

---

This is the **published version** of the bachelor thesis:

Gonzalvo Ulla, Óscar; Ibeas, Asier , dir. Priorització d'actuacions municipals mitjançant el mètode AHP. 2024. 11 pag. (Grau en Gestió de Ciutats Intel·ligents i Sostenibles)

---

This version is available at <https://ddd.uab.cat/record/308177>

under the terms of the  license

# Priorización de actuaciones municipales mediante el método AHP

Oscar Gonzalvo Ulla

**Resumen**— En este trabajo se decide qué actuación municipal contribuye más a que la ciudad sea más inteligente y sostenible. Para ello se priorizan cuatro alternativas de actuación predeterminadas y se utiliza la técnica de decisión multicriterio conocida como el Proceso Analítico Jerárquico (PAJ). Como criterios de decisión, se utilizan tanto conceptos de *Smart Cities*, como los del programa de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas (ODS). Al mismo tiempo que se desarrollará el citado proceso de priorización, se expondrá la metodología del PAJ paso a paso y, como se verá, se ha podido contar con la colaboración de un grupo de expertos que han aportado sus valoraciones.

**Palabras clave**— Toma de decisiones multicriterio, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), Priorización de actuaciones municipales.

**Abstract**— In this work, it is decided which municipal action contributes most to making the city more intelligent and sustainable. We use the multi-criteria decision technique known as the Analytical Hierarchical Process (AHP) to prioritize four given alternatives. The prioritization decision criteria include Smart Cities and United Nations Sustainable Development program (SDG) concepts. In addition to prioritization, the AHP methodology will be explained step by step and, the assessments of a group of experts will be presented.

**Index Terms**—Multi-criteria decision making, Analytical Hierarchical Process (AHP), Prioritization of municipal actions.

## 1 INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población mundial está siendo exponencial (*Figura 1*): 1.000 millones en 1805, 8.000 millones en 2023 y llegará a un máximo de 10.400 millones de habitantes en el 2086, [1]. Del total de la población mundial, el porcentaje de habitantes que viven en asentamientos urbanos ha ido incrementándose. Así, en el año 1800 la población urbana era menor de un 10% del total. En 1950 llegaba al 30% y la expectativa es superar el 68% en 2050. A modo de ejemplo, Delhi tendrá 39 millones de habitantes para el año 2030, [2][3][4].

Estas circunstancias demográficas, junto con otras de carácter económico, social y medioambiental conllevan importantes retos en las ciudades, especialmente en las de los países de baja renta *per cápita*. Algunos de estos retos son: atender las necesidades básicas de la población (alimentación, agua, vivienda, sanidad, seguridad, educación, etc.); mejorar las infraestructuras y servicios urbanos; procurar recursos energéticos; incrementar la sostenibilidad de ecosistemas y recursos naturales; mejorar las condiciones sociales, el bienestar, la movilidad y la seguridad, entre otros. Debido a la limitación de recursos y la imposibilidad de realizar todo en una misma ventana temporal, se deben tomar de manera continua decisiones que implican la priorización de actuaciones, en busca del uso más eficiente posible de esos recursos escasos. La sociedad en su conjunto, y la Administración Pública en particular, necesitan tomar decisiones sobre problemas complejos, basados en múltiples criterios, con métodos prácticos y eficaces. Este es el núcleo

de este trabajo, la toma de decisiones multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés). Este trabajo describe cómo priorizar entre un número limitado de posibles actuaciones de ámbito urbano. Tres de estas actuaciones son referidas al uso y generación de energía y una cuarta actuación es para la creación de infraestructura vinculada a una ciudad inteligente.

La solución técnica empleada es el Proceso Analítico Jerárquico de Thomas L. Saaty (se usará el término AHP de aquí en adelante, por sus siglas en inglés). El método AHP se inscribe entre las técnicas MCDM y es ampliamente reconocido para la solución de problemas complejos.

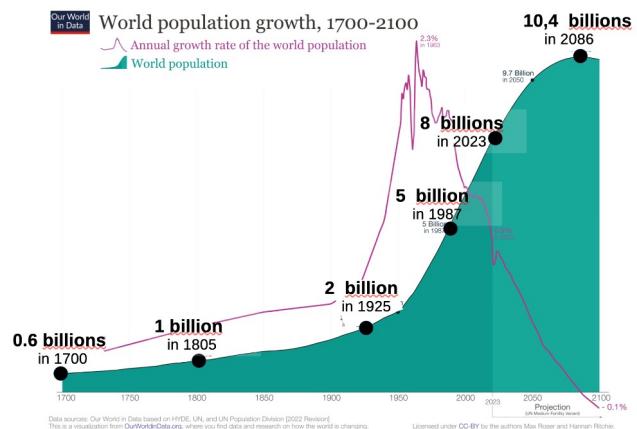


Figura 1: Crecimiento poblacional mundial. Fuente: ourworldindata.org

- E-mail de contacto: 1543363uab@gmail.com
- Trabajo tutorizado por: Asier Ibeas Hernández  
(Dto. de Telecomunicación e Ingeniería de Sistemas)
- Curso 2023/24

## 1.1 Estado del arte.

Este apartado tiene como objetivo proporcionar una visión general de las investigaciones y desarrollos del método AHP y su eventual aplicación al tema de este trabajo. Cabe decir que, desde los años 70 del siglo pasado, se han publicado una gran cantidad de libros, estudios y publicaciones científicas sobre el método, lo que haría tedioso detallarlas aquí.

Los contenidos relacionadas con el método AHP, han sido muy variados a lo largo de los años. En la década de los años 80, poco después de su planteamiento, las publicaciones trataban sobre todo de la matemática y los fundamentos del método en cuestión, [5]. En la década de los 90, se hicieron una gran cantidad de publicaciones, debido a su expansión hacia muchas áreas de estudio y disciplinas. Así, Luis G. Vargas planteó formalmente por primera vez en 1990 la capacidad del AHP para tener aplicaciones, en su publicación *An overview of the analytic hierarchy process and its applications*, [6]. Las conclusiones de su estudio señalaron que el AHP se podía usar para resolver problemas económicos, políticos, sociales o tecnológicos.

En 2022, en un contexto de creciente uso del AHP en múltiples disciplinas, Madzik P. y Falát L. realizaron un estudio exhaustivo sobre el estado del arte de dicho método y su implementación en los últimos 40 años. Su investigación ofrece una amplia visión de los avances realizados, las innovaciones metodológicas y las aplicaciones prácticas más significativas de este método. Según los autores, gracias a su simplicidad y eficacia, el AHP es un método utilizado en una gran amalgama de disciplinas y áreas de estudio, [5].

William Ho, indica algunas implementaciones alternativas, [7], como por ejemplo: AHP-MILP, donde se combina la programación entera lineal mixta, Kengpol, [8]; AHP-GP, combinando la programación por objetivos, Kull y Talluri, [9]; AHP-DP, usando la programación dinámica, Mafakheri, [10]; AHP-LP, implementando la programación lineal, Ishizaka y Labib, [11]; o AHP-MOLP, aplicando la programación multiobjetivo lineal, Quezada y López-Ospina, [12]. Desde 1997 hasta 2006, los temas publicados más comunes fueron la selección de rutas de transporte y la optimización de redes de distribución. A partir de 2006, el problema de evaluación y selección de proveedores muestra una mayor presencia entre los artículos publicados. Siguen por número de apariciones otras cuestiones como la selección de estrategias y políticas, la evaluación y selección de diseño de productos, la selección de equipos o herramientas y la evaluación y selección de ubicaciones, entre otros, [7].

Madzik P. y Falát L., [5], incluían el Desarrollo Sostenible en su clasificación de los tópicos más comunes en las publicaciones. Este sería el tópico que más relación tiene con el tema de este trabajo. El número de registros en que aparece este tópico es relativamente bajo según los autores, pero ha tenido un crecimiento elevado en los últimos años, sobretodo a partir de 2016. También se apunta que el área con mayor número de estudios sobre Desarrollo Sostenible ha sido las ciencias medio-ambientales, seguida por ingeniería y después por ciencias sociales.

Acabaremos diciendo que sobre el tema de “Ciudad Inteligente y sostenible” hay una relativa escasez de documentos académicos que apliquen el método AHP.

## 1.2 Estructura del trabajo.

En la sección 2, se plasmarán los objetivos específicos que se pretenden obtener con el mismo. Tras ello, en la sección 3 se introducirá el método AHP para, posteriormente en la sección 4, ir describiéndolo paso a paso, a la vez que resolviendo el caso práctico de ámbito municipal.

Tras la explicación del análisis y los resultados del caso en la sección 5, se presentarán las conclusiones de todo el trabajo (sección 6).

Los *Anexos* incluyen detalles complementarios a lo explicado en el cuerpo de este trabajo.

## 2 OBJETIVOS

Con este trabajo se busca priorizar entre cuatro actuaciones dadas, para elegir la que más contribuya a la ciudad. Para ello se va a utilizar la técnica de decisión multicriterio conocida como Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process – AHP).

Las cuatro actuaciones urbanas a priorizar son:

1. Creación de una infraestructura de generación de energía renovable.
2. Instalación de un sistema de energía termal de autoconsumo en el futuro parque empresarial de la ciudad.
3. Optimización de la eficiencia energética de todos los equipamientos y edificios públicos.
4. Generación de infraestructura inteligente en las principales vías urbanas y equipamientos públicos.

La priorización de estas actuaciones se hará basándose en su aportación a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) promovidos por Naciones Unidas y, simultáneamente, en la contribución para ser una ciudad inteligente.

Al utilizar el método AHP se buscan beneficios adicionales tales como: una mayor comprensión de la decisión, sus componentes y resultados, así como el análisis de todo lo anterior.

## 3 MÉTODOS DE DECISIÓN MULTICRITERIO Y AHP

### 3.1 Las técnicas de decisión multicriterio (MCDM)

Existe un número importante de técnicas multicriterio para la toma de decisiones (MCDM). Entre las MCDM más empleadas en la literatura académica se encuentran, por orden de frecuencia: *Analytic Hierarchy Process* (AHP); *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS); *Analytic Network Process* (ANP); *Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR); *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE); *Data Envelopment Analysis* (DEA); *The Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE); y *Weighted Aggregated Sum Product Assessment* (WASPAS). Existe gran diversidad y variedad conceptual entre ellas, tal como comentó H.M Arslan en un completo trabajo recopilatorio sobre cómo clasificaban los MCDM diversos autores, [13] [14] [15]. Por obvias limitaciones de espacio, queda fuera del alcance de este escrito entrar en una descripción y comparación de cada una de ellas.

### 3.2 El Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Por las ventajas que se dirán más adelante, la técnica multicriterio escogida es el Proceso Analítico Jerárquico (AHP), ideado por T.L. Saaty a finales de los años '70. Según su creador, el AHP es "una teoría general de la medición. Se utiliza para obtener escalas de razón a partir de comparaciones pareadas discretas y continuas en estructuras jerárquicas multinivel. Estas comparaciones pueden tomarse a partir de mediciones reales o de una escala fundamental que refleja la fuerza relativa de las preferencias y las opiniones", [16].

El AHP tiene un conjunto de características que lo hacen preferible a otras metodologías:

- El AHP permite convertir problemas complejos en partes más simples, que son estructuradas en forma de jerarquía de objetivo, criterios, subcriterios, alternativas, etc.
- Es aplicable a la toma de decisiones que impliquen múltiples criterios.
- Ha sido exhaustivamente utilizado con éxito desde su inicio en los años 80', demostrando gran versatilidad. Prueba de esa consistencia son las continuas adaptaciones y combinaciones en toda la literatura.
- Es intuitivo y, comparado con otros métodos, es más rápido para un gran número de casos.
- Es capaz de incorporar aspectos cuantificables con otros cualitativos, intangibles o incluso subjetivos. Esto le confiere una gran flexibilidad y aplicabilidad.
- Integra medidas multidimensionales dentro de una única escala de prioridades.
- El AHP es altamente productivo cuando los criterios escogidos son independientes y además se han utilizado los factores más relevantes para la decisión.
- La consistencia forma parte ineludible del proceso, por lo que es medida y validada en cada ciclo de emisión de juicios comparativos. El parámetro *CR* mide la coherencia interna entre el conjunto de juicios o evaluaciones emitidos por los decisores.
- Tiene carácter colaborativo, permitiendo integrar las opiniones de un grupo en las conclusiones generales, aun siendo aquellas divergentes. Se aprovechan las sinergias de los decisores (grupo de expertos, implicados, ...)
- Se fundamenta sobre una formulación matemática rigurosa, pero que un usuario del método no necesita dominar porque existen herramientas informáticas que la automatizan.
- Los resultados son exhaustivos, proporcionando información útil sobre la aportación de todos los elementos individuales que componen la jerarquía.

El método AHP también tiene limitaciones y algunos puntos débiles:

- El principal es que en algunos casos excesivamente complejos puede ser casi inviable. Esto es debido a la naturaleza pormenorizada de las comparaciones. Entendemos casos complejos como aquellos en los que hay muchos niveles en la jerarquía (más de cuatro), muchos elementos en algún nivel o muchos decisores.

- Los participantes en el AHP necesitan una cierta curva de aprendizaje. Adicionalmente, deben tener los conocimientos suficientes sobre el tema a valorar y sobre los criterios de evaluación implicados.
- En algunos casos el encaje del problema en una serie de niveles jerárquicos puede no representar bien la realidad.
- Se produce una dificultad valorativa debido a que el funcionamiento básico estriba en asignar un valor numérico a la pregunta de: ¿cuántas veces es más importante el elemento *i* frente al elemento *j*?
- En casos de comparaciones cualitativas la fiabilidad de los resultados puede verse comprometida, aún existiendo la suficiente consistencia interna (*CR*).

## 4 PRESENTACIÓN DEL MÉTODO

El Proceso Analítico Jerárquico puede plasmarse en una serie ordenada de pasos, que van a ser comentados más adelante y que podrían representarse de la siguiente manera :

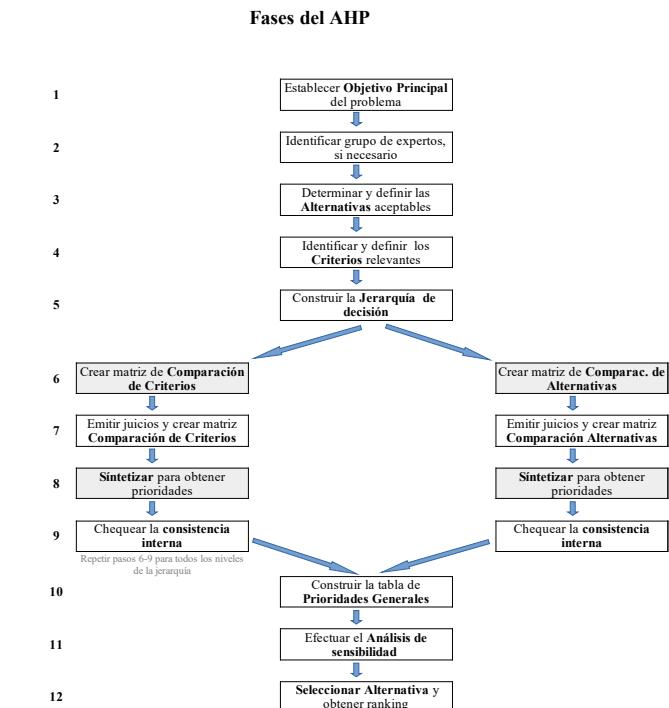


Figura 2: Fases del Proceso Analítico Jerárquico

### 4.1 Establecer el Objetivo Principal

El Objetivo Principal se define como la finalidad, meta, propósito o fin que se busca con todo el proceso de decisión. El Objetivo debe ser idealmente: Específico, medible o constatable, alcanzable, relevante y con indicación de temporalidad. Debe estar definido con la suficiente claridad para evitar ambigüedades y transmitir un mismo concepto a todos los participantes del proceso de la decisión .

En el ejemplo práctico que vamos a ir presentando en este trabajo, el Objetivo Principal buscado es: "Seleccionar la actuación municipal que más favorezca la transición hacia una Ciudad Inteligente y Sostenible, entre un conjunto dado de cuatro posibles alternativas de optimización energética y creación de infraestructuras". En el apartado 4.3 se detallan dichas alternativas.

Para tener una visión compartida del concepto de Ciudad Inteligente y Sostenible, además de datos específicos de la ciudad del Anexo 1, se utilizan los contenidos emitidos por las Naciones Unidas sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (OSD) y también los de la iniciativa global *U4SSC—United for Smart Sustainable Cities*, [17].

Igualmente se establece como marco temporal para los impactos, el periodo 2025-2050.

#### 4.2 Identificar un grupo de expertos

Este paso es opcional en la aplicación del AHP, ya que el método permite también su ejecución individual.

Para el caso práctico que nos ocupa y dado que la especialidad del método AHP son las decisiones complejas y con componentes cualitativos o subjetivos, es muy recomendable la búsqueda de un grupo de expertos conocedores de la materia sobre la que trata la decisión.

Sobre tamaño del grupo, aunque un número de personas limitado permitirá el intercambio en profundidad, un grupo menor de cinco componentes podría tener sesgos personales. Por otro lado, diez o más componentes en el grupo decisor hace conveniente la estructuración de los procedimientos y de la participación en las discusiones y valoraciones.

En el caso de este trabajo han participado catorce personas "expertas", de perfiles diversos: 4 son tituladas en Ingeniería Industrial, 2 en Ingeniería Informática, 2 licenciadas en Ingeniería Eléctrica, 1 en Ingeniería Mecánica; otras 2 licenciadas con responsabilidades en la Administración Pública y finalmente 3 personas directivas en el ámbito empresarial (dos de ellos MBA).

#### 4.3 Determinar las Alternativas a priorizar

A nivel teórico, una vez establecido el Objetivo Principal, es necesario determinar cuáles son las posibles opciones o Alternativas de la decisión, viables y relevantes, que puedan contribuir al logro del objetivo. En el caso de que se identifiquen un número muy elevado de alternativas puede ser recomendable hacer una preselección.

En el caso que nos ocupa, y con el objetivo de "Seleccionar la Actuación Municipal que más favorezca la transición hacia una Ciudad Inteligente y Sostenible" existen ya cuatro actuaciones municipales predefinidas. Con la ayuda de los 14 expertos, esas cuatro alternativas se deberán valorar y clasificar mediante el AHP para, finalmente, seleccionar la que más contribuya al objetivo durante el periodo 2025-2050.

Estas alternativas son:

**A-Generación de energía renovable:** Creación de una infraestructura urbana de generación de energía de origen renovable, tendente a la autosuficiencia del municipio. Principalmente constituida por instalaciones fotovoltaicas y eólicas, de capacidades diversas y diseminadas por el municipio.

**B-Energía de distrito:** Creación de un sistema de energía terrenal de autoconsumo compartido en un futuro parque empresarial. Con funcionalidades de generación, almacenaje y distribución de energía para calefacción y refrigeración, entre otras.

**C-Eficiencia energética de inmuebles públicos:** Optimizar la eficiencia energética de todos los equipamientos y edificios municipales. Las intervenciones contemplan, entre otras,

la instalación de estructuras de generación y aprovechamiento energético, la sustitución de elementos obsoletos o de alto consumo, el aislamiento térmico, aplicación de políticas internas, etc.

**D-Red IoT + alumbrado:** Generación de infraestructura inteligente en las principales vías urbanas y equipamientos públicos. Se persigue la reestructuración y ampliación generalizada de la capacidad de proporcionar servicios y aplicaciones, basados en tecnología IoT, por toda la ciudad. Como actuación secundaria se optimizará la funcionalidad para ciudades inteligentes, añadiendo postes inteligentes y modificando las instalaciones de alumbrado, la red de semáforos, etc. También se mejorará la eficiencia energética de todo ello.

#### 4.4 Definir los Criterios

Existiendo un Objetivo Principal definido y habiéndose determinado el conjunto de posibles Alternativas de solución, los Criterios surgen de manera natural con la pregunta *¿cómo podemos decidir qué alternativa contribuye más al logro del objetivo?*

Los criterios son aquellos atributos que permiten evaluar la importancia de cada Alternativa con relación al Objetivo Principal.

Tras sesiones con miembros del grupo de expertos, y gracias a su conocimientos, se pudieron consensuar inicialmente los Criterios: Economía, Medio Ambiente, Sociedad y Tecnología. (En el Anexo 2 puede encontrarse un listado con potenciales criterios basados en los ODS y en las Ciudades Inteligentes y Sostenibles, que puede tener utilidad para identificar criterios.)

Es importante mencionar aquí que la naturaleza del método AHP es la descomposición de lo complejo en varias partes más simples. Aplicándolo a los Criterios, si un criterio es muy general o denso, el método sugiere una descomposición en partes independientes, que faciliten su evaluación. Por ejemplo, el criterio **Economía** puede ser descompuesto en varios subcriterios como por ejemplo **Inversión** e **impacto económico**. Siguiendo esta premisa, se han descompuesto a su vez en un total de ocho subcriterios. Tras varios debates, la opinión mayoritaria es que era suficiente la utilización directa de los ocho subcriterios, dado que el análisis de los criterios iniciales no aportaba valor añadido al proceso. Así, pues, finalmente los Criterios definidos han sido ocho:

**C1-Inversión:** Menor importe de la inversión inicial. Facilidades para su materialización y financiación...

**C2-Impacto económico:** Rentas e ingresos generados, creación de empleo, menores costes y recursos necesarios, ahorros futuros respecto a la situación actual. También el impacto económico positivo inducido: generación de riqueza, reducción de costes públicos generados...

**C3-Naturaleza:** Preservación de recursos naturales, de la biodiversidad y ecosistemas. Mejor calidad del aire, el agua y la tierra...

**C4-Eficiencia Energética:** Incremento de eficiencia energética. Reducción en consumos, ahorros respecto al pasado...

**C5-Inclusión social y reducción desigualdad:** Incrementos en equidad, igualdad de oportunidades, accesibilidad, bienestar, participación ciudadana...

**C6-Impacto urbanístico y movilidad:** Mejoras urbanísticas y en la movilidad. Uso del suelo urbano. Funcionalidad y usos de la ciudad, estética...

**C7-Impacto tecnológico directo:** implementación de tecnologías y avances científicos, mejoras en TIC, nuevas prestaciones tecnológicas a los ciudadanos con capacidad de adaptación a futuras tecnologías y otros cambios...

**C8-Impacto en infraestructuras generales:** mejoras en transporte y vías de circulación, suministros, culturales, administrativas, servicios públicos, tercer sector...

#### 4.5 Construir la estructura jerárquica de la decisión

El método AHP especifica que el Objetivo General, Criterios, Subcriterios y Alternativas deben estructurarse en forma de una pirámide jerárquica, del tipo funcional lineal. El vértice superior estará formado por el Objetivo Principal. En un segundo nivel, que puede tener subniveles, estarán los Criterios y sus subcriterios. En el nivel más bajo de la jerarquía, están las Alternativas.

En caso de descomponer algún elemento en varios subelementos más simples, se añadirá un nivel adicional justo debajo del elemento descompuesto. Se añadirán tantos niveles como sea necesario. Por último, se trazarán lo que podemos llamar las líneas de evaluación: para cada elemento se trazarán líneas en sentido descendente, empezando por el objetivo principal hacia los criterios situados inmediatamente debajo. Por último, se trazarán las líneas descendentes entre los niveles más bajos de criterios (subcriterios) y las alternativas. La estructura jerárquica del caso quedaría de la siguiente forma:

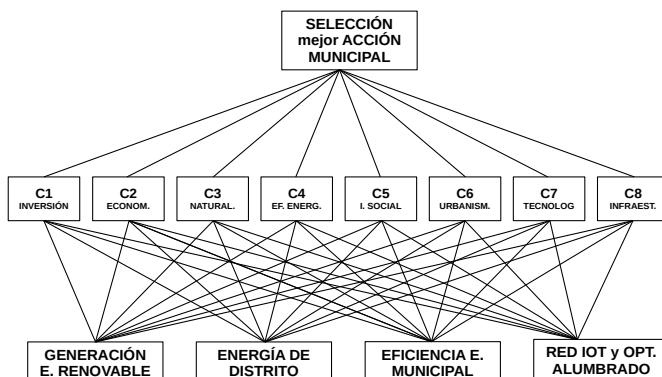


Figura 3: Esquema de estructura jerárquica aplicado al caso de estudio.

#### 4.6 Crear la matriz de comparación de Criterios y las matrices de comparación de las Alternativas

El método AHP necesita para sus comparaciones matrices cuadradas, dónde el encabezado de las filas y columnas coinciden, [18].

En una jerarquía sencilla, de tres niveles, hay una única matriz de comparación de Criterios y un número de matrices de comparación de Alternativas igual a la cantidad de criterios definidos. En nuestro caso, como se verá más adelante, la matriz de Criterios será de orden 8 (8 filas x 8 columnas) y las ocho matrices de las Alternativas serán de orden 4 (4x4).

Las matrices de comparación permiten reflejar numéricamente la importancia relativa de un elemento frente a otro.

Obviamente la importancia de un elemento respecto a sí mismo se valorará como 1, como muestra el ejemplo de la Figura 4.

Matriz de comparación por pares – CRITERIOS (respecto a Objetivo principal)				
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Criterio 1	1,00			
Criterio 2		1,00		
Criterio 3			1,00	
Criterio 4				1,00

Figura 4: Ejemplo de matriz de comparación

#### 4.7 Emitir juicios de comparación

El método recurrente para comparar, por ejemplo para calcular la importancia relativa de cada una de los criterios en el objetivo principal, es la comparación por pares (comparación binaria). Se debe realizar la comparación en todos los niveles de la jerarquía.

Comparar todos los elementos entre sí globalmente es complicado, por lo que Saaty propone la comparación de elementos por pares (pairwise en inglés). En la comparación por pares se evalúa la importancia de un elemento frente al otro para cada combinación de dos elementos.

La importancia viene determinada por cuál de los dos contribuye más al elemento que está en el nivel inmediatamente superior de la jerarquía. Por ejemplo, si se quiere evaluar la contribución de tres elementos *A*, *B* y *C* a un elemento superior denominado *H*, se preguntará: "Respecto al impacto en el elemento *H*... ¿Es más importante *A* o *B*?" . Se hará la comparación para cada una de las tres posibles combinaciones: *A* con *B*; *A* con *C* y *B* con *C*.

La segunda pregunta obligatoria del AHP para cada combinación de dos elementos es ¿Cuántas veces es más importante?. Esta segunda pregunta es la que va a permitir todos los cálculos matemáticos que hay en el método. Para responder a esa cuantificación, T.L. Saaty, ha facilitado su Escala Fundamental, (Figura 5). Es útil saber que la importancia de los elementos es matemáticamente recíproca. Dados estos valores de la escala fundamental, si *A* es 5 veces más importante que *B*, entonces *B* = 1/5 respecto a *A*

#### ESCALA FUNDAMENTAL (T. L. Saaty)

Valor	Juicio / Escala Verbal	Comentarios sobre nivel de preferencia o contribución
1	Igual Importancia	El elemento A es igual de importante que el B. Contribución idéntica.
3	Moderadamente más importante	El juicio y la experiencia favorecen ligeramente al elemento A frente al B.
5	Bastante mayor Importancia	El elemento A contribuye más, de manera fuerte y clara, que el elemento B
7	Mucho más importante	A contribuye más que B de modo contundente o muy fuerte
9	Extremadamente más importante	El elemento A es absolutamente más importante que B.
2, 4, 6 y 8	valores intermedios entre el resto	Valores intermedios asignables entre sus adyacentes (intentar evitar su uso)

Figura 5: Escala Fundamental de Saaty

#### 4.7.1 Juicios sobre Criterios

Para crear la matriz de comparación de Criterios, como se ha comentado, éstos se deben juzgar por pares, en función de su importancia relativa o impacto respecto al nivel superior, que suele ser el del Objetivo Principal de la jerarquía. Supongamos que se han identificado cuatro criterios:

		Matriz de comparación por pares – CRITERIOS (respecto a Objetivo principal)			
		Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4
Criterio 1	1,00	5,00	1/3	5,00	
	1/5	1,00	1/3	1,00	
	3,00	1,00	1,00	3,00	
	1/5	1,00	1/3	1,00	

Figura 6: Ejemplo de matriz de comparación de Criterios.

La mecánica de esta emisión de juicios es la siguiente: si el Criterio 1 contribuye al objetivo cinco veces más que el Criterio 4, pondremos con un cinco la intersección de la fila de C1 con la columna de C4 (y 1/5 en la intersección de la fila de la C4 con la columna del C1). De igual modo, si la importancia que tiene el Criterio 3 para el Objetivo es tres veces más que la que tiene el C1, pondremos un 3 en la línea de C3 y 1/3 en la fila de C1, figura 6.

#### 4.7.2 Juicios sobre las Alternativas

La mecánica de evaluación es exactamente la misma que la explicada en el apartado anterior, pero en este paso se crearán múltiples matrices. Se elaborarán una serie de matrices: una matriz para cada uno de los elementos que tienen las Alternativas inmediatamente por encima en la jerarquía. Se usará la Escala Fundamental para puntuar cada alternativa en función de cada elemento del nivel superior en la jerarquía. En el ejemplo que sigue, se puntuaba la preferencia desde el punto de vista del Criterio 3.

		Matriz de comparación por pares – ALTERNATIVAS (Preferencia de las alternativas considerando sólo el Criterio 3)			
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Alternativa 1	1	1/9	7,00	9,00	
	9	1	7	9	
	1/7	1/7	1	5	
	1/9	1/9	1/5	1	

Figura 7: Ejemplo de matriz comparación de Alternativas respecto a un supuesto Criterio 3

En nuestro caso real, se ha contado con las 14 personas expertas citadas en el punto 4.2. Cada experto ha generado una matriz de Criterios y, además, ocho matrices de alternativas.

#### 4.8 Sintetizar las matrices para obtener prioridades

En el caso de que un grupo de expertos haya emitido sus juicios, el primer paso consiste en la consolidación de las matrices individuales mediante la media geométrica, tal como indica el método AHP (no aplicable en caso de ejecución del AHP por una única persona).

El segundo paso, con carácter optativo, consiste en transformar la matriz consolidada aplicando una escala. La escala geométrica es una de las más habituales, si bien pueden aplicarse la logarítmica o la exponencial, entre otras. En nuestro caso práctico se ha transformado la matriz consolidada mediante la escala geométrica.

El tercer y último paso para cada matriz consolidada consiste transformar matemáticamente las cifras de las matrices de los juicios en un único valor para cada fila de la matriz. Este procedimiento es conocido como la *Solución del Eigenvector* (también Vector de Prioridad, Vector propio o Autovector), que es frecuentemente utilizado en cálculos de ingeniería. Por suerte, existen herramientas informáticas, como las utilizadas aquí, que hacen automáticamente todo este proceso, que además conlleva ciclos de cálculo repetitivos, [18].

#### 4.8.1 Síntesis de la matriz de Criterios y cálculo de vectores de prioridad (*Eigenvector*)

La Figura 8 muestra el *Eigenvector*, que en el contexto del AHP se suele llamar Vector de prioridad, obtenido a partir de las juicios sobre los criterios comentados en el apartado 4.7.1. Los datos obtenidos establecen el peso relativo con el que ponderará más adelante cada criterio. Cuanto mayor es el valor, más ponderación tendrá para influir en la decisión final. En la tabla citada, los pesos de 0,46 (46%) en Economía y 0,14 en Ef. Energética nos están diciendo que la importancia de la Economía en el Objetivo Principal es 3,3 veces la de la Ef. Energética (0,46/0,14 o 46% sobre 14%).

#### Comparación de Criterios según importancia para el Objetivo Principal (+ cálculo Eigenvector)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Vector de prioridad
									PESO
<b>C1 Inversión</b>	1,0	0,0	0,1	0,1	0,3	2,6	0,5	0,4	<b>0,02</b>
<b>C2 Economía</b>	48,2	1,0	1,5	2,1	6,1	94,4	12,0	7,2	<b>0,46</b>
<b>C3 Naturaleza</b>	14,1	0,7	1,0	1,3	2,0	65,6	2,4	1,9	<b>0,19</b>
<b>C4 Ef.energét.</b>	7,0	0,5	0,8	1,0	1,5	50,8	1,8	1,4	<b>0,14</b>
<b>C5 Incl.social</b>	3,3	0,2	0,5	0,7	1,0	15,6	1,2	1,0	<b>0,07</b>
<b>C6 Urbanism</b>	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	0,1	0,1	<b>0,00</b>
<b>C7 Tecnolog.</b>	2,0	0,1	0,4	0,5	0,8	7,6	1,0	0,7	<b>0,05</b>
<b>C8 Infraestr.</b>	2,6	0,1	0,5	0,7	1,0	8,4	1,5	1,0	<b>0,07</b>
LAMBDA <sub>max</sub> = 8,41      C.R.= 0,04      Escala Geométrica									

Figura 8: Comparación real Criterios por pares de criterios según importancia en Objetivo General. Cálculo del Eigenvector

#### 4.8.2 Síntesis de matrices de Alternativas y cálculo de vectores de prioridad

El proceso de transformación para las matrices de las alternativas es exactamente el descrito en el apartado anterior. Hay que indicar que las matrices de las Alternativas corresponden a las líneas que se aprecian en la *Figura 3*, en la parte inferior de la jerarquía, que unen las alternativas con los criterios ubicados inmediatamente por encima.

Comparación de Alternativas, para cada Criterio

C1 Inversión					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	0,4	0,0	0,1		<b>0,03</b>
<b>B</b>	<b>2,4</b>	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,08</b>
<b>C</b>	<b>33,2</b>	<b>7,9</b>	<b>1,0</b>	<b>2,3</b>	<b>0,67</b>
<b>D</b>	<b>8,2</b>	<b>2,2</b>	<b>0,4</b>	<b>1,0</b>	<b>0,22</b>

C2 Economía					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	11,6	52,4	184,6		<b>0,93</b>
<b>B</b>	<b>0,1</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>4,3</b>	<b>0,05</b>
<b>C</b>	<b>0,0</b>	<b>0,5</b>	<b>1,0</b>	<b>1,4</b>	<b>0,02</b>
<b>D</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,01</b>

C3 Naturaleza					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	4,3	19,8	126,5		<b>0,83</b>
<b>B</b>	<b>0,2</b>	<b>1,0</b>	<b>2,3</b>	<b>10,9</b>	<b>0,12</b>
<b>C</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>1,0</b>	<b>2,3</b>	<b>0,04</b>
<b>D</b>	<b>0,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,4</b>	<b>1,0</b>	<b>0,01</b>

C4 Ef.energét.					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	9,8	63,9	184,6		<b>0,92</b>
<b>B</b>	<b>0,1</b>	<b>1,0</b>	<b>2,4</b>	<b>6,7</b>	<b>0,06</b>
<b>C</b>	<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>0,02</b>
<b>D</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>	<b>0,6</b>	<b>1,0</b>	<b>0,01</b>

C5 Incl.social					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	6,0	3,4	0,1		<b>0,06</b>
<b>B</b>	<b>0,2</b>	<b>1,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,0</b>	<b>0,01</b>
<b>C</b>	<b>0,3</b>	<b>1,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,01</b>
<b>D</b>	<b>12,3</b>	<b>118,2</b>	<b>80,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,92</b>

C6 Urbanism					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	0,1	8,7	2,0		<b>0,06</b>
<b>B</b>	<b>16,0</b>	<b>1,0</b>	<b>139,9</b>	<b>34,9</b>	<b>0,91</b>
<b>C</b>	<b>0,1</b>	<b>0,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,6</b>	<b>0,01</b>
<b>D</b>	<b>0,5</b>	<b>0,0</b>	<b>1,7</b>	<b>1,0</b>	<b>0,02</b>

C7 Tecnolog.					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	1,2	1,5	0,6		<b>0,24</b>
<b>B</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>1,1</b>	<b>0,5</b>	<b>0,19</b>
<b>C</b>	<b>0,7</b>	<b>0,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,17</b>
<b>D</b>	<b>1,6</b>	<b>2,1</b>	<b>2,4</b>	<b>1,0</b>	<b>0,40</b>

C8 Infraestr.					Prioridad
A	B	C	D		
1,0	0,0	1,2	0,1		<b>0,02</b>
<b>B</b>	<b>38,8</b>	<b>1,0</b>	<b>41,9</b>	<b>1,0</b>	<b>0,58</b>
<b>C</b>	<b>0,8</b>	<b>0,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,1</b>	<b>0,02</b>
<b>D</b>	<b>17,4</b>	<b>1,0</b>	<b>19,3</b>	<b>1,0</b>	<b>0,39</b>

Escala Geométrica

ALTERNATIVAS				
A Generación renovables			C Mejora Eficiencia Eq. Mpal.	
B Energía de distrito			D IoT y Optim. Alumbrado...	

Figura 9: Comparación real de Alternativas por pares para cada criterios

En la *Figura 9* se pueden apreciar las ocho matrices, cada una con su vector de prioridad calculado en la columna derecha. Cada matriz detalla la prioridad que tiene cada alternativa en función del criterio citado en la cabecera.

#### 4.9 Chequeo del Coeficiente o Razón de Consistencia

La Razón de Consistencia (*consistency ratio*, CR) asegura que los juicios recogidos cumplen con las propiedades de transitividad y proporcionalidad. Comprueba, por tanto, la coherencia interna entre las distintas comparaciones de pares de una misma matriz. El valor límite del CR depende del orden de la matriz (n). Se considera que el vector de prioridades tiene una inconsistencia aceptable cuando es menor del 5% para n=3, del 8% para n=4, y menor del 10% para el resto de matrices. Si la razón de consistencia es superior al límite, los juicios deben volver a realizarse, o debe cambiarse algo en la estructura jerárquica (por ejemplo si dos criterios del mismo nivel no pueden evaluarse correctamente

por ser mutuamente dependientes). El CR conseguido por los expertos en las comparaciones consolidadas de los criterios ha sido de un 4,1% (*Figura 8*), por debajo del límite del 10% (n=8). Igualmente, todos los CR en las Alternativas (*Figura 9*) están por debajo del 8% (n=4). Concluimos, por tanto, que el proceso es consistente.

#### 4.10 Cálculo de las prioridades generales

Las prioridades generales son el resultado más importante buscado en todo el proceso del AHP. Este es el proceso de síntesis por el que el Vector de los Pesos (punto 4.8.1, ver "PESO" en la *Figura 8*) obtenidos de los Criterios ponderan las prioridades obtenidas en los Vectores de Prioridad de las ocho matrices de Alternativas (punto 4.8.2, ver columnas "Prioridad" de la *Figura 9*). Cada valor de preferencia de las Alternativas en las columnas de la *Figura 10* es multiplicado por el peso de cada criterio (fila superior en la *Figura 10*). La suma de cada fila es la Prioridad General (columna de la derecha), que constituye el resultado final buscado con todo el proceso AHP.

Composición y síntesis

	0,02	0,46	0,19	0,14	0,07	0,00	0,05	0,07	Impacto Compuesto de Acciones A. Local
	INV	ECO	NAT	EF.E	LSO	URB	TEC	INF	
<b>A</b>	0,03	0,93	0,83	0,92	0,06	0,06	0,24	0,02	<b>0,731</b>
<b>B</b>	0,08	0,05	0,12	0,06	0,01	0,91	0,19	0,58	<b>0,108</b>
<b>C</b>	0,67	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,17	0,02	<b>0,039</b>
<b>D</b>	0,22	0,01	0,01	0,01	0,92	0,02	0,40	0,39	<b>0,122</b>

Figura 10: Síntesis real de matrices y resultado final

#### 4.11 Análisis de sensibilidad

Este análisis permite examinar el grado de sensibilidad en los resultados obtenidos, mediante la variación de los valores (uno cada vez). En cada variación se conservan las proporciones del resto de resultados obtenidos, y a la vez todo sigue sumando 100%. Estos ejercicios ayudan a comprender con qué fiabilidad se puede asegurar que el resultado obtenido es correcto. Para entender la idea, son simulaciones del tipo: ¿qué pasaría si el resultado concreto de una alternativa fuera un 10% más bajo?, etc. En este trabajo no se ha realizado el análisis de sensibilidad, tarea que queda como una potencial mejora o trabajo futuro.

#### 4.12 Ranking de las alternativas y selección de la mejor

El resultado final buscado por el método AHP es la clasificación cuantificada (ranking) de las posibles soluciones u opciones (las Alternativas). La alternativa que más puntuación obtenga por medio de la técnica del AHP será aquella que más contribuya al Objetivo General.

ALTERNATIVAS	PRIORIDAD	RANKING
A Generación renovables	<b>73,1%</b>	<b>1</b>
B Energía de distrito	10,8%	3
C Mejora Eficiencia Eq. Mpal.	3,9%	4
D IoT y Optim. Alumbrado...	12,2%	2

Figura 11: Síntesis real de matrices y resultado final

## 5 RESULTADOS

El objetivo del trabajo es priorizar las cuatro actuaciones municipales dadas, en función su potencial contribución al Objetivo de "Ser una ciudad más inteligente y sostenible (basándose en los ODS de Naciones Unidas)". Según los expertos, tal como muestra la *Figura 10*, la actuación que más contribuye para alcanzar el Objetivo es la "A-Creación de una infraestructura de generación de energía renovable", con un ratio del 73%. La segunda prioridad es la "D-Generación de infraestructura inteligente-IoT" que, con un 12%, representa una importancia seis veces menor. Con una ponderación similar queda la alternativa de "B-Energía de Distrito", cuantificada en un 11%. Por último, la "Optimización energética de equipamientos y edificios públicos" ha quedado relegada al 4%.

La mayor valoración que se puede apreciar en la matriz de Criterios (*Figura 8*) es la del criterio Económico, que obtiene un peso del 46%, lo que supone una importancia 2,4 veces mayor que el siguiente criterio. Con un 19%, está el de Naturaleza, que incluye la preservación de recursos naturales, biodiversidad y ecosistemas. El criterio de Eficiencia Energética, en un tercer lugar, obtiene una ponderación del 14%. Por último, en esta toma de decisión y para el objetivo buscado, los otros cinco criterios tienen un peso casi irrelevante.

En cuanto a las matrices con valoraciones de las Alternativas de decisión, obtenidas para cada uno de los ocho criterios (*Figura 9*), caben destacar los siguientes resultados:

- Del primer criterio, C1-Inversión, la alternativa "C-Mejora de la Eficiencia de Equipamientos Municipales" obtiene un 67%, por ser la de menor importe y más asequible. Sigue "D-Infraestructuras-IoT" con un 22%. Las otras dos alternativas obtienen un porcentaje muy bajo por a su elevada inversión.
- Para el segundo criterio, C2-Economía, la "A-Generación de Energías Renovables" es la alternativa con una mayor prioridad, con un valor del 93%. Esto es debido a que el impacto generado posteriormente es mucho más significativo que el del resto de alternativas.
- En C3-Naturaleza, la "A-Generación de Energías Renovables" consigue un del 83% por sus impactos positivos sobre el medio ambiente, tanto directa como indirectamente.
- Cuarto criterio, C4-Eficiencia Energética, la "A-Generación de Energías Renovables" con un 92%, gracias a la importante generación de energía verde.
- Para C5-Inclusión Social, la "D-Infraestructuras Inteligentes y Red IoT" es la actuación municipal valorada en un 92%. Los expertos han considerado que esta es la alternativa que más impacto tiene sobre los ciudadanos entre las cuatro posibles. También es la que más prestaciones tecnológicas aporta.
- Del C6-Urbanismo, la "B-Energía de Distrito" alcanza el 91%. Esta alternativa es la que más afecta a la distribución urbana y a parte de la vida ciudadana.
- En cuanto al C7-Impacto tecnológico directo, la alternativa con mayor preferencia es "D-Infraestructuras Inteligentes y Red IoT", con un valor del 40%, por los avances en las TIC y las nuevas prestaciones para la ciudad y sus ciudadanos. La "A-

Generación de Energías Renovables" alcanza un 24% y la alternativa "B-Energía de Distrito" queda con un 19%.

- Para finalizar, el C8-*Impacto en infraestructuras generales*, la "B-Energía de Distrito" y la "D-Infraestructuras Inteligentes y Red IoT" tienen un valor de 58% y 39% respectivamente.

También hemos de destacar que los resultados del Coeficiente de Consistencia se han conseguido mantener dentro de los límites adecuados. Esto es importante porque denota la coherencia interna y el consenso alcanzado por los expertos en los juicios recogidos durante todo el proceso.

## 6 CONCLUSIONES

De las cuatro alternativas de actuación municipal, la seleccionada es la "A-Creación de una Infraestructura de Generación de Energía Renovable". El peso final obtenido por esta opción, el 73%, es un indicador claro de que las alternativas son muy diferentes entre sí y que las ventajas aportadas por la opción elegida son significativamente superiores a las del resto. Analíticamente vemos que los expertos han determinado que:

- Tan sólo tres de los ocho criterios ponderaban un 79% de la decisión final; C2-Economía, C3-Naturaleza y C4-Eficiencia Energética.
- Justamente, la importancia obtenida por la alternativa elegida, la "A", para cada uno de esos tres criterios ha sido 93%, 83% y 92%.

Si bien las razones de la elección son perfectamente válidas, hay que decir que dos aspectos en esta utilización del método AHP han favorecido que las diferencias fueran tan notables:

- Se ha cominado a los expertos a utilizar sólo los números impares de la Escala fundamental de Saaty.
- Los cálculos de las prioridades se han realizado usando la escala geométrica.

También hemos podido constatar las bondades y el gran potencial del Proceso Analítico Jerárquico.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a quienes han hecho posible la elaboración de este trabajo. Especialmente debo agradecer a mi tutor por su continuo soporte durante todo el proceso, ya que su dedicación ha sido fundamental para el resultado final.

También quiero agradecer a todos y cada uno de los catorce expertos y expertas que han participado en la aplicación del método AHP. Su entusiasmo, experiencia y conocimientos han sido cruciales en la ejecución del modelo y en la obtención de resultados confiables. Una factor clave que ha permitido y facilitado la elaboración cuantitativa del caso práctico ha sido la utilización del modelo de hoja de cálculo creado por Klaus D. Goepel, su altruista creación ha realizado los complejos cálculos, haciendo muy sencilla la obtención de los resultados, [17].

Finalmente, quiero agradecer el soporte recibido a las personas de mis entornos laboral, personal y familiar, cuya enumeración sería extensa, pero que merecen estar mencionadas aquí.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. McEvedy, R. Jones, *Atlas of world population history*. Great Britain, 1978.
- [2] United Nations, Department of Economic and social Affairs, *The speed of urbanization around the world*, 2018
- [3] United Nations, *The World's Cities in 2016*. doi: 10.18356/8519891f-en, 2016
- [4] United Nations, "World Urbanization Prospects: The 2018 Revision" [https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdfU4\\_World\\_UrbanizationProspects-The2018Revision\\_WUP2018-KeyFacts.pdf](https://population.un.org/wup/publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdfU4_World_UrbanizationProspects-The2018Revision_WUP2018-KeyFacts.pdf). 2018
- [5] Madzik P, Falát L (2022) State-of-the-art on analytic hierarchy process in the last 40 years: Literature review based on Latent Dirichlet Allocation topic modelling. *PLoS ONE* 17(5): e0268777. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268777>
- [6] Vargas LG. An overview of the analytic hierarchy process and its applications. *European Journal of Operational Research*. 1990; 48(1):2–8.
- [7] William Ho , Xin Ma , The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Research* (2017), doi: 10.1016/j.ejor.2017.09.007
- [8] Kengpol, A., 2008. Design of a decision support system to evaluate logistics distribution network in Greater Mekong Subregion Countries. *International Journal of Production Economics* 115 (2), 388-399.
- [9] Kull, T.J., Talluri, S., 2008. A supply risk reduction model using integrated multicriteria decision making. *IEEE Transactions on Engineering Management* 55 (3), 409-419.
- [10] Mafakheri, F., Breton, M., Ghoniem, A., 2011. Supplier selection-order allocation: A two-stage multiple criteria dynamic programming approach. *International Journal of Production Economics* 132 (1), 52-57.
- [11] Ishizaka, A., Labib, A., 2011. Review of the main development in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications* 38 (11), 14336-14345.
- [12] Quezada, L.E., López-Ospina, H.A., 2014. A method for designing a strategy map using AHP and linear programming. *International Journal of Production Economics* 158, 244-255.
- [13] R. F. Da Silva, M. M. Bellinello, G. F. M. De Souza, S. Antomarioni, M. Bevilacqua, and F. E. Ciarapica, "Deciding a Multicriteria Decision-Making (MCDM) Method to Prioritize Maintenance Work Orders of Hydroelectric Power Plants," *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8281, Dec. 2021, doi: 10.3390/en14248281.
- [14] V. Bali, V. Bhatnagar, J. Lu, and K. Banerjee, Eds., *Decision Analytics for Sustainable Development in Smart Society 5.0: Issues, Challenges and Opportunities*. In *Asset Analytics*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-1689-2.
- [15] H. M. Arslan, "Current classification of multi criteria decision analysis methods and public sector implementations," *public administration*, 2017
- [16] T. L. Saaty and L. G. Vargas, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, vol. 175. in International Series in Operations Research & Management Science, vol. 175. Boston, MA: Springer US, 2012. doi: 10.1007/978-1-4614-3597-6.
- [17] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. in *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. United Nations, 2023. doi: 10.18356/9789210024938.
- [18] Klaus D. Goepel, (2013). Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs, *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*, Kuala Lumpur 2013 DOI: <https://doi.org/10.13033/isahp.y2013.047>
- [19] R. Register, *Ecocity Berkeley: building cities for a healthy future*. Berkeley, Calif: North Atlantic Books, 1987.
- [20] "U4SSC-brochure.pdf." Accessed: Apr. 12, 2024. [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/obp/tut/T-TUT SMARTCITY-2017-8-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/obp/tut/T-TUT SMARTCITY-2017-8-PDF-E.pdf)
- [21] F. Caprotti and L. Yu, *Sustainable Cities in Asia*, 1st de. Abingdon, Oxon; New York, NY: Routledge, 2018.: Routledge, 2017. doi: 10.4324/9781315643069
- [22] Ajuntament de Sant Cugat del Valles, "Un eje económico de primer orden: los 7 parques empresariales de Sant Cugat." Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://investsantcugat.cat/es/parques-empresariales/>
- [23] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*, Second Edition., vol. 195. in International Series in Operations Research & Management Science, vol. 195. Boston, MA: Springer US, 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-7279-7.
- [24] T. L. Saaty, *Multicriteria decision making: the analytic hierarchy process ; planning, priority setting, resource allocation*, 2. ed., with New material added. in *The analytic hierarchy process series*, no. 1. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [25] E. Mu and M. Pereyra-Rojas, "Understanding the Analytic Hierarchy Process," in *Practical Decision Making*, in *SpringerBriefs in Operations Research*., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 7–22. doi: 10.1007/978-3-319-33861-3\_2.
- [26] V. Bali, V. Bhatnagar, J. Lu, and K. Banerjee, Eds., *Decision Analytics for Sustainable Development in Smart Society 5.0: Issues, Challenges and Opportunities*. In *Asset Analytics*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. doi: 10.1007/978-981-19-1689-2.

## ANEXOS

### A1. Documentación entregada al panel del expertos. Contexto y detalles para ponderar las 4 actuaciones a priorizar:

En general, para tener un referente rico en detalles, se elige como orientación las características actuales del municipio español de Sant Cugat del Vallès:

- Mediana urbe de Europa Occidental. Larga historia y crecimiento muy intenso en los últimos 30 años, principalmente por inmigración nacional.
- A 30 km de una gran ciudad, sus coordenadas apróx. Son Latitud: 41°28'N – Longitud: 2°5' E.
- A 124 m de altitud sobre el nivel del mar, el clima es Mediterráneo litoral, con temperatura media de 15,2°C y una amplitud térmica moderada (media máximas 21,5°C, media de mínimas 9,7°C).
- El nivel de insolación media-alta: 2500 horas de sol/año; irradiación 5,3 kWh/m<sup>2</sup>/día y Humedad relativa media de un 68%.
- Precipitación lluviosa anual con una media de 520mm.
- Velocidad media del viento 1,5m/s, principalmente de componente oeste.
- Superficie 4.830 Hectáreas (48km<sup>2</sup>). De ellas, 2.340Ha son forestales, no urbanizables, que están ubicadas en la periferia del núcleo urbano. Un 44% del municipio pertenece a un Parque Natural protegido.
- Siete Parques empresariales están en pleno funcionamiento, casi en su totalidad colindantes, con una extensión total de 630 hectáreas
- Un 90% de los edificios son viviendas. De éstas, un 72% son viviendas de un sólo inmueble (casas unifamiliares). La mayoría de ellas han sido construidas entre 1990 y 2009.
- Los servicios predominantes en el municipio son: actividades técnicas, administrativas e inmobiliarias un 31%, transporte, información y comunicaciones un 20%, comercio 20%, administración pública 16%, actividades financieras y seguros 8% y hostelería y otros 5%.
- 100.000 habitantes: El 18% tiene de 0 a 14 años y el 67% entre 15 y 64 años. La tasa de crecimiento de la población prevista para los próximos 10 años es de un 12% anual.
- La población ocupada es un 58%, y de ellos un 65% trabaja fuera del municipio.
- Renta per capita alta: 50.000€/año
- Consumo de agua total: 6,7 millones m<sup>3</sup>/año; 66% doméstico, 29% industrial 5% consumo municipal. El 83% de ese consumo llega a los contadores.
- El consumo anual total de energía de todas las fuentes es de 1.400-GWh. Distribución según la fuente energética: 35% Combustibles líquidos, 34% Gas Natural, 31% Electricidad. Distribución del consumo por sectores: 35% Transporte (incluye el 0,8% de la flota municipal), 35% Sector terciario (incluye el 0,9% de edificios y equipamientos municipales; también el 0,4% de alumbrado público y semáforos) y 30% residencial o doméstico.(No considerado el sector industrial, ni el primario)
- De esa energía total, el consumo eléctrico es de 435GWh, destinado éste un 38% a la industria, 30% servicios; 19% doméstico, sector primario).
- Chequear estos valores y añadir los consumos eléctricos de la industria.
- El 27% de las luminarias del alumbrado público son de tipo LED.
- La producción de electricidad autogenerada localmente es de 0,3 Gwh/año (origen: fotovoltaica en domicilios).
- Toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas anualmente, por sectores: Terciario 154.000t. (2,730t. De equipam. Municipales y 1.400t. Por alumbrado público), Transporte 126.720t. (2.870t. De la flota municipal), Residencial 108.439t., Residuos 16.569t. Y Agua 1.708t. (No considerado el sector industrial ni el primario).

### A2. Listado de ideas para identificar potenciales criterios relevantes (están basados en Ciudades Inteligentes y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible)

#### • Para Medio ambiente:

- Biodiversidad y preservación de recursos y ecosistemas.
- Calidad del aire, el agua y la tierra.
- Consumo de Energía.
- Mejora de la calidad del agua
- Uso eficiente de recursos hídricos
- Protección de ecosistemas acuáticos
- Aumento de energías renovables
- Eficiencia energética
- Investigación en energías limpias
- Acceso a servicios de saneamiento
- Gestión integral de recursos hídricos
- uso adecuado de los recursos genéticos.

#### • Para Sociedad y Cultura:

- Seguridad y Resiliencia (reducción del riesgo de desastres).
- Vivienda, Alimentación.
- Inclusión social: Equidad, igualdad de oportunidades,
- Accesibilidad,
- Bienestar
- Participación ciudadana.
- Educación, Salud y Cultura
- Impacto urbanístico y a la movilidad. Uso del suelo.
- Gobernanza municipal y marco legislativo.
- Resiliencia a desastres
- Accidentes de tráfico
- Educación para el desarrollo sostenible
- Participación comunitaria en gestión del agua
- Acceso universal a energía
- Reducción de pobreza
- Acceso a servicios básicos
- Eliminar discriminación urbanística
- Igualdad de género
- Protección de derechos laborales
- Políticas de protección social
- Facilitación de migración

#### • Para Economía:

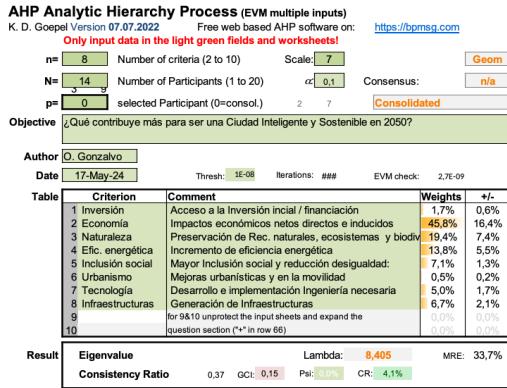
- Producción de bienes y servicios
- Beneficio económico
- Puestos de trabajo, nivel de empleo,
- Generación de riqueza y ahorros.
- Economía circular y economía local
- Retorno de la Inversión (ROI),
- Coste, financiación y recursos necesarios
- Factibilidad administrativa y eficiencia
- Igualdad en recursos económicos
- Crecimiento económico sostenido
- Aumento de la productividad
- Fomento de pymes
- Producción y consumo sostenibles
- Impulso de comercio local
- Movilización y aumento de los recursos financieros.

#### • Para Tecnología&infraestructuras:

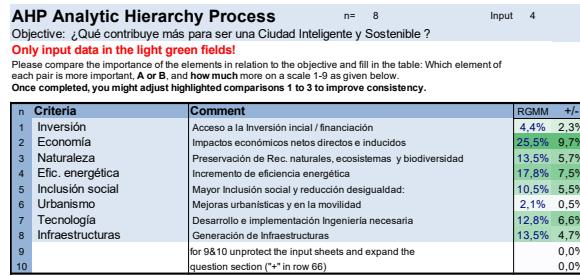
- Implementación técnica, dificultades.
- Marco temporal de implementación
- Riesgos técnicos o estructurales
- Futura contribución tecnológica
- Factibilidad
- Escalabilidad
- Robustez
- Estandarización
- Fiabilidad
- Impacto en Infraestructuras de Tecnologías de la Información y Comunicación
- Valor añadido a servicios existentes
- Potencial de actualizaciones y mejoras.
- Infraestructura sostenible
- Industria inclusiva y sostenible
- Modernización tecnológica
- Investigación científica y tecnológica
- Infraestructura resiliente
- Desarrollo tecnológico e innovación
- Acceso a TIC e Internet
- Mejora del traspaso de tecnología
- Promoción de tecnologías ecológicamente racionales

Ideas y palabras clave para confirmar la relevancia o impacto en el objetivo (o, en su caso, en el nivel superior de la jerarquía): intensidad, extensión, tiempo de ejecución, duración, periodicidad, reversibilidad, recuperabilidad, proyección futura, efectos principales, efectos colaterales, cantidad, calidad, evaluabilidad, factibilidad, escalabilidad, robustez, eficiencia técnica, estandarización, fiabilidad, eficacia, durabilidad, complejidad de ejecución.A3. Ejemplo de la hoja de cálculo de Klaus D. Goepel (Criterios en base al objetivo general)

### A3. Ejemplo de la hoja de cálculo de Klaus D. Goepel (Criterios en base al objetivo general)



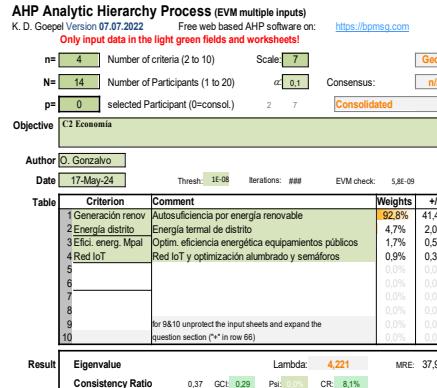
Matrix	normalized principal Eigenvector									
	Inversión	Economía	Naturaleza	Efic. energética	Inclusión social	Urbanismo	Tecnología	Infraestructuras	-	-
Inversión	1	0	1/9	1/7	2/7	2/5	1/2	2/5	-	-
Economía	2 48/15	1	1 1/2	2 1/7	6 1/6	9 4/3	12	7 2/9	-	-
Naturaleza	3 14/9	2/3	1	1 2/7	2	6 5/5	2 2/5	1 8/9	-	-
Efic. energética	4 7	4/9	7/9	1 1/2	1 1/2	50 5/6	1 5/6	1 2/5	-	-
Inclusión social	5 3 1/3	1/6	1/2	2/3	1	15 3/5	1 1/4	1	-	-
Urbanismo	6 2/5	0	0	0 1/9	1	1/6	1/6	-	-	-
Tecnología	7 2	1/9	3/7	5/9	4/5	7 4/7	1	2/3	-	-
Infraestructuras	8 2 5/9	1/7	1/2	5/7	1	8 3/8	1 1/2	1	-	-
**	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unscaled	1	1/7	1/5	1/4	3/8	2 3/8	1/2	3/7	-	-
1	2 6/5	1/5	2 1/9	3 3/5	7 5/9	4 3/5	3 6/7	-	-	-
2	3 4/5	5/8	1 3/8	2	7	2 1/4	1 8/9	-	-	-
3	4 3/4	1/2	5/7	1 3/8	6 2/3	1 7/8	1 1/2	-	-	-
4	5 2/3	2/7	1/2	5/8	5	1 1/3	1	-	-	-
5	6 3/7	1/8	1/7	1/5	1	1/4	1/4	-	-	-
6	7 2	2/9	4/9	5/9	3/4	3 8/9	5/8	-	-	-
7	8 2 3/8	1/4	1/2	2/3	1	4 1/9	1 3/5	-	-	-
8	9 -	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	10 -	-	-	-	-	-	-	-	-	-



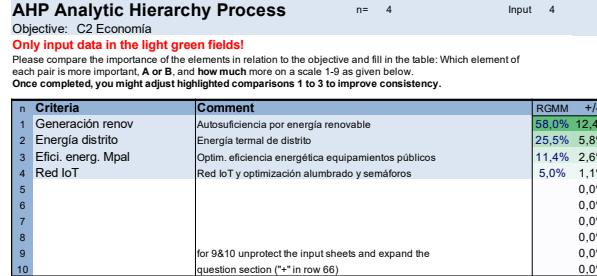
Participant 4

1	$\alpha = 0.1$	CR: 8%
Name	Weight	Date
Consistency Ratio		
Criteria more important ? Scale		
i j	A	B A or B (1-9)
1 2	Inversión	B 9
1 3		B 5
1 4		B 5
1 5		A 3
1 6		A 3
1 7		A 1
1 8		B 3
2 3	Economía	A 1
2 4		A 1
2 5		A 3
2 6		A 9
2 7		A 3
2 8		A 3
3 4	Naturaleza	B 3
3 5		A 1
3 6		A 7
3 7		A 1
3 8		A 1
4 5	Efic. energética	B 3
4 6		A 1
4 7		A 7
4 8		A 1
5 6	Inclusión social	A 1
5 7		A 5
5 8		B 3
6 7	Urbanismo	B 5
6 8		B 5
7 8	Tecnología	A 1

### A4. Ejemplo de la hoja de cálculo de Klaus D. Goepel (Alternativas en base a un criterio)



Matrix	normalized principal Eigenvector									
	Generación renov	Energía distrito	Efic. energ. Mpal	Red IoT	-	-	-	-	-	-
Generación renov	1	11 4/7	52 1/3	###	-	-	-	-	-	-
2 1/8	1	2	4 1/3	-	-	-	-	-	-	-
3 0	1/2	1	1 2/5	-	-	-	-	-	-	-
4 0	29	5/7	1	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Matrix	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Unscaled	1	4 5/9	6 5/7	8 5/9	-	-	-	-	-	-
2	2 9	2	3 1/9	-	-	-	-	-	-	-
3 1/7	1/2	1 1/2	-	-	-	-	-	-	-	-
4 1/9	1/3	2/5	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



Participant 4

1	$\alpha = 0.1$	CR: 3%
Name	Weight	Date
Consistency Ratio		
Criteria more important ? Scale		
i j	A	B A or B (1-9)
1 2	Generación renov	B 3
1 3		A 5
1 4		A 9
1 5		A 6
1 6		A 7
1 7		A 8
1 8		A 9
2 3	Energía distrito	A 3
2 4		A 5
2 5		A 6
2 6		A 7
2 7		A 8
2 8		A 9
3 4	Efic. energ. Mpal	A 3
3 5		A 5
3 6		A 7
3 7		A 8
3 8		A 9
4 5	Red IoT	A 3
4 6		A 5
4 7		A 6
4 8		A 7
5 6		A 8
5 7		A 9
5 8		A 8
6 7		A 9
6 8		A 8
7 8		A 9