Determinación del área de representatividad de las estaciones de la red de vigilancia y previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña (XVPCA) utilizando el sistema de calidad del aire CALIOPE

Destinatario:

Servei de Vigilància i Control de l'Aire

Direcció General de Qualitat Ambiental

Generalitat de Catalunya

Trabajo realizado por:

Barcelona Supercomputing Center-Departamento de Ciencias de la Tierra

Mª Teresa Pay

Fecha:

Barcelona, 24 Diciembre 2015

Agradecimientos. El Barcelona Supercomputing Center (BSC) agradece agradece al *R Core Team* por el lenguaje estadístico R (URL http://www.R-project.org), a la Fundación Python (https://www.python.org/psf/) por el programa Python y a la Fundación *Open Source Geospatial* (http://www.osgeo.org/) por la librerías de información geográfica.

Índice

Resumen **7**

Acrónimos **8**

1 Introducción y objetivos **9**

2 Datos y metodología **11**

2.1 Zona de estudio 11

2.2 Cálculo de la representatividad espacial 12

2.3 Cálculo de la redundancia espacial de las estaciones 14

2.4 Correlación de las áreas representativas con la densidad de población 14

2.5 Datos del sistema CALIOPE 15

3 Resultados **15**

3.1 Cobertura espacial de la XVPCA 16

3.1.1 Representatividad espacial de la XVPCA por contaminante 16

3.1.2 Representatividad espacial de la XVPCA en función de la base temporal 17

3.1.3 Representatividad espacial de cada una de las estaciones de la XVPCA 19

3.2 Cobertura de la XVPCA en función de las medidas realizadas en cada estación 22

3.2.1 Representatividad espacial de la XVPCA por contaminante medido 22

3.2.2 Redundancia de las estaciones 25

4 Discusión y conclusiones **31**

5 Bibliografía **33**

ANEXO I. Ficha de representatividad espacial por estación

ANEXO II. Tablas de representatividad espacial anual por estación

ANEXO III. Tablas de redundancia de las estaciones por contaminante y base temporal

Índice de figuras

Figura 1. Balance de estaciones por tipología (áreas y emisión) para las 15 zonas de calidad de aire (ZQA). Las ZQA están representadas en Tabla 1. (a) estaciones de la XVPCA, (b) estaciones que miden O_3, (c) NO_2, (d) SO_2, (e) PM10, y (f) PM2.5..... 12

Figura 2. Mapa de población en número de habitantes interpolado a la malla de CALIOPE a 1 km x 1km de resolución sobre Cataluña (CAT1km)..... 15

Figura 3. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio anual de los contaminantes O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10, PM2.5 y para la intersección..... 17

Figura 4. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio de los contaminantes O_3max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 en función de tres bases temporales: anual (primera columna), diaria (segunda columna) y máxima horaria (tercera columna). 18

Figura 5. Cobertura espacial de la XVPCA para el promedio anual de los contaminantes O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10, PM2.5 y para la intersección teniendo en cuenta los contaminantes medidos en cada estación..... 23

Figura 6. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio de los contaminantes O_3max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 en función de tres bases temporales: anual (primera columna), diaria (segunda columna) y máxima horaria (tercera columna). 24

Figura 7. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de O_3 max8h. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales. 26

Figura 8. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de NO_2. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales..... 27

Figura 9. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de PM10. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales..... 29

Figura 10. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de PM2.5. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales. 30

Índice de tablas

Tabla 1. Localización y balance de estaciones de la XVPCA para 2015 por ZQA (según lista de estaciones facilitada por el Departamento de Territorio y Sostenibilidad). Fuente: http://mediambient.gencat.cat 11

Tabla 2. Cobertura espacial de la XVPCA en km^2 en las 129 estaciones disponibles (n) para los contaminantes de estudio (O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) por base temporal (anual, diario, Max 1h) y población asociada en número de habitantes (POP) y porcentaje (%POP). 19

Tabla 3. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el O_3 Max8h diario y anual y el O_3 Max 1h. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T) 20

Tabla 4. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el NO_2. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T) 21

Tabla 5. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el SO_2. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T) 21

Tabla 6. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el PM10. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T) 21

Tabla 7. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el PM2.5. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T) 22

Tabla 8. Cobertura espacial de la XVPCA en km^2 en las estaciones con medidas disponibles (n) para los contaminantes de estudio (O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) por base temporal (anual, diario, max1h) y población asociada en número de habitantes (POP) y porcentaje (%POP). 25

Resumen

Desde un punto de vista regulatorio, la directiva 2008/50/CE establece varios requerimientos para la localización de estaciones de medida fijas, incluyendo consideraciones de representatividad espacial. La Decisión de Ejecución de la Comisión para las directivas 2008/50/CE y 2004/107/CE en relación con el intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad del aire (2011/850/EC) específica que la información acerca de la **representatividad espacial** debería ser proporcionada cuando esté disponible, como parte del conjunto de datos proporcionado en estaciones fijas. La delimitación del área representativa de una estación de medida es una herramienta más para obtener información acerca de la calidad del aire en dimensión espacial, cumpliendo los requerimientos de la legislación europea en la que la evaluación de la calidad del aire será realizada en todo el territorio. La evaluación del área representativa de una estación permite extender la información observada en un punto (lugar de muestreo) al área de representatividad. Dentro de esa área, la concentración se desvía de la concentración medida en el punto de medida en un cierto rango, pero también tiene que cumplir criterios adicionales relacionados con las causas comunes de concentraciones.

Comunicar la información sobre representatividad espacial no es aún obligatorio estrictamente y el método de cálculo no está armonizado puesto que no hay un método de referencia especificado. Además en la literatura científica tampoco hay un acuerdo unificado para abordar este complejo problema. Actualmente FAIRMODE se ha encargado de armonizar las metodologías de cálculo de la representatividad espacial de las estaciones, para ello han lanzado un ejercicio de intercomparación de métodos para el cálculo de la representatividad espacial de las estaciones, para explorar las fortalezas y debilidades de los diferentes métodos.

Este documento es una evaluación de **la representatividad espacial de las estaciones de la Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña (XVPCA)** (REPCAT) correspondientes a las Zonas de Calidad del Aire[1] de la 3 a la 15, para los contaminantes relevantes desde el punto de vista regulatorio (O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5). Para ellos se han utilizado como datos de partida las salidas del sistema de predicción de calidad del aire CALIOPE sobre Cataluña a 1 km de resolución espacial.

El estudio se centra en el cálculo de la representatividad espacial de cada una de las estaciones de forma individualizada y se correlacionará la zona de representatividad de cada estación con la población establecida en cada zona. Además, se estimará la cobertura espacial de toda la red en su conjunto y se calculará la redundancia de las estaciones teniendo en cuenta diferentes bases temporales.

[1] La Generalitat ha definido 15 Zonas de Calidad del Aire (ZQA) en base a áreas que comparten características orográficas, de población, de emisiones industriales y de tráfico. La zonificación está descrita en http://bit.ly/1CaH1VV.

Acrónimos

XVPCA	Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña
ZQA	Zona de Calidad del aire
CALIOPE	Sistema de Calidad del aire operativo para España
DM	Discrepancia Máxima
Q	Redundancia
Max8h	Concentración máxima de las medias móviles octo-horarias
Max1h	Concentración máxima diaria
SR	Representatividad espacial
POP	Población en número de habitantes
%POP	Porcentaje de población
CAT1km	Malla CALIOPE para el dominio de Cataluña a 1 km x 1 km de resolución horizontal
REPCAT	Determinación del área de representatividad de las estaciones de la red de vigilancia y previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña utilizando el sistema de calidad del aire CALIOPE
RF	Estación de calidad del aire clasificada como rural de fondo
UF	Estación de calidad del aire clasificada como urbana de fondo
SF	Estación de calidad del aire clasificada como suburbana de fondo
RT	Estación de calidad del aire clasificada como rural de tráfico
UT	Estación de calidad del aire clasificada como urbana de tráfico
ST	Estación de calidad del aire clasificada como suburbana de tráfico
RI	Estación de calidad del aire clasificada como rural industrial
UI	Estación de calidad del aire clasificada como urbana industrial
SI	Estación de calidad del aire clasificada como suburbana industrial
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
O_3	Ozono
NO_2	Dióxido de nitrógeno
SO_2	Dióxido de azufre
PM10	Material particulado con un diámetro menor que 10 µm
PM2.5	Material particulado con un diámetro menor que 2.5 µm

1 Introducción y objetivos

La monitorización sistemática de bases de datos significativos de calidad del aire es obligatoria para una eficiente gestión de la contaminación y una toma de decisiones. Desde la entrada en vigor de la Decisión de Consejo 97/101/CE los estados miembros han estado obligados a medir e intercambiar medidas de contaminación atmosférica. Sin embargo, la recopilación de bases de datos de calidad con cobertura especial adecuada supone un reto en términos de calidad de los datos y configuración de las redes. Las Directivas 2008/50/CE y 2004/107/CE se empeñan en mejorar la calidad de las medidas y en la recopilación de los datos, y en asegurar que la información recogida sobre la contaminación es suficientemente representativa y comparable en todo la Comunidad.

La Directiva 2008/50/CE indica además la importancia de usar criterios comunes para la clasificación, número y localización de estaciones de medida para la evaluación de la calidad del aire, incluyendo consideraciones de **representatividad espacial**. La delimitación del área representativa de una estación de medida es una herramienta más para obtener información acerca de la calidad del aire en dimensión espacial, cumpliendo los requerimientos de la legislación europea en la que la evaluación de la calidad del aire será realizada en todo el territorio. La evaluación del área representativa de una estación permite extender la información observada en un punto (lugar de muestreo) al área de representatividad. Dentro de esa área, la concentración se desvía de la concentración medida en el punto de muestreo en un cierto rango, pero también tiene que cumplir criterios adicionales relacionados con las causas comunes de concentraciones.

En este sentido, la Decisión de Ejecución de la Comisión en relación con el intercambio recíproco de información y la notificación sobre la calidad del aire (2011/850/EC), también conocido como IPR (*Implementing Provisions on Reporting*), específica en el Anexo II-D que la información acerca de la representatividad espacial debería ser proporcionada cuando esté disponible, como parte del conjunto de datos proporcionado en estaciones fijas. Ello supone notificar sobre: (1) la **extensión espacial del área representativa** (descripción geométrica), (2) la **evaluación de la representatividad** (interpretación del área representativa y la limitación de uso de esa información), y (3) la **documentación de la representatividad**.

Comunicar la **información sobre representatividad espacial no es aún obligatorio estrictamente y el método de cálculo no está armonizado** puesto que no hay un método de referencia especificado. Por ello, la Comisión, con el soporte de los Estados Miembros y la Agencia Europea del Medioambiente ha preparado una guía para facilitar la implementación de la Decisión 2011/850/UE (IPR, 2013) donde se explica que *"... aún no hay una definición de representatividad espacial para las estaciones de medida en la legislación Europea relativa a la calidad del aire y hay una necesidad de desarrollar herramientas para su evaluación cuantitativa"*. Además añade *"… la evaluación de la representatividad será evaluada en detalle en el marco de colaboración entre AQUILA/FAIRMODE"*. En este sentido la comunidad FAIRMODE (Martín et al., 2015) ha lanzado un ejercicio de intercomparación de diferentes metodologías de cálculo de la representatividad espacial de estaciones de calidad del aire. Esta actividad está actualmente en desarrollo en la cual el BSC participa con la metodología que se aplicará en este estudio.

En base al marco legal y al estado del arte en el cálculo de la representatividad espacial de las estaciones, el presente documento tiene como objetivo el **estudio de la representatividad espacial de las estaciones de la Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica de Cataluña (XVPCA)** correspondientes a

las Zonas de Calidad del Aire[2] de la 3 a la 15, en el que se excluyen las zonas de aglomeración del área del Barcelona y del Vallès-Baix Llobregrat (ZQA1 y ZQA2) para el año de referencia 2014.

Los **objetivos específicos** de este trabajo son:

1. Analizar de la cobertura espacial de la XVPCA para los principales contaminantes a diferentes resoluciones temporales (anual, diarias, máxima horaria).

2. Calcular el área representativa de cada una de las estaciones de la XVPCA para los principales contaminantes a diferentes resoluciones temporales (anual, diarias, máxima horaria).

3. Examinar la redundancia de las estaciones de la XVPCA en base anual.

4. Determinar la cobertura de la red en términos de población.

La tarea de evaluar la representatividad espacial tiene como objetivo delimitar las áreas del campo de concentración con **características similares** en localizaciones concretas. Estas características (variables) pueden ser niveles de concentración, propiedades estadísticas de los datos medidos, o parámetros externos que influencian la calidad del aire, como las emisiones o las condiciones de dispersión. En este estudio, la definición de representatividad está basada en dos criterios (Spangl et al., 2007):

1- La variable concentración está por debajo un cierto umbral.

2- La “similaridad de concentración” está causada por factores comunes.

Similares concentraciones pueden ser observadas por casualidad en diferentes localizaciones debido a una combinación de factores externos diferentes como emisiones, dispersión, transporte a larga distancia, formación o deposición. El uso de modelos, nos permite tener en cuenta variables adicionales para el cálculo de la representatividad como son las emisiones de diferentes fuentes y los patrones de dispersión de contaminantes determinados por condiciones topográficas.

[2] La Generalitat ha definido 15 Zonas de Calidad del Aire (ZQA) en base a áreas que comparten características orográficas, de población, de emisiones industriales y de tráfico. La zonificación está descrita en http://bit.ly/1CaH1VV.

2 Datos y metodología

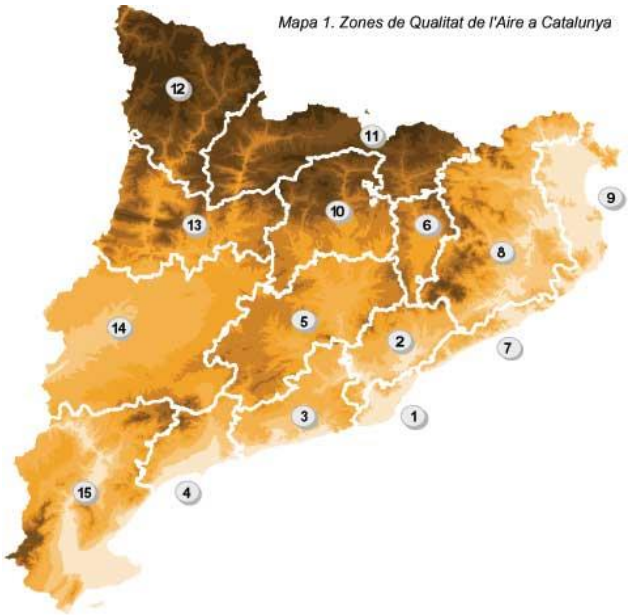
2.1 Zona de estudio

La Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica (XVPCA) fue creada por la Ley 22/1983, de 21 de noviembre, definida por el Orden de 20 de junio de 1986 y actualmente adscrita administrativamente al Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Catalunya, y está gestionada por la Dirección General de Calidad Ambiental.

La determinación del número de estaciones necesarias para evaluar la calidad del aire de una zona y la elección de su emplazamiento es fundamental para una buena interpretación del comportamiento de los contaminantes. Los factores que se tuvieron en cuenta para diseñar la XVPCA (Gencat, 2015) son el tipo y distribución de las fuentes emisoras, características meteorológicas de las zonas, características geográficas y orográficas, distribución de los receptores, demanda social, magnitud de la población afectada, y recursos especialmente protegidos o más vulnerables.

Tabla 1. Localización y balance de estaciones de la XVPCA para 2015 por ZQA (según lista de estaciones facilitada por el Departamento de Territorio y Sostenibilidad). Fuente: http://mediambient.gencat.cat

ZQA	Puntos Medida
1	31
2	25
3	12
4	10
5	7
6	5
7	5
8	8
9	2
10	2
11	2
12	1
13	2
14	2
15	15



Dentro del contexto normativo (Real Decreto 102/2011 y 2008/50/CE), Catalunya está dividida en **15 zonas de calidad del aire (ZQA)** cuyo objetivo es que las mediciones efectuadas en una zona representen el nivel de fondo de calidad del aire de toda el área que la comprende. Para ello, es necesario que la superficie que la forma sea homogénea en cuanto a la orografía, la climatología, la densidad de población y el volumen de emisiones industriales y de tráfico. Cada punto del territorio pertenece a una zona de calidad del aire y se caracteriza por un tipo de área. Esto implica que para evaluar la calidad del aire en Cataluña no es necesario medir todos sus puntos (Gencat, 2015). Así, y de acuerdo con la normativa, es suficiente disponer de datos para cada tipo de área dentro de una zona, ya que dos áreas del mismo tipo y comprendidas dentro de la misma zona presentan niveles de inmisión equivalentes.

Según la Tabla 1, la XVPCA dispone de 129 puntos de medida, correspondiente a 82 municipios de medida. En el presente estudio se calculará la representatividad espacial de la XVPCA correspondiente a las ZQA de

la 3 a la 15, para los contaminantes relevantes desde el punto de vista regulatorio (O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5), que según la Tabla 1 corresponde a 73 puntos de medida.

Del total de las 129 estaciones que conforman la XVPCA, 48 estaciones miden O_3, 65 estaciones miden NO_2, 44 estaciones miden SO_2, 99 estaciones miden PM10 y 39 estaciones miden PM2.5. La Figura 1 presenta la tipología de estaciones por contaminante y ZQA.

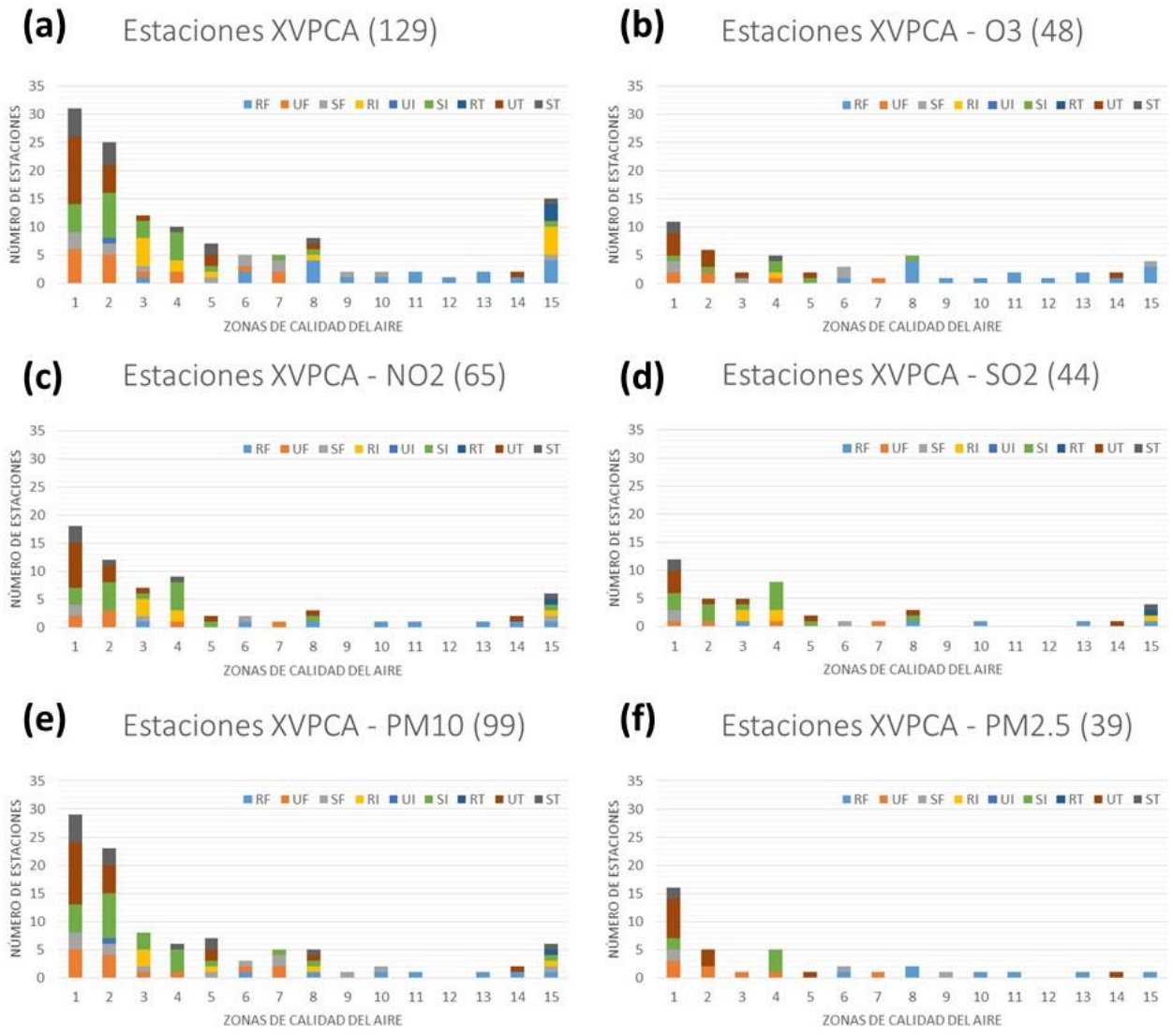


Figura 1. Balance de estaciones por tipología (áreas y emisión) para las 15 zonas de calidad de aire (ZQA). Las ZQA están representadas en Tabla 1. (a) estaciones de la XVPCA, (b) estaciones que miden O_3, (c) NO_2, (d) SO_2, (e) PM10, y (f) PM2.5

2.2 Cálculo de la representatividad espacial

La representatividad espacial de una estación depende de los factores locales y ambientales que afectan a dicha estación (ej., topografía, fuentes de emisión, patrones meteorológicos, entorno, etc.), del contaminante medido y de la base temporal usada para el cálculo (Vitali et al., 2013; Martín et al., 2014a). Los sistema de calidad del aire como CALIOPE son herramientas potentes para cuantifica la representatividad espacial de las estaciones porque (i) tiene una cobertura espacial y temporal elevada (1

km y 1h), (ii) tratan con contaminantes primarios y segundarios (ej., O_3), (iii) tienen en cuenta tanto la fuentes de contaminantes (naturales y antropogénicas), y (iv) considerar los factores meteorológicos y topográficos que delimitan el transporte de los contaminantes en los alrededores de la estación.

La representatividad de una estación, desde un punto de vista estadístico, trata de definir las zonas alrededor de dicho punto cuyos valores estén comprendidos dentro de un rango de variación, de forma que la medición de parámetros ambientales en la estación pueda ser extrapolada a su radio de acción con bastante certeza.

El método para el cálculo de la representatividad seleccionado se llama "**método de similitud**" (Vitali et al., 2013; Martín et al., 2014a). Este método se basa en localizar los puntos alrededor de la estación en los que la concentración del contaminante difiera de la concentración obtenida en el punto donde se ubica la estación menos de un determinado porcentaje. Este porcentaje se denomina en lo sucesivo discrepancia máxima (DM).

En el Anexo V del Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, se establece que la incertidumbre máxima admitida de las mediciones fijas debe ser del 15 % para los contaminantes dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono, mientras que se sitúa en el 25% para benceno, PM10, PM2.5 y plomo. Como lo que se persigue en un estudio de representatividad es determinar la fracción del territorio que tiene el mismo comportamiento que el punto donde se sitúa la estación, la DM a considerar debe situarse en este entorno. Siguiendo las recomendaciones de otros estudios, en este estudio se aplicará una DM del 20%.

Por tanto, la representatividad espacial de una estación será calculada como una función de frecuencia (fsito) como se indica a continuación (Ec.2):

$$f_{sito}(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} flag}{N_t}, \quad conflag = \begin{cases} 1, & \dfrac{|C(X_{sito},Y_{sito},Z_0,t_i) - C(x,y,Z_0,t_i)|}{C(X_{sito},Y_{sito},Z_0,t_i)} < 0.2 \\ 0, & \dfrac{|C(X_{sito},Y_{sito},Z_0,t_i) - C(x,y,Z_0,t_i)|}{C(X_{sito},Y_{sito},Z_0,t_i)} > 0.2 \end{cases} \quad \text{(Ec.2)}$$

donde C es la concentración, X_{sito} e Y_{sito} son las coordenadas de la estación, mientras que X e Y son los puntos del domino donde se explora la representatividad. Z_o es el nivel de superficie y t_i es el periodo (día, mes, etc.). La función de frecuencia está acotada espacialmente de acuerdo a la representatividad máxima de las estaciones establecida en el Anexo VIII de la Directiva 2008/50/CE. De esta forma se establece que en estaciones rurales de fondo la representatividad máxima permitida es de 10.000 km^2, mientras que el margen máximo de representatividad para el resto de estaciones (suburbanas, urbanas, rurales de tráfico y rurales industriales) está fijado a 400 km^2.

Este procedimiento se debe repetir para todas las estaciones con dispositivos midiendo un determinado contaminante (O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5). Con ello se está midiendo la cobertura real de la red para un determinado contaminante (dependiente del dispositivo que pudiera estar situado en ella) y no la representatividad de la localización geográfica de la red en general (independiente del dispositivo que pudiera estar situado en ella).

El comportamiento de una estación para un contaminante varía de un periodo a otro (ej., días, meses, etc.). Como la representatividad espacial varia con la base temporal en la que se promedie la concentración, en este trabajo, se calculará la representatividad espacial en base diaria, mensual y anual. Para iniciar este procedimiento, en cada periodo se calcula el valor que se obtiene en el punto donde se ubica la estación de

la XVPCA que se desea analizar. Se le aplica el porcentaje de discrepancia máxima permitido, calculando las celdas de salida del modelo que se encuentran dentro del intervalo valor estación ± discrepancia máxima.

Se repite este procedimiento para cada periodo considerado (días, meses, año), seleccionándose finalmente como representatividad de la estación aquellos puntos que cumplan la condición anterior en el 90% de los periodos de estudio (Nappo et al., 1982).

El objetivo de esta actividad 2.2 es el cálculo del área representativa de la XVPCA para O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 en el año 2014 basado en el método de similitud (descrito anteriormente) usando los datos del modelo CALIOPE en el domino CAT1km. Las tareas asociadas a esta actividad son:

- Cálculo de la cobertura espacial de la XVPCA para los principales contaminantes a diferentes resoluciones temporales (diarias, mensuales y anuales).
- Cálculo de la representatividad espacial de cada una de las estaciones de la XVPCA para los principales contaminantes a diferentes resoluciones temporales (diarias, mensuales y anuales).

2.3 Cálculo de la redundancia espacial de las estaciones

Con la idea de identificar la eficacia de la red en términos de redundancia, se calculará un parámetro que permita indicar el nivel de solapamiento entre las estaciones de la XVPCA para los principales contaminantes. Para ello se utilizará la definición de redundancia propuesta por Martin et al. (2014b) que considera que dos estaciones son redundantes cuando estas son representativas de la misma área. Así se define el porcentaje de redundancia (Q; Ec.2) entre dos estaciones como el ratio entre el área intersecada por las dos estaciones y la unión del área total cubierta por las dos estaciones.

$$Q = \frac{I_{ab}}{(N_a + N_b - I_{ab})} \quad \text{(Ec. 2)}$$

Donde a y b son las estaciones de calidad del aire para las cuales se calcula la redundancia, I_{ab} es el área de intersección entre las zonas de representatividad de las estaciones a y b, N_a es el área de representatividad de la estación a y N_b es el área de representatividad de la estación b.

El porcentaje de redundancia va de 0 a 1. Cuando el porcentaje de redundancia entre dos estaciones es 0 significa que no hay solapamiento entre el área representativa de ambas. Cuando Q es 1 significa que las dos estaciones son representativas de exactamente la misma área.

2.4 Correlación de las áreas representativas con la densidad de población

De forma complementaria al estudio de representatividad, se ha estimado la población asociad a dicha área para cada estación. Los datos de población disponibles corresponden a cada municipio según la base de datos georeferenciada de TeleAtlas Mulinet (TeleAtlasMultinet, 2011) e interpolados a la malla de trabajo de CAT1km. Para realizar dicha interpolación, se ha trabajado con la capa poligonal *Built-Up areas* (áreas donde se concentran casas y edificios con una función residencial y un área mínima de 2500 m^2) reportada también por TeleAtlas Multinet. De forma complementaria, también se ha usado una capa puntual reportada por TeleAtlas Mulinet donde se representan pequeñas zonas urbanizadas. A partir de ésta, se ha generado una capa poligonal formada por círculos de 50 m de radio cuyos centros se corresponden con los centros de las zonas urbanizadas. De esta manera se ampliará el número de áreas habitadas que propone la primera capa, permitiendo un reparto de la población más real.

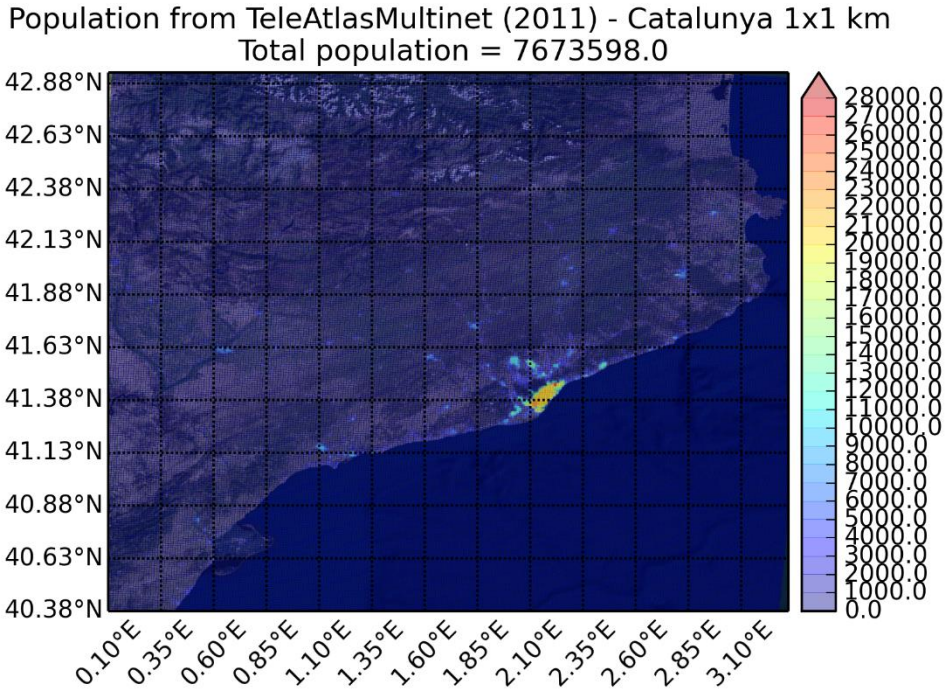


Figura 2. Mapa de población en número de habitantes interpolado a la malla de CALIOPE a 1 km x 1km de resolución sobre Cataluña (CAT1km)

Los datos de población utilizados en este estudio se han desagregado por área en aquellas celdas de la malla de trabajo de CAT1km que intersequen con las capas mencionadas y se han representado en la Figura 2.

2.5 Datos del sistema CALIOPE

CALIOPE es un sistema de predicción de la calidad del aire a corto plazo que se ejecuta diariamente sobre Europa y sobre España con una resolución espacial de 12 y 4 km, respectivamente, y una resolución temporal de 1 hora. Además, CALIOPE proporciona pronósticos de calidad del aire a mayor resolución sobre Cataluña (1 km). El sistema proporciona concentraciones en superficie de los principales contaminantes gaseosos (O_3, NO_2, SO_2) y material particulado (PM10 y PM2.5).

CALIOPE comenzó dando pronósticos a 1 km sobre el domino Barcelona (BCN1km) en 2012, pero desde junio de 2013 el pronóstico se extendió a toda Cataluña (CAT1km). Los ficheros brutos de CALIOPE para el dominio CAT1km se encuentran almacenaos en las instalaciones del BSC (*/gpfs/archive/bsc32/bsc32359/archive_forecast/F-CAT1/REDUCED*). Por tanto, el cálculo de la representatividad espacial de la XVPCA se hará sobre el año completo disponible, que es 2014, utilizando los datos de pronóstico a 24 h.

Previamente al cálculo de la representatividad espacial se ha de procesar la información bruta del sistema CALIOPE para calcular los promedios diarios, mensuales y anuales en el dominio CAT1km para los contaminantes O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 correspondientes el año 2014.

3 Resultados

En este apartado se analizan los resultados del estudio describiendo la cobertura espacial de la XVPCA desde un nivel global (toda las estaciones de la red) a un nivel individual (por estación) para cada uno de los

principales contaminantes regulados por la directiva 2008/50/CE. En primer lugar, la Sección 3.1 evalúa la cobertura de la XVPCA para cada uno de los contaminantes por base temporal (diaria, mensual y anual) considerando que en las estaciones actuales se miden todos los contaminantes de estudio. También se analizará la representatividad espacial de la una de las estaciones por área y tipo de emisión. La Sección 3.2 se analizará la cobertura espacial de la XVPCA considerando que no todas las estaciones miden todos los contaminantes (situación real). El objetivo de analizar de forma complementaria la configuración de la red actual (Sección 3.2) y la red considerando que en todas las estaciones se están midiendo todos los contaminantes (Sección 3.1) es el de proporcionar una herramienta de decisión al gestor de la red de cara a determinar qué nuevos sensores y en qué localizaciones/estaciones sería importante considerar en un futuro de cara a aumentar de forma significativa la actual cobertura espacial del conjunto de la red.

3.1 Cobertura espacial de la XVPCA

3.1.1 Representatividad espacial de la XVPCA por contaminante

Una vez calculada la representatividad espacial por estación, se ha determinado la cobertura espacial de toda la red de estaciones de calidad del aire XVPCA como un agregado de la representatividad individual de cada estación. En este primer análisis se ha tenido en cuenta que todas las estaciones son potenciales localizaciones para medir todos los contaminantes en el mismo emplazamiento. Sin embargo, en la Sección 3.2 se tendrá en cuenta el contaminante medido en cada estación.

La Figura 3, que representa la cobertura espacial de la XVPCA para cada uno de los contaminantes considerados en este estudio (O_3max, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) para el promedio anual de concentración, indica diferencias significas entre ellos. La XVPCA presenta la mayor cobertura espacial para el O_3max. El O_3 dado su elevado tiempo de vida en la atmósfera (aproximadamente 20 días) es capaz de formarse, transportarse y depositare lejos de la zona de presencia de sus precursores, de ahí su alta representatividad espacial para cada una de las estaciones. El patrón de representatividad espacial de O_3max está dominado por las estaciones de rurales de fondo, para las cuales por razones metodológicas se les asigna una representatividad máxima de 10.000 km^2 (Sección 2.2).

La representatividad espacial para los gases NO_2 y SO_2 es significativamente menor comparada con el O_3max, debido a diferencias en su origen y mecanismo de inyección la atmósfera. El NO_2 que procede principalmente del tráfico rodado se emite muy cerca de la superficie, por tanto su permanencia en la atmósfera (desde que se emite hasta que se deposita) es de ~1 día. Por el contrario, el SO_2 además de ser emitido por el tráfico rodado principal fuente de emisión son las centrales térmicas, que inyecta los contaminantes en capas altas de la atmósfera, ello hace que la permanencia del SO_2 en la atmósfera aumente además de poder ser transportado a más larga distancia de la zona donde se emitió. Para el caso del PM10 y PM2.5, el patrón de representatividad espacial de la XVPCA es similar, dado que el PM es un contaminante sensible de ser transportado a larga distancia su variabilidad es baja en zonas de rurales de fondo, por tanto dichas estaciones se presentan una alta cobertura espacial.

Estos resultados indican que la representatividad espacial no puede considerarse como un valor único asociado a cada estación, si no que ha de depender del contaminante dada a sus diferencias en composición química, procesos de emisión y dinámica atmosférica. Sin embargo, con la idea de proporcionar un valor unificado, se ha determinado el valor de representatividad espacial llamado "intersección" determinado a partir del área coincidente (intersecada) sobre las áreas de representatividad de los cinco contaminantes considerados. El área de intersección intersecada se muestra la Figura 3 (cuarta fila, segunda columna) e indica que es un valor muy restrictivo, pues recoge el peor de los casos.

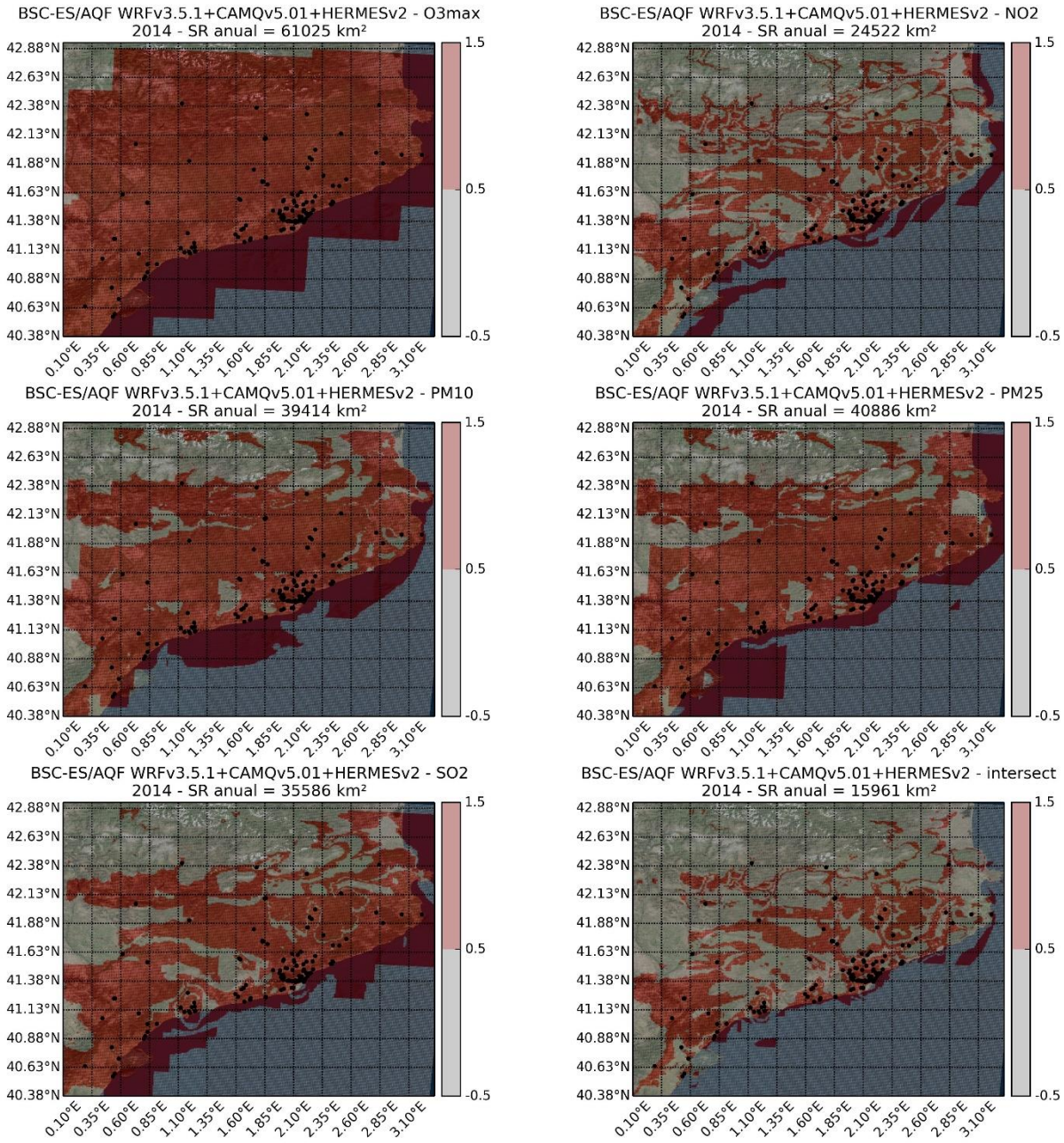


Figura 3. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio anual de los contaminantes O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10, PM2.5 y para la intersección.

3.1.2 Representatividad espacial de la XVPCA en función de la base temporal

A la hora de terminar el área representativa de una estación de calidad del aire cuando dicho estación detectó una excedencia de los valores límite u objetivo establecidos en la Directiva Europea, resulta útil conocer el área y la población que dicha medida representa en el contexto espacial. Complementariamente a los resultados de la representatividad espacial anual del apartado anterior, en la Figura 4 se muestra dicho valor para diferentes bases temporales legisladas según el contaminante (anual, diaria y Max 1h). En el caso del O_3 se considera el promedio octo-horario de la media móvil (Max 8h). Los resultados indican que la representatividad espacial disminuye al aumentar la resolución de la base temporal de promedio anual a

diario y/o Max 1h. Este efecto es significativo para todos los contaminantes excepto para el O_3, para el que la Max 8h anual, diaria y Max 1h muestras un patrón casi invariable. Este hecho es atribuido a que el O_3 considerado un contaminante de larga distancia, cuya mayor variabilidad se encuentra en zonas de alta actividad antropogénica y entre valores diurnos/nocturnos.

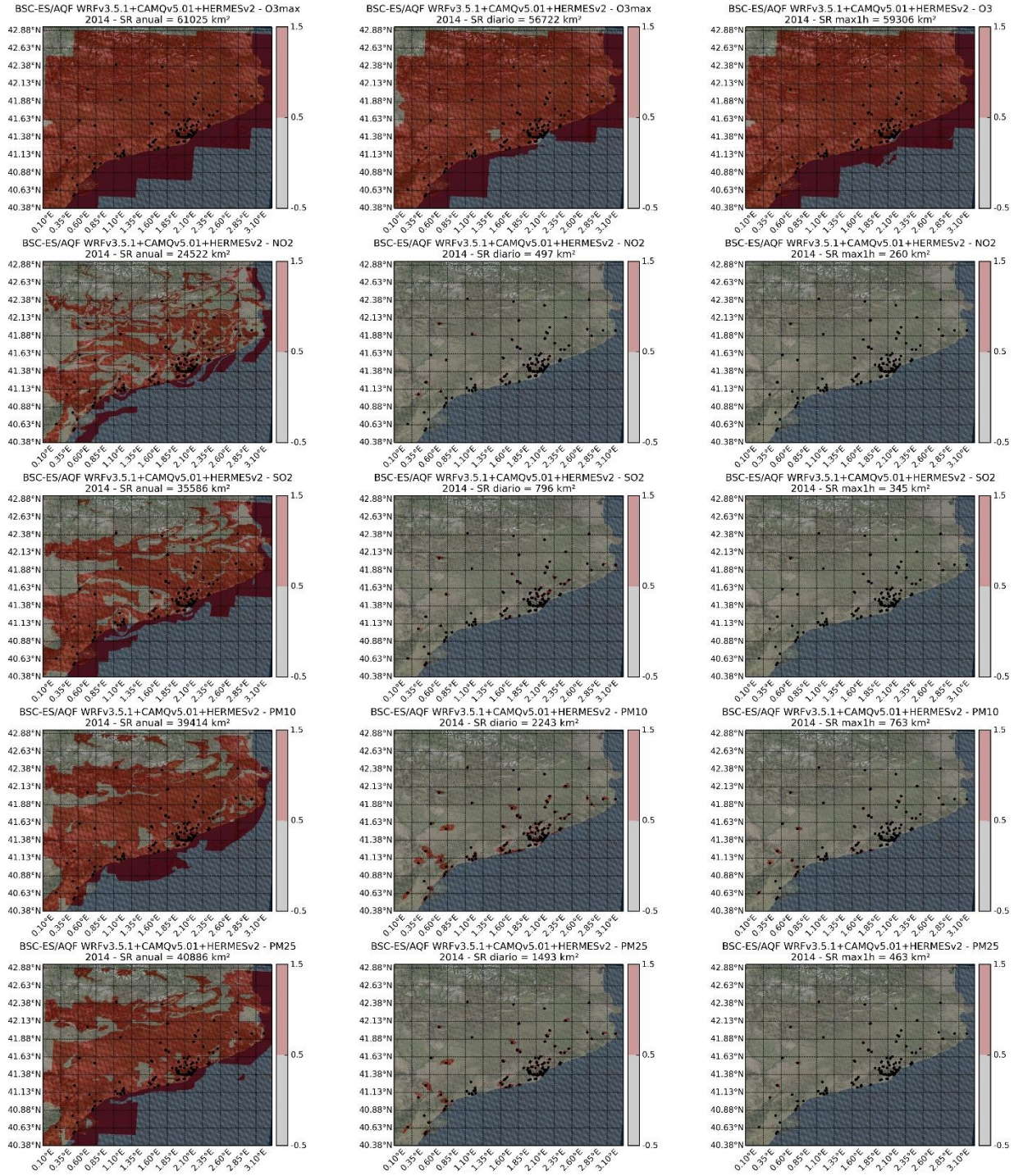


Figura 4. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio de los contaminantes O_3max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 en función de tres bases temporales: anual (primera columna), diaria (segunda columna) y máxima horaria (tercera columna).

Los resultados cuantitativos del análisis de representatividad espacial de la XVPCA en el caso hipotético de que las estaciones de la XVPCA midieran todos los contaminantes se recogen en la Tabla 2 por contaminante y base temporal, incluyendo el valor de población asociada, tanto en valor absoluto (POP) como porcentual (%POP). El O_3 dado su alto tiempo de residencia en la atmósfera presenta una alta representatividad espacial para cada una de las estaciones, como ya se discutió anteriormente. Si las 129 estaciones de la XVPCA midieran O_3 en las tres bases temporales (anual, diaria, y máxima diaria) la red cubriría un área entre 56.000 y 61.000 km^2, correspondiente a un 94-99% de la población de Cataluña.

Tabla 2. Cobertura espacial de la XVPCA en km^2 en las 129 estaciones disponibles (n) para los contaminantes de estudio (O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) por base temporal (anual, diario, Max 1h) y población asociada en número de habitantes (POP) y porcentaje (%POP).

	n	Anual (km^2)	POP ($*10^6$)	%POP (%)	Diario (km^2)	POP ($*10^6$)	%POP (%)	Max 1h (km^2)	POP ($*10^6$)	%POP (%)
O_3 Max8h	129	61025	7.61	99.2	56722	7.27	94.8	59306	7.41	96.5
NO_2	129	24522	6.21	80.9	497	1.96	25.6	260	1.46	19.0
SO_2	129	35586	6.83	89.0	796	2.44	31.8	345	1.24	16.1
PM10	129	39414	7.41	96.6	2243	3.97	51.8	763	1.95	25.5
PM2.5	129	40886	7.28	94.9	1493	3.21	41.9	463	1.41	18.4

Para el caso de NO_2 y SO_2 la cobertura espacial de las 129 estaciones correspondería a un área de 24.522 km^2 para NO_2 y un área de 35.586 km^2 en promedio anual, siendo mayor para el SO_2 que para el NO_2. Este hecho tiene sentido al tener en cuenta el origen y los mecanismo de inyección de estos contaminantes en la atmósfera. El NO_2 que procede principalmente del tráfico rodado se emite muy cerca de la superficie, por tanto su permanencia en la atmósfera (desde que se emite hasta que se deposita) es de ~1 día. Por el contrario, el SO_2 además de ser emitido por el tráfico rodado principal fuente de emisión son las centrales térmicas, que inyecta los contaminantes en capas altas de la atmósfera, ello hace que la permanencia del SO_2 en la atmósfera aumente además de poder ser transportado a más larga distancia de la zona donde se emitió. A parte de estas diferencias observadas ente NO_2 y SO_2, es de destacar la alta cobertura de la XVPCA para NO_2 y SO_2 en promedio anual que representa un 80-90% en términos de población, y la baja cobertura de estos contaminantes para el resto de bases temporales (diaria y Max 1h), del orden de 16-32% en términos de población.

Para el PM la cobertura espacial es elevada tanto para PM10 como para PM2.5 en promedio anual, entorno al 95-96%, siendo mayor para el PM10. Destaca la reducción de la cobertura de población en promedio diario, del orden del 42%-52%.

3.1.3 Representatividad espacial de cada una de las estaciones de la XVPCA

De forma complementaria al estudio de la cobertura global de la XVPCA, se ha calculado la representatividad espacial promedio de cada una de las estaciones de la XVPCA por tipología, teniendo en cuenta su comportamiento promedio, su desviación del comportamiento medio y el número de estaciones de la XVPCA disponibles en cada categoría. La Tabla 3 muestra la representatividad espacial por tipología para el O_3 y base temporal. Como se discutió anteriormente, la representatividad espacial por base temporal no varía de forma importante, sin embargo si hay cambios por tipología de estación, especialmente entre las estaciones rurales de fondo (RF) con una representatividad entre 7800-9700 km^2 y

el resto de tipologías (UF, SF, RI, UI, SB, RT y UT) con una representatividad entre 200-400 km^2, con una representatividad espacial mímina en estaciones UT (130-400 km^2). Esta diferencia se debe al origen del O_3 presente en cada una de las estaciones. Las estaciones RF está alejada de fuentes significativas de emisión antropogénica, por tanto la medida de esta estaciones es representativa de los valores de fondo debido al transporte a larga distancia, mientras que el resto de estaciones (UF, SF, RI, UI, SB, RT y UT) están influenciadas por algún tipo de emisión antropogénica o por el entramado urbano/suburbano. El O_3 es un contaminante secundario formado en presencia de los precursores NO_x y VOC, además su concentración puede llegar a ser elevada en zonas remotas de fondo, dado su elevado tiempo de vida en la atmosfera (~20 días). Debido a esta naturaleza y comportamiento del O_3, en zonas RF donde hay ausencia de precursores a niveles elevados la representatividad es mayor, mientras en el resto de estaciones con influencia antropogénica, la variabilidad del ciclo diario del O_3 se ve afectada por los precursores.

El análisis de la variabilidad de la representatividad espacial por tipología de estación para el NO_2 (Tabla 4) no muestra grandes diferencias para altas resoluciones temporales (Max 1h y diaria) donde la estación es representativa de un área entre 8 y 1 km^2. La mayor representatividad espacial se obtiene para el promedio anual, aunque de nuevo sólo es apreciable para las estaciones RF (1642 km^2) frente al resto (60-100 km^2). La misma tendencia se observa para el SO_2 (Tabla 5), aunque los valores son sensiblemente superiores a los del NO_2, con una representatividad anual de 2434 km^2 para estaciones RF y 150-230 km^2 para el resto de estaciones.

Para el PM10 y PM2.5 las estaciones rurales de fondo presentan una representatividad espacial anual del mismo orden de magnitud entre 3100 km^2 y 3400km^2 (Tabla 6 y Tabla 7). Para el resto de estaciones (UF, SF, RI, UI, SI, RT, UT y ST) la representatividad espacial es significativamente menor tanto para PM10 como para PM2.5, en el rango de 160-316 km^2 para el promedio anual. De nuevo para ambos contaminantes, la representatividad espacial disminuye significativamente de promedio anual a diario o Max 1h, donde los valores de representatividad están en el rango 3-49 km^2 para todos los tipos de estaciones.

Tabla 3. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el O_3 Max8h diario y anual y el O_3 Max 1h. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T)

	n	Max 1h	Diario	Anual
RF	19	8496.4±1097.9	7826.8±1630.5	9710.9±1178.9
UF	17	271.5±159.7	144.6±112.3	405.8±62.9
SF	14	399±64	290.4±115.9	439.9±3.2
RI	14	412.2±106	383.6±116	439.9±4
UI	1	436±NA	346±NA	441±NA
SI	25	334.3±101.6	154.8±125.4	427.2±39.2
RT	3	441±0	441±0	441±0
UT	22	271±148.6	135.3±114	410.4±38.4
ST	14	282.9±153.8	187±171.2	400.1±48.8

Tabla 4. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el NO_2. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T)

	n	Max 1h	Diario	Anual
RF	19	2.9±3.1	8.7±7.8	1642.1±674.5
UF	17	2.9±2.2	4.2±3.5	100.9±55.1
SF	14	1.1±0.3	2.5±1.5	61±33.3
RI	14	2±1.8	4.4±4.7	121.7±52.1
UI	1	1±NA	2±NA	103±NA
SI	25	2.4±3.1	3.6±3.7	102.7±43.7
RT	3	1.7±1.2	3±1.7	115.7±57
UT	22	2.6±1.7	4.3±2.7	113.1±57.3
ST	14	3.1±3	4.6±3.4	110.4±36.4

Tabla 5. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el SO_2. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T)

	n	Max 1h	Diario	Anual
RF	19	4.8±4	11.3±7.6	2434.6±1018.7
UF	17	2.6±1.9	6.9±5.4	164.9±91.9
SF	14	2.7±2	6.6±5.3	189.9±88.6
RI	14	2.1±2.2	5.1±6.5	226.5±129.3
UI	1	5±NA	11±NA	185±NA
SI	25	2.5±2.2	7.7±8.4	188.8±106.6
RT	3	4.7±2.5	8.3±4	174.3±23.3
UT	22	2.5±2.1	6.9±6.4	148±75.2
ST	14	2.6±2.1	6.7±5.5	159.2±92.4

Tabla 6. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el PM10. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T)

	n	Max 1h	Diario	Anual
RF	19	12.4±12.7	41±46.2	3198.1±1213.6
UF	17	5.4±2.9	18.7±7.8	222.4±69.2
SF	14	5.1±2.8	20.6±14	204±77.7
RI	14	15.6±14.3	48.4±49.9	314.9±85
UI	1	4±NA	26±NA	199±NA
SI	25	5.2±4.1	17±13.1	238.8±92.3
RT	3	10.3±5.5	25±8.7	286.3±19
UT	22	4.9±3.5	17.3±9	213.2±67.6
ST	14	4.4±2.8	18±12.2	192±68.5

Tabla 7. Representatividad espacial (km^2) por tipología de estación para el PM2.5. El valor de representatividad está representado por la media y la distribución estándar teniendo en cuenta el número de estaciones para cada tipo (n). La tipología de estaciones consideradas son: rural (R), urbana (U), suburbana (S), fondo (F), industrial (I) y de tráfico (T)

	n	Max 1h	Diario	Anual
RF	19	7.1±6.3	25.8±29.8	3428.7±1543.5
UF	17	3.3±2.1	10±4.2	159.8±38.6
SF	14	3.2±2.1	11±5.3	162.5±55.1
RI	14	7.6±6.7	30.2±29.6	316.5±109.2
UI	1	4±NA	15±NA	185±NA
SI	25	3.2±2.3	10.7±9.1	182±71.6
RT	3	6±2.6	19±13.5	315.3±87.2
UT	22	2.9±1.9	10.5±5.2	173.6±51.1
ST	14	2.9±2.4	10.7±9.2	173.9±75.8

La información completa sobre la representatividad espacial de cada una de las estaciones de XVPCA se presenta de forma gráfica en el ANEXO I y de forma numérica en el ANEXO II.

3.2 Cobertura de la XVPCA en función de las medidas realizadas en cada estación

3.2.1 Representatividad espacial de la XVPCA por contaminante medido

Teniendo en cuenta que todas la estaciones de la XVPCA no miden a la vez todos los contaminantes regulados (O_3, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) como se discutió en la Sección 2.1, y que existen evidencias que la representatividad espacial de los contaminantes depende de su naturaleza y base temporal como se discutió en la Sección 3.1.1 y 3.1.2, es necesario realizar un estudio detallado de la cobertura real de la red para conocer su cobertura en términos de población. La Figura 5 muestra cobertura espacial de la XVPCA en km^2 para el promedio anual de cada uno de los contaminantes considerados en el estudio medidos en cada estación actualmente (O_3 Max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5).

De la misma forma que en la Sección 3.1, la Figura 6 muestra cómo la cobertura espacial de la XVPCA disminuye cuando aumenta la resolución de la base temporal sobre la cual se estiman las concentraciones de los contaminantes desde anual a máxima diaria (Max 1h). Como se mostró en el análisis anterior, el O_3 muestra la menor variabilidad por base temporal (anual, diaria, Max 1h), siendo más significativa para el resto de contaminantes.

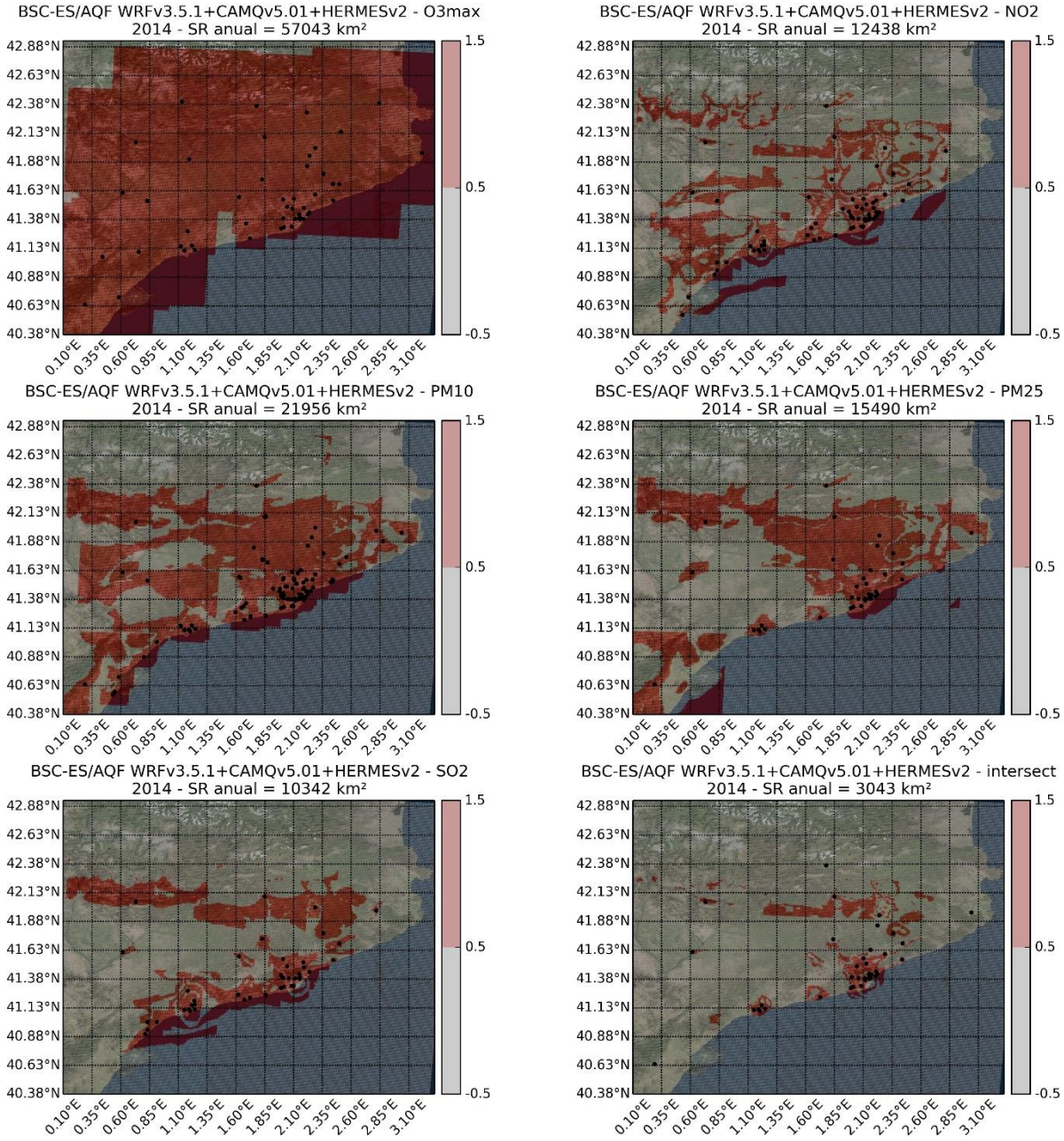


Figura 5. Cobertura espacial de la XVPCA para el promedio anual de los contaminantes O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10, PM2.5 y para la intersección teniendo en cuenta los contaminantes medidos en cada estación.

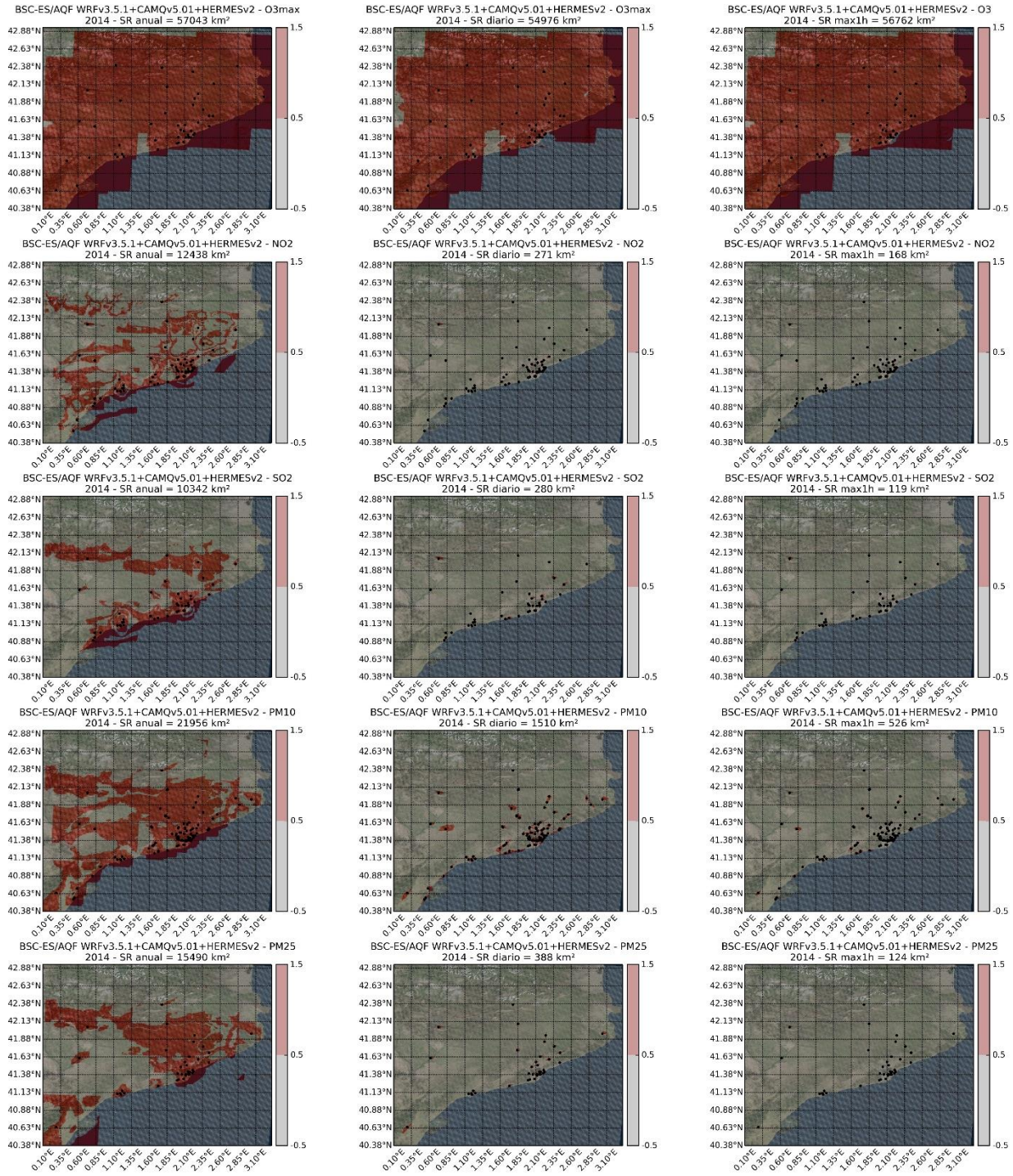


Figura 6. Cobertura espacial de la XVPCA (129 estaciones) para el promedio de los contaminantes O_3max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5 en función de tres bases temporales: anual (primera columna), diaria (segunda columna) y máxima horaria (tercera columna).

La Tabla 8 muestra los datos globales del área representativa de la XVPCA en km^2 y su correspondencia con la población cubierta por cada zona en función del contaminante y base temporal, limitado a los contaminantes que se miden en cada estación. El O_3 dado su alto tiempo de residencia en la atmósfera presenta una alta representatividad espacial para cada una de las estaciones, como ya se discutió anteriormente. Las 48 estaciones de la XVPCA que miden O_3 en las tres bases temporales (anual, diaria, y máxima diaria) en Cataluña cubren un área de entre 54.976 y 57.043 km^2, que corresponden a un 90-98% de la población de Cataluña.

Para el caso de NO_2 existen 65 estaciones distribuidas en Cataluña que representa un 73% de la población en términos anuales. En el caso de SO_2, el número de estaciones es ligeramente inferior al del NO_2 (44 estaciones) y eso también se refleja en unos valores de representatividad espacial ligeramente inferiores, sobre todo en términos de población con el 67% de población cubierta en términos anuales. A parte de estas diferencias observadas ente NO_2 y SO_2, es de destacar la baja cobertura de la XVPCA para estos contaminantes para el promedio diario y Max 1h, del orden de 5-19% en términos de población.

Para el PM la cobertura espacial es elevada tanto para PM10 como para PM2.5 en promedio anual, entorno al 77-88% en términos de población cubierta. Para el promedio diario (regulado por la Directiva Europea) la población cubierta es sensiblemente inferior para el PM10, del orden del 55%, siendo el más bajo para el PM2.5 (23%). Esta baja cobertura espacial de PM2.5 está relacionada con la ausencia de estaciones midiendo PM2.5 en principales zonas urbana, en donde ya se mide PM10.

Tabla 8. Cobertura espacial de la XVPCA en km^2 en las estaciones con medidas disponibles (n) para los contaminantes de estudio (O_3 max8h, NO_2, SO_2, PM10 y PM2.5) por base temporal (anual, diario, max1h) y población asociada en número de habitantes (POP) y porcentaje (%POP).

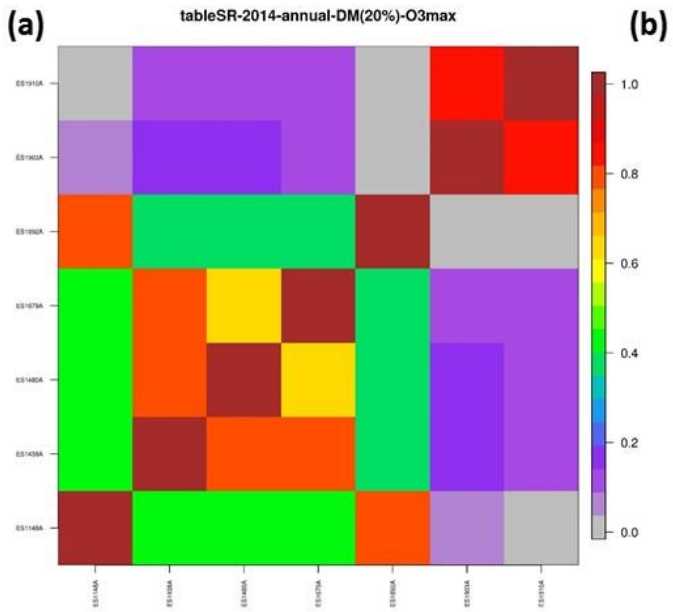
	n	Anual (km^2)	Pob (*10^6)	Pob (%)	Diario (km^2)	Pob (*10^6)	Pob (%)	Max 1h (km^2)	Pob (*10^6)	Pob (%)
O_3 max8h	48	57043	7.52	98.1	54976	6.90	89.9	56762	7.25	94.4
NO_2	65	12438	5.59	72.8	271	1.47	19.2	168	1.05	13.7
SO_2	44	10342	5.20	67.9	280	1.00	13.1	119	0.40	5.2
PM10	99	21956	6.73	87.7	1510	3.86	50.4	526	1.89	24.7
PM2.5	39	15490	5.89	76.7	388	1.78	23.3	124	0.69	9.0

3.2.2 Redundancia de las estaciones

La redundancia de las estaciones (Q) se ha calculado de acuerdo a la Sección 2.3 para las estaciones de la XVPCA que miden cada uno de los contaminantes. Para el análisis de ratio Q se ha utilizado la matriz de redundancia (Figura 7) que representa en el eje x e y las estaciones disponibles comprándolas dos a dos, y con una graduación de colores que indica el color de ratio Q.

En este apartado se analizan las matrices de redundancia correspondientes a estaciones con medidas de cada contaminante. Además se han filtrado aquellas con una redundancia mayor de 75% (Q > 0.75). El umbral del 75% se ha establecido de forma arbitraria, pero en el ANEXO III se muestra el ratio Q para todas las estaciones. De forma complementaria a este estudio, se ha calculado Q para cada una de las estaciones de la XVPCA como si midieran todos los contaminantes y se ha añadido en el ANEXO III. Esta información puede ser de guía a la hora de ampliar de la medida de contaminantes en las estaciones de la red.

El análisis de la redundancia para las estaciones que miden O_3 destaca que sólo en promedio anual de la máxima octo-horaria de O_3 hay una redundancia mayor de 75% (Figura 7) entre un determinado número de estaciones urbanas/suburbanas de tráfico y fondo correspondientes a la ZAQ1. Existe una redundancia en términos anuales para O_3 entre Barcelona-l'Eixample (ES1438A), Barcelona-Gracia-Sant Gervasi (ES1480A), y Barcelona-Ciutadella (ES1679A). El segundo grupo de estaciones redundantes se da entre Badalona-Mont-Roig-Ausias-March (ES1892A), y Sant Adria del Besos (ES1148A), y el tercer grupo está formado por Viladecans- Atrium (ES1903A) y Gavá-Parc-Miluleni (ES1910A).



O3max anual		
ES1438A	ES1480A	ES1679A
ES1480A	ES1438A	
ES1679A	ES1438A	
ES1892A	ES1148A	
ES1903A	ES1910A	
ES1910A	ES1903A	
ES1148A	ES1892A	

Figura 7. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de O_3 max8h. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales.

Para NO_2, 10 estaciones presentan redundancia en el promedio anual de NO_2 (Figura 8) correspondientes a la ZQA1 (6 estaciones urbanas, 5 de tráfico y 1 de fondo) y a la ZQA4 (4 estaciones, 3 suburbanas industriales, 1 urbana de fondo).

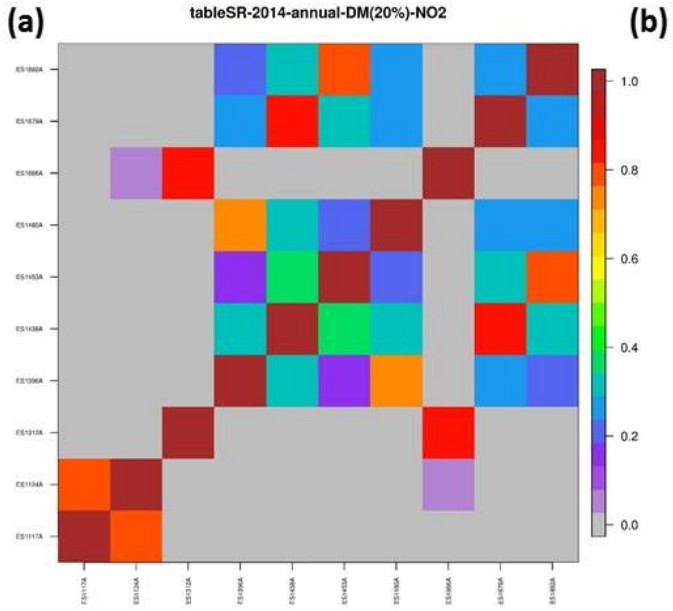
En la ZQA4 la redundancia se observa entre los pares de estaciones:

- Vila seca (ES1117A) y Tarragona Sant Salvador (ES1124A)
- Tarragona Universitat Laboral (ES1312A) y Tarragona Parc Ciutat (ES1666A)

En la ZQA1 la redundancia se observa entre los pares de estaciones:

- Barcelona Sants (ES1396A) y Barcelona Gracia Sant Gervasi (ES1480A) (promedio anual y diario)
- Barcelona Eixample (ES1438A) y Barcelona Ciutadella (ES1679A)
- Santa Coloma de Gramanet (ES1453A) y Badalona Mont Roig Ausias March (ES1892A)

No hay redundancia superior al 75% entre pares de estaciones para SO_2.



NO2 anual		NO2 diario	
ES1117A	ES1124A	ES1396A	ES1480A
ES1124A	ES1117A	ES1480A	ES1396A
ES1312A	ES1666A		
ES1396A	ES1480A		
ES1438A	ES1679A		
ES1453A	ES1892A		
ES1480A	ES1396A		
ES1666A	ES1312A		
ES1679A	ES1438A		
ES1892A	ES1453A		

Figura 8. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de NO_2. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales.

Es para el PM10 donde mayor redundancia se observa entre estaciones (Figura 9). La más crítica es la redundancia que se da para las tres bases temporales (anual, diara, y Max 1h). El conjunto de estaciones redundantes son las que se lista a continuación.

En la ZQA 1:

- Barcelona Pl. Universitat (ES0559A) y Barcelona l'Eixample (ES1438) (urbanas de tráfico).
- Sant-Vicent dels Horts Laba (ES2011A) y Sant Vicent dels Horts CEIP (ES1663A) (suburbanas industrials)

En la ZQA 2:

- Montcada i Reixac Pl Lluis Companys (ES00584A) y Montcada i Reixac Ajuntament (ES1665A) (usuburbanas industriales)

En un menor grado, se observan estaciones con redundancia anual y diaria presentes en la ZQA5:

- Manresa CEIP (ES0392A) y Manresa Ajuntament (ES1861A) (Tráfico)
- Igualada Masuca (ES1135A) y Vilanova del Cami (ES2035A) (Suburbanas)
- Mataró Cros (ES1390A) y Mataró Passeig Molins (ES1816A) (uburbana-industrial / urbana-fondo)

Redundancia anual en la ZQA1:

- Molins de Rei Ajuntament (ES0586A) y Sant Vicent Horts (ES1663A) (suburbanas)
- Santa Coloma Gramanet-Balldovina (ES1453A) y Badalona Gardia Urbana (ES1928A) (urbanas)

- Barcelona Port Vell (ES1870A) y Barcelona IES Verdaguer (ES1900A)
- El Prat Llobregat Jardins Pau (ES1929A) y El prat Llobregat CEM Sagnier (ES1983A) (suburbanas de tráfico)

Redundancia anual en la ZQA2:

- Terrasa Mina (ES0395A) y Terrasa Pare Alegre (ES1018A). Urbana
- Terrasa Pare Alegre (ES1018A) y Terrasa Mina Publica Aiges (ES0395A). Urbanas

Redundancia anual en la ZQA3:

- Vilanova i la Geltru centre civic (ES1447A) y Vilanova i la Geltru Ajuntament (ES1555A). Suburbana-urbana
- Santa Margarida els Monjos els Monjos (ES1896A) y Santa Margarida els Monjos la Rapita (ES1899A) (industriales)

Redundancia anual en la ZQA4:

- Tarragona Bonavista (ES1120A) y Tarragona Universidad Laboral (ES1312A).

Redundancia anual en la ZAQ5:

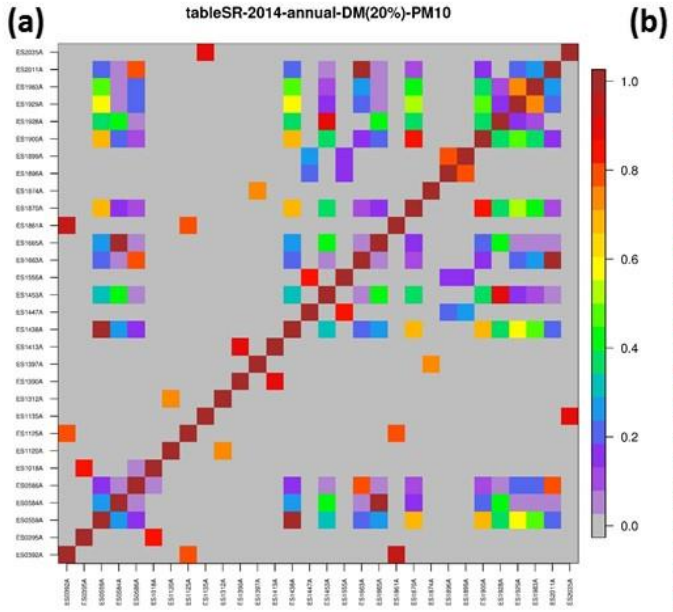
- Manresa Pl España (ES1125A), Manresa CEIP (ES0392A) y Manresa ajuntament (ES1861A) (Tráfico)

Redundancia anual en la ZAQ6:

- Manlleu Hospital Comarcal (ES1397A) y Vic Centre Civic Santa Ana (ES1874A) (suburbana y urbana fondo)

Redundancia anual en la ZAQ7:

- Mataró Cors (ES1413A) y Mataró Pablo Iglesias (ES1390A) (Sububanas)



(b)

PM10 anual			PM10 diario		PM10 max1h	
ES0392A	ES1125A	ES1861A	ES0392A	ES1861A	ES0559A	ES1438A
ES1125A	ES0392A	ES1861A	ES0559A	ES1438A	ES0584A	ES1665A
ES1663A	ES0586A	ES2011A	ES0584A	ES1665A	ES1438A	ES0559A
ES1861A	ES0392A	ES1125A	ES1135A	ES2035A	ES1663A	ES2011A
ES0586A	ES1663A	ES2011A	ES1390A	ES1816A	ES1665A	ES0584A
ES2011A	ES0586A	ES1663A	ES1438A	ES0559A	ES2011A	ES1663A
ES1018A	ES0395A		ES1663A	ES2011A		
ES1120A	ES1312A		ES1665A	ES0584A		
ES1135A	ES2035A		ES1816A	ES1390A		
ES1312A	ES1120A		ES1861A	ES0392A		
ES1390A	ES1413A		ES2011A	ES1663A		
ES1397A	ES1874A		ES2035A	ES1135A		
ES1413A	ES1390A					
ES1438A	ES0559A					
ES1447A	ES1555A					
ES1453A	ES1928A					
ES1555A	ES1447A					
ES1665A	ES0584A					
ES1870A	ES1900A					
ES1874A	ES1397A					
ES1896A	ES1899A					
ES1899A	ES1896A					
ES1900A	ES1870A					
ES1928A	ES1453A					
ES1929A	ES1983A					
ES1983A	ES1929A					
ES2035A	ES2035A					
ES0395A	ES1018A					
ES0559A	ES1438A					
ES0584A	ES1665A					

Figura 9. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de PM10. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales.

El estudio de redundancia para el PM2.5 muestra la existencia de un par de estaciones redundantes en las tres bases temporales (Figura 10), que correspondientes a las estaciones urbanas de tráfico de la ZQA1:

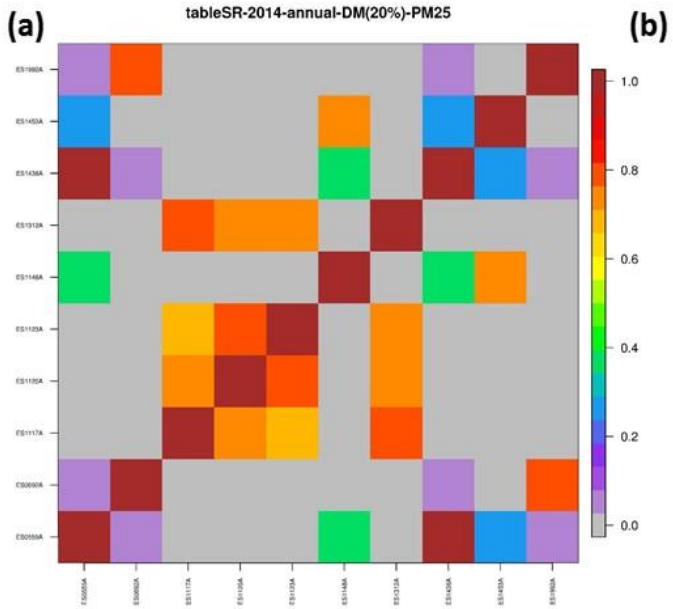
- Barcelona Pl. Universitat (ES0559A) – Barcelona L'Eixample (ES1438A)

También se han detectado estaciones con redundancia anual en la ZQA1 como son:

- L'Hospitalet de Llobregat (ES0692A) – Barcelona Palau Reial (ES1992A) (urbanas de tráfico)
- Sant Adria de Besos Olimpic (ES1453A) y Santa Coloma de Gramanet Balldovina (ES1148A) (tráfico)

Y en la ZQA4 en las siguientes estaciones suburbanas industriales:

- Vila-Seca-Renfe (ES1117A) y Tarragona Universitat Laboral (ES1312A) (suburbanas industriales)
- Tarragona Bonavista (ES1120A) y Cosntanti Guadi (ES1123A) (suburbanas industriales)



PM25 anual		PM25 diario		PM25 max1h	
ES0559A	ES1438A	ES0559A	ES1438A	ES0559A	ES1438A
ES0692A	ES1992A	ES1438A	ES0559A	ES1438A	ES0559A
ES1117A	ES1312A				
ES1120A	ES1123A				
ES1123A	ES1120A				
ES1148A	ES1453A				
ES1312A	ES1117A				
ES1438A	ES0559A				
ES1453A	ES1148A				
ES1992A	ES0692A				

Figura 10. (a) Matriz de redundancia de estaciones de la XVPCA con un ratio de redundancia (Q) mayor de 75% en al menos un par de estaciones correspondiente al promedio anual de PM2.5. (b) Lista de estaciones con una redundancia > 75%. Celdas en verde indican redundancia en una sola base temporal. Celdas naranjas indican redundancia en dos bases temporales. Celdas rojas indican redundancia en las tres bases temporales.

4 Discusión y conclusiones

Se ha demostrado que la representación espacial de una estación depende de la topología de la estaciones, de la tipología (entorno y tipo de emisión predominante). La representatividad espacial calculada como la variabilidad de concentraciones (método aquí propuesto) es función del tipo de contaminante y base temporal utiliza para promediar las concentraciones.

El presente estudio ha indicado que la XVPCA presenta una alta cobertura espacial y poblacional en el caso del O_3. Las 48 estaciones que miden O_3 en las tres bases temporales (anual, diaria, y máxima diaria) en Cataluña cubren un área entre 56.000 y 57.000 km^2, que corresponden a un 90-98% de la población. El estudio complementario realizado para la ampliación (que consiste en activar las medidas de O_3 en el resto de estaciones) no supone una ganancia significativa en estos términos. Tampoco se ha detectado una redundancia significativa para las estaciones actuales que miden O_3, tanto solo un determinado número de estaciones urbanas/suburbanas de tráfico y fondo correspondientes a la ZAQ1.

El estudio de representatividad de la XVPCA para NO_2 ha indicado que las existen 65 estaciones distribuidas en Cataluña que representa un 73% de la población en términos anuales, y se reduce de forma significativa para los promedios diarios y Max 1h a un 13-19% de población cubierta. En cuanto a redundancia, no existen estaciones que sea redundantes en las tres bases temporales (anual, diaria y Max 1h). Sin embargo se ha detectado redundancia en 10 estaciones en el promedio anual de NO_2 correspondientes a la ZQA1 (6 estaciones urbanas, 5 de tráfico y 1 de fondo) y a la ZQA4 (4 estaciones, 3 suburbanas industriales, 1 urbana de fondo).

En el caso del SO_2, como para el NO_2, la cobertura de la XVPCA es satisfactoria para el promedio anual, correspondiente a un 10.342 km^2 y un 68% de población. Sin embargo destaca la baja cobertura en términos diarios y Max 1h, de la solo un 13% de población cubierta. No se ha detectado una redundancia de estaciones significativa. Un aumento del número de estaciones de 44 a 129 aumentaría a un 33% la población cubierta.

Para PM10 la cobertura de la XVPCA es satisfactoria, con 99 la red cubre casi 22.000 km2 y el 88% de la población. Aunque para promedio diario y Max 1h, la cobertura de la red disminuye, se mantiene en niveles relativamente altos con un 50% de población cubierta. Destaca la redundancia de estaciones en las tres bases temporales (anual, diario y Max 1h) para las estaciones urbanas de trafico de Barcelona Pl. Universidad y Eixample y las dos estaciones suburbanas industriales de Sant Vicent del Horts y la dos estaciones de Montcada i Reixac (Pl Lluis Companys y Ayuntamiento) todas ellas localizadas en la ZQA1 y ZQA2. En menor grado se observa reduncia en el promedio anual y diario para 6 estaciones urbanas/suburbanas de la ZQA5.

Para el PM2.5 la cobertura espacial de la XVPCA es ligeramente inferior a la del PM10 precisamente por el menor número de estaciones disponibles (39), aun así cubre un 77% de la población, aunque del mismo modo que para el PM10 la cobertura espacial disminuye para el promedio diario hasta un 23% de población cubierta. Se ha observado una redundancia en el promedio anual y diario para las estaciones de Barcelona Pl. Universitat y Eixample localizadas en la ZQA1.

La metodología utilizada en este trabajo está basada en los datos de un modelo mesoescalar con una resolución espacial de 1 km x 1 km. Esta resolución no es suficiente para describir con precisión la dinámica de la contaminación en estaciones de tráfico en alta aglomeraciones urbanas como son la ZQA1 y ZQA2. Nuevas metodologías de cálculo que describan los fenómenos mesoescalares a resolución de 1-100 m se precisaran en el futuro para poder calcular la representatividad espacial de dichas estaciones. Por tanto los

datos obtenidos sobre la redundancia de las estaciones urbanas/suburbanas en la ZAQ1 y ZQA2 no pueden ser tomados como concluyentes, debido a una limitación metodológica.

Bibliografía

Nappo C. J., Caneill J. Y., Furman R. W., Gifford F. A., Kaimal J. C., Kramer M. L., Lockhart T. J., Pendergast M. M., Pielke R. A., Randerson D. , Shreffl er J. H., Wyngaard J. C., 1982. The Workshop on the Representativeness of Meteorological-Observations, June 1981, Boulder, Colorado. Bullettin of the American Meteorological Society, 63, 761–764.

Gencat, 2015. Red de vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica (XVPA). Disponible en: http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/avaluacio/xarxa_de_vigilancia_i_previsio_de_la_contaminacio_atmosferica_xvpca/conceptes_clau/, acesso el 27 octubre 2015.

IPR, 2013. Guidance on the Commission Implementing Decision laying down rules for Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council as regards the reciprocal exchange of information and reporting on ambient air (Decision 2011/850/EU). DG ENV, July 15 2013. Disponible: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/IPR_guidance1.pdf, aceso 27 de octubre 2015.

Martín, F., Fileni, L., Palominio, I., Vivanco, M., Garrido, J., 2014a. Analysis of the spatial representativeness of rural background monitoring stations in Spain. Atmospheric Pollution Research, 5, 779-788.

Martin, F., Santiago, J.L., García, L., Kracht, Ol, Gerboles, M., 2015. FAIRMODE Spatial representativeness feasibility study: Feasibility Analysis and proposal for the intercomparison exercise. FAIRMODE Technical Meeting, Aveiro, Portual, 24-25 Junio 2015. Disponible: http://fairmode.jrc.ec.europa.eu/document/fairmode/event/presentation/20150624-Aveiro/WG1/WG1-S5.3%20-%20FAIRMODE%20Meeting%20Aveiro%202015%20Spatial%20Representativeness%20Intercomparison%20Exercise_22-06-2015-feasibility%20&%20proposal.pdf, acceso 27 octubre, 2015.

Spangl, W., Schneider, J., Moosmann, L., Nagl, C., 2007. Representativeness and classification of air quality monitoring stations. Draft final report. Available at: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/legislation/pdf/report_uba.pdf, October 2015.

TeleAtlasMultinet, 2011. European and Spanish digital cartography. http://www.tomtom.com/en_gb/licensing/products/maps/multinet/. March 2012

Vitali L., Ciancarella L., Cionni I., Cremona G., Piersanti A., Righini G., 2013. Rappresentatività spaziale di misure di qualità dell'aria. Valutazione di un metodo di stima basato sull'analisi dei campi di concentrazione simulati dal modello nazionale MINNI. Technical Report ENEA, RT/2013/3/ENEA.