

---

# HACIA LA AUTOSUFICIENCIA ENERGÉTICA EN LAS CIUDADES. ANÁLISIS DEL POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO A ESCALA URBANA EN EL PRINCIPADO DE ANDORRA

*Towards energy self-sufficiency in cities. Analysis of the solar photovoltaic potential at urban scale in the Principality of Andorra*  
*Rumo à auto-suficiência energética nas cidades. Análise do potencial solar fotovoltaico à escala urbana no Principado de Andorra*

---

Oriol Travesset-Baro<sup>1,2</sup> , Marc Vilella<sup>1</sup>  & Patricia Borges<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup> Observatori de la Sostenibilitat d'Andorra. Sant Julià de Lòria-Andorra. Correo: [otravesset@obsa.ad](mailto:otravesset@obsa.ad), [mvilella@obsa.ad](mailto:mvilella@obsa.ad), [pborges@obsa.ad](mailto:pborges@obsa.ad)

<sup>2</sup> Institut universitari de recerca en Ciència i Tecnologies de la Sostenibilitat. Universitat Politècnica de Catalunya. Correo: [oriol.travesset@upc.edu](mailto:oriol.travesset@upc.edu), [patricia.borges@upc.edu](mailto:patricia.borges@upc.edu)

Fecha de recepción: 10 de junio de 2021.

Fecha de aceptación: 27 de agosto de 2021.

## RESUMEN

**INTRODUCCIÓN.** Una parte importante de países y ciudades se han comprometido a la neutralidad de carbono en 2050. Incluso algunos van más allá y hablan de autosuficiencia energética en las ciudades. Ante estos retos mayúsculos, las energías renovables se presentan como una de las opciones principales a tener en cuenta. Conocer su potencial a gran escala es el primer paso para conseguir una implantación masiva. **OBJETIVO.** Este artículo describe un caso de estudio en el que se analiza el potencial de generación eléctrica a escala de país mediante sistemas fotovoltaicos instalados en los tejados de los edificios. **MÉTODO.** Para ello se utiliza una metodología que combina Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos LiDAR (*Lighting Detection And Ranging*). **RESULTADOS.** Los resultados muestran que, con la instalación de sistemas fotovoltaicos en prácticamente la totalidad de los edificios del país, se cubriría el 48% de la demanda eléctrica actual. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.** A pesar de que el potencial estimado es significativo, una reflexión profunda sobre los resultados lleva a pensar que la autosuficiencia energética en un contexto urbano es difícilmente viable. De todas maneras, análisis como el presentado en este estudio son de vital importancia para dar apoyo a





la definición de políticas que conduzcan a países y ciudades a cumplir con sus objetivos en materia energética y de cambio climático.

**Palabras claves:** Energía, autosuficiencia, potencial solar, Andorra.

## ABSTRACT

**INTRODUCTION.** A significant number of countries and cities have committed to carbon neutrality by 2050. Some even go further and talk about energy self-sufficiency in cities. In the face of these major challenges, renewable energies are one of the main options to take into account. Knowing their potential on a large scale is the first step towards mass implementation. **OBJECTIVE.** This article describes a case study in which the potential for electricity generation on a country scale using photovoltaic systems installed on the roofs of buildings is analyzed. **METHOD.** A methodology combining Geographic Information Systems (GIS) and LiDAR (Lighting Detection And Ranging) data is used. **RESULTS.** The results show that, with the installation of photovoltaic systems on practically all the buildings in the country, 48% of the current electricity demand would be covered. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS.** Although the estimated potential is significant, a thorough reflection on the results leads to think that energy self-sufficiency in an urban context is hardly feasible. In any case, analyses such as the one presented in this study are of vital importance to support the definition of policies that lead countries and cities to meet their energy and climate change objectives.

**Keywords:** Energy, self-sufficiency, solar potential, Andorra

## RESUMO

**INTRODUÇÃO.** Um número significativo de países e cidades comprometeram-se com a neutralidade de carbono até 2050. Alguns vão mesmo mais longe e falam de auto-suficiência energética nas cidades. Face a estes grandes desafios, as energias renováveis são uma das principais opções a ter em conta. Conhecer o seu potencial em grande escala é o primeiro passo para se conseguir uma implementação massiva. **OBJECTIVO.** Este trabalho descreve um estudo de caso em que é analisado o potencial de produção de electricidade à escala nacional através de sistemas fotovoltaicos instalados nos telhados dos edifícios. **MÉTODO.** Para este fim, utiliza-se uma metodologia que combina dados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e LiDAR (*Lighting Detection And Ranging*). **RESULTADOS.** Os resultados mostram que, com a instalação de sistemas fotovoltaicos em praticamente todos os edifícios no país, 48% da procura actual de electricidade seria coberta. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.** Embora o potencial estimado seja significativo, uma reflexão profunda sobre os resultados leva a pensar que a auto-suficiência energética num contexto urbano é dificilmente viável. Em qualquer caso, análises como a apresentada neste estudo são de importância vital para apoiar a definição de políticas que levem os países e as cidades a cumprir os seus objectivos em matéria de energia e alterações climáticas.

**Palavras-chave:** Energia, auto-suficiência, potencial solar, Andorra





## INTRODUCCIÓN

Las ciudades consumen aproximadamente el 65% de la energía a nivel global y son responsables del 70% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. Actualmente son hogar del 55% de la población mundial [2] y, se estima que, este valor puede llegar al 60% en el año 2030 [3].

Existe prácticamente un consenso a nivel mundial de la necesidad de conseguir el objetivo de llegar a la neutralidad del carbono el año 2050. La Unión Europea, el Reino Unido, Japón, la República de Corea y más de 110 países se han comprometido a hacerlo. También lo ha hecho la administración entrante de Estados Unidos y China se ha comprometido a conseguirlo antes de 2060 [4].

Este contexto exige que todos los países y ciudades adopten planes para alcanzar el objetivo de cero emisiones. En paralelo a otras medidas, se espera que las energías renovables contribuyan en gran medida a abordar este reto [2]. El movimiento hacia el 100% de energía renovable en las ciudades, entendido en la mayoría de casos como 100% de electricidad renovable, está ganando terreno en los últimos años. En todo el mundo, 617 ciudades han establecido objetivos de conseguir el 100% de uso de electricidad renovable en el conjunto de la ciudad o, en algunos casos, se ha limitado a las operaciones municipales [2]. Incluso algunas ciudades, como Barcelona, han planteado llegar a ser autosuficientes energéticamente en el año 2050 [5]. En el caso de las zonas urbanas, buena parte de las opciones de introducción de energías renovables identificadas pasan por el aprovechamiento de los tejados de los edificios.

Los sistemas solares fotovoltaicos en los tejados han demostrado su capacidad para convertir barrios residenciales y comerciales en zonas de generación de energía distribuida [6], [7]. Las zonas urbanas ofrecen una gran cantidad de tejados sin utilizar con un importante potencial de generación de energía. Grandes ciudades como Barcelona, Boston o Nueva York han caracterizado las azoteas de sus edificios para estimar el potencial de generación de energía fotovoltaica y han publicado los resultados en aplicaciones web públicas para animar a los ciudadanos a instalar estos sistemas [8].

Los métodos desarrollados para estimar el potencial fotovoltaico de los tejados van desde simples multiplicadores de la superficie total del edificio, hasta métodos que emplean complejos sistemas de información geográfica (SIG) o modelos tridimensionales (3D). A diferencia de los métodos simples, los modelos tridimensionales basados en SIG son más detallados y pueden reproducirse en varias regiones. Sin embargo, estos métodos, especialmente cuando combinan SIG y datos LiDAR (*Lighting Detection And Ranging*) requieren de mucho tiempo y recursos informáticos [9]. Más recientemente se han desarrollado metodologías que incorporan el uso de algoritmos de *machine learning*. Estos métodos, a pesar de ser menos precisos que los basados en LiDAR, son menos costosos computacionalmente por lo que permiten cubrir áreas geográficas más extensas [10].





Este artículo describe un caso de estudio en el que se analiza el potencial de generación eléctrica a escala de país mediante sistemas fotovoltaicos instalados en los tejados de los edificios. El análisis se centra en el Principado de Andorra, un pequeño país europeo ubicado entre Francia y España. Andorra tiene una población cercana a los 80000 habitantes y una superficie de 468 km<sup>2</sup>. Su localización, en medio de los Pirineos, hace que las montañas de su alrededor provoquen sombras que reducen el potencial solar. El análisis realizado en este artículo se basa en la combinación de SIG y datos LiDAR para representar de forma precisa las zonas urbanas y la orografía influyente en la generación de sombras.

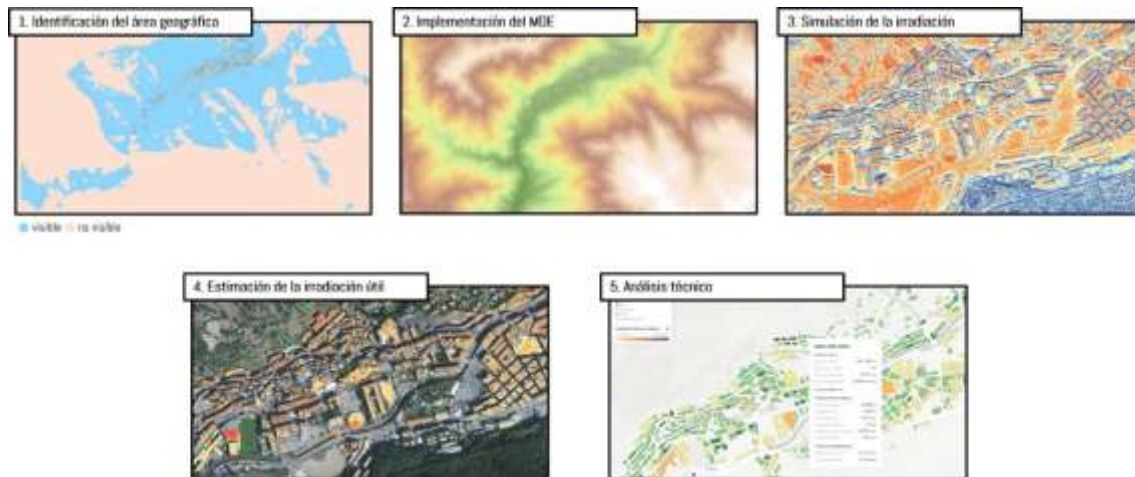
Los resultados obtenidos son específicos para el Principado de Andorra, pero pueden servir de referencia para otras zonas, especialmente en regiones de montaña que no dispongan de los recursos para realizar un análisis basado en SIG y LiDAR.

## MÉTODO

Uno de los aspectos clave en el análisis del potencial solar es la caracterización del terreno mediante modelos digitales de elevación (MDE). A diferencia de otros estudios también centrados en el ámbito urbano [11]–[13] pero ubicados en zonas planas, la influencia de la orografía en zonas montañosas es determinante en la obtención de los resultados finales [14]. En este sentido, es importante caracterizar adecuadamente las montañas para poder representar las sombras que éstas provocan y, en consecuencia, la limitación provocada en el número de horas de insolación que se obtienen en la zona de estudio.

En el caso de Andorra, para representar el terreno, se parte de un MDE de resolución 15x15 m [15], adecuado para captar el efecto de las montañas sobre la irradiación pero insuficiente para representar los tejados de los edificios. Así pues, para representar de forma acurada los edificios, es necesario trabajar en resoluciones superiores, que obligan a gestionar archivos muy pesados. Para evitar simulaciones muy costosas, se ha dividido el territorio de Andorra en diferentes zonas de estudio. Es importante limitar al máximo la zona de estudio, pero asegurándose de incluir en el MDE el área suficiente que permita captar el efecto de la orografía. La Figura 1 presenta un diagrama que resume la metodología desarrollada para realizar el análisis de aprovechamiento fotovoltaico en los tejados de los edificios de Andorra.





**Figura 1.** Metodología de análisis de potencial solar en edificios a gran escala

A continuación, se detallan las distintas fases del proceso realizado.

### Identificación del área geográfica

Con el objetivo de evitar simulaciones muy costosas, el primer paso consiste en dividir el territorio en diferentes zonas. En el caso de Andorra, la zonificación consiste en siete zonas con sus respectivos edificios y MDE. A pesar de la importancia de acotar las zonas de estudio, es importante tener en cuenta que el terreno representado debe incluir el área suficiente para tener en cuenta las sombras provocadas por la orografía.

El área de interés a considerar en el MDE se ha determinado mediante el método *viewshed*, el cual permite identificar las zonas del terreno con visión directa respecto a uno o varios puntos (edificios). De esta manera, y teniendo en cuenta la trayectoria solar, se obtiene la zona a incluir en el MDE teniendo en cuenta tanto el terreno como los edificios. El punto 1 de la Figura 1 muestra el *viewshed* de la *Vall Central* con el que se ha delimitado esta zona de estudio. El color azul representa el área visible desde los observadores (puntos rojos) ubicados en edificios representativos de la zona en análisis.

### Implementación del MDE

Basándose en los límites establecidos previamente, se construye el MDE de alta resolución representando los edificios y la orografía del terreno de forma precisa. Aunque un MDE de resolución 15x15 m es suficiente para representar la orografía, las infraestructuras urbanas requieren una resolución mayor. En este modelo se utilizan datos LiDAR con una densidad de 1 punto/m<sup>2</sup> [16] con los que se ha construido un MDE de 1x1 m de resolución, el mínimo para representar de forma acurada características de los tejados como el pendiente, la orientación o estructuras adyacentes y vegetación [17]. El punto 2 de la Figura 1 muestra el MDE de la zona *Vall Central*, representando tanto las edificaciones de la zona urbana con las montañas que provocan sombras.



## Simulación de la irradiación

Para calcular la insolación de las áreas de estudio se ha utilizado la herramienta *Solar Analyst* de ArcGIS [18]. Esta estimación del valor de irradiación en cada celda del MDE tiene en cuenta la trayectoria solar en la zona estudiada, así como las sombras provocadas por el resto de celdas del modelo.

La disponibilidad de datos históricos de producción de las instalaciones fotovoltaicas existentes ha permitido ajustar los parámetros de simulación para representar con mayor precisión las condiciones de Andorra. A partir de la producción del año 2020 de 20 instalaciones fotovoltaicas, se ha ajustado la transmisividad. Esta es una propiedad de la atmósfera que se expresa como la relación entre la energía (medida en todas las longitudes de onda) que llega a la superficie de la tierra en relación con la que se recibe en el límite superior de la atmósfera (extraterrestre). Los valores varían de 0 (sin transmisión) a 1 (transmisión completa). Habitualmente se observan valores de 0,6 o 0,7 para condiciones de cielo muy claro y 0,5 para un cielo generalmente claro. En el caso de Andorra, el valor que minimiza el diferencial entre las horas solar pico (HSP) anuales simuladas y las reales es 0,55. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros de simulación aplicados a las zonas del país consideradas.

**Tabla 1.** Valores de los parámetros utilizados en las simulaciones

|                               |                             |
|-------------------------------|-----------------------------|
| <i>Time configuration</i>     | <i>Whole year</i>           |
| <i>Year</i>                   | 2020                        |
| <i>Hour interval</i>          | 1                           |
| <i>Sky size resolution</i>    | 200                         |
| <i>Calculation directions</i> | 32                          |
| <i>Zenith divisions</i>       | 8                           |
| <i>Azimuth divisions</i>      | 8                           |
| <i>Diffuse model type</i>     | <i>Uniform overcast sky</i> |
| <i>Diffuse proportion</i>     | 0,3                         |
| <i>Transmittivity</i>         | 0,55                        |

Calculando las diferencias entre las simulaciones de HSP y las reales, se observa que las mayores sobreestimaciones y subestimaciones son del 15,3% y del -17,1%, respectivamente. Teniendo en cuenta toda la muestra, de promedio, las simulaciones sobrestiman las HSP en un 0,35%.

## Estimación de la irradiación útil

A continuación de simular la irradiación anual en la totalidad del terreno que incluye la zona de estudio, se extrae la irradiación de interés mediante una capa vectorial de edificios. A la irradiación anual simulada en los edificios, se ha aplicado un conjunto de filtros que permiten identificar la superficie aprovechable de cada tejado junto con la irradiación útil a utilizar en hipotéticas instalaciones fotovoltaicas futuras. Los umbrales



mínimos de irradiación establecidos, de pendiente máxima y de orientación se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Filtros aplicados en la identificación del área e irradiación útil (\*filtro aplicado únicamente en pendientes superiores a 15°)

|   |
|---|
| <b>Irradiación</b> $\geq 1200$ kWh/m <sup>2</sup> ·any                    |
| <b>Pendiente</b> $\leq 80^\circ$  |
| <b>337,5° <math>\geq</math> Orientación* <math>\geq 22,5^\circ</math></b> |

El punto 4 de la Figura 1 muestra la irradiación y las áreas aprovechables de los tejados de los edificios de una pequeña parte de la zona de estudio.

### Análisis técnico

La metodología para estimar el potencial de aprovechamiento fotovoltaico se basa en el cálculo de la conversión de la irradiación útil anual recibida en cada tejado en el potencial de generación de electricidad. En paralelo a la producción estimada, se calculan también diferentes indicadores económicos (costes de inversión y explotación, ingresos, período de retorno de la inversión y beneficios) y medioambientales (ahorro de emisiones de CO<sub>2</sub> y equivalencia de la producción en número de viviendas). En la integración de los cálculos económicos se ha tenido en cuenta la subvención en la inversión inicial proporcionada por el programa Renova 2021 [19], enfocado a promover la eficiencia energética y la implantación de energías renovables en los edificios. Las características técnicas y los costes económicos de las instalaciones se han establecido en base al criterio de la empresa SUD Pirineus S.L. y la Oficina de la Energía y del Cambio Climático de Andorra. La Tabla 3 presenta los parámetros técnicos y económicos considerados en los cálculos.

**Tabla 3.** Parámetros técnicos y económicos considerados en los cálculos (\*incluye mantenimiento, seguro y compensación a las distribuidoras eléctricas)

|   |                       |             |
|---|-----------------------|-------------|
| <b>Paneles fotovoltaicos</b>                        | 1,8 m <sup>2</sup>    | 380 Wp      |
| <b>Eficiencia de las instalaciones</b>              | 83%                   |             |
| <b>Tiempo de vida de las instalaciones</b>          | 25 años               |             |
|   | <b>Potencia (kWp)</b> | <b>€/Wp</b> |
|   | P $\leq$ 2            | 1,50        |
|   | 2>P $\leq$ 6          | 1,30        |
| <b>Coste de las instalaciones</b>                   | 6>P $\leq$ 20         | 1,15        |
|   | 20>P $\leq$ 50        | 1,10        |
|   | P>50                  | 1,00        |
| <b>Coste de operación* P<math>\leq</math>50 kWp</b> | 25                    | €/kWp·año   |
| <b>Coste de operación* P&gt;50 kWp</b>              | 18                    | €/kWp·año   |

Los ingresos por inyección a la red de la electricidad generada se calculan en base al precio actual de la Tarifa C (0,0853 €/kWh) asumiendo un incremento de un 1,5% anual. El ahorro aportado por la electricidad autoconsumida se calcula en base a un precio de 0,10 €/kWh teniendo en cuenta el precio actual de la *Tarifa Blava Doméstica* y una familia tipo de cuatro personas. En este caso, el incremento del precio durante el tiempo de vida de las instalaciones se establece también en un 1,5% anual.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> anuales evitadas por las instalaciones fotovoltaicas se calculan teniendo en cuenta el factor de emisiones del mix eléctrico andorrano (124 gCO<sub>2</sub>eq/kWh) [20]. La equivalencia de la producción en número de viviendas se calcula teniendo en cuenta el consumo eléctrico medio anual de una vivienda en Andorra (5768 kWh el año 2019).

## RESULTADOS

### Potencial de generación

La zona de estudio analizada incluye los tejados de un total de 11109 edificios, de los cuales se han excluido 324 por tener actualmente usos incompatibles con la instalación de paneles fotovoltaicos. La superficie de los tejados compatibles con instalaciones fotovoltaicas asciende a 2,38 km<sup>2</sup>, resultando en una superficie promedio de tejado de 220 m<sup>2</sup>. Después de aplicar los filtros para determinar la irradiación útil (ver Tabla 2), 1374 edificios han sido descartados por no disponer de superficie suficiente para una instalación fotovoltaica que cumpla los criterios de irradiación, pendiente y orientación, previamente establecidos. La superficie útil promedio de las instalaciones identificadas es de 116 m<sup>2</sup> y su irradiación útil promedio de 1382 kWh/m<sup>2</sup>.

El potencial de generación fotovoltaica en los tejados del Principado de Andorra se estima en 266 GWh con una potencia instalable de 229 MWp.

La Tabla 4 presenta los resultados desagregados para las distintas regiones del Principado de Andorra.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos en las siete parroquias del Principado de Andorra

|  | Canillo | Encamp | Ordino | La Massana | A. la Vella | St. Julià de Lòria | Escaldes-Engordany |
|--|---------|--------|--------|------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Número de edificios                        | 1184    | 1514   | 1054   | 2222       | 1823        | 1655               | 1333               |
| Número de instalaciones                    | 1087    | 1288   | 954    | 1954       | 1595        | 1356               | 1177               |
| Superficie (km <sup>2</sup> )              | 0,26    | 0,34   | 0,17   | 0,37       | 0,60        | 0,33               | 0,31               |
| Superficie útil (km <sup>2</sup> )         | 0,14    | 0,17   | 0,07   | 0,16       | 0,29        | 0,13               | 0,13               |
| Irradiación promedio (kWh/m <sup>2</sup> ) | 1444    | 1417   | 1386   | 1389       | 1353        | 1347               | 1368               |
| Potencial fotovoltaico (GWh)               | 35      | 44     | 17     | 40         | 68          | 31                 | 32                 |

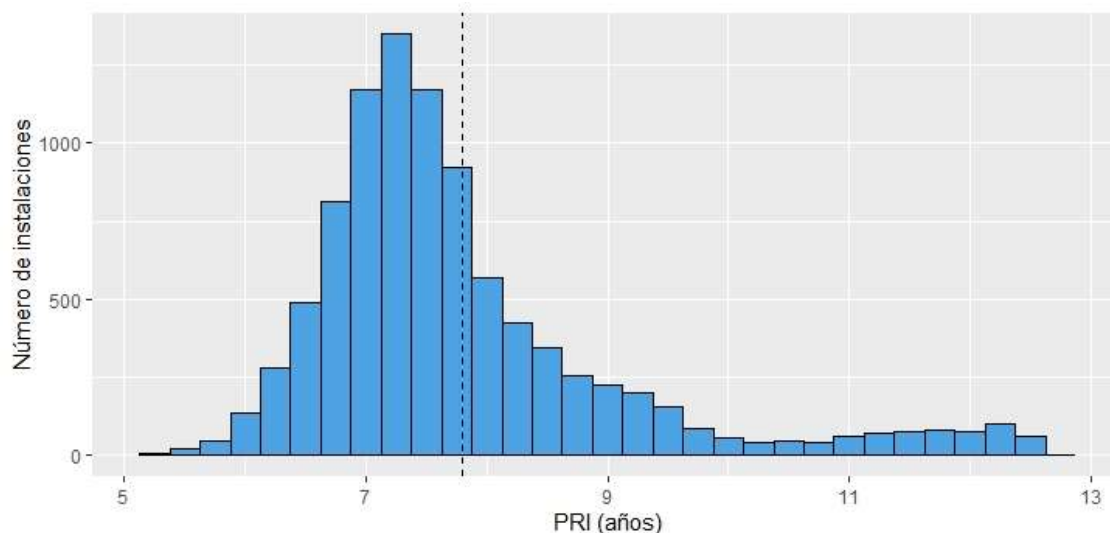


Comparando los resultados obtenidos con el consumo final de electricidad del conjunto del Principado de Andorra (555 GWh el año 2019), observamos que, aprovechando la totalidad del potencial fotovoltaico de los tejados del país, se podría cubrir el 48% de la demanda eléctrica actual.

El ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero teniendo en cuenta el mix eléctrico actual sería de 32954 tCO<sub>2</sub>eq/año, el 6,3% de las emisiones anuales del país [21].

### Rentabilidad económica de las instalaciones

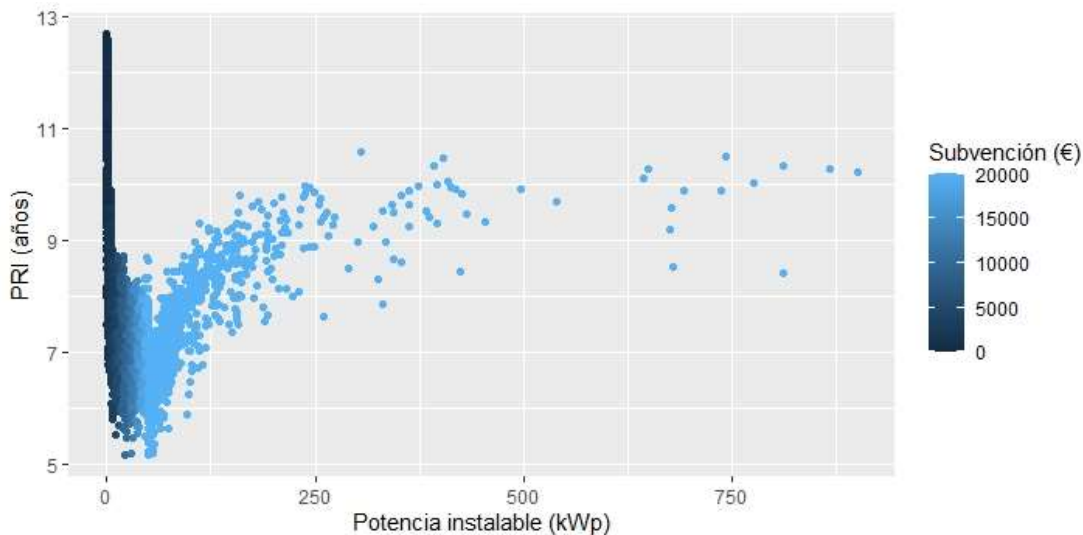
La rentabilidad económica de las instalaciones se ha estudiado teniendo en cuenta el coste de inversión, la subvención, el coste de operación y los ingresos por la inyección de electricidad a la red durante el tiempo de vida de estas. Considerando que el 100% de la electricidad generada es inyecta a la red, el período de retorno de la inversión (PRI) promedio de las instalaciones analizadas es 7,8 años. Tal como se observa en la Figura 2, los PRI's de las instalaciones se encuentran en un rango entre los 5 y los 13 años.



**Figura 2.** Distribución de frecuencias de los PRI's de las instalaciones identificadas

Situándonos en un escenario de 100% autoconsumo, el PRI promedio de las instalaciones analizadas descendería hasta los 6,4 años.

La subvención proporcionada por el programa Renova 2021, limita la ayuda a 20000 € y a un 40% del coste total de la instalación. Este aspecto favorece a las instalaciones de pequeña potencia que, por contra, tienen un coste nominal (€/Wp) superior. Ambos factores, tal como se observa en la Figura 3, provocan que las instalaciones con PRI's más bajos son las que se encuentran alrededor de los 50 kWp.



**Figura 3.** Relación entre la potencia instalable, el PRI y la subvención

Por el contrario, los valores más altos de PRI se encuentran en las instalaciones de mayor potencia y especialmente en las inferiores a 2 kWp.

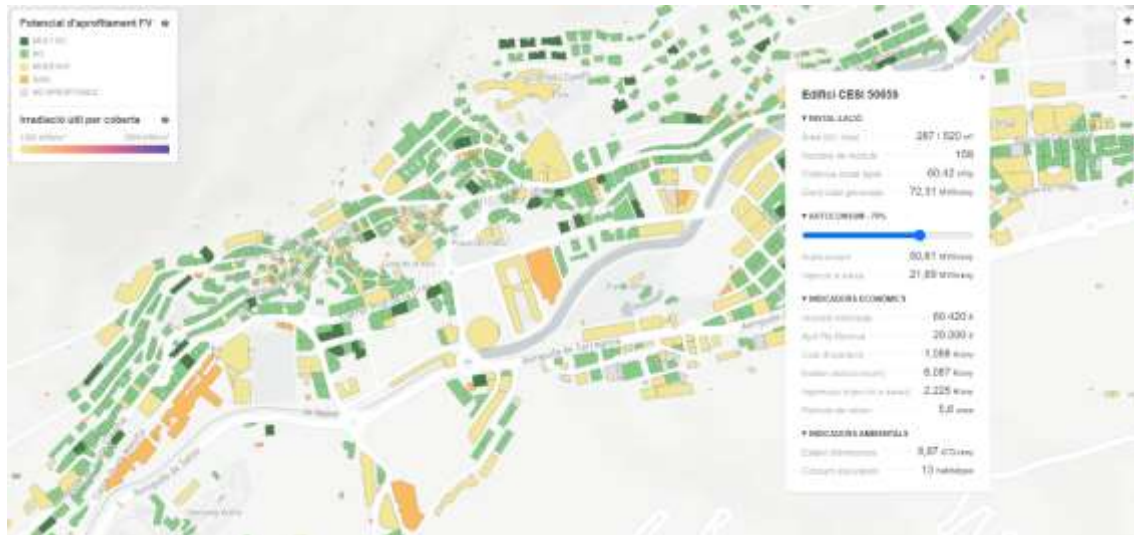
### Plataforma de divulgación

Como fase final del estudio realizado a escala de país, se ha desarrollado una plataforma web destinada a la ciudadanía y a los profesionales del sector con el objetivo de promover la implantación de la energía solar fotovoltaica a gran escala. La plataforma [potencial.solar](http://potencial.solar) presenta dos capas cartográficas que proporcionan información a distintas escalas espaciales.

La capa *Potencial d'aprofitament fotovoltaic*, presentada en la Figura 4, presenta la información agrupada a escala de edificio e incluye los indicadores económicos y ambientales. A nivel visual, los edificios se categorizan según su potencial de aprovechamiento (ver Tabla 5), teniendo en cuenta el PRI calculado. Los edificios categorizados como *No aprofitable* (no aprovechables) son aquellos en los que una vez aplicados los filtros descritos en la Tabla 2, no disponen de superficie útil para instalar un solo módulo fotovoltaico.

**Tabla 5.** Umbrales considerados en la categorización (PRI en años)

|                  |                |
|------------------|----------------|
| <b>Muy bueno</b> | PRI < 6,5      |
| <b>Bueno</b>     | 6,5 <= PRI < 8 |
| <b>Moderado</b>  | 8 <= PRI < 10  |
| <b>Bajo</b>      | PRI >= 10      |



**Figura 4.** Visualización interactiva del potencial de aprovechamiento fotovoltaico (<https://www.potencial.solar/>)

La capa *Irradiació útil per coberta*, mostrada en la Figura 5, presenta la información a escala de tejado e incluye información sobre la irradiación media y la instalación potencial en los distintos tejados de un edificio. El nivel de detalle aportado en esta capa puede ser de gran utilidad para identificar las mejores zonas a utilizar en cada edificio.



**Figura 5.** Visualización interactiva de la irradiación útil en los tejados (<https://www.potencial.solar/>)

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Uno de los resultados principales de este estudio muestra cómo, mediante la instalación de sistemas fotovoltaicos en los tejados de los edificios, Andorra podría cubrir el 48% de la demanda eléctrica actual. Este valor está en línea con el obtenido en otros estudios con

metodologías similares, 56% en Ludwigsburg (Alemania) [22], 67% en Bardejov (Eslovaquia) [23] y 48% en un barrio de Lisboa (Portugal) [11]. Tampoco difiere en exceso del obtenido en estudios con metodologías que incorporan *machine learning*, 25,3% en Suiza o 38,6% en Estados Unidos [10].

A pesar de que el potencial estimado es significativo, sin una reducción considerable de la demanda, la autosuficiencia energética en el contexto urbano es difícilmente viable. Hay que tener en cuenta que, en el caso de Andorra, la electricidad representa poco más del 20% del consumo final de energía [24], por lo que, en todo caso, siendo optimistas podríamos aspirar a la autosuficiencia eléctrica. Independientemente del potencial estimado, análisis como el presentado en este estudio son de vital importancia para dar apoyo a la definición de políticas que conduzcan a países y ciudades a cumplir con sus objetivos en materia energética y de cambio climático. También se han demostrado como herramientas potentes para fomentar la aceptación e interés de esta tecnología por parte de la ciudadanía.

Aunque este trabajo ya incorpora filtros bastante restrictivos en la identificación del área e irradiación útil a emplear en hipotéticas instalaciones fotovoltaicas (ver Tabla 2), cuando comparamos los resultados con instalaciones ya existentes, se observa que el ajuste de la insolación simulada es muy bueno, pero las instalaciones propuestas por este estudio son generalmente de mayor potencia que las implementadas en la realidad. Esto es debido a los condicionantes económicos que buscan maximizar el rendimiento tendiendo a implementar instalaciones más pequeñas.

A nivel metodológico, la propuesta planteada en este artículo es exigente en cuanto al acceso a datos históricos de producción fotovoltaica para ajustar los parámetros de simulación a las condiciones de la zona de estudio, la disponibilidad de cartografía SIG detallada de los edificios y datos LiDAR.

El ajuste realizado con datos históricos es una de las mejoras de este estudio, pero aflora también una limitación. Por motivos de disponibilidad de datos históricos de producción fotovoltaica, el ajuste se ha realizado en base a los datos de una de las zonas (Vall Central) y el valor obtenido del parámetro transmisividad se ha aplicado en las simulaciones del resto del país. Esta simplificación provoca que no se tengan en cuenta las particularidades específicas de ciertas zonas (p.ej., períodos mayores de nubosidad). Debido a las dimensiones y condiciones climáticas de Andorra, este aspecto no se prevé crítico, aunque puede tener importancia en una de las zonas (Pas de la Casa, ubicada al extremo noreste del país).

Entre el trabajo futuro previsto en esta línea de investigación, destaca la voluntad de realizar un ajuste específico de los parámetros para cada una de las zonas a medida que la disponibilidad de datos históricos lo permita. En paralelo, es de especial interés, ampliar el análisis a otras escalas temporales (p.ej., mensual, diario) para poder estudiar la estacionalidad del recurso y compararlo con la demanda eléctrica.





## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Obra no financiada.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran la no presencia de conflicto de intereses.

## APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

A pesar de que la metodología utilizada en este trabajo es similar a la de estudios previos, este representa el primer análisis realizado a escala de país combinando datos SIG i LiDAR. La metodología propuesta incorpora como novedad una adaptación que la hace especialmente útil para zonas de montaña y un ajuste de los parámetros de simulación a partir de los datos reales de las instalaciones fotovoltaicas existentes.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Oriol Travesset-Baro ha coordinado la definición de la metodología y los trabajos de ajuste y simulación. Patricia Borges ha estado involucrada en la preparación de la cartografía y en la revisión bibliográfica. Por último, Marc Vilella ha desarrollado la plataforma web de divulgación destinada a la ciudadanía y a los profesionales del sector.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Oficina de la Energía y del Cambio Climático de Andorra y al Departamento de Cartografía del Gobierno de Andorra haber proporcionado la cartografía, los datos históricos de producción fotovoltaica y los datos LiDAR imprescindibles para la realización de este estudio.

## REFERENCIAS

- [1] IRENA, "Renewable energy in cities, International Renewable Energy Agency (IRENA)," Abu Dhabi, 2016.
- [2] REN21, "Renewables in Cities. 2021 Global Status Report," 2021.
- [3] E. O. Shaughnessy *et al.*, "Estimating the National Carbon Abatement Potential of City Policies: A Data-Driven Approach," 2016.
- [4] United Nations, "Carbon Neutrality by 2050: the World's Most Urgent Mission," 2020. [Online]. Available: <https://www.un.org/sg/en/content/sg/articles/2020-12-11/carbon-neutrality-2050-the-world's-most-urgent-mission>. [Accessed: 02-Jun-2021].
- [5] Energy Cities, "Barcelona, towards energy self-sufficiency by 2050," 2016. [Online]. Available: <https://energy-cities.eu/publication/cities-heading-towards-100-renewable-energy-by-controlling-their-consumption/>. [Accessed: 21-Jul-2020].



- [6] T. James, A. Goodrich, M. Woodhouse, R. Margolis, and S. Ong, "Building-Integrated Photovoltaics (BIPV) in the Residential Sector: An Analysis of Installed Rooftop System Prices," Golden, 2011.
- [7] M. Barrier and L. Irvine, "Solar PV for Multifamily Affordable Housing in Seattle," 2015.
- [8] Ajuntament de Barcelona, "Mapa: ¿Cuánta energía puedes generar?," 2018. [Online]. Available: <https://energia.barcelona/es/mapa-cuanta-energia-puedes-generar>. [Accessed: 03-Jun-2021].
- [9] J. Melius, R. Margolis, and S. Ong, "Estimating Rooftop Suitability for PV: A Review of Methods, Patents, and Validation Techniques," no. December, p. 35, 2013.
- [10] A. A. A. Gassar and S. H. Cha, "Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales," *Applied Energy*, vol. 291, no. April, p. 116817, 2021.
- [11] M. Brito, N. Gomes, T. Santos, and J. Tenedório, "Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LiDAR data," *Solar Energy*, vol. 86, pp. 283–288, 2012.
- [12] M. Cellura, a. Di Gangi, S. Longo, and a. Orioli, "Photovoltaic electricity scenario analysis in urban contexts: An Italian case study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2041–2052, 2012.
- [13] P. Redweik, C. Catita, and M. Brito, "Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape," *Solar Energy*, vol. 97, pp. 332–341, 2013.
- [14] O. Travesset-Baro, G. Francisco, M. Vilella, and M. Pons, "Building rooftops photovoltaic potential in mountainous regions: a case study from the Pyrenees," in *33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, 2017, pp. 2511–2514.
- [15] Govern d'Andorra, "Mapa topogràfic d'Andorra. Escala: 1:5000. Corbes de nivell a interval de 25 m. Material cedit pel Ministeri d'Economia i Territori." 2003.
- [16] Govern d'Andorra, "Nuve de puntos LiDAR de Andorra," 2018. [Online]. Available: <http://www.ideandorra.ad/geodades/index.jsp?pog=lidar2018laz>. [Accessed: 21-Jul-2020].
- [17] J. B. Kodysh, O. A. Omitaomu, B. L. Bhaduri, and B. S. Neish, "Methodology for estimating solar potential on multiple building rooftops for photovoltaic systems," *Sustainable Cities and Society*, vol. 8, pp. 31–41, 2013.
- [18] P. Fu and P. M. Rich, "Design and Implementation of the Solar Analyst: an ArcView Extension for Modeling Solar Radiation at Landscape Scales," *19th Annual ESRI User Conference*, pp. 1–24, 1999.
- [19] Govern d'Andorra, "Edicte del 27-1-2021 pel qual es fa pública l'obertura de la convocatòria dels ajuts del programa Renova per a la millora del parc immobiliari nacional, la millora de l'eficiència energètica dels edificis i l'ús de les energies renovables per al 2021." pp. 1–4, 2021.



- [20] Govern d'Andorra, "Decret del 29-1-2020 pel qual s'aprova el Reglament de la qualificació de l'eficiència energètica en l'edificació." pp. 1–42, 2020.
- [21] Govern d'Andorra, "Troisième Rapport Bisannuel à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)," Andorra la Vella, 2019.
- [22] L. Romero Rodríguez, E. Duminil, J. Sánchez Ramos, and U. Eicker, "Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach," *Solar Energy*, vol. 146, pp. 264–275, 2017.
- [23] J. Hofierka, "Assessment of photovoltaic potential in urban areas using open-source solar radiation tools," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2206–2214, 2009.
- [24] O. Travesset-Baro, "Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista," *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*, Sep. 2017.



## NOTA BIOGRÁFICA



Oriol Travesset-Baro. **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0001-9997-9789>

Es investigador en el Observatorio de la Sostenibilidad de Andorra (OBSA). Es ingeniero de telecomunicaciones y doctor en ciencia y tecnologías de la sostenibilidad por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Sus investigaciones recientes se han centrado principalmente en explorar cómo el Principado de Andorra puede avanzar hacia un sistema energético más sostenible. Sus principales intereses de investigación incluyen la modelización de sistemas energéticos, la planificación energética, las energías renovables y la movilidad sostenible.



Marc Vilella. **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0002-5838-7645>

Es desarrollador en el Observatorio de la Sostenibilidad de Andorra. Obtuvo su grado en Ingeniería de Telecomunicaciones por la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) y una maestría en automatización por La Salle – Universitat Ramon Llull (URL). Su línea de trabajo se centra en el desarrollo de interfaces de interacción y visualización de datos.



Patricia Borges. **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0002-4447-2822>

Es investigadora en el Observatorio de la Sostenibilidad de Andorra (OBSA). Obtuvo su grado en Ingeniería de la Edificación, y tiene una maestría en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Actualmente es doctoranda del programa de Sostenibilidad de la UPC, y sus principales líneas de investigación son la edificación y la energía.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.



Travesset-Baro, Vilella & Borges. Hacia la autosuficiencia energética en las ciudades. análisis del potencial solar fotovoltaico a escala urbana en el principado de andorra.  
Julio – Diciembre 2021

<http://dx.doi.org/10.33210/ca.v10i3.369>

