

EXPOSICIÓN POTENCIAL DE GRUPOS VULNERABLES URBANOS A CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM₁₀: EVALUACIÓN EN GRANDES CIUDADES ESPAÑOLAS MEDIANTE LA BALANZA DE LA JUSTICIA AMBIENTAL

ÁREA TEMÁTICA: Problemas ambientales, cambio climático y gestión de riesgos

Antonio Moreno Jiménez*, Rosa Cañada Torrecilla, Pedro Martínez Suárez, María Jesús Vidal Domínguez y Antonio Palacios García

Departamento de Geografía, Universidad Autónoma de Madrid, España

* antonio.moreno@uam.es

Resumen

El concepto de justicia ambiental está adquiriendo cada vez mayor protagonismo como criterio y meta del desarrollo. Ello implica que situaciones, políticas y planes deberían ser examinados también desde ese punto de vista, para propiciar una disminución de las desigualdades en las “cargas” ambientales (externalidades negativas, peligros, malestar) soportadas por los distintos grupos sociodemográficos. Partiendo de esa premisa, en esta contribución se aplica una metodología original que, combinando técnicas estadísticas y de interpolación espacial, y apoyada en sistemas de información geográfica (SIG), permite medir en qué grado ciertas subpoblaciones están sobre- o subexpuestas en el interior de la ciudad a unos niveles de polución atmosférica por PM₁₀ excesivos, lo cual puede repercutir seriamente en su bienestar y salud. Como casos de estudio se tratan dos grandes ciudades españolas y varios grupos de población considerados como vulnerables. Los resultados desvelan que, junto a una alta exposición general, algunos colectivos demográficos soportan una superior exposición potencial a elevadas concentraciones anuales de PM₁₀. Ello indicaría la existencia de injusticias ambientales intraurbanas, aunque en grado diverso.

Palabras clave: justicia ambiental, contaminación atmosférica, material particulado PM₁₀, población vulnerable, exposición ambiental, sistemas de información geográfica.

1. Introducción

El concepto de justicia ambiental (JA) está recibiendo cada vez mayor atención en el ámbito de las comunidades científicas, habida cuenta de que social y políticamente está ganando notoriedad como criterio y meta del desarrollo territorial. Como noción posee una notable riqueza y complejidad, tal como se ha puesto de manifiesto en diversas obras teóricas sobre el mismo (e.g. Dobson, 1998; Walker, 2009; Wenz, 1988). Con frecuencia se suele afirmar que “*Environmental injustice is the inequitable and disproportionately heavy exposure of poor, minority, and disenfranchised populations to toxic chemicals, contaminated air and water, unsafe workplaces, and other environmental hazards*” (Landrigan *et al.*, 2010: 178). En una interpretación más general de la idea se podría sostener la existencia de injusticia siempre que la afección o exposición, real o potencial, a ambiente negativo fuese soportada por algún grupo sociodemográfico en una cuantía mayor que lo que le corresponde. Una situación justa ambientalmente implicaría, entre otras cosas, que las “cargas” ambientales (peligros, degradación, malestar, insalubridad, etc.) fuesen sufridas por los diversos grupos socio-espaciales de forma no discriminatoria, es decir, que se repartiesen y afectasen de manera equilibrada a todos ellos, evitando particularmente la afección excesiva y desproporcionada sobre los más débiles, desfavorecidos o vulnerables (Moreno, 2010). La falta de

equidad ambiental, como ha descrito Walker (2012) puede emerger de formas muy diversas y bastantes estudios han evidenciado que existe en muchas situaciones y que ello afecta seriamente al bienestar y salud humanos.

De lo conocido hasta ahora se colige que políticas y planes deberían estar inspirados también en tal principio y que las situaciones discriminatorias y los conflictos observables en muchos lugares deberían ser examinados también desde esa perspectiva, con el objetivo de propiciar un equilibrio o disminución de las desigualdades en las “cargas” ambientales (externalidades negativas, peligros, malestar) soportadas por los distintos grupos sociodemográficos. Los estudios han puesto de relieve así mismo que todavía queda mucho por hacer, no solo en el plano de las normativas, por ausencia de las mismas en muchos países, sino también en el de los métodos de evaluación, por las dificultades de medición que supone ese concepto.

Partiendo de esa premisa, en este trabajo se pretende realizar y divulgar una contribución novedosa, a la vez metodológica y empírica, que se ha desarrollado en el marco de un proyecto de investigación reciente. Combinando técnicas estadísticas y de interpolación espacial, y apoyándonos en sistemas de información geográfica (SIG), se ha tratado de medir en qué grado ciertas subpoblaciones están sobre o subexpuestas en el interior de la ciudad a unos niveles de polución atmosférica por PM_{10} excesivos, hecho que puede repercutir seriamente en su bienestar y salud. Como casos de estudio se tratan algunas grandes ciudades españolas y varios grupos de población considerados como vulnerables.

De forma más explícita los objetivos avistados podrían enumerarse como sigue: a) determinar la desigual exposición potencial de ciertos grupos vulnerables a niveles elevados de un importante contaminante del aire, como son las PM_{10} ; b) valorar las diferencias detectadas en equidad ambiental por esa causa en algunas grandes ciudades españolas; c) difundir una metodología efectiva para cuantificar injusticias ambientales en áreas urbanas; y d) finalmente, facilitar la conciencia y debate públicos en torno a la JA, postulando su evaluación periódica a partir de estudios como el presentado que faciliten un empoderamiento social y mejores bases para la acción política.

En el apartado siguiente se presentan abreviadamente unos antecedentes de este tipo de estudios, para luego exponer los materiales y métodos usados. Seguidamente se comentan los resultados y se termina con unas conclusiones.

2. Antecedentes: un breve apunte

Dejando aparte las cuestiones teóricas, la indagación metodológica y empírica sobre JA está en franca expansión, aunque con notables desigualdades entre ámbitos geográficos. Varios autores han publicado revisiones bibliográficas sobre el tema en las que es posible conocer los principales aspectos y desarrollos. Por imposibilidad de hacerlo aquí remitimos al lector a las síntesis de Chakraborty *et al.* (2011); Holifield *et al.* (2009); Reed and George (2011); Martuzzi *et al.* (2010); y Walker (2012). En general, la producción abunda mucho más en el ámbito anglosajón; en otros países europeos la indagación es aún modesta en cifras (vid. los trabajos de Maier y Mielck, 2010; Moreno, 2010; Raddatz y Mennis, 2012); en otras partes del mundo como Asia (Harding, 2007), América Latina (e.g. Carruthers, 2008; Berger, 2012; Vásquez y Salgado, 2009) o África la atención al tema está comenzando, con particular énfasis en su dimensión política.

Los métodos y los aspectos considerados resultan muy variados, habiendo quedado probado en los estudios que en muchos lugares existen injusticias ambientales, aunque no siempre. En todo caso se concluye unánimemente la trascendencia del asunto y la necesidad de incorporar la evaluación de la JA en la toma de decisiones que impliquen externalidades y riesgos ambientales, frente en el que cada vez se alzan más voces en pro de regulaciones normativas eficaces.

3. Métodos y datos

El concepto de exposición potencial adoptado aquí (vs. exposición real) quiere aludir a varios elementos importantes que introducen incertidumbre a la hora de realizar la interpretación: por un lado, que el indicador de polución usado es un valor promedio, cuya variabilidad temporal puede ser importante; además, al no ser posible conocer el valor de contaminación más que en los observatorios se debió estimar dichos valores para todo el ámbito de estudio, como más abajo se explica; y por otro, que la localización adoptada para asignar un grado de concentración del contaminante a la población ha sido la de su residencia habitual, por lo que en función de la movilidad espacio-temporal de cada individuo ello contendrá una inexactitud en un grado no cuantificado en este artículo. Veamos algo más pormenorizadamente las operaciones desarrolladas a estos efectos.

En primer lugar, y a los fines de un estudio como este, resulta muy importante establecer una adecuada delimitación del *ámbito de estudio* en las ciudades consideradas. A primera vista se podría pensar en el espacio urbanizado, pero en el mismo existen zonas de muy desigual presencia humana (en el tiempo). Pese a las evidentes limitaciones, la alternativa más frecuente ha sido referir la población a su domicilio habitual y considerar que las condiciones ambientales de ese entorno son las que representarían mejor la exposición potencial al ambiente atmosférico. Así se ha hecho en este estudio, y en razón de ello se ha introducido el concepto de “*área urbana poblada*” (AUP) como aquella, y su entorno cercano, en la que hay una notable presencia habitual de residentes. De manera operativa se incluyeron las zonas de uso residencial, comercial, ocio, etc. y se excluyeron las áreas extensas de uso industrial, transporte (e. g. aeropuertos), agrícola, etc., donde la densidad de población era baja o exigua. La delimitación de dicha zona se apoyó en la interpretación de imágenes aéreas recientes (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional de España) y de cartografía de usos del suelo (Corine LandCover, 2006), apoyada en SIG.

En segundo lugar, los datos de *contaminación del aire* por PM₁₀, proceden de los organismos locales y autonómicos competentes (Ayuntamiento y Comunidad de Madrid y Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica de la Generalitat de Catalunya). Se han utilizado estaciones sitas en el interior de los municipios examinados, Madrid y Barcelona, y otras próximas, situadas en municipios limítrofes, para mejorar la cobertura del muestreo espacial. La variable ambiental seleccionada para este estudio ha sido la concentración media anual de partículas en suspensión de un tamaño inferior a 10 µm, PM₁₀, del año 2010 en µg/m³. Como es sabido, las partículas (aerosoles) son emitidas por una gran variedad de fuentes, en función de las cuales varían sus propiedades físicas y su composición química. Pueden ser primarias, vertidas directamente a la atmósfera desde su fuente de emisión, o secundarias, formadas a partir de contaminantes primarios previamente liberados. La principal fuente de material particulado en el ámbito urbano es el tráfico rodado, que engloba tanto emisiones directas de la combustión como las procedentes por la re-suspensión de materiales procedentes del firme de la calzada, como consecuencia de la abrasión mecánica de vehículos, frenos, ruedas, etc. Una parte importante también se debe a emisiones derivadas de obras de construcción, demolición, etc. Su concentración depende de la dinámica atmosférica, que influye en su dispersión, estancamiento o en su transporte, como se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios sobre Barcelona o el Mediterráneo Occidental (Viana *et al.*, 2005; Querol *et al.*, 2003; Rodríguez *et al.*, 2002).

Puesto que los datos de dichas estaciones conforman una muestra espacial, y como para la evaluación de la equidad ambiental se precisa conocer el nivel de polución en todos los lugares de la ciudad, se avistó acometer una estimación de los mismos mediante interpolación espacial. La metodología utilizada está detallada en Cañada Torrecilla *et al.* (2014). El método que proporcionó un mejor resultado en los valores estimados, tanto en Madrid como en Barcelona, ha sido el Kriging anisotrópico, por proporcionar unos menores errores en la predicción: el *mean error* (ME), media de los errores próxima a 0, el *root mean square error* (RMSE), error cuadrático medio más bajo y el

root mean square standardized error (RMSSE) próximo a 1 (véase tabla 1). Ello implicó seleccionar los puntos muestrales para interpolar en cada lugar adoptando una vecindad de forma elíptica con el tamaño, la orientación, el número de sectores y de puntos próximos más idóneos, que condujesen además a unas menores diferencias entre los valores observados y pronosticados por el modelo (tabla 2).

Tabla 1. Parámetros utilizados en la interpolación de las PM₁₀ y bondad de ajuste del modelo.

Modelo	Parámetros	Ciudades	
		Madrid	Barcelona
Kriging anisotrópico	Nº de puntos vecinos	7/3	5/2
	Vecindad de búsqueda: forma, sectores, rotación, longitud de ejes	Elipse, 4 sectores, 45°, 9000/5000	Elipse, 4 sectores, 45°, 9000/3000
	Ángulo de rotación de elipse	35°	61°
Bondad de ajuste	Media de los errores (ME)	-0,04	0,35
	Error cuadrático medio (RMSE)	3,58	2,86
	RMSSE	0,98	0,91

Fte. Elaboración propia.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de los valores observados y pronosticados por el Kriging.

ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS	MADRID		BARCELONA	
	DATOS OBSERVADOS	DATOS ESTIMADOS	DATOS OBSERVADOS	DATOS ESTIMADOS
Media	22,85	22,13	29,7	29,3
Desviación típica	4,36	2,26	3,1	2,11
Máximo	34	26,96	34	32,7
Mínimo	15	16,86	24	25,5
Amplitud	19	10,10	10	7,2
n	20		14	

Fte. Elaboración propia.

Procede recordar que el nivel medio anual admisible por la legislación española y por la Unión Europea (UE) es de 40 µg/m³, sin embargo la Organización Mundial de la Salud (OMS / WHO) es más exigente y fija un valor objetivo de 20 µg/m³. Una exposición prolongada a esta contaminación contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares, respiratorias y cáncer de pulmón (WHO, 2013; Querol *et al.*, 2006). Estudios realizados en la UE indican que la esperanza de vida se puede reducir 8,6 meses (Gurjar *et al.*, 2010).

Una particularidad de nuestro análisis estriba en que requiere adoptar límites para valorar la aceptación o no de la concentración del contaminante en la atmósfera. La aplicación a tal fin del criterio de la OMS o de la Unión Europea/España conduce a situaciones desiguales y parcialmente contradictorias: en general ni en Madrid ni en Barcelona se supera el valor de 40 µg/m³ por lo que de utilizarse este umbral, no habría problema ambiental; si se adopta el umbral más exigente de 20 µg/m³ surgen escenarios dispares: en Madrid aflorarían zonas por encima y por debajo de ese valor, en tanto que en Barcelona toda la ciudad superaría ese nivel. Por tal motivo se ha adoptado una

decisión metodológicamente flexible, considerando que la polución es un problema a reducir en el tiempo hasta niveles aceptables: para Madrid se adoptó el umbral más exigente de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS), en tanto que meta a lograr, mientras que para Barcelona se usó un valor límite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, intermedio entre $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (UE) y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMS).

La determinación de los *grupos sociodemográficos* a examinar desde la óptica de las posibles inequidades ambientales constituye otra decisión metodológica importante y son diversas las opciones adoptadas en los estudios sobre el tema. Aquí se ha priorizado el criterio de vulnerabilidad humana y parcialmente el de privación, por lo que se ha seleccionado un corto número de grupos de población, cuyos datos están disponibles en el Padrón Municipal de Habitantes, para pequeñas unidades espaciales (llamadas secciones censales). Seis grupos de población han sido contemplados para su examen:

- A. Según la edad, los niños (0-4 años) y los ancianos (80 años y más) resultan, por sus rasgos biológicos, más sensibles a las agresiones ambientales (vid. Landrigan *et al.*, 2010).
- B. Los inmigrantes extranjeros por razones económicas, provenientes de países menos desarrollados que la UE y que se insertan en la base de la pirámide laboral, conforman otro grupo que, aunque dispar según la procedencia, suele sufrir más privaciones y unas condiciones sociales adversas. Para diferenciar las posibles variaciones dentro de este heterogéneo colectivo se conformaron varios subgrupos según procedencia, dada la notoria tendencia a la coalescencia y segregación que suelen exhibir en el interior de las ciudades. Así se han distinguido cuatro subgrupos: los procedentes de América Latina, los africanos (sobre todo del Magreb y África subsahariana), los asiáticos (predominantemente de China) y los europeos provenientes de países menos desarrollados (sobre todo Rumanía, Bulgaria, Polonia, Rusia y Ucrania).

Los efectivos de población total y de tales grupos fueron referenciados en unidades espaciales pequeñas, las secciones censales, que poseen entre 1000-2000 habitantes. La cartografía digital de las mismas procede del Instituto Nacional de Estadística de España 2010 y fue editada para ajustarse al AUP, como área de estudio significativa. Los datos de población posteriormente fueron convertidos a capas raster (píxeles de 50 m de resolución, i.e. 0,25 ha), para tener una distribución aproximada y con alta desagregación espacial de los habitantes. El resultado fue un conjunto de siete capas raster, consistentes en extensión y resolución, conteniendo cada una la cifra estimada por pixel de población total y de cada uno de los seis grupos demográficos. Estas operaciones de tratamiento de datos de población se realizaron con el *software* ArcGIS.

Para *medir la JA* se computaron, seguidamente, las cifras de población (total y de los distintos grupos demográficos) en cada uno de los dos intervalos de polución significativos (por encima y por debajo del nivel crítico de 20 ó $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, según el caso), obteniendo las correspondientes tablas de distribución de frecuencias (con la población total y de cada grupo). Ello se ejecutó mediante la operación *Zonal statistics* de ArcGIS.

La comprobación de la hipótesis de inequidad se ha realizado mediante dos técnicas complementarias, el test χ^2 de una muestra, perteneciente a las pruebas de bondad de ajuste (vid. Siegel, 1972: 64-69; Ruiz-Maya *et al.*, 1995: 75-77), y el diagrama o balanza de justicia ambiental descrito en Moreno (2010, 2012). La primera de ellas es un conocido test de independencia mediante el cual se trata de comprobar la hipótesis nula, H_0 , de que la exposición de un grupo de población a los distintos niveles de PM_{10} atmosférico es idéntica a la que tiene el conjunto de la población residente, o lo que es lo mismo, que las dos distribuciones de frecuencias (la del grupo y la del total) por niveles de PM_{10} son similares. La hipótesis alternativa, H_1 , supone lo contrario, es decir, que son diferentes, lo que implicaría que dicho grupo posee una exposición, bien menor, bien mayor que la de la población total. En tal caso, la interpretación de los resultados (diferencias entre las frecuencias y proporciones observadas y esperadas, bajo el supuesto de independencia)

permitiría dictaminar acerca de la existencia de inequidad. Este test es parecido a los usados por Jacobson *et al.* (2005) y Brainard *et al.* (2003) y fue resuelto con el sistema estadístico NCSS.

El diagrama o balanza de la justicia ambiental se construye (con Excel) precisamente a partir de las diferencias proporcionales entre la distribución observada y la teórica, es decir, exhibe visualmente en qué grado (porcentaje) la frecuencia observada del grupo de población en cada uno de los dos intervalos de PM₁₀ coincide o se aleja de la norma de referencia (la población total), permitiendo así una apreciación clara y directa de las posibles desigualdades para cada grupo. La analogía de este gráfico con el reconocido icono de la justicia facilita su comprensión.

En resumen, ambas técnicas resultan complementarias y adoptan el mismo enfoque de evaluación al considerar como referencia a la población total residente, de manera que si la exposición potencial de un grupo de población concreto a niveles altos de PM₁₀ fuese proporcionalmente mayor que la de la población total de la ciudad, entonces cabría hablar de discriminación negativa y no equidad ambiental para dicho grupo. No la habría, en caso de similar nivel de exposición. En el supuesto, también posible, de que dicho grupo tuviese una exposición proporcionalmente menor que el conjunto de la población a la alta polución, entonces cabría calificar su situación de ambientalmente privilegiada o favorable para tal grupo, en términos comparativos.

4. Análisis de resultados

4.1. El patrón de contaminación del aire por PM₁₀ en las ciudades de Madrid y Barcelona

La contaminación más elevada en Madrid se sitúa en la parte central y en zonas de la periferia SE y S (figura 1A), pudiendo relacionarse en el primer caso a las emisiones de tráfico y, en el segundo, a las partículas provenientes de suelos secos y desnudos de vegetación que abundan allí. Las zonas de menor polución conforman una banda perimetral discontinua que discurre desde el N hacia el W y SW.

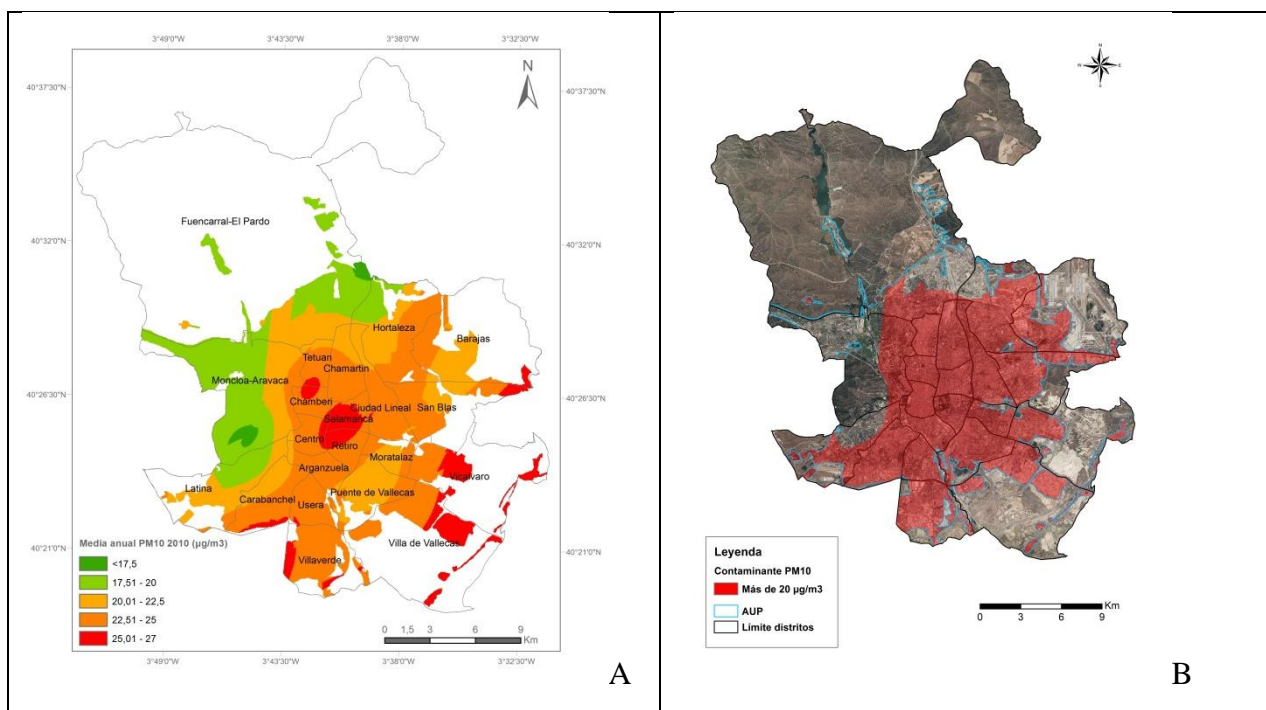


Figura 1. A) Niveles estimados de concentración media anual de PM₁₀ en la atmósfera para Madrid en 2010; B) zona excediendo 30 µg/m³. Fte. Elaboración propia.

En el caso de Barcelona la concentración media anual estimada de PM₁₀ conforma un patrón muy definido (figura 2A), exhibiendo una disposición en franjas casi paralelas a la línea de costa, cuyos valores de contaminación, salvo en una estrecha banda litoral-urbana, muestran un descenso claro a

medida que se sube en altitud hacia el NW. La zona baja de la ciudad, situada sobre la llamada llanura litoral y con más tráfico, se ve sometida a una peor calidad del aire por este contaminante.

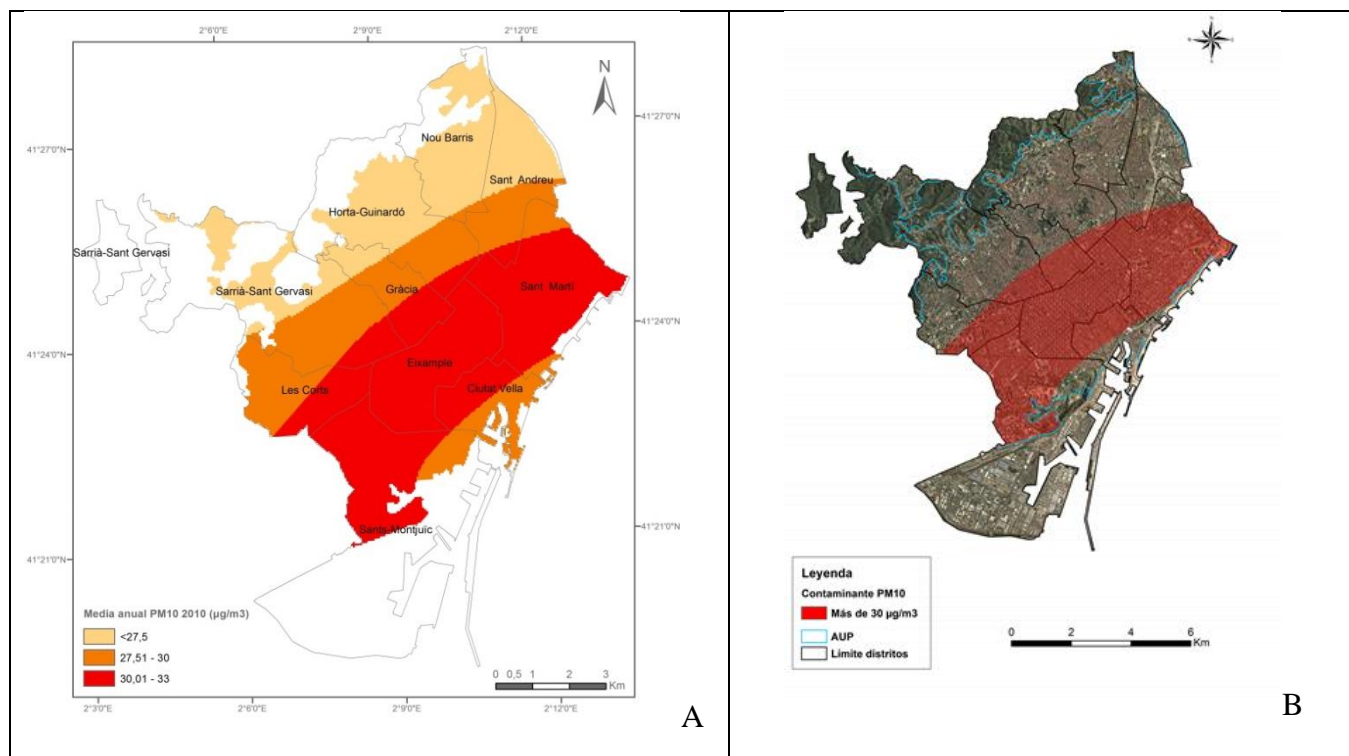


Figura 2. A) Niveles estimados de concentración media anual de PM_{10} en la atmósfera para Barcelona en 2010; B) zona excediendo $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fte. Elaboración propia.

En resumen, las dos ciudades no tendrían riesgo de contaminación por PM_{10} , si se considera el umbral de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la legislación europea. Sin embargo, dado que estudios recogidos por la WHO (2013) ponen de manifiesto los beneficios de una exposición a menores concentraciones de PM_{10} en la atmósfera (y por debajo del umbral establecido por la UE), los umbrales aplicados aquí permiten apreciar que hay desigualdades en la calidad del aire. Por ejemplo con el umbral de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Madrid tendría el 77,3 % de la superficie del AUP como zona de riesgo, sin embargo, el 100 % del área de Barcelona sufriría riesgo por PM_{10} elevado. Con el umbral de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el porcentaje en esta última ciudad obviamente desciende (45,6 %).

4.2. Las desigualdades de exposición potencial de la población a las PM_{10} en Madrid

4.2.1. La situación de los niños y los ancianos

El análisis desarrollado arroja que la población total residente en zonas expuestas a niveles de PM_{10} en 2010 por encima del umbral aconsejado por la OMS ($> 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) es muy elevada: 2.994.250 personas, es decir, el 91,5 %, y que por tanto la ciudad se enfrenta a un problema de importante magnitud.

A la vista de la cifra anterior se puede ya vislumbrar una elevada exposición también por subgrupos poblacionales, sin perjuicio de que puedan emerger diferencias entre ellos. Los resultados se exponen comparativamente en la tabla 3. En ella se observa cómo el grupo de niños (0-4 años), aun siendo el menos expuesto, su porcentaje ronda el 88 %, mientras que el grupo de ancianos (80 años y más) se revela como uno de los más expuestos (93 %). Ambos grupos presentan además situaciones diferentes si los comparamos con la población total, tal como expresan las balanzas de justicia ambiental de la figura 3. Ellas reflejan que los niños se encuentran proporcionalmente menos expuestos de lo esperado, y por tanto algo más favorecidos ambientalmente que los ancianos, los cuales estarían un poco más expuestos de lo que cabría esperar, es decir, ligeramente

desfavorecidos. Los resultados ponen en evidencia cómo la presencia mayor de ancianos en el interior de la ciudad (figura 4A), donde coinciden con una elevada contaminación por PM₁₀, vinculada a elevados niveles de tráfico rodado, penaliza a dicho colectivo. El grupo de niños, con mayor presencia periférica, coincide en esa corona exterior con algunas zonas (al W y N sobre todo) de menor concentración de partículas, lo que estadísticamente les confiere una cierta ventaja comparativa de más de tres puntos porcentuales.

Realmente no parece haber mucha diferencia absoluta entre las cifras de población expuesta respecto a la esperada (bajo la hipótesis de equidad o similar exposición proporcional), pese a lo cual el test de bondad de ajuste χ^2 indica que las divergencias con respecto a las cifras de la población total son estadísticamente significativas con una muy alta probabilidad (*vid.* tabla 3), y por tanto cabe asumir que la exposición de esos dos grupos es sustancialmente distinta a la de aquella.

Tabla 3. Test de justicia ambiental (bondad de ajuste) para los grupos vulnerables en Madrid, respecto a la contaminación atmosférica por PM₁₀, 2010.

Variable	χ^2 con 1 grado de libertad	P-valor	Población expuesta	Población esperada
Población 0 - 4 años	2466,23	0,00	143125 (88,04 %)	148714 (91,48 %)
Población \geq 80 años	696,87	0,00	176324 (93,18 %)	173118 (91,48 %)
Inmigrantes latinoamericanos	57,97	0,00	277534 (91,87 %)	276366 (91,48 %)
Inmigrantes africanos	236,69	0,00	39844 (93,56 %)	38958 (91,48 %)
Inmigrantes asiáticos	457,01	0,00	48875 (94,10 %)	47515 (91,48 %)
Inmigrantes europeos	269,06	0,00	85812 (90,00 %)	87225 (91,48 %)

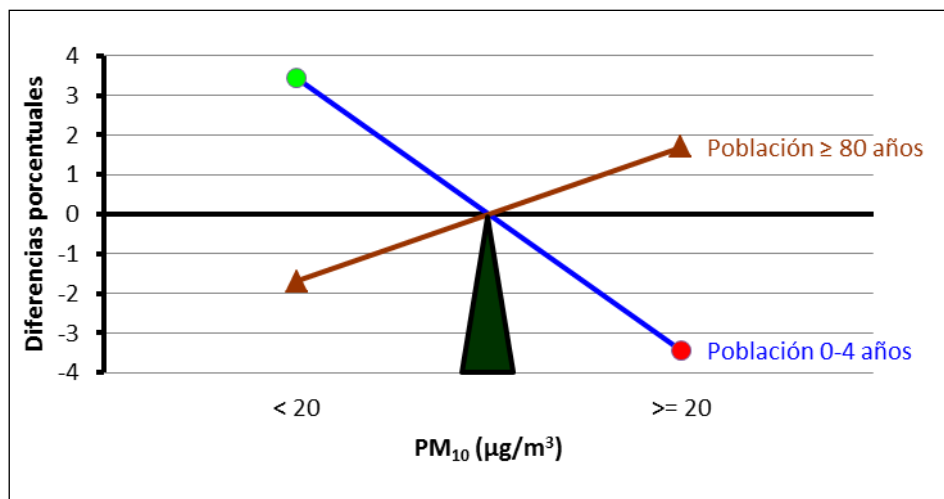


Figura 3. Balanzas de la justicia ambiental para dos grupos de edad vulnerables en Madrid, respecto a la polución del aire por PM₁₀, 2010. Nota: el eje vertical muestra las desviaciones (en unidades porcentuales) de la exposición de estos grupos poblacionales respecto de la exposición de la población total de la ciudad. Fte. Elaboración propia.

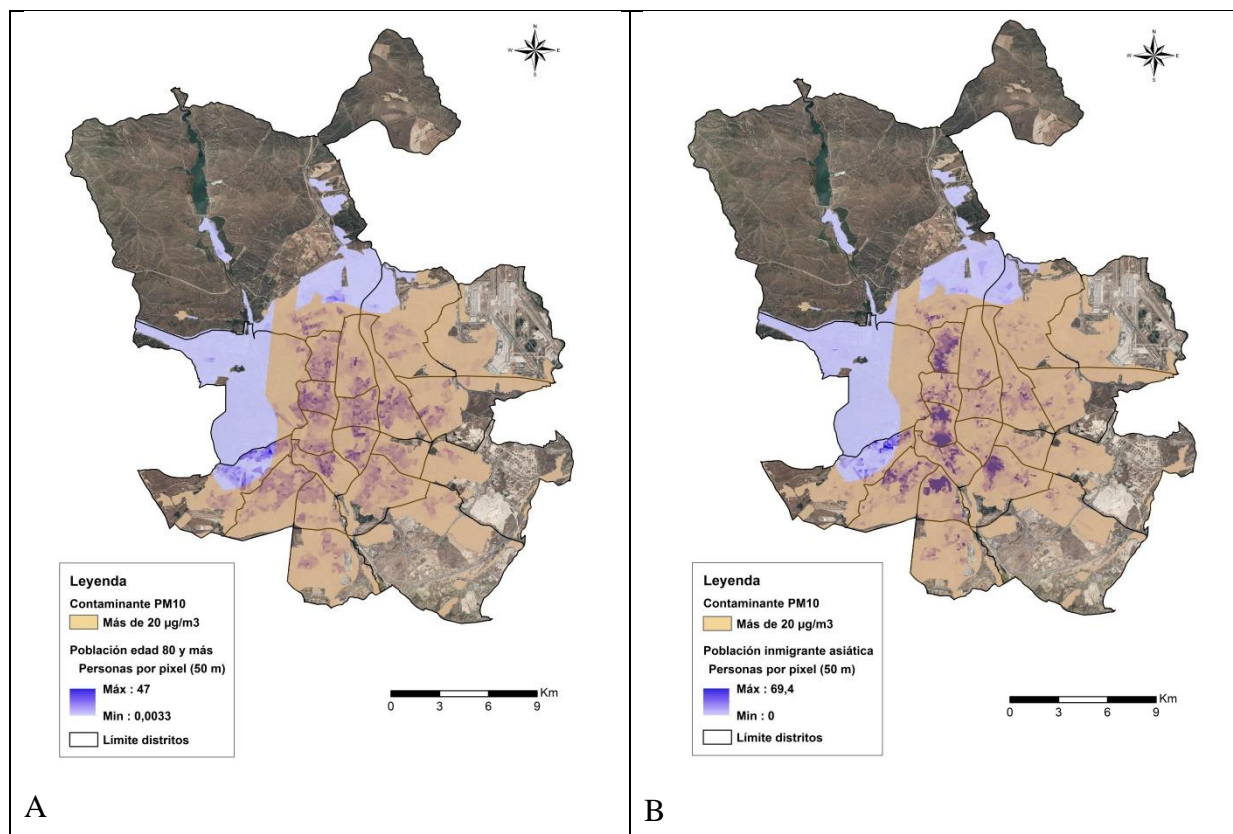


Figura 4. Zona con excesiva concentración de PM₁₀ en el aire (media anual > 20 µg/m³) en 2010 y densidades de población de 80 años y más (A) y de inmigrantes asiáticos (B) en Madrid (2011). Fte. Elaboración propia.

4.2.2. La situación de los inmigrantes extranjeros de países menos desarrollados

Pasando a analizar los cuatro grupos de inmigrantes considerados se observa en la tabla 3 que igualmente estarían expuestos de forma mayoritaria a concentraciones de partículas atmosféricas excesivas, oscilando entre el 90 y el 94 %. En comparación con la población total, la figura 5 muestra que casi todos ellos resultan proporcionalmente más expuestos de lo esperado y por tanto más desfavorecidos, destacando los de origen asiático y africano (con más de dos puntos porcentuales). La figura 4B exhibe cómo la mayor parte de las zonas con fuertes densidades de asiáticos se hallan en los ámbitos más contaminados. La exposición de los latinoamericanos sería, en proporción, bastante similar a la del conjunto poblacional total, por lo que se encontrarían algo más próximos a la equidad (tan sólo ligeramente penalizados), de acuerdo con el criterio adoptado. No sucede esto con los de origen europeo, que resultarían los únicos favorecidos al estar menos expuestos de lo que cabría esperar, es decir, su brazo derecho de la balanza es el único que cae por debajo del umbral crítico, como se ve en la figura 5. La razón parece estibar en una presencia mayor de este grupo en el SW de la ciudad, zona donde la concentración media anual de PM₁₀ se estima inferior a 20 µg/m³. En cualquier caso, el nivel de probabilidad (p) resultante del test de la χ^2 es próximo a cero para todos y cada uno de los cuatro grupos, indicando una diferencia estadísticamente significativa de la exposición potencial de todos ellos respecto a la que tendría el conjunto de la población.

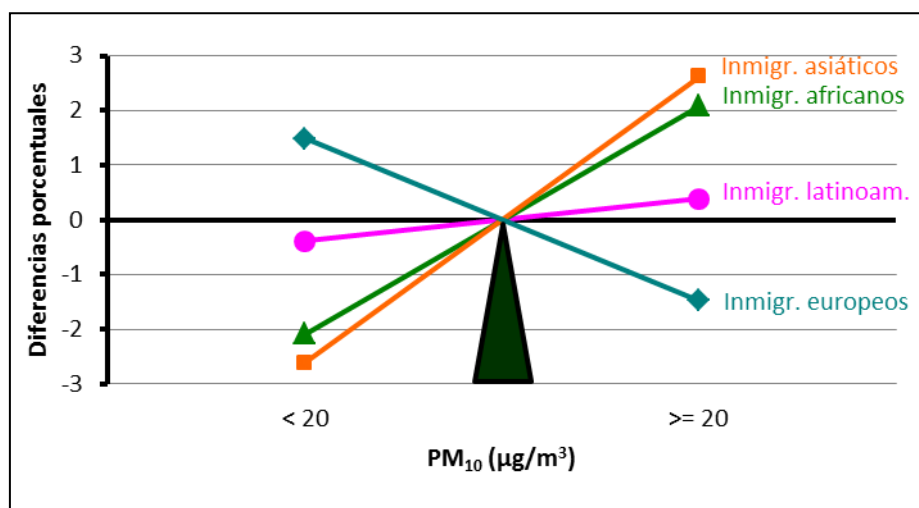


Figura 5. Balanzas de la justicia ambiental para grupos de inmigrantes de países menos desarrollados en Madrid, respecto a la polución del aire por PM₁₀, 2010. Nota: el eje vertical muestra las desviaciones (en unidades porcentuales) de la exposición de estos grupos poblacionales respecto de la exposición de la población total de la ciudad. Fte. Elaboración propia.

4.3. Las desigualdades de exposición potencial a las PM₁₀ en Barcelona

Conviene reseñar, como se anticipó en el apartado de métodos, que para esta ciudad la adopción de los límites normativos de la OMS / WHO o de España / UE relativos a la concentración media anual de este contaminante conduciría a concluir que o bien no hay problema (por no superarse el valor crítico), o bien hay una exposición total de los residentes. De ahí que el valor de 30 µg/m³ adoptado en este trabajo constituya una referencia intermedia y útil para el análisis, si bien la comparación de los resultados con Madrid no resulta posible.

4.3.1. La situación de los niños y los ancianos

En Barcelona la población estimada que reside en zonas expuestas a niveles de PM₁₀ en 2010 por encima del nivel de 30 µg/m³ es 941.880 personas, es decir, el 58,2 % de la población total, lo que significa que más de la mitad de sus residentes se encuentran potencialmente expuestos a este problema.

Los resultados de exposición potencial por subgrupos poblacionales en esta ciudad se recogen comparativamente en la tabla 4. En ella se puede ver cómo los dos colectivos de edad, niños (0-4 años) y ancianos (80 años y más), presentan una exposición moderada y bastante similar: 56 % y 60 %, lo que podría hacer pensar que ambos tuviesen patrones de distribución intraurbana parecidos. Sin embargo, cuando los comparamos con la población total, presentan situaciones bien diferentes, según ponen de manifiesto las balanzas de justicia ambiental de la figura 6. En ellas se aprecia que los niños se encuentran proporcionalmente menos expuestos de lo esperado (más de dos puntos porcentuales por debajo), mientras que los ancianos por el contrario están un poco más expuestos de lo que cabría esperar (más de un punto porcentual por encima). Por tanto, los primeros se muestran como algo más favorecidos ambientalmente, en tanto que los segundos aparecen como algo más perjudicados. La figura 7A muestra conjuntamente la zona más contaminada y las densidades de ancianos desvelando la notable presencia de éstos en aquel ámbito.

Al testar cuantitativamente la hipótesis de equidad ambiental o similar exposición proporcional, aunque aparentemente no existe en ambos subgrupos poblacionales demasiada diferencia absoluta entre las cifras de población expuesta respecto a la esperada, en la tabla 4 el test de bondad de ajuste χ^2 establece que la exposición potencial que ambos soportan es sustancialmente distinta a la de la

población total (p-valor próximo a cero), lo que equivale a decir que las divergencias con respecto a ésta son estadísticamente significativas con una muy alta probabilidad.

Tabla 4. Test de justicia ambiental (bondad de ajuste) para los grupos vulnerables en Barcelona, respecto a la contaminación atmosférica por PM₁₀, 2010.

Variable	χ^2 con 1 grado de libertad	P-valor	Población expuesta	Población esperada
Población 0 - 4 años	137,30	0,00	39467 (55,99 %)	41002 (58,16 %)
Población \geq 80 años	86,00	0,00	64748 (59,55 %)	63239 (58,16 %)
Inmigrantes latinoamericanos	1,21	0,27	60898 (58,00 %)	61073 (58,16 %)
Inmigrantes africanos	21,77	0,00	11751 (56,57 %)	12083 (58,16 %)
Inmigrantes asiáticos	3675,78	0,00	38094 (71,08 %)	31171 (58,16 %)
Inmigrantes europeos	0,16	0,69	9951 (58,31 %)	9925 (58,16 %)

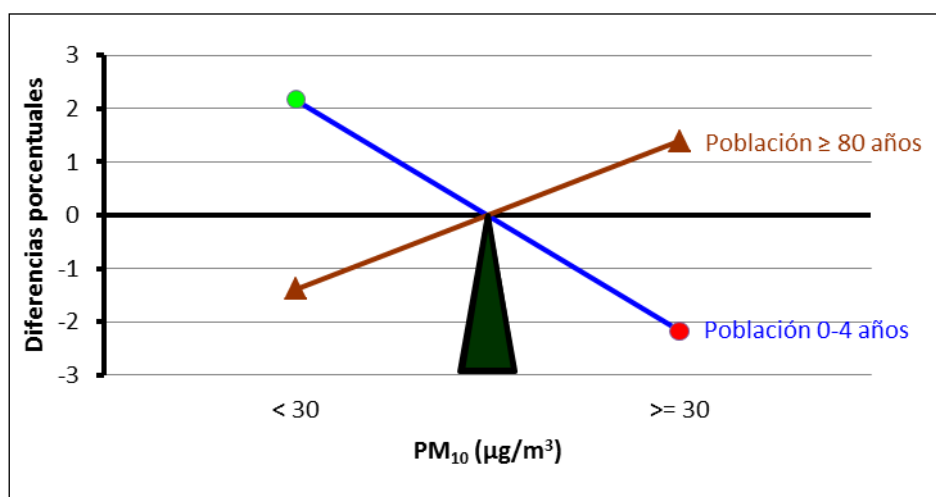


Figura 6. Balanzas de la justicia ambiental para dos grupos de edad vulnerables en Barcelona, respecto a la polución del aire por PM₁₀, 2010. Nota: el eje vertical muestra las desviaciones (en unidades porcentuales) de la exposición de estos grupos poblacionales respecto de la exposición de la población total de la ciudad. Fte. Elaboración propia.

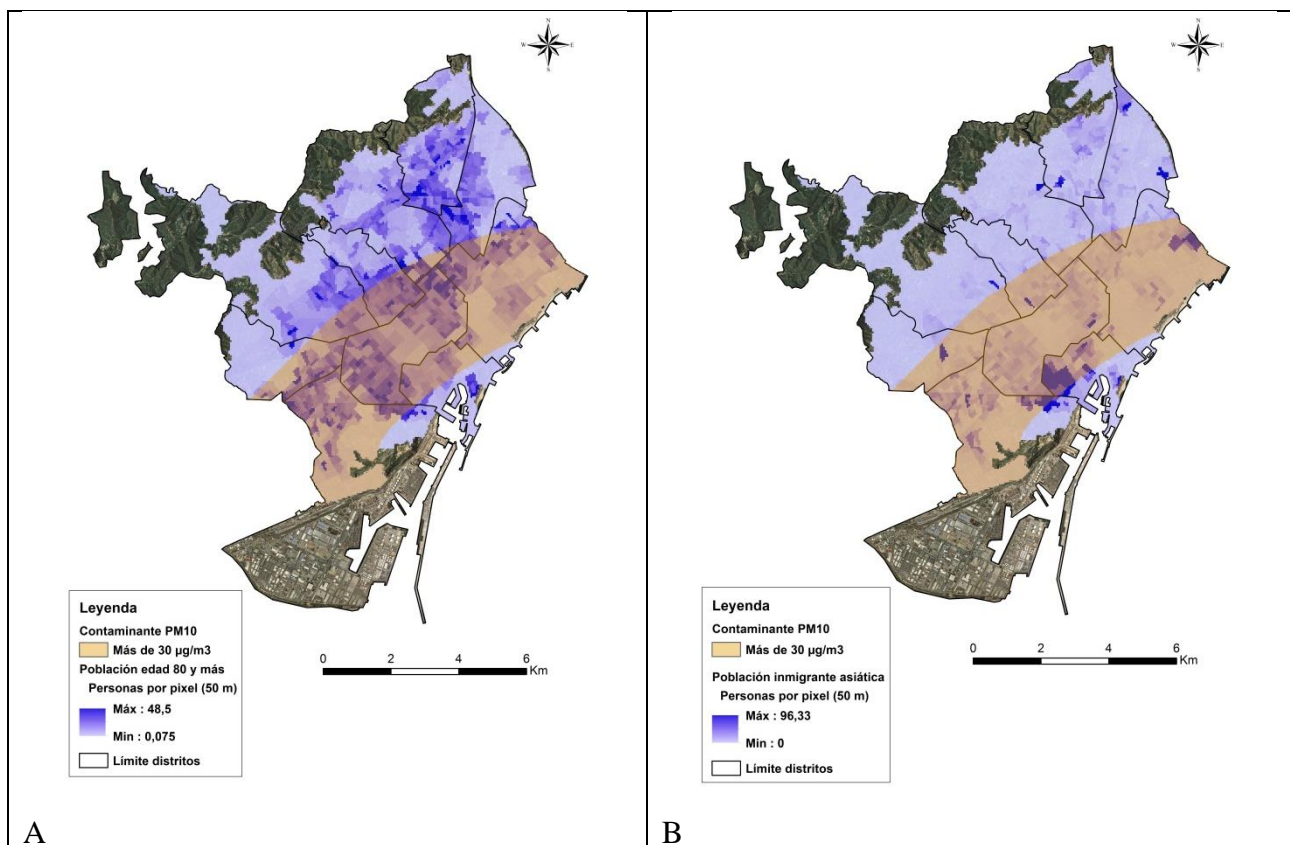


Figura 7. Zona con excesiva concentración de PM₁₀ en el aire (media anual > 30 µg/m³) en 2010 y densidades de población de 80 años y más (A) y de inmigrantes asiáticos (B) en Barcelona (2011). Fte. Elaboración propia.

4.3.2. La situación de los inmigrantes extranjeros de países menos desarrollados

Para el caso de los cuatro grupos de inmigrantes contemplados la tabla 4 pone de manifiesto unos niveles de exposición también moderados, oscilando entre el 57 y el 58 %, a excepción de los de origen asiático, para los que se eleva sobremanera hasta el 71 %. La figura 8 permite apreciar cómo la exposición de los latinoamericanos y europeos es, en proporción, muy similar a la de la población total (sus líneas casi coinciden con la horizontal) y por tanto se encontrarían bastante próximos a la equidad. Los africanos, por su parte, salen algo beneficiados (más de un punto porcentual), por su presencia más abundante en una zona del norte que no supera el umbral crítico de PM₁₀. En el otro extremo destacan los de origen asiático, los cuales residen mucho más de lo que cabría esperar en barrios contaminados por PM₁₀; ello se refleja en su brazo derecho de la balanza con casi trece puntos porcentuales por encima del umbral crítico, y por tanto ambientalmente muy desfavorecidos. La razón parece deberse a la particular agrupación de ese grupo de inmigrantes en unas pocas zonas de la ciudad, especialmente en el centro histórico, pero todas ellas con una concentración media anual de PM₁₀ superior a 30 µg/m³, como muestra la figura 7B.

Si en la tabla 4 examinamos los niveles de probabilidad (p) resultantes del test de la χ^2 , se observa que son próximos a cero en el caso de los africanos y asiáticos, indicando una diferencia estadísticamente significativa de la exposición potencial de ambos respecto a la que exhibe el conjunto de la población. Sin embargo, no sucede así con los latinoamericanos y los europeos, cuyo nivel de probabilidad es superior a cero, lo que apunta a que su grado de exposición potencial a atmósfera con altas PM₁₀ es sensiblemente similar al del conjunto poblacional de Barcelona (H₀). Ello significaría, según la regla metodológica adoptada, que no sufren discriminación por este contaminante.

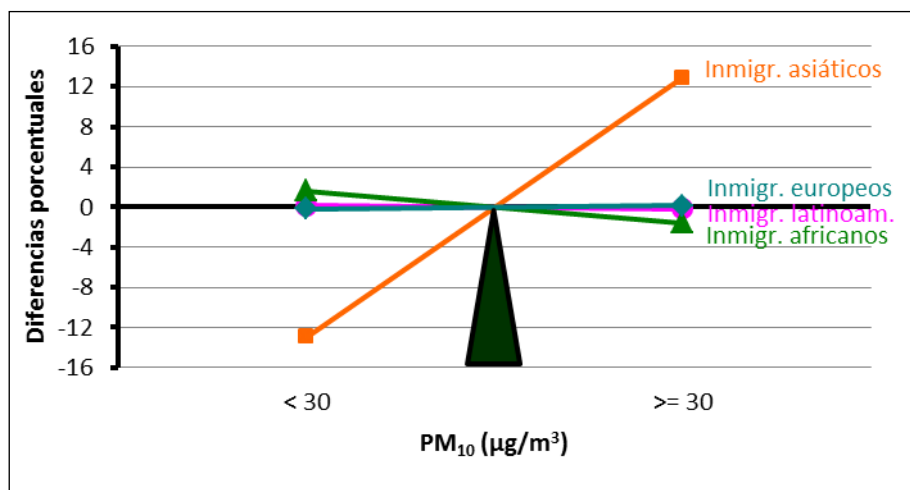


Figura 8. Balanzas de la justicia ambiental para grupos de inmigrantes de países menos desarrollados en Barcelona, respecto a la polución del aire por PM₁₀, 2010. Nota: el eje vertical muestra las desviaciones (en unidades porcentuales) de la exposición de estos grupos poblacionales respecto de la exposición de la población total de la ciudad. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

La exposición humana a ambientes aéreos desfavorables por su contaminación es un problema largo tiempo conocido, pero que recientemente se está poniendo en la agenda pública por cuanto puede ser generadora de injusticias ambientales hacia aquéllos que sufren peligros o malestar excesivos, respecto a otros grupos de residentes. Desde la responsabilidad de la comunidad científica se ha de acometer el importante reto de determinar las desigualdades entre ciudadanos, por cuanto los métodos y la información resultan limitados aún y habrían de ser mejorados. Ello no obstante, los métodos y las técnicas adoptados y análisis desarrollados aquí han permitido obtener algunas ideas que, con las cautelas debidas, pueden ser aceptadas como un paso para ulteriores progresos en esta elusiva línea.

Los resultados desvelan que, junto a una alta exposición general, algunos colectivos demográficos soportan una todavía mayor exposición potencial a elevadas concentraciones anuales de PM₁₀ (i. e. superiores al límite adoptado analíticamente). Conviene recordar que se eligió un umbral distinto para cada ciudad (20, nivel establecido por la Organización Mundial de la Salud para Madrid, y 30 para Barcelona), por lo que las comparaciones entr ambas han de hacerse con esa restricción en mente. Pese a ello los resultados apuntan a la existencia de injusticias ambientales, aunque en grado diverso.

Sintéticamente, y en lo relativo a la exposición diferencial de los grupos vulnerables considerados a la polución por PM₁₀, a tenor del método aplicado se constata que, según el test de la χ^2 en Madrid todos los grupos vulnerables diferirían significativamente de la exposición de la población total. En Barcelona latinoamericanos y europeos concordarían en su exposición con las cifras de la población total, pero todos los demás grupos divergirían también de los porcentajes observados en la población total con un nivel de probabilidad estadísticamente alto.

Aunque esos resultados ya traslucen ciertas inequidades, el examen de las balanzas de la justicia ambiental desvela matices dignos de valorar, que ahora sintetizamos:

- La población infantil aparece beneficiada en ambas ciudades (en más de 2 puntos porcentuales), mientras que los ancianos de 80 años y más concuerdan también pero ahora en sentido opuesto, sufriendo algo de sobre-exposición a niveles más altos de PM₁₀.

- En cuanto a los inmigrantes de países menos desarrollados se producen algunas similitudes en ambas ciudades: los asiáticos son los más sobre-expuestos, especialmente en Barcelona; a ellos se añaden los africanos, pero solo en la ciudad de Madrid. Si miramos a las situaciones de ventaja, ésta solo beneficia ligeramente a los europeos y en Madrid. Los restantes grupos muestran un patrón de exposición potencial que se desvía relativamente poco del de la población total.

Agradecimientos

Este trabajo es un resultado del proyecto “Contaminación atmosférica urbana y justicia ambiental: metodología de evaluación y estudio de casos con Sistemas de Información Geográfica”. Ministerio de Economía y Competitividad de España (Ref. CSO2011- 26177). Se agradece así mismo la colaboración técnica de Ana Mellado San Gabino en la preparación los mapas.

Bibliografía

- Brainard, J., Jones, A. P., Bateman, I. J., & Lovett, A. 2003. *Modelling environmental equity: exposure to environmental urban noise pollution in Birmingham, UK*. Norwich, Norfolk, UK: Environmental Decision Making Working Papers, EDM 03-04, Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE), University of East Anglia.
- Berger, M. 2012. Justicia ambiental en América Latina. Inteligencia colectiva y creatividad institucional contra la desposesión de derechos, *E-Cadernos CES*, 17, <http://eces.revues.org/1128>, DOI: 10.4000/eces.1128.
- Cañada, R., Moreno, A. y González, H. 2014. Modelado de la calidad del aire urbano. Un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial, *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 65, 317-342.
- Carruthers, D. V. (Ed.) 2008. *Environmental Justice in Latin America: Problems, promise, and practice*. Cambridge MA, MIT Press.
- Chakraborty, J., Maantay, J.A., & Brender, J. 2011. Disproportionate proximity to environmental health hazards: methods, models, and measurement. *American Journal of Public Health*, 101 (S1), 27-36.
- Dobson, A. (Ed.) 1998. *Justice and the environment*. Oxford, Oxford University Press.
- Gurjar, B.R, Molina, L.T. y Ojha, C.S.P. (Eds.) 2010. *Air pollution. Health and environmental impacts*. New York, CRS Press. Taylor and Francis Group, 518 pp.
- Harding, A. (Ed.) 2007. *Access to environmental justice. A comparative study*. Leiden, Martinus Nijhoff.
- Holifield, R., Porter, M., & Walker, G. 2009. Introduction. Spaces of environmental justice: frameworks for critical engagement. *Antipode*, 41 (4), 591-612.
- Jacobson, J.O., Hengartner, N. W. & Louis, T.A. 2005. Inequality measures for evaluations of environmental justice: a case study of close proximity to highways in New York City. *Environment and Planning A*, 37, 21-43.
- Landrigan, P.J., Rauh, V.A. & Galvez, M.P. 2010. Environmental justice and the health of children. *The Mount Sinai Journal of Medicine*, 77 (2), 178-187.
- Maier, W. & Mielk, A. 2010. Environmental justice (Umweltgerechtigkeit). *Prävention und Gesundheitsförderung*, 5 (2), 115-128.
- Martuzzi, M., Mitis, F. & Forastiere, F. 2010. Inequalities, inequalities, environmental justice in waste management and health. *European Journal of Public Health*, 20 (1), 21-26.
- Moreno Jiménez, A. 2010. Justicia ambiental. Del concepto a la aplicación en análisis de políticas y planificación territoriales. *Scripta Nova*, XIV, 316, 33.
- Moreno Jiménez, A. 2012. Evaluación de la justicia ambiental con sistemas de información geográfica. In Moreno Jiménez, A., Buzai, G.D. & Fuenzalida-Díaz, M. (Eds.): *Sistemas de información geográfica. Aplicaciones en diagnósticos territoriales y decisiones geoambientales*. Madrid, Ra-Ma, 173-202.

- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M.M., Castillo, S., Pey, J., Rodríguez, S., Cristóbal, A., Jiménez, S., Pallarés, M., de la Rosa, J., Artiñano, B., Salvador, P., Sánchez, M., García, S., Herce, M.D., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M.C., Monfort, E., Sanz, M.J., Palomo-Marín, R., Pinilla-Gill, E. y Cuevas, E. 2006. *Material particulado en España: niveles, composición y contribución de fuentes*. Madrid, CSIC y Ministerio de Medio Ambiente, 41 pp.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M.M., Artiñano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Santos, S.G.D., Patier, R.F., Rosa, J.D.L., Campa, A.S.D.L., Menedez, M. 2003. *Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España: Informes finales*. IJA-CSIC, ISCIII, CIEMAT, Universidad de Huelva, Universidad del País Vasco.
- Raddatz, L. & Mennis, J. 2013. Environmental justice in Hamburg, Germany. *The Professional Geographer*, 65 (3), 495–511.
- Reed, M.G. & George, C. 2011. Where in the world is environmental justice? *Progress in Human Geography*, 35 (6), 835-842.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Plana, F. 2002. Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric aerosol in the Western Mediterranean, *Journal of Geophysical Research*, 107 (D24), 4777.
- Ruiz-Maya, L., Martín Pliego, F.J., Montero, J.M. & Uriz Tomé, P. (Eds.) 1995. *Análisis estadístico de encuestas: datos cualitativos*. Madrid, AC.
- Siegel, S. (Ed.) 1972. *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*. México, Trillas, 2ª ed.
- Vásquez, A. y Salgado, M. 2009. Desigualdades socioeconómicas y distribución inequitativa de los riesgos ambientales en las comunas de Peñalolén y San Pedro de la Paz. Una perspectiva de justicia ambiental. *Revista de Geografía Norte Grande*, 43: 95-110
- Viana, M., Pérez, C., Querol, X., Alastuey, A., Nickovic, S. y Baldasano, J.M. 2005. Spatial and temporal variability of PM levels and composition in a complex summer atmospheric scenario in Barcelona (NE Spain), *Atmospheric Environment*, 39, 5343–5361.
- Walker, G. 2009. Beyond distribution and proximity: exploring the multiple spatialities of environmental justice. *Antipode*, 41 (4), 614–636.
- Walker, G. (Ed.). 2012. *Environmental justice: concepts, evidence and politics*. London, Routledge.
- Wenz, P.S. (Ed.) 1988. *Environmental justice*. New York, State University of New York Press.
- WHO, 2013. *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIAP*. Copenhagen. Regional Office for Europe, 22 p.