

04-032

DECISION CRITERIA FOR THE ANALYSIS OF LIGHT POLLUTION IN SPAIN. AN AHP APPROACH.

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⁾ University of Exeter

The irrational use of artificial night light on public roads and private spaces, the main actor in light pollution, has negative impacts not only on the environment, but also in areas as diverse as safety, health, energy or the socio-cultural field. Since the first statistics of street lighting at European level were published in 2007, Spain is one of the European countries with the highest expenditure on street lighting. From the information collected by the Suomi-NPP satellite, it is possible to know data estimations per municipality concerning topics such as the installed power, the number of light points, the power emitted by area or the power emitted per inhabitant, just to quote some of the parameters related to light pollution. In this study, it is proposed to use such estimations to apply the Analytic Hierarchy Process (AHP), a robust Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methodology, and obtain the weight or the coefficient of importance of the criteria of the most influential criteria from the perspective of the light pollution.

Keywords: Street lighting; Analytic Hierarchy Process (AHP); criteria; experts.

CRITERIOS DE DECISIÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN LUMÍNICA EN ESPAÑA. UN ENFOQUE AHP.

El uso irracional de la luz artificial nocturna en las vías públicas y espacios privados, actor principal de la contaminación lumínica, conlleva impactos negativos no sólo sobre el medioambiente, sino también en ámbitos tan diversos como la seguridad, la salud, la energía o el ámbito socio-cultural. Desde que en el año 2007 fueron publicadas las primeras estadísticas de alumbrado público a nivel europeo, España es uno de los países europeos con mayor gasto en alumbrado público. A partir de la información recogida por el satélite Suomi-NPP, resulta posible conocer estimaciones por municipio de datos 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 parámetros relacionados con la contaminación lumínica. En este estudio se propone recurrir a dicha información con el objetivo de aplicar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), una metodología de toma de decisiones multi-criterio, y obtener el peso o coeficiente de importancia de los criterios más influyentes bajo la perspectiva de la contaminación lumínica.

Palabras claves: Alumbrado público; Proceso Analítico Jerárquico (AHP); criterios; expertos.

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



1. Introducción

De alguna forma, podemos intuir que la contaminación lumínica es un término genérico, cuyo valor apunta a una suma total de todos los efectos adversos de la luz artificial.

Numerosos estudios científicos ponen de manifiesto los perjuicios asociados con la iluminación artificial nocturna de las vías públicas y espacios privados, origen de un importante impacto ambiental, debido a factores tales como la dirección de emisión de la luz, su intensidad, el espectro (color) de las lámparas utilizadas, etc.

Por todo ello, se hace imprescindible conocer en primer término los ámbitos de impacto. Según la Asociación contra la contaminación lumínica Cel Fosc, este impacto afecta a cinco grandes ámbitos:

- **Ecológico:** Afecta a todas las especies que desarrollan su vida activa total o parcialmente en un medio nocturno.
- **Energético:** La iluminación consume ingentes cantidades de energía. En España solo el alumbrado público supone 116 kW-hora por año y habitante (frente a 93 en Francia y 43 en Alemania).
- **Salud:** La intrusión lumínica perjudica la salud de las personas pues puede producir disfunción circadiana y un mayor riesgo estadístico de padecer alteración del sueño, estrés, depresión, obesidad, diabetes y cáncer de mama/próstata, entre otras enfermedades.
- **Seguridad:** Frente a la innegable sensación de seguridad que ofrece el alumbrado nocturno, si éste no está bien planificado ocasiona fatiga visual, deslumbramientos y relajación de la alerta en la conducción.
- **Cultural:** La degradación del cielo nocturno limita su estudio científico y la práctica astronómica.

Teniendo en consideración dichos ámbitos de impacto, debemos dirigir la mirada hacia las causas que originan dicho comportamiento. El flujo de luz y la contaminación lumínica generada por las poblaciones, pueden ser causados por diferentes factores, incluido el clima, la latitud, la estructura económica, las características culturales de dicha población, su densidad de población, el nivel de desarrollo de infraestructuras, los patrones de urbanización, etc

Numerosos estudios han revelado inesperadas conclusiones al respecto. Según Falchi et al., (2019) no existe una relación directa entre el nivel adquisitivo de una población y su grado de contaminación lumínica. En este sentido, tan solo debemos de observar cómo en Europa, países de alto PIB como Alemania, se nos presentan más apagados que otros como Portugal, España, Italia o Grecia. En este sentido, la contaminación lumínica apunta en mayor dirección

a los países ribereños mediterráneos, de climas más templados, y gran tradición turística, más dados al uso de espacios públicos por sus ciudadanos.

Figura 1: Día 249, España y Portugal resplandecientes después de la oscuridad (desde la Estación Espacial Internacional) (National Geographic España, 2015)



Por otro lado y más allá de la obviedad que presenta el hecho de reconocer que las grandes ciudades son fuentes principales de contaminación, es importante reseñar el papel que juega el ser humano en el consumo de la energía que genera dicha contaminación. Así pues, bajo esta circunstancia, podríamos observar el hecho de que Madrid no sea la ciudad más contaminante de España, pues son varios los millones de personas que hacen uso de las infraestructuras luminosas, en contra de otros pueblos mucho más pequeños, que puedan derrochar mucha más energía por habitante, al iluminar calles prácticamente vacías.

En último término, la paulatina conversión del alumbrado público a una nueva tecnología LED (Light-Emitting Diode) en los últimos años, en base a una innegable mayor eficiencia energética, ha acrecentado de forma exponencial los niveles de contaminación lumínica, consecuencia de la mayor emisión de luz en el espectro azul.

Por todo ello, se encuentra actualmente a la espera de ser ratificado por el Congreso de los Diputados, el Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado, documento que recoge entre otras, la necesidad de declarar zonas de iluminación protegidas y la necesidad de usar la luz cálida sobre la fría, todo ello, en base a sus nocivos efectos en la biodiversidad.

En cualquier caso, para lograr un óptimo control poblacional del factor de contaminación lumínica, es imprescindible mostrar una medida consensuada del volumen total de esta contaminación, que pondere no solo el gasto energético bruto de las poblaciones (medida que a buen seguro y en mayor magnitud, debe recaer en las grandes ciudades), sino también mostrar la consideración del 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.

En este contexto, el estudio realizado por los investigadores Sánchez de Miguel y Benayas (2015), mediante el conveniente uso mixto de imágenes satélite y datos oficiales, constituye un excelente punto de partida a la hora de valorar el territorio español en relación con la contaminación lumínica, apuntando hacia varios factores a considerar y ponderar en su forma adecuada. Por tanto, dado que en dicha evaluación influyen criterios tales como la potencia instalada, el número de puntos de luz, la potencia emitida por área, etc., es posible aplicar el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) (Saaty, 1980), una metodología de toma de decisiones multi-criterio sencilla y robusta, y obtener el peso o coeficiente de importancia de los criterios más influyentes bajo la perspectiva de la contaminación lumínica. Ese es precisamente el estudio que se pretende realizar con esta contribución.

En la sección 2 se describirá en detalle la metodología AHP 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. Metodología

2.1 El proceso Analítico Jerárquico

En este contexto, la metodología AHP (Analytic Hierarchy Process), propuesta por Saaty (1980), se postula como una eficaz herramienta de decisión, pues se fundamenta en el hecho de otorgar pesos de importancia y juicios de valor a ciertos criterios de carácter cualitativo, mediante comparativas dos a dos, y posteriormente, en asociar la importancia de dichos criterios respecto a las alternativas en litigio, según una escala denominada escala de Saaty (Tabla 1).

Tabla 1. Escala de Saaty

Valor	Definición	Comentario
1	Igual importancia	A y B presentan la misma importancia
3	Importancia moderada	A es ligeramente más importante que B
5	Importancia grande	A es más importante que B
7	Importancia muy grande	A es mucho más importante que B
9	Importancia extrema	A es extremadamente más importante que B

Básicamente, el método AHP consta de tres etapas:

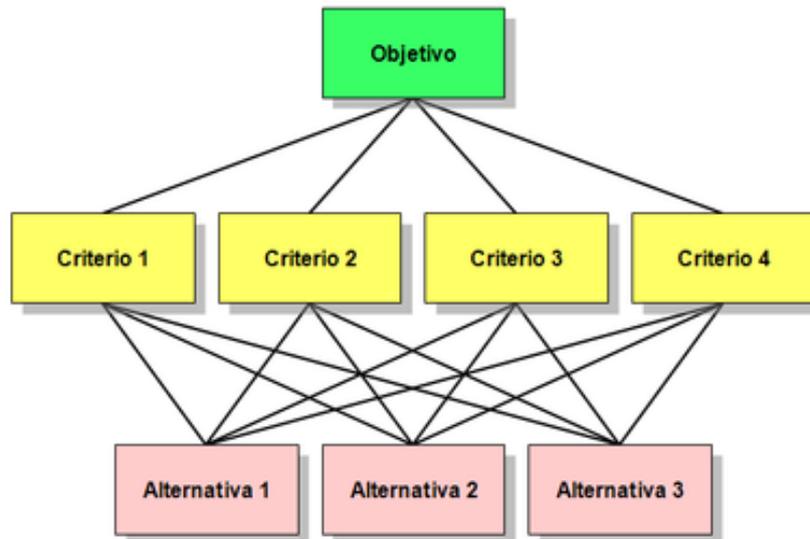
- Estructurar el problema de decisión en una jerarquía con distintos niveles. Un nivel superior indicativo del objetivo y meta a alcanzar, un nivel intermedio en que se definen los

critérios y/o subcritérios que influyen en la evaluación, y un nivel inferior en el que se reflejen las alternativas a evaluar.

- Efectuar una comparación pareada de los elementos de cada nivel de la jerarquía con respecto a cada criterio en el nivel precedente.
- Sintetizar verticalmente los juicios sobre los distintos niveles de la jerarquía.

A continuación se representa el problema estándar mediante un diagrama de árbol, fundamentado en la existencia de una Jerarquía implícita de los componentes del problema. Esta jerarquía implica una clasificación ordinal con al menos 3 niveles subordinados entre sí:

Figura 2: Esquema general de un proceso AHP



La metodología AHP refleja la tendencia natural de la mente a clasificar elementos de un sistema en diferentes niveles y a agrupar elementos similares en cada nivel. Sin embargo dicha metodología ofrece su verdadero potencial cuando se maneja un número reducido de alternativas (Romero, 1993).

Con objeto de otorgar pesos o coeficientes de importancia a los criterios, resulta posible elaborar un cuestionario el cual debe ser cumplimentado por expertos en el ámbito de la naturaleza del caso de estudio que se pretenda resolver. Con los resultados de dicho cuestionario, se genera la denominada matriz de comparación mediante la confrontación por pares de criterios (C_i, C_j) para cada uno de los expertos que compongan el grupo de asesoramiento una matriz $n \times n$ (Figura 3)

Figura 3: Matriz de comparación pareada

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & \cdots & C_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ C_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

La diagonal principal ($C_{11}, C_{22}, \dots, C_{nn}$) sería la unidad, pues se comparan mismos criterios entre sí. El resto de los valores, por ejemplo C_{13} , supone la evaluación relativa del criterio C_1 respecto al criterio C_3 ($C_{13} \approx w_1/w_3$).

De forma global:

- $C_{ij} \approx (w_i/w_j)$, para todo $i, j = 1, 2, \dots, n$.
- $C_{ii} = 1$, para todo $i = 1, 2, \dots, n$.
- Si $C_{ij} = \alpha \neq 0$, entonces $C_{ji} = 1/\alpha$, para todo $i = 1, 2, \dots, n$.
- Si el Criterio i es más importante que el Criterio j , entonces $C_{ij} \approx (w_i/w_j) > 1$.

Se comprueba que la matriz anterior cumple con las propiedades:

- Reciprocidad (si $C_{ij} = x$, entonces $C_{ji} = 1/x$),
- Homogeneidad (si i y j son igualmente importantes, $C_{ij} = C_{ji} = 1$, y además, $C_{ii} = 1$ para todo i),
- Consistencia (la matriz no debe contener contradicciones en la valoración realizada)

Como resultado de las comparaciones pareadas de criterios correspondientes a los juicios emitidos por los expertos, se obtiene el vector de pesos, en base a la media geométrica normalizada, que habilita la cuantificación de la importancia de los diferentes criterios, según la siguiente expresión:

$$w_i = \frac{(\prod_j C_{ij})^{1/n}}{\sum_i (\prod_j C_{ij})^{1/n}} \quad (1)$$

Por otro lado, si "n" es el número de criterios a valorar dos a dos, cada uno de los expertos debe emitir número de juicios igual a la siguiente expresión:

$$L = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2)$$

Con la finalidad de analizar la consistencia de los juicios emitidos por el grupo de expertos, la metodología AHP permite calcular el denominado ratio de consistencia (RC) a partir del índice de consistencia (IC) y del índice aleatorio (IR). Según Saaty, la matriz de comparación será consistente si su $RC < 0.1$. En ese caso los juicios o valoraciones proporcionados por el grupo de expertos no deberán ser revisados.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3)$$

Para el cálculo del índice de consistencia (IC), se empleará la expresión (4) donde λ_{max} es el autovalor principal de C y n es la dimensión de la matriz de decisión. La consistencia es completa cuando se obtiene un índice de consistencia igual a cero.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

El valor del índice aleatorio IR puede ser obtenido en función del valor n sometido a estudio según la Tabla 2 la cual representa su valor medio para 100000 matrices aleatorias utilizando la escala de Saaty.

Tabla 2. Índices aleatorios para distintos órdenes n (Alonso y Lamata, 2006)

n	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0.5245	0.8815	1.1086	1.2479	1.3417	1.4056	1.4499	1.4854

3. Caso de estudio

3.1 Descripción del problema de decisión

Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Sánchez de Vera, 2017), el territorio español contaba en 2017, con casi 9 millones de puntos de luz (8.849.839) con una potencia media de 156W. España gasta cerca de 950 millones de euros al año en alumbrado público municipal, siendo el país de mayor consumo por habitante de la Unión Europea. Como consecuencia de ello, España es también uno de los países más afectados por la contaminación lumínica, con un 96% de la población residiendo en zonas de alta contaminación.

Desde hace varios años, los ayuntamientos locales y las entidades autonómicas y estatales han realizado inversiones millonarias, con objeto de modificar el alumbrado público en base a una tecnología más eficiente como las lámparas LED. Sin embargo, y en contra de la opinión general, dicha tecnología es menos respetuosa con el medio ambiente, como consecuencia de su emisión en la zona azul del espectro, dado que sus cortas longitudes de onda se escapan de la fuente de luz de forma más ágil que las más largas y cálidas.

Por otro lado, en referencia al marco normativo, no existía hasta el año 2008 una normativa a nivel estatal en España que regulase de forma específica la contaminación lumínica, permitiendo a las Comunidades Autónomas elaborar su regulación a nivel regional. En este sentido, la Comunidad Autónoma de Canarias, fue la pionera en este aspecto, al promulgar en 1988 la Ley sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias (España, 1988).

Con la entrada del Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07 (España, 2008), se introdujeron importantes medidas de mejora del alumbrado público en el ámbito de la eficiencia energética, sin embargo en aquel momento aún no se había producido el verdadero auge de la tecnología LED (Sánchez de Miguel y Benayas, 2015). Por otro lado, y de forma general, dicha normativa establecía obligaciones de mínimos en el ámbito de la contaminación lumínica y no verdaderas recomendaciones a seguir.

Actualmente, y tal como refiere el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, el Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética de instalaciones de alumbrado exterior y sus instrucciones técnicas complementarias, deroga el Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, y actualiza la normativa, entre otras razones, por la incorporación de nuevas tecnologías de iluminación no consideradas en éste, y por las condiciones técnicas que deben cumplir las instalaciones de alumbrado exterior, en orden a

mejorar su eficiencia y ahorro energético, con objeto de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, en cada proyecto o instalación.

En este contexto, se realizó un estudio (Sánchez de Miguel y Benayas, 2015) sobre el ranking de la contaminación lumínica en los municipios de España cuya superficie de iluminación artificial superaba 1 km² (2116 municipios). Dicho estudio está basado en el tratamiento y análisis de imágenes satelitales nocturnas a través de un producto denominado NOKTOsat, que reproduce imágenes radiométricas totalmente calibradas, esenciales para estudios de impacto ambiental en contaminación lumínica y que sirven de sustento para diferentes trabajos de investigación en colaboración con la Universidad Complutense de Madrid (UCM), como el proyecto Cities at Night, que involucra además a las agencias espaciales NASA, ESA y a otros institutos de investigación.

En dicho estudio, para evaluar los municipios españoles bajo la perspectiva de la contaminación lumínica se tuvieron en cuenta varios criterios tales como la potencia instalada, el número de puntos de luz, la potencia emitida por área, etc., y éstos fueron analizados mediante el empleo de técnicas estadísticas (medias, medianas, cuartiles, modelos de regresión, etc.). No obstante, no se emplearon metodologías de toma de decisiones multi-criterio que, por la naturaleza de los datos de partida (matriz de decisión de alternativas y criterios), podrían resultar idóneas. Es por ello por lo que el problema de decisión que se pretende abordar en este estudio consiste en la determinación del peso o coeficiente de importancia de los criterios más influyentes a la hora de evaluar dichos municipios desde el punto de vista de la contaminación lumínica.

3.2 Definición de criterios

La selección de los criterios de evaluación es la etapa más importante del proceso. En este sentido, es vital definir con precisión lo que verdaderamente queremos medir, para posteriormente poder realizar una selección y/o ponderación adecuada de los mismos. De su correcta elección depende que una alternativa quede clasificada en mejor o peor posición. Por lo tanto, la calidad del resultado final la ofrece en gran medida la calidad de los criterios puestos en valor, por lo que no ha de hacerse de forma arbitraria, sino a raíz de la opinión y asesoramiento de los diferentes expertos en la materia

Dado que el presente estudio pretende ofrecer una nueva visión de los resultados aportados en otro anterior, se mantienen los mismos criterios de decisión que llevaron a este último a sus particulares resultados. Dichos criterios por lo tanto, han sido seleccionados en base a fuentes fiables de información, tal como aparecen en el Ranking de la Contaminación lumínica en España 2015 (Sánchez de Miguel y Benayas, 2015).

Por otro lado, el presente trabajo introduce valoraciones y pesos otorgados a dichos criterios de decisión realizados por diferentes expertos de la materia tratada, en relación con su competencia y experiencia profesional.

Dicho grupo de expertos está conformado por ocho integrantes que forman parte de las siguientes instituciones y organizaciones: Real Observatorio de la Armada, en sus secciones de Astronomía, Efemérides y Área de detección y seguimiento de basura espacial, Universidad Complutense de Madrid en su Departamento de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera, Proyecto Cities at Night, International Dark Sky Association, y Área de alumbrado público del Ayuntamiento de Torre-Pacheco (Murcia).

Por su parte, el organigrama final queda establecido con seis criterios de decisión, cuyas definiciones y fuentes de información se exponen a continuación:

- **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

Las fuentes de información de los factores a ponderar son las siguientes:

- Flujo Natural: Potencia emitida al espacio medida por el instrumento VIIRS/DNB, montado a bordo del satélite Suomi NPP.
- Potencia Instalada y Puntos de luz: Extraída en base a la encuesta de infraestructura y equipamientos locales (EI y EL) del Ministerio de Política Territorial y Función Pública.
- Superficie artificial: Medida en base a CORINE Land Cover (Copernicus Land Monitoring Service).
- Población: Obtenida del Instituto Nacional de Estadística (INE)

3.3 Obtención del peso o coeficiente de importancia

Dado que el número total de criterios de evaluación en el presente trabajo de investigación es de seis, cada experto debe emitir un total de 15 juicios particulares para evaluar el nivel de importancia relativa de cada uno de ellos (expresión 2).

Finalmente y de acuerdo con las expresiones 3 y 4, se calculará el Ratio de Consistencia (CR), siendo aceptados los juicios emitidos por cada experto en aquellos casos en los que no se supere el valor establecido de $CR < 0.1$. Por ello, a modo de ejemplo, se presentan las matrices de cálculo y el análisis de consistencia para el Experto 1.

La matriz de comparación pareada de criterios del experto 1 (Tabla 3) constituye el punto de partida del proceso de obtención de pesos:

Tabla 3. Comparación pareada de criterios por el Experto 1

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆
C ₁	1	1	9	7	9	9
C ₂	1	1	9	7	9	9
C ₃	1/9	1/9	1	1/3	1	1
C ₄	1/7	1/7	3	1	3	3
C ₅	1/9	1/9	1	1/3	1	1
C ₆	1/9	1/9	1	1/3	1	1

En base a la expresión (1) de aplicación de la media geométrica normalizada, se obtiene la matriz de pesos W y el autovalor principal de la matriz λ_{max} (Tabla 4)

Tabla 4. Matriz de pesos de los criterios correspondiente al Experto 1

	Producto	Media Geométrica Normalizada	Pesos (%)	λ_{\max}
C ₁	4.1493	0.3988	39.88	6.1324
C ₂	4.1493	0.3988	39.88	6.1324
C ₃	0.4003	0.0385	3.85	6.0573
C ₄	0.9054	0.0870	8.70	6.2884
C ₅	0.4003	0.0385	3.85	6.0573
C ₆	0.4003	0.0385	3.85	6.0573

Finalmente, en aplicación de las expresiones (3) y (4) y la Tabla 2, se procede al cálculo del ratio de consistencia, cuyo término será aceptado como válido cuando no supere el umbral establecido en 0,1 (Tabla 5).

Tabla 5. Cálculo de RC correspondiente al Experto 1

Media λ_{\max}	IC	IR (n=6)	RC	RC _{max}
6,1209	0.0242	1.2479	0.0193	< 0.1

En base a lo anteriormente expresado y en relación con las evaluaciones ofrecidas por los expertos, se procede a realizar el cálculo de los pesos de los criterios y el análisis de consistencia para el resto de los expertos (Tabla 6).

Tabla 6. Matriz de pesos de los criterios y ratio de consistencia (RC) de cada experto

	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8
C ₁	0.3988	0.2198	0.3925	0.0272	0.2598	0.3447	0.2598	0.1973
C ₂	0.3988	0.2198	0.3925	0.4565	0.4692	0.3447	0.4692	0.5442
C ₃	0.0385	0.2198	0.0348	0.2421	0.0690	0.0440	0.1358	0.0908
C ₄	0.0870	0.0399	0.1106	0.1114	0.1358	0.1567	0.0690	0.0385
C ₅	0.0385	0.2198	0.0348	0.0513	0.0332	0.0258	0.0332	0.0908
C ₆	0.0385	0.0808	0.0348	0.1114	0.0332	0.0841	0.0332	0.0385
RC	0.0193	0.0062	0.0504	0.0410	0.0442	0.0458	0.0442	0.0338

Una vez comprobado que las relaciones de consistencia parciales se encuentran dentro de límites establecidos, se efectúa una agregación homogénea mediante la media aritmética de los pesos proporcionados por cada uno de los expertos (Tabla 7).

Tabla 7. Agregación homogénea de expertos

	Vector de pesos global (%)
C ₁	26.25
C ₂	41.19
C ₃	10.93
C ₄	9.36
C ₅	6.59
C ₆	5.68

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que los expertos se han declinado por el criterio C₂ (Potencia emitida por superficie artificial) como más importante, seguido en mayor medida por el criterio C₁ (Flujo natural). Este hecho no es de extrañar si atendemos a la definición más pura del término “contaminación lumínica” que, según Green Globe, se define como “la emisión de flujo luminoso, por fuentes artificiales de luz constituyentes del alumbrado nocturno, con intensidades, direcciones o rangos espectrales inadecuados para la realización de las actividades previstas en la zona alumbrada”.

En este contexto resaltamos los términos emisión de flujo luminoso y zona alumbrada, como claros exponentes de los criterios seleccionados por los expertos, reduciendo el impacto o minimizando el hecho de quién o cuántos hacen uso de esa iluminación o el número de iluminarias que lo generan. De hecho, un estudio reciente realizado en Gran Bretaña (Cox et al., 2020) ha demostrado que, aunque la luz artificial en la noche aumenta con la densidad de población, la cantidad de luz por persona disminuye con el incremento urbanístico (con una mediana de emisiones directas por habitante tres veces mayor en las poblaciones rurales que en las urbanas, y una mediana de resplandor celeste once veces mayor). En dicho trabajo se observó una variación significativa en la luz artificial durante la noche en función del tipo de suelo (urbano, parque nacional, lugares de interés especial, etc.), enfatizando que la contaminación lumínica no es un problema exclusivamente urbano.

La siguiente tabla, muestra el orden de preferencia de los criterios sometidos a juicio por parte de los expertos, donde se observa directamente el hecho de que todos los expertos han elegido el criterio 2 en primera opción, bien de forma individual o bien de forma compartida.

Tabla 8. Orden de preferencia de criterios por los expertos

	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	Experto 8
C ₁	1º	1º	1º	5º	2º	1º	2º	2º
C ₂	1º							
C ₃	3º	1º	3º	2º	4º	4º	3º	3º
C ₄	2º	3º	2º	3º	3º	2º	4º	4º
C ₅	3º	1º	3º	4º	5º	5º	5º	3º
C ₆	3º	2º	3º	3º	5º	3º	5º	4º

4. Conclusiones

El potencial del presente trabajo de investigación radica en el hecho de integrar la aplicación de una técnica de decisión multi-criterio 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 robusto Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ha sido factible determinar los pesos o coeficientes de importancia de los criterios que influyen en el método de evaluación, todo ello mediante comparaciones pareadas, erradicando cualquier razón de inconsistencia en el proceso, bajo estándares lógicos matemáticos.

Desde el punto de vista de la contaminación lumínica, los criterios más importantes y que han obtenido mayor ponderación son los criterios C₂ (Potencia emitida por superficie artificial) y C₁ (Flujo natural).

Dicho procedimiento, servirá de pilar estructural para un estudio posterior aplicando otra metodología de toma de decisiones multi-criterio ampliamente contrastada en el ámbito de la teoría de la decisión; el método TOPSIS. De esta forma será posible evaluar los municipios españoles bajo la perspectiva de la contaminación lumínica y obtener una ordenación jerarquizada de las alternativas en función de la distancia existente a la solución ideal.

Bibliografía

- Alonso, J.A., & Lamata, M.T. (2006). Consistency in the Analytic Hierarchy Process: A new approach. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 14(4): 445–459.
- Cel Fosc, Asociación contra la Contaminación Lumínica. Evaluación del impacto ambiental de la contaminación lumínica de Madrid (n.d.). Obtenido el 15 de abril de 2020 desde <https://www.celfosc.org/MadridDecide2018.pdf>
- Copernicus Land Monitoring Service. (n.d.). Obtenido el 10 de junio de 2020 desde <https://land.copernicus.eu/>
- Cox, D.T.C., Sánchez de Miguel, A., Dzurjak, S.A., Bennie, J., & Gaston, K.J. (2020). National Scale Spatial Variation in Artificial Light at Night. *Remote Sensing* 12(10)
- España, Ministerio de Industria, Comercio y Turismo. Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética de instalaciones de alumbrado exterior

y sus instrucciones técnicas complementarias. Obtenido el 8 de abril de 2020 desde https://industria.gob.es/es-es/participacion_publica/Paginas/proyecto-RD-reglamento-eficiencia-energetica.aspx

España. Ley 31/1988, de 31 de octubre, sobre Protección de la Calidad Astronómica de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias. *Boletín Oficial del Estado*, 3 de noviembre de 1988, núm. 264, pp. 31451-31451

España. Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. *Boletín Oficial del Estado*, 19 de noviembre de 2008, núm. 279, pp. 45988-46057

Falchi, F., Furgoni, R., Gallaway, T.A., Rybnikova, N.A., Portnov, B.A., Baugh, K., Cinzano, P. & Elvidge, C.D. (2019). Light pollution in USA and Europe: The good, the bad and the ugly. *Journal of Environmental Management* 248-109227.

Green Globe. Sostenibilidad y Proyectos Ambientales. Contaminación lumínica. (n.d.) Obtenido el 12 de abril de 2020 desde <https://www.greenglobe.es/contaminacion-luminica/>

Instituto Nacional de Estadística. Demografía y Población.(n.d.) Obtenido el 10 de junio de 2020 desde https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/categoria.htm?c=Estadistica_P&cid=1254734710990

Ministerio de Política Territorial y Función Pública. Encuesta de Infraestructura y Equipamientos Locales. (n.d.). Obtenido el 10 de junio de 2020 desde http://www.mptfp.es/portal/politica-territorial/local/coop_econom_local_estado_fondos_europeos/eiel.html

National Geographic España. La península Ibérica desde el espacio (2015). Obtenido el 07 de diciembre de 2015 desde https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/la-peninsula-iberica-desde-el-espacio_9961

Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*. Madrid: Alianza Editorial.

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 de Vera, A. (2017). Inventario, consumo de energía y potencial de ahorro del alumbrado exterior municipal en España (2017). Obtenido el 10 de mayo de 2020 desde <https://smart-lighting.es/inventario-potencial-ahorro-alumbrado-exterior-municipal/>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

