

05-030

EVALUATION OF LIGHT POLLUTION IN SPAIN USING MULTI-CRITERIA DECISION MAKING METHODOLOGIES

Sánchez Lozano, Juan Miguel (1); Dobarganes Nodar, Alberto (2); Sánchez de Miguel, Alejandro (3)

(1) Centro Universitario de la Defensa de San Javier, (2) Sección de Técnicas de Apoyo a la Decisión, (SETAD-GIMOE), (3) Instituto de Física de Partículas y del Cosmos (IPARCOS), Universidad Complutense de Madrid

Light pollution is one of the causes of generating negative impacts not only on the environment but also on the health of citizens. Given that Spain is one of the European Union countries with the highest spending on public lighting, analyzing in detail what level of pollution Spanish municipalities have, from this perspective, is of great interest. When evaluating light pollution, various criteria influence such as the installed power, the number of light points, the power emitted per area or the power emitted per inhabitant, just to quote some of them. That is why approaching this analysis by applying multi-criteria decision-making (MCDM) methodologies can be useful and recommendable. For all these reasons, this study will be based on a decision matrix of alternatives and criteria whose data have been obtained by the Suomi-NPP satellite and, through the combination of two robust and widely contrasted MCDM methodologies (AHP-TOPSIS), 2216 Spanish municipalities will be evaluated from the perspective of light pollution. Through the strict application of such MCDM methodologies and supported by the opinion of a group of experts, it is intended to allow the mathematical sciences to shed some "new light" on the matter.

Keywords: Street lighting; Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS); Analytic Hierarchy Process (AHP); municipalities; criteria; experts

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ESPAÑA MEDIANTE METODOLOGÍAS DE TOMA DE DECISIONES MULTI-CRITERIO

La contaminación lumínica es una de las causantes de generar impactos negativos no sólo sobre el medio ambiente sino también sobre la salud de la ciudadanía. Dado que España es uno de los países de la Unión Europea con mayor gasto destinado a alumbrado público, analizar en detalle qué nivel de contaminación tienen los municipios españoles bajo esa perspectiva es de gran interés. A la hora de evaluar la contaminación lumínica influyen diversos criterios tales como la potencia instalada, el número de puntos de luz, la potencia emitida por área o la potencia emitida por habitante, por citar algunos de los parámetros relacionados. Es por ello que abordar este análisis aplicando metodologías de toma de decisiones multi-criterio (MCDM) es recomendable. Por todo ello, en este estudio se partirá de una matriz de decisión de alternativas y criterios cuyos datos han sido obtenidos por el satélite Suomi-NPP y, mediante la combinación de dos metodologías MCDM ampliamente contrastadas (AHP-TOPSIS), se evaluarán 2216 municipios españoles bajo la perspectiva de la contaminación lumínica. De la aplicación rigurosa de dichas metodologías, y amparado en la opinión de un grupo de expertos, se pretende permitir a las ciencias matemáticas arrojar "nueva luz" en la materia.

Palabras clave: Alumbrado público; Técnica de Ordenación de Preferencias por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS); Proceso Analítico Jerárquico (AHP); municipios; criterios; expertos

Correspondencia: Juan Miguel Sánchez Lozano. Correo: juanmi.sanchez@tud.upct.es

Agradecimientos: Este trabajo está financiado por el proyecto de investigación PID2020-112754GB-I00 del Ministerio de Ciencia e Innovación (España).



©2022 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

La alteración de la oscuridad natural de la noche, como consecuencia del desaprovechamiento de la luz artificial nocturna en las instalaciones de alumbrado exterior, define un término tristemente extendido hoy en día en nuestro planeta: la contaminación lumínica. El uso a escala global de este tipo de iluminación artificial ha ido creciendo de forma exponencial desde el siglo XIX y, en la actualidad, continúa incrementándose anualmente en el rango 0-20%, dependiendo de la región geográfica (Hölker et al., 2010). El constante aumento de las áreas urbanizadas y de las infraestructuras de transporte ha generado una gran perturbación en los regímenes de luz natural y, en consecuencia, una presión ambiental capaz de interrumpir los ciclos naturales de luz y oscuridad (Fachi et al., 2016).

Tales interrupciones han puesto en peligro la biodiversidad a escala global (Gaston et al., 2013), afectando incluso al comportamiento de las especies al alterar sus ritmos circadianos (Touzot et al., 2022) e inhibir la secreción de melatonina (hormona asociada al sueño), provocando lo que se conoce como interrupción circadiana o cronodisrupción (Erren & Reiter, 2009a). Efectos que pueden estar vinculados con numerosas enfermedades tales como el cáncer, el Alzheimer y las enfermedades cardiovasculares (Erren & Reiter, 2009b).

De igual modo, la influencia de la luz artificial nocturna afecta a los flujos migratorios de las aves como por ejemplo las aves migratorias nocturnas, las cuales son atraídas a las áreas urbanas durante sus vuelos migratorios y se exponen a elevadas concentraciones de PM_{2.5}, un tipo de contaminación del aire compuesto por partículas de diámetro aerodinámico $\leq 2,5 \mu\text{m}$ que presentan un gran riesgo para la salud. Las aves en sus vuelos migratorios requieren un aumento de la frecuencia respiratoria, ocasionando que dichas partículas puedan entrar en su sistema respiratorio y cardiovascular deteriorando la función pulmonar (La Sorte et al, 2022). De hecho, la contaminación del aire no sólo puede causar dificultades respiratorias y enfermedades, sino también alterar su comportamiento, elevar los niveles de estrés y reducir el éxito reproductivo (Sanderfoot & Holloway, 2017).

Con este breve repaso a la literatura científica se ha puesto de manifiesto la necesidad de analizar en profundidad las causas de estos efectos tan dañinos y perjudiciales para la salud y el medioambiente. La emisión de luz artificial nocturna y la contaminación lumínica que ésta puede ocasionar debido a un inadecuado uso o desaprovechamiento, pueden ser debidas a factores tan diversos como la ubicación geográfica, la climatología, el desarrollo económico y urbanístico, las densidades de población, hábitos y características sociodemográficas, etc.

Estudios recientes han demostrado la inexistencia de una relación directa entre el poder adquisitivo de una nación y su nivel de contaminación lumínica (Falchi et al., 2019). A modo de ejemplo mencionar el caso de Alemania, un país que aunque posee un elevado producto interior bruto, no presenta los altos índices de iluminación que poseen los países bañados por el Mar Mediterráneo como España, Italia o Grecia. La climatología y el marcado carácter turístico de estos últimos podrían ser las causas por las que estos países demandan un mayor uso de espacios públicos y por ende, una mayor actividad nocturna.

Centrando la atención en España, y aunque a simple vista podría parecer obvio que las grandes urbes son fuentes principales de contaminación, resulta necesario destacar la influencia del ser humano en el consumo de la energía que genera dicha contaminación. Bajo esta premisa podría darse la circunstancia de que la ciudad de Madrid no sea la ciudad más contaminante de España, pues son millones los ciudadanos de esta capital que hacen uso de la iluminación artificial nocturna, en contra de otros municipios mucho más pequeños, que puedan derrochar mucha más energía por habitante, al iluminar infraestructuras viarias con apenas uso.

Figura 1: Imagen de la Península Ibérica tomada el 4 de diciembre de 2011 desde la Estación Espacial Internacional (NASA Earth Observatory, 2011)



También es importante resaltar que el innegable ahorro de eficiencia energética que está suponiendo la implantación extensiva de tecnologías LED (Light-Emitting Diode) en instalaciones de alumbrado exterior de los municipios españoles, ha provocado que aumenten de forma exponencial los niveles de contaminación lumínica, consecuencia de la mayor emisión de luz en el espectro azul de este tipo de tecnología.

Por lo tanto, para llevar a cabo un análisis exhaustivo que permita considerar todos los factores que influyen en la contaminación lumínica, es imprescindible disponer de una herramienta capaz de medir el volumen total de esta contaminación, que pondere no solo el gasto energético bruto de las poblaciones, sino también que tenga en consideración parámetros tales como el consumo por área o por habitante, ya que existen gran cantidad de municipios más y menos contaminantes que éstas últimas, pero que simplemente por el hecho de ser más pequeños, no parecen ofrecer datos tan impactantes.

Con el objetivo de abordar dicho análisis, se ha partido en este estudio del trabajo desarrollado por los investigadores Sánchez de Miguel y Benayas (2015) en el que, mediante datos oficiales españoles (Instituto Nacional de Estadística, etc.) y datos procedentes del satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi-NPP) analizaron la contaminación lumínica de los municipios españoles proporcionando un ranking. A la hora de evaluar la contaminación lumínica influyen diversos criterios tales como la potencia instalada, el número de puntos de luz, la potencia emitida por área o la potencia emitida por habitante, por citar algunos de los parámetros relacionados. Es por ello que abordar este tipo de análisis aplicando metodologías de toma de decisiones multi-criterio (MCDM) es recomendable. Por todo ello, en este estudio se partirá de una matriz de decisión de alternativas y criterios cuyos datos han sido obtenidos por las fuentes anteriormente mencionadas y, mediante la combinación de dos metodologías MCDM ampliamente contrastadas: El proceso AHP (Analytic Hierarchy Process) diseñado por (Saaty, 1980) y el método TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) desarrollado por (Hwang & Yoon, 1981), se evaluarán 2216 municipios españoles bajo la perspectiva de la contaminación lumínica.

Dado que la aplicación de la metodología AHP para este caso de estudio específico fue descrita en un primer trabajo desarrollado por (Sánchez-Lozano et al, 2021) mediante el cual se determinaron los pesos o coeficientes e importancia de los criterios; en el presente estudio se describirá y aplicará la metodología TOPSIS, partiendo de los pesos de los

criterios ya determinados, con vistas a evaluar los municipios españoles y obtener un ranking basado en la contaminación lumínica.

En la sección 2 se describirá en detalle la metodología TOPSIS con el objetivo de resolver el caso de estudio planteado (sección 3). Finalmente, se mostrarán las conclusiones alcanzadas en este estudio en la sección 4.

2. El método TOPSIS

El método TOPSIS desarrollado por Hwang y Yoon en 1981, nos introduce en el concepto de “alternativa ideal”, definida como aquella solución que presenta, por un lado, la distancia más próxima a la solución ideal positiva (PIS – Positive Ideal Solution), y por otro, la distancia más lejana a la solución ideal negativa (NIS).

En este sentido, asumimos que la técnica TOPSIS encara el dilema de trabajar a la par, con una combinación de soluciones ideal y anti-ideal para cada uno de los criterios seleccionados, sobre las cuales el resto de las alternativas se comparan.

A diferencia del procedimiento AHP, el método TOPSIS, muestra su mayor potencial en aquellos casos donde existen multitud de alternativas sometidas a evaluación por criterios de diferente entidad y magnitud. En este sentido, la metodología integra una lógica sólida, que representa el propio razonamiento del ser humano ante la visualización única de las alternativas en un poliedro, e integrado bajo un valor escalar que representa lo mejor y lo peor de dichas alternativas de forma simultánea. Para la resolución del problema, el método TOPSIS se compone de las siguientes etapas:

Etapla 1: Construcción de la matriz de decisión, que sirve de soporte para los cálculos posteriores. La tabla enfrentará por filas a las m alternativas A_i , $i=1,\dots,m$ que serán evaluadas frente a j criterios C_j , $j=1,\dots,n$ de evaluación por columnas. Como resultado de ella, se obtendrán los correspondientes valores x_{ij} de resultados relativos de cada una de ellas. Por otro lado, junto a cada criterio aparecen los valores $W=(w_1, w_2,\dots,w_n)$ representativos de los pesos finales asociados a cada criterio. Tal y como se ha comentado con anterioridad, los pesos de los criterios del caso de estudio que se pretende abordar fueron obtenidos en un estudio previo (Sánchez-Lozano et al, 2021).

Tabla 1. Matriz de decisión

	W_1	W_2	...	W_j	...	W_n
	C_1	C_2	...	C_j	...	C_n
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1j}	...	x_{1n}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2j}	...	x_{2n}
A_3	x_{31}	x_{32}	...	x_{3j}	...	x_{3n}
...
A_m	x_{m1}	x_{m2}	...	x_{mj}	...	x_{mn}

Etapla 2: Normalización de la matriz de decisión. En dicha el valor de cada criterio queda dividido por su norma. De esta forma las escalas quedan normalizadas usando la siguiente expresión:

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}} \quad (1)$$

Etapla 3: Ponderación de la matriz normalizada. Una vez conocidos los pesos asociados a cada criterio en base a metodología AHP, se procede a multiplicar cada valor de la matriz de decisión normalizada para cada alternativa por su peso correspondiente mediante la siguiente expresión:

$$v_{ij} = w_{ij} \otimes n_{ij} \quad (j = 1, \dots, n \quad i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

Etapla 4: Determinar las soluciones ideales positiva (PIS) y negativa (NIS). Sus valores corresponden con la mejor y peor alternativa para cada uno de los criterios de evaluación, en función de su razón lógica de maximización o de minimización. Para este cálculo se utilizan las siguientes expresiones, donde $\{J\}$ se asocia a criterios en razón de beneficio mientras que $\{J'\}$ se asocia a criterios en razón de coste o pérdidas:

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} = \begin{cases} \max_i \{v_{ij}, j \in J\}, i = 1, 2, \dots, m & \text{si el criterio es a maximizar} \\ \min_i \{v_{ij}, j \in J'\}, i = 1, 2, \dots, m & \text{si el criterio es a minimizar} \end{cases} \quad (3)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} = \begin{cases} \min_i \{v_{ij}, j \in J\}, i = 1, 2, \dots, m & \text{si el criterio es a maximizar} \\ \max_i \{v_{ij}, j \in J'\}, i = 1, 2, \dots, m & \text{si el criterio es a minimizar} \end{cases} \quad (4)$$

Etapla 5: Cálculo de las distancias de las alternativas a la solución ideal positiva (d_i^+) y negativa (d_i^-), que sirven de soporte para el algoritmo TOPSIS. La mejor alternativa debe presentar una relación de mínima distancia a la solución ideal positiva (PIS) y máxima distancia a la solución ideal negativa (NIS). Se recurre para ello a la distancia euclídea multidimensional, que viene dada por las siguientes expresiones:

$$d_i^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$d_i^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Etapla 6: Cálculo de la proximidad relativa de cada alternativa a la solución ideal (R_i), que representa la propia valoración de la alternativa sometida a estudio. Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

El valor de dicho coeficiente (R_i) estará situado en el intervalo (0,1) de forma que, cuanto más se aproxime a la unidad, mayor prioridad tendrá la alternativa sometida a evaluación

Etapla 7: Obtención del ranking de evaluación en orden decreciente: En el caso de estudio el cual será detallado en la sección posterior, las alternativas cuyos valores sean próximos a la unidad corresponderán con los municipios más contaminantes bajo la perspectiva de la contaminación lumínica.

De la correcta ejecución de dichas etapas, se conseguirá descomponer un problema de decisión complejo en varios procesos de análisis asequibles, estructurados y flexibles, permitiendo el procesado de las alternativas de forma secuencial y en base a distintos criterios de evaluación ponderados por personal experto en la materia.

3. Caso de estudio

3.1 Descripción del problema de decisión y obtención del peso de los criterios

A la hora de realizar un estudio de contaminación lumínica de los diferentes municipios españoles, es preciso evaluar numerosas variables. En concreto, en el presente trabajo se someten a estudio 2116 municipios de España cuya superficie artificial supera 1 km². Dichos municipios representan las alternativas del presente proceso, las cuales quedarán clasificadas en virtud de la aplicación de metodologías de toma de decisiones multi-criterio.

Una vez identificadas las alternativas a evaluar (municipios españoles con superficie artificial superior a 1 km²), es necesario definir los criterios que influyen en la evaluación de dichas alternativas. Para ello, se tomó como referencia el estudio de dos investigadores españoles (Sánchez de Miguel y Benayas, 2015) en el que, a través de imágenes nocturnas procedentes del satélite Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi-NPP), la encuesta de infraestructura y equipamientos locales del Ministerio de Política Territorial y Función Pública, datos geográficos de Copernicus Land Monitoring Service y datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadística (INE), evaluaron los municipios mencionados en función de los siguientes criterios:

- **C₁– Flujo natural (nW / sr):** Flujo recibido por el satélite tras la eliminación del suelo, ruido, etc.
- **C₂ – Potencia emitida por superficie artificial (W / km²):** Potencia instalada respecto a la superficie artificial o aquella que es necesario iluminar.
- **C₃ – Potencia emitida por habitante (W / habitante)** Potencia instalada respecto al número de habitantes de dicha población.
- **C₄ – Puntos de luz por superficie artificial (número / km²):** Número total de puntos de luz que contiene la superficie artificial o aquella que es necesario iluminar.
- **C₅ – Puntos de luz por habitante (número / habitante)** Número total de puntos de luz respecto al número de habitantes de dicha población
- **C₆ –Puntos de luz por municipio (número / municipio)** Suma total de puntos de luz que pertenecen al municipio.

Con la finalidad de conocer el peso o coeficiente de importancia de los criterios mencionados, y poder tener en consideración dichos coeficientes en la fase TOPSIS de evaluación de alternativas, se llevó a cabo el estudio desarrollado por (Sánchez-Lozano et al., 2021). A través de un grupo de asesoramiento compuesto por 8 expertos en el ámbito de la contaminación lumínica, y tras aplicar la metodología AHP, fue posible obtener los pesos de los criterios los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2. Coeficientes de importancia de los criterios

Criterios	Pesos (%)
C1.- Flujo natural	26,25
C2.- Potencia emitida por superficie artificial	41,19
C3.- Potencia emitida por habitante	10,93
C4.- Puntos de luz por superficie artificial	9,36
C5.- Puntos de luz por habitante	6,59
C6.- Puntos de luz por municipio	5,68

3.2 Proceso TOPSIS de evaluación de alternativas

La primera etapa de la metodología TOPSIS consiste en la elaboración de la matriz de decisión, con los datos aportados por sus correspondientes fuentes. Para el caso particular del presente estudio, en filas se da entrada a los 2216 municipios que conforman las alternativas a evaluar del proceso y se insertan los valores adquiridos por dichos municipios en base a los criterios de evaluación anteriormente citados y representados en columnas (C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆). Con todo ello, la matriz de decisión representada de forma reducida se muestra a continuación:

Tabla 3. Matriz de decisión de alternativas y criterios

Alternativas	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
A ₁ Bilbao	13849,1	6934,5	0,39	1900,8	0,11	37325
A ₂ Hospitalet de Llobregat	7283,7	6271,0	0,30	1495,6	0,07	18251
A ₃ Barakaldo	6377,2	8103,2	0,61	1916,1	0,14	14436
A ₄ Valencia	45049,1	9167,0	0,62	1977,9	0,13	106974
A ₅ Cádiz	4586,9	7011,2	0,40	2235,3	0,13	15848
A ₆ Melilla	6911,5	8899,4	0,92	1469,0	0,15	12249
A ₇ San Fernando	5337,2	6132,4	0,59	1293,4	0,13	12100
A ₈ Puertollano	18365,6	6392,7	3,72	413,6	0,24	12500
A ₉ Badalona	7604,7	5684,0	0,35	2002,6	0,12	27438
A ₉ Parla	6282,5	6332,1	0,52	1006,5	0,08	10324
...
A ₂₂₁₆ Estrada (A)	1404,1	6419,6	0,65	5698,6	0,57	12440

Con dicha matriz de decisión y conocidos los pesos de los criterios mediante la aplicación de metodología AHP, resulta posible ejecutar cada una de las etapas del algoritmo TOPSIS y obtener un ranking de alternativas. Se muestra de forma esquemática en la Tabla 4 el ranking TOPSIS final y los rankings que ocuparían cada alternativa en función de la valoración de cada criterio de forma independiente, donde el puesto número 1 lo ocupa la

localidad que ofrece la menor contaminación lumínica, y el puesto 2216 la más contaminante.

Tabla 4. Tabla final de rankings independientes

Alternativas	Rankings individuales por criterio						Ranking Final
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	
A ₁ Bilbao	2186	2151	46	2150	56	2199	2181
A ₂ Hospitalet de Llobregat	2130	2120	17	2065	8	2151	2112
A ₃ Barakaldo	2112	2189	208	2151	182	2125	2162
A ₄ Valencia	2212	2205	225	2159	146	2214	2212
A ₅ Cádiz	2072	2155	54	2175	116	2140	2119
A ₆ Melilla	2124	2202	635	2053	215	2103	2175
A ₇ San Fernando	2098	2105	196	1978	105	2099	2072
A ₈ Puertollano	2199	2127	2084	602	797	2107	2195
A ₉ Badalona	2139	2048	27	2160	102	2186	2098
A ₉ Parla	2110	2122	135	1744	16	2077	2099
...
A ₂₂₁₆ Estrada (A)	1634	2128	250	2203	2047	2106	2120

En virtud de ello, en base a metodología científica TOPSIS del ámbito de la toma de decisiones multi-criterio, y amparada por el juicio de diversos expertos en la materia tratada, se constata que dicha ciudad ocupa la posición 2181 en dicho ranking

3.3 Resultados

Una vez obtenida la tabla de rankings final TOPSIS-AHP, resulta posible ordenar las alternativas en relación con la puntuación final obtenida y ofrecer interesantes comparativas. La siguiente tabla representa, en color verde, las diez poblaciones menos contaminantes del territorio español frente a las diez más contaminantes, en color rojo:

Tabla 5. Tabla de ranking Top 10 TOPSIS-AHP

Ranking Top10 menos contaminantes	Ranking Top10 más contaminantes
Alba de Yeltes	Madrid
Castilblanco	Zaragoza
Villa de Mazo	Barcelona
Paso (El)	Sevilla
Cala	Valencia
Cervatos de la Cueva	Murcia
Barruecopardo	Málaga
Manganeses de la Polvorosa	Cartagena
Macael	Laredo
Fabero	Palos de la Frontera

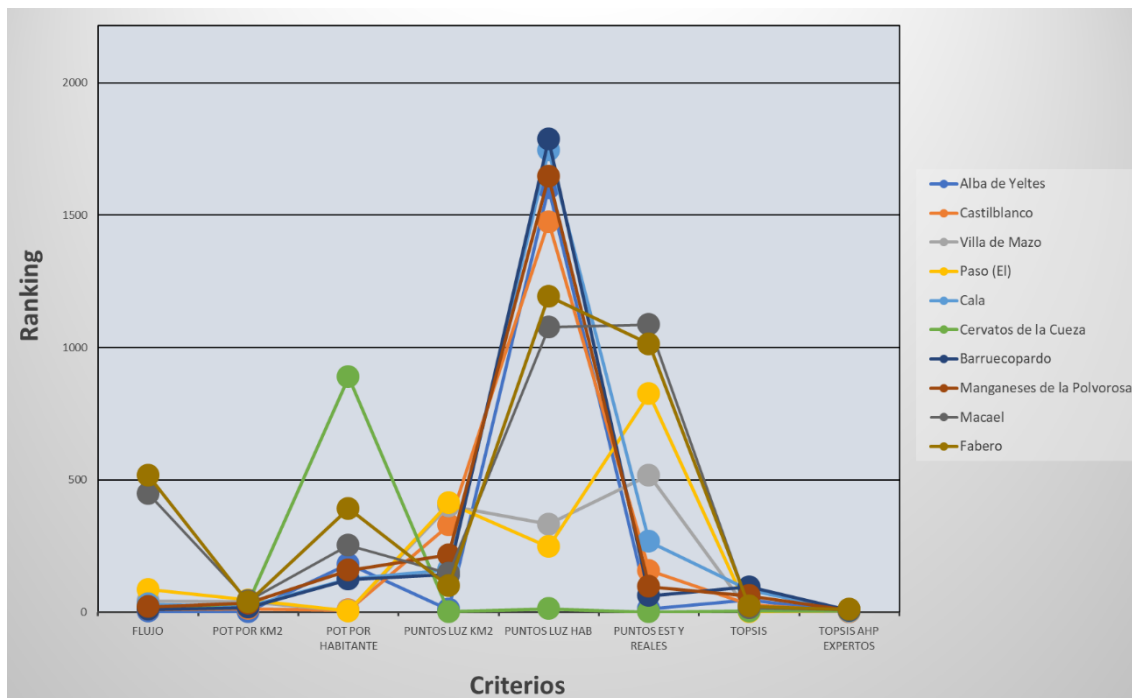
La tabla expresa algunos resultados previsible y otros no tanto. Las grandes ciudades son más penalizadas, desde el momento que los criterios flujo natural y potencia por superficie, adquieren mayor envergadura que aquellos que introducen mismos factores por habitante. Sin embargo, y en contraposición, la tabla también ofrece entre los primeros puestos poblaciones como Laredo o Palos de la Frontera, de mucha menor entidad poblacional respecto a las primeras y por lo tanto, de enorme contaminación lumínica respecto a sus habitantes.

Para analizar los resultados de las 10 poblaciones menos contaminantes, se ha elaborado una tabla con su gráfica asociada, que representa el recorrido por criterios de cada una de esas poblaciones, que le ha permitido alcanzar el Top 10 de poblaciones menos contaminantes de España:

Tabla 6. TOP 10 poblaciones de menor contaminación lumínica. Ranking por criterios

Alternativas	Rankings individuales por criterio						Ranking Final
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	
Alba de Yeltes	3	2	182	11	1603	13	1
Castilblanco	11	13	8	329	1475	157	2
Villa de Mazo	43	40	6	402	332	517	3
Paso (EI)	86	46	5	413	247	824	4
Cala	30	22	126	161	1744	267	5
Cervatos de la Cueva	15	35	889	2	13	1	6
Barruecopardo	10	18	124	142	1786	62	7
Manganeses de la Polvorosa	20	34	158	217	1646	97	8
Macael	447	44	254	147	1077	1086	9
Fabero	518	38	392	100	1193	1013	10

Figura 2: Recorrido gráfico por criterios de poblaciones menos contaminantes



La gráfica muestra curiosos resultados, pues son pocos los casos en que dichas localidades Top 10 final alcanzan puestos Top 10 de forma parcial. Ello es sin duda muestra de la robustez de la técnica TOPSIS, pues al seleccionar las alternativas en base a una combinación de soluciones ideal y anti-ideal, aumenta la probabilidad de que la mejor solución obtenida sea la más constante, o expresado de otra forma, la “menos mala” de forma regular.

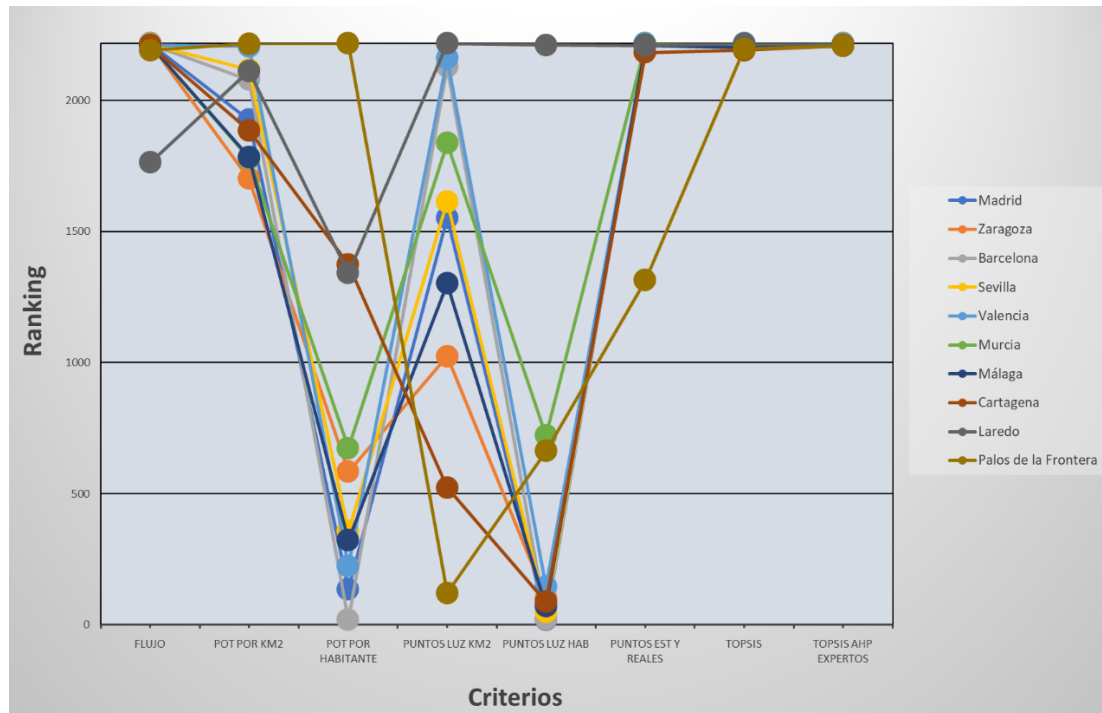
Por otro lado, una gran parte de estos municipios, como consecuencia de su escasa población, ocupa peores posiciones en el criterio puntos de luz por habitante, sin embargo, éste hecho queda compensado por el bajo peso otorgado por los expertos a los factores potencia y puntos de luz en relación poblacional y por el mayor compromiso con la contaminación lumínica, quizá en parte favorecido por el hecho de que dichos pequeños pueblos no hacen uso extensivo de iluminación ornamental.

De forma análoga a lo realizado para las poblaciones menos contaminantes, se analiza el recorrido por criterios de las 10 poblaciones más contaminantes, con su gráfica asociada, donde podemos observar la penalización que supone para las grandes urbes, el hecho de otorgar por parte de los expertos menores pesos relativos a las relaciones de potencia y puntos de luz por habitante. A excepción de las poblaciones Laredo y Palos de la Frontera, las otras 8 poblaciones del Top 10, forman parte del grupo de 25 localidades más pobladas de España.

Tabla 7. TOP 10 poblaciones de mayor contaminación lumínica. Ranking por criterios

Alternativas	Rankings individuales por criterio						Ranking Final
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	
Madrid	2216	1925	136	1552	20	2216	2216
Zaragoza	2215	1701	584	1024	101	2212	2215
Barcelona	2213	2078	18	2128	22	2215	2214
Sevilla	2214	2117	357	1613	49	2210	2213
Valencia	2212	2205	225	2159	146	2214	2212
Murcia	2211	1779	673	1837	721	2213	2211
Málaga	2210	1784	322	1301	71	2209	2210
Cartagena	2209	1884	1374	523	88	2182	2209
Laredo	1763	2111	1341	2216	2210	2208	2208
Palos de la Frontera	2191	2215	2216	121	663	1314	2207

Figura 3: Recorrido gráfico por criterios de poblaciones más contaminantes



4. Conclusiones

El potencial del presente trabajo de investigación radica en el hecho de integrar la aplicación de dos técnicas de decisión multi-criterio combinadas en un ámbito completamente novedoso, como es el estudio de la contaminación lumínica en España.

A través de la opinión contrastada de un grupo de expertos en el asunto tratado, y de la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ha sido factible determinar los pesos o coeficientes de importancia de los criterios que influyen en el método de evaluación. Dicho procedimiento, ha servido de pilar estructural para la aplicación de la metodología TOPSIS, con objeto de obtener una ordenación jerarquizada de las alternativas en función de la distancia existente a la solución idea y anti-ideal, de sus valores normalizados.

Con todo ello, se ha elaborado un minucioso estudio de contaminación lumínica de las 2216 poblaciones españolas de más de 1 km² de superficie, estableciendo un ranking entre ellas, robusto y congruente con el sólido conocimiento de diversos expertos en el asunto tratado.

En este sentido se abren numerosas vías de trabajo futuro, que continúen la línea del presente trabajo. Inicialmente, se ha elaborado una encuesta más completa y extensa, que se ha distribuido de forma online mediante código QR, por los foros y por la comunidad de la contaminación lumínica, donde nuevos expertos, estudiosos de la materia y personal sensibilizado con el problema, puedan aportar una visión más completa y global de éste. De forma añadida, dicha encuesta incrementa el número total de criterios de evaluación hasta un total de doce, en lugar de los seis estudiados en el presente trabajo.

Por lo expresado anteriormente, se puede concluir que la aplicación combinada de los métodos de decisión multicriterio TOPSIS y AHP, es lo suficientemente robusta para considerar su aplicación en el presente trabajo, incluso en el caso de que los expertos difieran radicalmente en sus juicios de valor. Este algoritmo es especialmente estable en casos como el presente, donde se tratan multitud de alternativas, pues al introducir modificaciones al problema inicial planteado, el ranking final de resultados se muestra

especialmente estable, arrojando un poco más de luz sobre las verdaderas fuentes de contaminación lumínica en España.

Bibliografía

Erren, T.C. & Reiter, R.J. (2009a). Defining Chronodisruption. *Journal of Pineal Research*, 46(3): 245–247.

Erren, T.C., & Reiter, R.J. (2009b). Light Hygiene: Time to Make Preventive Use of Insights—Old and New—into the Nexus of the Drug Light, Melatonin, Clocks, Chronodisruption and Public Health. *Medical Hypotheses*, 73: 537–541.

Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C.C.M., Elvidge, C.D., Baugh, K., Portnov, B.A., Rybnikova, N.A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6): 1600377.

Gaston, K.J., Bennie, J., Davies, T.W., & Hopkins, J. (2013). The ecological impacts of nighttime light pollution: a mechanistic appraisal: nighttime light pollution. *Biological Reviews*, 88: 912–927.

Hölker, F., Moss, T., Griefahn, B., Kloas, W., Voigt, C. C., Henckel, D., et al. (2010). The dark side of light: a transdisciplinary research agenda for light pollution policy. *Ecology and Society*, 15(4): 13.

Hwang, C.L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Methods and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany..

La Sorte, F.A., Aronson, M.F.J., Lepczyk, C.A., & Horton, K.G. (2022). Assessing the combined threats of artificial light at night and air pollution for the world's nocturnally migrating birds. *Global Ecology and Biogeography*, 31(5): 912-924.

Saaty, T.L. (1980). *AHP The Analytic Hierarchy Process*. New York, USA: McGraw Hill.

Sánchez de Miguel A, Benayas Polo R. (2015). Ranking de la Contaminación lumínica en España. Obtenido el 1 de abril de 2020 desde <http://doi.org/10.5281/zenodo.2600474>.

Sánchez-Lozano, J.M., Dobarganes-Nodar, A., & Sánchez De Miguel, A. (2021). Decision criteria for the analysis of light pollution in Spain. An AHP approach. 25th International Congress on Project Management and Engineering Alcoi, 6th – 9th July 2021

Sanderfoot, O.V., & Holloway, T. (2017). Air pollution impacts on avian species via inhalation exposure and associated outcomes. *Environmental Research Letters*, 12: 083002.

Touzot, M., Lefebure, T., Lengagne, T., Secondi, J., Dumet, A., Konecny-Dupre, L., Veber, P., Navratil, V., Duchamp, C., & Mondy, N. (2022). Transcriptome-wide deregulation of gene expression by artificial light at night in tadpoles of common toads, *Science of The Total Environment*, 818: 151734.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

