POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Development of a protocol for the effective creation of Low Emission Zones in Spain

Original
Development of a protocol for the effective creation of Low Emission Zones in Spain / Pastor Fernandez, A., Pastor Ferrando, J.P., De Marco, A., Ottaviani, F.M., Bastante Ceca, M.J.. - (2024), pp. 1878-1890. (28th International Congress on Project Management and Engineering, CIDIP 2024 Jaén (Spain) 2024).

Availability:
This version is available at: 11583/2996683 since: 2025-01-17T17:50:10Z

Publisher:
Asociacion Espanola de Direccion e Ingenieria de Proyectos (AEIPRO)

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

23 October 2026

(06-012) - Development of a protocol for the effective creation of Low Emission Zones in Spain.

Pastor Fernández, Andrés [1]; Pastor Ferrando , Juan Pascual [2]; De Marco, Alberto [3]; Maria Ottaviani, Filippo [3]; Bastante Ceca, María José [4]

[1] Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial.Universidad de Cádiz, [2] Centro de Investigación en Dirección de Proyectos, Innovación y Sostenibilidad (PRINS). Universitat Politècnica de València., [3] Department of Management and Production

One of the main legislative developments in Spain related to Sustainability, Climate Change and the 2030 Agenda is the transposition of European directives into Royal Decree 1052/2022, which regulates Low Emission Zones (LEZ), immediately applicable in towns with more than 50,000 inhabitants and island territories. In the field related to air quality (AC), this regulation establishes different restrictions that will be monitored to ensure that the limitations on access, circulation and parking of vehicles in the LEZs are really effective. There are many objective criteria that influence the air quality of towns and cities, including census, vehicles, etc. Since there are different morphologies for EPZs (nuclear, point, special, ...) it is relevant to incorporate other criteria that allow a correct selection of the type of zone. In this paper, using AHP methodology, a protocol will be developed to allow municipalities to select the most appropriate type based on the established criteria.

Keywords: Low Emission Zone (LEZ); Sustainability; AHP; Air Quality

Desarrollo de un protocolo para la creación efectiva de Zonas de Bajas Emisiones en España

Una de las principales novedades legislativas en España relacionadas con la Sostenibilidad, el Cambio Climático y la Agenda 2030, es la transposición de las directivas europeas al Real Decreto 1052/2022 por el que se regulan las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE), de aplicación inmediata en poblaciones de más de 50.000 habitantes y territorios insulares. En el ámbito relacionado con la calidad del aire (CA), esta normativa establece diferentes restricciones que serán objeto de seguimiento para que las limitaciones al acceso, circulación y estacionamiento de vehículos en las ZBE sean realmente efectivas. Existen numerosos criterios objetivos que influyen en la calidad del aire de las poblaciones, entre ellos el censo, los vehículos, etc. Ya que existen diferentes morfologías para las ZBE (nucleares, puntuales, especiales, ...) es pertinente incorporar otros criterios que permitan una correcta selección del tipo de zona. En el presente trabajo, mediante la metodología AHP, se desarrollará un protocolo que permita a los municipios seleccionar el tipo más adecuado con base en los criterios establecidos.

Palabras clave: Zona de Baja Emisión; Sostenibilidad; AHP; Calidad del Aire

Correspondencia: andres.pastor@uca.es

Agradecimientos: A la Universidad de Cádiz por su apoyo mediante el Plan propio de estímulo y apoyo a la Investigación y Transferencia y al Grupo PAIDI TEP 955 Ingeniería y Tecnología para la Prevención de Riesgos Laborales y al Centro de Investigación en Dirección de Proyectos, Innovación y Sostenibilidad PRINS de la Universitat Politècnica de València

©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. Introducción

El desafío global representado por la elevada contaminación planetaria, junto con la significativa incidencia de patologías asociadas a factores ambientales, constituye una preocupación de primer orden (Prüss-Ustün et al., 2017), manifestando que " la carga de morbilidad pone de relieve la importancia de la protección del medio ambiente para la salud de las personas". Según la OMS se estima que, en 2019, la contaminación del aire ambiente (exterior) en las ciudades y zonas rurales de todo el mundo provocó 4,2 millones de muertes prematuras anuales; esta mortalidad se debe a la exposición a materia particulada fina, que causa enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cánceres (OMS, 2022). Esta problemática subraya la urgente necesidad de abordar la contaminación del aire como una cuestión de salud pública global, imperativa para la formulación de políticas y estrategias que mitiguen su impacto adverso sobre la salud humana.

La sostenibilidad ambiental y la lucha contra el cambio climático se han convertido en prioridades globales en las últimas décadas, impulsando a gobiernos, organizaciones y la sociedad civil a buscar soluciones innovadoras y efectivas. Dentro de este marco, la Unión Europea ha establecido directivas ambiciosas para promover la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire, enfocándose en la implementación de políticas y estrategias que alineen los esfuerzos locales con los objetivos de la Agenda 2030.

En España, la transposición de estas directivas europeas al marco legislativo nacional ha dado lugar a la implementación del Real Decreto 1052/2022, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones, que introduce las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) como un instrumento jurídico que ayude a combatir la contaminación en núcleos urbanos. Esta legislación obliga, de manera generalizada, a ciudades de más de 50.000 habitantes y a territorios insulares a adoptar medidas restrictivas en cuanto al acceso, circulación y estacionamiento de vehículos, con el objetivo de mejorar la calidad del aire y, consecuentemente, la salud pública y el bienestar de la población.

A pesar de la claridad en los objetivos de estas políticas, la implementación efectiva de las ZBE presenta desafíos significativos, especialmente en lo que respecta a la selección del tipo de zona más adecuado para cada municipio. Aunque el citado Real Decreto no entra en el diseño de las ZBE, diversos factores son determinantes a la hora de lograr la efectividad y repercusión de la ZBE en el municipio. Dentro de los mismos, el censo poblacional, el parque vehicular y las características específicas de cada área urbana, influyen directamente en la calidad del aire y, por tanto, en la eficacia de las medidas adoptadas por los municipios para una correcta determinación de la ZBE.

Ante esta problemática, esta investigación propone el desarrollo de un protocolo basado en la metodología Analytic Hierarchy Process (AHP) para facilitar a los municipios la selección del tipo de ZBE más apropiado, considerando unos criterios objetivos y específicos. El trabajo, no solo busca contribuir a la literatura existente sobre políticas de sostenibilidad urbana y gestión de la calidad del aire, sino aportar una herramienta práctica para los responsables a nivel local, en su esfuerzo por cumplir con las exigencias legislativas y los objetivos ambientales.

Tras la introducción desarrollada, el trabajo se estructura presentando los objetivos generales y específicos de la investigación, una revisión bibliográfica del estado del Arte en materia de las ZBEs, abarcando aspectos relacionados con la calidad del aire (CA) en las ciudades, tras lo cual, se realizará el desarrollo metodológico del protocolo para la correcta elección de la ZBE y se realizará una discusión sobre su uso y limitaciones. El trabajo se termina con la exposición de las conclusiones, así como las líneas futuras de investigación con las que continuar aspectos que complementarán el conocimiento en lo relativo a las ZBEs.

2. Objetivos

El presente trabajo pretende atender, como objetivo principal, el desarrollo de un protocolo de aplicación general para la elección de la ZBE más adecuada a un municipio en función de varios parámetros que son propios de cada municipio. De esta manera, el citado protocolo se diseña con una aplicación universal.

Como objetivos secundarios, en primer lugar, el trabajo va a realizar un estudio bibliográfico necesario para el correcto diseño del protocolo, analizando aspectos relativos a la calidad del aire en las ciudades y los principales contaminantes que afectan a la salud de las personas. Posteriormente, se analizarán los medios de control y seguimiento de la calidad del aire que son utilizados en España para vigilar las condiciones ambientales del aire.

3. Revisión Bibliográfica

Como objetivos secundarios, en primer lugar, el trabajo va a realizar un estudio bibliográfico necesario para el correcto diseño del protocolo, analizando aspectos relativos a la calidad del aire en las ciudades y los principales contaminantes que afectan a la salud de las personas. Posteriormente, se analizarán los medios de control y seguimiento de la calidad del aire que son utilizados en España para vigilar las condiciones ambientales del aire. Se finalizará la revisión del estado del arte con los aspectos principales del método AHP y su aplicación a estudios de similar índole.

3.1 Calidad del Aire en las Ciudades

Las ciudades son epicentros de actividad económica, social y cultural, pero también de significativos desafíos ambientales, entre los que destaca la contaminación del aire. La calidad del aire urbano se ve afectada por una combinación de factores, incluyendo emisiones industriales, tráfico vehicular, y actividades de construcción, entre otros. Estudios como los de (Karagulian et al., 2015) que analizan las fuentes de contaminantes atmosféricos en ciudades de todo el mundo, identifican que el transporte y la industria son las principales fuentes de contaminación en áreas urbanas. La urbanización acelerada y el incremento del parque vehicular sin un control efectivo de emisiones exacerban el problema, afectando la salud pública y la calidad de vida de los ciudadanos.

3.2 Principales contaminantes del aire en las Ciudades

Los principales contaminantes del aire incluyen partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2,5}$), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO). Las partículas finas, especialmente $PM_{2,5}$, son de especial preocupación debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio y afectar la salud cardiovascular y respiratoria. Estudios como los de (Pope III y Dockery, 2006) han demostrado una correlación significativa entre la exposición a $PM_{2,5}$ y el aumento en la tasa de morbilidad y mortalidad, aunque expresan que “existen varios factores que dificultan relativamente la evaluación de los efectos de la contaminación atmosférica en el cáncer de pulmón” como es el tabaquismo. Otro contaminante crítico, el NO_2, generado principalmente por el tráfico vehicular, ha sido vinculado con exacerbaciones de enfermedades respiratorias y reducción de la función pulmonar.

Los proyectos de ZBE establecen que es necesario monitorizar los contaminantes relacionados con el tráfico, como son las partículas en suspensión (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y Dióxido de nitrógeno (NO_2), así como otros relacionados con el cambio climático como es el Ozono troposférico (O_3) y el Dióxido de azufre (SO_2). En la siguiente Figura se muestra una clasificación del índice en función de las concentraciones máximas de los citados contaminantes.

Figura 1: Calidad del Aire (ICA)

CATEGORÍA DEL ÍNDICE	MENSAJES PARA LA SALUD	SO_2	PM2,5	PM10	O_3	NO_2
Buena	Calidad del aire satisfactoria	0-100	0-10	0-20	0-50	0-40
Razonablemente Buena	Calidad del aire aceptable, la contaminación no supone un riesgo para la salud	101-200	11-20	21-40	51-100	41-90
Regular	La calidad del aire probablemente no afecte a la población general pero puede presentar un riesgo moderado para los *grupos de riesgo*	201-350	21-25	41-50	101-130	91-120
Desfavorable	*Toda la población* puede experimentar efectos negativos sobre la salud y puede tener efectos mucho más serios en los *grupos de riesgo*	351-500	26-50	51-100	131-240	121-230
Muy Desfavorable	Condiciones de emergencia para la salud pública, la población entera puede verse seriamente afectada	501-750	51-75	101-150	241-380	231-340
Extremadamente Desfavorable	Condiciones de emergencia para la salud pública, la población entera puede verse gravemente afectada	751-1250	76-800	151-1200	381-800	341-1000

*Los valores de todos los contaminantes de la tabla están expresados en µg/m3

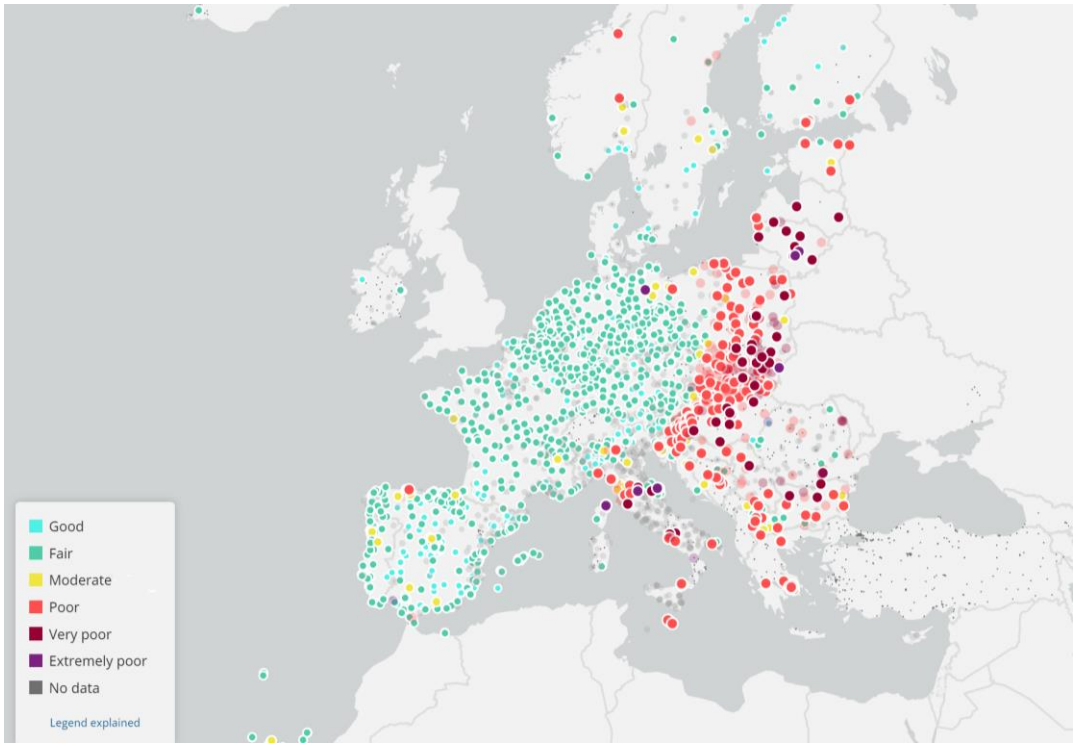
Fuente: Orden TEC/351/2019, de 18 de marzo, por la que se aprueba el Índice Nacional de Calidad del Aire, 2019.

3.3 Sistemas de control y seguimiento de la calidad del aire en las ciudades

El control y seguimiento de la calidad del aire son fundamentales para gestionar la contaminación urbana y proteger la salud pública. Los sistemas de monitoreo de calidad del aire incluyen estaciones de monitoreo fijas y móviles que miden concentraciones de contaminantes en tiempo real, proporcionando datos críticos para la toma de decisiones y la implementación de medidas correctivas. Las tecnologías de sensor remoto y los modelos de dispersión atmosférica juegan un papel crucial en la evaluación de la calidad del aire y la identificación de fuentes de emisión. Además, iniciativas como el Sistema de Información de la Calidad del Aire (AQI, por sus siglas en inglés) ofrecen una herramienta valiosa para informar al público sobre las condiciones del aire y riesgos para la salud.

En Europa existe una red de estaciones que monitorean la calidad del aire mediante el análisis continuo de los contaminantes existentes en el ambiente. Esta red se conforma a través de la integración de las redes nacionales. En la Figura 2, se observa la distribución de redes que permite la determinación del índice de calidad en Europa.

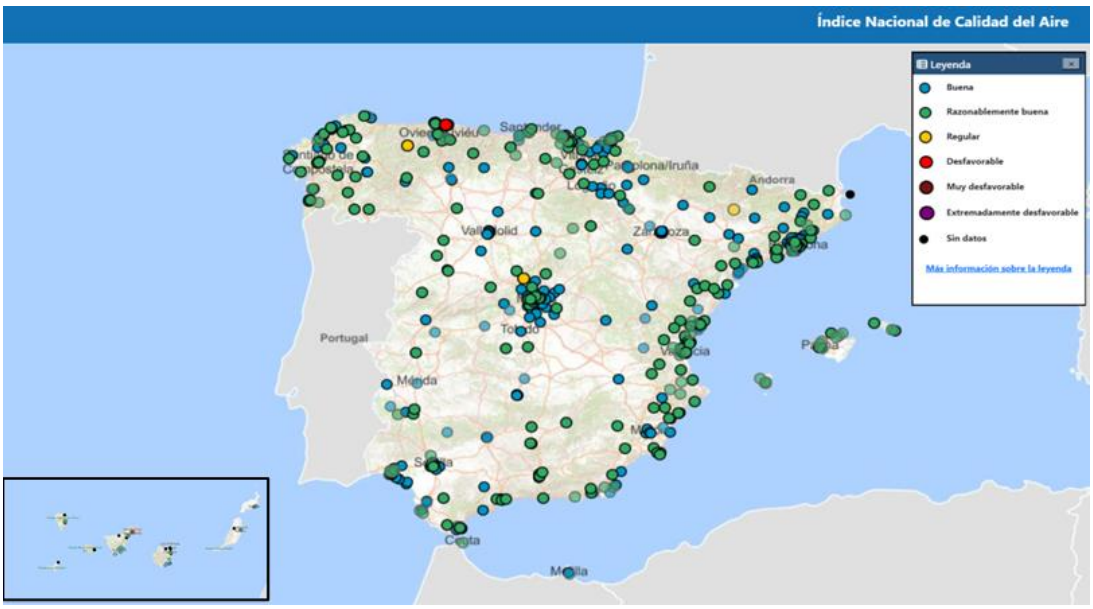
Figura 2: Red europea de observación de calidad del aire



Fuente https://airindex.eea.europa.eu/. Fecha de consulta 02-abril-2024

Los sistemas de monitoreo de la calidad del aire transmiten datos en tiempo real al Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Utilizando estas mediciones, se calcula el Índice de Calidad del Aire (ICA) basado en las concentraciones de contaminantes expresadas en microgramos por metro cúbico (µg/m3). En la Figura 3 se muestra la red de observación en la que se indica el ICA de cada estación.

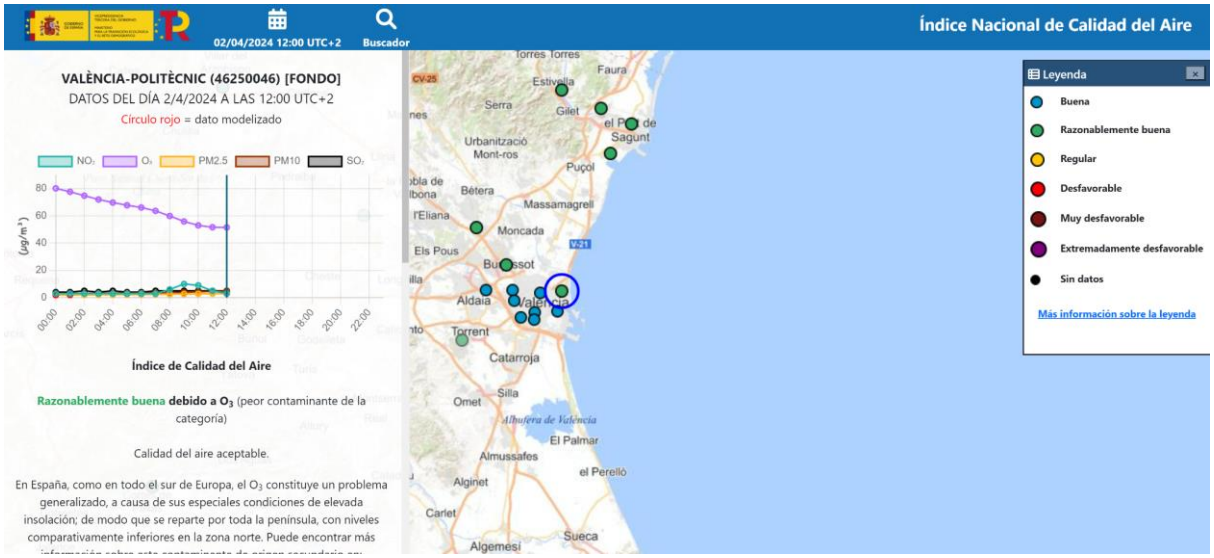
Figura 3: Red de observación de calidad del aire en España



Fuente https://ica.miteco.es/. Fecha de consulta 10-marzo-2024

En el presente recurso se pueden consultar los datos de cada una de las estaciones. A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestran los datos correspondientes a la estación ubicada en la Universitat Politècnica de València.

Figura 4: Datos estación Universitat Politècnica de València



Fuente https://ica.miteco.es/. Fecha de consulta 02-abril-2024

Todo ello permite tener un control eficaz de la presencia de los contaminantes en tiempo real y así poder monitorear si las concentraciones corresponden a los valores estimados para el cumplimiento normativo.

Estas estaciones forman parte de los equipos de control y verificación de las mejoras que una ZBE aplica sobre el municipio. Mediante metodologías “Diff in Diff” se pueden evaluar el impacto que tiene la incorporación de una ZBE en el municipio, usando como elementos de control las propias estaciones anteriormente citadas (Salas et al., 2021). En la Figura 5 se observa una estación de calidad del aire. Concretamente corresponde a una que el Ayuntamiento de Málaga ha implantado y monitoriza Óxidos de Nitrógeno (NO_X, NO_2, NO), Dióxido de Azufre (SO_2), Monóxido de Carbono (CO), Ozono (O_3) y partículas PM_{10} y $PM_{2,5}$, así como una estación meteorológica.

Figura 5: Estación de Calidad del Aire de Málaga Este

Fuente: https://medioambiente.malaga.eu/ambito-de-actuacion/control-de-la-contaminacion/contaminacion-atmosferica/

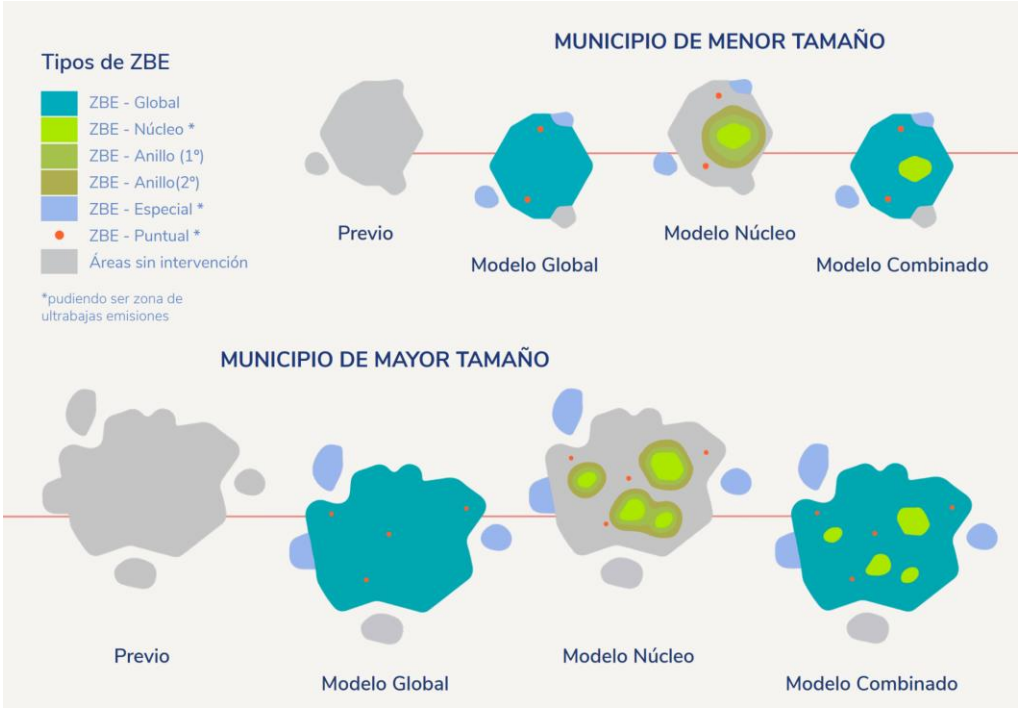
3.4 Clasificación de las ZBEs

Las Zonas de Bajas Emisiones (ZBE) se clasifican en diversas categorías en función de sus características y objetivos específicos:

- Núcleo: Se refiere a la demarcación de una o más áreas específicas dentro de un municipio.
- Especiales: Corresponden a áreas que, por sus particularidades, atraen un volumen significativo de desplazamientos en vehículos. Ejemplos de estas son los parques empresariales, polígonos industriales, campus universitarios, y zonas sanitarias o educativas.
- Anillo: Esta categoría incluye la creación de una o varias zonas de transición alrededor de las ZBE Núcleo o Especiales, donde se aplican medidas progresivas destinadas a prevenir efectos indeseados de segregación.
- Puntual: Diseñadas para proteger a grupos de población vulnerable.
- Zonas de Ultrabajas Emisiones: Establecen restricciones más estrictas que las aplicables en sus áreas circundantes.

La estructura definitiva de una ZBE puede integrar una combinación de estos diferentes tipos, tal como se ilustra en la Figura 6.

Figura 6: Tipos de ZBEs



Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), 2021)

3.5 Técnica de decisión multicriterio (AHP)

AHP (por sus siglas en inglés Analytic Hierarchy Process) es una técnica para la toma de decisiones, desarrollada por Thomas L. Saaty en la década de 1970 (Saaty, 1977, 1980; Saaty y Vargas, 1979). Se basa en la descomposición del objetivo del problema de decisión en una jerarquía de criterios, con las alternativas del problema en el nivel inferior. Seguidamente se deben priorizar los elementos del mismo nivel jerárquico mediante comparaciones por pares.

Estas comparaciones se obtienen de los juicios que emiten uno o más expertos. El método AHP aporta ventajas a la priorización de las ZBE, respecto a otros métodos de priorización, dado que resulta en un modelo fácil de comprender que:

- Permite utilizar criterios cualitativos, no únicamente cuantitativos.
- Se puede evaluar la coherencia de las respuestas.
- Pueden participar diferentes expertos, tanto a nivel individual o grupal, como para evaluar el modelo completo o una parte de la que sea especialista.
- Se pueden integrar los juicios y resultados de varios expertos, para obtener un resultado global.
- Permite el uso de escalas ("ratings" en inglés) para evaluar los criterios o las alternativas.
- Para combinar la importancia de los criterios y las valoraciones de las alternativas, utiliza el método suma ponderada.

Diversos autores han realizado investigaciones relativas a los aspectos medioambientales relacionadas con la calidad del aire usando el método AHP: (Shao et al., 2013) evalúan modelos basados en AHP para la evaluación de la calidad del aire en interiores; (Li et al., 2015) emplean AHP para analizar la calidad ambiental atmosférica; (Lv & Ji, 2019; Seibert et al., 2022) proponen indicadores basado en AHP para evaluar la calidad ambiental atmosférica; (S. Li et al., 2022) utilizan AHP para priorizar las vías de gobernanza en prevención de la contaminación; (Moradi et al., 2023) utilizan AHP para priorizar los criterios en un modelo de evaluación de la calidad del medio ambiente urbano.

4. Protocolo

Como ha quedado establecido en la sección 2, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar un protocolo de aplicación general para la elección de la tipología de ZBE más adecuada para cada municipio en función de las características propias del mismo, aplicando para ello el método AHP. El método AHP como se ha indicado en la sección 3,5 permite a un conjunto de decisores evaluar y priorizar una serie de alternativas frente a un conjunto de criterios. A continuación, se describe el desarrollo del protocolo usado en esta investigación.

En primer lugar, se utiliza la información oficial del Censo (INE, 2024), para poder determinar la obligatoriedad de implantar la ZBE, en función del tamaño de la población (superior a 50.000 habitantes de manera general, territorios insulares o excepcionalmente para municipios con más de 20.000 habitantes cuando se superen los valores límite de los contaminantes regulados en el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire). Según el INE, en el año 2023 hubo un total de 152 municipios con más de 50.001 habitantes, y 271 municipios con una población entre 20.001 y 50.000 habitantes (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución del número de municipios en España según tamaño del municipio, con una población superior a 20.000 habitantes, en 2023.

Tamaño del municipio	Número de municipios
De 20.001 a 50.000	271
De 50.001 a 100.000	87
De 100.001 a 500.000	59
Más de 500.000	6

A continuación, se han identificado las alternativas. Para ello se parte de los diferentes modelos de ZBE establecidas por la legislación, que incluyen diferentes tipologías de ZBE según se indica en el apartado 3.4. Los posibles modelos son:

- Modelo Global (incluyendo zonas globales, puntuales y especiales)
- Modelo Nuclear (incluyendo zonas puntuales, especiales o en anillo)
- Modelo Combinado (incluyendo zonas globales, puntuales, especiales y núcleos)

Combinando todas las posibilidades de los diferentes modelos, obtenemos en una primera iteración 13 alternativas de zonificación:

1. Zonificación global
2. Zonificación global + puntual
3. Zonificación global + especial
4. Zonificación global + puntual + especial
5. Zonificación nuclear
6. Zonificación nuclear + anillo
7. Zonificación nuclear + puntual
8. Zonificación nuclear + especial
9. Zonificación nuclear + especial + puntual
10. Zonificación nuclear + especial + anillo
11. Zonificación nuclear + puntual + anillo
12. Zonificación nuclear + especial + puntual + anillo
13. Zonificación combinada (global + puntual + especial + nuclear)

Tras analizar en detalle las alternativas, los autores decidimos descartar las alternativas 1 y 3 por considerarlas incluidas ya dentro de la alternativa 4, así como la alternativa 5 por estar incluida dentro de la alternativa 7. Finalmente, decidimos también, en este primer análisis, dejar fuera del alcance las alternativas con la distribución en anillo, lo que descarta las alternativas 6, 10, 11 y 12. Esto nos dejaría un conjunto de 6 alternativas, formado por las alternativas 2, 4, 7, 8, 9 y 13, que ahora pasan a denominarse alternativas A1 a A6, y que corresponden a las siguientes configuraciones:

A1: Zonificación global y puntual

A2: Zonificación global, puntual y especial

A3: Zonificación nuclear y puntual

A4: Zonificación nuclear y especial

A5: Zonificación nuclear, especial y puntual

A6: Zonificación combinada (global, puntual, especial y nuclear).

Una vez identificadas las alternativas, hay que definir los criterios. Para ello, se pretende incluir una serie de criterios adicionales a los ya establecidos en la legislación (que básicamente incluyen el tráfico y el tamaño de la población).

En una primera iteración, para determinar los criterios en base a los cuáles se va a tomar la decisión, los autores definimos un conjunto de 8 criterios listados a continuación:

C1. Nº de vehículos/vivienda

C2. Nº habitantes/vivienda

C3. Presencia de estaciones fijas de medición de contaminantes

C4. Ratio perímetro municipio/extensión

C5. Nº de centros educativos

C6. Nº de centros de salud

C7. Nº de establecimientos

C8. Consumo de energía eléctrica

Tras analizar los criterios en detalle, observamos que algunos necesitan redefinirse ya que abarcan un contenido muy extenso, o no están realmente relacionados con lo que se pretende decidir, o no se dispone de datos objetivos cuantificados. De esta forma, en un segundo análisis se han definido los siguientes grupos y criterios que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de decisión

Nº	Grupo	Criterio
1	G1. POBLACIÓN	C 1.1. Población total 2022
2		C 1.2. Población/Vivienda
3		C 1.3. Densidad de población
4	G2. TURISMO	C 2.1. Zona turística
5		C 2.2. Eventos puntuales
6	G3. VEHÍCULOS	C 3.1. Nº vehículos
7		C 3.2. Nº vehículos/vivienda
8	G4. ESTABLECIMIENTOS	C 4.1. Nº vehículos (turismos)
9		C 4.2. Nº vehículos/Vivienda
10	G5. CONSUMO ENERGÍA	C 5.1. Consumo energía residencial
11		C 5.2. Consumo energía No residencial
12	G6. INDUSTRIA	C 6.1. Zonas industriales monitorizadas
13		C 6.2. Zona portuaria
14	G7. OTROS	C 7.1. Zonas fronterizas

Así pues, finalmente obtenemos un conjunto formado por 6 alternativas (A1 a A6) y 14 criterios agrupados en 7 grupos.

5. Discusión

Aunque en los últimos tiempos la calidad del aire en Europa ha mejorado (las muertes prematuras por exposición a $PM_{2,5}$ disminuyó un 45% en la UE entre 2005 y 2020), la contaminación atmosférica sigue suponiendo un riesgo significativo para la salud (el 96% de la población urbana de la UE estuvo expuesta a concentraciones de $PM_{2,5}$ superiores al umbral seguro de 5 µg/m^3 establecido por la OMS (European Environmental Agency (EEA), 2022).

Es por esto que, una de las metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 (Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades), hace referencia a este aspecto, concretamente la Meta 3.9 “Para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo”.

La legislación europea, a través de la propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa actualmente en fase de enmiendas (Comisión Europea, 2022ª, 2022b), así como la legislación nacional (a través del Real Decreto 1052/2022, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones), están impulsando el desarrollo de proyectos cuyo objetivo es determinar la mejor configuración de dichas zonas en los diferentes municipios y territorios de aplicación.

Dado que hay 152 municipios con la población mínima para estar obligados a implantar ZBEs, y hasta otros 271 que pueden tener que implantarlas según la calidad del aire, el modelo propuesto debe ser adaptado a cada municipio, puesto que cada uno puede tener, y tendrá circunstancias específicas. Esto se traduce en criterios que deban descomponerse en otros subcriterios, o criterios que deban añadirse al modelo, y otros que deban eliminarse del modelo porque no sean relevantes en ese municipio concreto.

6. Conclusiones

Aunque la legislación española marca como obligatoria la zonificación en municipios únicamente con población superior a 50.000 habitantes, territorios insulares, o municipios con población superior a 20.000 habitantes cuando superen ciertos umbrales de contaminación, no deja claro qué tipología de ZBE elegir en cada zona. La configuración de las distintas ZBE a partir de las tipologías establecidas en el RD 1052/2022 depende de una serie de parámetros más allá del tamaño de población.

A la hora de determinar qué tipología es más adecuada para cada municipio, en función de sus características, un método de ayuda a la decisión como el AHP, puede resultar útil.

En este trabajo se ha revisado la necesidad de aplicación de ZBEs en los municipios españoles, se han revisado trabajos dónde se aplica la metodología AHP en modelos multicriterio de calidad del aire. También se ha revisado el sistema de vigilancia del índice de calidad del aire en España. Posteriormente se ha planteado un modelo AHP de ayuda a la decisión multicriterio para priorizar las tipologías de ZBE en municipios.

El modelo propuesto está formado por un conjunto de 6 alternativas y 14 criterios agrupados en 7 grupos.

Europa y España cuentan con sistemas de control y monitorización de la calidad del aire que sirven para obtener los datos de los principales contaminantes (PM_{10}, $PM_{2,5}$, NO_X, O_3, SO_2,…), lo cual puede ser de utilidad para determinar la bondad del modelo propuesto.

Queda pendiente la aplicación a un territorio para determinar su validez.

7. Referencias

Comisión Europea. (2022a). *ANEXOS de la Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa* (COM(2022) 542 final/2). [consultado 20 febrero 2024]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2ae4a0cc-55f8-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_2&format=PDF

Comisión Europea. (2022b). *Propuesta de DIRECTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa* (COM(2022) 542 final/2). [consultado 24 febrero 2024]. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2ae4a0cc-55f8-11ed-92ed-01aa75ed71a1.0006.02/DOC_3&format=PDF

European Environmental Agency (EEA). (2022). *Air quality in Europe 2022. Report no. 05/2022*. https://doi.org/10.2800/488115

INE. (2024). *Censos de Población y Viviendas*. Censos de Población y Viviendas. [consultado 16 febrero 2024]. Disponible en:: https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176992&menu=ultiDatos&idp=1254735572981

Karagulian, F., Belis, C. A., Dora, C. F. C., Prüss-Ustün, A. M., Bonjour, S., Adair-Rohani, H., & Amann, M. (2015). Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment*, *120*, 475-483. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087

Li, S., Zhou, E., Zhang, P., & Xia, Y. (2022). A Pollution Prevention Pathway Evaluation Methodology Based on Systematic Collaborative Control. *Sustainability*, *14*(14), 8747. https://doi.org/10.3390/su14148747

Li, Y., Wang, R.-H., & Ji, S. (2015). Application of Analytic Hierarchy Process to Evaluation on Quality of Atmospheric Environment in Nanjing City. *2015 First International Conference on Computational Intelligence Theory, Systems and Applications (CCITSA)*, 213-216. https://doi.org/10.1109/CCITSA.2015.49

Lv, W., & Ji, S. (2019). Atmospheric environmental quality assessment method based on analytic hierarchy process. *Discrete & Continuous Dynamical Systems - S*, *12*(4-5), 941-955. https://doi.org/10.3934/dcdss.2019063

Moradi, B., Akbari, R., Taghavi, S. R., Fardad, F., Esmailzadeh, A., Ahmadi, M. Z., Attarroshan, S., Nickravesh, F., Jokar Arsanjani, J., Amirkhani, M., & Martek, I. (2023). A Scenario-Based Spatial Multi-Criteria Decision-Making System for Urban Environment Quality Assessment: Case Study of Tehran. *Land*, *12*(9), 1659. https://doi.org/10.3390/land12091659

OMS. (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [consultado 2 maro 2024]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Orden TEC/351/2019, de 18 de marzo, por la que se aprueba el Índice Nacional de Calidad del Aire (2019). [consultado 25 febrero 2024]. Disponible en: https://www.boe.es/eli/es/o/2019/03/18/tec351/con

Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *56*(6), 709-742. https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485

Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Neville, T., Bos, R., & Neira, M. (2017). Diseases due to unhealthy environments: an updated estimate of the global burden of disease attributable to environmental determinants of health. *Journal of Public Health*, *39*(3), 464-475. https://doi.org/10.1093/pubmed/fdw085

Real Decreto 1052/2022, por el que se regulan las zonas de bajas emisiones, BOE N. 311, de 28 de diciembre de 2022 185962 (2022). [consultado 18 marzo 2024]. Disponible en: https://www.boe.es/eli/es/rd/2022/12/27/1052

Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, *15*(3), 234-281. https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. London . McGraw Hill.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1979). Estimating technological coefficients by the analytic hierarchy process. *Socio-Economic Planning Sciences*, *13*(6), 333-336. https://doi.org/10.1016/0038-0121(79)90015-6

Salas, R., Perez-Villadoniga, M. J., Prieto-Rodriguez, J., & Russo, A. (2021). Were traffic restrictions in Madrid effective at reducing NO2 levels? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *91*. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102689

Seibert, O. G., Pinto, W. de P., & Monte, E. Z. (2022). Índice de poluição atmosférica: uma proposta baseada em dados secundários para avaliação da qualidade do ar. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *27*(6), 1209-1219. https://doi.org/10.1590/s1413-415220210321

Shao, H., Yang, L., & Han, Y. (2013). Evaluation Model Based on Analytic Hierarchy Process and Applications in Indoor Air Quality Monitoring System. *2013 6th International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 9-12. https://doi.org/10.1109/ICINIS.2013.9

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible