

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL PARA LA HIBRIDACIÓN EÓLICA-FOTOVOLTAICA EN ESPAÑA: UNA APROXIMACIÓN BASADA EN SIG

Domínguez, J., Arribas, L., Martín, A. M., Navarro, J., Zarzalejo, L. F., Cruz, I.

Departamento de Energía, CIEMAT, Avenida Complutense 40, 28040, Madrid, España, javier.dominguez@ciemat.es



INTRODUCCIÓN

La transición energética lleva implícita el desarrollo de grandes infraestructuras tanto de generación como de distribución de electricidad.

La ocupación del territorio y las necesidades de infraestructuras de evacuación son aspectos fundamentales en este desarrollo

La hibridación de grandes plantas eólicas y fotovoltaicas puede tener un impacto positivo, disminuyendo la competencia por los usos del suelo y optimizando el aprovechamiento de las infraestructuras energéticas.

MEDIDAS PLAN DE INVERSIONES Y REFORMAS PARA LA RECUPERACIÓN ECONÓMICA

- Componente 1.15. Inversión. CIEMAT Nuevas tecnologías renovables híbridas. Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Objetivo: La creciente implantación de fuentes de energía renovables variables, obliga a buscar estrategias que garanticen su flexibilidad y gestionabilidad de la forma más competitiva posible, además de ofrecer mayor fiabilidad a la red eléctrica del futuro, aprovechando las ventajas que aporta la hibridación de las distintas tecnologías de generación renovable en la operación del sistema.



OBJETIVO DE LA MEDIDA

Medida 1: Desarrollo de un mapa nacional de capacidad de hibridación de energías renovables

A partir del mapa solar y eólico de España, del mapa de zonificación ambiental para las energías renovables realizados por MITERD y de la capacidad de evacuación de la red eléctrica, se pretende elaborar un mapa de potencial de hibridación para el territorio nacional.

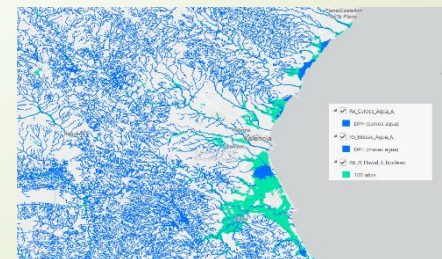
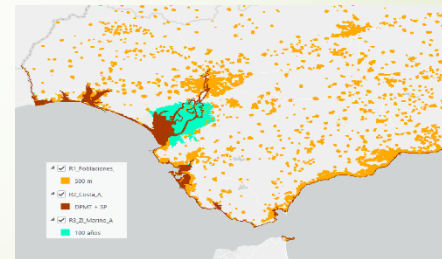
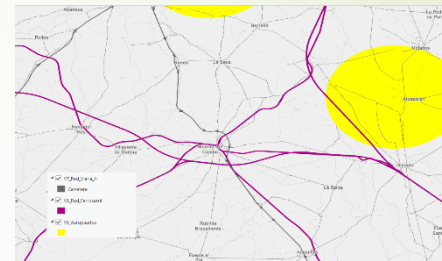
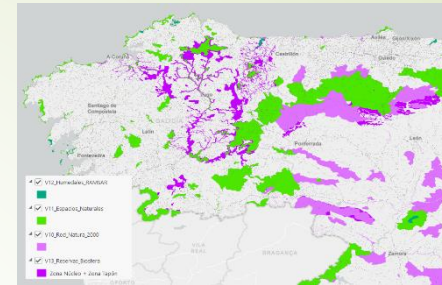
TECNOLOGÍAS Y CONDICIONES DE BASE

- Energía eólica
- Energía Solar Fotovoltaica
- Parques del orden de MW
- Complementariedad horaria y estacional
- Mejorar el comportamiento y optimizar recursos
- Restricciones (ambientales...)

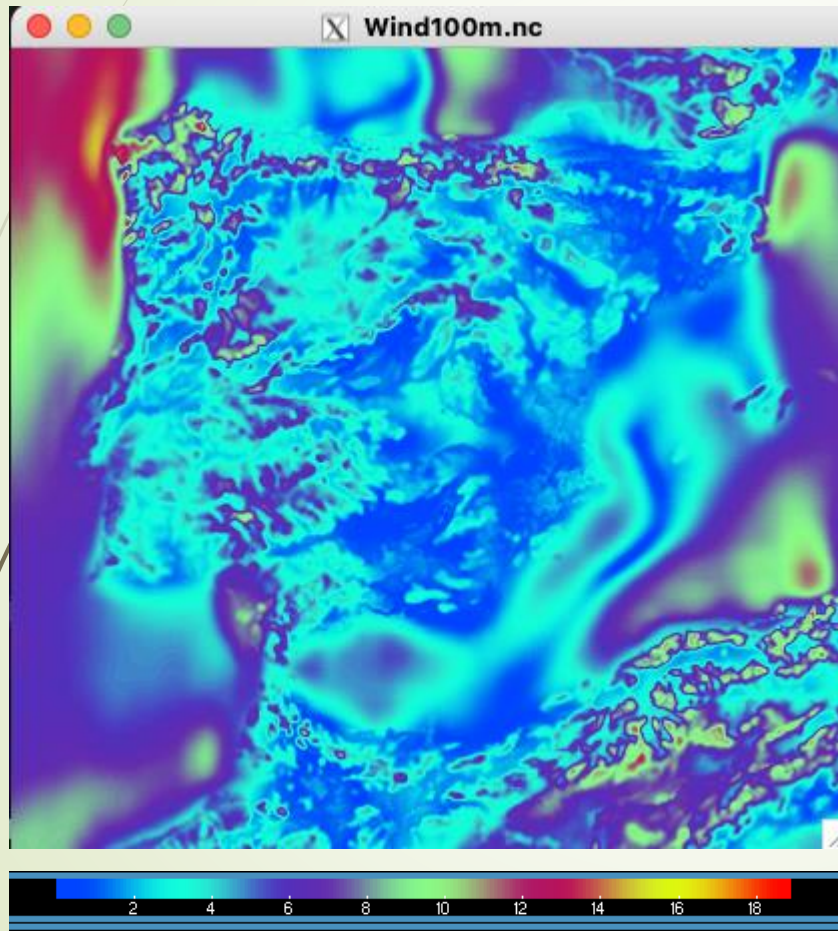
Metodología: Fuentes de Datos

6

Datos	Fuente	Escala / Resolución
Límites administrativos	IGN	-
Poblaciones	IGN	1:5.000
Líneas de deslinde para el Dominio Público Marítimo Terrestre	MITECO	1:25.000
Cartografía de zonas inundables de origen marino (100 y 500 años)	MITECO	1:25.000
Hidrografía	IGN	1:25.000
Zonas inundables de origen fluvial (100 y 500 años)	MITECO	1:25.000
Red viaria	IGN	1:5.000 a 1:25.000, 1:100.000
Red de ferrocarril	IGN	1:5.000 a 1:25.000
Aeropuertos	IGN - AENA	1:5.000 a 1:25.000
Red Natura 2000	MITECO	1:50.000
Espacios Naturales Protegidos	MITECO	1:50.000
Humedales RAMSAR	MITECO	1:50.000
Reservas de la Biosfera	MITECO	1:50.000
Red General de Vías Pecuarias de España	MITECO	-
CORINE Land Cover	IGN	1:100.000
Líneas eléctricas, subestaciones y centradles	IGN	1:100.000
Irradiación solar	ADRASE- CIEMAT	5.000 m
	ERA5-Copernicus	0,25° y 1.000 m
Velocidad del viento	ERA5-Copernicus	0,25° y 1.000 m
Modelo Digital del Terreno	IGN	200 m
Pendientes	IGN	200 m
Sensibilidad por la presencia de determinadas especies de aves	SEOBirdLife	-



ANÁLISIS DE RECURSOS WRF



Variables extraídas: Velocidad viento 100m, GHI...

Table 2: Setup configurations and parameterizations used in the WRF simulations.

WRF version	4.5.1
Domains	1 nest from ERA5 (D_1); 1 nest from D_1 (ndown program, D_2)
Grid spacing	D_1 at 4 km resolution; D_2 at 1 km resolution
Vertical discretization	54 hybrid vertical coordinate, model top at 50 hPa Auto levels opt. = -2
Model levels	9 model levels below 1 km 5 lowest level height: approx. 35, 75, 124, 184 & 255 m.a.g.l.
Terrain data	Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 at 30 arcsec. (Danielson and Gesch, 2011)
Land use data	CORINE 100 m (EEA, 2021)
Dynamical forcing	ERA5 Reanalysis every 3 hours ($0.3^\circ \times 0.3^\circ$) on pressure levels (Hersbach et al., 2020)
Sea conditions	NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset SST & Sea Ice (0.25° approx.; 25 km; Reynolds et al., 2007)
Nudging	Spectral nudging in D_1 above the (PBL) & level 12 in u, v, t and q & 14 for the potential No nudging in D_2
Time step	20 s for D_1 5 s for D_2
Simulation length and temporal resolution	2009-2014, with the first year of spin Output 30 min Restart every 10 days
PBL	Improved Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 scheme (Nakanishi and Niino, 2006)
Surface Layer	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme
Land surface model	Noah-MP model (Niu et al., 2011) Miguez-Macho & Fan runoff and groundwater scheme (Fan et al., 2007; Miguez-Macho et al., 2007) Static tables wit NEWA Rugosity & CORDEX LAI Thompson et al. (2008)
Cloud Microphysics	No shallow convection parameterization
Shallow convection	Rapid Radiative Transfer Model (Iacono et al., 2008)
Radiation	No cumulus; convection permitting for D_1 & D_2
Cumulus parameterization	Full diffusion
Diffusion	2D deformation 6 th - order positive definite numerical diffusion Rate 0.12 Vertical damping
Advection	Monotonic transport & positive definite advection of moisture and scalars
Computing Numerical options	512 cores, IO quilting (12 cores for output) for D_1 384 cores, IO quilting (4 cores for output) for D_2

Metodología: aproximaciones al problema

Aproximación 1:

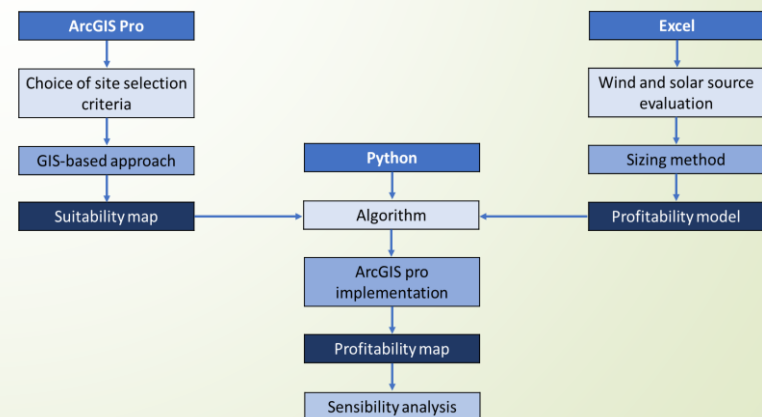
Mapa de aptitud basado en el estado del arte de la literatura científica. Arroja una primera visión del potencial peninsular y Balears. Resultados optimistas. Resultados: TFM, artículo y [story map](#).

Aproximación 2:

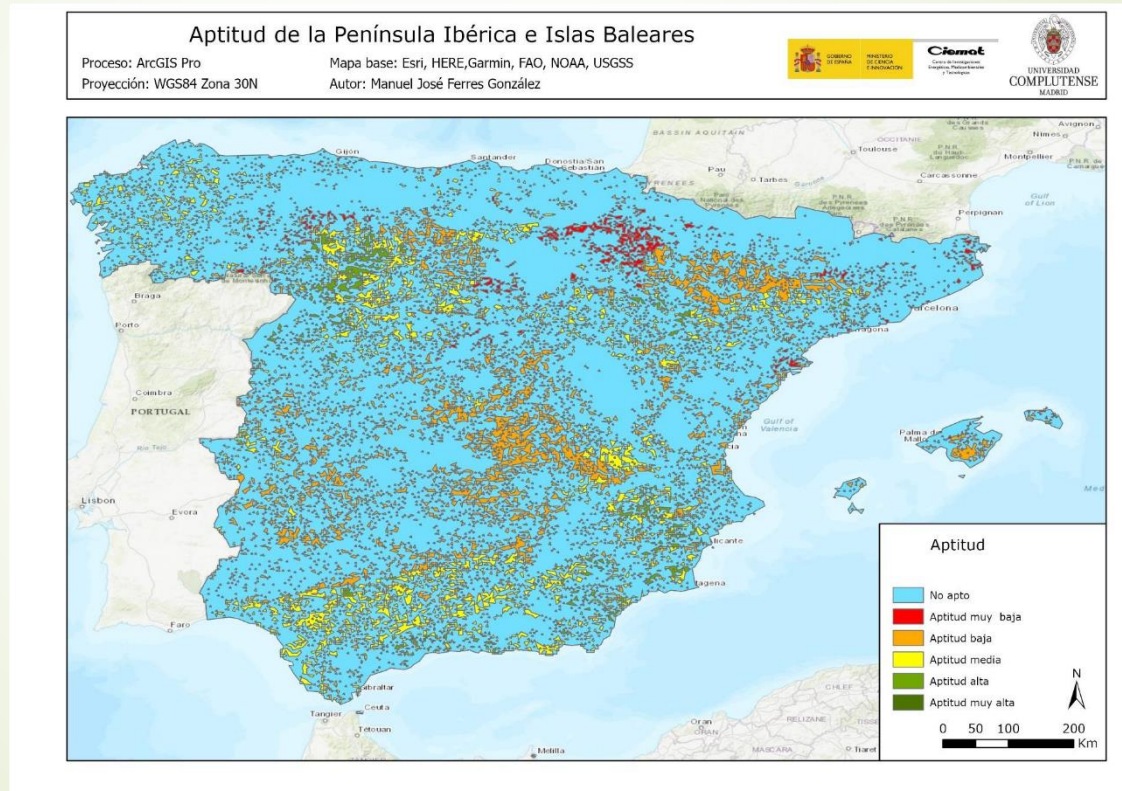
Implementado un nuevo mapa de capacidad basado en lógica difusa. Implementado un primer modelo de rentabilidad. Implementado un nuevo mapa de rentabilidad basado en los anteriores.

Table 1. Parameters extracted from the review of articles, adapted to the layers structure.

Climate Conditions		Infrastructure			
Parameters	Value	Parameters	Value	Parameters	Value
Wind Speed (m/s)	[2.5–35.6]	Settlements (km)	[0.25–10]	Visibility (% of pixel)	[0–31]
Solar daily Global Irradiation (kWh/m ² -day)	[4.5–6.7]	Renewables Energies Facilities	[Existing areas]	Electric Grid (km)	[0.1–40]
Temperature (°C)	[17–31.1]	Land Cover	[Better in areas without vegetation]	Water bodies (km)	[0.4–28]
Business		Land Use	[Better in not productive areas]	Airports (km)	[3.5–28]
Parameters	Value	Slope solar (°)	[0–5.71]	Bird Migration Path	[X]
Useful Life (years)	[25–30]	Slope wind (°)	[0–35]	Roughness	[1.5]
Minimal area (km ²)	[4]	DEM solar (m)	[300–1500]	Faults (m)	[200]
Installation cost (\$/kW)	[4000–5000]	DEM wind (m)	[500–2000]	Roads (km)	[0.3–40]

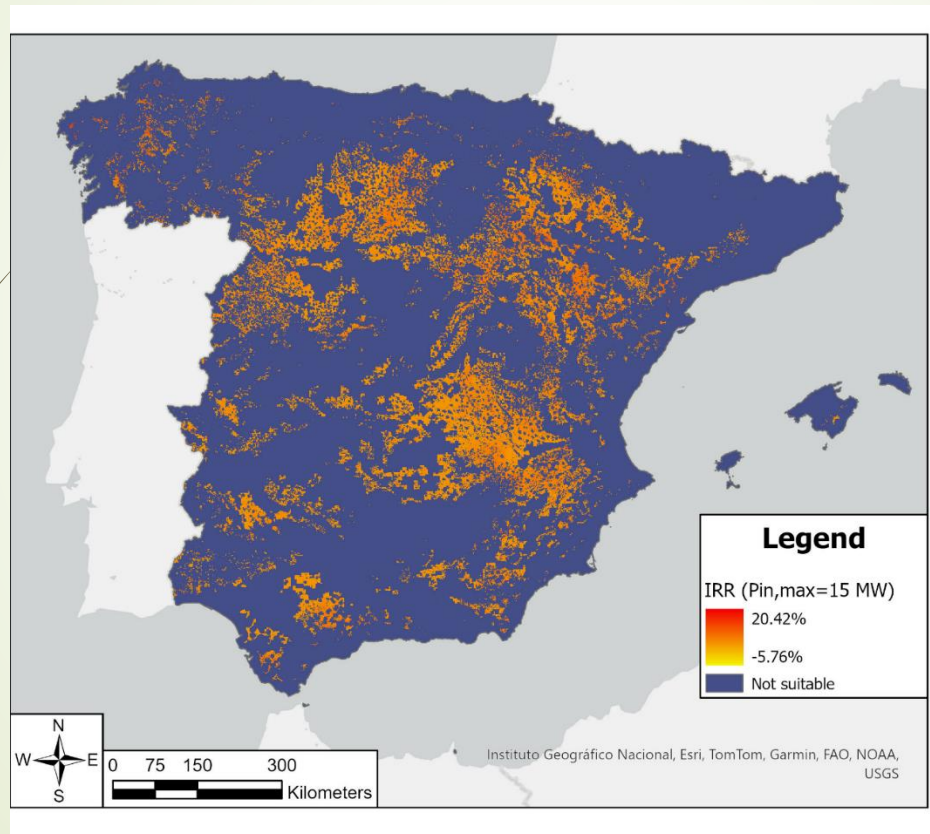


APROXIMACIÓN 1: APTITUD



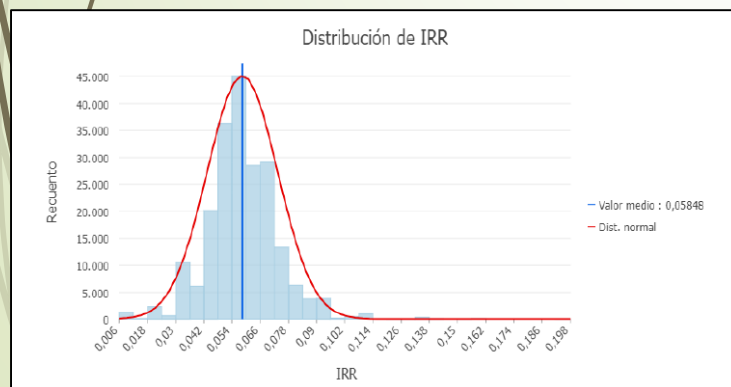
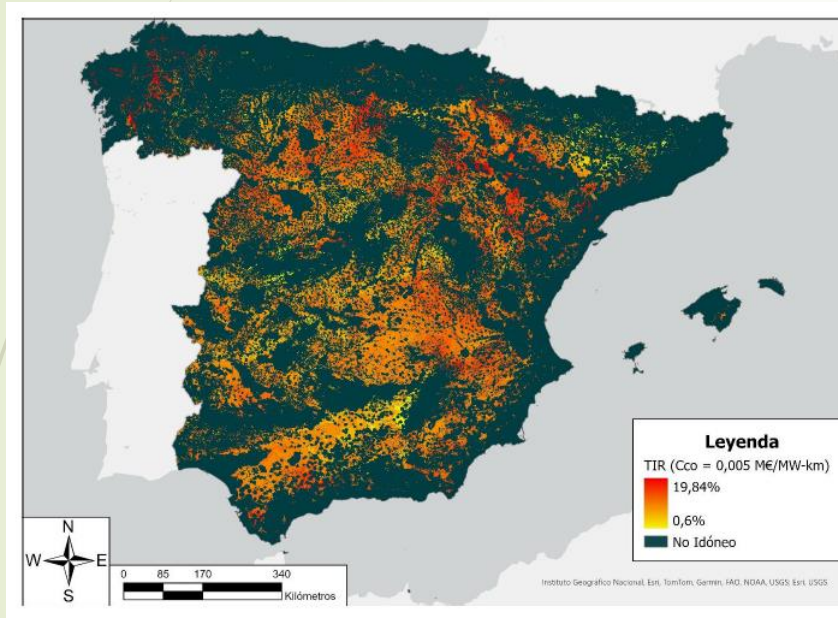
Ferres González, M. J. (2021). *Elaboración del mapa de hibridación de energía eólica y solar en España*. (MsC - Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica MsC), UCM, Madrid. Retrieved from <https://eprints.ucm.es/id/eprint/68272/>

APROXIMACIÓN 2: TASA DE RETORNO



Borsato, M. (2024). *Assessment of Utility-scale Hybrid Systems, based on Wind and PV plants, and mapping of potential installation sites in Spain*. (Master's Degree in Energy Engineering MSc), UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA, Padua (Italy). Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12608/66029>

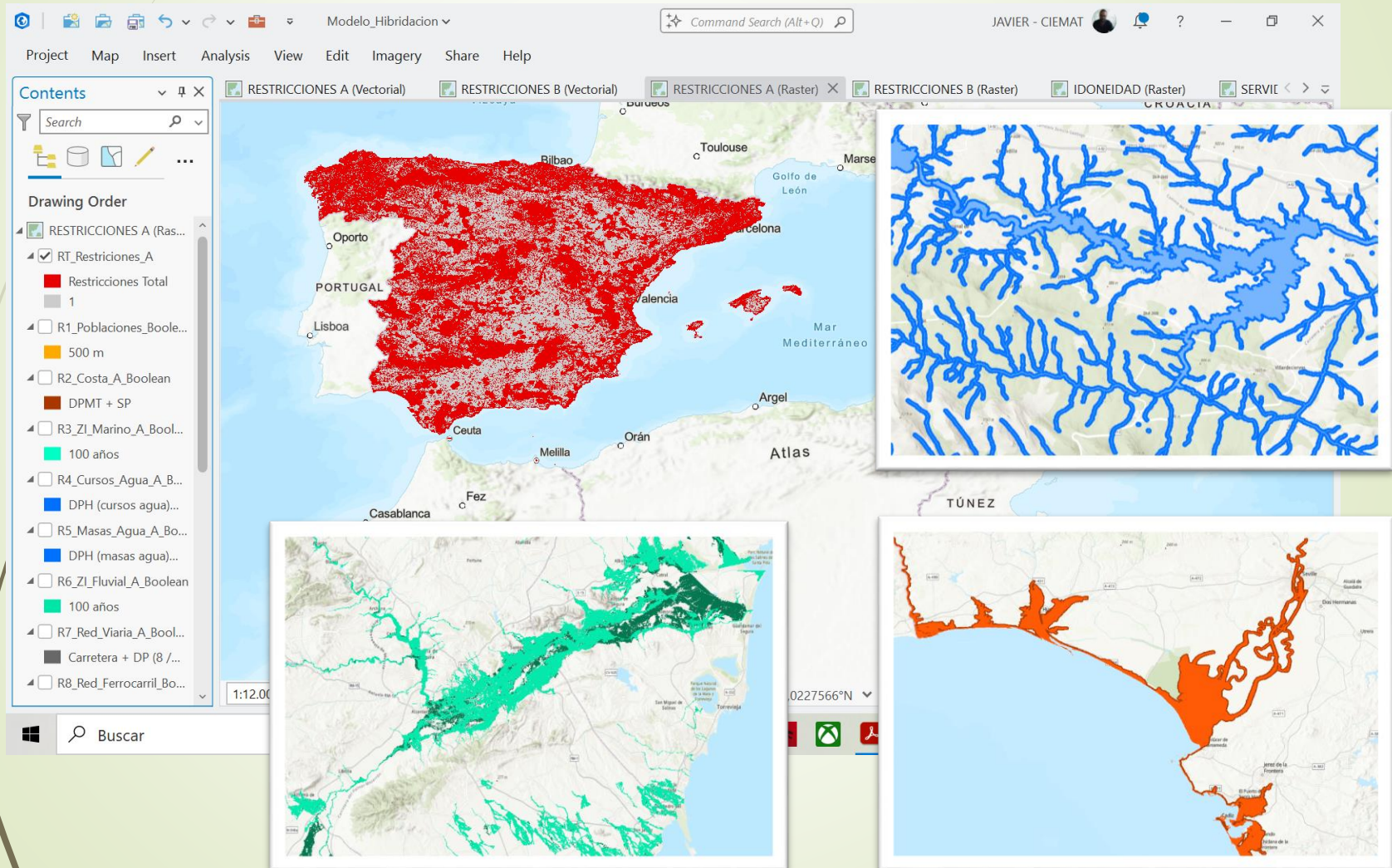
APROXIMACIÓN 3: TIR + DISTANCIA RED



Cordente R. (2025). Evaluación del potencial de plantas híbridas eólico-fotovoltaicas en España. Máster propio en Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA), UPM.

Nº	Notebook	Funcionalidad
1	Constantes y Raster iniciales	Define todos los parámetros globales del modelo (límites de potencia instalable, costes unitarios, vida útil, PPA, tasa de descuento, etc.) y genera los rústers base como la máscara del área de estudio.
2	Distancia a red	Calcula la distancia desde cada celda a la red de alta tensión utilizando la herramienta Near de ArcGIS. El resultado se almacena en el campo "Distancia" y se convierte en un rúster para su visualización.
3	Recurso eólico	Estima el recurso eólico anual por celda a partir de datos de velocidad de viento.
4	Recurso solar	Calcula el recurso solar disponible teniendo en cuenta la radiación global horizontal ajustada por pérdidas.
5	Producción diaria de energía	Calcula la producción diaria de energía para cada celda y combinación de potencia. Se realiza una simulación completa a lo largo del año para estimar la energía generada con base en los recursos renovables.
6	Coste	Calcula los costes CAPEX (incluido coste de conexión a red) y OPEX asociados a cada combinación.
7	LCOE	Calcula el coste nivelado de la energía (LCOE) para cada celda y combinación, como métrica complementaria al IRR, útil para comparar zonas con diferentes configuraciones.
8	Solución Óptima	Selecciona, para cada celda, la combinación de potencia que minimiza el coste total. Esta configuración óptima se utiliza posteriormente en el cálculo del IRR.
9	Cálculo TIR	Calcula la TIR final para cada celda, basándose en su configuración óptima y considerando todos los costes, incluidos los de conexión a red. El resultado se exporta como un rúster final de rentabilidad.

GIS MAPA HIBRIDACIÓN



Resultados: Evolución y estado actual del proyecto

Hechos relevantes

Revisión en profundidad de la literatura científica respecto a la evaluación de emplazamientos potenciales para sistemas híbridos. Implementadas varias simulaciones (3) basadas en indicadores económicos y soportadas en Python. Defendidas tres tesis de maestría (España e Italia) con la máxima calificación. Publicados dos artículos en revistas de impacto. Base de datos geográfica actualizada y preparada para nuevas simulaciones. Nueva revisión de variables y pesos basada en los reglamentos y con vistas a su simplificación operativa

En estos momentos...

Incorporación de análisis horario a partir de la simulación realizada del recurso eólico y solar con alta resolución espacio-temporal mediante la adaptación del modelo WRF. Modificación del código e introducción de nuevos algoritmos. Desarrollo de un visor de mapas.



DISCUSIÓN

- Capacidad de simulación y escenarios
- Escalas y diferentes aproximaciones
- Diferentes metodologías de análisis SIG: Multicriterio, lógica difusa
- Escala temporal

LÍNEAS FUTURAS Y CONCLUSIONES

- Proyecto dinámico, incorporar nuevas aproximaciones y diferentes visiones
- Puntos de enfoque: demanda, almacenamiento, red, territorio... ¿Cómo hacer coincidir intereses divergentes?
- Los SIG son una herramienta fundamental para el análisis e implementación de nuevos enfoques tecnológicos para la transición energética

Topic

GIS-Driven
Renewable Energy
Solutions:
Advancing
Regional
Development,
Rural
Electrification, and
Universal Energy
Access

Topic Editors

Prof. Dr. Javier
Dominguez Bravo
Dr. Luis F. Zarzalejo
Dr. Markus Biberacher

Deadline

Abstract Submission:
30.04.2027
Final Submission:

Participating Journals

Clean Technologies,
Energies, Sustainability,
Applied Sciences, Sci



[mdpi.com/topics/
5193H7SS37](https://mdpi.com/topics/5193H7SS37)

Topics
MDPI, Grosspeteranlage 5
4052 Basel, Switzerland
Tel: +41 61 683 77 34
topic@mdpi.com

mdpi.com/topics



REFERENCIAS Y AGRADECIMIENTOS

- Cordente R. (2025). Evaluación del potencial de plantas híbridas eólico-fotovoltaicas en España. Máster propio en Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA), UPM.
- Arribas, L., et al. (2025). The Potential of Utility-Scale Hybrid Wind-Solar PV Power Plant Deployment: From the Data to the Results. *Wind*, 5(3), 16. <https://doi.org/10.3390/wind5030016>
- Borsato, M. (2024). *Assessment of Utility-scale Hybrid Systems, based on Wind and PV plants, and mapping of potential installation sites in Spain.* (Master's Degree in Energy Engineering MsC), UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA, Padua (Italy). Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12608/66029>
- Arribas, L., et al. (2021). Review of Data and Data Sources for the Assessment of the Potential of Utility-Scale Hybrid Wind-Solar PV Power Plants Deployment, under a Microgrid Scope. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14217434>
- Ferres González, M. J. (2021). *Elaboración del mapa de hibridación de energía eólica y solar en España.* (MsC - Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica MsC), UCM, Madrid. Retrieved from <https://eprints.ucm.es/id/eprint/68272/>

PERTE
de energías renovables,
hidrógeno renovable
y almacenamiento

Plan de Recuperación,
Transformación y Resiliencia

