

ZONIFICACIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN LA COMUNIDAD DE MADRID

ANÁLISIS PREVIO DE CAPACIDAD DE ACOGIDA

ANEXO II. MÉTODO DE JERARQUÍAS ANALÍTICAS

Noviembre 2022



OBJETIVOS
DE DESARROLLO
SOSTENIBLE



ANEXO II. Método de jerarquías analíticas

Para llevar a cabo el análisis y ponderación de los diferentes indicadores, se ha empleado el método de jerarquías analíticas -Analytical Hierarchy Process (AHP), Saaty 1980- se trata de un modelo matemático para la resolución de una decisión con criterios múltiples, con la finalidad de obtener una valoración analítica de las alternativas, mediante preguntas formuladas con base en una comparación por pares. De esta forma se obtiene una estructura jerárquica de dominancia de unos criterios respecto a los otros.

Por tanto, para comenzar el análisis se elabora una matriz donde se incluirán, tanto en las filas como en las columnas, todos los indicadores (criterios) que van a ser considerados en la toma de la decisión final.

FACTOR	INDICADOR	FAUNA	BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN		FAUNA	BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	BIODIVERSIDAD / FLORA		FAUNA	SUELO / POBLACION	GEODIVERSIDAD	PAISAJE	POBLACION
		RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y colisión	POBN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	Áreas importantes para la Conservación de las Aves (SEO/BirdLife)	Conectividad ecológica	Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios (*)	Hábitats de Interés Comunitario	Catálogo Regional de Especies Amenazadas	Capacidad agrícola: clase agrícola 3	Lugares de Interés Geológico	Unidades de Paisaje con Calidad A o M.A. o con Fragilidad A o M.A.	Suelo No Urbanizable Protegido
FAUNA	RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y colisión												
BIODIVERSIDAD / POBLACION	POBN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición												
	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición												
FAUNA	Áreas importantes para la Conservación de las Aves (SEO/BirdLife)												
BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	Conectividad ecológica												
BIODIVERSIDAD / FLORA	Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios (*)												
	Hábitats de Interés Comunitario												
FAUNA	Catálogo Regional de Especies Amenazadas												
SUELO / POBLACION	Capacidad agrícola: clase agrícola 3												
GEODIVERSIDAD	Lugares de Interés Geológico												
PAISAJE	Unidades de Paisaje con Calidad A o M.A. o con Fragilidad A o M.A.												
POBLACION	Suelo No Urbanizable Protegido												
SUMATORIO NORMALIZACION													

Figura 1. Matriz de Saaty

El AHP utiliza una escala de valores de 1 a 9 para calificar la relación entre dos elementos de la matriz.

VALOR	GRADO DE IMPORTANCIA
1	Importancia igual.
3	Importancia moderada.
5	Importancia fuerte.
7	Importancia muy fuerte o demostrada.
9	Importancia extrema.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios.

Los valores inversos, de menor importancia, serán representados desde 1/2 hasta 1/9 en dicha matriz. En la siguiente imagen se muestra la matriz completa utilizada en el análisis para la implantación de energía fotovoltaica en la región.

FACTOR	INDICADOR	FAUNA	BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN		FAUNA	BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	BIODIVERSIDAD / FLORA		FAUNA	SUELO / POBLACIÓN	GEODIVERSIDAD	PAISAJE	POBLACIÓN
		RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y caídas	PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	Áreas importantes para la Conservación de las Áreas (SIB) (BirdLife)	Conectividad ecológica	Hábitats de Interés Comunitario: Prioritarios (*)	Hábitats de Interés Comunitario	Catálogo Regional de Especies Amenazadas	Capacidad agropecuaria clase agropecuaria 3	Lugares de Interés Geológico	Unidades de Paisaje con Calidad A o M.A. o con Fragilidad A o M.A.	Suelo No Urbanizable Protegido
FAUNA	RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y caídas	1	3	3	1/3	1	1/5	1	3	1/3	3	2	5
BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN	PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	1/3	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/4	1	1/3	3
	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	1/3	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/4	1	1/3	3
FAUNA	Áreas importantes para la Conservación de las Áreas (SIB) (BirdLife)	3	3	3	1	3	1/4	1/2	3	1	3	4	7
BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	Conectividad ecológica	1	1	1	1/3	1	1/5	1/2	1/3	1/5	2	1	3
BIODIVERSIDAD / FLORA	Hábitats de Interés Comunitario: Prioritarios (*)	5	5	5	4	5	1	4	5	4	5	5	7
	Hábitats de Interés Comunitario	1	3	3	2	2	1/4	1	1/2	1	3	1/2	5
FAUNA	Catálogo Regional de Especies Amenazadas	1/3	3	3	1/3	3	1/5	2	1	1/2	3	3	4
SUELO / POBLACIÓN	Capacidad agropecuaria clase agropecuaria 3	3	4	4	1	5	1/4	1	2	1	5	5	5
GEODIVERSIDAD	Lugares de Interés Geológico	1/3	1	1	1/3	1/2	1/5	1/3	1/3	1/5	1	3	3
PAISAJE	Unidades de Paisaje con Calidad A o M.A. o con Fragilidad A o M.A.	1/2	3	3	1/4	1	1/5	2	1/3	1/5	1/3	1	3
POBLACIÓN	Suelo No Urbanizable Protegido	1/5	1/3	1/3	1/7	1/3	1/7	1/5	1/4	1/5	1/3	1/3	1
SUMATORIO NORMALIZACIÓN		16,03	28,33	28,33	10,39	23,83	3,29	13,20	16,42	9,13	27,67	25,50	49,00

Figura 2. Matriz de Saaty con valores asignados

La matriz se aborda tomando el indicador de las filas y comparándolo con el indicador de las columnas. Es decir, en el caso del extracto de matriz reflejado a continuación, como ejemplo se tomará la decisión de cuánta importancia tiene un Área Importante para la Conservación de las Aves (IBA) (A en la fila) en comparación con un Lugar de Interés Geológico (LIG) (B en la columna), resultando en este caso un 3 (celda C) la valoración asignada. Para este análisis se consideran las IBAs moderadamente más importantes que los LIGs en cuanto al valor que tendrían a la hora de evaluar los impactos que una planta fotovoltaica pudiera ocasionar en estos dos valores ambientales.

FACTOR	INDICADOR	FAUNA	BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN		FAUNA	BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	BIODIVERSIDAD / FLORA		FAUNA	SUELO / POBLACIÓN	GEODIVERSIDAD	PAISAJE	POBLACIÓN
		RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y colisión	PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	Áreas importantes para la Conservación de las Aves (SICU/BirdLife)	Conectividad ecológica	Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios (*)	Hábitats de Interés Comunitario	Catálogo Regional de Especies Amenazadas	Capacidad agrícola: clase agrícola 3	Lugares de Interés Geológico	Unidades de Paisaje con Calidad A o M-A o con Fragilidad A o M-A	Suelo No Urbanizable Protegido
FAUNA	RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y colisión	1	3	3	1/3	1	1/5	1	3	1/3	3	2	5
BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN	PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	1/3	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/4	1	1/3	3
	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	1/3	1	1	1/3	1	1/5	1/3	1/3	1/4	1	1/3	3
FAUNA A	Áreas importantes para la conservación de las Aves (SICU/BirdLife)	3	3	3	1	3	1/4	1/2	3	1	3 C	4	7

Figura 3. Ejemplo de asignación de valores comparando por pares los indicadores

Posteriormente, con objeto de facilitar cálculos matemáticos futuros se realiza una normalización (matriz normalizada) de todos los valores de la matriz de comparación por pares, esto quiere decir que el sumatorio de los valores de cada columna debe ser igual a 1.

Matriz Normalizada												
0,062	0,106	0,106	0,032	0,042	0,061	0,076	0,183	0,036	0,108	0,078	0,102	
0,021	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,025	0,020	0,027	0,036	0,013	0,061	
0,021	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,025	0,020	0,027	0,036	0,013	0,061	
0,187	0,106	0,106	0,096	0,126	0,076	0,038	0,183	0,109	0,108	0,157	0,143	
0,062	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,038	0,020	0,022	0,072	0,039	0,061	
0,312	0,176	0,176	0,385	0,210	0,304	0,303	0,305	0,438	0,181	0,196	0,143	
0,062	0,106	0,106	0,192	0,084	0,076	0,076	0,030	0,109	0,108	0,020	0,102	
0,021	0,106	0,106	0,032	0,126	0,061	0,152	0,061	0,055	0,108	0,118	0,082	
0,187	0,141	0,141	0,096	0,210	0,076	0,076	0,122	0,109	0,181	0,196	0,102	
0,021	0,035	0,035	0,032	0,021	0,061	0,025	0,020	0,022	0,036	0,118	0,061	
0,031	0,106	0,106	0,024	0,042	0,061	0,152	0,020	0,022	0,012	0,039	0,061	
0,012	0,012	0,012	0,014	0,014	0,043	0,015	0,015	0,022	0,012	0,013	0,020	
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Figura 4. Matriz normalizada

Para obtener esta normalización, se divide cada valor de la Matriz de Saaty (Figura 2) por el número total de su correspondiente columna (sumatorio normalización). Por ejemplo, siguiendo la matriz anteriormente completada para energía fotovoltaica, el resultado sería:

Para el indicador que representa las especies amenazadas incluidas en el Catálogo Regional:
 $3/16,42 = 0,183$; $(1/3)/16,42 = 0,020$; etc.

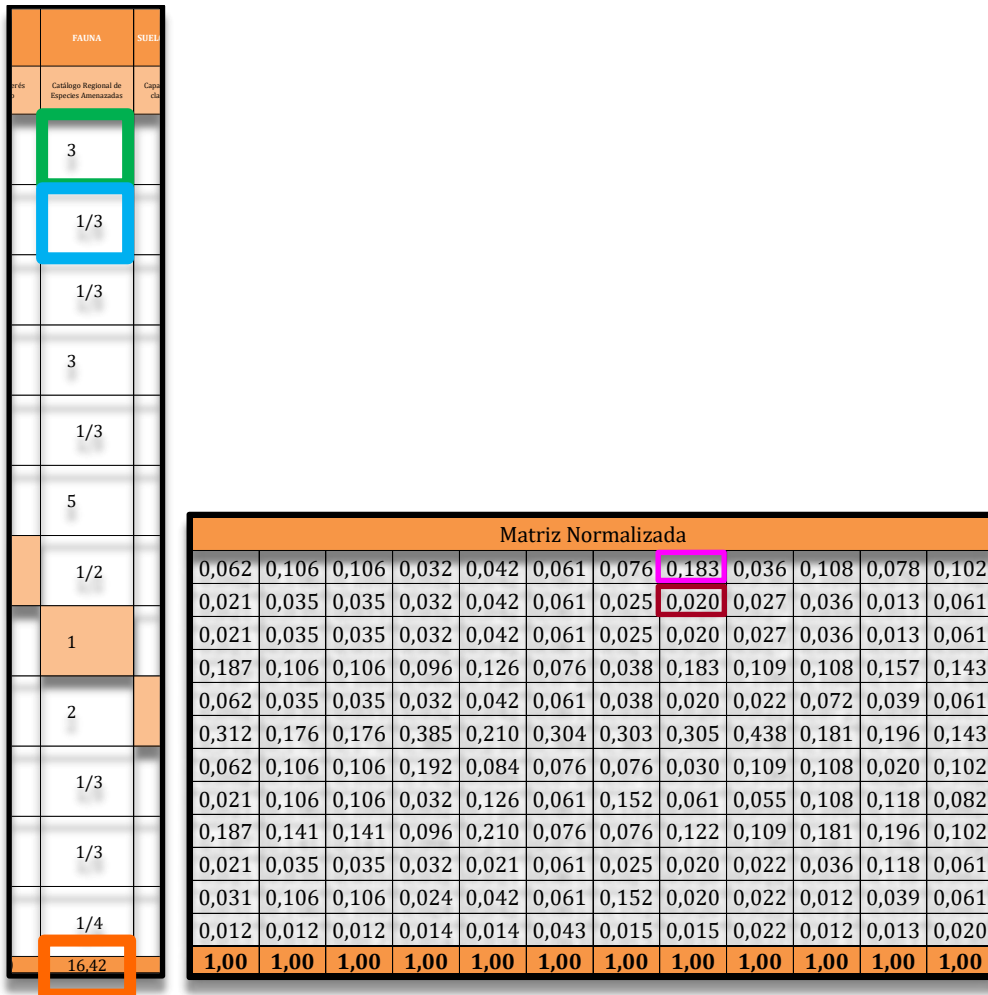


Figura 5. Ejemplo de operaciones para obtener la normalización de los valores

Una vez rellena la matriz normalizada, se realiza una ponderación de cada criterio mediante el cálculo del valor promedio, es decir, la media aritmética.

La media aritmética (ponderación) se obtiene de sumar los valores de una fila de la matriz normalizada y dividirlo por el número de criterios empleados. Por ejemplo, para el caso del indicador de Unidades de Paisaje Visual con Calidad Alta o Media-Alta o con Fragilidad Alta o Media-Alta sería:

$$\text{Ponderación} = (0,031+0,106+0,106+0,024+\dots+0,061)/12 = 0,056.$$

Matriz Normalizada												Ponderación	Indicador
0,031	0,106	0,106	0,024	0,042	0,061	0,152	0,020	0,022	0,012	0,039	0,061	0,056	Unidades de Paisaje con Calidad Alta o Media-Alta o bien con Fragilidad Alta o Media-Alta

Figura 6. Ejemplo de operaciones para obtener la ponderación de un indicador

Siendo el resultado final de ponderación para todos los indicadores los siguientes:

Matriz Normalizada												Ponderación	Indicador
0,062	0,106	0,106	0,032	0,042	0,061	0,076	0,183	0,036	0,108	0,078	0,102	0,083	RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y
0,021	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,025	0,020	0,027	0,036	0,013	0,061	0,034	PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición
0,021	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,025	0,020	0,027	0,036	0,013	0,061	0,034	Reservas de la Biosfera: Zona de Transición
0,187	0,106	0,106	0,096	0,126	0,076	0,038	0,183	0,109	0,108	0,157	0,143	0,120	Áreas Importantes para la Conservación
0,062	0,035	0,035	0,032	0,042	0,061	0,038	0,020	0,022	0,072	0,039	0,061	0,043	Conectividad ecológica-
0,312	0,176	0,176	0,385	0,210	0,304	0,303	0,305	0,438	0,181	0,196	0,143	0,261	Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios (*)
0,062	0,106	0,106	0,192	0,084	0,076	0,076	0,030	0,109	0,108	0,020	0,102	0,089	Hábitats de Interés Comunitario
0,021	0,106	0,106	0,032	0,126	0,061	0,152	0,061	0,055	0,108	0,118	0,082	0,086	Catálogo Regional de Especies Amenazadas
0,187	0,141	0,141	0,096	0,210	0,076	0,076	0,122	0,109	0,181	0,196	0,102	0,136	Capacidad agrológica: clase 3
0,021	0,035	0,035	0,032	0,021	0,061	0,025	0,020	0,022	0,036	0,118	0,061	0,041	Lugares de Interés Geológico
0,031	0,106	0,106	0,024	0,042	0,061	0,152	0,020	0,022	0,012	0,039	0,061	0,056	Unidades de Paisaje con Calidad Alta o Media-Alta o
0,012	0,012	0,012	0,014	0,014	0,043	0,015	0,015	0,022	0,012	0,013	0,020	0,017	Suelo No Urbanizable Protegido
1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1	TOTAL

Figura 7. Resultado ponderación de indicadores

Seguidamente, para verificar que la matriz inicial tiene coherencia matemática, ha de calcularse la relación de consistencia de dicha matriz ($CR=CI/RI$), para ello se realiza una multiplicación de matrices, donde se opera con la matriz inicial (Figura 2) y con el valor de la ponderación (columna ponderación de la figura 7).

Por ejemplo, en una matriz se operaría de la siguiente manera:

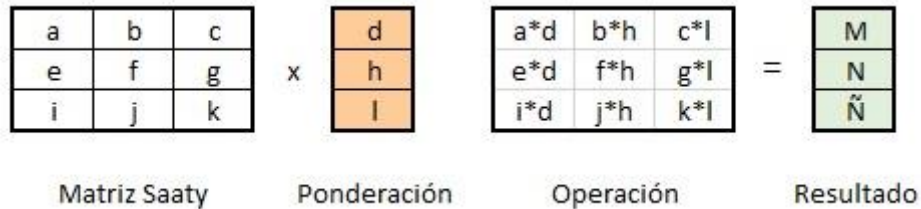


Figura 8. Operaciones matriz

Para llevar a cabo dicha verificación, en el caso que nos ocupa, se multiplica la matriz con los criterios de evaluación (Figura 2) con los valores de la matriz normalizada (Figura 4).

Por ejemplo, en la primera fila quedaría así dicha multiplicación de matrices:

$$(1*0,062) + (3*0,106) + (3*0,106) + (1/3*0,032) + \dots + (5*0,102) = 1,134$$

FACTOR	INDICADOR	FAUNA	BIODIVERSIDAD / POBLACIÓN		FAUNA	BIODIVERSIDAD / FAUNA / FLORA	BIODIVERSIDAD / FLORA		FAUNA	SIEMBRO / POBLACIÓN	GEODIVERSIDAD	PAISAJE	POBLACIÓN
		RD 1432/2008 ZPA medidas contra el comercio electrónico y colofón	FORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	Reserva de la Biosfera: Zona de Transición	Áreas importantes para la Conservación de las Aves (SICRI BirdLife)	Conectividad ecológica	Hábitats de Interés Comunitario: Prerriarios (*)	Hábitats de Interés Comunitario	Catálogo Regional de Especies Amenazadas	Capacidad agrícola: clase agrícola 3	Lugares de Interés Geológico	Unidades de Paisaje con Calidad A o M.A. o con Fragilidad A o M.A.	Suelo No Urbanizable Protegido
FAUNA	RD 1432/2008 ZPA medidas contra el comercio electrónico y colofón	1	3	3	1/3	1	1/5	1	3	1/3	3	2	5

Matriz Normalizada												
0,062	0,106	0,106	0,032	0,042	0,061	0,076	0,183	0,036	0,108	0,078	0,102	

Esta operación en el modelo de zonificación ambiental resulta:

RD 1432/2008 ZPA medidas contra electrocución y colisión	1,134
PORN Sierra de Guadarrama: Zona de Transición	0,434
Reservas de la Biosfera: Zona de Transición	0,434
Áreas Importantes para la Conservación de las Aves (SEO/Birdife)	1,672
Conectividad ecológica-Autopistas Salvajes (WWF España) y Corredores Ecológicos 2os CM	0,576
Hábitats de Interés Comunitario Prioritarios (*)	3,646
Hábitats de Interés Comunitario	1,183
Catálogo Regional de Especies Amenazadas	1,146
Capacidad agrológica: clase agrológica 3	1,890
Lugares de Interés Geológico	0,556
Unidades de Paisaje con Calidad A o M-A o con Fragilidad A o M-A	0,727
Suelo No Urbanizable Protegido	0,224
nmax (SUMA)	13,622

Una vez calculado nmax, se calcula el índice de consistencia (CI):

$$CI = (nmax-n)/(n-1)$$

Siendo n el número total de criterios (indicadores) utilizados (en el caso que nos ocupa n=12)

$$CI = (13,622-12)/11$$

$$CI = 0,147$$

Para el índice aleatorio (RI) se emplea la siguiente ecuación:

$$RI = 1,98 \times (n-2)/n$$

$$RI = (1,98 \times 10)/12$$

$$RI = 1,650$$

Por tanto, CR= CI/RI

$$CR = 0,147/1,650$$

$$CR = 0,089$$

Fuente: Ecuaciones tomadas de Saaty (1980)

Si el **valor** obtenido para **CR es menor a 0,10** se considera que los **juicios asignados** en la matriz de comparación por pares **son suficientemente adecuados**.