

05-031

(05-031) - Identification of the potential of floating photovoltaic systems: Jaén, a case study

Muñoz Cerón, Emilio ¹; Osorio Aravena, Juan Carlos ¹; Rodríguez Segura, Francisco Javier ²; Moreno Buesa, Sergio ¹

¹ Universidad de Jaén, ² Universidad de Granada

The integration of photovoltaic systems in our energy system is a growing reality, especially through the promotion of large photovoltaic plants. In this scenario, the occupation of large extensions of land destined mainly for agricultural uses is being the object of controversy from different sectors of society, since it is displacing the traditional use of the land.

For this reason, the promotion of photovoltaic projects is being urged to continue advancing towards a renewable energy transition, while guaranteeing the environmental sustainability of the project. In this context, floating photovoltaic systems (FPV) emerge, as they can be a more sustainable alternative to ground-based photovoltaic systems, since they avoid the occupation of useful land and power generation is more distributed than in the case of large photovoltaic plants.

This work presents a study that calculates the technical potential of FPV at the provincial level, using the province of Jaén as a case study and focusing on irrigation ponds, reservoirs and others, to discern the capacity that could be installed without the need to replace agricultural land, as well as to calculate the amount of energy that could be supplied.

Keywords: Photovoltaic; Floating; Renewable Energy

Identificación del potencial de sistemas fotovoltaicos flotantes: Jaén, un caso de estudio

La integración de sistemas fotovoltaicos en nuestro sistema energético es una realidad en auge, especialmente mediante la promoción de grandes plantas fotovoltaicas. En este escenario la ocupación de grandes extensiones de terreno destinadas principalmente a usos agrícolas está siendo objeto de polémica proveniente de diferentes sectores de la sociedad, puesto que está desplazando el uso tradicional del terreno.

Es por ello por lo que se está instando a la promoción de proyectos fotovoltaicos que sigan permitiendo avanzar hacia una transición energética renovable, a la par que se garantice la sostenibilidad medioambiental del proyecto. En este contexto surgen los sistemas fotovoltaicos flotantes (FPV), ya que pueden ser una alternativa más sostenible que los sistemas fotovoltaicos en tierra, puesto que evitan la ocupación de suelo útil y la generación de energía está más distribuida que el caso de grandes plantas fotovoltaicas.

Este trabajo presenta un estudio que calcula el potencial técnico de FPV a nivel provincial, poniendo como caso de estudio a la provincia de Jaén y centrándose en balsas de riego, embalses y otras infraestructuras, que permita discernir acerca de la capacidad que podría instalarse sin necesidad de sustituir terreno agrícola, así como calcular la cantidad de energía que podría abastecer.

Palabras clave: Fotovoltaica; Flotante; Energía Renovable



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Correspondencia: EMILIO MUÑOZ CERÓN, emunoz@ujaen.es

1. Introducción

En el año 2022, la capacidad de generación con fuentes renovables tuvo una expansión en la penetración en el sistema con respecto a las cifras alcanzadas en el año anterior. Atendiendo a las cifras totales del sistema, la cuota de las renovables alcanzó el 83% en dicho año, mientras que en 2021 supuso el 78%. Este incremento gradual ha supuesto que la cuota que estas tecnologías renovables representan en la capacidad total aumente del 38,3% en 2021 al 40,2% en 2022 (IRENA, 2023). No obstante, a pesar de los progresos realizados para fomentar la penetración de las fuentes de energía renovables (EERR) en la mayor parte del mundo, el ritmo de implantación aún no es lo suficientemente rápido como para alcanzar los objetivos internacionales de mitigación del cambio climático (REN21, 2021).

Complementariamente a alcanzar los objetivos fijados, en los procesos de planificación energética es cada vez más importante incluir aspectos que vayan más allá de los tecno-económicos (Osorio-Aravena et al., 2020), con el fin de aplicar políticas que no sólo reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también eviten otros problemas medioambientales y no supongan una fuente de conflicto social, al tiempo que generen beneficios socioeconómicos. En este sentido, la energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías de EERR más prometedoras debido a su ubicuidad y sostenibilidad, en especial, la alternativa que pueden suponer los sistemas fotovoltaicos flotantes (Kim et al., 2019).

Por ello, la energía solar fotovoltaica es una de las tecnologías que más se espera que contribuya al cambio hacia la adopción de las energías renovables en el panorama energético mundial. En este aspecto, en la década actual, los Estados miembros europeos pretenden instalar entre 140 y 222 GW de nueva capacidad fotovoltaica (Kougias et al., 2021), lo que supondrá un aumento de la capacidad fotovoltaica de la UE de entre el 100% y el 160% con respecto a la existente a finales de 2019. De hecho, se espera que la energía solar fotovoltaica sea la principal tecnología de energías renovables en 2050 (Bogdanov et al., 2021), en sintonía con el incremento de capacidad de penetración de las energías renovables mencionadas al inicio. Adicionalmente esto conlleva otros beneficios, como el potencial para crear numerosos puestos de trabajo durante esta implementación de la transición energética mundial (Ram et al., 2022).

Este crecimiento exponencial que está experimentando la instalación de sistemas solares fotovoltaicos, y el potencial de desarrollo previsto en los próximos años, se debe principalmente al importante descenso en el coste instalación de este tipo de sistemas que hacen que la energía generada mediante la tecnología fotovoltaica resulte, hoy en día, competitiva con las fuentes de generación tradicionales (Kost, 2021).

Particularizando para el caso de España, este país ha sido de los mayores instaladores de esta tecnología en Europa desde el 2018. En el año 2022, lideró el crecimiento europeo con 8,6 GWp de nueva potencia instalada, mientras que en Alemania se instaló 7,9 GWp,

perdiendo el liderazgo que había mantenido históricamente. La capacidad fotovoltaica nacional ha pasado de 4,7 GW en diciembre de 2018 a 25 GW de potencia fotovoltaica acumulada a finales de 2022 (Unión Fotovoltaica Española (UNEF), 2023).

Esta potencia acumulada ha tenido un impacto significativo en el mix energético español. En el año 2022 generó 27864 GWh, lo que supuso una participación del 10,1% en términos absolutos, y considerando que la estructura de generación eléctrica en España tenía un 42,2% de producción renovable, se concluye que la tecnología fotovoltaica aportó el 24% en términos relativos (Red Eléctrica, 2023). La evolución experimentada en el año 2023 confirma el papel primordial que esta tecnología tiene, ya que se instaló un 28% más de potencia que el año anterior, lo que implica que a día de hoy la tecnología solar fotovoltaica representa el 20,3% de la potencia instalada en el sistema eléctrico español y, con una generación de 37332 GWh, supuso el 14% de la generación eléctrica peninsular (Red Eléctrica, 2024). Estas cifras no tienen en cuenta la energía solar autoconsumida en instalaciones domiciliarias, lo que vendría a ahondar aún más en el aporte y relevancia de esta tecnología en el sector eléctrico español.

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 de España tiene como objetivo que los sistemas de energías renovables proporcionen el 74% de la energía eléctrica nacional en 2030, con el objetivo de alcanzar el 100% en 2050. Para ello, en el año 2021 se fijó como objetivo alcanzar los 39 GW de fotovoltaica instalada en todo el país para el año 2030, que supone un incremento del 56% con respecto a la potencia actual instalada (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020). No obstante, en la revisión de este plan realizada en el año 2023 y pendiente de autorización por parte de la Comisión Europea, se ha elevado el objetivo de potencia FV, ya que ahora se ha fijado la meta de alcanzar 76 GW de potencia FV para 2030 (Unión Fotovoltaica Española (UNEF), 2023).

Pese al objetivo fijado en dicho plan, y de su potencial contribución a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y por tanto a la mitigación del cambio climático, el despliegue masivo de las energías renovables en general, y de la energía solar fotovoltaica en particular, está suscitando algunas preocupaciones de índole social.

Las energías renovables tienen densidades de potencia inferiores a las de las fuentes convencionales (Capellán-Pérez et al., 2017). Las 10 mayores centrales fotovoltaicas de España ocupan, de media, aproximadamente 2 ha (0,02 km²) de terreno por cada MW de potencia instalado (Álvarez & Zafra, 2021). Si se mantiene esta tendencia, los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima requerirán, a un ritmo de casi 5 nuevos GW fotovoltaicos instalados al año, el uso de 100 km² de terreno en parques solares cada año.

Este requisito de terreno para la instalación de la potencia fotovoltaica prevista puede suponer una amenaza para la biodiversidad (Serrano et al., 2020), generando además conflictos potenciales con la agricultura (Späth, 2018).

En España ya se han experimentado algunos problemas relacionados con la creciente ocupación de terrenos por parte de las energías renovables. Entre ellos, la elevada demanda de suelo para parques fotovoltaicos ha hecho que aumente el coste del terreno. Esto puede tener una repercusión negativa en el incremento del coste de los sistemas fotovoltaicos a escala comercial en España, especialmente para los emplazamientos situados cerca de los puntos de conexión a la red. Otro de los efectos es que, según una estimación reciente (Aparicio, 2020), actualmente es hasta 10 veces más rentable alquilar suelo para instalar grandes parques de energía solar fotovoltaica que para cultivar, lo que está provocando que haya un desplazamiento del uso tradicional del terreno.

Por estas razones, el sector fotovoltaico industrial y la comunidad científica han estado explorando soluciones para aliviar la competencia por el uso del suelo.

Una de las alternativas a esta problemática del terreno ha sido abordada por los sistemas fotovoltaicos flotantes (FPV), que es una aplicación emergente de esta tecnología, donde los

módulos fotovoltaicos se posicionan sobre el agua mediante estructuras especialmente diseñadas para tal efecto (ver figura 1). Esta solución se está implantando a escala mundial con un ritmo de crecimiento exponencial, llegando a doblar su capacidad instalada cada año (Tina et al., 2018; World Bank et al., 2019). Además, la predicción de capacidad a instalar a nivel mundial en los próximos años plantea un escenario de gran expansión (Fernández, 2023), favorecido por el potencial de generación eléctrica que este tipo de sistemas tiene, según los resultados publicados por algunos estudios, donde España ocupa una posición relevante (Jin et al., 2023).

Figura 1: Ejemplo de sistema FV flotante (Imagen propiedad de Desarrollos Tecnológicos Inteltec S.L)



El mayor beneficio de estos sistemas es que esta solución evita los conflictos por el uso del suelo (Padilha Campos Lopes et al., 2022).

Una de las principales ventajas de este tipo de sistemas es que mayoritariamente son competitivos en costes en comparación con las plantas fotovoltaicas montadas en suelo, debido a la ausencia de costes de adquisición de terrenos. De hecho, la FPV no suele requerir grandes obras de preparación del terreno y, si se combina con los sistemas hidroeléctricos existentes en algunas ubicaciones potenciales como son los pantanos, podría aprovechar las infraestructuras eléctricas existentes.

Este hecho tiene como consecuencia un beneficio directo en una reducción potencial de los costes de generación de energía mediante este tipo de alternativa fotovoltaica.

Además, algunos autores afirman que la eficiencia de la generación de electricidad es superior a la de los sistemas fotovoltaicos clásicos debido a los efectos refrigerantes del agua. Se esperan temperaturas de funcionamiento más bajas en comparación con los sistemas fotovoltaicos terrestres que pudieran estar en la misma ubicación, lo que significa que las instalaciones fotovoltaicas basadas en tecnología flotante podrían generar mayor cantidad de electricidad por unidad de potencia. Este hecho redundaría en la reducción de costes de generación anteriormente indicada.

Complementariamente, las instalaciones fotovoltaicas flotantes también podrían proporcionar algunos beneficios adicionales y únicos, como es la reducción de la evaporación del agua de los embalses o balsas donde se instale, lo que hace que haya más agua disponible para otros

finés (Alheiji et al., 2021). En un contexto temporal de extrema sequía como el que estamos inmersos, es un beneficio de alto valor añadido. Adicionalmente, un efecto indirecto es la mitigación del crecimiento de algas que supone un problema en las balsas de riego, así como el uso de productos químicos para evitar su proliferación, con el consiguiente desembolso económico (Ferrer-Gisbert et al., 2013).

Finalmente, los proyectos de FPV podrían mitigar los efectos del cambio climático sobre la temperatura y la estratificación de las masas de agua (Exley et al., 2021), fomentar sinergias entre el nexo agua-alimentación-energía (Zhou et al., 2020) y paulatinamente están ganando apoyo social (Bax et al., 2022).

Con el propósito de analizar el efecto que la implantación de esta tecnología puede tener a nivel territorial, recientemente se ha presentado el primer estudio que calcula el potencial técnico de instalación FPV centrado en grandes infraestructuras hídricas, como son los pantanos (López et al., 2022). Sin embargo, se estima oportuno realizar un análisis de oportunidad de implementación de este tipo de sistemas a nivel territorial. Para ello, se presenta en este estudio una identificación del potencial de sistemas fotovoltaicos flotantes en la provincia de Jaén, mediante su instalación aprovechando balsas de riego, pantanos, así como balsas de residuos del olivar, denominadas balsas de alpechín.

Para ello, en el apartado 2 de este documento se describe la contextualización de la ubicación del caso de estudio, esto es, la provincia de Jaén. El siguiente apartado detalla el enfoque metodológico para calcular el potencial técnico de la FPV y sus múltiples beneficios, cuyos resultados se presentan en el apartado 4. Finalmente, se exponen las conclusiones más relevantes del trabajo.

2. Contexto

El contexto del presente estudio comienza con una descripción de la situación energética de la provincia de Jaén, que servirá de comparación con la capacidad de generación eléctrica de los sistemas FPV propuestos. Además, se comenta la razón de ser de las balsas de riego en la provincia, donde ya se encuentran algunos de estos sistemas instalados. Se ha tomado un campo de pruebas piloto de la Universidad de Jaén como caso de referencia para algunos indicadores y variables de este estudio.

La provincia de Jaén está situada en el sur de España y pertenece a la región de Andalucía. Ocupa una superficie de 13.496 km² y está dividida en 97 municipios. Se trata de una provincia que se caracteriza por ser una región eminentemente agrícola, donde el olivar es el cultivo predominante.

El consumo de energía final en Andalucía ascendió a 12390,6 ktep en 2022. Para ese año, en la provincia de Jaén, el consumo fue de 1085 ktep, lo que representa el 8,8% del total andaluz (Agencia Andaluza de la Energía, 2024).

Desagregando este consumo según los distintos sectores económicos, el sector industrial y de transporte son los de mayor repercusión. En el caso de la provincia de Jaén, el sector industrial supuso un consumo de energía final de 335,1 ktep, mientras que el de transporte ascendió a 397,1 ktep. Por otro lado, el sector primario y el de servicios fueron las actividades que menos energía final consumieron, 7,7% y un 8,7% respectivamente.

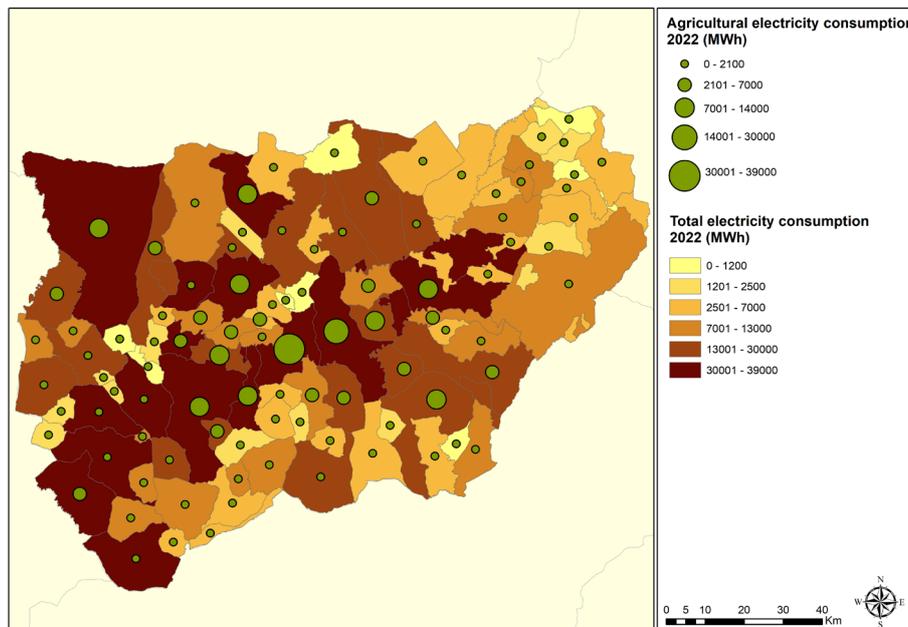
En relación al consumo final de electricidad, en Jaén en los últimos años, se está produciendo una disminución paulatina de este dato. La apuesta por la eficiencia energética y la mayor participación de las energías renovables en la estructura de consumo y generación de la provincia explican esta tendencia. Por ejemplo, en el año 2020, el consumo eléctrico de la provincia ascendió a 2684,73 GWh, mientras que los últimos datos, de 2022, cifran el consumo final en 2558,14 GWh, en línea con la tendencia observada a nivel andaluz. No obstante, si

los datos de consumo se comparan con la producción bruta total de electricidad en Jaén, que para 2022 fue de 2.323,25 GWh, se produce un saldo eléctrico negativo entre producción y consumo. Por tanto, se podría afirmar que Jaén es energéticamente dependiente de las provincias vecinas.

Teniendo en cuenta el carácter distribuido de la tecnología fotovoltaica, así como la dispersión de balsas de riego, embalses y balsas de alpechín en la provincia donde se realizará el estudio de potencial flotante, este consumo se ha desagregado para cada uno de los municipios de esta provincia. La figura 2 muestra el mapa de la provincia de Jaén donde se identifica el consumo total de cada municipio, destacando la relevancia que tiene el consumo eléctrico del sector agrario en el consumo total de cada municipio.

En cuanto a la generación eléctrica, en el año 2022 las diferentes instalaciones ubicadas en Jaén generaron una producción de 1247,7 GWh, donde el 56,2% tenía su origen en fuentes no renovables. En cuanto a la generación eléctrica renovable, la biomasa se posiciona como líder, generando 238,9 GWh, seguida por la tecnología solar fotovoltaica, que para dicho año supuso el 40,1% de la generación eléctrica con fuentes renovables.

Figura 2: Consumo de electricidad en los municipios de Jaén



2.1 Balsas de regadío, embalses y balsas de alpechín

El principal motor de los procesos de modernización agrícola ha sido el uso intensivo de los recursos disponibles (Peñalver et al., 2015). En Andalucía, los condicionantes del clima mediterráneo, caracterizado por la irregularidad y escasez y una elevada evaporación, hacen del agua un recurso que se disputa entre el uso doméstico y el regadío, que en el caso concreto de esta provincia ha experimentado una expansión en las últimas décadas (Paniza Cabrera et al., 2015).

Desde la segunda mitad del siglo XX, se llevaron a cabo diferentes intervenciones encaminadas a la ampliación de la superficie de regadío, materializada en la construcción de una extensa red de embalses a lo largo del río Guadalquivir y sus principales ramales (Araque-Jiménez et al., 2002). Sin embargo, tras la entrada de España en la Unión Europea Unión Europea y la vinculación de las ayudas agrarias a la Política Agraria Común (PAC), se genera en esta provincia un movimiento de intensificación, donde las infraestructuras hidráulicas de

regadío existentes se volvieron insuficientes, dando lugar a proliferación de balsas de agua en explotaciones privadas que pretenden optimizar el uso del agua para el riego y garantizar el suministro de agua a sus cultivos en épocas estivales o de sequía (Peñalver et al., 2015).

Complementariamente, la intensificación de la industria aceitera en la provincia ha supuesto un incremento en la generación de los residuos de la molturación del fruto del olivar, denominado alpechín, que no puede ser vertido y precisa de su almacenamiento en balsas especiales para tal fin.

3. Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación, es decir la identificación del potencial de capacidad técnica y de generación eléctrica de una instalación masiva de sistemas fotovoltaicos flotantes, junto con la cuantificación de los beneficios adicionales (sociales, económicos o medioambientales), se propone la siguiente metodología.

El primer paso consiste en definir el tipo y las características de la infraestructura para la instalación de estos sistemas FPV. En este manuscrito para evitar cualquier conflicto con la biodiversidad acuática, sólo se analizan superficies de agua artificiales, incluyendo balsas de riego y embalses.

Además, se incluyen otro tipo de infraestructuras de acumulación de líquidos como son los residuos líquidos tóxicos resultantes del prensado de las aceitunas para la producción de aceite. En esta etapa, se han eliminado otro tipo de infraestructuras como son los estanques de purines de ganado.

El siguiente paso de la metodología consiste en identificar, dentro de una región concreta, aquellas infraestructuras hídricas que cumplen los requisitos anteriores. Para ello, se obtienen sus coordenadas de localización, así como la superficie de agua ocupada por dichas balsas y embalses. Para tal fin, se han usado los datos cartográficos proporcionados por el Sistema de Información Multiterritorial (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2024).

La siguiente fase ha consistido en procesar la lista de infraestructuras hidráulicas registradas con el fin de descartar algunas infraestructuras que no encajan dentro de la clasificación preliminar, como sucede con los canales de riego. Posteriormente, a partir de sus coordenadas de ubicación, se ha realizado una agrupación de estas infraestructuras en función de los municipios a los que pertenecen, calculando para ello el punto central global (centroide) de todas las infraestructuras consideradas en un municipio determinado, y que serán utilizadas como coordenadas de referencia para los datos meteorológicos. Para tal fin se empleó el software de procesamiento geoespacial ArcMap.

El cuarto paso de la metodología, previo al cálculo de la electricidad solar fotovoltaica, consiste en seleccionar los datos meteorológicos de estos centroides de referencia. Se recomienda que los datos correspondan al año meteorológico tipo (TMY), que consiste en registrar varias mediciones meteorológicas a intervalos horarios durante un periodo de varios años para construir una imagen del clima local, reduciendo así la incertidumbre que podría causar el uso de datos meteorológicos de un año concreto. Entre las fuentes de datos meteorológicos disponibles, la herramienta PVGIS (versión 5.2) proporciona bases de datos de libre acceso sobre radiación solar. En esta investigación se utilizó la base de datos PVGIS-SARAH2 cuyos datos están basados en satélites, cubriendo un periodo de tiempo de 2005 a 2020 (Huld et al., 2012).

La simulación del rendimiento eléctrico final, es decir, la energía generada por unidad de potencia fotovoltaica instalada (Y_F , kWh/kWp) que tendría un sistema FV flotante en las ubicaciones centroides es el quinto paso de esta metodología. Para ello se ha considerado 5° como ángulo de inclinación de los módulos, ya que es por defecto el nivel de inclinación que

tienen este tipo de sistemas flotantes. Para este proceso de simulación se empleó el software System Advisor Model (SAM) desarrollado por el centro de investigación NREL (Rudié et al., 2014). En una primera aproximación, se han asumido las pérdidas globales del sistema fotovoltaico establecidas por defecto por el software, ya que aunque algunos autores mencionan posibles ganancias de energía debidas al efecto refrigerante del agua, estas conclusiones aún no están suficientemente contrastadas con datos empíricos y, en algunos casos, dependiendo del tipo de flotador utilizado, estas mejoras energéticas no son tan elevadas (Dörenkämper et al., 2021).

En este paso resulta útil estimar la superficie agrícola equivalente necesaria para producir la misma energía que el sistema FV flotante, pero instalando la planta fotovoltaica en el suelo en su lugar. Por tanto, el rendimiento eléctrico de una instalación FV con una inclinación optimizada para cada uno de las ubicaciones (centroides) también ha sido objeto de simulación. En este caso, el ángulo de inclinación de estos sistemas coincide con la latitud de las ubicaciones de los centroides.

Posteriormente, en el siguiente paso de la metodología, se procede a calcular la energía generada por unidad de superficie de agua o de tierra (E_A , kWh/m²) tanto del sistema fotovoltaico flotante como del sistema gemelo terrestre en la ubicación del centroide. Para este cálculo, se utilizó la potencia fotovoltaica por unidad de superficie (K_{pvA} , kWp/m²) de un sistema fotovoltaico flotante estándar y de un sistema fotovoltaico terrestre inclinado óptimamente en la ubicación del centroide. Por lo tanto, considerando el rendimiento energético anual (Y_F) simulado para para cada sistema, la energía por unidad de superficie puede deducirse fácilmente

Para definir el valor de la potencia fotovoltaica por unidad de superficie K_{pvA} , se ha utilizado la potencia fotovoltaica pico y la superficie de agua cubierta por el sistema fotovoltaico flotante del campo de pruebas que tiene la Universidad de Jaén. Esta planta FPV tiene una potencia pico de 52,7 kWp y ocupa una superficie de agua de 401 m², por lo que el valor de K_{pvA} utilizado en este estudio es de 0,131 kWp/m². En el caso de las plantas FV ubicadas en suelo, se ha obtenido a partir de datos de instalaciones reales disponibles en la base de datos del Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía: Datos Espaciales de Referencia de Andalucía, proporcionados por la Junta de Andalucía (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2024). En el caso particular de la provincia de Jaén, si se considera la superficie individual de todas las plantas solares fotovoltaicas existentes (fijas sobre suelo) y su correspondiente valor de potencia pico, se ha considerado un valor medio de K_{pvA} de 0,388 MWp/ha.

Para cada una de las balsas de riego, embalses y balsas de alpechín se ha definido la superficie de líquido (S_w , m²) que puede cubrir el sistema FPV. En este aspecto se ha planteado un escenario conservador, donde se ha considerado que solamente el 25% de la superficie de la estructura acuática podría llegar a cubrirse por este tipo de sistemas. El motivo de elegir este valor se justifica por la superficie disponible que existiría en el hipotético caso que se alcanzase el nivel mínimo de la balsa, es decir, en ausencia de agua, y para ello se ha tomado como referencia el sistema del campo de pruebas de la Universidad de Jaén donde está situado el campo de pruebas. Este tipo de sistemas está diseñado para que en tales casos, los flotadores podrían estar apoyados directamente en el fondo del estanque sin dañar su capa de impermeabilización.

Considerando este escenario de ocupación de la superficie de agua, la superficie de cada estanque y el valor constante de la potencia fotovoltaica por unidad de superficie (K_{pvA}) anteriormente indicado, el siguiente paso en la metodología fue obtener el potencial de potencia fotovoltaica (P_{FPV} , kWp) y la producción anual de energía (E_{FPV} , kWh) de cada uno de las estructuras registradas en la provincia de Jaén, aplicando para ello las ecuaciones 1 y 2.

$$P_{FPV} (kWp) = Kpv_A (kWp/m^2) \cdot \frac{C_W (\%)}{100} \cdot S_W (m^2) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} E_{FPV} (kWh) &= E_A (kWh/m^2) \cdot \frac{C_W (\%)}{100} \cdot S_W (m^2) = \\ &= P_{FPV} (kWp) \cdot Y_F (kWh/kWp) \end{aligned} \quad (2)$$

A los resultados que se obtendrían con la aplicación de estas fórmulas se les ha aplicado un filtro en relación al tamaño mínimo de sistema que podría instalarse, debido a que podría haber determinadas balsas de riego de dimensiones reducidas en las que la instalación de este tipo de sistemas no podría ser técnicamente viable o rentable. Este filtro se ha fijado en primer lugar en 10 kWp y en una segunda aproximación, más realista desde el punto de vista de rentabilidad, en 50 kWp.

El resultado de esta metodología permite comparar el potencial de generación eléctrica fotovoltaica flotante con el consumo eléctrico por sectores en la provincia de Jaén. Adicionalmente, con el objetivo de apoyar el concepto de generación distribuida, esta comparación también se puede realizar a nivel municipal.

Complementariamente a los resultados energéticos, se procederá a evaluar el impacto de estos en la obtención de beneficios adicionales. En primer lugar, se estudió la superficie destinada a cultivos de olivar, u otros, que se evita que sea ocupada por plantas fotovoltaicas tradicionales que se instalan sobre el suelo. Para ello, se han propuesto dos escenarios de análisis. Por un lado, se considera la superficie que debería ocupar una planta fija sobre suelo (con su inclinación óptima) para tener la misma cobertura en potencia que los sistemas flotantes obtenidos. El otro escenario consiste en determinar la superficie que necesitarían los sistemas FV tradicionales para producir la misma cantidad de energía que la generada por las instalaciones flotantes.

Adicionalmente a la superficie de suelo que se evitaría desplazar de su uso tradicional, se han calculado otros indicadores como tasas de creación de empleo, la evitación de emisiones de CO₂ y la reducción de la evaporación del agua debido a la superficie cubierta por los módulos fotovoltaicos y los flotadores.

La estimación del número de empleos directos creados en las fases de construcción e instalación y posteriormente en la operación y mantenimiento (O&M) se basa en investigaciones anteriores, donde se estima que para la primera fase podrían crearse 13 empleos/MWp y para las tareas de O&M, 0,7 empleos/MWp (Ram et al., 2022).

En cuanto a la reducción de las emisiones de CO₂, se consideró entre 0,364 y 0,826 ktCO₂/GWh, que es el rango del factor de emisión de CO₂ que depende de la tecnología específica de generación de electricidad basada en combustibles fósiles (Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, n.d.).

Finalmente, para estimar la reducción de la evaporación del agua, como consecuencia de cubrir la superficie balsa de riego con sistemas FPV, se ha estimado en 16667 m³/MWp (Redón Santafé et al., 2014).

4. Resultados

Atendiendo a los tipos de infraestructuras objeto de instalación de este tipo de sistemas definidos en la metodología, en la provincia de Jaén se han identificado 3201 balsas de riego, con una superficie total de 18 km². En la cuenca del Guadalquivir y del Segura existen 88 embalses o balsas que se alimentan directamente de estos, cuya superficie bruta es de 126 km². Finalmente, existen 379 balsas de alpechín diseminadas por toda la provincia, cuya superficie total asciende a 3 km².

4.1 Potencial fotovoltaico flotante y producción de electricidad

Considerando el escenario conservador en donde sólo el 25% de la superficie total se ha empleado para la instalación de este tipo de sistemas, y el tamaño mínimo de generador fotovoltaico es de 10 kWp, se podrían instalar en la provincia de Jaén hasta 4,8 GW de potencia fotovoltaica sin necesidad de usar terreno agrícola para ello. En el caso de requerir que estos sistemas tuvieran una potencia mínima de 50 kWp, esta cifra se mantendría prácticamente igual, descendiendo solamente el potencial en 37,5 MW. Este resultado representaría poder añadir al sistema eléctrico provincial un 1610% de la existente en la actualidad alimentada por esta tecnología fotovoltaica, que en el año 2023 ascendía a 298 MW. En términos relativos, este resultado supondría poder incrementar la potencia eléctrica renovable de Andalucía en un 40%, considerando todas las tecnologías de esta índole.

En términos energéticos, los resultados de la simulación estiman que con el potencial de sistemas FPV identificados se podría llegar a cubrir una demanda eléctrica anual de hasta 7062 GWh, lo que vendría a suponer prácticamente el triple del consumo eléctrico actual de la provincia de Jaén.

La tabla 1 muestra una comparativa del consumo eléctrico de los sectores más representativos de la provincia, con el grado de cobertura de esta demanda que podría llegar a cubrirse con este tipo de sistemas y cuya potencia fuese superior a 50 kWp.

Tabla 1: Cobertura del consumo eléctrico de la provincia de Jaén por sectores

Sectores	Consumo eléctrico anual (GWh)	% de cobertura eléctrica
Agrícola	233,1	3005,9
Industrial	637,7	1098,7
Residencial	978,9	715,8
TOTAL	2508,8	279,3

Se observa que en todos los casos se cubriría ampliamente la demanda eléctrica de la provincia de Jaén.

En un escenario más conservador, en donde solamente se empleasen las balsas de riego, excluyendo del análisis los embalses y las balsas de alpechín, los resultados de cobertura eléctrica que se obtendrían se observan en la tabla 2.

Tabla 2: Cobertura del consumo eléctrico de la provincia de Jaén por sectores empleando solamente balsas de riego

Sectores	Consumo eléctrico anual (GWh)	% de cobertura eléctrica
Agrícola	233,1	358,7
Industrial	637,7	131,1
Residencial	978,9	85,4
TOTAL	2508,8	33,33

Se demuestra en este caso el papel relevante que tendrían los embalses, si bien, es cierto que la instalación de este tipo de sistemas podría entrar en conflicto con otros usos de dichas infraestructuras y necesitaría de un estudio más pormenorizado.

En cualquier caso, en ambos escenarios de manera independiente se estaría en disposición de cubrir la demanda eléctrica del sector agrícola e industrial de la provincia.

Debido a la dispersión geográfica de las infraestructuras identificadas en el presente estudio, se ha realizado un análisis más detallado, en donde se ha comparado la electricidad consumida por cada municipio con la generación fotovoltaica potencial que podría producirse esos distritos geográficos, considerando de manera conjunta las tres tipologías de infraestructuras, esto es, balsas de riego, embalses y balsas de alpechín.

Figura 3: Potencial de generación FV flotante y consumo eléctrico total de la provincia de Jaén

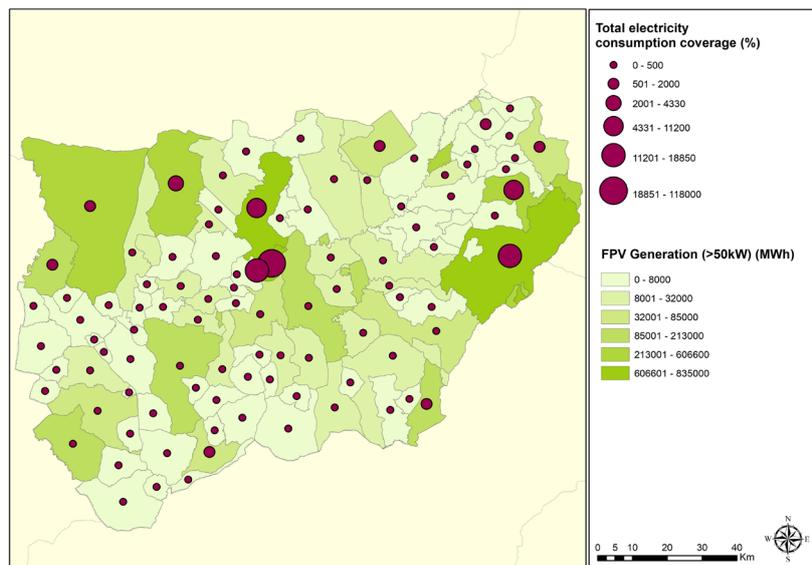
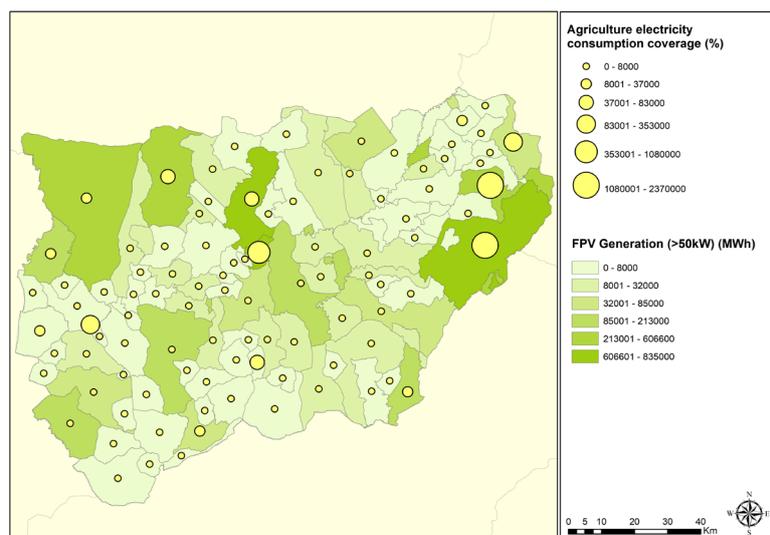


Figura 4: Comparativa de generación FPV y el grado de cobertura eléctrica del sector agrícola



Las figuras 3 y 4 muestran la generación FPV agrupada según el nivel de cada municipio, con los siguientes supuestos: umbral mínimo de potencia FPV de 50 kWp y un grado de cubrimiento de la superficie de $C_w = 25\%$. En estas figuras se han comparado los datos de generación FPV con el porcentaje de cobertura del consumo eléctrico total en Jaén (figura 3) y la ratio de cobertura del consumo correspondiente exclusivamente al sector agrario (figura 4).

4.2 Beneficios adicionales

De manera complementaria al análisis generación-consumo, uno de los objetivos de este tipo de instalaciones flotantes es evitar la ocupación de terrenos que podrían destinarse a otros usos, preferentemente agrícolas o ganaderos.

Por este motivo, este análisis se amplió para determinar la superficie de terreno que no es necesario ocupar. Estos terrenos están dedicados en su mayor parte al cultivo del olivo, que es el cultivo predominante en la provincia de Jaén. Este cálculo, como se explica en la metodología, se ha basado en la comparación con un sistema fotovoltaico fijo, en el que se ha aplicado un ángulo de inclinación correspondiente a la latitud de la ubicación de cada estanque.

Los resultados se han obtenido atendiendo a dos escenarios de análisis. Por un lado, se ha calculado la superficie de terreno que debería ocupar un sistema fijo para cubrir la misma potencia de los sistemas flotantes. En este caso, se evitaría el desplazamiento de hasta 124 km², que podría seguir destinándose a sus usos tradicionales (agrícolas y ganaderos).

En el segundo escenario se analiza la superficie de terreno necesaria para generar la misma electricidad que los sistemas fotovoltaicos flotantes del apartado anterior. En este segundo enfoque, dado que la inclinación igual a la latitud optimiza la generación fotovoltaica, se necesita menos potencia (por tanto, menos superficie) en los sistemas fotovoltaicos montados en tierra para generar la misma energía que los FPV. El terreno que podría ser "salvado" asciende a 113 km².

En ambos escenarios, y en el caso de usar solamente las balsas de riego y, por tanto, excluir los embalses y balsas de alpechín, los resultados serían de 14,5 km² y 13,8 km² respectivamente.

Profundizando en los beneficios que estos sistemas de FPV pueden generar, cabe destacar las emisiones de CO₂ evitadas, la capacidad de creación de empleo y, atendiendo a las particularidades de escasez hídricas de la provincia, la posible reducción de la evaporación del agua. La tabla 3 resume estos resultados para dos escenarios, atendiendo a si se consideran todas las infraestructuras identificadas en este estudio, o solamente a las balsas de riego.

Tabla 3: Beneficios adicionales

Escenarios	Emisiones evitadas (MtCO ₂ /año)	Evaporación (10 ⁶ m ³ /año)	Creación de empleo (construcción)	Creación de empleo (O&M)
Todas las infraestructuras	2,55 - 5,79	80,26	62603	3371
Solo balsas de riego	0,3 - 0,69	9,38	7320	394

En el escenario más conservador, esto es, solamente empleando las balsas de riego, se observa que los beneficios en cuanto a la evaporación de agua evitada, así como en la creación de empleo en las tareas de operación y mantenimiento son destacables.

5. Conclusiones

Los sistemas de generación de energía renovable son la solución para promover una transición ecológica sostenible. Sin embargo, su implantación no está exenta de polémica, ya que implica desplazar el uso de terreno destinado al ámbito de la agricultura o la ganadería. Es en este contexto donde está surgiendo con mayor repercusión una cierta oposición social ya que la implantación de grandes plantas fotovoltaicas entra en conflicto con el uso tradicional del suelo.

De acuerdo con los resultados de estudios como el presentado en este artículo, es evidente que existen alternativas a la instalación de plantas fotovoltaicas tradicionales que hacen una ocupación de la tierra.

Existen numerosos estudios que contemplan este tipo de sistemas flotantes, pero sólo en grandes extensiones de agua, como embalses, que, si bien son una ubicación idónea, su instalación puede entrar en conflicto con el estado trófico del agua y otros usos (recreativo, pesquero, etc.). La instalación de sistemas fotovoltaicos flotantes aprovechando adicionalmente otras infraestructuras hídricas, como son las balsas de riego, evita a priori estas limitaciones, ya que estas superficies de agua no tienen otro uso que el de almacenar agua y tienen además un carácter más distribuido, como se refleja en los resultados del manuscrito. Esta característica permite una generación más cercana a los puntos de consumo, ya que o bien pueden servir para alimentar las bombas de agua que normalmente se utilizan en este tipo de instalaciones para el riego de zonas adyacentes, o bien se encuentran relativamente cerca de poblaciones que puedan consumir la energía generada o de industrias aceiteras.

Una vez identificado el potencial FPV, tanto en términos de potencia fotovoltaica como de electricidad, se considera necesario profundizar, pero desde una perspectiva de modelo de negocio, para realizar una comparación del coste de generación de electricidad producida por este tipo de sistemas, con el coste de las tarifas eléctricas.

Por tanto, en un escenario en el que los agricultores se enfrentan a un importante incremento de sus costes de producción, la alternativa de una fuente de energía renovable que sea capaz de competir con los precios del suministro eléctrico es una opción muy interesante, además que puede suponer un modelo de negocio alternativo, mediante la creación de cooperativas energéticas.

6. Referencias

- Agencia Andaluza de la Energía. (2024). *Info-Energía*. Junta de Andalucía. <http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/info-web/loginController>
- Alhejji, A., Kuriqi, A., Jurasz, J., & Abo-Elyousr, F. K. (2021). Energy Harvesting and Water Saving in Arid Regions via Solar PV Accommodation in Irrigation Canals. *Energies*, 14(9), 2620. <https://doi.org/10.3390/en14092620>
- Álvarez, C., & Zafra, M. (2021). Cuánto ocupan las megacentrales solares: investigadores alertan del impacto del 'boom' fotovoltaico. *El País*. <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2021-01-23/cuanto-ocupan-las-megacentrales-solares-investigadores-alertan-del-impacto-del-boom-fotovoltaico.html#>
- Aparicio, L. (2020). Los agricultores se frotan las manos 'plantando' paneles solares. *El País*.

<https://elpais.com/economia/2020-10-30/los-agricultores-se-frotan-las-manos-plantando-paneles-solares.html>

- Araque-Jiménez, E., Gallego Simón, V. J., & Sánchez Martínez, J. D. (2002). El Olivar Regado en la Provincia de Jaén. *Investigaciones Geográficas*, 28, 5–32. <https://www.redalyc.org/pdf/176/17602801.pdf>
- Bax, V., van de Lageweg, W. I., van den Berg, B., Hoosemans, R., & Terpstra, T. (2022). Will it float? Exploring the social feasibility of floating solar energy infrastructure in the Netherlands. *Energy Research & Social Science*, 89, 102569. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102569>
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Arto, I. (2017). Assessing vulnerabilities and limits in the transition to renewable energies: Land requirements under 100% solar energy scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 760–782. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>
- Dörenkämper, M., Wahed, A., Kumar, A., de Jong, M., Kroon, J., & Reindl, T. (2021). The cooling effect of floating PV in two different climate zones: A comparison of field test data from the Netherlands and Singapore. *Solar Energy*, 214, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.029>
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (n.d.). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc.ch/report/2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>
- Exley, G., Armstrong, A., Page, T., & Jones, I. D. (2021). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy*, 219, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>
- Fernández, L. (2023). *Global projection of floating solar PV installations 2031, by leading country*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/1396280/global-forecast-of-floating-pv-capacity-by-country/>
- Ferrer-Gisbert, C., Ferrán-Gozálvez, J. J., Redón-Santafé, M., Ferrer-Gisbert, P., Sánchez-Romero, F. J., & Torregrosa-Soler, J. B. (2013). A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs. *Renewable Energy*, 60, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.04.007>
- Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy*, 86(6), 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>
- Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2024). *Datos Espaciales de Referencia de Andalucía (DERA)*. https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/DERA/datos_espaciales.htm
- IRENA. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. www.irena.org/publications
- Jin, Y., Hu, S., Ziegler, A. D., Gibson, L., Campbell, J. E., Xu, R., Chen, D., Zhu, K., Zheng, Y., Ye, B., Ye, F., & Zeng, Z. (2023). Energy production and water savings from floating solar photovoltaics on global reservoirs. *Nature Sustainability*, 6(7), 865–874.

<https://doi.org/10.1038/s41893-023-01089-6>

- Kim, S.-M., Oh, M., & Park, H.-D. (2019). Analysis and Prioritization of the Floating Photovoltaic System Potential for Reservoirs in Korea. *Applied Sciences*, 9(3), 395. <https://doi.org/10.3390/app9030395>
- Kost, C. (2021). *Levelized Cost of Electricity- Renewable Energy Technologies*. <https://ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/cost-of-electricity.html>
- Kougias, I., Taylor, N., Kakoulaki, G., & Jäger-Waldau, A. (2021). The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>
- López, M., Soto, F., & Hernández, Z. A. (2022). Assessment of the potential of floating solar photovoltaic panels in bodies of water in mainland Spain. *Journal of Cleaner Production*, 340, 130752. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130752>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). *Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030*. <https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html>
- Osorio-Aravena, J. C., Frolova, M., Terrados-Cepeda, J., & Muñoz-Cerón, E. (2020). Spatial Energy Planning: A Review. *Energies*, 13(20), 5379. <https://doi.org/10.3390/en13205379>
- Padilha Campos Lopes, M., Nogueira, T., Santos, A. J. L., Castelo Branco, D., & Pouran, H. (2022). Technical potential of floating photovoltaic systems on artificial water bodies in Brazil. *Renewable Energy*, 181, 1023–1033. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.09.104>
- Paniza Cabrera, A., García Martínez, P., & Sánchez Martínez, J. D. (2015). Análisis de la expansión del olivar en la provincia de Jaén a través de fuentes cartográficas (1956-2007). *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 35(1), 119–137. https://doi.org/10.5209/rev_AGUC.2015.v35.n1.48966
- Peñalver, P., León, D., Casas, J., Fuentes-Rodríguez, F., Gallego, I., Juan, M., Sánchez, P., & Toja, Y. (2015). Las balsas agrícolas en Andalucía: una oportunidad para enlazar desarrollo y conservación en climas mediterráneos. *Chronica Naturae, ISSN-e 2253-6280, Nº. 5, 2015, Págs. 57-67, 67(5), 57–67*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5020312&info=resumen&idioma=SPA>
[%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5020312](https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5020312)
- Ram, M., Osorio-Aravena, J. C., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2022). Job creation during a climate compliant global energy transition across the power, heat, transport, and desalination sectors by 2050. *Energy*, 238, 121690. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>
- Red Eléctrica. (2023). *Informe del Sistema Eléctrico. Informe resumen de energías renovables*. <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables>
- Red Eléctrica. (2024). *Las renovables en el sistema eléctrico español*. <https://www.sistemaelectrico-ree.es/informe-de-energias-renovables>
- Redón Santafé, M., Torregrosa Soler, J. B., Sánchez Romero, F. J., Ferrer Gisbert, P. S., Ferrán Gozávez, J. J., & Ferrer Gisbert, C. M. (2014). Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs. *Energy*, 67, 246–255. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.01.083>
- REN21. (2021). *Renewables 2021. Global Status Report*. <https://doi.org/978-3-948393-03-8>
- Rudié, E., Thornton, A., Rajendra, N., & Kerrigan, S. (2014). System Advisor Model Performance Modeling Validation Report : Analysis of 100 sites. In *SAM Integration and Validation*. <https://s3.amazonaws.com/locus->

public/nrel/SAM_Validation_Report_final.pdf

- Serrano, D., Margalida, A., Pérez-García, J. M., Juste, J., Traba, J., Valera, F., Carrete, M., Aihartza, J., Real, J., Mañosa, S., Flaquer, C., Garin, I., Morales, M. B., Alcalde, J. T., Arroyo, B., Sánchez-Zapata, J. A., Blanco, G., Negro, J. J., Tella, J. L., ... Donázar, J. A. (2020). Renewables in Spain threaten biodiversity. *Science*, 370(6522), 1282–1283. <https://doi.org/10.1126/science.abf6509>
- Späth, L. (2018). Large-scale photovoltaics? Yes please, but not like this! Insights on different perspectives underlying the trade-off between land use and renewable electricity development. *Energy Policy*, 122, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.029>
- Tina, G., Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., & Rosa-Clot, P. (2018). Geographic and technical floating photovoltaic potential. *Thermal Science*, 22(Suppl. 3), 831–841. <https://doi.org/10.2298/TSCI170929017T>
- Unión Fotovoltaica Española (UNEF). (2023). *Informe Anual UNEF 2023*. <https://www.unef.es/es/recursos-informes?idMultimediaCategoria=18>
- World Bank, ESMAP, & SERIS. (2019). *Where Sun Meets Water*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/32804>
- Zhou, Y., Chang, F.-J., Chang, L.-C., Lee, W.-D., Huang, A., Xu, C.-Y., & Guo, S. (2020). An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies. *Applied Energy*, 275, 115389. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115389>

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

