , Birmingham 2011.

## ANEXO B. Medianas $\text{O}_3$

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $\text{O}_3$   
(Birmingham 2008)

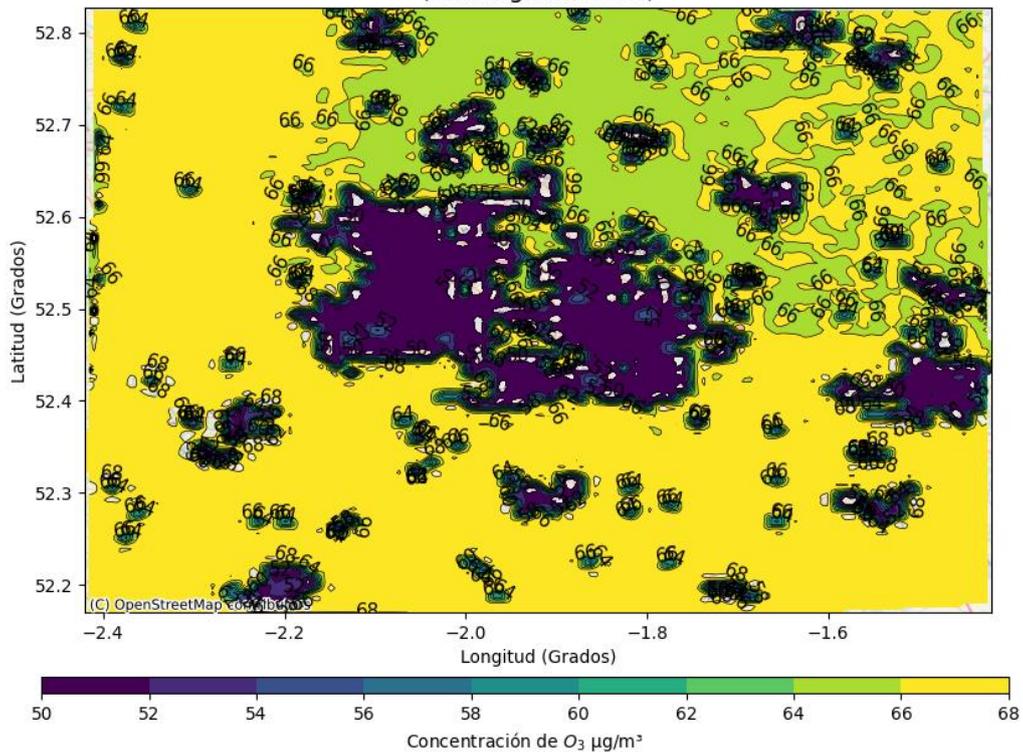


Figura 25. Curvas de nivel de concentración Mediana O<sub>3</sub>, Birmingham 2008.

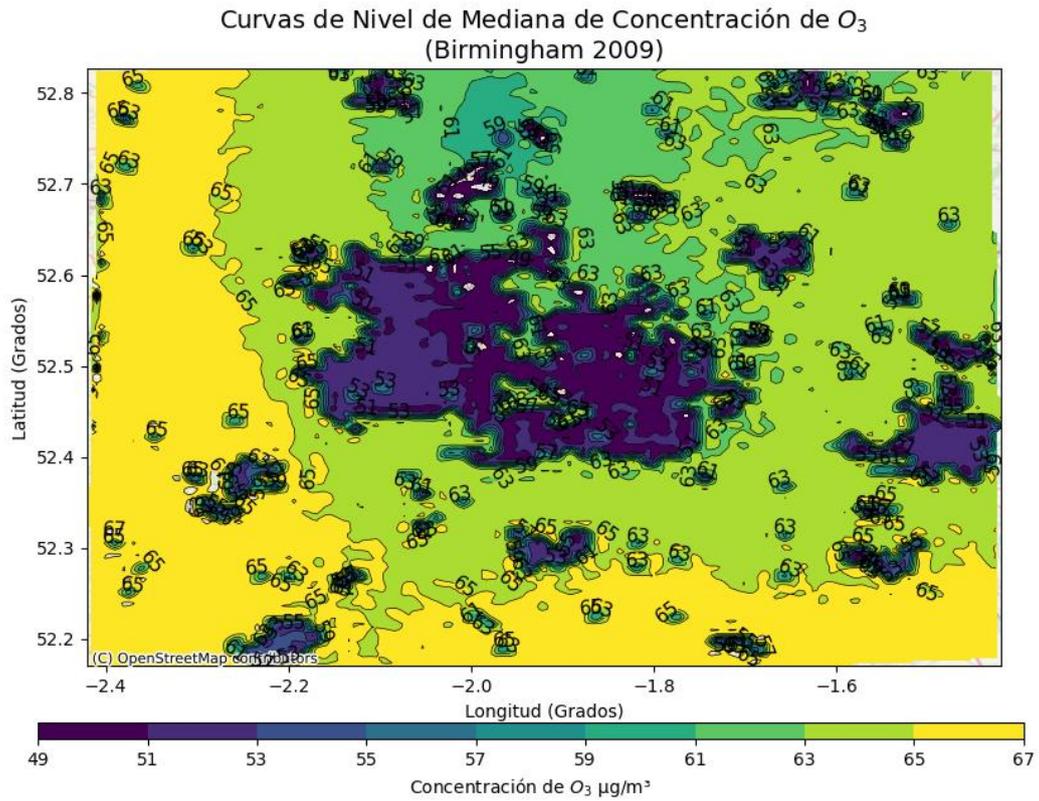


Figura 26. Curvas de nivel de concentración Mediana O<sub>3</sub>, Birmingham 2009.

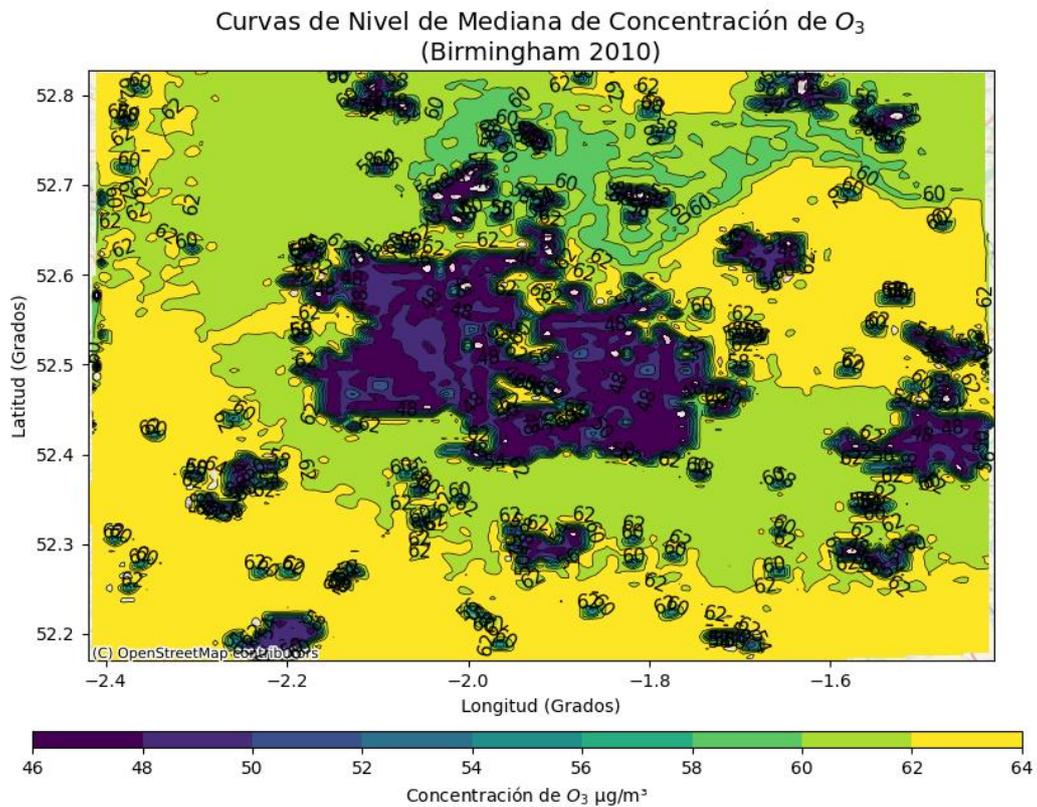


Figura 27. Curvas de nivel de concentración Mediana O<sub>3</sub>, Birmingham 2010.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $O_3$   
(Birmingham 2011)

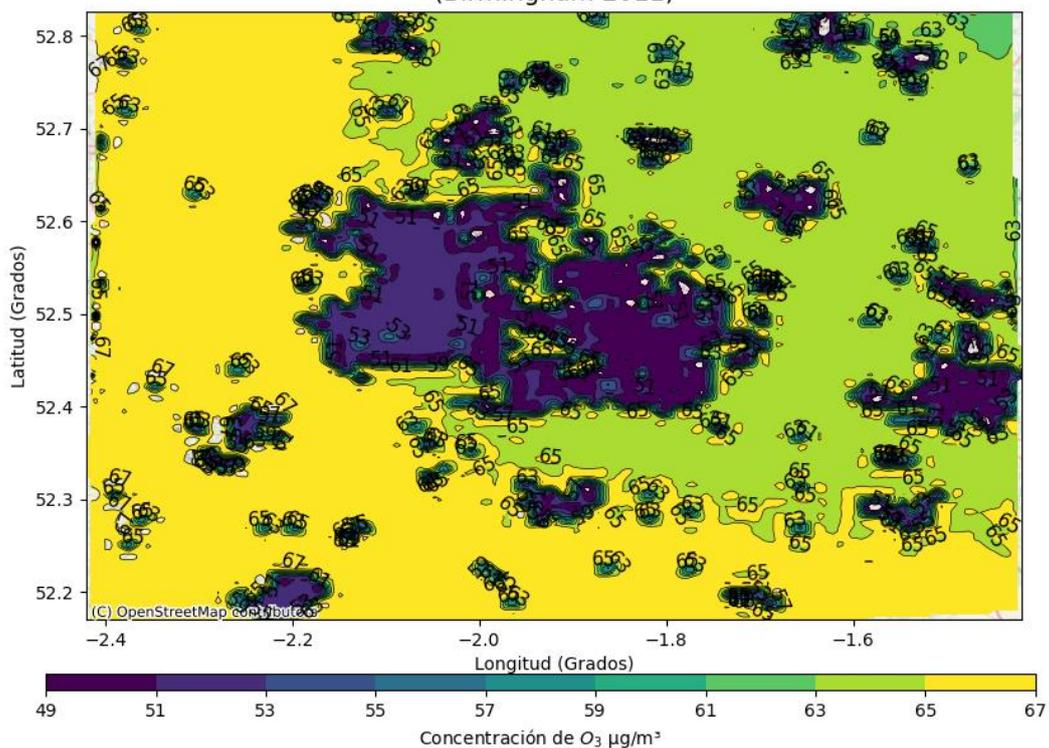


Figura 28. Curvas de nivel de concentración Mediana  $O_3$ , Birmingham 2011.

### ANEXO C. Medianas $PM_{10}$

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $PM_{10}$   
(Birmingham 2008)

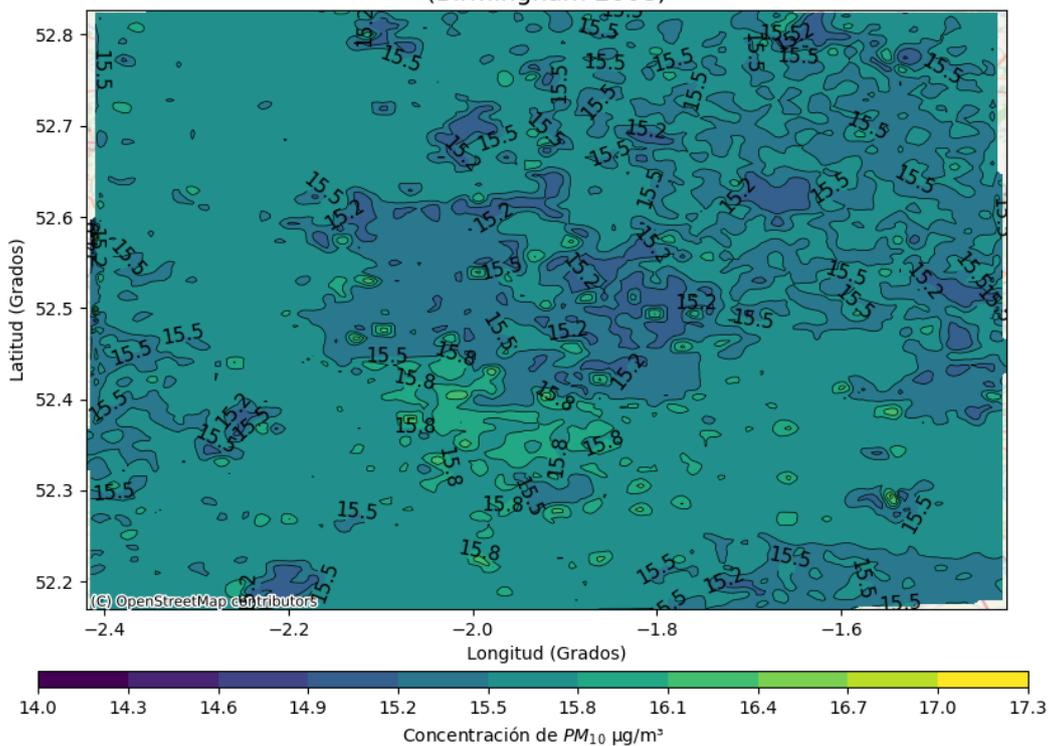


Figura 29. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham 2008.

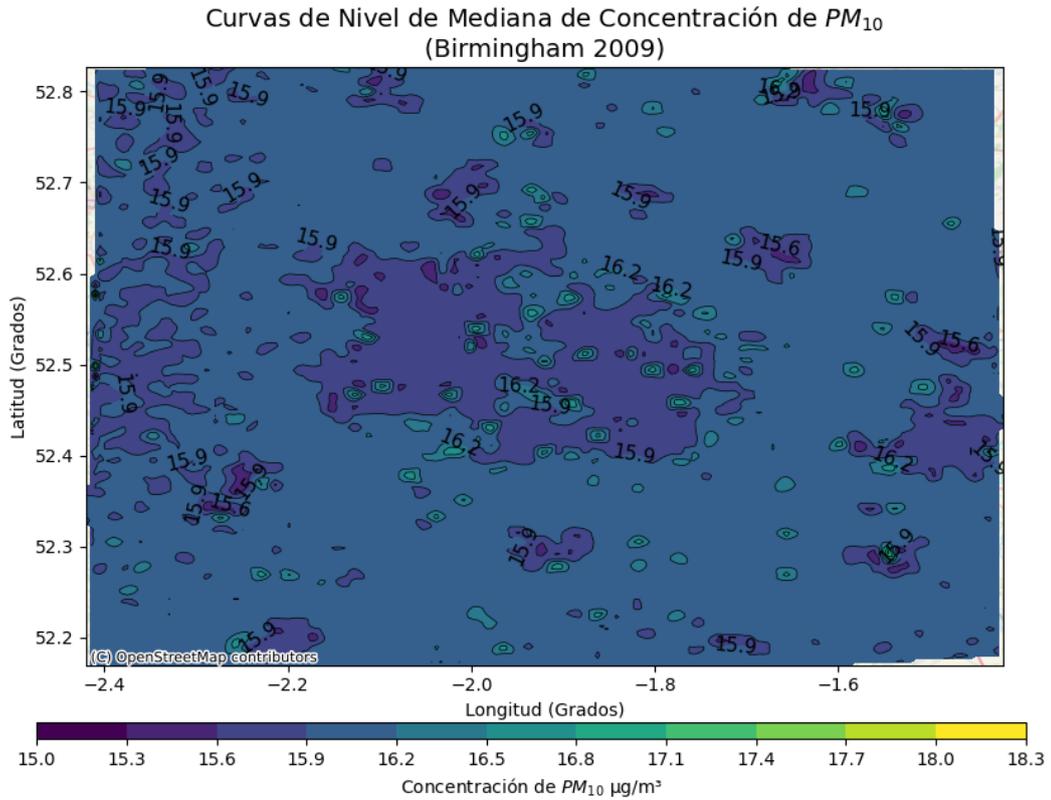


Figura 30. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham 2009.

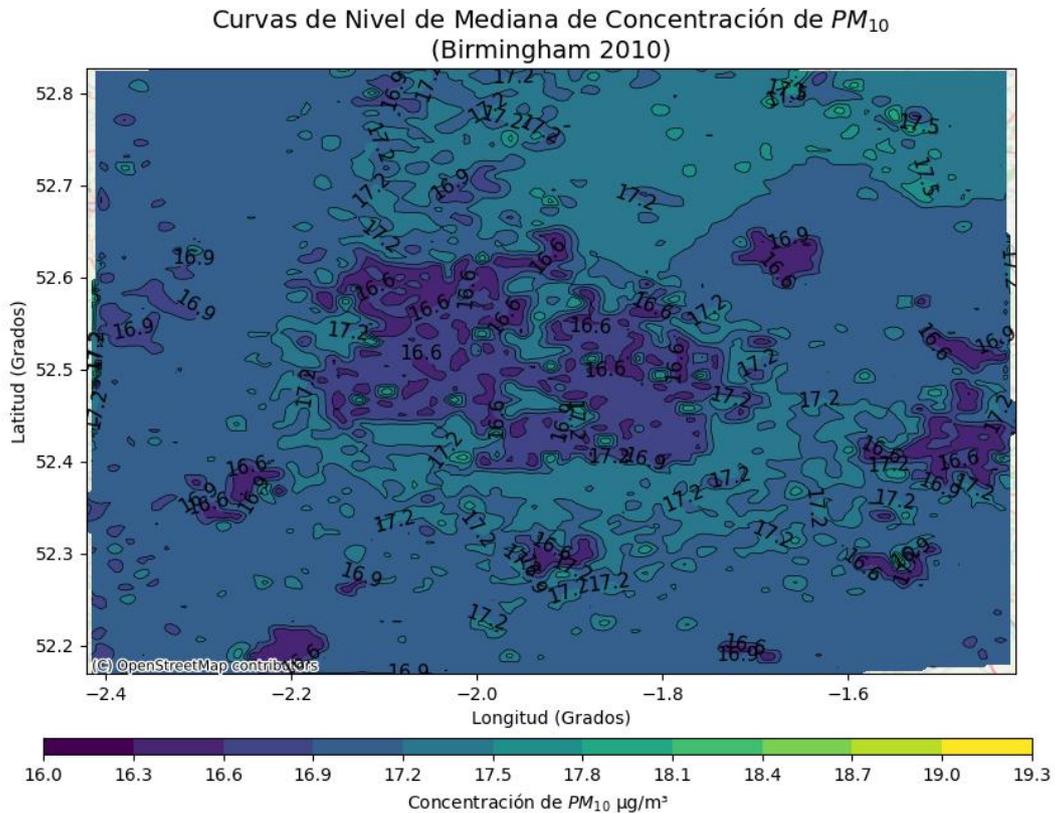


Figura 31. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham 2010.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $PM_{10}$   
(Birmingham 2011)

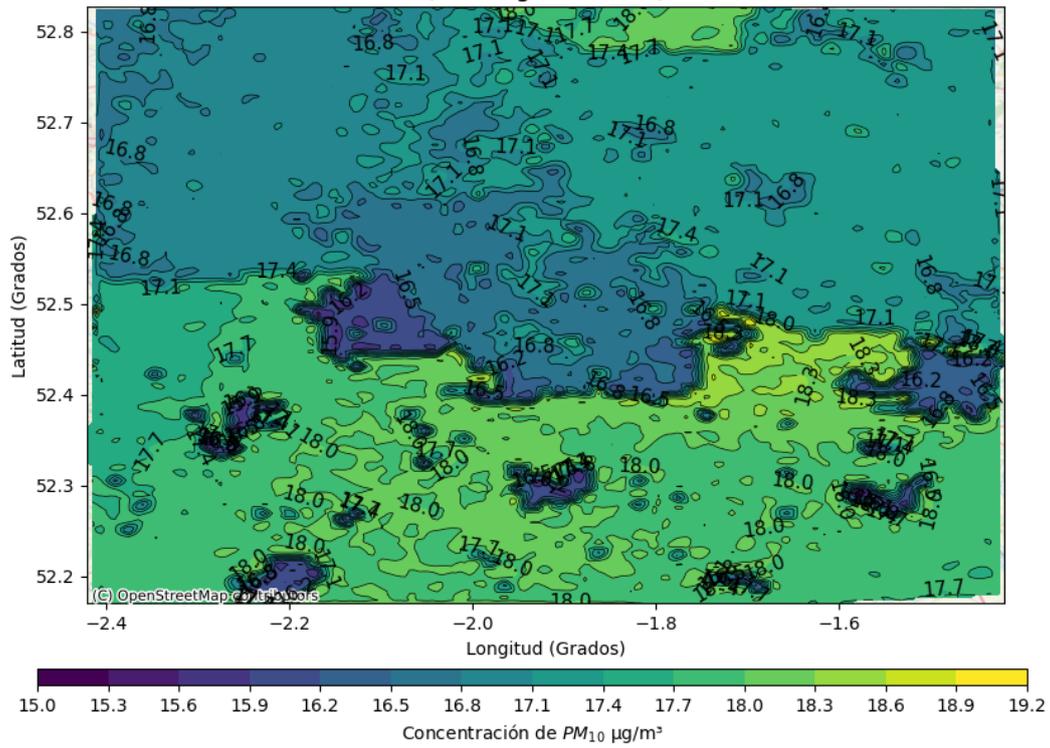


Figura 32. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{10}$ , Birmingham 2011.

## ANEXO D. Medianas PM<sub>2.5</sub>

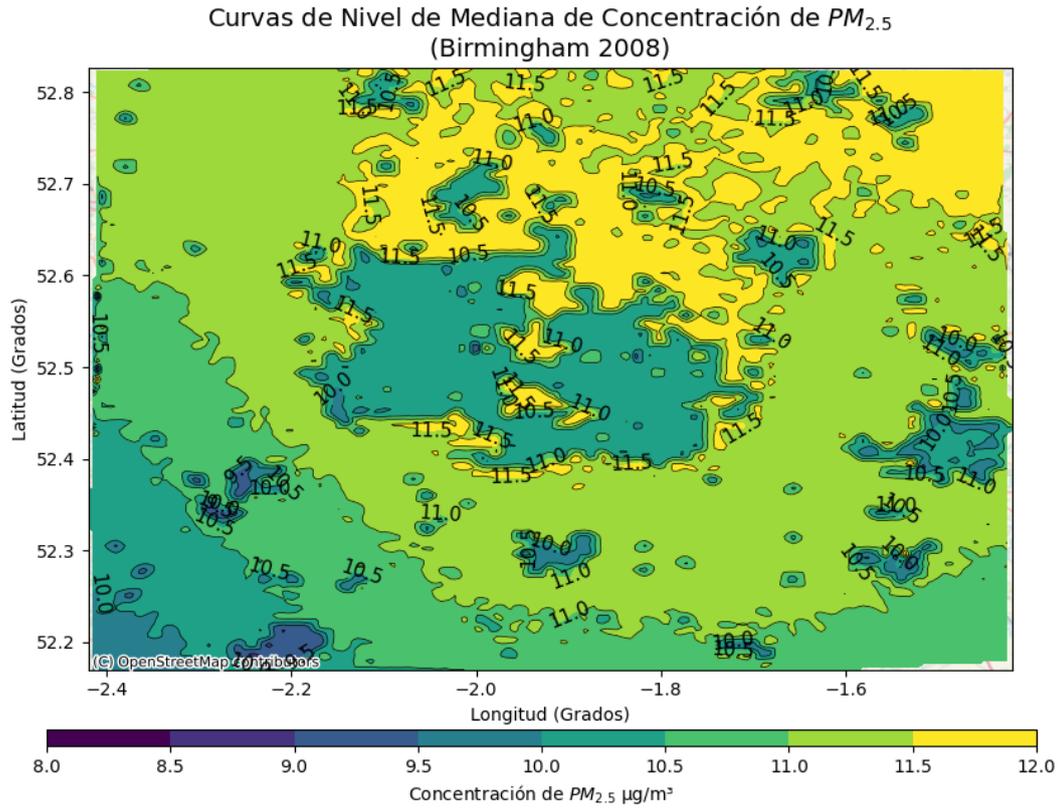


Figura 33. Curvas de nivel de concentración Mediana PM<sub>2.5</sub>, Birmingham 2008.

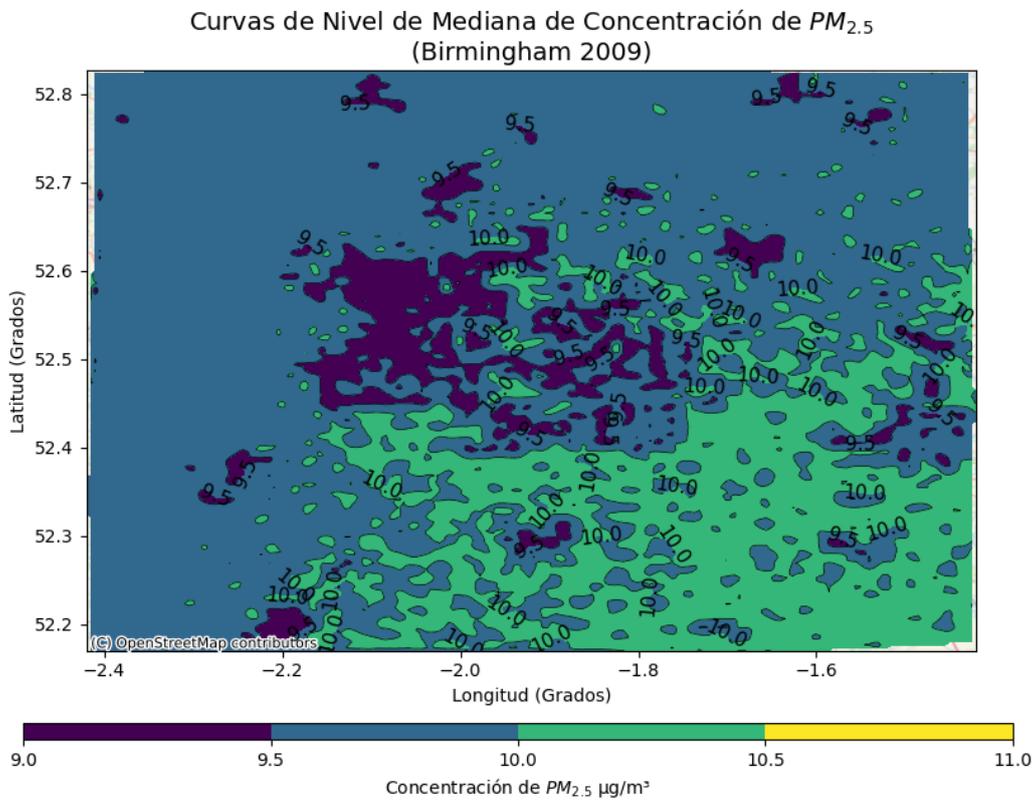


Figura 34. Curvas de nivel de concentración Mediana PM<sub>2.5</sub>, Birmingham 2009.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $PM_{2.5}$   
(Birmingham 2010)

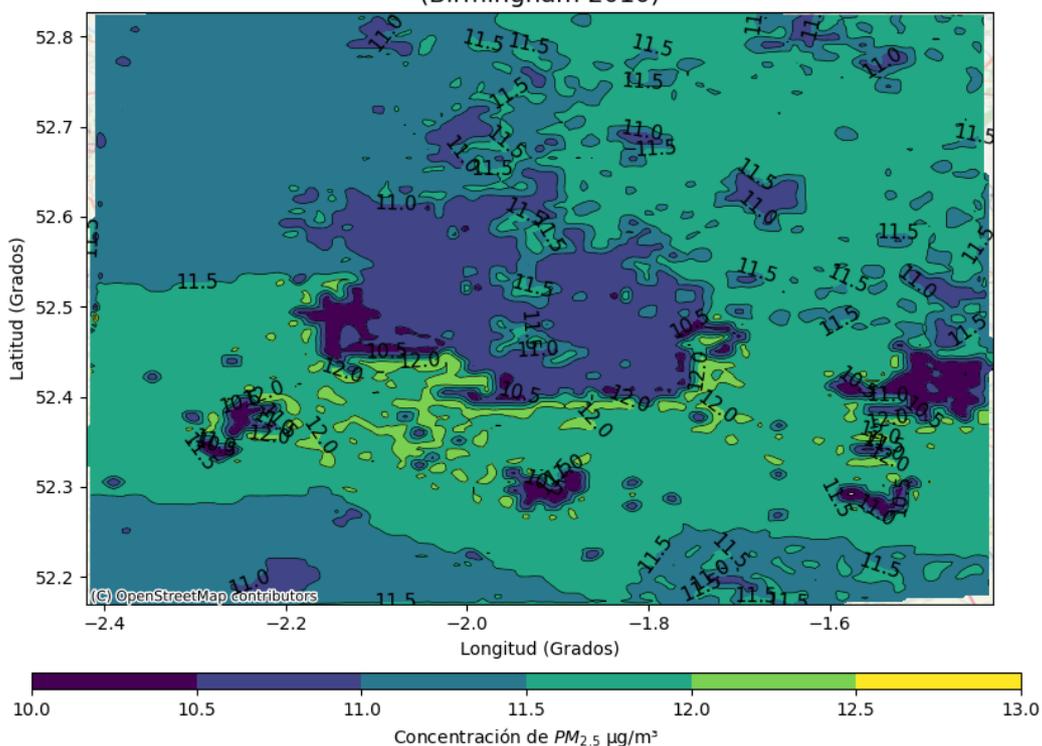


Figura 35. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{2.5}$ , Birmingham 2010.

Curvas de Nivel de Mediana de Concentración de  $PM_{2.5}$   
(Birmingham 2011)

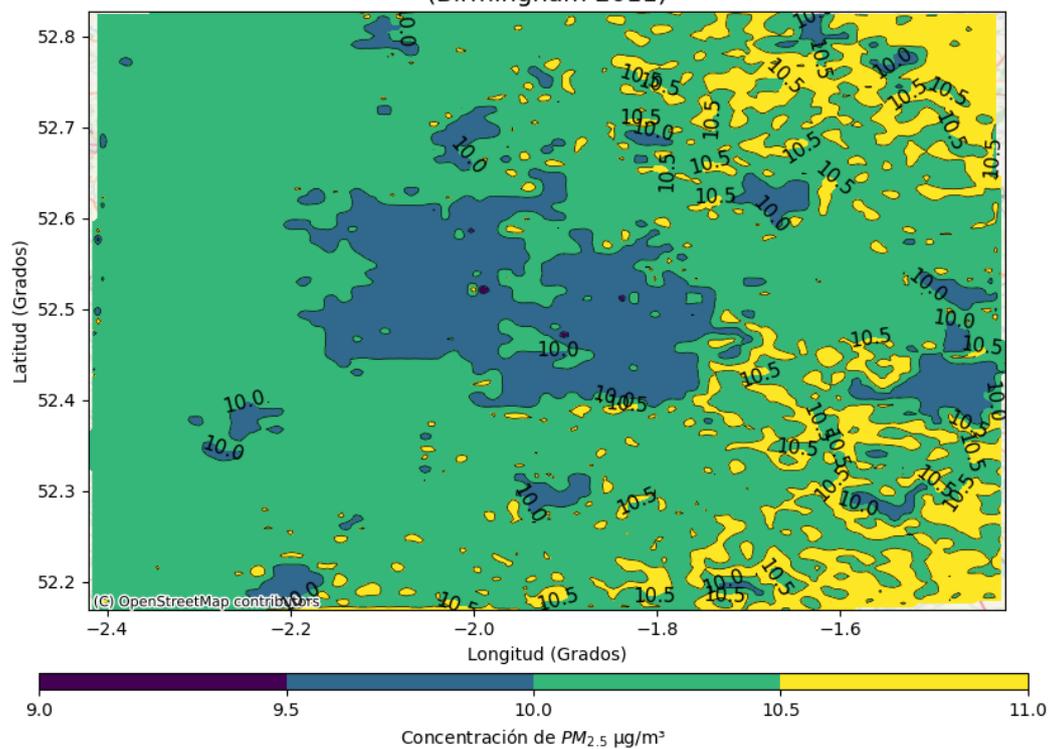


Figura 36. Curvas de nivel de concentración Mediana  $PM_{2.5}$ , Birmingham 2011.