

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Estudio de localización de una central fotovoltaica de 50 MW en Andalucía occidental mediante un SIG

Autor: Pablo Gandullo Romero

Tutor: José Lázaro Amaro Mellado

Dpto. Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Estudio de localización de una central fotovoltaica de 50 MW en Andalucía occidental mediante un SIG

Autor:

Pablo Gandullo Romero

Tutor:

José Lázaro Amaro Mellado

Profesor asociado

Dpto. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2022

Trabajo Fin de Máster: Estudio de localización de una central fotovoltaica de 50 MW en Andalucía occidental mediante un SIG

Autor: Pablo Gandullo Romero

Tutor: José Lázaro Amaro Mellado

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar las presentes líneas para agradecer a mis padres, familia y amigos como pilares fundamentales para alcanzar las metas fijadas a nivel académico.

De igual manera, agradecer al tutor toda la atención, apoyo y esfuerzo dedicado al presente trabajo.

Resumen

El presente trabajo aborda la determinación de la localización para una posible implantación de una central fotovoltaica en el área occidental de la comunidad autónoma de Andalucía. Con ello, se pretende explotar las cualidades de la citada área y aprovechar el gran despliegue fotovoltaico que ha eclosionado en la península ibérica durante los últimos lustros. De esta manera, se puede obtener un aporte de energía eléctrica de enorme relevancia, no tan solo por el volumen de esta sino por ser una energía verde y exenta de contaminantes atmosféricos.

Para poder llevar a cabo el desarrollo del proyecto se efectúa una primera recogida de información relativa a las centrales fotovoltaicas, con especial mención a la base teórica en la que se fundamenta la tecnología fotovoltaica, los dispositivos necesarios para su funcionamiento y la radiación, que es el elemento de base sobre el que pivota esta tecnología de generación eléctrica.

Considerando todo lo anterior, tras realizar el análisis de la legislación que atañe a este tipo de instalaciones, se establecen una serie de criterios que resultan relevantes para determinar la ubicación más favorable de una instalación fotovoltaica. Esta tarea se realiza a través de una potente herramienta como son los sistemas de información geográfica, gracias a la cual se pueden evaluar todos los factores que entran en juego de manera simultánea, así como la sinergia entre los mismos.

Abstract

The present work deals with the determination of the location for a possible implementation of a photovoltaic power plant in the western area of the autonomous community of Andalusia. The aim is to exploit the qualities of this area and to take advantage of the large-scale photovoltaic deployment that has taken off on the Iberian Peninsula in recent years. This way, it is possible to obtain an enormously important contribution of electrical energy, not only because of its volume but also because it is a green energy that is free of atmospheric pollutants.

In order to be able to carry out the development of the project, an initial data gathering on photovoltaic power plants is carried out, with special mention of the theoretical basis on which photovoltaic technology is based, the necessary devices for its operation and radiation, which is the basic element on which this electricity generation technology is based.

In view of all this, after analyzing the legislation concerning this type of installation, a series of criteria are established that are relevant for determining the most favorable location for a photovoltaic installation. This task is carried out by means of a powerful tool such as geographic information systems, thanks to which it is possible to evaluate all the factors that are involved simultaneously, as well as the synergy between them.

Aclaración

La labor que se recoge en el presente documento constituye un ejercicio metodológico basado en el potencial de los sistemas de información geográfica como una herramienta eficaz para lograr soluciones ante aquellos planteamientos enfocados a la obtención de ubicaciones geográficas adecuadas y apropiadas para cada caso.

Por ello, no se pretende con el mismo la obtención de una herramienta que dé lugar a una solución real, ya que, en dicho caso, entran en consideración un número mayor de variables de las que se han tenido en consideración.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Aclaración	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
2 Central fotovoltaica	7
2.1 <i>Definición central fotovoltaica</i>	7
2.2 <i>El efecto fotovoltaico</i>	7
2.3 <i>¿Cómo funciona una central fotovoltaica?</i>	10
2.3.1 Primera fase	10
2.3.2 Segunda fase	11
2.3.3 Tercera fase	12
2.4 <i>¿Cuál es la eficiencia de una central fotovoltaica?</i>	13
2.4.1 Factores de carácter medioambiental	13
2.4.2 Factores de carácter tecnológico	15
2.5 <i>Efectos medioambientales que provocan las centrales fotovoltaicas</i>	15
3 Tipos de células	17
3.1 <i>Células monocristalinas</i>	17
3.2 <i>Células policristalinas</i>	18
3.3 <i>Células amorfas</i>	19
4 Radiación solar	21
4.1 <i>Definición de la radiación solar</i>	21
4.2 <i>El sol</i>	21
4.3 <i>Tipología de radiación</i>	23
4.4 <i>Colocación paneles fotovoltaicos</i>	24
4.5 <i>El efecto de sombra</i>	26
4.6 <i>Radiación en la zona de interés</i>	26
5 Situación de la fotovoltaica en España	29
5.1 <i>Listado de las mayores plantas fotovoltaicas en España</i>	29
6 Legislación sobre centrales fotovoltaicas en España	31
6.1 <i>Legislación común a todos los sistemas fotovoltaicos</i>	31
7 Criterios para la ubicación de una central fotovoltaica	33
8 Sistemas de Información Geográfica	35
8.1 <i>Historia de los sistemas SIG</i>	35

8.2	<i>Definición SIG</i>	36
8.3	<i>Modelo de datos</i>	37
8.4	<i>Funcionamiento de los SIG</i>	38
9	Aplicación práctica	40
9.1	<i>Datos de partida</i>	40
9.2	<i>Análisis multicriterio</i>	42
9.2.1	Pendiente del terreno	43
9.2.2	Nivel de radiación solar	45
9.2.3	Proximidad a las vías de comunicación	47
9.2.4	Proximidad a las redes eléctricas	49
9.2.5	Proximidad al recurso hídrico	51
9.2.6	Proximidad a núcleos de población	54
9.2.7	Suelos protegidos	57
10	Resultados	60
11	Conclusiones	65
	Referencias	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado de las 10 plantas fotovoltaicas de mayor tamaño en España.	30
Tabla 2. Herramientas sistemas SIG.	39
Tabla 3. Coeficiente de puntuación relativa para cada criterio de ubicación de la central fotovoltaica.	43
Tabla 4. Peso de los valores de la pendiente del terreno para la ubicación de una central fotovoltaica.	43
Tabla 5. Peso de la distancia a las vías de comunicación para la ubicación de una central fotovoltaica.	48
Tabla 6. Peso de la proximidad de las vías eléctricas para la ubicación de una central fotovoltaica.	50
Tabla 7. Criterio de exclusión por cercanía a recurso hídrico para las plantas fotovoltaicas.	53
Tabla 8. Criterio de exclusión por cercanía a núcleos de población para las plantas fotovoltaicas.	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Parque de Generación Eléctrica de España por fuente de energía.	1
Figura 2 – Emisiones de CO ₂ por kWh producido en España.	2
Figura 3 – Evolución de la potencia eléctrica instalada según lo fijado en el PNIEC 2021-2030.	3
Figura 4 – Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el sistema eléctrico español [MW].	4
Figura 5 – Ubicación de las provincias de Andalucía occidental dentro de España.	6
Figura 6 – Representación esquemática del efecto fotoeléctrico.	8
Figura 7 – El efecto fotoeléctrico sobre el silicio como material semiconductor.	8
Figura 8 – Representación esquemática de una celda fotovoltaica.	9
Figura 9 – Representación esquemática de un módulo fotovoltaico.	10
Figura 10 – Diseño esquemático de los componentes de la central fotovoltaica.	13
Figura 11 – Hoja de especificaciones de un módulo fotovoltaico.	14
Figura 12 – Emisiones atmosféricas vinculadas a la tecnología fotovoltaica.	16
Figura 13 – Representación gráfica de un panel de silicio monocristalino.	18
Figura 14 – Representación gráfica de un panel de silicio policristalino.	19
Figura 15 – Representación gráfica de un panel de silicio amorfo.	20
Figura 16 – Esquema de la posición de la tierra al sol.	22
Figura 17 – Esquema de la posición del sol desde la superficie terrestre.	22
Figura 18 – Ángulo del sol respecto a la superficie terrestre.	23
Figura 19 – Tipología de radiación solar sobre la superficie terrestre.	24
Figura 20 – Latitud terrestre.	24
Figura 21 – Esquema de la orientación o Azimut.	25
Figura 22 – Esquema de relativo a la inclinación del módulo fotovoltaico.	25
Figura 23 – Esquema relativo a la inclinación del módulo fotovoltaico.	26
Figura 24 – Irradiación directa normalizada en España.	28
Figura 25 – Esquema conceptual relativo a la legislación fotovoltaica en España.	32
Figura 26 – Evolución de los SIG en relación con los avances tecnológicos de interés.	36
Figura 27 – Datos en el modelo Vectorial. a) punto, b) línea, c) y d) polígono.	38
Figura 28 – Base cartográfica de Andalucía.	41
Figura 29 – Altura del terreno Andalucía occidental.	44
Figura 30 - Pendiente del terreno Andalucía occidental.	45
Figura 31 – Mapa de irradiación referido a Andalucía occidental.	46
Figura 32 - Radiación normalizada Andalucía occidental.	47
Figura 33 - Mapa vías de comunicación Andalucía.	48
Figura 34 - Vías de comunicación Andalucía occidental.	49

Figura 35 - Mapa líneas eléctricas Andalucía.	50
Figura 36 - Redes eléctricas Andalucía occidental.	51
Figura 37 – Mapa del recurso hídrico en Andalucía.	52
Figura 38 – Recurso hídrico de Andalucía sin considerar los ríos de primer orden.	53
Figura 39 - Recurso hídrico Andalucía occidental.	54
Figura 40. Mapa de poblaciones de Andalucía.	55
Figura 41 – Mapa de las poblaciones de cabecera en Andalucía.	56
Figura 42 - Distancia núcleos de población Andalucía occidental.	57
Figura 43 – Figuras de especial protección de Andalucía.	58
Figura 44 – Mapa que excluye el suelo que ocupan las figuras de especial protección.	59
Figura 46 - Solución final evaluado de 0 a 1.	60
Figura 47. Solución final binaria.	61
Figura 48 – Alternativas con más de 100 ha para implantar una central fotovoltaica.	62
Figura 49 - Alternativa 1 para el emplazamiento de la central fotovoltaica.	63
Figura 50 - Alternativa 2 para el emplazamiento de la central fotovoltaica.	64

Notación

PNIEC	Plan Nacional Integrado de Energía y Clima
RBT	Reglamento de Baja Tensión
LCG	<i>Computer Graphics Laboratory</i>

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el parque generador de energía eléctrica en España se encuentra fuertemente determinado por dos grandes aspectos: que este sea cada vez más verde y la crisis energética fruto de las tensiones geopolíticas que ha disparado el precio de la energía.

Con respecto al primer punto, cabe resaltar que se trata de una tendencia instaurada algunos lustros atrás, focalizada en la obtención de un sistema de generación más limpio y libre de emisiones. Este hecho es fruto de la mayor concienciación medioambiental que surge en la sociedad occidental a finales del siglo XX. Como consecuencia de todo ello, se viene estableciendo una paulatina sustitución de las tecnologías de generación basadas en combustibles fósiles por fuentes de energía renovable.

En relación con lo anterior, la Figura 1 refleja el incremento porcentual que presentan distintas tecnologías de generación renovables en el sistema de generación eléctrico español respecto a otras tecnologías de generación como las centrales de carbón. Como prueba de todo ello, mientras que a principios del presente siglo el peso de las energías renovables en el sistema eléctrico era únicamente del 15%, en la actualidad se ha triplicado hasta alcanzar el 45%.

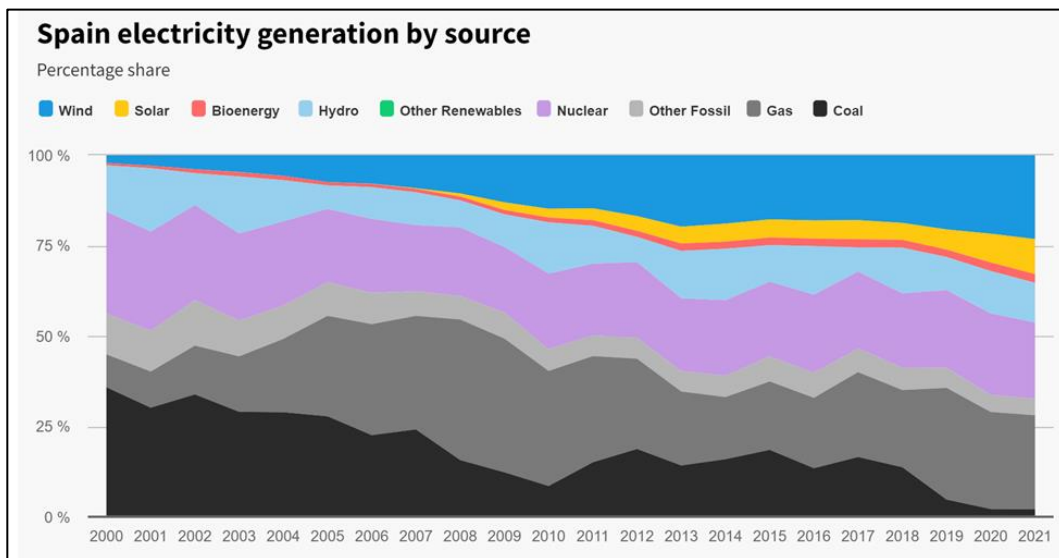


Figura 1 – Parque de Generación Eléctrica de España por fuente de energía.

Fuente: (EMBER, 2021)

De este modo, se ha logrado reducir a la mitad los gramos de CO₂ emitidos por kWh generado, desde un valor de 425,63 en el año 2000 al valor de 193,74 del año 2021. La Figura 2 evidencia la evolución seguida por las emisiones de CO₂ por kWh producido durante el siglo XXI.

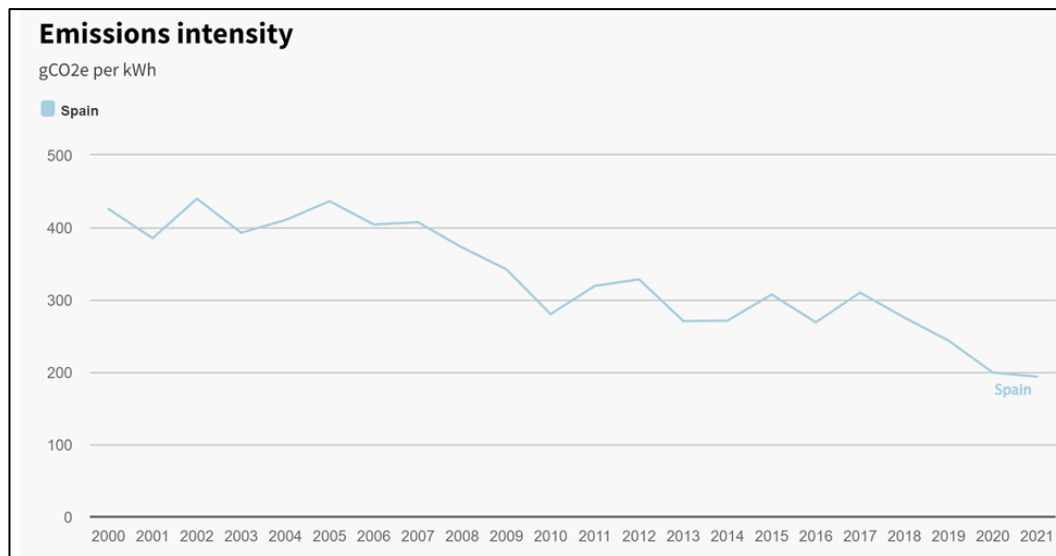


Figura 2 – Emisiones de CO₂ por kWh producido en España.

Fuente: (EMBER, 2021)

Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías de generación eléctrica renovables no se queda únicamente en el crecimiento experimentado hasta ahora, puesto que se espera que dicho crecimiento continúe su avance. En línea con todo ello se encuentran las previsiones incluidas en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030, sobre el devenir de la producción eléctrica en España. En este se indica que los cimientos del sistema deben recaer fundamentalmente sobre las energías renovables con objeto de cumplir los compromisos nacionales e internacionales adquiridos en materia de cambio climático para las próximas décadas. (MITECO, 2022)

De manera detallada, en el PNIEC se prevé la implantación de alrededor de 60 GW de potencia renovable adicionales. Con ello se lograría que en torno al 74% de la generación eléctrica en el año 2030 sea de origen renovable.

En lo que concierne a la energía fotovoltaica, el PNIEC presenta un escenario objetivo donde se establecen que los niveles de generación derivados de las fuentes renovables se incrementen desde los 4.854 MW instalados en el año 2015 hasta los 39.181 MW planificados para el año 2030. La evolución de la potencia instalada para cada tecnología de generación según la planificación del PNIEC queda recogida en la Figura 3.

Parque de generación del Escenario Objetivo (MW)				
Año	2015	2020*	2025*	2030*
Eólica (terrestre y marítima)	22.925	28.033	40.633	50.333
Solar fotovoltaica	4.854	9.071	21.713	39.181
Solar termoeléctrica	2.300	2.303	4.803	7.303
Hidráulica	14.104	14.109	14.359	14.609
Bombeo Mixto	2.687	2.687	2.687	2.687
Bombeo Puro	3.337	3.337	4.212	6.837
Biogás	223	211	241	241
Otras renovables	0	0	40	80
Biomasa	677	613	815	1.408
Carbón	11.311	7.897	2.165	0
Ciclo combinado	26.612	26.612	26.612	26.612
Cogeneración	6.143	5.239	4.373	3.670
Fuel y Fuel/Gas (Territorios No Peninsulares)	3.708	3.708	2.781	1.854
Residuos y otros	893	610	470	341
Nuclear	7.399	7.399	7.399	3.181
Almacenamiento	0	0	500	2.500
Total	107.173	111.829	133.802	160.837

*Los datos de 2020, 2025 y 2030 son estimaciones del Escenario Objetivo del borrador actualizado del PNIEC.

Figura 3 – Evolución de la potencia eléctrica instalada según lo fijado en el PNIEC 2021-2030.

Fuente: (MITECO, 2022)

Por otro lado, la actualidad mundial se encuentra marcada por una gran incertidumbre a nivel geopolítico y económico. La escalada de tensión que se ha producido en el este de Europa ha desembocado en una grave crisis energética y de suministro que ha disparado la inflación en gran medida debido al incremento del coste de la energía. Así pues, todo ello da lugar a una variación en la política energética de los países afectados, entre los cuales se encuentra España, hacia la búsqueda de un incremento en la denominada autonomía energética. Este concepto es definido como la capacidad que presenta un determinado país de satisfacer sus necesidades de energía sin depender de otros países.

En relación con la idea de incrementar el nivel de autonomía energética, resulta fundamental para España el papel que juega la energía fotovoltaica puesto que se trata de uno de los países con mayores ventajas para la implantación de este tipo de tecnología. Según (RED ELÉCTRICA, 2022), España goza anualmente de unas tres mil horas de luz solar, lo cual la convierte en uno de los enclaves europeos más soleados y, por ende, uno de los territorios con mayor recurso solar disponible para la producción de electricidad, con unas características óptimas para su desarrollo.

Además, en las últimas dos décadas se ha producido un enorme avance tecnológico que, acompañado de una disminución en los costes de producción, ha motivado un incremento de las plantas de energía solar fotovoltaica (MITECO, 2022). De esta manera, se ha pasado de las pequeñas instalaciones con una potencia alrededor de 1-2 MW existentes a inicios de siglo a las grandes infraestructuras actuales, con una potencia de generación que alcanzan el orden de los 200-500 MW.

En línea con lo anterior, las grandes centrales fotovoltaicas que se han implantado en los últimos años han contribuido a que el peso de este tipo de tecnología en el parque de generación eléctrico español se haya triplicado en el último lustro, superando a otra tecnología de generación eléctrica renovable como la hidráulica y convirtiéndose en la tercera tecnología con más MW instalados, con un total de 17.191 MW.

Tal y como refleja la Figura 4, en los últimos años se han sumado más de 12.000 MW de potencia fotovoltaica instalada, lo cual ha permitido a la fotovoltaica ascender cuatro puestos en el ranking nacional de las tecnologías de generación.

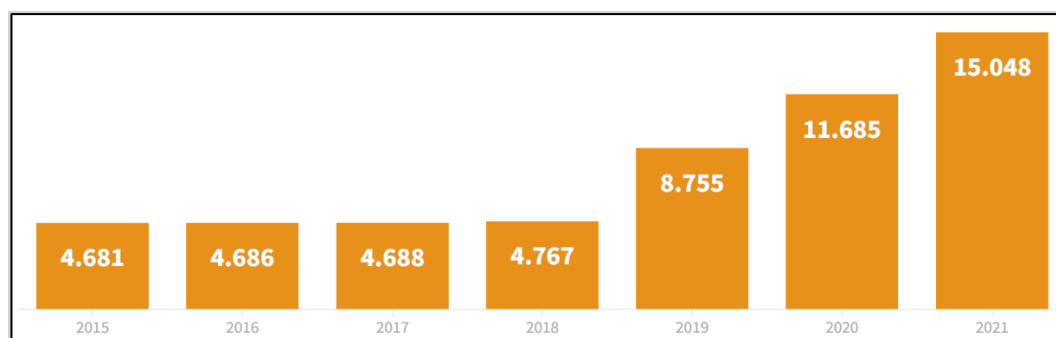


Figura 4 – Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el sistema eléctrico español [MW].

Fuente: (RED ELÉCTRICA, 2022)

Por este motivo, queda demostrada la capacidad de la tecnología fotovoltaica como un mecanismo para aprovechar una fuente de recursos natural e inagotable, como es la radiación solar, en la producción de energía eléctrica sin generar residuos. Por ello, la energía obtenida mediante la tecnología fotovoltaica se puede catalogar como limpia y funcional.

1.1 Objetivos

El principal objetivo que se fija para el desarrollo del presente trabajo es la determinación de la localización más ventajosa para la implantación de una planta fotovoltaica caracterizada por una potencia pico de 50MW en el área geográfica correspondiente Andalucía occidental, al sur de España.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo, se seleccionan una serie de criterios que actúan como condicionantes o restricciones. Los datos vinculados a estos parámetros son los empleados por la herramienta basada en los Sistemas de Información Geográfica, en adelante SIG, para determinar la localización más favorable de la planta fotovoltaica.

En relación con lo anterior, cabe destacar que la solución obtenida no se trata de una solución real puesto que únicamente se encuentra determinada por las restricciones de los parámetros establecidos, constituyendo de este modo un ejercicio académico.

1.2 Estructura del trabajo

La estructura seguida durante el desarrollo del presente proyecto presenta el desglose que se recoge a continuación:

- **Introducción**

El primer capítulo del proyecto es de carácter introductorio. En este, se incluye un primer avance relativo a la casuística que se pretende abordar con el desarrollo del mismo. De igual manera, también incluye la definición de los objetivos fijados y el ámbito geográfico al cual se ciñe el proyecto.

- **Central fotovoltaica**

El segundo capítulo recoge toda la información relativa a las centrales fotovoltaicas. Por ello, en este punto se incluye una definición de estas, se trata el efecto fotovoltaico en el que se basa esta tecnología, se detalla el funcionamiento de este tipo de instalaciones, su eficiencia y los efectos medioambientales relacionados con estas.

- **Tipos de células**

El tercer capítulo se orienta hacia del desarrollo de una descripción pormenorizada relativa a las principales tipologías de células fotovoltaicas compuestas por silicio que se pueden encontrar actualmente en el sector.

Entre las células basadas en el silicio destacan las células monocristalinas, las células policristalinas y las células de silicio amorfo.

- **Radiación**

La radiación solar es un elemento de vital importancia sobre el cual se basa el funcionamiento de la tecnología fotovoltaica, por ello, el cuarto capítulo se dedica a dicho aspecto. En este, se describe al sol como fuente de radiación, se tratan las distintas tipologías de radiación existentes y su eficacia para la generación fotovoltaica, la colocación de los módulos fotovoltaicos, el efecto sombra y los niveles de radiación a gran escala sobre el área a la cual se ciñe el proyecto.

- **Situación de la fotovoltaica en España**

El quinto capítulo refleja la situación actual y futura de las centrales fotovoltaicas en España. A fin de proporcionar una perspectiva del momento del sector, se recoge un listado con las instalaciones fotovoltaicas de mayor tamaño a nivel nacional.

- **Legislación sobre centrales fotovoltaicas en España**

El sexto capítulo aborda todo lo relativo a la normativa que aplica a las instalaciones fotovoltaicas en sus distintos niveles.

- **Criterios para la ubicación de una central fotovoltaica**

El séptimo capítulo del proyecto incluye un primer listado de los criterios seleccionados para la determinación de la localización más favorable para la planta fotovoltaica.

- **Sistemas de Información Geográfica**

El octavo capítulo se encuentra dedicado a los sistemas de información geográfica, detallándose aspectos como la historia relativa a estos sistemas, la definición, modelo de datos o funcionamiento de estas herramientas.

- **Realización del trabajo**

El noveno capítulo es el de mayor importancia dentro del proyecto, puesto que es en el que se detalla la aplicación práctica de este. En este, se tratan aspectos como los datos de partida o el análisis multicriterio que se lleva a cabo.

- **Resultados**

El décimo capítulo refleja los resultados obtenidos tras el empleo de la herramienta SIG sobre los datos vinculados a los criterios seleccionados. Dentro de este, se incluye un mapa en detalle de los espacios resultantes junto con la selección del enclave definitivo.

- **Conclusiones**

Por último, se incluye un capítulo en el que se reflejan las conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto.

1.3 Ámbito geográfico del trabajo

El ámbito geográfico al cual se circunscribe el proyecto es el área denominada como Andalucía occidental. Dentro de este concepto se incluye la superficie comprendida por las provincias de Cádiz, Córdoba, Huelva y Sevilla, todas ellas situadas en la zona suroccidental del territorio español, tal y como se puede apreciar en la Figura 5.

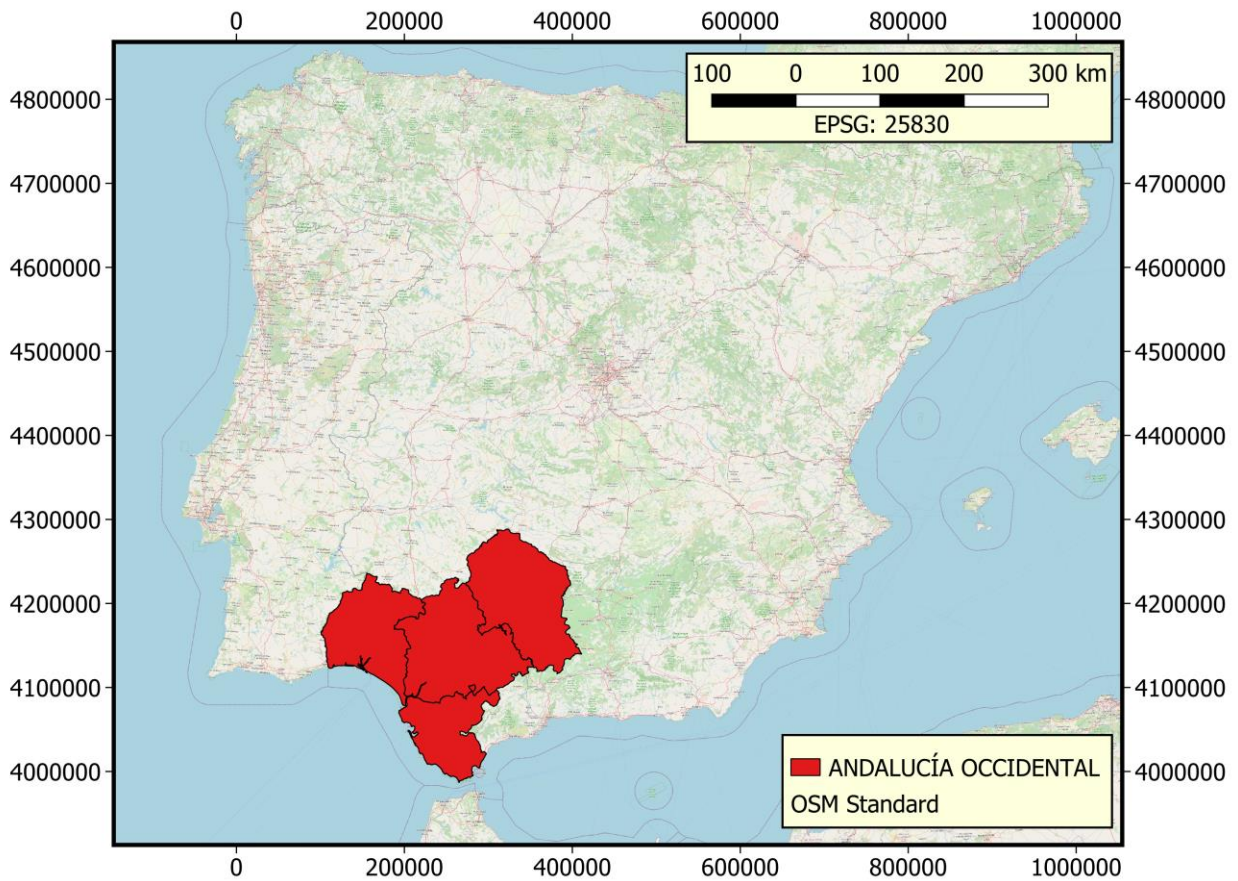


Figura 5 – Ubicación de las provincias de Andalucía occidental dentro de España.

Fuente: Elaboración propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

2 CENTRAL FOTOVOLTAICA

En el presente capítulo se desarrolla una recopilación de información relativa a las centrales de generación eléctrica basadas en la tecnología fotovoltaica. De esta manera, se tratan aspectos que van desde la propia definición de este tipo de tecnología, el efecto en el que se basan, su modo de funcionamiento, la eficiencia o el impacto medioambiental que ocasionan este tipo de instalaciones.

2.1 Definición central fotovoltaica

Según (CREUS SOLÉ, 2014), una central fotovoltaica se puede definir como una tipología de instalación industrial en la que se lleva a cabo la producción de energía eléctrica a partir de radiación solar mediante el empleo de células fotovoltaicas. De esta manera, la célula fotovoltaica se constituye como aquel elemento electrónico capaz de convertir, de manera directa e inmediata, la radiación lumínica en electricidad. Para que esto tenga lugar, se debe generar una fuerza electromotriz debido a la absorción de radiación ionizante en un material semiconductor, lo cual se conoce como efecto fotovoltaico, tal y como recoge (DOMÍNGUEZ GÓMEZ, 2008).

De manera particular, el concepto de central fotovoltaica hace referencia a una instalación de mediana o gran escala que se suele situar en terrenos rústicos debido a la gran superficie que ocupa. En cuanto a la superficie ocupada, su mayor parte lo está por un elevado número de módulos fotovoltaicos que, a su vez, se encuentran constituidos por células fotovoltaicas.

Como resultado de todo ello, resulta una instalación capaz de proporcionar energía a un nivel muy superior al de otras instalaciones fotovoltaicas, como las destinadas al autoconsumo.

2.2 El efecto fotovoltaico

Tal y como se expresa en el punto dedicado a la definición de la central fotovoltaica, la tecnología fotovoltaica se basa en la conversión de radiación lumínica en energía eléctrica. La citada conversión tiene lugar en los módulos fotovoltaicos, los cuales se caracterizan por estar fundamentalmente constituidos por un material semiconductor, a partir del denominado efecto fotovoltaico.

Atendiendo a lo anterior, para profundizar en el análisis del denominado efecto fotovoltaico, se debe abordar, de manera previa, el estudio del denominado efecto fotoeléctrico, lo cual se va a realizar atendiendo a lo reflejado en (TOBAJAS VÁZQUEZ, 2014). El efecto fotoeléctrico se encuentra relacionado con la cantidad de electrones que un metal es capaz de proporcionar cuando recibe una radiación de tipo fotónica, es decir, es el proceso por el cual un material libera electrones ante la incidencia de radiación electromagnética.

Es importante destacar que los electrones de un material pueden absorber energía de los fotones que inciden sobre el mismo, adquiriendo un nivel energético superior. En el caso de que el nivel energético adquirido sea superior al nivel energético que precisan para abandonarlo, se genera un par electrón-hueco, donde el hueco se comporta como una carga positiva.

De esta manera, si la energía que proporcionan los fotones es alta, parte de dicha energía se destina a la liberación de electrones y el resto se emplea para aumentar la energía cinética. Sin embargo, en aquellos casos en los que la energía absorbida de los fotones no sea suficiente para que los electrones logren abandonar el material, no se produce el denominado fenómeno de foto emisividad.

Cabe resaltar que la energía que proporcionan los fotones no se encuentra vinculada a la intensidad de la radiación, sino a su longitud de onda de esta. Así pues, el efecto fotoeléctrico se encuentra relacionado con la siguiente expresión matemática:

$$E = h \cdot f$$

Donde:

- E , se corresponde con la energía recibida de los fotones.
- h , es la denominada constante de Planck, la cual presenta un valor de $6,62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$
- f , hace referencia a la frecuencia expresada en Hz.

La Figura 6 muestra de manera gráfica el proceso vinculado al efecto fotoeléctrico que se describe en los párrafos superiores:

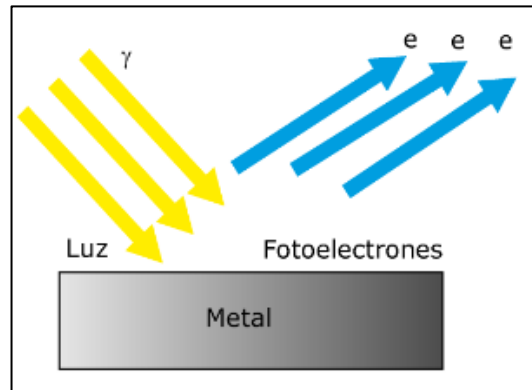


Figura 6 – Representación esquemática del efecto fotoeléctrico.

Fuente: (TOBAJAS VÁZQUEZ, 2014)

A fin de clarificar el concepto, de todo lo anterior se puede extraer que, si ante una radiación caracterizada por una longitud de onda fija no se produce el efecto fotoeléctrico, no va a suceder este por mucho que se intensifique la radiación. Sin embargo, sí que se puede alcanzar este fenómeno físico disminuyendo la longitud de onda de la radiación incidente, puesto que esto incrementa la energía de la misma.

Así pues, cada semiconductor se encuentra caracterizado por un límite energético inferior necesario para que se produzca la rotura del enlace y que aparezca el denominado par electrón-hueco, por tanto, también existe una longitud de onda máxima para que esto se produzca. A modo de ejemplificación, en el caso del silicio el límite energético inferior para romper el enlace se sitúa en 1,12 eV que, a su vez, se corresponde con una longitud de onda inferior a 1.100 nm. El caso del Silicio queda ejemplificado de manera gráfica en la Figura 7.

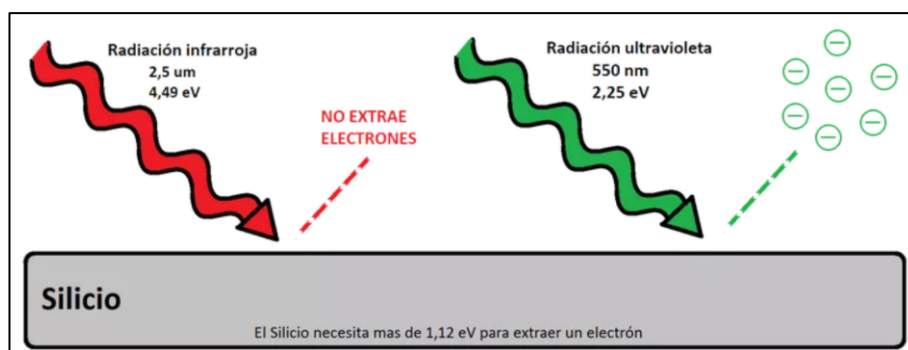


Figura 7 – El efecto fotoeléctrico sobre el silicio como material semiconductor.

Fuente: (HELIOESFERA, 2022).

Si, como resultado del efecto fotoeléctrico se separan, por un lado, los electrones que actúan como cargas negativas y, por otro lado, los huecos que quedan como cargas positivas, se genera un campo eléctrico que transforma el semiconductor en un generador eléctrico a pequeña escala.

Todo lo descrito respecto al efecto fotoeléctrico constituye la base del denominado efecto fotovoltaico, el cual tiene lugar cuando la radiación solar incide sobre un semiconductor en el que previamente se ha desarrollado de manera artificial dos regiones. La primera de estas regiones es la denominada región P que se encuentra caracterizada por contener pequeñas cantidades de boro y estar cargada de manera positiva. La segunda región es la denominada región N, que es la que contiene los electrones y, por tanto, se encuentra cargada negativamente.

En relación con lo anterior, cabe destacar el hecho de que la unión entre la región P y N, cuando se expone a la radiación solar, genera un campo electrostático constante (CREUS SOLÉ, 2014). Este da lugar a un movimiento de electrones que fluyen al cerrar el circuito con una carga externa constituyendo una corriente continua.

Así pues, el efecto fotovoltaico se puede definir como un fenómeno físico basado en la conversión de la radiación solar en energía eléctrica (ENDESA FUNDACIÓN, 2013). Inicialmente la energía se manifiesta a través de los fotones que constituyen la radiación solar, al incidir estos fotones sobre la superficie del material semiconductor que construye las células fotovoltaicas se produce el desprendimiento de los electrones que se ubican en la superficie externa de la célula fotovoltaica. Este desprendimiento tiene lugar debido a que los electrones absorben la energía que proviene de la radiación solar incidente liberándose del átomo al cual se encuentran vinculados originalmente y dando lugar a que en el interior de la célula tenga lugar una corriente eléctrica continua derivada de la diferencia de potencial que se ocasiona como resultado de la pérdida de electrones.

Según (DÍAZ CORCOBADO & CARMONA RUBIA, 2018), el efecto fotovoltaico tiene lugar en las células fotovoltaicas gracias a que estas se comportan como un diodo. Las células fotovoltaicas tienen una superficie que recibe la radiación solar, que es el espacio donde se va a producir el desprendimiento de electrones y se le conoce como región N, y una superficie en total oscuridad, la región P, a fin de que no se desprendan electrones de esta y se alcance una mayor diferencia de potencial en el interior.

Para que la región P se encuentre en total oscuridad se ejecuta sobre esta un proceso de metalizado completo, mientras que en la zona N el metalizado tiene forma de peine, con el objetivo de que la radiación solar llegue a la superficie del semiconductor. La Figura 8 muestra el detalle vinculado a una célula fotovoltaica.

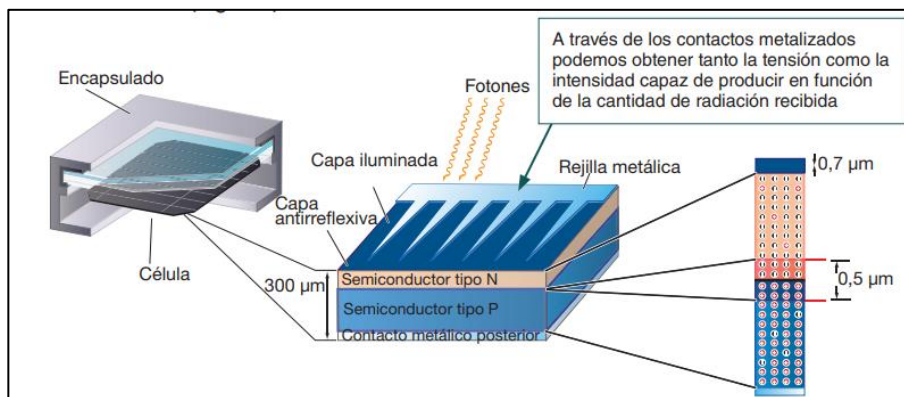


Figura 8 – Representación esquemática de una celda fotovoltaica.

Fuente: (DÍAZ CORCOBADO & CARMONA RUBIA, 2018)

De manera general, (ARENAS, CHACÓN PINZÓN, & BELKY, 2019) resaltan que una célula fotovoltaica se encuentra compuesta por materiales semiconductores en forma de capas delgadas que, al ser expuestas a la luz, producen una corriente eléctrica. Por ello, las células fotovoltaicas se encuentran integradas en módulos que, al unirse, forman los denominados módulos fotovoltaicos.

Según lo anterior, un módulo fotovoltaico, también conocido como panel solar, se encuentra constituido por un conjunto de células fotovoltaicas conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco (DÍAZ CORCOBADO & CARMONA RUBIA, 2018). La red de células fotovoltaicas que constituyen el módulo se conecta en serie para aumentar la diferencia de potencial o voltaje hasta alcanzar el

valor deseado. De igual manera se conectan varias de estas redes de células en paralelo para aumentar la corriente que es capaz de producir y dar una potencia de salida más alta.

La Figura 9 refleja las características más relevantes de un módulo fotovoltaico a través de su estructura.

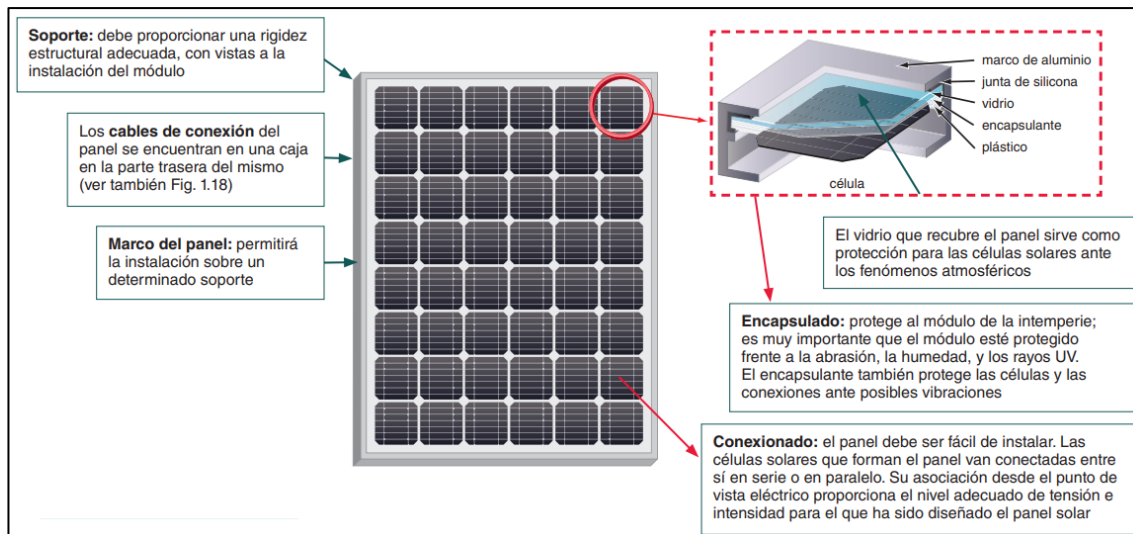


Figura 9 – Representación esquemática de un módulo fotovoltaico.

Fuente: (DÍAZ CORCOBADO & CARMONA RUBIA, 2018)

2.3 ¿Cómo funciona una central fotovoltaica?

La realización del presente punto se efectúa considerando lo reflejado en (TRASHORRAS MONTECELOS, 2021). Atendiendo a ello, se puede destacar que el funcionamiento de una central fotovoltaica depende, en gran medida, de la disponibilidad de almacenar energía por parte de la propia instalación. En este trabajo, la casuística en cuestión se corresponde con la de una instalación fotovoltaica conectada a la red eléctrica de distribución sin almacenamiento energético. Es decir, el caso planteado se trata de una instalación fotovoltaica sobre suelo con inyección total a red y sin sistema de almacenamiento energético en su interior.

Así pues, el funcionamiento de este tipo de central fotovoltaica se puede desglosar en tres grandes etapas que tienen lugar de manera consecutiva. La primera etapa se corresponde con la conversión de energía solar en energía eléctrica en forma de corriente continua; la segunda se corresponde con la transformación de la corriente continua en corriente alterna; y, por último, la tercera etapa engloba las tareas relativas al transporte y suministro de la electricidad.

2.3.1 Primera fase

La primera fase está basada en la generación de electricidad en forma de corriente continua por parte de los módulos fotovoltaicos. Respecto a estos, cabe destacar que constituyen el elemento de mayor relevancia en lo que al funcionamiento de una central fotovoltaica compete.

Por tanto, el sistema de conexión entre módulos fotovoltaicos va a determinar las características técnicas de generación. De esta manera, se debe estructurar los módulos del modo más eficiente atendiendo a factores como que la potencia máxima y la corriente de cortocircuito real nunca pueden superar un intervalo superior al 3% respecto al valor nominal indicado por el fabricante.

Por todo ello, se debe rechazar todo aquel módulo que presente desperfectos de fabricación en alguno de sus componentes, un desajuste en la alineación de las células fotovoltaicas o imperfecciones en el sistema de

encapsulamiento. Además, en lo que respecta a su construcción, deben gozar de un grado de protección IP65 con los marcos laterales compuestos por aluminio o acero inoxidable.

En materia de seguridad, se debe de conectar a tierra la estructura del generador y se deben instalar elementos de seguridad, tales como fusibles o interruptores independientes, para la desconexión de cada una de las ramas del resto del sistema generador a fin de facilitar las operaciones de mantenimiento.

A nivel global, el sistema de protección de la instalación fotovoltaica incorpora elementos que se encuentran ubicados desde el generador fotovoltaico hasta la conexión a la red de distribución. Entre los elementos de protección destacan los diodos de bloqueo que se instalan en la salida de cada cadena de módulos fotovoltaicos para evitar una posible disipación de potencia ante situaciones defectuosas. Además, con ello se evita que la corriente circule en sentido opuesto al deseado.

Otro elemento relevante en cuanto al funcionamiento de las centrales fotovoltaicas es la estructura de soporte de los módulos fotovoltaicos. En primer lugar, cabe resaltar que todo este sistema estructural debe estar sujeto a lo indicado en el Código Técnico de la Edificación en materia de seguridad, con especial atención a que la estructura de los módulos soporte de manera conjunta todo tipo de sobrecargas debido a acciones como las del viento o la nieve.

Además, el diseño y construcción del sistema estructural y la fijación de los módulos fotovoltaicos deben permitir las correspondientes dilataciones térmicas sin transmitir cargas que puedan llegar a poner en peligro la integridad de la instalación. Para ello, se debe asegurar que el sistema de fijación de los módulos cuente, en número y posición, con un número adecuado de puntos de fijación en base al área y la posición de los módulos. Con todas estas acciones se evita que se puedan llegar a generar flexiones que sobrepasen los valores límite que indica el fabricante.

En materia de efectividad, el diseño de la estructura se debe realizar de tal manera que optimicen la posición de los módulos en cuanto a la generación eléctrica, encontrándose está determinada por la orientación y el ángulo de inclinación. A la hora de determinar la posición de los módulos fotovoltaicos también se debe considerar también posibles acciones futuras respecto al mantenimiento de los módulos o la sustitución de estos, de tal forma que se facilite la operación de todas las acciones implicadas en ambas operaciones.

La estructura se debe proteger de manera superficial contra la acción de los agentes ambientales, por lo que la realización de agujeros en la estructura se lleva a cabo antes de proceder al galvanizado o protección de esta. La tornillería empleada para la sujeción de los módulos fotovoltaicos al sistema estructural debe ser, en cualquier caso, de acero inoxidable. Para la unión del resto de elementos, los tornillos pueden ser de acero inoxidable o bien galvanizados.

2.3.2 Segunda fase

La segunda fase del funcionamiento de una instalación fotovoltaica es la transformación de la corriente continua en corriente alterna. La corriente generada en los módulos fotovoltaicos se conduce hasta un armario de corriente continua. En este armario se encuentra el inversor que transforma la corriente eléctrica de continua a alterna para, posteriormente, dirigirla hacia un armario de corriente alterna.

Así pues, en lo que respecta a la segunda etapa, el elemento de mayor relevancia es el inversor. La capacidad del inversor para convertir la corriente eléctrica continua en corriente eléctrica alterna permite salvar el escollo de acoplamiento entre la corriente continua producida por los módulos fotovoltaicos y la corriente alterna que caracteriza a la red eléctrica de transporte.

El funcionamiento de los inversores se caracteriza por una potencia de entrada de carácter variable cuyo objetivo es extraer la máxima potencia del generador fotovoltaico en cada instante. En materia de seguridad, el funcionamiento del inversor obliga a incorporar protecciones frente a:

- Cortocircuitos en alterna.
- Tensión de red fuera de rango.
- Frecuencia de red fuera de rango.
- Sobretensiones, mediante varistores o similares.
- Perturbaciones presentes en la red como micro cortes, pulsos, defectos de ciclos, ausencia y retorno de

la red, etc.

Adicionalmente, cada uno de los inversores presentes en una central fotovoltaica debe disponer de las indicaciones pertinentes para su correcta operación e incorporar los controles automáticos necesarios para realizar, con seguridad, las operaciones de supervisión y manejo. Por ello, cada uno de los inversores de la instalación posee, como mínimo, los siguientes controles manuales:

- Encendido y apagado general del inversor.
- Conexión y desconexión del inversor a la interfaz CA.

El funcionamiento de un inversor se encuentra determinado por la necesidad de seguir entregando potencia a la red cuando las condiciones de irradiancia solar superen en un 10% a las condiciones estándar de medida, en adelante CEM. Además, el diseño se efectúa de tal manera que durante su funcionamiento llegue a soportar picos un 30% superior a las CEM durante un espacio temporal de hasta diez segundos.

Los inversores que se encuentran instalados a en el medio exterior deben gozar de un grado de protección IP 65, estando garantizado su adecuado funcionamiento en condiciones ambientales con temperatura situadas entre 0°C y 40°C y con humedades entre el 0 % y el 85 %.

Además de los elementos citados, en un parque fotovoltaico se debe disponer de un cuadro de distribución en el lado de la corriente continua para poder desarrollar la maniobra y protección de este espacio, un cuadro de distribución en el lado de corriente alterna, para la maniobra y protección en el lado de corriente alterna, contadores y el centro de transformación que se encarga de ajustar el voltaje de la corriente alterna a las condiciones idóneas de manera previa al transporte.

2.3.3 Tercera fase

La tercera fase tiene lugar porque la corriente alterna que sale del armario de corriente alterna debe ser adaptada en cuanto a intensidad y tensión para adecuarse a los valores que se manejan en la línea de transporte. Para ello, se emplea un centro de transformación que adapta los citados parámetros a los de la red de transporte.

De manera general, la operativa asociada a una central fotovoltaica precisa incorporar aquellos elementos y características necesarios para garantizar en todo momento la calidad del suministro eléctrico. Además, se debe garantizar que el funcionamiento de las instalaciones fotovoltaicas no provoque en la red eléctrica ningún tipo de avería, disminución en las condiciones de seguridad o alteraciones superiores a las admitidas por la normativa.

Por ello, se debe asegurar que durante la fase de operación estas instalaciones no generen situaciones de riesgo para el personal de mantenimiento y la explotación de la red de distribución. En base a todo esto, los materiales de la instalación que se encuentren expuestos a condiciones meteorológicas adversas deben gozar de protección frente a los agentes ambientales, en particular, contra el efecto de la radiación solar y la humedad.

Además de lo citado anteriormente, se incluyen una serie de elementos necesarios en materia de seguridad y protecciones propias de las personas y de la instalación fotovoltaica. Todo ello pretende garantizar la protección frente a contactos directos e indirectos, cortocircuitos o sobrecargas.

Un aspecto de gran importancia en el funcionamiento de los parques fotovoltaicos es el sistema de puesta a tierra de la instalación. Sobre este se dispone que todas las masas de la instalación fotovoltaica, tanto de la sección continua como de la alterna, deben conectarse a una única tierra totalmente independiente de la del neutro de la empresa distribuidora, de acuerdo con el reglamento electrotécnico de baja tensión contemplado en el Real Decreto 842/2002.

Respecto a los cables que interconectan los distintos elementos de la instalación, se deben disponer de tal forma que el positivo y negativo de cada grupo de módulos se encuentre separados y debidamente protegidos. Además, estos conductores deben estar constituidos por cobre, con una sección suficiente para evitar posibles pérdidas de potencial o calentamientos. De manera específica, se debe asegurar que el conductor sea de sección suficiente para que las pérdidas de potencia no superen el 1,5 % independientemente de las condiciones de trabajo.

En materia estructural, todo el cableado debe contar con una longitud suficiente como para evitar posibles situaciones de peligro debidas al tránsito del personal por la instalación, como enganchones que generen esfuerzos de tensión. Además, el cableado presente en el área de operación de corriente continua debe contar con un doble aislamiento que garantice un uso adecuado a la intemperie, al aire o enterrado.

De manera general, el nivel de aislamiento mínimo del cableado es de clase I para su uso en el equipamiento (módulos e inversores) o materiales (conductores, cajas y armarios de conexión), exceptuando el cableado de continua, que debe ser de doble aislamiento de clase dos y un grado de protección mínimo de IP65.

Para finalizar, se ha de indicar que la instalación precisa de unos servicios auxiliares para su correcto funcionamiento como son los sistemas de alumbrado, telecomunicación, alarmas, etc.

A modo de ejemplificación, la Figura 10 representa el conjunto de los principales elementos que componen una central fotovoltaica, así como las conexiones entre los mismos.

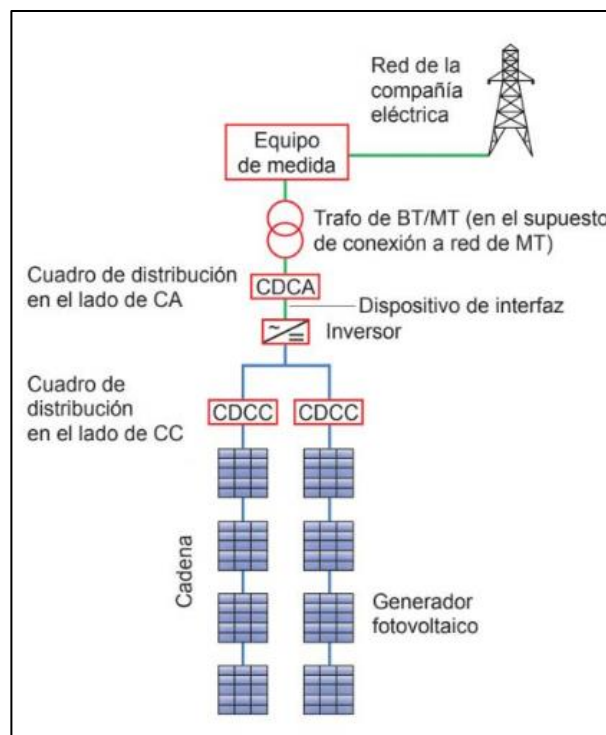


Figura 10 – Diseño esquemático de los componentes de la central fotovoltaica.

Fuente: (TRASHORRAS MONTECELOS, 2021)

2.4 ¿Cuál es la eficiencia de una central fotovoltaica?

La eficiencia de un parque fotovoltaico se encuentra determinada por un conjunto de factores que se engloban dentro de dos grandes grupos, los factores medioambientales y los factores tecnológicos, todo lo referido a los mismos en el presente punto se extrae del conocimiento reflejado en (SMA SOLAR TECHNOLOGY AG, 2019). Así pues, entre los factores medioambientales se encuentran aspectos como la temperatura de los módulos fotovoltaicos, la irradiación solar / energía disipada o la sombra / suciedad en los módulos fotovoltaicos. Respecto a los factores de carácter tecnológico, cabe resaltar aspectos como las pérdidas por cableado, el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, el rendimiento del inversor, la tecnología de las células solares en los módulos fotovoltaicos o la degradación de estas.

2.4.1 Factores de carácter medioambiental

La temperatura de los módulos fotovoltaicos es un factor medioambiental que presenta gran influencia sobre la

potencia y la efectividad de las células solares ya que el incremento en la temperatura de los módulos merma considerablemente el funcionamiento de las células fotovoltaicas.

Por ello, un módulo fotovoltaico opera de manera más eficiente a bajas temperaturas. Tal es la situación que se puede dar cuando el cielo se encuentra totalmente descubierto de nubosidad durante el invierno donde se incrementa notablemente la efectividad del módulo si la radiación solar incide de manera adecuada, generándose un alto valor en el coeficiente de rendimiento. Sin embargo, esta situación no se mantiene en el tiempo ya que cuando la radiación incide de manera continuada sobre el módulo este experimenta un aumento de temperatura que hace que la efectividad tienda a disminuir en un cierto grado.

Atendiendo a lo reflejado en (ADLER, BERARDI, GARCÍA PEDROSA, MONTICELLI, & MORQUECHO, 2013) respecto a la evaluación del efecto de la temperatura sobre el rendimiento de los módulos fotovoltaicos, se puede afirmar que esta se determina mediante dos parámetros principalmente, el coeficiente intensidad-temperatura y el coeficiente tensión-temperatura.

Respecto al coeficiente intensidad-temperatura, destacar que evalúa la variación de la intensidad de cortocircuito de un módulo fotovoltaico por grado centígrado de variación de la temperatura en sus células. El valor de dicho parámetro se puede especificar de dos maneras distintas, en valor absoluto como mA/°C o en valor relativo como %/°C.

El otro gran parámetro es el coeficiente tensión-temperatura, el cual evalúa la variación de la tensión de circuito abierto de un módulo fotovoltaico por grado centígrado de variación de la temperatura de sus células. De igual manera, este parámetro se puede expresar en forma de valor absoluto como mV/°C o en forma de valor relativo como %/°C.

Estos dos parámetros son muy relevantes puesto que posibilitan una relación directa entre la situación ambiental en materia de temperatura durante el funcionamiento del módulo, con las condiciones ambientales fijadas durante los ensayos nominales llevados a cabo en el laboratorio. Existe un tercer parámetro en cuestión que es el del coeficiente potencia-temperatura el cual, de manera análoga a lo indicado para la tensión y la intensidad, permite relacionar la variación de la potencia máxima de un módulo fotovoltaico con la variación de la temperatura en las células de este. De igual manera, los fabricantes incluyen en la hoja de datos del panel un parámetro que se corresponde con el rango de funcionamiento de los paneles solares respecto a la temperatura. Un ejemplo de ello es la hoja de datos recogida en Figura 11.

Datos mecánicos		Datos eléctricos		Coef. de temperatura	
Célula	52*15,3 (16,8)	Potencia máxima (W)	5	Coef. de temperatura Isc (%)/°C	+0.04
Tecnología de célula	Monocristalina	Tensión de potencia óptima (Vmp)	18,57	Coef. de temperatura Voc (%)/°C	-0.38
Número de células (pcs)	4*9	Corriente operativa óptima (Imp)	0,27	Coef. de temperatura Pm (%)/°C	-0.47
Tamaño del módulo (mm)	260*210*18	Tensión de circuito abierto (Voc)	22,64	Coef. de temperatura Im (%)/°C	+0.04
Grosor del cristal (mm)	3.2	Corriente de cortocircuito (Isc)	0,29	Coef. de temperatura Vm (%)/°C	-0.38
Máx. carga de superficie	2400-5400Pa	Eficiencia de célula (%)	17,96		
Resistencia al granizo	23m/s ,7.53g	Eficiencia de módulo (%)	9,16		
Peso de la unidad (Kg)	0,7	Tolerancia (%)	±3%		
Corriente máxima del fusible (A)	-	NOCT	47°C +/-2°C		
Marco	18#				
Tipo de conector	MC4				
Parte posterior	TPT				
Rango de temperatura	-40°C / +85°C				
FF (%)	70-76%				

Figura 11 – Hoja de especificaciones de un módulo fotovoltaico.

Fuente: (TECHNO SUN, 2022)

Otro de los factores de mayor relevancia en cuando a los factores medioambientales es la irradiación solar y energía disipada. La energía disipada es la diferencia existente entre la potencia absorbida y la potencia desprendida. Una vez aclarado el concepto, se debe destacar que existen una serie de situaciones en las que el sol se encuentra a menor altura, tales como la que tiene lugar al atardecer, durante las primeras horas matinales o durante el invierno. Este hecho da lugar a que durante estos instantes el rendimiento que obtiene el sistema es

menor al habitual.

El último de los factores medioambientales que se aborda es la sombra o suciedad en los módulos fotovoltaicos. Respecto al mismo cabe resaltar que, en función del lugar en el que se encuentren ubicados, es importante evitar que elementos exteriores provoquen un sombreado momentáneo o permanente sobre los módulos. Del mismo modo ocurre con la suciedad, donde el polvo, el polen o la nieve pueden dar lugar a un sombreado de los módulos fotovoltaicos. En ambos casos, todo ello da lugar a un menor rendimiento del módulo fotovoltaico ya que estos pueden absorber una menor irradiación solar. Así pues, se produce una disminución del coeficiente de rendimiento global de la instalación fotovoltaica.

2.4.2 Factores de carácter tecnológico

Al igual que con los factores medioambientales, también existen una serie de factores de carácter tecnológico que influyen en el rendimiento de la instalación fotovoltaica aminorando el mismo. El primero de este tipo de factores que se abordan es el de las pérdidas por cableado. Estas tienen lugar al transferir la electricidad desde el inversor hasta el contador de inyección de la empresa explotadora de la red. El nivel de pérdidas por cableado depende del tipo y material de los cables que se empleen en la instalación, siendo en cualquier caso un factor que aminora el rendimiento de esta.

El factor de mayor relevancia dentro de los que se agrupan en el ámbito tecnológico es el del rendimiento de los módulos fotovoltaicos, ya que este influye directamente en el coeficiente de rendimiento de la instalación fotovoltaica. Por este motivo, cuanto mayor sea el rendimiento de los módulos fotovoltaicos mayor resulta el valor del coeficiente de rendimiento global de la instalación. El rendimiento fotovoltaico depende de múltiples factores, pudiendo alcanzar valores ligeramente superiores al 20% en el mejor de los casos.

Otro factor considerable es el rendimiento del inversor ya que un inversor con un elevado rendimiento conduce a un mejor valor en el coeficiente de rendimiento global de la instalación. Sin embargo, a diferencia del caso de los módulos fotovoltaicos, donde el rendimiento apenas superaba el 20%, en el caso del rendimiento de los inversores se llega a alcanzar un rendimiento superior al 90% y, con facilidad, se logra un rendimiento superior al 80%.

Del mismo modo, el coeficiente de rendimiento global de la instalación se ve afectado por la tecnología de las células solares de los módulos fotovoltaicos, puesto que existen diferentes tipos de células solares para los módulos fotovoltaicos con rendimientos distintos entre sí. Generalmente se emplean células solares de silicio, normalmente de células de silicio monocristalino, células de silicio policristalino o células amorfas.

Por último, hay que destacar la degradación de los módulos fotovoltaicos debida al transcurso temporal desde su instalación. Así, una exposición prolongada a las inclemencias meteorológicas genera una reducción del coeficiente de rendimiento que, para el caso de las células de silicio, se estima en torno al 20% de efectividad tras dos décadas de uso.

2.5 Efectos medioambientales que provocan las centrales fotovoltaicas

El nuevo modelo de generación eléctrica hacia el que se está avanzando en la actualidad se caracteriza por un mayor peso de las tecnologías de carácter renovable, como es el caso de la fotovoltaica. Sin lugar a duda, todo ello conlleva una serie de beneficios a nivel medioambiental y, en especial, en lo relativo al cambio climático puesto que se trata de tecnologías de generación que evitan el incremento en la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

La fotovoltaica se considera como una tecnología de generación eléctrica, en líneas generales, beneficiosa para el medio ambiente ya que a la ausencia de emisiones de gases durante la producción de energía se une la ausencia de ruido, la ausencia de contaminación química y una buena capacidad de implantación en ambientes urbanos, fundamentalmente en fachadas y tejados.

Sin embargo, no todos los aspectos medioambientales relacionados con la tecnología fotovoltaica son positivos. Si bien durante la fase de operación se encuentra libre de emisiones, no ocurre lo mismo durante el proceso de fabricación de los elementos que la componen. Hay que destacar que durante las tareas de fabricación se generan una serie de emisiones derivadas del gasto de combustibles fósiles asociados al proceso.

Así pues, (CREUS SOLÉ, 2014) incluye una estimación que sitúa entre 15 y 70 los gramos de CO₂ que se emiten en el proceso de fabricación por kWh de energía producido. Sin embargo, si se emplea la tecnología fotovoltaica en sustitución de un generador diésel, se produce una disminución significativa en las emisiones de CO₂, puesto que en el caso del generador diésel se sitúan en 700 gramos por kWh producido.

La Figura 12 refleja los valores de emisiones medioambientales de la tecnología fotovoltaica en función de la potencia pico instalada, tanto durante la fase de operación como de construcción de los elementos.

Parámetro	Valor (kWp)	Valor (kg/TJ)
CO ₂ (kg/TJ)	0	0
SO ₂ (kg/TJ)	0	0
NOx (kg/TJ)	0	0
Partículas (kg/TJ)	0	0
VOCs (kg/TJ)	0	0
En la construcción CO ₂ (kg/TJ)	432-2138	4000-20000
En la construcción SO ₂ (kg/TJ)	5,47-6,76	75-95
En la construcción NOx (kg/TJ)	4,52-6,07	61-83

Figura 12 – Emisiones atmosféricas vinculadas a la tecnología fotovoltaica.

Fuente: (CREUS SOLÉ, 2014)

Como se indica en párrafos anteriores, la energía fotovoltaica se considera como una energía renovable libre de emisiones atmosféricas o efluentes líquidos durante su fase de operación. Sin embargo, los efectos medioambientales de una determinada tecnología de generación eléctrica no se ciñen exclusivamente a las emisiones de gases y es que, en el caso de las grandes centrales fotovoltaicas, es de gran relevancia el impacto paisajístico que tiene lugar con la implantación de estas (ENDESA FUNDACIÓN, 2013).

La instalación de una central fotovoltaica a gran escala precisa de una enorme superficie sobre la que colocar los módulos fotovoltaicos y demás elementos. Todo ello conlleva un gran impacto sobre el medio ambiente, por lo que se debe desarrollar con sensibilidad hacia el hábitat en el que se ubica a fin de que resulte ambientalmente sostenible en su conjunto.

Uno de los escollos de mayor importancia a la hora de desarrollar grandes instalaciones de energía solar fotovoltaica es el hecho de que la alta ocupación de suelo que requieren obliga a transformar suelo agrícola en suelo industrial, con el consiguiente impacto ambiental que ello conlleva. Por ello, este impacto que se genera sobre la biodiversidad debe ser aminorado mediante la evaluación previa de las repercusiones sobre el medio ambiente, así como la toma de adecuadas medidas de gestión. Anteriormente, el impacto de las centrales fotovoltaicas suponía la alteración del hábitat y, en muchos casos, la destrucción de este con el enorme perjuicio para las especies de flora y fauna que ello conlleva.

El suelo sobre el que se instaura una central fotovoltaica siempre experimenta un cierto grado de degradación durante la etapa constructiva. Este nivel de degradación medioambiental continúa también durante la fase de operación puesto que bien se aplican sustancias químicas que inhiben el crecimiento de la materia vegetal o se elimina esta mediante operaciones de desbroce del terreno. En cualquier caso, resulta evidente la alteración de la vegetación, aunque sea en menor grado en la situación descrita en segundo lugar.

La transformación de los hábitats que provoca la implantación de instalaciones fotovoltaicas produce un amplio rango de impactos entre los que destaca la reducción de la cubierta vegetal, la compactación del suelo, la reducción de la infiltración, el incremento de la escorrentía superficial, la pérdida de suelo, la reducción de la materia orgánica en el suelo o la disminución en la calidad del agua.

Por todo ello, cuando la instalación llega al final de su vida útil es fundamental reinstaurar el terreno a las condiciones que presentaba de manera previa al desarrollo de la actividad industrial.

Por otro lado, hay que destacar el impacto que las líneas eléctricas aéreas de evacuación de la energía producida en las plantas solares fotovoltaicas generan sobre la fauna, fundamentalmente sobre las aves de mayor tamaño. Estas suponen una autentica trampa mortal para la avifauna principalmente por electrocución o colisión contra las mismas.

3 TIPOS DE CÉLULAS

En la actualidad existen distintas tipologías de células fotovoltaicas que constituyen el elemento diferenciador más importante entre los distintos módulos fotovoltaicos. Además, la tipología de célula fotovoltaica por la que está compuesto el módulo determina aspectos de enorme relevancia como el tamaño del módulo, su precio o la tecnología asociada al mismo.

En relación con lo anterior, pese al loable esfuerzo que están efectuando los fabricantes de paneles fotovoltaicos por buscar nuevas tecnologías que permitan incrementar la eficiencia y disminuir costes, la mayoría de las células fotovoltaicas se encuentran constituidas fundamentalmente por silicio. Buena prueba de ello es que alrededor del 90% de los módulos que se fabrican tienen al silicio como principal constituyente.

Dentro de los paneles que cuentan con el silicio como componente principal existen una serie de variaciones, las cuales se abordan en el presente punto, destacando tres por encima del resto debido a una mayor cuota de mercado. Estos tres tipos de paneles basados en el silicio son los monocristalinos, policristalinos y amorfos. Todo lo desarrollado en el presente capítulo se encuentra fundamentalmente basado en el conocimiento reflejado en (MARTÍN ÁLVAREZ, 2019).

3.1 Células monocristalinas

Las células monocristalinas, representadas en la Figura 13, se caracterizan por estar fabricadas a partir de un silicio extremadamente puro que les confiere un color negro oscuro el cual facilita su identificación respecto a otro tipo de células fotovoltaicas. Además, la pureza del silicio a partir del cual se fabrican les dota de un alto grado de eficiencia a la hora de efectuar la conversión de la radiación solar en energía eléctrica.

Según (IGES SÁNCHEZ, 2020), la fabricación de las células monocristalinas se encuentra basada en un proceso tecnológico que no se encuentra exento de complejidad. Este proceso se inicia con la fundición de silicio policristalino dentro en un crisol de cuarzo de alta pureza, ya que este material de tipo refractario soporta muy bien las altas temperaturas que se alcanzan. Posteriormente, se somete al crisol a un movimiento giratorio constante en una atmósfera de argón a baja presión. El resultado de todo ello es la obtención de lingotes de silicio monocristalino con forma cilíndrica, razón por la cual las células de silicio monocristalino presentan chaflanes en sus esquinas.

La eficiencia de las células monocristalinas es considerablemente más alta que la de las células policristalinas, en torno al 15%. De igual manera, si la comparación se efectúa con células desarrolladas a partir de otro material, la mayor eficacia de las células monocristalinas se incrementa hasta más del 20%. Para el caso de células fabricadas a partir de silicio comercial la eficiencia se encuentra normalmente entre el 15% y el 17% inferior a las células de silicio monocristalino.

El rendimiento que presentan las células de silicio monocristalino en condiciones óptimas de laboratorio se sitúa en entorno a un 24% mientras que en aplicaciones prácticas reales disminuye hasta el 15-18%, convirtiéndose en las células de mayor rentabilidad eléctrica.

Sin embargo, la mayor eficacia no es la única ventaja que presentan las células monocristalinas, puesto que estas también se encuentran dotadas de una mayor durabilidad. Hasta tal punto llega este aspecto que la garantía que ofrecen los fabricantes sobre las placas que emplean esta tecnología se sitúa en los 25 años con una vida útil que supera ampliamente este periodo.

Pese a las innumerables ventajas que presenta, también se incluyen una serie de desventajas que se deben considerar. La primera de las desventajas que se puede asignar a las células monocristalinas es su elevado precio ya que resulta la opción más cara de todas las células fotovoltaicas que se elaboran con silicio. Este hecho se debe a los desechos que se producen por el sistema de corte cuadrado que se les aplica, además del mayor grado de pureza que es necesario en el silicio.

Otra de las mayores desventajas de esta tipología de células es la gran afección que presenta su rendimiento ante el aumento de temperatura. Sin embargo, respecto a este aspecto, no resulta determinante si se compara

con las pérdidas que presentan otro tipo de células fotovoltaicas.

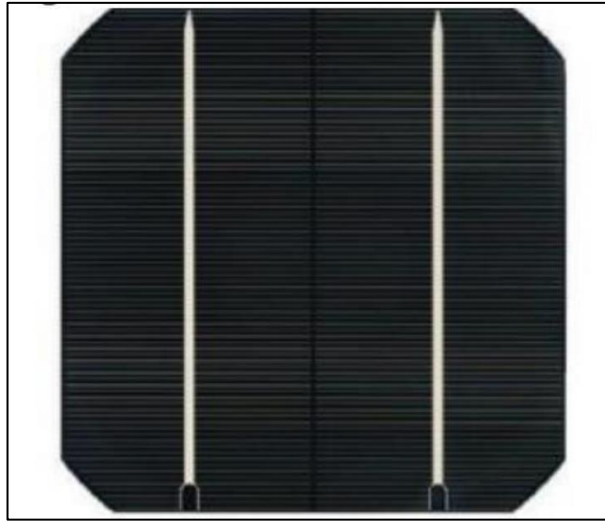


Figura 13 – Representación gráfica de un panel de silicio monocristalino.

Fuente: (POLITYTO CREMASCO, CORDEIRO, RODRIGUES LAUTERT, ASSADE LELUDAK, & URBANETZ JUNIO, 2021)

3.2 Células policristalinas

Las células fotovoltaicas policristalinas se conocen también como células de polisilicio, siendo estas las primeras células desarrolladas allá por la década de los ochenta del siglo pasado. El silicio policristalino que las constituye les confiere un color de tono azul oscuro, tal y como se aprecia en la Figura 14.

El proceso de fabricación de esta tipología de células presenta diferencias respecto al de las células monocristalinas, ya que el silicio tras fundirse se vierte directamente en un molde de forma cuadrada. La base del proceso de producción se basa en procesos de fundición con enfriamiento controlado en molde de grafito o cuarzo. Debido al empleo de molde con forma cuadrada o rectangular es posible optimizar al máximo el espacio del que dispone el módulo fotovoltaico y disminuir los desechos.

Como expresa (IGES SÁNCHEZ, 2020), el proceso de fabricación de las células de silicio policristalino tiene un grado de complejidad menor al de las células de silicio monocristalino. Así pues, la mayor simpleza que presenta el proceso de fabricación de esta tipología de células posibilita una disminución de los costes asociados a las mismas y permite mayores lotes de producción a nivel industrial. Todo ello genera una enorme ventaja a nivel económico que posiciona a las células de silicio policristalino como una opción más atractiva que las células de silicio monocristalino.

Además, el material desperdiciado durante el proceso de fabricación resulta mínimo, la apariencia de la célula policristalina es mejor que la monocristalina y su ciclo de vida consume una menor energía.

Otro aspecto de gran interés es el hecho de que las altas temperaturas no afectan tanto a la eficiencia de la célula policristalina en comparación con las células monocristalinas y, por ende, termina siendo una opción más atractiva para aquellos emplazamientos que se sitúan en climas muy cálidos, puesto que su eficiencia no se ve muy reducida y su precio resulta menor.

Sin embargo, la eficiencia que este presenta es menor tanto respecto al silicio monocristalino como con respecto a otros materiales en desarrollo. Esta tipología de células presenta un rendimiento en condiciones óptimas de laboratorio que se encuentra entre el 19% y 20% mientras que el rendimiento en condiciones prácticas se sitúa entre el 12% y el 14% (IGES SÁNCHEZ, 2020).

Uno de los factores de mayor importancia a la hora de justificar por qué la eficiencia de la tecnología monocristalina es superior al de la tecnología policristalina es el hecho de que las tecnologías policristalinas

tienen pérdidas en los límites de discontinuidades de grano, mientras que las tecnologías monocristalinas tienen celdas uniformes.

Sin embargo, se están desarrollando en la actualidad cambios en lo relativo al proceso de fabricación y la arquitectura de las celdas a fin de aumentar la eficiencia de las células policristalinas. Uno de estos ejemplos es la arquitectura PERC que logra disminuir la diferencia en cuando a eficacia entre la tecnología monocristalina y policristalina desarrolladas mediante las arquitecturas convencionales.



Figura 14 – Representación gráfica de un panel de silicio policristalino.

Fuente: (POLITYTO CREMASCO, CORDEIRO, RODRIGUES LAUTERT, ASSADE LELUDAK, & URBANETZ JUNIO, 2021)

3.3 Células amorfas

Las células de silicio amorfo, representadas en la Figura 15, a diferencia de las células de silicio cristalino ya sean monocristalinas o policristalinas, se caracterizan porque los átomos de silicio se encuentran estructurados de manera aleatoria. Este hecho es determinante a la hora de determinar las características del mismo puesto que la distribución aleatoria de los átomos genera un mayor espacio en el silicio amorfo que en el cristalino.

Las células de silicio amorfo, caracterizadas por un color amarronado, se componen de una serie de finas capas que permiten la conductividad eléctrica, lo que motiva que no se aprecie alteración visual relativa al conexionado entre células.

Pese a que el coste de fabricación de esta tipología de células es reducido, su principal defecto se encuentra en la baja eficacia que presentan. Tal es el caso, que mientras que en condiciones óptimas de laboratorio el rendimiento se fija en torno al 16%, en aplicaciones prácticas resulta finalmente inferior al 10% (IGES SÁNCHEZ, 2020).

Esta tipología de células fotovoltaicas se ven fuertemente afectadas por una baja eficiencia frente a la degradación motivada por la radiación solar. Así pues, cuando la luz induce de manera continuada en el tiempo a la célula amorfa, esta sufre una inestabilidad que merma su eficiencia.

Por todo ello, la eficacia de los módulos constituidos a partir de células amorfas se degrada con la exposición a la luz generando que, si tras la instalación el rendimiento podía alcanzar el 12%, con el paso de los meses disminuya hasta un 6% aproximadamente.



Figura 15 – Representación gráfica de un panel de silicio amorfo.

Fuente: (LAZO VIRI, 2019).

Como se desprende de lo tratado en el presente capítulo, las dos alternativas más rentables es el empleo de células de silicio monocristalino o bien células de silicio policristalino. Uno de los principales puntos que determina la decisión entre ambas tipologías es el clima del emplazamiento.

De esta manera, en aquellos climas con un carácter frío se ve favorecido el empleo de las células de silicio monocristalino, en tanto que en climas cálidos es conveniente optar por los paneles basados en las células de silicio policristalino.

Además, las células de silicio monocristalino trabajan en torno a dos voltios por encima de las de silicio policristalino, por lo que su punto de potencia máximo se encuentra alrededor de medio amperio por encima. Como resultado de todo ello, las células de silicio monocristalino logran alcanzar unos 35 W más de potencia.

4 RADIACIÓN SOLAR

Este cuarto capítulo se encuentra dedicado a la radiación solar y todo lo que ella conlleva. La radiación solar es un factor básico a la hora de determinar la ubicación de una instalación fotovoltaica ya que resulta condición sine qua non para su funcionamiento. A continuación, se incluyen una serie de puntos en los que se desglosa la información de mayor relevancia respecto a este parámetro.

4.1 Definición de la radiación solar

Según (PAREJA APARICIO, 2010), la radiación solar es el nombre con el que se conoce a la energía que emite el sol que, para el caso particular de la tierra, es del orden de $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh. Este valor es tan elevado como para que se pudiese llegar a satisfacer completamente las necesidades en materia energética a nivel mundial. Así pues, se puede afirmar que se trata de una fuente de energía de carácter renovable con un enorme potencial.

Sin embargo, no se trata de una tecnología libre de inconvenientes. Entre estos se encuentran la forma de captación y almacenaje o las condiciones a las que se encuentra sujeta en cuanto a condiciones meteorológicas, ambientales o geográficas.

4.2 El sol

La mayor parte del desarrollo del presente punto se encuentra fundamentado en la información obtenida de (PAREJA APARICIO, 2010). Así pues, se puede indicar que el sol es una estrella que se concibe, desde el punto de vista que concierne al presente trabajo, como un enorme reactor nuclear de fusión que ilumina y calienta a la tierra. Por ello, la radiación solar proveniente del sol se considera una inmensa fuente de energía con carácter inagotable.

Entre sus principales características destaca un diámetro que alcanza los $1,39 \cdot 10^9$ metros, una temperatura media de 5.500 °C y una elevada masividad, cuyo valor es de $2 \cdot 10^{30}$ kg lo que supone que es unas 330.000 veces superior a la masa de la tierra.

La elevada temperatura que alcanza proviene de una serie de reacciones internas que generan una paulatina pérdida de masa, la cual se transforma en energía. El plasma solar es un gas con alto nivel de ionización que se constituye fundamentalmente de hidrógeno y helio. Bajo la acción del campo gravitacional solar, este se comprime dando lugar en su interior a un incremento en la densidad de este y en la temperatura lo cual permite que se desarrollen las reacciones nucleares. Así pues, son estas reacciones nucleares la fuente de energía que el sol emite al espacio, tal y como recoge (GROSSI GALLEGOS, 2002).

La energía que se produce en el sol se transmite en forma de radiación electromagnética que se conoce como radiación solar. Esta radiación solar se va aminorando a medida que avanza por el espacio, de tal forma que en la superficie solar alcanza su valor máximo del orden de los $5,4 \cdot 10^{24}$ J.

Puesto que existe una enorme distancia entre el sol y la tierra, con un valor medio de unos $1,5 \cdot 10^{11}$ metros, la radiación solar que llega a la atmósfera terrestre se encuentra considerablemente aminorada por la distancia recorrida. Así pues, la energía que llega del sol a la tierra es del orden de los 1360 W/m². Además, esta radiación sufre una atenuación debido a la capa atmosférica, por lo que tras atravesar la atmósfera la radiación que llega a la superficie terrestre es de unos 1000 W/m².

Por otra parte, cabe resaltar el hecho de que la tierra, en su movimiento de traslación alrededor del sol, define una trayectoria elíptica. Es decir, el movimiento de traslación se realiza sobre un eje horizontal, que es el ecuador terrestre, con un ángulo de $23^{\circ}27'$, tal y como refleja la Figura 16. Por ello, la posición del sol desde el punto de vista de la tierra ve modificada su altura, lo cual deriva en que la posición del sol resulte diferente de unas estaciones a otras.

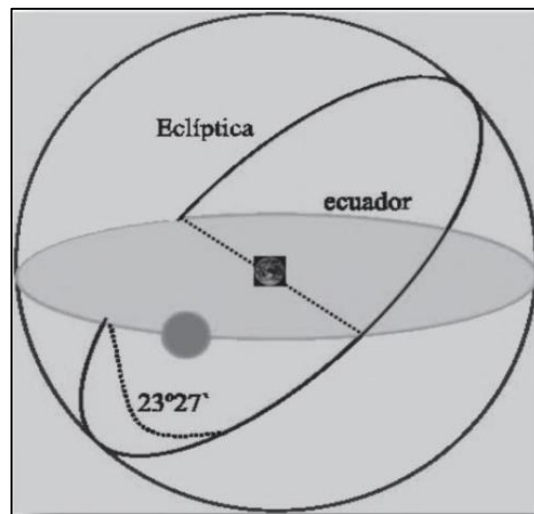


Figura 16 – Esquema de la posición de la tierra al sol.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010).

Así pues, como se puede apreciar en la Figura 17, para zonas geográficas situadas en el hemisferio norte aquella posición en la cual el sol se encuentra en su punto máximo se conoce como solsticio de verano, mientras que la posición en la cual el sol se encuentra en su punto mínimo se conoce como solsticio de invierno.

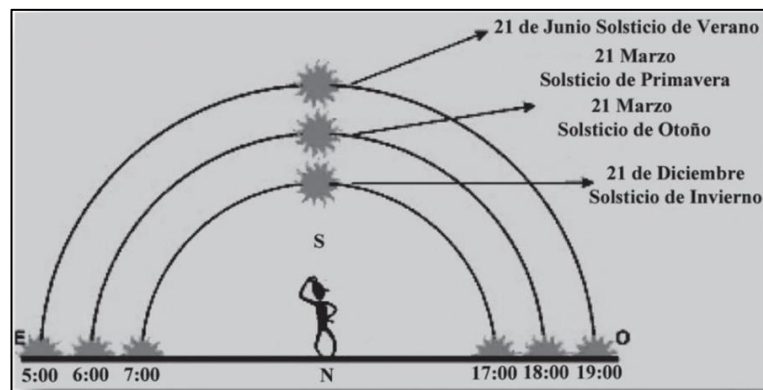


Figura 17 – Ejemplo de esquema de la posición del sol desde la superficie terrestre.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010)

De igual manera, al verse modificada la altura del sol, el ángulo de incidencia de este sobre la superficie terrestre también se ve modificado tal y como refleja la Figura 18.

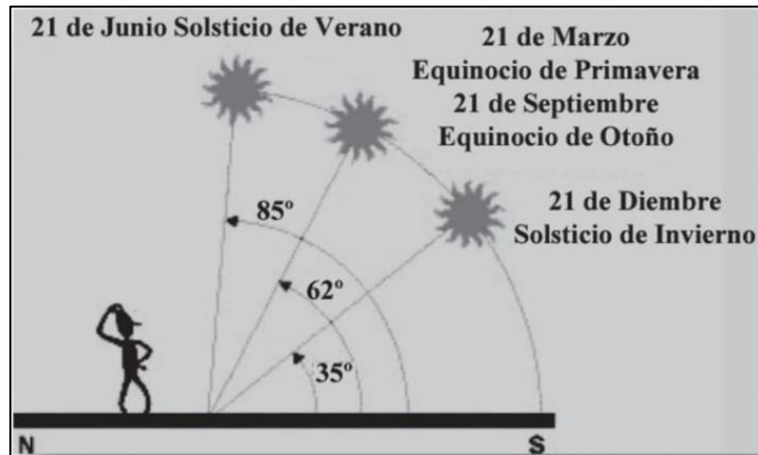


Figura 18 – Ejemplo de ángulo del sol respecto a la superficie terrestre.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010).

4.3 Tipología de radiación

La labor recogida en el presente punto se basa en lo expresado en (PAREJA APARICIO, 2010), según el cual la radiación solar no es un ente único e inequívoco, sino que, en función la incidencia sobre una superficie se puede distinguir tres grandes tipos de radiación solar, tal y como se aprecia en la Figura 19.

- Radiación directa, se corresponde con aquella que se recibe directamente desde el sol sin que haya tenido lugar desviación alguna durante su paso por la atmósfera.
- Radiación difusa, es aquella que, al atravesar la atmósfera terrestre, sufre desviaciones en su trayectoria que se deben fundamentalmente a fenómenos como el de la reflexión y difusión.
- Radiación reflejada o albedo, esta es un tipo de radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Cabe resaltar que, de las tres tipologías de radiación enunciadas, la radiación directa es la mayor y más importante para las aplicaciones fotovoltaicas. Sin embargo, se pueden dar ciertas condiciones meteorológicas que hacen que no se reciba radiación directa pero sí que se continúa recibiendo radiación solar sobre los captadores gracias a la radiación difusa. Esta situación es la que tiene lugar durante los días nublados, que se consideran como días con poca radiación solar.

La efectividad de la radiación difusa en la producción de energía eléctrica se encuentra muy determinada por las propiedades direccionales de la radiación y por el ángulo de los sistemas de captación utilizados, el cual está marcado por los propios factores geográficos. Del mismo modo, también depende de la naturaleza del suelo, por ejemplo, en la nieve la reflexión es muy superior a la producida sobre una superficie con vegetación.

Así pues, la radiación solar total se puede considerar como la suma de la radiación directa, difusa y reflejada.

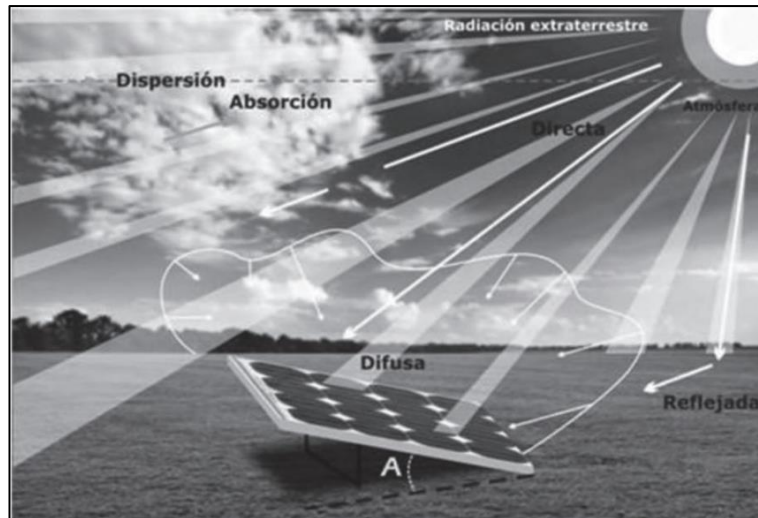


Figura 19 – Tipología de radiación solar sobre la superficie terrestre.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010).

4.4 Colocación paneles fotovoltaicos

Los captadores solares son elementos capaces de convertir la energía proveniente del sol en energía eléctrica o energía térmica. En el caso de que la energía producida sea de tipo eléctrico se les conoce como módulos fotovoltaicos, mientras que los destinados a la fototérmica se conoce como paneles solares.

En ambos casos, la colocación de estos elementos es determinante para aumentar su productividad puesto que la esta depende de la incidencia solar que varía en función de multitud de aspectos como la estación del año o la zona geográfica.

Según (PAREJA APARICIO, 2010), para determinar la correcta colocación de los paneles fotovoltaicos se deben considerar una serie de elementos como los que se recogen a continuación:

- La latitud, esta se puede definir como la distancia existente desde un determinado punto de la superficie terrestre al ecuador. Su descripción gráfica se encuentra recogida en la Figura 20.

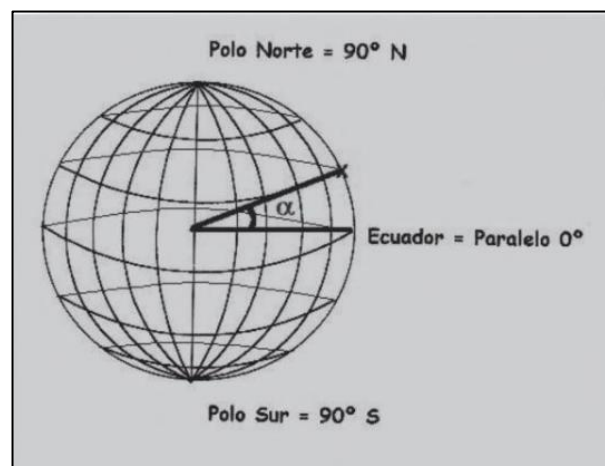


Figura 20 – Latitud terrestre.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010)

- La orientación o Azimut (astronómico), que se define para el hemisferio norte como aquel ángulo de desviación respecto al sur geográfico de una superficie. Sin embargo, hay que resaltar que el sur geográfico no se corresponde con el sur magnético, tal y como muestra Figura 21. Por ello, como norma general los módulos fotovoltaicos que se instalan en el hemisferio norte se sitúan hacia el sur magnético y, para el caso del hemisferio sur, la orientación suele ser hacia el norte magnético.

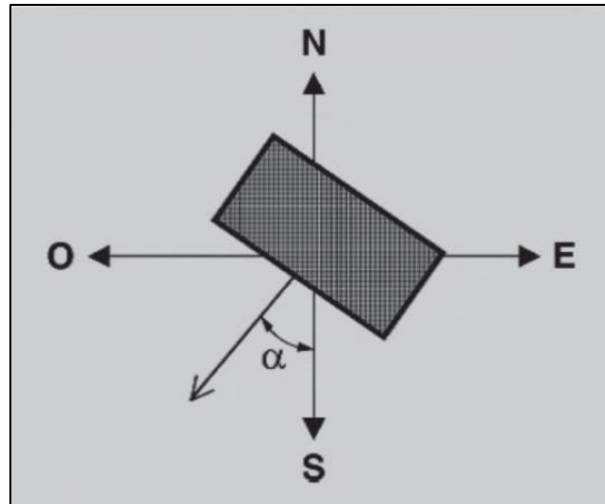


Figura 21 – Esquema de la orientación o Azimut.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010).

- La inclinación, parámetro que se define como el ángulo que forma el plano de la superficie captadora y la horizontal. De manera gráfica este parámetro se puede apreciar en la Figura 22.

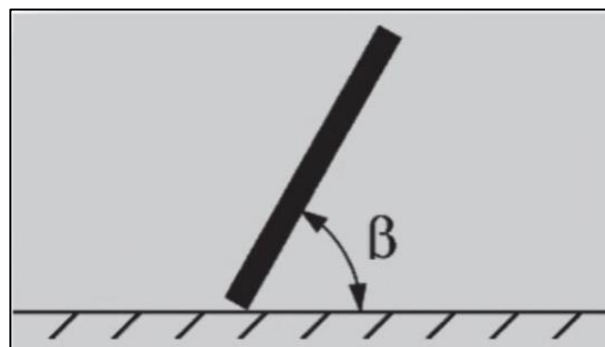


Figura 22 – Esquema de relativo a la inclinación del módulo fotovoltaico.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010).

- La incidencia, que se define como el ángulo que forma la radiación directa sobre la superficie captadora y la perpendicular al captador, Figura 23. Así pues, este dato conviene que sea el menor posible ya que con ello se logra incrementar la energía captada.

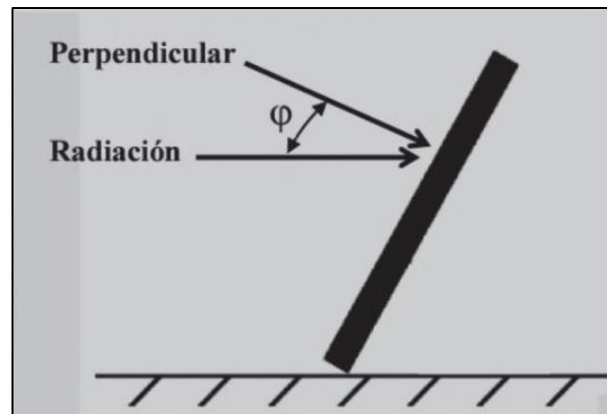


Figura 23 – Esquema relativo a la inclinación del módulo fotovoltaico.

Fuente: (PAREJA APARICIO, 2010)

Para concluir este apartado, se ha de indicar que en función emplazamiento seleccionado se obtiene de manera directa tanto la orientación como la latitud. Además, en función del uso al que se destine la instalación se puede determinar el valor de la inclinación con el fin de que el ángulo de incidencia sea lo más perpendicular posible al captador.

Por ello, si se considera la dirección sur al estar emplazados en el hemisferio norte y la orientación óptima, la inclinación se puede aproximar de la siguiente manera. Si el consumo es de carácter anual, el grado de inclinación es el mismo que la latitud geográfica menos diez grados. En el caso de un consumo preferente en invierno, el grado de inclinación se corresponde con la latitud geográfica sumado diez grados. Por último, para un consumo preferente en verano, el grado de inclinación sería el de la latitud geográfica menos veinte grados.

Además, existe una expresión matemática capaz de proporcionar el grado de inclinación óptima (β_{opt}) atendiendo a la latitud del enclave (ϕ). Esta expresión es la que se adjunta a continuación:

$$\beta_{opt} = 3.7 + 0.69 \cdot \phi$$

4.5 El efecto de sombra

En el proceso de captación de energía solar hay que evitar el denominado como efecto sombra, ya que este genera unas pérdidas de rendimiento no deseadas puesto que se cubre de forma temporal la superficie de captación. En una instalación fotovoltaica las sombras pueden suceder por la influencia de obstáculos externos, como puede ser edificios, montañas o árboles, o bien a causa de una alineación errónea en la distribución de los módulos fotovoltaicos de tal forma que la sombra producida por unos se proyecta sobre otros.

Así pues, el efecto sombra se traduce en energía que podría ser captada y no lo es porque hay obstáculos que lo dificultan. Para que esto no suceda se establecen una serie de conceptos como el de la distancia mínima entre filas de captadores, el cual se relaciona con el efecto sombra producido por los propios captadores.

Otro término acuñado es el de las pérdidas por sombreado, sin embargo, este se utiliza en aquellos casos en los cuales el elemento que produce el efecto sombra no es posible evitarlo. Por ello, expresa la relación entre aquella energía que se capta y la que se podría llegar a captar de no ser por el efecto de la sombra que se proyecta sobre la superficie de los captadores.

4.6 Radiación en la zona de interés

Para cerrar el capítulo dedicado a la radiación solar se trata lo relativo a este parámetro en la región occidental de Andalucía, que es el área sobre el que se pretende determinar la ubicación más favorable para implantar la instalación fotovoltaica.

Como se ha comentado en apartados anteriores, el nivel de radiación de radiación que llega a la tierra procedente del sol es muy superior al que finalmente alcanza la superficie terrestre debido principalmente a fenómenos como la reflexión, la absorción o la difusión.

Estos fenómenos pueden estar vinculados a una serie de factores ambientales particulares de cada enclave. Por ejemplo, la difusión de la radiación solar se ve muy favorecida por la presencia de polvo o contaminación ambiental, que resulta mucho más común en entornos urbanos o industriales que en entornos rurales. Además, los efectos climatológicos de un área determinada, como la presencia habitual de nubosidad, niebla o nieve alteran el nivel de radiación que se puede aprovechar mediante la tecnología fotovoltaica. Por otro lado, los niveles de radiación varían en función de la época del año en cuestión, con la particularidad de que los valores extremos se suelen alcanzar siempre durante el verano o el invierno.

En apartados anteriores se tratan los valores de radiación a escoger según el uso de la instalación, así como la inclinación de los sistemas captadores para aprovechar la mayor energía posible. Así pues, España cuenta con una serie de diferencias regionales en materia de irradiación global media anual teniendo, por norma general, la zona sur mayores valores que los alcanzados en las zonas del norte por su mayor proximidad al ecuador.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede apreciar lo indicado anteriormente, ya que se corresponde con el mapa de radiación global en España.

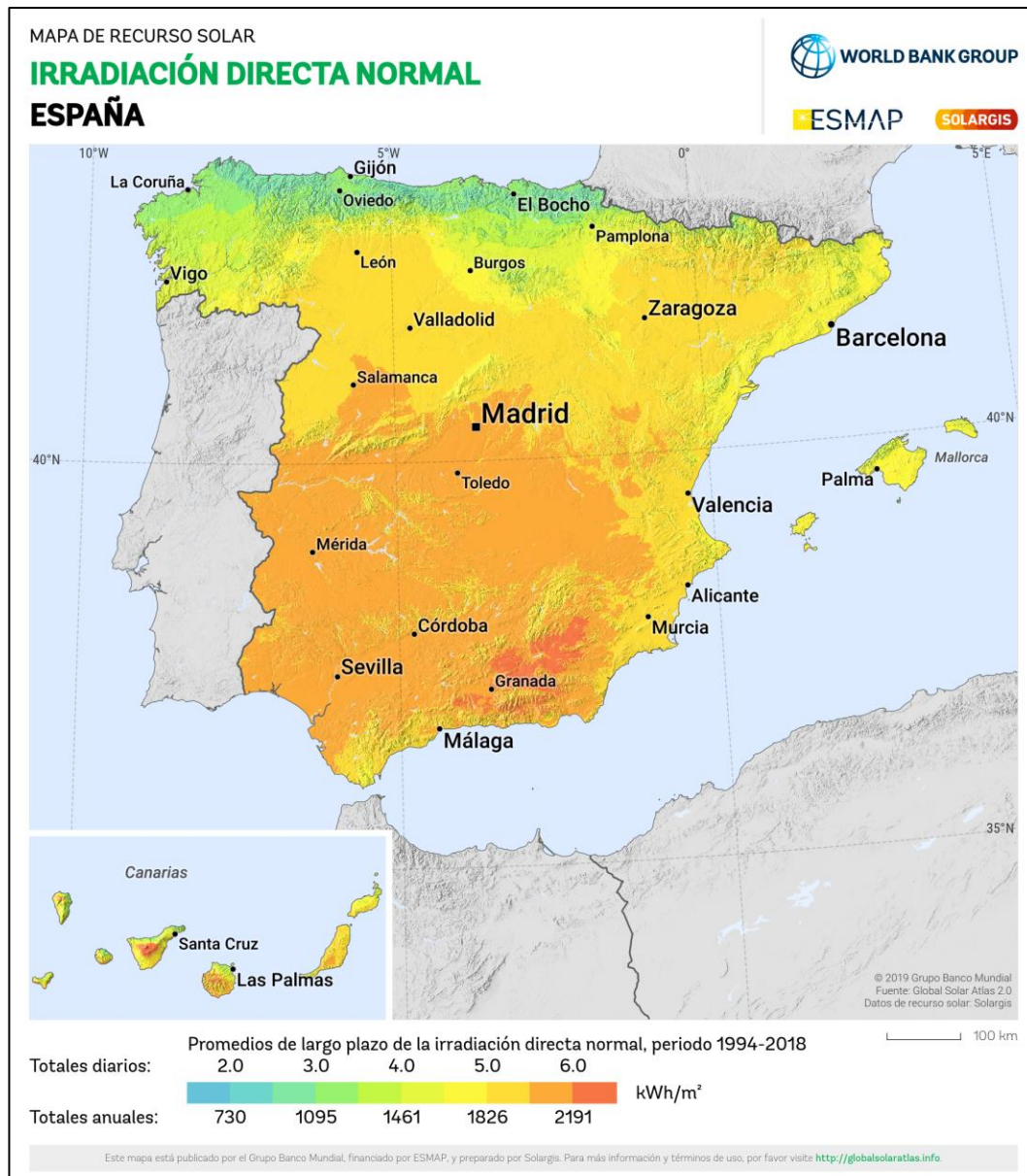


Figura 24 – Irradiación directa normalizada en España.

Fuente: (SOLARGIS, 2019)

Como se puede apreciar en el mapa, la zona occidental de Andalucía se encuentra mayoritariamente dentro del área que recibe un mayor nivel de radiación solar. Esto es, a priori, sumamente positivo puesto que se trata de la zona con mayor potencial de rendimiento fotovoltaico.

5 SITUACIÓN DE LA FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA

Actualmente la fotovoltaica se encuentra viviendo su época dorada en España, batiendo récords en cuanto a instalación de potencia año tras año. Esto se espera que continúe en el tiempo debido a un contexto político favorable por parte de la Comisión Europea que, en base a la situación geopolítica y la crisis energética mundial, pretende que los estados miembros aceleren y faciliten la tramitación de todos aquellos proyectos que potencien la transición energética hacia energías limpias. Además, estos deben dotar a Europa de un mayor nivel de autonomía energética frente a proveedores poco fiables y la volatilidad de los combustibles fósiles (UNEF, 2022).

Por ello, la Comisión Europea ha señalado como método para facilitar la tramitación de los proyectos de energías renovables la simplificación y el acortamiento de los procesos de concesión de permisos, ya que estos factores son dos de los principales implicados en el retraso de las inversiones en energías renovables e infraestructuras conexas.

Así pues, se debe garantizar que la planificación, la construcción y la explotación de instalaciones para la producción de energía procedente de fuentes renovables, su conexión a la red y la propia red conexas se consideren de interés público superior y, en aras de la seguridad pública, puedan acogerse al procedimiento más favorable disponible en sus procedimientos de planificación y autorización.

La urgencia de acometer la descarbonización y la necesidad de disminuir nuestra dependencia energética obligan a que la construcción de las plantas renovables sea una prioridad en la tramitación administrativa, siempre respetando la máxima vigilancia ambiental.

5.1 Listado de las mayores plantas fotovoltaicas en España

Buena prueba de la buena salud que goza la tecnología fotovoltaica en España se recoge en la Tabla 1, la cual refleja las diez instalaciones fotovoltaicas con mayor potencia instalada basado en lo reflejado en (RED ELÉCTRICA, 2022). Lo más destacable es el hecho de que todas las centrales en cuestión se han construido en el último lustro.

Propietario	Nombre	Población	Provincia	Potencia	Año de puesta en funcionamiento	Superficie
Iberdrola	FV Francisco Pizarro	Torrecillas de la Tiesa y Aldeacentenera	Cáceres	590 MWp	08/22	1.300 ha
Iberdrola	IF Núñez de Balboa	Usagre	Badajoz	500 MWp	04/20	1.000 ha
Northleaf	Central Solar Fotovoltaica de Mula	Mula	Murcia	494 MWp	07/19	1.000 ha
Statkraft	PFVTayuela	Tayuela	Cáceres	300 MWp	12/20	820 ha
Ellomay	Talasel Solar PV	Talaván	Cáceres	300 MWp	12/20	615 ha
Iberdrola	P.S.F.V. Ceclavin	Ceclavín	Caceres	328 MWp	07/21	800 ha
Repsol	Valdesolar	Valdecaballeros	Badajoz	264 MWp	09/21	700 ha
Promosolar Juwi, 17, S. L.	Bonete FV	Bonete	Albacete	241 MWp	-	400 ha
Galp Energía	Chiprana - Samper	Chiprana	Zaragoza	200 MWp	01/20	500 ha
Ardian Infraestructure & White Summit Capital	La Isla	Alcalá de Guadaíra	Sevilla	200 MWp	-	400 ha

Tabla 1. Listado de las 10 plantas fotovoltaicas de mayor tamaño en España.

Fuente: Elaboración propia.

6 LEGISLACIÓN SOBRE CENTRALES FOTOVOLTAICAS EN ESPAÑA

En el presente punto se desarrolla todo lo relativo a la legislación vigente en España en lo relativo a los sistemas fotovoltaicos. De esta manera, se ha desglosado la normativa en dos grandes grupos, por un lado, se aborda lo relativo a la legislación que aplica a todos los sistemas fotovoltaicos y, por otro lado, se aborda lo relativo a la legislación específica para los sistemas fotovoltaicos conectados a red, que es el que comente a lo tratado en el presente trabajo. (IDAE, 2011)

6.1 Legislación común a todos los sistemas fotovoltaicos

El conjunto de los sistemas fotovoltaicos presentes sobre el territorio español se encuentra bajo el amparo de la ley 24/2013, también conocida como ley del sector eléctrico. La ley del sector eléctrico recoge el aspecto normativo que compete al del sector eléctrico con el objetivo de asegurar un suministro eléctrico de calidad que se ajuste a la demanda de los usuarios en cuanto a seguridad, calidad, eficiencia, objetividad, transparencia y al mínimo coste.

Además, también es de competencia general para todos los sistemas fotovoltaicos el RD 1955/2000 en el que se incluye la regulación de todas las actividades del sector eléctrico. Dentro de este real decreto se concentran aspecto de suma relevancia a nivel restrictivo en lo que concierne a las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones generadoras de energía eléctrica.

A nivel legislativo los sistemas fotovoltaicos se pueden desglosar en tres grandes grupos, las instalaciones fotovoltaicas aisladas, en adelante SFA, las centrales fotovoltaicas o aquellas instalaciones destinadas al autoconsumo.

Por ello, se procede a abordar de manera rápida lo relativo a los SFA y las instalaciones de autoconsumo para focalizar el desarrollo en la legislación relativa a las centrales eléctricas. Las instalaciones destinadas al autoconsumo se rigen fundamentalmente por dos reales decretos. El RD 15/2018 en el que se trata todo lo relativo a la transición energética y la protección de los consumidores y el RD 244/2019 que abarca lo que concierne a las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo en materia de energía eléctrica.

Por otra parte, las instalaciones SFA se encuentran bajo el amparo del RD 842/2002, también denominado como reglamento electrotécnico de baja tensión, y la guía técnica de aplicación para instalaciones generadoras de baja tensión.

Lo que mayor importancia presenta para el presente proyecto es lo relativo a las centrales fotovoltaicas, para las cuales la principal normativa es el RD 413/2014, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos y el RD 1183/2020, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Dentro de esta categoría de grandes centrales fotovoltaicas existe una distinción en cuanto a normativa en función de la potencia eléctrica de la instalación. Por ello, mientras que para aquellas instalaciones con una potencia inferior a 100kW aplica el RD 1699/2011 por el que se regula la conexión a red de instalaciones de

producción de energía eléctrica de pequeña potencia. Para las instalaciones con una potencia instalada superior a los 100 kW se debe considerar el RD 1183/2020 por el que se regula el acceso y conexión a las redes de transporte y distribución eléctrica.

La Figura 25 recoge de manera esquemática lo desarrollado en los párrafos superiores, haciendo hincapié en aquella normativa de mayor consideración para cada tipología de sistema fotovoltaico.

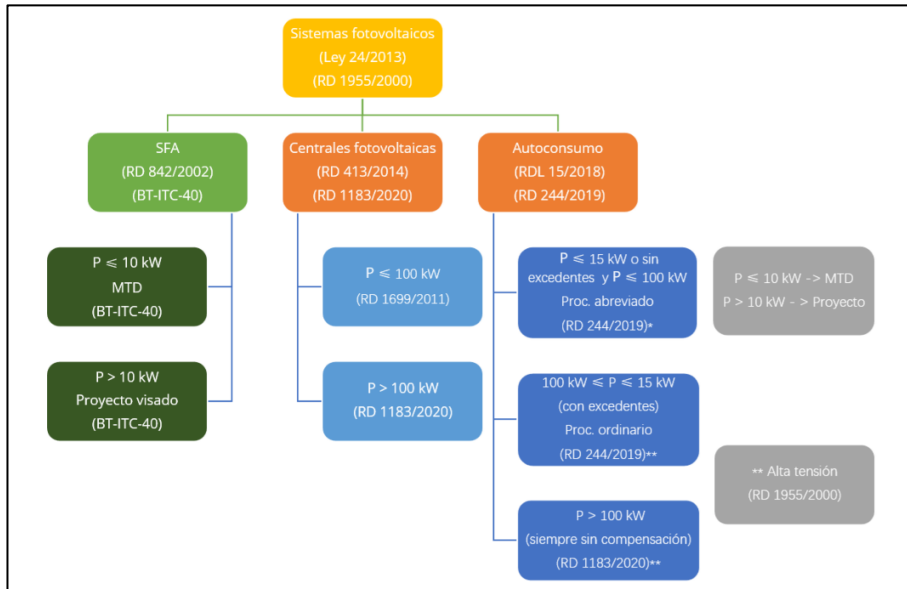


Figura 25 – Esquema conceptual relativo a la legislación fotovoltaica en España.

Fuente: (CENSOLAR, 2021)

Además de lo anterior, se incluye un listado de aquella normativa que compete a los proyectos fotovoltaicos, tanto a nivel nacional como autonómico:

- Real Decreto 187/2016 en el que se trata lo relacionado con las exigencias de seguridad del material eléctrico.
- Real Decreto 50/2008, a través del cual se regulan los procedimientos administrativos referidos a las instalaciones de energía solar fotovoltaica emplazadas en la Comunidad Autónoma de Andalucía.
- Orden de 26 de marzo de 2007, de especial importancia puesto que es aquella en la que se incluyen las especificaciones técnicas de las instalaciones fotovoltaicas en Andalucía.
- Ley 2/2007, del 27 de marzo, de fomento de las energías renovables, el ahorro y la eficiencia energética de Andalucía.
- El RDL 23/2020 en el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.
- La Circular 1/2021 de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, por la que se establece la metodología y condiciones del acceso y de la conexión a las redes de transporte y distribución de las instalaciones de producción de energía eléctrica.

7 CRITERIOS PARA LA UBICACIÓN DE UNA CENTRAL FOTOVOLTAICA

En este séptimo capítulo del proyecto se trata todo lo relativo a los criterios seleccionados para la determinación de la localización más propicia de una central fotovoltaica en la región occidental de Andalucía.

En relación con lo anterior, es importante resaltar el hecho de que los criterios seleccionados se encuentran basados en lo reflejado en los artículos científicos sobre el tema como los son (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020) y (GUTIERREZ VELAYOS, AGUILÓ PASTRANA, & VELÁZQUEZ SAORNIL, 2018). En ellos se combinan criterios de carácter técnico, económico y ambiental. A continuación, se procede a detallar cada uno de los criterios establecidos:

- La pendiente del terreno es un factor de carácter técnico en el cual el incremento de su valor supone una evolución negativa de la aptitud para la implantación de una central fotovoltaica. Así pues, los valores mínimos en cuanto a la pendiente implican niveles máximos de aptitud para establecer las instalaciones fotovoltaicas. Este hecho se debe a la multitud de inconvenientes que suponen los terrenos con elevadas pendientes, los cuales necesitan de la realización de grandes movimientos de tierra para la adecuación del terreno. Todo ello dispara el coste de la ejecución de la instalación, así como la dificultad de acceder al mismo. De esta manera, se puede concluir que aquellos terrenos con baja pendiente facilitan la instalación de los paneles solares.
- La radiación es un factor de carácter técnico cuyo criterio de aptitud que se encuentra ligado de manera directa a la intensidad y el número de horas de exposición a la radiación solar, ya que indica la cantidad de energía solar que se irradia sobre una determina superficie a lo largo de un espacio temporal concreto.

Así pues, es el principal criterio a la hora de analizar el emplazamiento de una instalación fotovoltaica ya que, para que una central fotovoltaica resulte viable, es fundamental que cuente con altos niveles de radiación. Por ello, los niveles máximos de irradiancia global horizontal proporcionan niveles máximos de aptitud respecto al citado criterio.

- La cercanía a las vías de comunicación es un condicionante de carácter económico con el que se analiza la accesibilidad del enclave. Cabe destacar que una mayor accesibilidad supone una mayor aptitud ya que un menor valor en cuanto a la distancia viaria supone un enorme ahorro en tiempo y dinero. Una mayor cercanía a las vías de comunicación permite una reducción de costos durante la fase de construcción, operación y mantenimiento, evitando gastos adicionales como la construcción de nuevas vías.
- La cercanía a redes eléctricas es un criterio de carácter económico en el cual un menor valor en cuanto a la distancia a la línea eléctrica implica un mayor valor en cuanto a la aptitud del criterio. Por tanto, cuanto mayor proximidad a una línea eléctrica con el nivel de tensión requerido, mayor aptitud para la localización de una instalación fotovoltaica.
- La cercanía a recurso hídrico es un parámetro que pretende analizar la distancia a los cauces desde cualquier punto de la zona de estudio. Así pues, se establece como criterio para un impacto máximo respecto a esta variable el valor mínimo de distancia a los cauces.
- El criterio de los suelos protegidos es de carácter ambiental, con él se vela por evitar la implantación de grandes instalaciones fotovoltaicas en espacio de alto valor ambiental y ecológico. Como se indica en apartados previos del presente documento, las instalaciones fotovoltaicas de gran tamaño llevan asociado cierto impacto paisajístico, que puede ocasionar un deterioro medioambiental que afecta de manera negativa a la flora y fauna del entorno. Para evitar que esto suceda en aquellas regiones protegidas, entra en consideración este criterio.
- La cercanía a los núcleos de población es un factor que se centra en la exclusión de aquellos espacios

próximos a los núcleos de población debido al impacto visual o malestar a la población que puede provocar la cercanía de este tipo de instalaciones.

- La superficie mínima necesaria es un factor de carácter técnico primordial en cuanto a la localización de una planta fotovoltaica. La importancia de este criterio radica en la necesidad de establecer un valor mínimo en cuanto a la superficie del terreno suficiente como para asegurar el adecuado desarrollo de la actividad industrial. Este es un parámetro de base en cuanto a los datos de partida para establecer la localización de una central fotovoltaica puesto que si no cumple con las necesidades superficiales mínimas resulta imposible que la instalación alcance las especificaciones técnicas fijadas.

8 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Una vez desarrollado todo lo relativo al contexto que rodea al presente proyecto, así como definir el objeto de análisis de este, que no es otro que el de las centrales fotovoltaicas, se procede a tratar lo relativo a la herramienta empleada para determinar la ubicación más favorable para una central fotovoltaica en Andalucía Occidental.

Así pues, la herramienta que se va a emplear se corresponde con un Sistema de Información Geográfica, en adelante SIG. Estos actualmente constituyen una potente herramienta a con un alto nivel tecnológico e innovador que presenta multitud de aplicaciones en diversos ámbitos.

8.1 Historia de los sistemas SIG

La historia de los sistemas SIG se desarrolla atendiendo a lo reflejado en (LÓPEZ LARA, POSADA SIMEÓN, & MORENO NAVARRO, 1997) y (CNIG, 2021). A partir de ello se puede resaltar que el origen de los SIG no es algo que se encuentre perfectamente definido. Por ello, existe una corriente que lo sitúa con la aparición de las técnicas cartográficas en tanto que otra corriente, mucho más amplia, define que el origen se produce con el paso del formato cartográfico analógico al formato digital.

Si bien su origen no resulta claro, sí que es evidente que su desarrollo va de la mano con la evolución de la informática. Así pues, la aparición de los ordenadores en la década de los años 60 supone el inicio de una revolución en lo que al análisis de datos respecta. Este hecho da lugar al tratamiento de un volumen mayor de datos, a acceder de una manera mucho más rápida a los mismos y a reducir los costes del tratamiento de datos cartográficos.

En relación con lo anterior, es destacable el papel jugado por Roger Tomlinson ya que este desarrolló un modelo de procesamiento integrado a partir de mapas. Todo ello dio lugar a una aplicación consistente en el desarrollo de un modelo de procesamiento integrado en base a una serie de mapas temáticos.

A finales de la década es destacable la labor realizada el arquitecto H. Fisher, fundador del LCG de Harvard, en su apuesta por el empleo de los computadores para la realización de gráficos y el procesamiento de la información espacial a fin de efectuar el planeamiento territorial.

Durante esta época surgieron un conjunto de *softwares* de carácter cartográfico como SYMAP, CALFORM o GRID, los cuales resultaron decisivos en el empleo de los equipos informáticos para el análisis espacial. Sin embargo, los resultados obtenidos con estos no fueron los esperados debido a una serie de factores como el empleo de impresoras matriciales de baja resolución, lo cual derivaba en la obtención de conclusiones no acertadas.

Posteriormente, se inicia una segunda etapa caracterizada por la incorporación como principal novedad de la dotación de topología a los objetos cartográficos. Todo ello da lugar a la aparición de los primeros programas vectoriales de SIG, como es el caso de ODYSSEY. Este incorpora la digitalización semiautomática, la gestión de bases de datos y la elaboración interactiva de los mapas.

Así pues, se puede destacar, a modo de conclusión, que la década de los sesenta y setenta se caracterizaron por el desarrollo de *softwares* SIG ligados a necesidades específicas. Sin embargo, la capacidad de este tipo de programas resultaba escasa.

Tras esta primera eclosión de *softwares* de análisis espacial, el mayor avance surgió con el denominado método ráster. De esta forma, se lograron desarrollar dos métodos diferentes y a la vez complementarios, el vectorial y el ráster.

Todo ello ha permitido que los SIG hayan evolucionado de manera exponencial, como se puede apreciar en la Figura 26. Con ello, han sufrido múltiples líneas de investigación relativas a campos del conocimiento tan diversos como los relacionados con la geometría espacial o la inteligencia artificial.

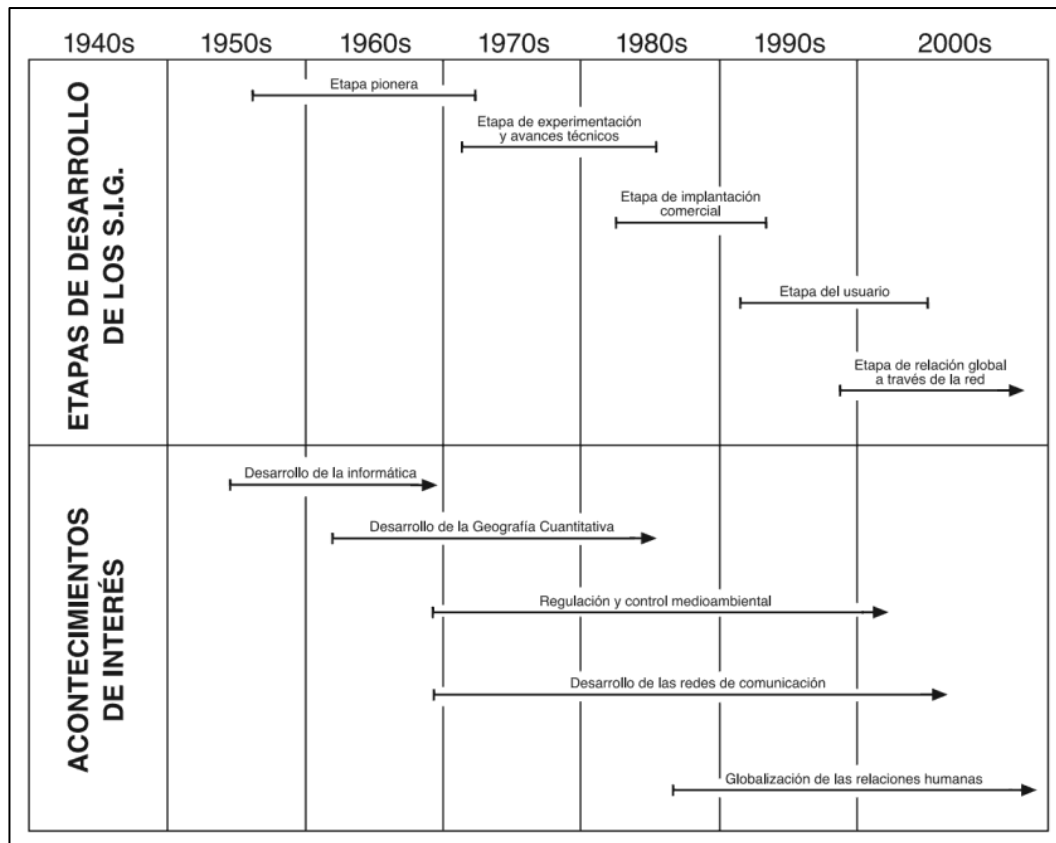


Figura 26 – Evolución de los SIG en relación con los avances tecnológicos de interés.

Fuente: (SANTOS PRECIADO, 2020)

La evolución de los SIG da lugar a las Infraestructuras de Datos Espaciales, en adelante IDE. Estas se basan en servicios normalizados y accesibles de forma abierta a través de una serie de protocolos. Cabe destacar conceptos fundamentales que las IDE manejan como son los servicios o, especialmente, la interoperabilidad. (CNIG, 2021)

8.2 Definición SIG

La definición de los SIG no es algo único o unívoco, sino que más bien se puede indicar que existen una serie de definiciones que varían fundamentalmente atendiendo a la característica del sistema SIG que se destaque en cada caso. Sin embargo, si existe un punto de unión entre todas estas definiciones y no es otro que el reflejo de la capacidad de los SIG para trabajar con información de carácter espacial.

Dentro del conjunto de definiciones que se pueden aplicar a los sistemas SIG se destacan aquellas de mayor importancia, fundamentalmente atendiendo a lo recogido en (PÉREZ NAVARRO, y otros, 2011). De este modo, la primera de las definiciones es de finales de la década de los ochenta del siglo pasado, fecha en la que una serie de expertos en la materia definieron los sistemas SIG como un sistema de *hardware*, *software*, datos, personas, organizaciones y convenios institucionales para la recopilación, almacenamiento, análisis y distribución de información de territorios de la tierra.

La segunda de las definiciones que destacan es más reciente puesto que fue establecida por Chrisman en los inicios del presente siglo. En ella, se concibe los SIG como un conjunto de acciones organizadas mediante la cual los usuarios pueden cuantificar determinados fenómenos y proceso geográficos a fin de enfatizar cuestiones espaciales, entidades y relaciones.

Por último, cabe resaltar una serie de definiciones basadas cada una de ellas en una categoría distinta:

- Una poderosa «caja de herramientas» para recoger, almacenar, recuperar, transformar y visualizar datos del mundo real.
- Un sistema de bases de datos en el que la mayoría de los datos están indexados geográficamente y con los cuales se puede realizar un conjunto de procedimientos con el objetivo de dar respuesta a consultas sobre entidades espaciales en la base de datos.
- Una entidad institucional con una estructura organizativa que integra tecnología con base de datos, expertos y ayuda económica continuada.

8.3 Modelo de datos

El modelo de datos es una parte de gran relevancia en lo que respecta a los sistemas SIG, por ello se trata en el presente punto todo lo relativo al tema atendiendo a lo recogido en (GARCÍA PÉREZ & CABRERO ORTEGA, 2015).

Una de las principales características de los sistemas SIG es que permiten focalizar la realidad en función de las necesidades que presente cada caso de estudio. Esto implica que la parte de la realidad a considerar para cada caso debe ser modelizada con el objetivo de que pueda ser tratada por el sistema SIG.

En relación con lo anterior, cabe resaltar que existen dos formas claramente diferenciadas de llevar a cabo la modelización de la realidad, el modelo vectorial y el modelo ráster. Así pues, todo ello da lugar a la aparición de dos tipos de capas SIG, las de carácter vectorial y las ráster, en función de la tipología de información recogida en cada caso.

De esta manera, el modelo de datos vectorial se encuentra constituido por datos geográficos que se corresponden con datos de carácter espacial que se encuentran representados en base a coordenadas. Por ello, el empleo de esta tipología de datos permite operar con datos dispersos a lo largo del espacio geográfico.

Un SIG vectorial tiene dos grandes constituyentes, por un lado, presenta una componente geográfica y, por otro lado, una base de datos asociada que constituye la denominada tabla de atributos.

El modelo de datos vectorial resulta de gran utilidad a la hora de plasmar la realidad de aquellos elementos que derivan de la acción del hombre. Esta realidad se plasma únicamente mediante los tres tipos de datos que se recogen en la Figura 27: el punto, la línea y el polígono.

El punto se emplea cuando se pretende representar un elemento que se caracteriza por no tener dimensiones, sino únicamente una ubicación. Todo ello da lugar a que se pueda establecer la posición exacta de un determinado elemento en función de las coordenadas de los sistemas de referencia.

Por su parte, las líneas se conciben como una sucesión ordenada de puntos que representan objetos espaciales definidos únicamente por una dimensión. Este hecho requiere que para determinar su posición exacta sea necesario dos pares de coordenadas.

En el caso del polígono, su concepción se corresponde con un conjunto de líneas cerradas. Mediante los polígonos se representan aquellos objetos espaciales con dos dimensiones como son la longitud y la altura. Así pues, la posición de cada objeto queda perfectamente determinada por dos líneas de las cuales se conoce su inicio y final.

Sin embargo, todo lo indicado tiene un cierto carácter relativo puesto que un determinado elemento puede estar representado por distintos objetos en función de la escala empleada.

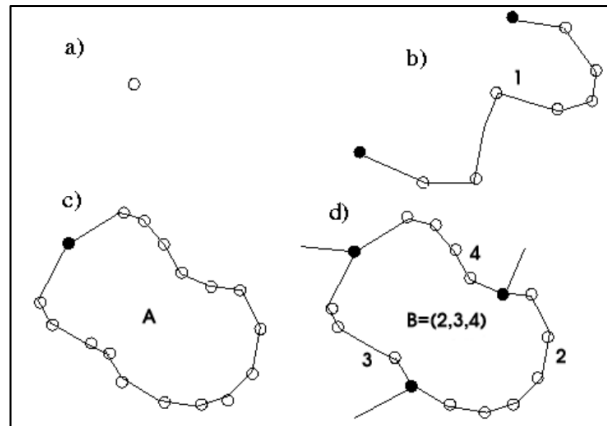


Figura 27 – Datos en el modelo Vectorial. a) punto, b) línea, c) y d) polígono.

Fuente: (ALONSO SARRIA, 2019)

El modelo de datos ráster se caracteriza por estar constituidos por matrices binarias que se vinculan a los píxeles de la imagen, lo cual da lugar a que se vincule este tipo de datos a las fotografías. En aquellos casos en los que la matriz vinculada al ráster no sea binaria, lo cual supone que la imagen es en blanco y negro, pueden dar lugar a ráster a color.

El modelo de datos ráster está relacionado con el análisis de imágenes y la representación de las localizaciones espaciales. Por ello, resulta de gran utilidad a la hora de representar variables con carácter continuo en los que no existan unos límites claramente diferenciados o zonas de transición.

De esta manera, la realidad se representa de manera fragmentada como una retícula rectangular pixelada de tal forma que estos no se superpongan unos a otros. Por ello, el tamaño del píxel determina el grado de resolución que se alcance.

Cada píxel se corresponde con un determinado espacio geográfico y tiene unas características particulares asociadas. Así pues, en el caso del modelo ráster los puntos se representan mediante un único píxel, las líneas con un conjunto de píxeles alineados y los polígonos mediante un conjunto de células contiguas.

La principal ventaja de los modelos ráster es que permiten representar en el espacio variables cuya variación es de tipo continuo de una manera efectiva ya que cada celda incluye el valor de dicha variable.

8.4 Funcionamiento de los SIG

El funcionamiento de los sistemas SIG se gobierna de manera mayoritaria a través de la interfaz gráfica de usuario vinculada a los mismos. Para ello se hace uso del teclado o el puntero a fin de poder efectuar las modificaciones pertinentes. Además de todo lo anterior, se cuenta con un menú que facilita el manejo del sistema puesto que en su interior se recopilan las principales acciones que la herramienta puede llevar a cabo.

Así pues, se puede indicar que el funcionamiento de los sistemas SIG se basa en la aplicación de una serie de acciones recogidas en un menú a través de la interfaz gráfica de usuario, lo cual da lugar a que se opere de la forma que se pretende.

Destacar que el número de acciones que pueden llevar a cabo los sistemas SIG es sumamente elevado lo cual origina que el funcionamiento de los SIG pueda llegar a alcanzar un alto grado de complejidad. Entre las principales acciones destacan, por su mayor empleo, tareas como la apertura de capas previamente almacenadas en el equipo o la realización de operaciones básicas sobre las mismas como duplicarlas o cortarlas.

Los SIG cuentan con un menú particular para las capas del mapa que proporciona una mejor experiencia de usuario a la hora de operar con un número elevado de capas. Este hecho es relativamente común puesto que cada capa muestra una parte de la realidad y es muy frecuente operar de manera simultánea con distintos aspectos de la realidad que se recogen cada uno de ellos en una capa.

La apertura de una capa en la aplicación SIG conlleva la aparición de la vista de mapa, donde se recoge una representación gráfica de la misma. Se puede dar el caso en el que se agreguen de manera simultánea varias capas en la interfaz del sistema, lo cual ocasiona que se superpongan unas sobre otras. El funcionamiento de un sistema SIG permite modificar la vista de las capas llevando a cabo la ampliación o disminución de un área de esta o el desplazamiento por distintos espacios de la capa.

La vista de las distintas capas es un elemento gran relevancia para los sistemas SIG, pero su verdadero potencial deriva de la capacidad que presentan de operar sobre las mismas. Dentro de las acciones que se pueden llevar sobre una determinada capa destacan las recogidas en la Tabla 2 puesto que son las que se emplean en este trabajo.

Capa datos vectoriales	Herramientas de geoproceto	<i>Buffer</i>	Algoritmo que procesa un área de influencia para todos los objetos de una capa de entrada, usando una distancia fija o dinámica.
		Cortar	Algoritmo que corta una capa vectorial utilizando los objetos espaciales de una capa poligonal adicional.
		Diferencia	Algoritmo que extrae los objetos espaciales de la capa de entrada que caen fuera, o traslapan parcialmente en la capa de superposición.
	Herramienta de gestión de datos	Unir capas vectoriales	Algoritmo que combina múltiples capas vectoriales con el mismo tipo de geometría en una sola.
Capa datos ráster	Análisis	Pendiente	Algoritmo que genera un mapa de pendientes a partir de cualquier ráster de elevación compatible con GDAL.
		Reproyectar	Algoritmo encargado de reproyectar una capa ráster en otro Sistema de referencia de coordenadas.
	Conversión	Rasterizar	Algoritmo que convierte geometrías vectoriales (puntos, líneas y polígonos) en una imagen ráster.
		Poligonizar	Algoritmo que crea polígonos vectoriales para todas las regiones conectadas de píxeles en el ráster que comparten un valor de píxel común.

Tabla 2. Herramientas sistemas SIG.

Fuente: Elaboración propia

9 APLICACIÓN PRÁCTICA

El noveno capítulo describe todas las acciones llevadas a cabo para alcanzar el objetivo del proyecto, la determinación de la mejor ubicación para la implantación de una central fotovoltaica en Andalucía occidental. El desarrollo de todas estas acciones no se desarrolla de manera aleatoria, sino que se encuentran amparadas bajo el manto del análisis multicriterio a fin de asegurar que la solución alcanzada sea la mejor posible.

El análisis multicriterio se constituye por dos grandes áreas como los criterios que se incluyen en el mismo y la herramienta que se emplea para su ejecución. En lo que compete al presente trabajo, los criterios que se incluyen en el mismo son los que se describen en el séptimo capítulo del presente documento y la herramienta SIG empleada se trata de la versión 3.8.2 de QGIS (QGIS, 2022).

QGIS es una herramienta de tipo SIG que posibilita el tratamiento, conjunto y por separado, de todos los criterios incluidos en el análisis multicriterio. Esta característica, junto con otras como que se trate de un *software* libre y de código abierto, lo hacen el candidato ideal para su empleo en el trabajo.

La web original de QGIS resalta al *software* como una aplicación de carácter profesional que corre en los principales sistemas como Linux, Mac, Android o Windows y que soporta gran cantidad de formatos y funcionalidades de datos.

Gracias a todo ello, QGIS posee un amplio espectro de capacidades que desarrolla mediante distintas funciones básicas y complementos. Con todo ello, permite visualizar, gestionar, editar y analizar datos, así como diseñar mapas imprimibles.

La combinación del análisis multicriterio como método para aunar los distintos criterios implicados proporciona una visión global que facilita la toma de decisiones. Los criterios seleccionados pueden ser de carácter excluyente, en cuyo caso únicamente presenta valores binarios, o no excluyentes, donde existen valores intermedios entre el cero y el uno.

Mediante el uso de QGIS es posible el desarrollo de distintas capas, cada una de ellas asociadas a un determinado criterio, atendiendo al parámetro correspondiente en cada caso. Además, la operación conjunta de todas ellas proporciona un resultado global que es el que se va a considerar a la hora de tomar la decisión final para establecer la central fotovoltaica.

9.1 Datos de partida

Los datos de partida del proyecto se obtienen desde tres fuentes distintas y entre estos se encuentran capas de tipo vectorial y capas de tipo ráster. Las capas de tipo vectorial se descargan desde el Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía en formato *shapefile* (.shp) cuya interfaz se muestra en la Figura 28 (IECA, 2022).



Figura 28 – Base cartográfica de Andalucía.

Fuente: (IECA, 2022)

(IECA, 2022) dispone de un amplio y variado catálogo de capas referidas, en su mayoría, al espacio de ocupa la comunidad andaluza. Sin embargo, para el desarrollo del presente proyecto no resulta necesario el empleo de todas ellas. A continuación, se procede a listar las capas de partida que se han tomado en cada caso.

- *09_14_RedCarreteras*, que incluye información en lo que respecta al trazado de la red de carreteras que se pueden encontrar en la comunidad de Andalucía. Esta se encuentra representada en la Figura 33.
- *10_14_LineaElectrica*, en la que se encuentra localizadas las líneas eléctricas existentes en Andalucía. Esta capa se puede observar en la Figura 35.
- *03_01_Rio*, la cual abarca los cursos fluviales ubicados en Andalucía. Su representación se aprecia en la Figura 37 de este documento.
- *07_01_Poblaciones*, con la superficie que recoge el conjunto de edificios y espacios asociados que se reconocen como lugar determinado en el que se localiza población. Esta se corresponde con la Figura 40
- *11_07_Enp_FiguraProteccion*, la cual contiene la información relativa a los Espacios Naturales Protegidos de Andalucía. La cual se asocia a la Figura 43 del presente documento.

Las capas de tipo ráster que actúan como datos de partida son únicamente dos, la referida a la altitud y la correspondiente a la radiación. La pendiente del terreno se determina a través de la altitud del mismo, por ello se descarga de una capa de tipo ráster en formato TIFF con la altitud desde la web del Instituto Geográfico Nacional (IGN, 2022).

De igual manera, los datos de partidas relativos a la radiación solar se obtienen mediante la descarga de una capa ráster en formato TIFF desde (SOLARGIS, 2019).

En cualquier caso, todas las capas que se emplean como datos de partida en el proyecto se obtienen de forma gratuita y todas se han empleado el sistema de referencia EPSG: 25830 (ETRS89 – UTM30). El tratamiento

que se efectúa sobre cada uno de ellos, así como las particularidades en la obtención de estos, se describe de manera más detallada en el apartado que se adjunta a continuación.

9.2 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es un método que facilita la toma de decisiones mediante la consideración ponderada de los distintos parámetros que constituyen los criterios del trabajo. La ejecución de un análisis multicriterio contempla dos etapas que tienen lugar de manera consecutiva.

En la primera etapa se lleva a cabo una delimitación de las soluciones viables del sistema. Para ello, procede a la asignación de los pesos vinculados a cada uno de los criterios que entran en consideración a la hora de establecer la localización más adecuada de una central fotovoltaica. Esta primera etapa tiene una serie de particularidades entre las que destaca el hecho de que el sumatorio de los pesos vinculados a los criterios no excluyente debe ser igual a la unidad. Por ello, en ningún caso el peso asociado a un determinado criterio puede llegar a sobrepasar el valor unitario.

Respecto a la asignación de pesos para cada criterio en particular, se lleva a cabo un mecanismo similar en el que se establecen coeficientes de puntuación relativa en función del valor que presente la variable en cada caso.

Como resultado de todo lo indicado anteriormente se obtiene un mapa específico para cada criterio, que se caracteriza por los pesos establecidos en función de los niveles alcanzados por la variable. Por otro lado, se obtiene, con carácter global, el peso que tiene el criterio a la hora de determinar la ubicación. Este segundo aspecto se basa en la relevancia que tiene el criterio sobre el sistema.

La segunda etapa del análisis multicriterio se focaliza en la selección del enclave más adecuado entre aquellas superficies que obtengan un mejor resultado en la primera fase. Para ello, se considera inicialmente si las superficies determinadas cumplen los requisitos de superficie mínimos del sistema. Posteriormente, se decide entre las distintas alternativas en función de criterios particulares como pueda ser la presencia de algún elemento de carácter medioambiental o la presencia de algún tipo de construcción que dificulta la implantación del sistema.

Los criterios que se incluyen dentro del análisis multicriterio no se han seleccionado de manera aleatoria, su selección se basa en lo publicado en sendos artículos científicos como lo son (GUTIERREZ VELAYOS, AGUILÓ PASTRANA, & VELÁZQUEZ SAORNIL, 2018) y (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020). Así pues, respaldado por lo publicado en materia científica respecto a la ubicación de las plantas fotovoltaicas se decide incluir los siguientes criterios:

- Superficie mínima para la implantación de la instalación
- Nivel de radiación solar
- Proximidad a redes eléctricas
- Proximidad a vías de comunicación
- Pendiente del terreno
- Suelos protegidos (Excluyente)
- Proximidad a núcleos de población (Excluyente)
- Proximidad al recurso hídrico (Excluyente)

Como se indica en párrafos anteriores, la primera etapa del análisis multicriterio incluye la asignación de pesos a cada criterio. Igualmente, se sigue lo indicado en (GUTIERREZ VELAYOS, AGUILÓ PASTRANA, & VELÁZQUEZ SAORNIL, 2018) y (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020). Sin embargo, como existen leves variaciones a la hora de asignar el peso de cada criterio, se decide efectuar la media ponderada entre el valor indicado para cada caso en sendas publicaciones. El resultado de todo ello se puede apreciar en la

Tabla 3 que se adjunta a continuación.

Criterio	Radiación Solar	Proximidad a redes eléctricas	Proximidad a vías de comunicación	Pendiente del terreno	Suelo protegido	Cercanía núcleos de población	Recurso hídrico
Peso	0,410	0,240	0,240	0,110	0/1	0/1	0/1
Peso	0,363	0,265	0,150	0,222	0/1	0/1	0/1
Peso ponderado	0,387	0,252	0,195	0,166	0/1	0/1	0/1

Tabla 3. Coeficiente de puntuación relativa para cada criterio de ubicación de la central fotovoltaica.

Fuente: (GUTIERREZ VELAYOS, AGUILÓ PASTRANA, & VELÁZQUEZ SAORNIL, 2018) y (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

Como bien refleja la Tabla 3, existen una serie de criterios con carácter binario en los cuales si no se cumple lo indicado queda imposibilitado para la implantación de la central fotovoltaica y otros criterios con un valor fijado entre cero y uno, cuyo sumatorio se corresponde con la unidad según lo indicado con anterioridad.

En este trabajo se ha considerado un tamaño de celda de 100 × 100 metros y se ha llevado a cabo un análisis ráster. A continuación, se procede a tratar con mayor grado de detalle cada uno de los criterios que se incluyen dentro del análisis multicriterio:

9.2.1 Pendiente del terreno

A partir de lo indicado en (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020) se establecen una serie de rangos para la pendiente y a cada uno de estos rangos se les asigna un peso específico. En el caso de la pendiente como criterio se ha dividido el espectro que ocupa en cuatro rangos no simétricos entre sí. Dentro de estos, se asocia como situación más favorable aquellos casos en los que la pendiente del terreno se sitúa entre el cero y el cinco por ciento y como enclaves más desfavorables aquellos en los cuales la pendiente del terreno supera el veinte por ciento. Todo ello queda reflejado en la Tabla 4 que se adjunta a continuación.

Pendiente [%]	0 – 5	5 – 10	10 – 15	> 20
Escala	1	0,66	0,33	0

Tabla 4. Peso de los valores de la pendiente del terreno para la ubicación de una central fotovoltaica.

Fuente: (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

La pendiente es un criterio cuyo tratamiento resulta ligeramente distinto al que se lleva a cabo para el resto de los criterios seleccionados. Este hecho se debe a que la capa de la cual parte el proceso no se corresponde con el valor de la pendiente propiamente dicho, sino con el de la altura del terreno a partir del cual es posible obtener el valor de la pendiente mediante el empleo de QGIS.

De manera pormenorizada, el proceso comienza con la descarga de la capa con la información relativa a la altura del terreno para la zona occidental de Andalucía, representada en la Figura 29. La descarga de la capa ráster con la altura del terreno se efectúa desde (IGN, 2022).

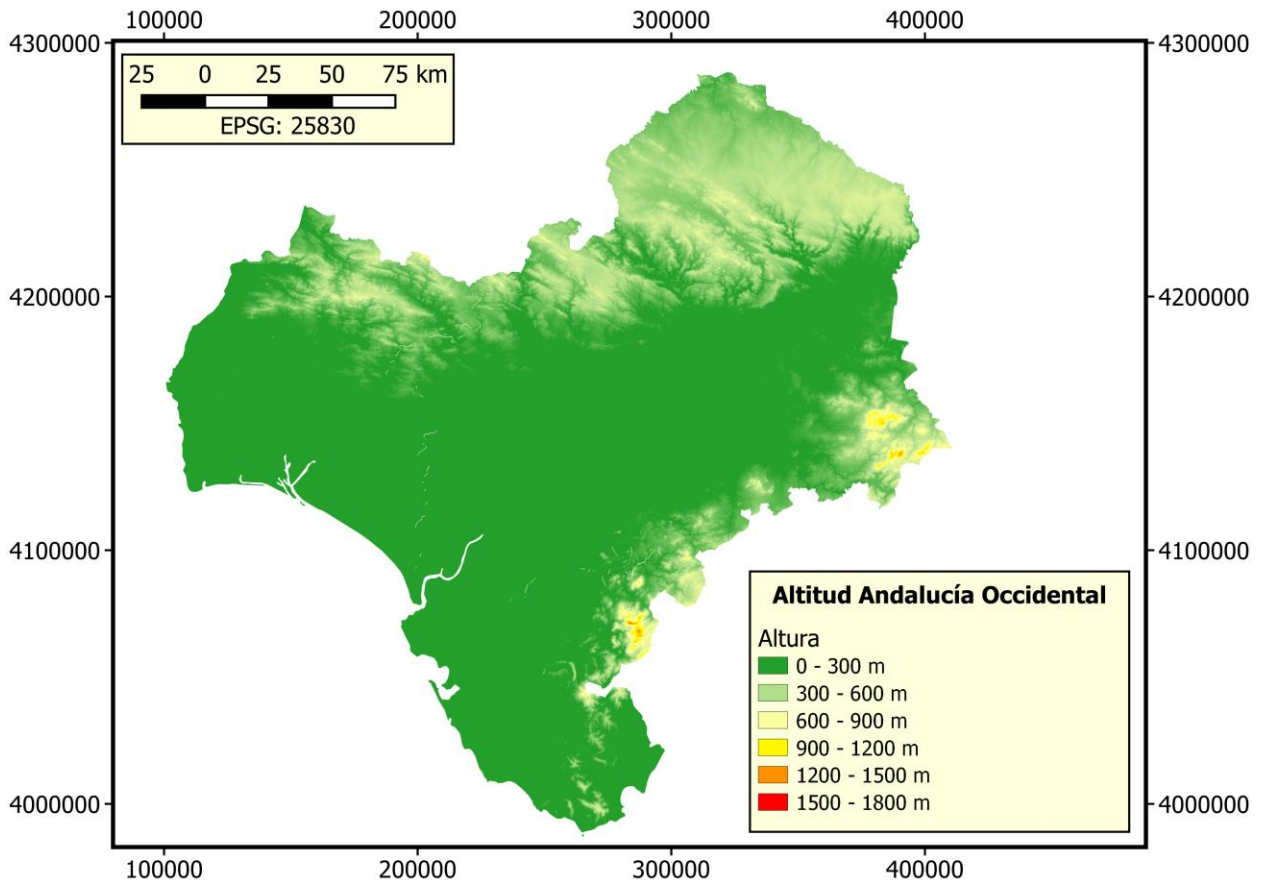


Figura 29 – Altura del terreno Andalucía occidental.

Fuente: (IGN, 2022)

Aprovechando el hecho de que QGIS permite calcular la pendiente del terreno a partir de la altura se obtiene el resultado que se refleja en la Figura 30 cuya leyenda muestra el color asignado a cada uno de los rangos establecidos.

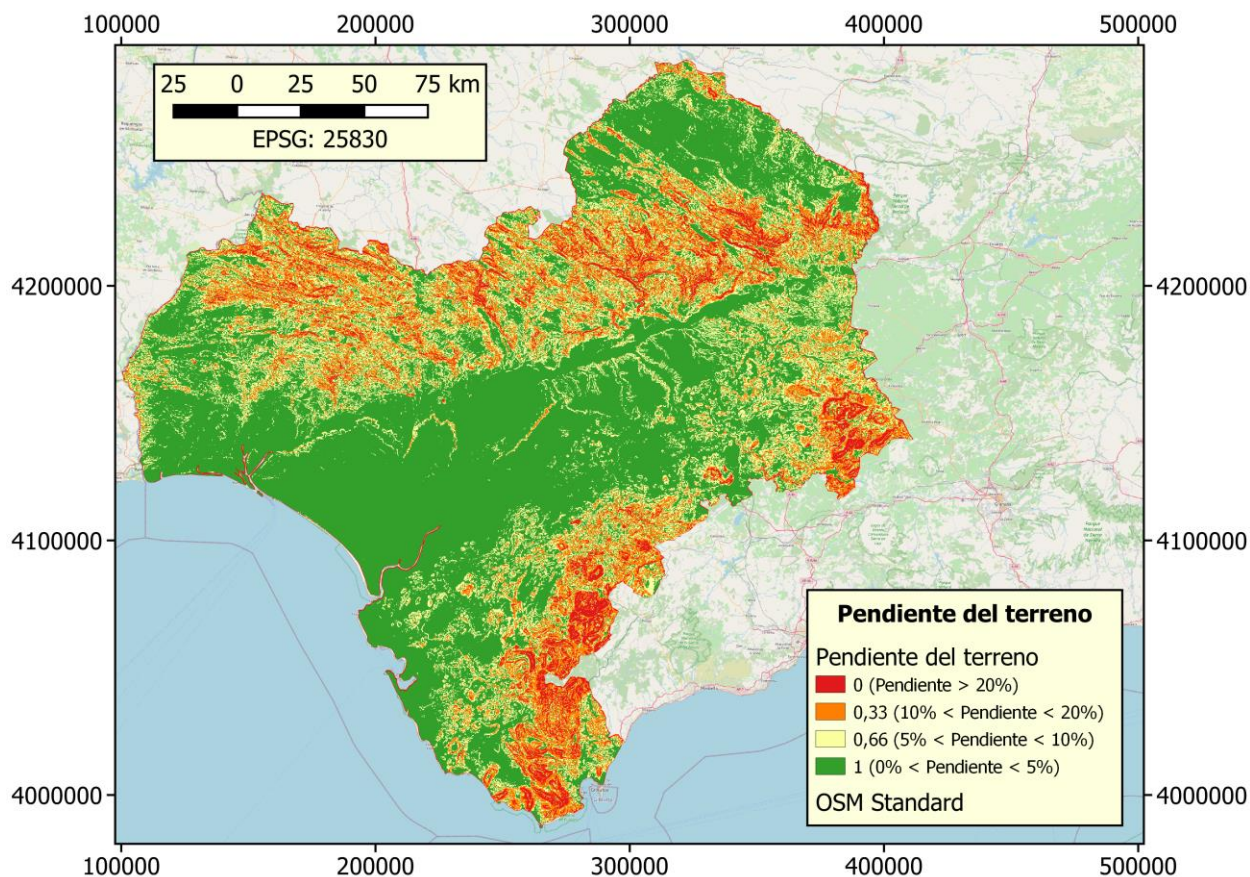


Figura 30 - Pendiente del terreno Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.2 Nivel de radiación solar

El criterio de mayor peso respecto a todos aquellos que conforman el análisis multicriterio no es otro que la radiación. Por ello, la radiación presenta un tratamiento diferenciado respecto al resto. Para el desarrollo de la capa vinculada a la radiación se parte de la capa ráster que aparece en la Figura 31 donde se refleja la radiación global normalizada descargada desde (SOLARGIS, 2019).

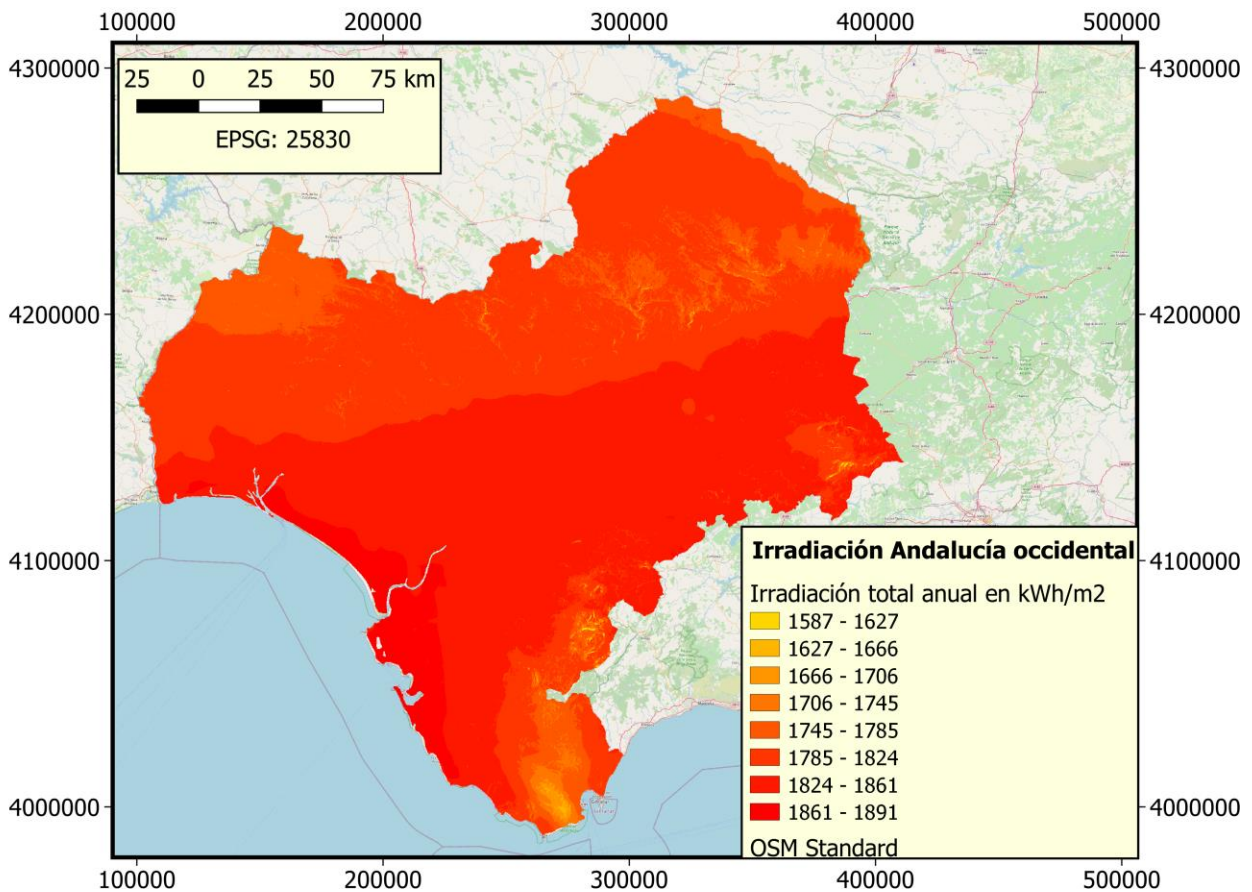


Figura 31 – Mapa de irradiación referido a Andalucía occidental.

Fuente: (SOLARGIS, 2019). Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

Como se puede apreciar, los valores en los cuales se expresa la irradiación en el mapa original oscilan entre los 1891 kWh/m² de valor máximo y los 1587 kWh/m² de valor mínimo si se toma el promedio anual, o 5,4 kWh/m² de valor máximo y 3,6 kWh/m² de valor mínimo si se toma el promedio diario. En cualquier caso, para poder aplicar el criterio dentro del análisis multicriterio el valor debe estar comprendido entre cero y uno.

Por ello, se opta por normalizar los valores de la radiación a fin de que a cada punto le corresponda un valor normalizado que se no supere en ningún caso la unidad. La ejecución del proceso de normalización tiene lugar mediante la aplicación de la expresión matemática que se adjunta a continuación en la cual se ven involucrados el valor máximo de la radiación en la región considerada, el valor mínimo de la radiación en la región considerada y el valor de la radiación en el punto a normalizar.

$$Radiación\ Normalizada = \frac{Radiación\ en\ el\ punto - Valor\ mínimo\ radiación}{Valor\ máximo\ de\ radiación - Valor\ mínimo\ de\ radiación}$$

El valor máximo y mínimo para la ejecución del proceso de normalizado se obtiene al abrir el histograma vinculado a la capa. Todo este proceso se ejecuta mediante el empleo de QGIS, obteniéndose con resultado la capa ráster que refleja la radiación normalizada que se recoge en la Figura 32.

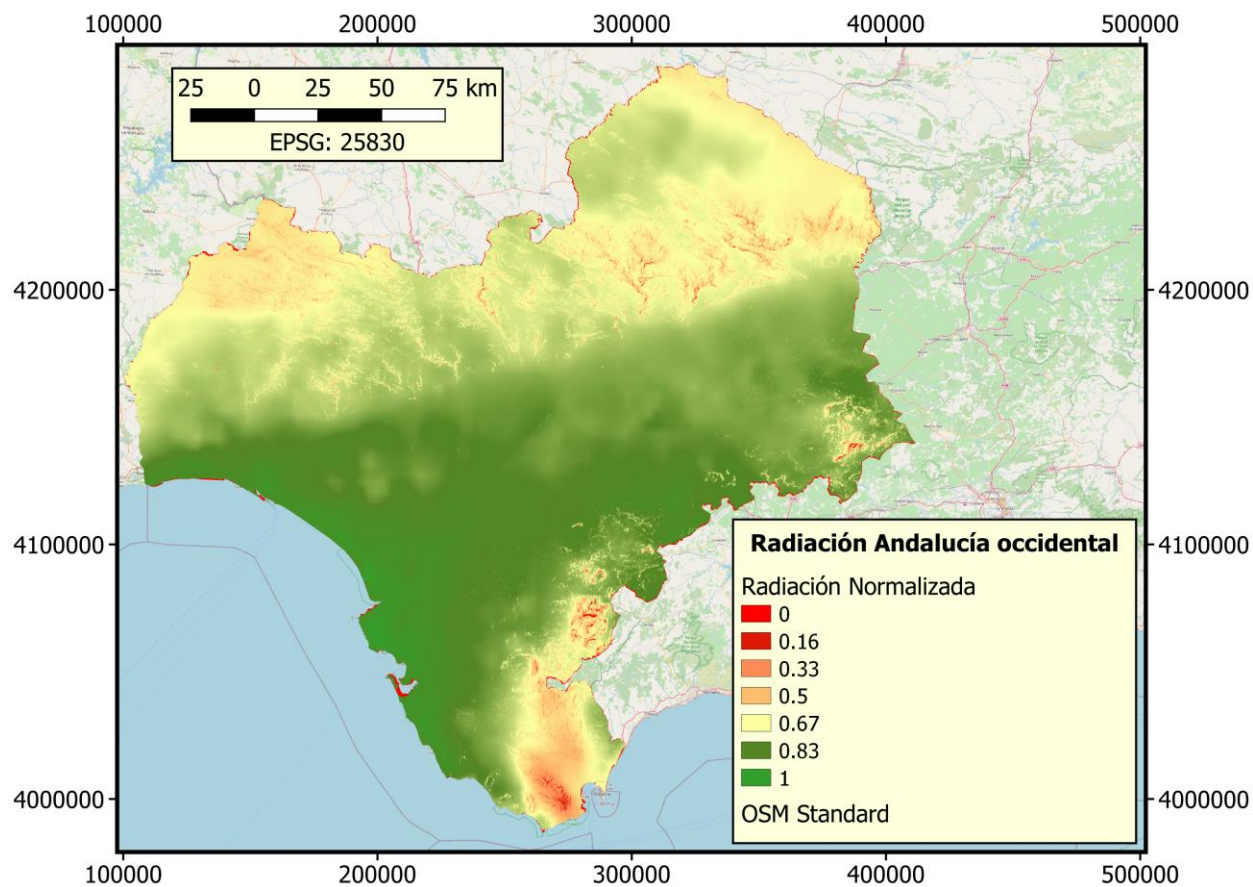


Figura 32 - Radiación normalizada Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.3 Proximidad a las vías de comunicación

El tratamiento de las vías de comunicación se inicia con la descarga de la capa recogida en la Figura 33.

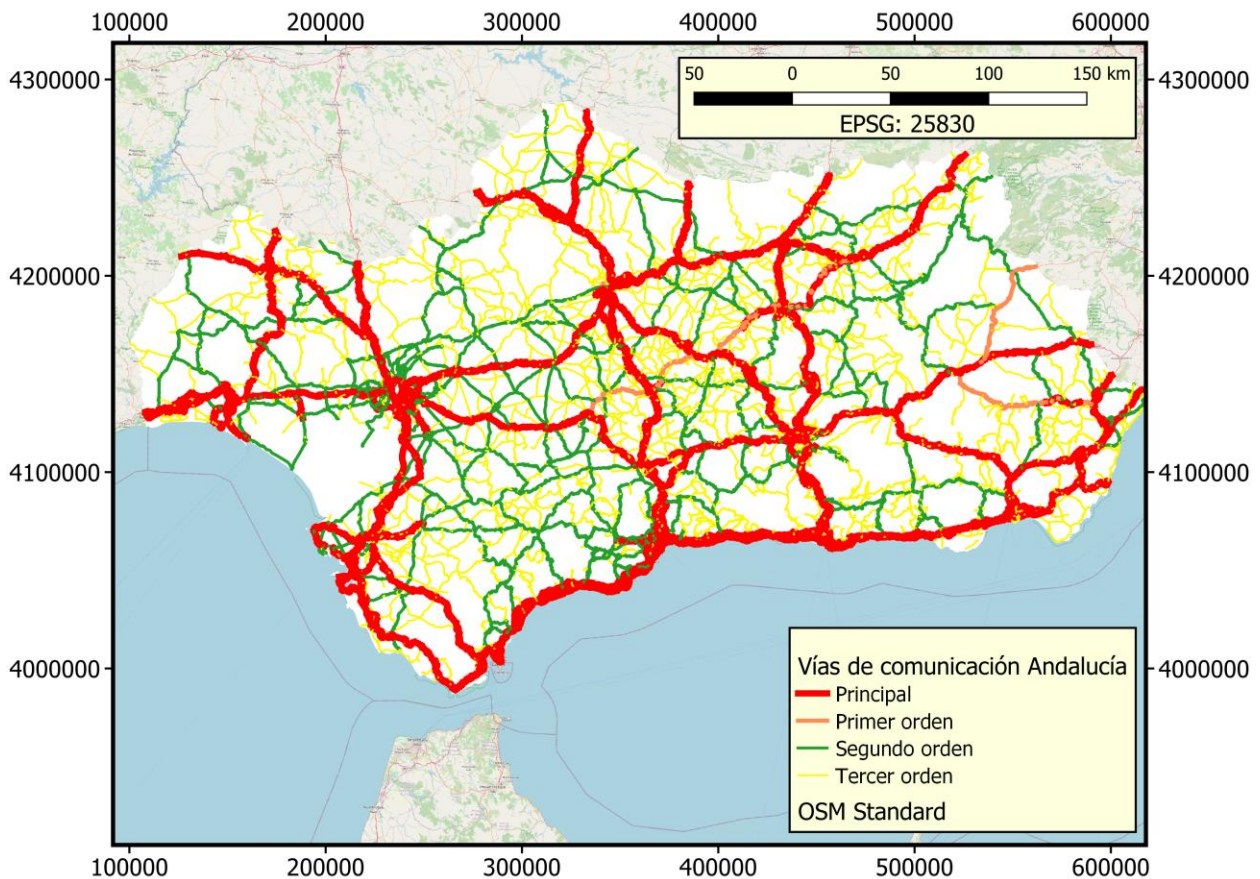


Figura 33 - Mapa vías de comunicación Andalucía.

Fuente: (IECA, 2022). Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

Con la apertura de la capa en QGIS, se efectúa una operación de cortado a fin de que se circunscriba únicamente a la región occidental de la misma, puesto que esta abarca el total de la comunidad andaluza.

Posteriormente, se ejecutan cada una de las áreas de influencia establecidas para este criterio. Las distintas áreas de influencia, y los pesos asociados a las mismas, se obtienen de (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020) según lo reflejado en la Tabla 5. Para la ejecución de las distintas áreas de influencia se ejecuta una serie de *buffers*, tomando como referencia las líneas eléctricas del mapa original.

Vías de comunicación [m]	3.500 - 240	6.000 - 3.500	10.000 - 6.000	240 - 0
Escala	1	0,66	0,33	0

Tabla 5. Peso de la distancia a las vías de comunicación para la ubicación de una central fotovoltaica.

Fuente: (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

Tras la ejecución de los distintos *buffers* se ejecuta la acción diferencia que evita que se superpongan un *buffer* sobre otro para unir las distintas capas obtenidas para cada referencia. El último paso es el de rasterizar esta última capa a fin de obtener una puntuación para cada punto del mapa. El proceso de rasterizar se basa en sobrescribir sobre una capa ráster una capa vectorial de tal modo que los nuevos valores se asignen en función del valor del atributo de la característica vectorial superpuesta. Para el caso de la proximidad a las vías de comunicación, el mapa rasterizado es el que se recoge en la Figura 34.

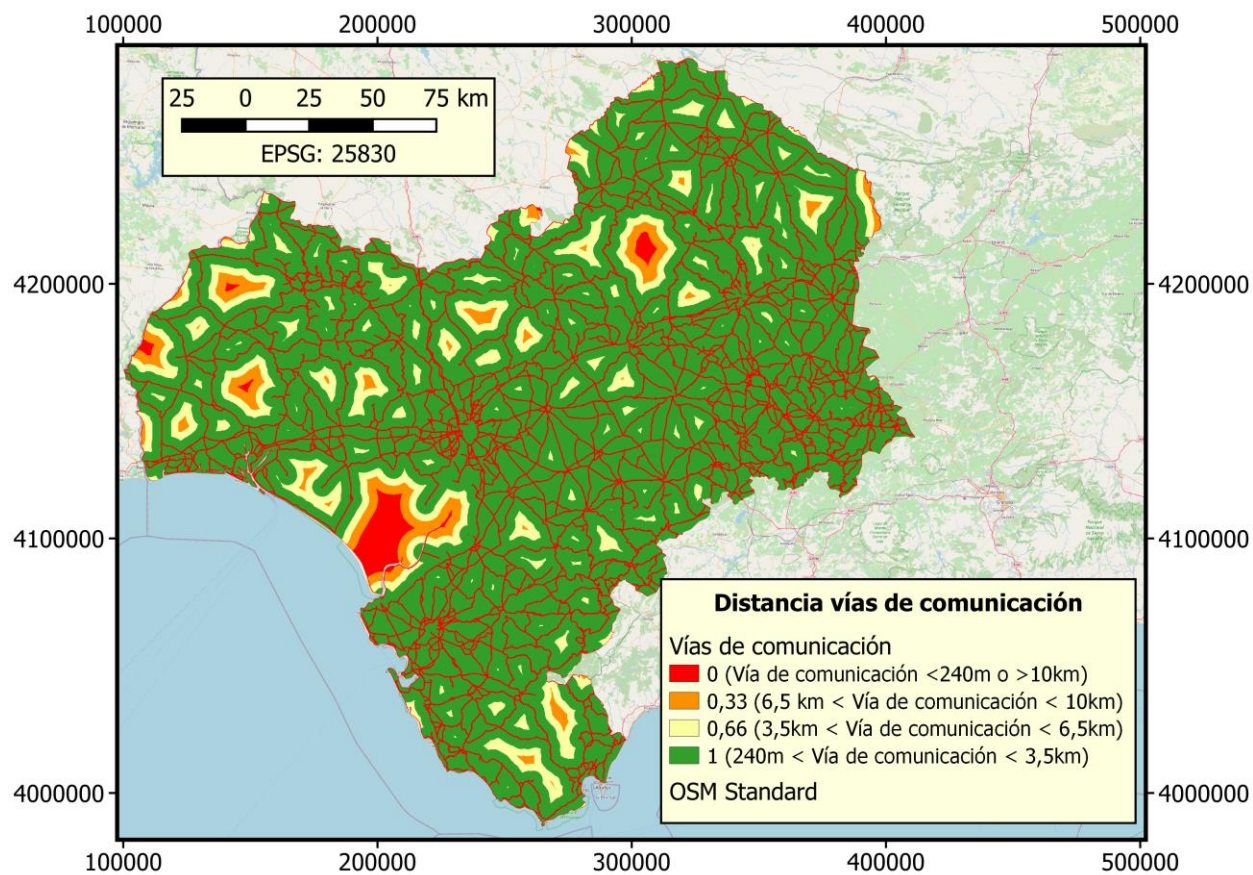


Figura 34 - Vías de comunicación Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.4 Proximidad a las redes eléctricas

El proceso seguido para la evaluación del criterio correspondiente a la cercanía a las líneas eléctricas es muy similar al de las vías de comunicación. Por lo tanto, se inicia el proceso con la descarga de la capa que aparece en la Figura 35.

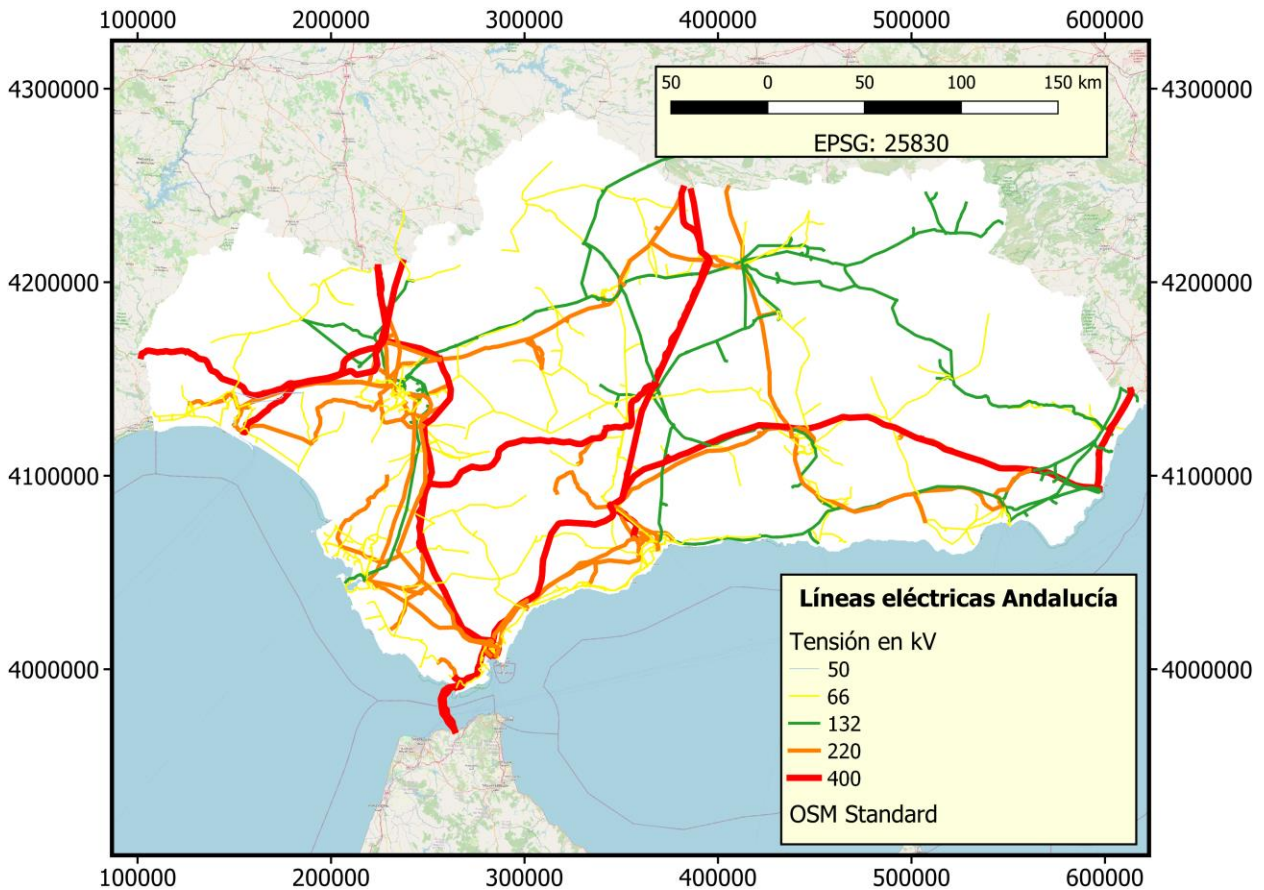


Figura 35 - Mapa líneas eléctricas Andalucía.

Fuente: (IECA, 2022). Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

El proceso que se sigue es idéntico al de las vías de comunicación, con la salvedad de que los criterios que se aplican a la distancia a las líneas eléctricas son los que se recogen en Tabla 6. En esta aparecen las distintas áreas de influencia relativas a las redes eléctricas, así como el peso dotado para cada una de ellas.

Redes eléctricas [m]	6.500 – 300	15.000 – 6.500	20.000 – 15.000	300 - 0
Escala	1	0,66	0,33	0

Tabla 6. Peso de la proximidad de las vías eléctricas para la ubicación de una central fotovoltaica.

Fuente: (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

Tras la realización de los distintos *buffers* se aplican una unión de las capas vectoriales asociada a cada uno de ellos y posteriormente se procede al rasterizado de la capa, obteniéndose el resultado que se aprecia en la Figura 36.

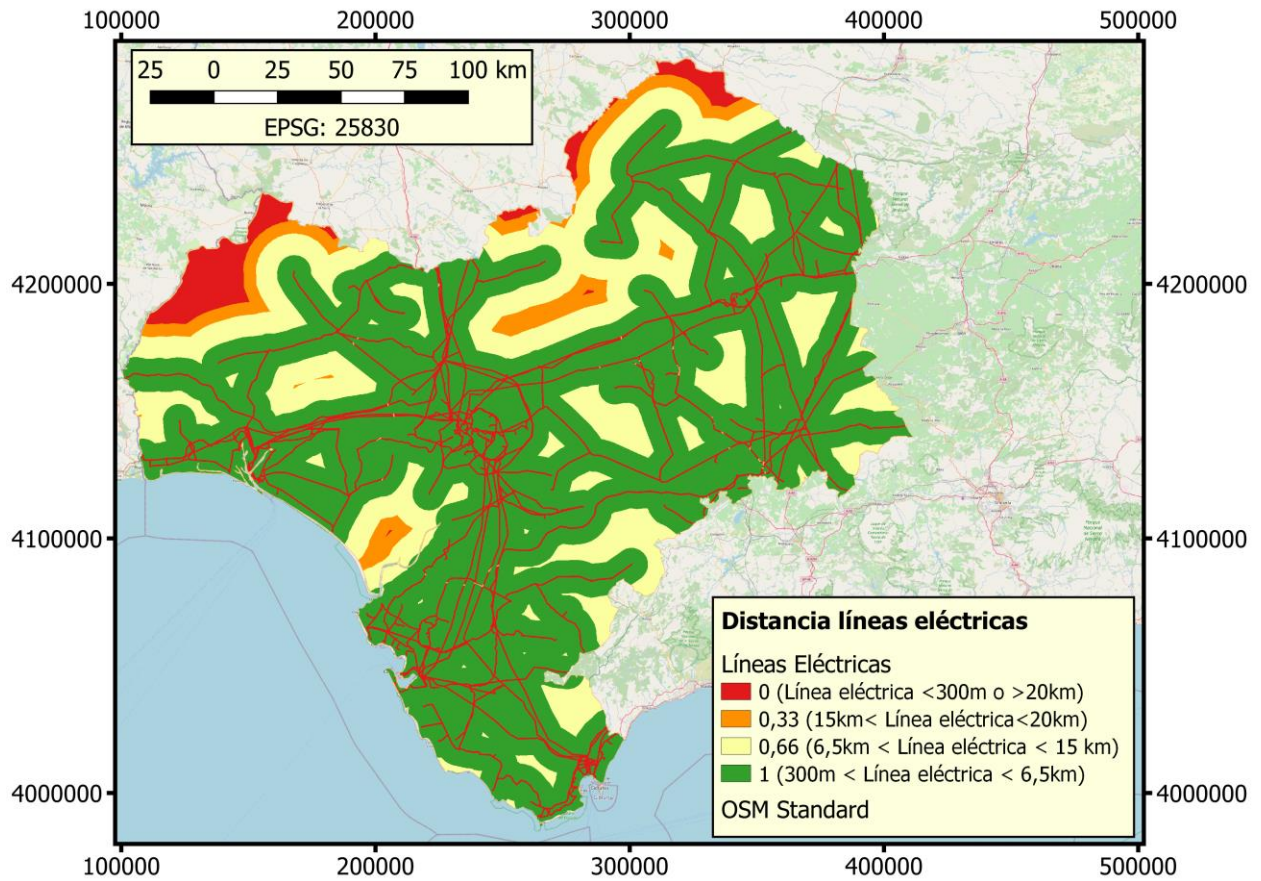


Figura 36 - Redes eléctricas Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.5 Proximidad al recurso hídrico

El caso del recurso hídrico presenta ciertas particularidades respecto a los tratados con anterioridad. El proceso seguido con este criterio se inicia con la descarga de la capa que se observa en la Figura 37.

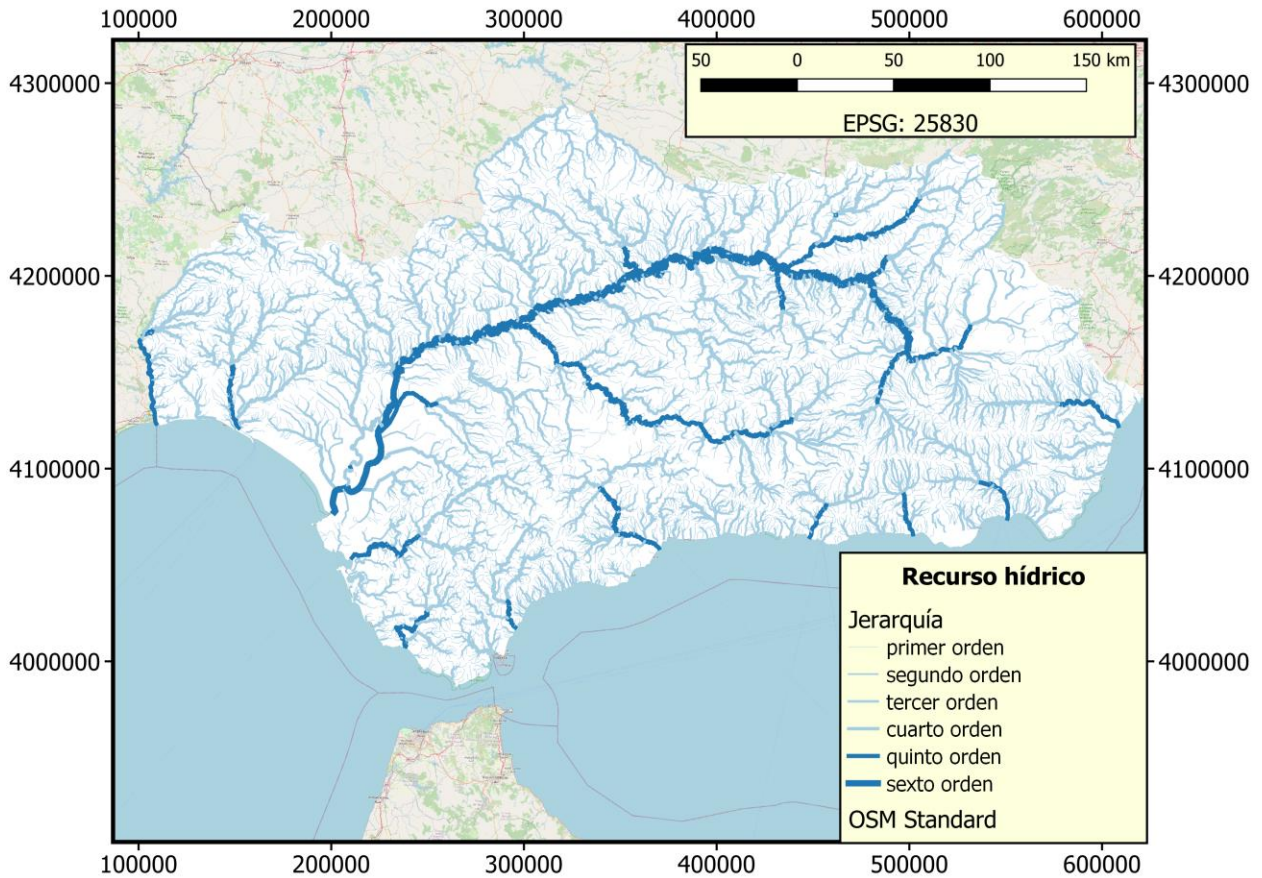


Figura 37 – Mapa del recurso hídrico en Andalucía.

Fuente: (IECA, 2022). Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

De manera previa a efectuar la operación de cortado para que la capa se circunscriba a la región occidental de Andalucía se efectúa el filtrado de la capa a fin de retirar de la misma los ríos de menor entidad etiquetados como de primer orden, cuyo resultado se muestra en Figura 38. Por lo tanto, esta operación de filtrado diferencia el tratamiento de los datos seguidos para el recurso hídrico de el del resto de criterios.

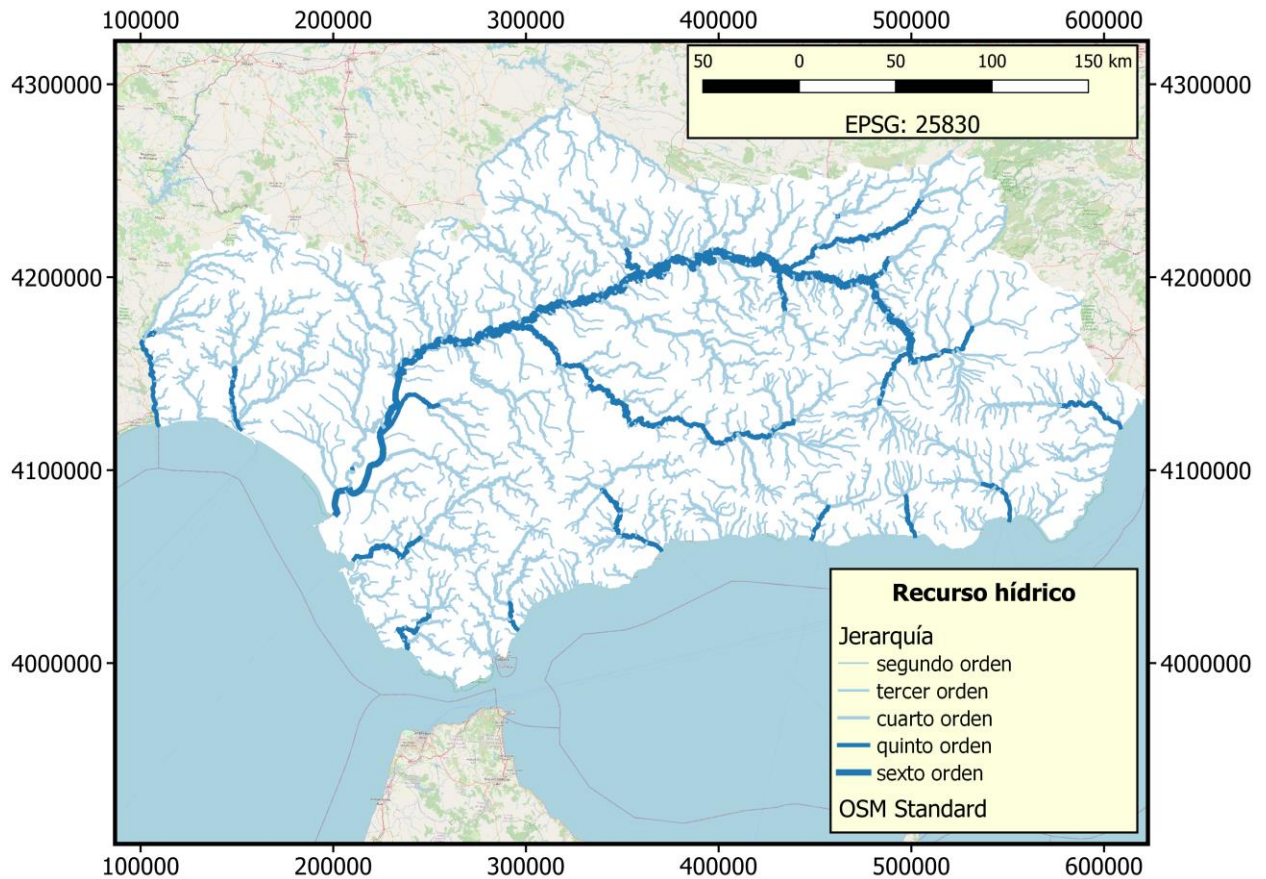


Figura 38 – Recurso hídrico de Andalucía sin considerar los ríos de primer orden.

Fuente: Elaboración propia. Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

La siguiente acción que se lleva a cabo es la aplicación de un *buffer* que genera las dos áreas de influencia que se reflejan en la Tabla 7.

Cercanía recurso hídrico [m]	>500	500 – 0
Escala	1	0

Tabla 7. Criterio de exclusión por cercanía a recurso hídrico para las plantas fotovoltaicas.

Fuente: (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

Tras la unión y rasterizado de las capas se obtiene el mapa que se adjunta en la Figura 39 del presente documento.

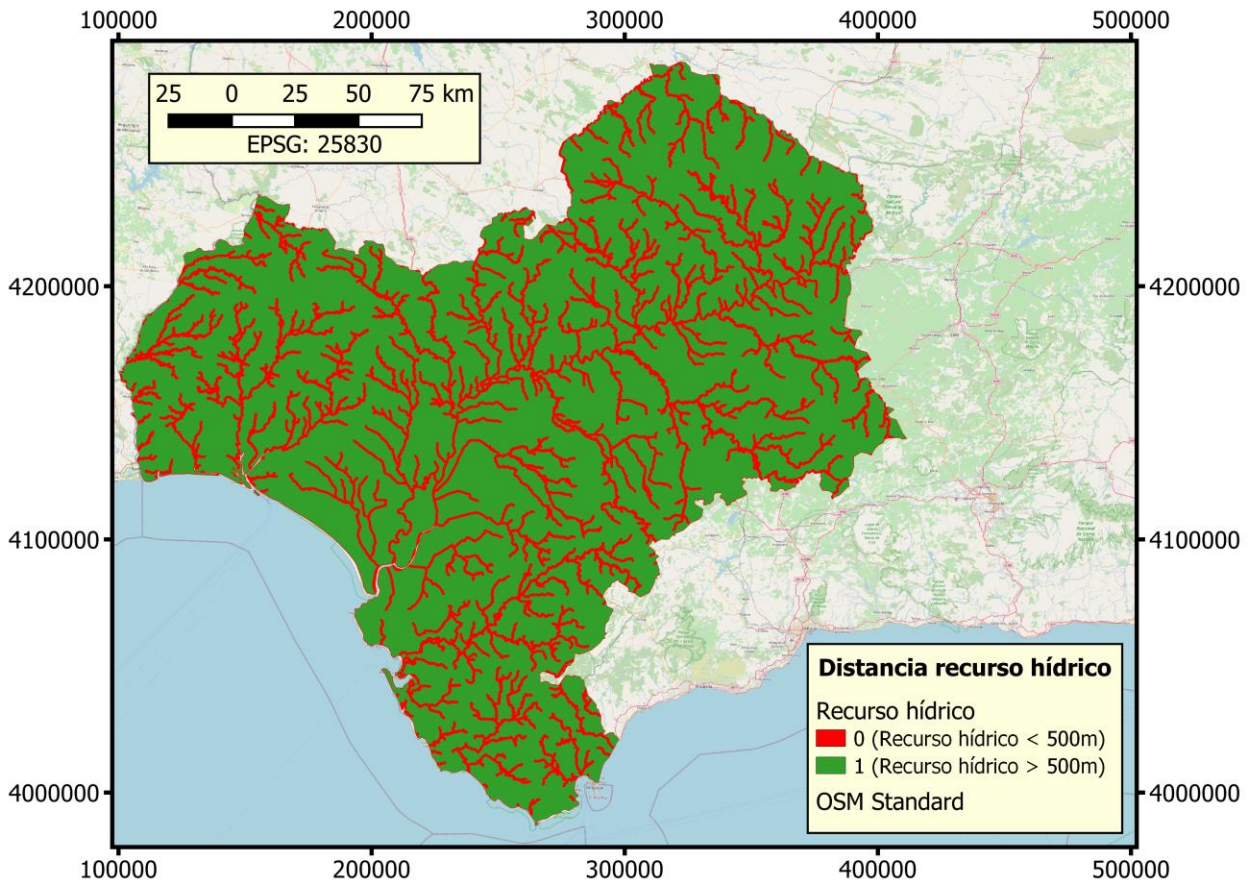


Figura 39 - Recurso hídrico Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.6 Proximidad a núcleos de población

En el caso de los núcleos de población se parte de la capa representada en la Figura 40.

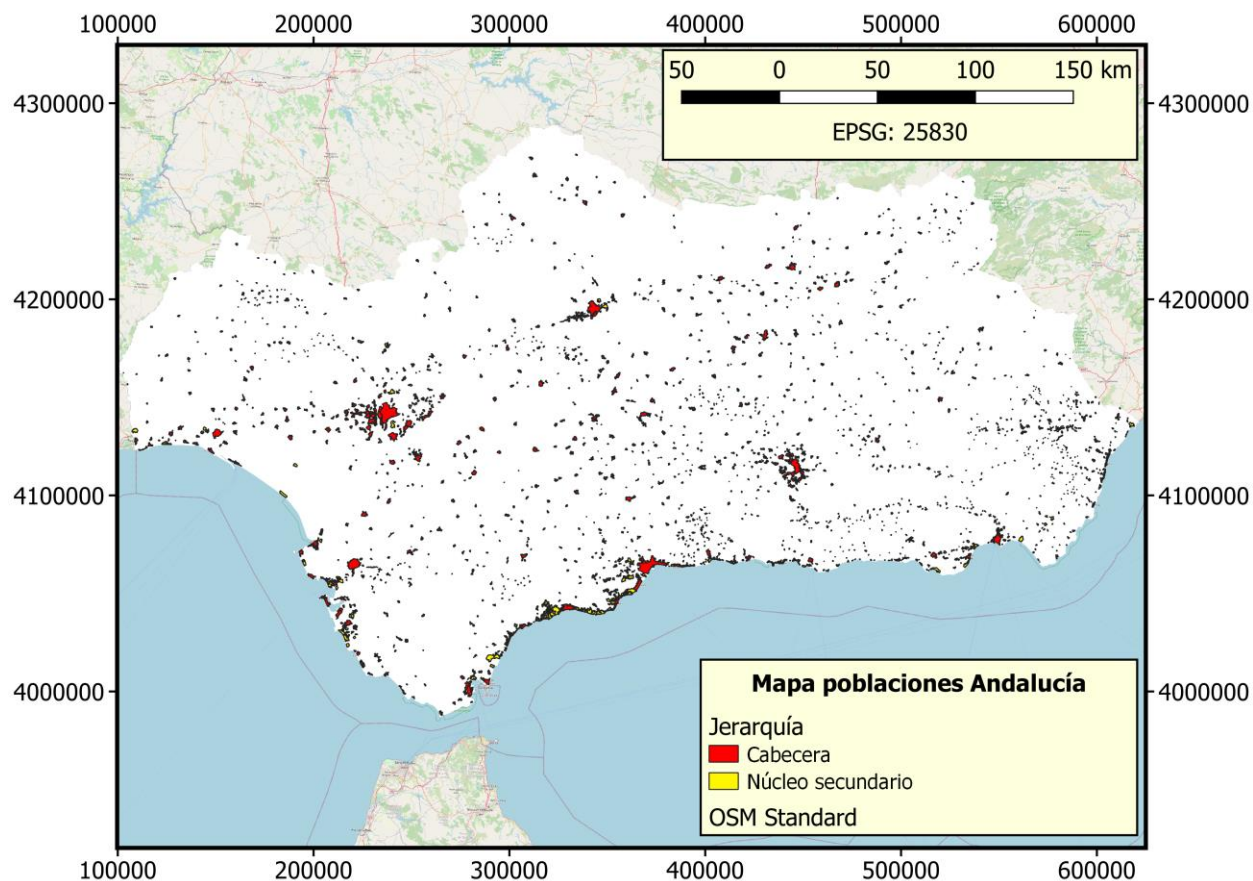


Figura 40. Mapa de poblaciones de Andalucía.

Fuente: (IECA, 2022) . Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

El nivel considerado en dicha capa incluye construcciones aisladas y núcleos de carácter secundario cuyo tamaño no resulta relevante para aplicarle un margen como el reflejado en la Tabla 8, por lo que se efectúa el filtrado que se puede apreciar en la Figura 41 para considerar exclusivamente aquellos asentamientos poblacionales de mayor entidad.

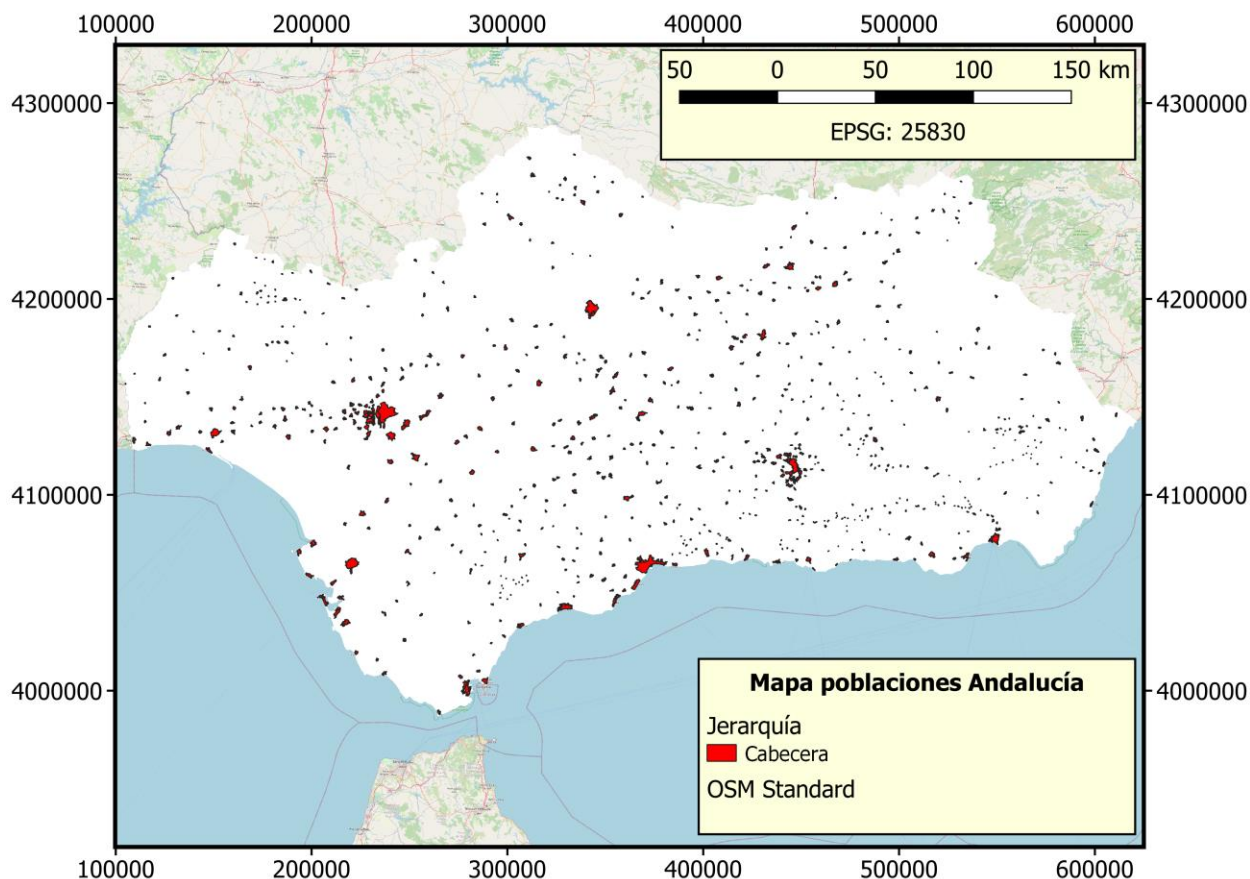


Figura 41 – Mapa de las poblaciones de cabecera en Andalucía.

Fuente: Elaboración propia. Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

La central fotovoltaica debe situarse a una distancia considerable de los núcleos de población, por lo que se debe cumplir lo indicado por (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020) tal y como se recoge en la Tabla 8.

Cercanía núcleos de población [m]	>5.000	5.000 – 0
Escala	1	0

Tabla 8. Criterio de exclusión por cercanía a núcleos de población para las plantas fotovoltaicas.

Fuente: (QUINTEROS & MORALES JADAN, 2020)

Como la cercanía a los núcleos de población es un criterio con carácter excluyente, no se puede emplazar la central fotovoltaica a una distancia inferior a los cinco kilómetros del núcleo de población. Sin embargo, si se considera como espacio válido todo aquel que se encuentre a una distancia mayor a la indicada.

El resultado que se obtiene tras operar con QGIS es el de una capa ráster en la que se refleja las zonas no válidas para la implantación de una central fotovoltaica en la región occidental de Andalucía, a la cual se le asigna un valor de cero, y aquellas en las que, si se puede considerar su implantación, a la que se les asigna un valor unitario. Todo esto se puede apreciar en la Figura 42 que se adjunta a continuación.

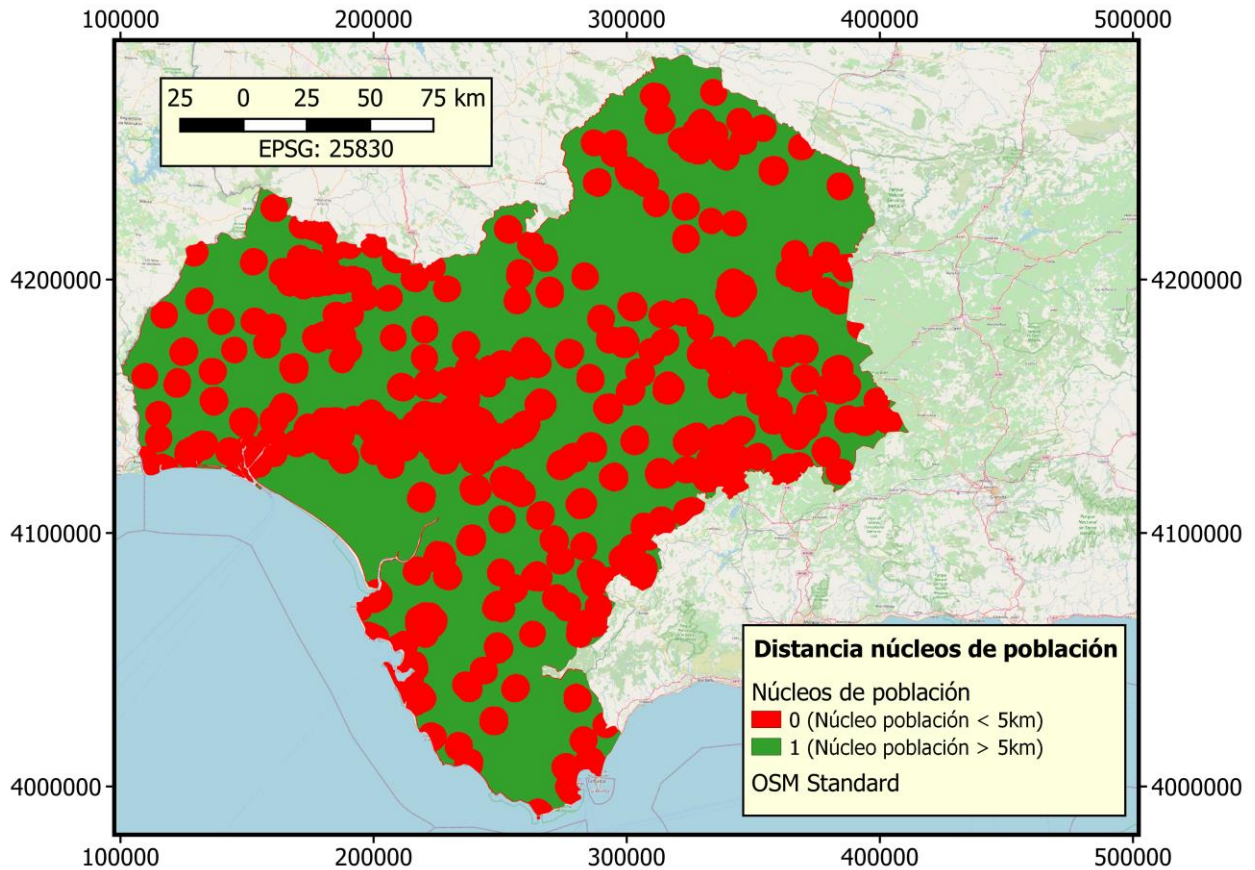


Figura 42 - Distancia núcleos de población Andalucía occidental.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

9.2.7 Suelos protegidos

El criterio de los suelos protegidos es de carácter ambiental puesto que con este se pretende evitar que se produzca la implantación de la instalación en aquellas superficies protegidas por su valor medioambiental. Por ello, este parámetro excluye de una posible solución todos aquellos espacios naturales protegidos, independientemente de que la figura de protección se establezca a nivel estatal o autonómico.

Para cumplir con lo anterior, se parte de la capa que se recoge en la Figura 43, correspondiente con la capa figuras de protección que aparece en el apartado dedicado al patrimonio de la web del (IECA, 2022). En esta capa se incluyen todos los parques nacionales y naturales, parajes naturales, parques periurbanos, monumentos naturales, reservas naturales y paisajes protegidos de la comunidad andaluza.

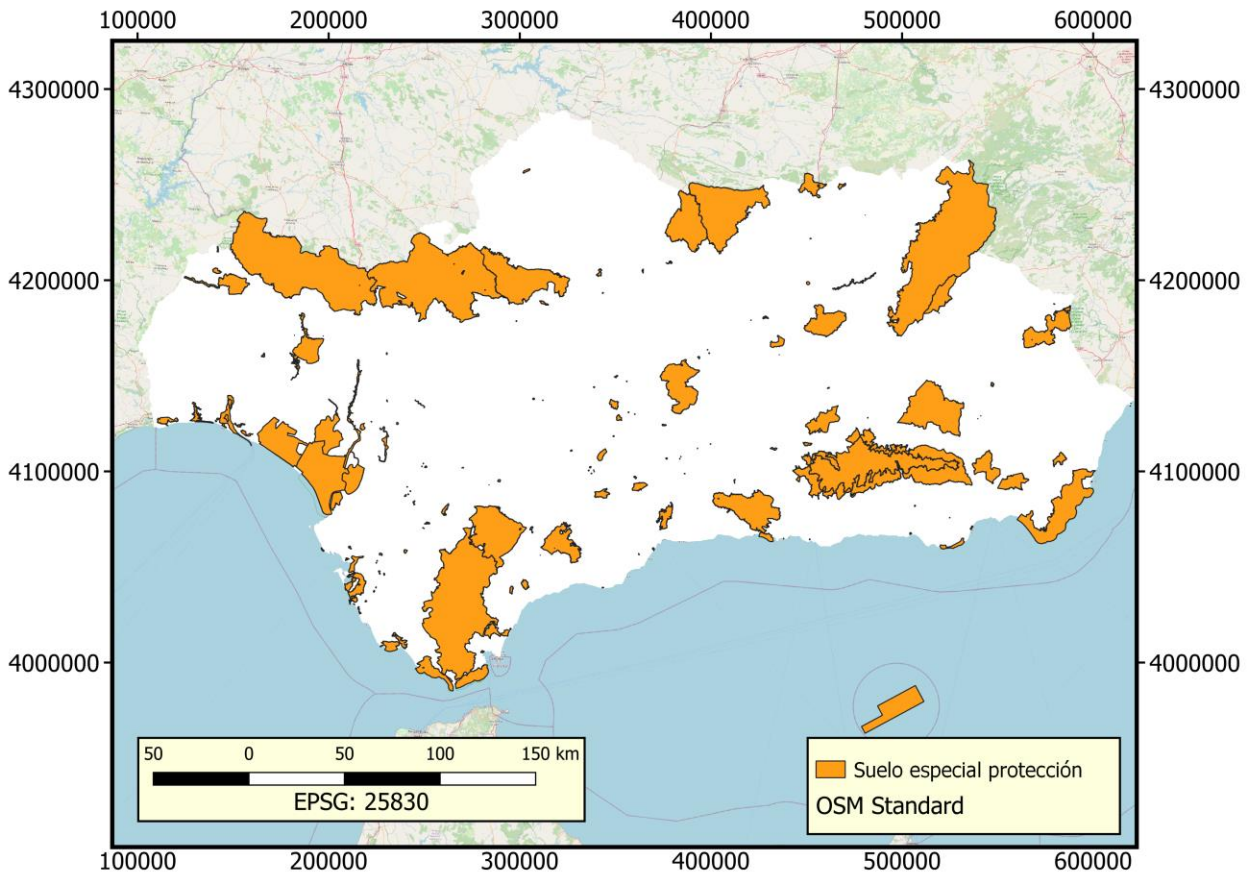


Figura 43 – Figuras de especial protección de Andalucía.
 Fuente: (IECA, 2022). Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

A la capa que se corresponde con la Figura 43 se le aplica una operación de rasterizado, dando como resultado la capa que se incluye en la Figura 44. Con ello se posibilita su inclusión dentro del análisis multicriterio.

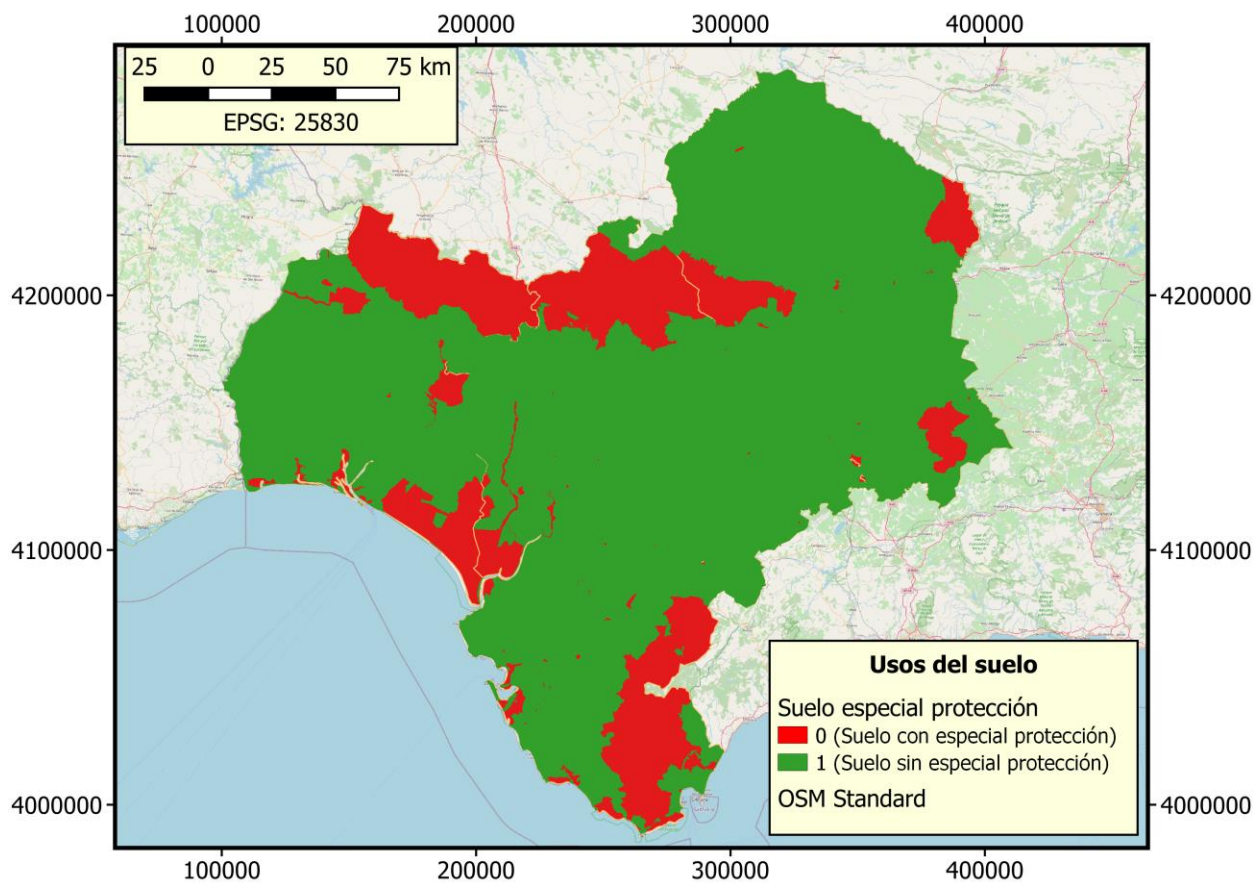


Figura 44 – Mapa que excluye el suelo que ocupan las figuras de especial protección.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

El presente punto del proyecto recoge los resultados obtenidos tras considerar simultáneamente el conjunto de criterios que forman parte del análisis multicriterio. Respecto a esto, los pesos específicos para cada criterio son los recogidos en la Tabla 3 del presente documento.

Para alcanzar los resultados que se reflejan en el punto actual se opera con QGIS a partir de las distintas capas ráster obtenidas para cada uno de los criterios obtenidos en el apartado anterior. El resultado final se corresponde con el sumatorio de los criterios no excluyentes multiplicados por el peso asociado a cada uno de ellos. Además, el resultado de este sumatorio es multiplicado por cada uno de los criterios excluyentes a fin de que queden exentos de formar parte de una posible solución aquellas áreas restringidas.

Atendiendo a todo lo indicado, se puede apreciar en la Figura 45 como para cada punto de la región occidental de Andalucía se obtiene un determinado valor.

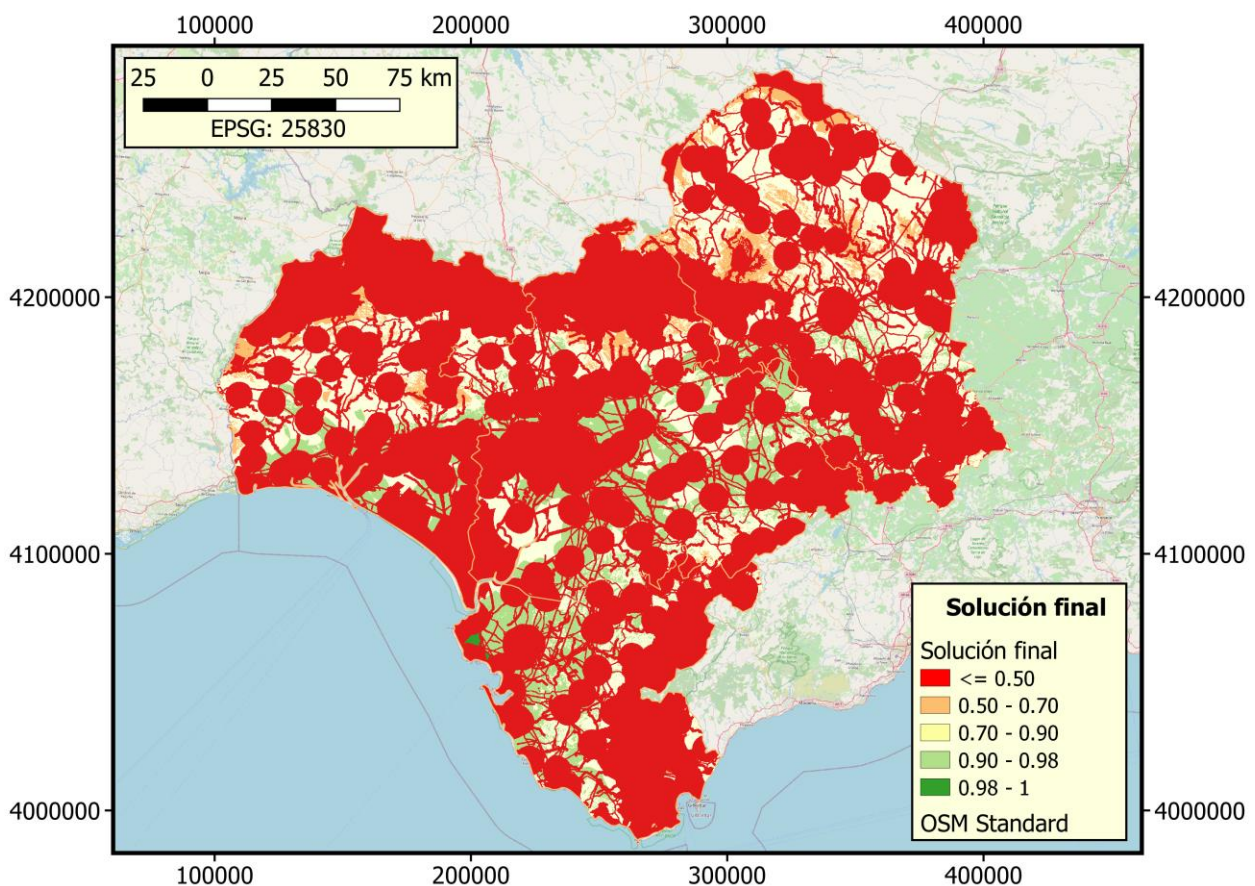


Figura 45 - Solución final evaluado de 0 a 1.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

El siguiente paso consiste en filtrar los puntos en función del valor asociado a estos, por lo que únicamente se consideran como válidos aquellos puntos con un valor superior a 0.98. Ello da lugar a la división del área en cuestión en dos grandes grupos, los espacios que superan dicho criterio y los que no. Todo ello se puede apreciar en la Figura 46.

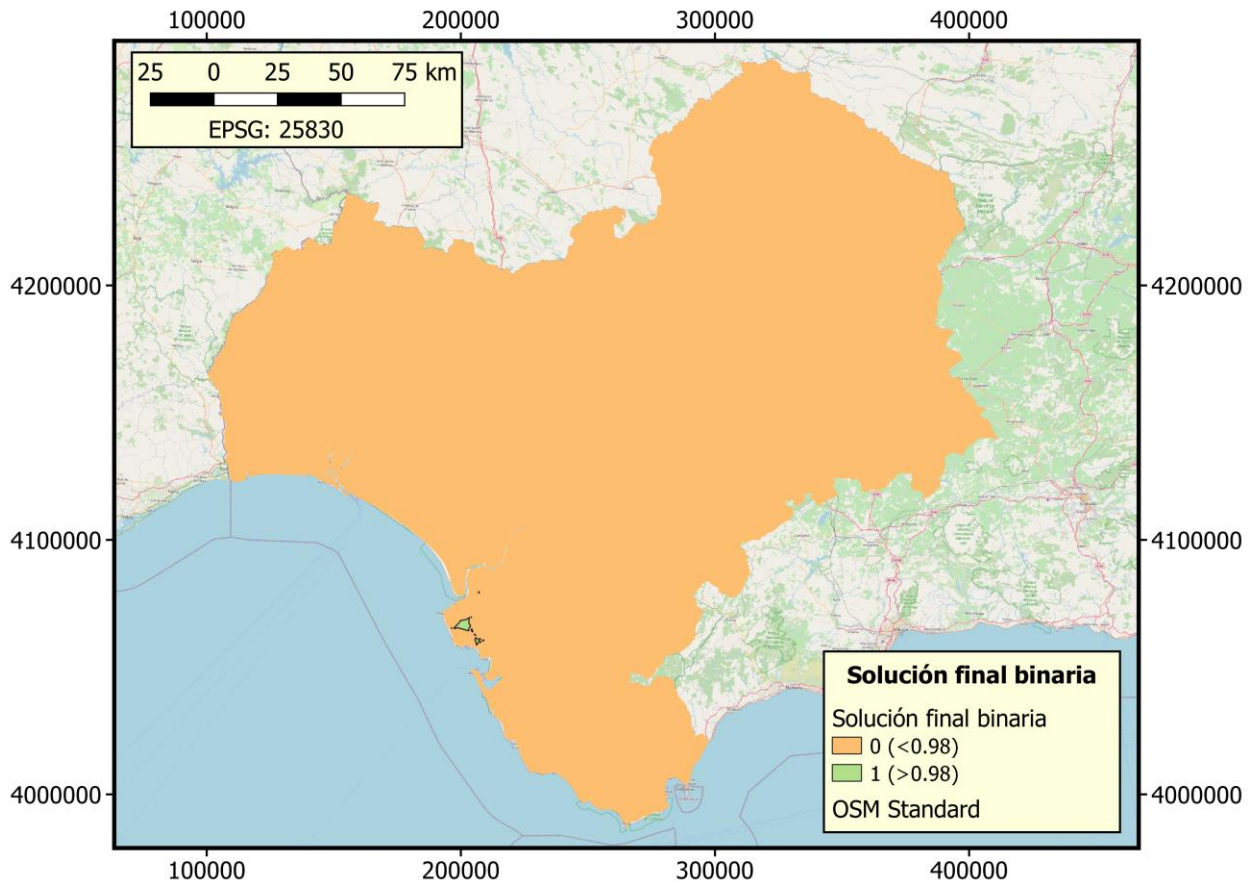


Figura 46. Solución final binaria.

Fuente: Realización propia. Cartografía base: (OPEN STREET MAP, 2022)

El siguiente paso para la obtención del resultado definitivo consiste en determinar la superficie mínima necesaria para poder implantar la instalación fotovoltaica. Este parámetro se encuentra íntimamente ligado a la potencia eléctrica de la instalación, puesto que de la misma dependen las necesidades superficiales mínimas del complejo.

La casuística que se desarrolla en el presente trabajo se corresponde con una central fotovoltaica con una potencia pico igual a 50MW. Este valor establecido para la potencia no es algo que se efectúa de manera aleatoria, sino que se corresponde con el límite superior para que todo lo relativo a la tramitación de este se efectúe a nivel autonómico. Esto tiene una enorme ventaja puesto que se agiliza todo lo relativo al proceso de autorización y los requisitos que se demanda resultan más asequibles.

En este caso, establecer una potencia de 50MW hace que la instalación sea competencia de la comunidad autónoma de Andalucía en lo relativo a la autorización de las instalaciones y en trámites medioambientales. Todo ello se extrae de lo indicado en (JUNTA DE ANDALUCÍA, 2016) donde se establece que «las instalaciones energéticas que son competencia de esta Comunidad Autónoma de Andalucía son aquellas instalaciones de producción de energía eléctrica de potencia eléctrica instalada igual o inferior a 50 MW».

En el caso de las instalaciones eléctricas de generación cuya capacidad supere lo 50MW, se encuentren ubicada sobre el mar u ocupen el ámbito geográfico de más de una comunidad, la tramitación corresponde a la Administración General del Estado.

Como se destaca anteriormente, la potencia de la instalación de generación eléctrica fotovoltaica es muy relevante a la hora de estimar las necesidades superficiales del proyecto. En el caso de la fotovoltaica, se emplea lo referido por (INSTITUTO ENERXÉTICO DE GALICIA, 2021) donde se indica que para obtener un kilovatio pico la superficie efectiva de los paneles fotovoltaicos oscila entre los ocho y los diez metros cuadrados. Sin embargo, en grandes instalaciones como la de este trabajo, existen multitud de paneles fotovoltaicos y se deben considerar otros aspectos como evitar el sombreado entre paneles.

Todo ello, dispara las necesidades superficiales muy por encima del valor de la superficie efectiva. Por ello, el valor real que se debe considerar es el que aparece en (SUELO SOLAR, 2009) donde se expresa que, para instalaciones de estructura fija, como la del presente proyecto, se necesitan dos hectáreas superficiales por megavatio instalado. De esta manera, puesto que la central fotovoltaica es de 50MW, la superficie mínima necesaria es de cien hectáreas.

Aplicando este criterio de superficie mínima únicamente quedan dos posibles alternativas como enclaves válidos. Estas dos alternativas son las que se aprecian en la Figura 47.

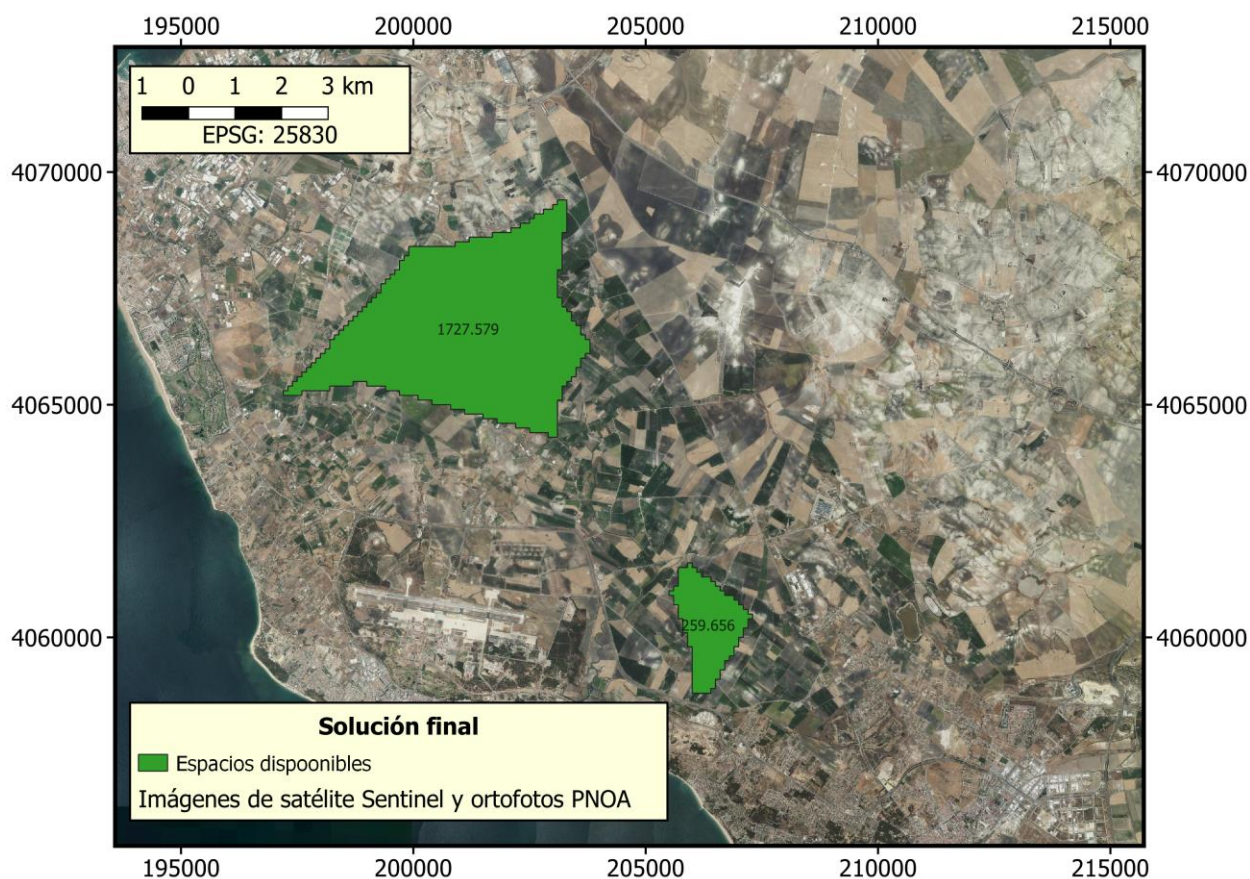


Figura 47 – Alternativas con más de 100 ha para implantar una central fotovoltaica.

Fuente: Elaboración propia. Fondo: (OPEN STREET MAP, 2022)

El último paso consiste en analizar de manera pormenorizada cada una de las dos alternativas planteadas a fin de establecer cuál de ellas es mejor para la implantación de la central fotovoltaica.

En el caso de la alternativa uno, que se refleja en la Figura 48, se puede apreciar como la superficie del área en cuestión supera las cien hectáreas. Por ello, esta primera alternativa cumple en lo relativo a las necesidades superficiales. Sin embargo, en dicha imagen se puede apreciar como dentro del área en cuestión aparece una pequeña superficie acuosa y determinadas construcciones aisladas. Todo ello hace que se descarte esta primera alternativa como emplazamiento definitivo para la implantación de una central fotovoltaica.

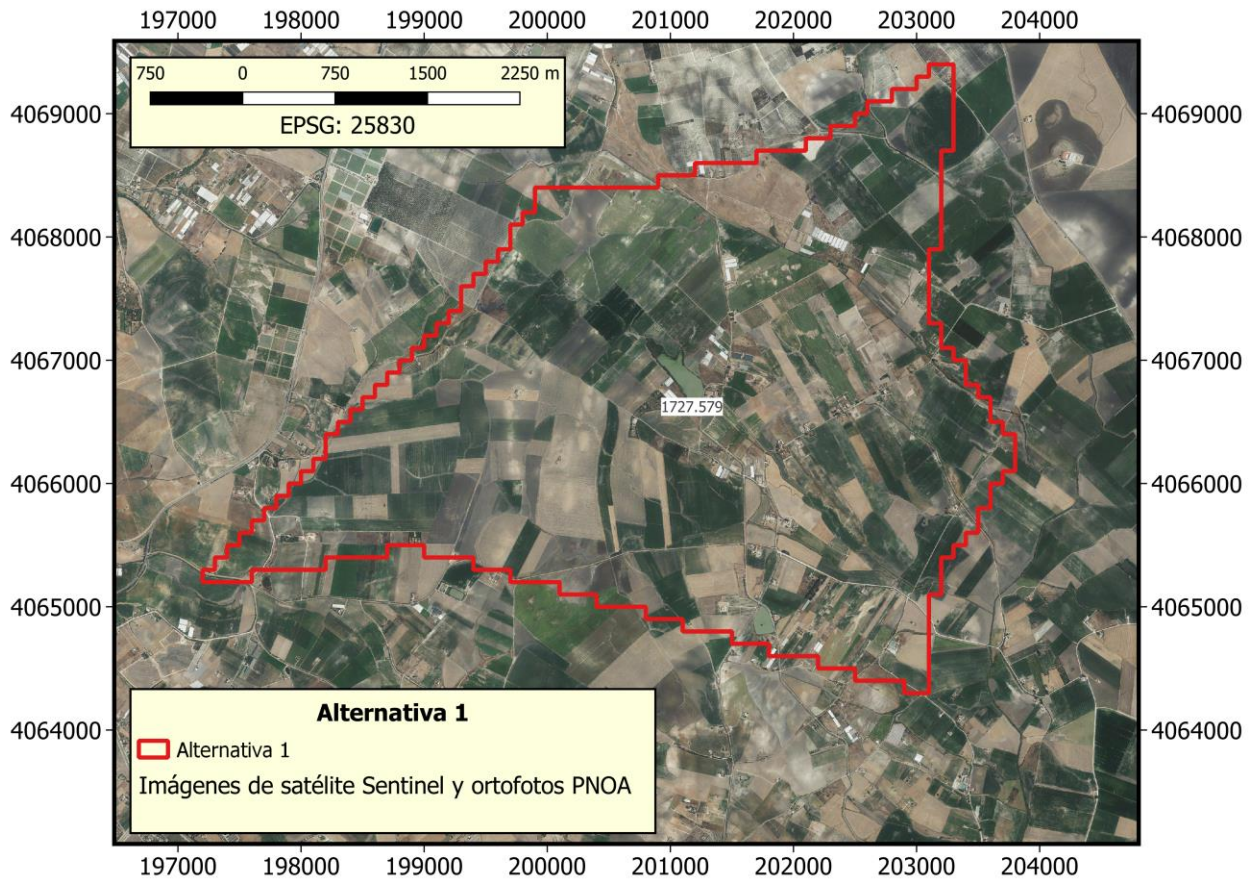


Figura 48 - Alternativa 1 para el emplazamiento de la central fotovoltaica.

Fuente: Elaboración propia. Fondo: (CNIG, 2022)

En el caso de la alternativa dos, el área en cuestión supera las 250 hectáreas que es más del doble de la superficie mínima requerida, tal y como refleja la Figura 49. A diferencia de lo que se aprecia en la alternativa uno, el espacio que ocupa la alternativa dos se encuentra exento de impedimentos que puedan llegar a impedir la localización de la central fotovoltaica. Por ello, resulta la mejor alternativa posible como emplazamiento para una central fotovoltaica de 50 MW. El emplazamiento que se selecciona se sitúa en la provincia de Cádiz, en el espacio existente entre la base naval de Rota y el municipio del Puerto de Santa María.

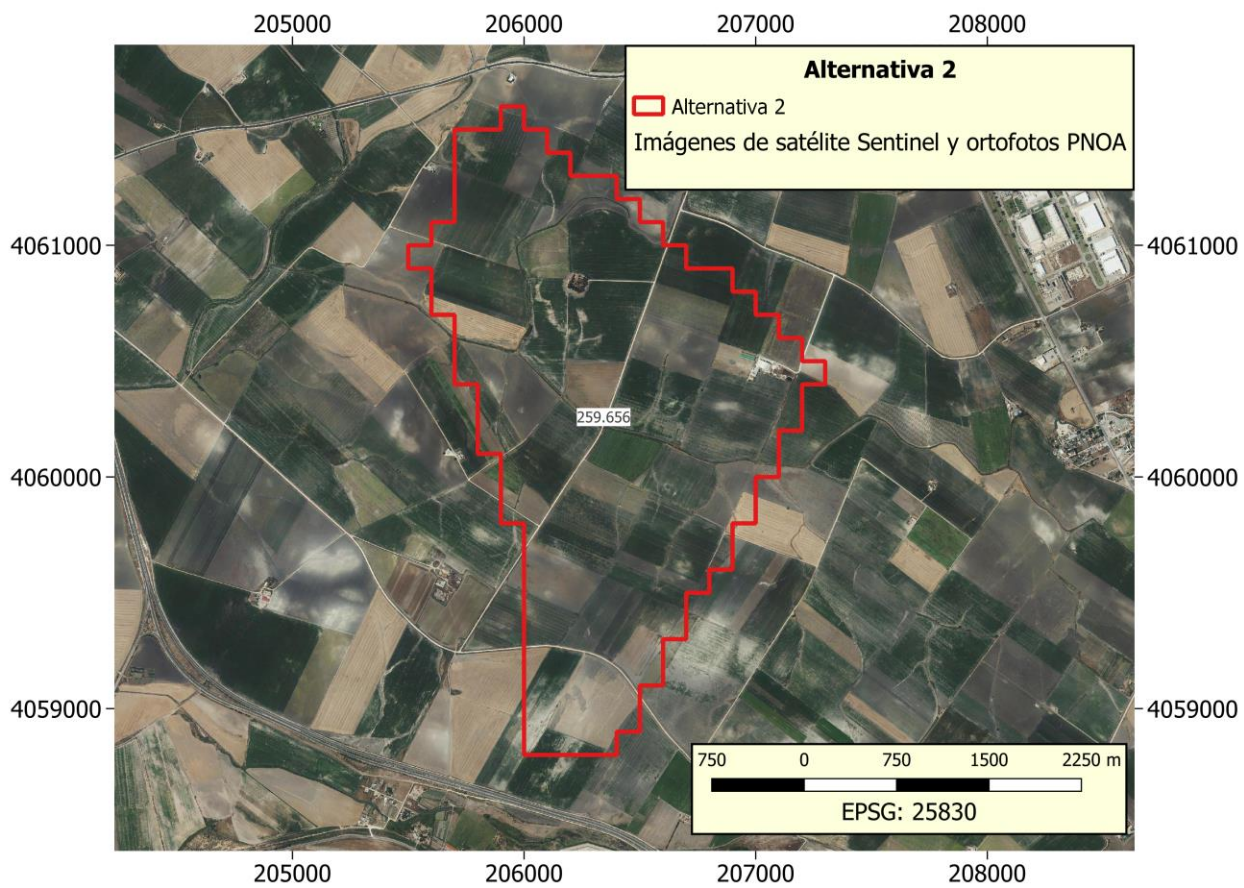


Figura 49 - Alternativa 2 para el emplazamiento de la central fotovoltaica.

Fuente: Elaboración propia. Fondo: (CNIG, 2022)

Este último capítulo del trabajo se dedica a establecer todas aquellas conclusiones derivadas del desarrollo del mismo. Para ello, se hace un recorrido lineal por los distintos apartados que lo constituyen y las principales ideas que se pueden extraer.

De esta manera, la primera parte del trabajo permite deducir el buen estado de salud en el que se encuentran las energías renovables a nivel general, y la fotovoltaica en particular, en la actualidad. Todo ello queda de manifiesto con la implantación anual de una potencia en materia de energías renovables superior al año anterior en cuestión, por lo tanto, este tipo de tecnologías resultan sumamente atractivas a la hora de fijarlas como un posible destino de inversión.

Por otro lado, se encuentran las conclusiones extraídas a nivel técnico derivadas del análisis multicriterio llevado a cabo para determinar la mejor implantación posible de una central fotovoltaica en la región occidental de Andalucía.

Del resultado obtenido cabe resaltar que Andalucía se trata de un enclave extraordinario para la implantación de la tecnología fotovoltaica, buena prueba de ello es el alto valor alcanzado al aplicar el análisis multicriterio. El resultado alcanzado fija como mejor enclave para una central fotovoltaica de 50MW en Andalucía occidental el situado entre la base naval de Rota y el Puerto de Santa María. Sin embargo, existen otros muchos enclaves en los que, si bien el valor alcanzado no resulta tan alto, sí que son buenos emplazamientos para poder llevar a cabo potencialmente la implantación de la tecnología fotovoltaica.

Para finalizar, se debe destacar el enorme potencial que presentan los SIG a la hora de determinar la localización más favorable para una tipología de instalación de un determinado espacio. La capacidad que atesoran para el manejo y tratamiento de datos espaciales, junto con la información que incluyen estos, facilita enormemente la selección del enclave más apropiado en cada caso.

REFERENCIAS

- ADLER, F., BERARDI, M., GARCÍA PEDROSA, M., MONTICELLI, F., & MORQUECHO, M. (2013). *Energía solar fotovoltaica. Instalaciones Industriales*. Recuperado el 19 de Octubre de 2022, de <http://www3.fi.mdp.edu.ar/dtoelectrica/files/instalaciones-industriales/material/autogeneracion/renovables/solar/energia%20solar%202013.pdf>
- ALONSO SARRIA, F. (2019). Modelos y estructura de datos. En F. ALONSO SARRIA, *Sistemas de Información Geográfica* (pág. 239). Murcia. Recuperado el 13 de Noviembre de 2022, de <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- ARENAS, D., CHACÓN PINZÓN, E., & BELKY, J. (2019). Revisión del estado actual de los Sistemas de Energía Fotovoltaico. *Revista Integra, 11*. Recuperado el 18 de Octubre de 2022
- CENSOLAR. (2021). *Legislación fotovoltaica en España*. Recuperado el 30 de Octubre de 2022, de <https://www.censolar.org/legislacion-fotovoltaica-2021/>
- CNIG. (2021). *Infraestructuras de Datos Espaciales* (1ª ed.). (M. J. INIESTO ALBA, & M. A. NÚÑEZ ANDRÉS, Edits.) Madrid, Comunidad de Madrid, España: O. A. Centro Nacional de Información Geográfica. Recuperado el 4 de Noviembre de 2022, de <https://www.ign.es/resources/acercaDe/libDigPub/Libro-IDE-2020.pdf>
- CNIG. (2022). *Sentinel y PNOA*. Obtenido de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=VAMSB>
- CREUS SOLÉ, A. (2014). *Energías renovables* (Segunda ed.). (E. Ceysa, Ed.) Barcelona, Barcelona, España: Cano Pina. Recuperado el 17 de Octubre de 2022, de CREUS SOLÉ, A. *Energías renovables* (2a. ed.). ed. Barcelhttps://elibro--net.us.debiblio.com/es/ereader/bibliotecaus/43075?page=358
- DÍAZ CORCOBADO, T., & CARMONA RUBIA, G. (2018). Componentes de una instalación solar fotovoltaica. En *Instalaciones solares fotovoltaicas* (Primera ed., pág. 24). 1: McGraw-Hill Interamericana de España S.L. Recuperado el 18 de Octubre de 2022, de <https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>
- DOMÍNGUEZ GÓMEZ, J. A. (2008). *Energías alternativas* (Tercera ed.). Madrid, Comunidad de Madrid, España: Equipo Sirius. Recuperado el 15 de Octubre de 2022, de <https://elibro--net.us.debiblio.com/es/ereader/bibliotecaus/60129?page=5>
- EMBER. (2021). *Ember Climate*. Recuperado el 20 de Octubre de 2022, de <https://ember-climate.org/countries-and-regions/regions/europe/>
- ENDESA FUNDACIÓN. (2013). *Central solar*. Recuperado el 17 de Octubre de 2022, de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-renovables/central-solar>
- ESPEJO MARTIN, C., & APARICIO GUERRERO, A. E. (Febrero de 2020). La Producción de Electricidad con Energía Solar Fotovoltaica en España en el Siglo XXI. *Revista de Estudios Andaluces*(39), 28. Recuperado el 20 de Octubre de 2022, de https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/100239/04_espejo-marin_aparicio-guerrero.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- GARCÍA PÉREZ, A., & CABRERO ORTEGA, Y. (2015). *Análisis estadístico de datos espaciales con QGIS y R*. Madrid, Comunidad de Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado el 20 de Noviembre de 2022, de <https://lectura.unebook.es/viewer/9788436270914/3>
- GROSSI GALLEGOS, H. (2002). *Notas sobre radiación solar* (Primera ed.). Universidad Nacional de Luján. Recuperado el 01 de Noviembre de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Grossi-Gallegos/publication/311375862_Notes_on_Solar_Radiation_en_espanol/links/584338c208ae2d2175

637d92/Notes-on-Solar-Radiation-en-espanol.pdf

- GUTIERREZ VELAYOS, J., AGUILÓ PASTRANA, M. L., & VELÁZQUEZ SAORNIL, J. (2018). Metodología para la localización óptima de instalaciones de energía solar fotovoltaica en la isla de Tenerife, España. *Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018*. Madrid.
- HELIOESFERA. (02 de Febrero de 2022). *Diferencia entre el efecto fotoeléctrico y el efecto fotovoltaico*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2022, de <https://www.helioesfera.com/diferencia-entre-efecto-fotoelectrico-y-efecto-fotovoltaico/>
- IDAE. (2011). *Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Recuperado el 07 de Noviembre de 2022, de https://www.idae.es/sites/default/files/documentos_5654_FV_pliego_condiciones_tecnicas_instalaciones_conectadas_a_red_C20_Julio_2011_3498eaaf.pdf
- IECA. (2022). *Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2022, de Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA): https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/datos_espaciales.htm
- IGES SÁNCHEZ, J. (2020). *Diseño y estudio ambiental de una placa fotovoltaica*. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena. Recuperado el 28 de Octubre de 2022, de <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/8934/tfg-ige-dis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IGN. (2022). *Instituto Geográfico Nacional*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2022, de <https://www.ign.es/web/ign/portal/inicio>
- INSTITUTO ENERXÉTICO DE GALICIA. (2021). *Energía solar fotovoltaica*. Recuperado el 28 de Octubre de 2022, de https://www.inega.gal/informacion/preguntas_frecuentes/enerxia_solar_fotovoltaica.html?idioma=es
- JUNTA DE ANDALUCÍA. (2016). *BOJA n° 51 de 16/03/2016*. Obtenido de <https://www.juntadeandalucia.es/boja/2016/51/>
- LAZO VIRI, N. D. (2019). *Construcción de un módulo de energía solar fotovoltaica con paneles de silicio amorfo (Capa fina)*. Trabajo Fin de Grado, Instituto Tecnológico Superior Vida Nueva, Quito. Recuperado el 3 de Noviembre de 2022, de <http://dspace.istvidanueva.edu.ec/bitstream/123456789/93/1/43.1350-LAZO-VIRI-NESTOR-DARIO.pdf>
- LÓPEZ LARA, E., POSADA SIMEÓN, C., & MORENO NAVARRO, J. G. (1997). Los sistemas de información geográfica. *I Congreso de Ciencia Regional de Andalucía: Andalucía en el imbral del siglo XXI*, (pág. 16). Jerez de la Frontera. Recuperado el 4 de Noviembre de 2022, de <http://imsturex.unex.es/MUIETSIG/TEMA1.pdf>
- MARTÍN ÁLVAREZ, S. (2019). *Estudio de las células y paneles de una instalación fotovoltaica*. Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, Tecnología Electrónica, Valladolid. Recuperado el 5 de Noviembre de 2022, de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/36784/TFG-I-1155.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- MITECO. (2022). Guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental de proyectos de plantas solares fotovoltaicas y sus infraestructuras de evacuación.
- OPEN STREET MAP. (2022). Recuperado el 24 de Noviembre de 2022, de <https://www.openstreetmap.org/>
- ORTIZ CACHÁ, M. (2019). *Análisis Técnico y Financiero de un Proyecto Fotovoltaico*. Trabajo Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid, Técnicas Energéticas, Madrid. Recuperado el 20 de Octubre de 2022, de https://oa.upm.es/56695/1/TFG_MANUEL_ORTIZ_CACHA.pdf
- PAREJA APARICIO, M. (2010). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. Barcelona, Barcelona, España: Marcombo S.A. Recuperado el 26 de Octubre de 2022, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=YkxOEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=radiacion+solar&ots=r8Zc8HNhbj&sig=oVfxNyrjsR21xNZI1hLHcS-NDYU#v=onepage&q&f=true>
- PÉREZ NAVARRO, A., BOTELLA PLANA, A., MUÑOZ BOLLAS, A., OLIVELLA GONZÁLEZ, R.,

- OLMEDILLAS HERNÁNDEZ, J. C., & RODRÍGUEZ LLORET, J. (2011). *Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática*. Barcelona, Barcelona, España: Editorial UOC. Recuperado el 12 de Noviembre de 2022
- POLITYTO CREMASCO, N., CORDEIRO, A. C., RODRIGUES LAUTERT, R., ASSADE LELUDAK, J., & URBANETZ JUNIO, J. (2021). Estudio de diferentes tecnologías de células fotovoltaicas. *Revista Electrónica Científica Inovacao e Tecnologia*, 12(31), 44-55. Recuperado el 3 de Noviembre de 2022
- QGIS. (2022). *Descarga QGIS para tu plataforma*. Recuperado el 15 de septiembre de 2022, de www.qgis.org
- QUINTEROS, M. E., & MORALES JADAN, D. X. (01 de Diciembre de 2020). Análisis multicriterio para la localización de centrales fotovoltaicas de gran escala. *Revista Digital Novasinerгия*, 2(2), 10. Recuperado el 29 de Octubre de 2022, de <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rns/v3n2/2631-2654-rns-3-02-00047.pdf>
- RED ELÉCTRICA. (22 de Septiembre de 2022). *2022 o el brillante año de la fotovoltaica*. Recuperado el 25 de Octubre de 2022, de <https://www.ree.es/es/sala-de-prensa/actualidad/especial/2022/09/2022-o-el-brillante-ano-de-la-fotovoltaica>
- RED ELÉCTRICA. (2022). *Mapa instalaciones fotovoltaicas*. Recuperado el 03 de Noviembre de 2022, de Sistemas de Información del Operador del Sistema: <https://www.esios.ree.es/es/mapas-de-interes/mapa-instalaciones-fotovoltaicas>
- SANTOS PRECIADO, J. M. (2020). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, Comunidad de Madrid, España: UNED. Recuperado el 5 de Noviembre de 2022, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=xjbeDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=historia+sistemas+informacion+geografica&ots=wrs-jzoDag&sig=Gpg0377njpytgFLXL40wpJvfqzE#v=onepage&q&f=false>
- SMA SOLAR TECHNOLOGY AG. (2019). *Coeficiente de rendimiento. Factor de calidad de la instalación fotovoltaica*. Recuperado el 2022 de Octubre de 2022, de <https://files.sma.de/downloads/Perfratio-TI-es-11.pdf>
- SOLARGIS. (2019). *Mapas de recursos solares de España*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2022, de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/spain>
- SUELO SOLAR. (12 de marzo de 2009). *¿Qué tipo de terrenos y a qué precio buscan los promotores solares?* Recuperado el 1 de Noviembre de 2022, de <https://suelosolar.com/noticias/consultorio/espana/12-3-2009/que-tipo-terrenos-que-precio-buscan-promotores-solares>
- TECHNO SUN. (2022). <https://www.technosun.com/>. Recuperado el 2 de Noviembre de 2022, de <https://www.technosun.com/descargas/TECHNO-SUN-SLxxxTU-5-10-20-40-100-150W-ficha-ES.pdf>
- TOBAJAS VÁZQUEZ, M. (2014). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Barcelona, Barcelona, España: Cano Pina, S.L. - Ediciones Ceysa. Recuperado el 17 de Octubre de 2022, de <https://elibro-net.us.debiblio.com/es/ereader/bibliotecaus/43053?page=7>
- TRASHORRAS MONTECELOS, J. (2021). *Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares fotovoltaicas* (Primera ed.). Madrid, Comunidad de Madrid, España: Paraninfo. Recuperado el 19 de Octubre de 2022, de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ZKIIIEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=funcionamiento+fotovoltaica&ots=m1AuHI_yrq&sig=8-9esxsoUAFcX9McxTj6_H8eNw#v=onepage&q=funcionamiento%20fotovoltaica&f=true
- UNEF. (2022). *Energía Solar. Apuesta segura para la recuperación económica*. Informe anual, Unión Española Fotovoltaica, Madrid. Recuperado el 06 de Noviembre de 2022