

INSTITUTO TECNOLÓGICO AUTÓNOMO DE MÉXICO

I T A M

**PARQUES DE PANELES SOLARES EN TERRENOS OCIOSOS COMO  
OPORTUNIDAD DE NEGOCIOS: SIMULACIÓN EN ESPAÑA Y ALEMANIA**

APLICACIÓN PRÁCTICA

TESINA

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN NEGOCIOS

PRESENTA

ROBERTO ANDRADE MARTÍNEZ

ASESOR: SERGIO ROMERO HERNÁNDEZ

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	3
1.1.	Antecedentes	3
1.2.	Oportunidad	3
1.3.	Paneles solares fotovoltaicos	3
1.4.	Pregunta y objetivo de trabajo	7
1.5.	Hipótesis del trabajo	8
1.6.	Estrategia metodológica	8
2.	DESARROLLO	10
2.1.	Obtención de datos para la simulación	10
2.2.	Simulación	11
2.3.	Resultados	13
2.3.1.	Producción en España	15
2.3.2.	Producción en Alemania	22
2.4.	Extrapolación a México	26
3.	CONCLUSIONES	30
	ANEXOS	31
	REFERENCIAS	34

# **PARQUES DE PANELES SOLARES EN TERRENOS OCIOSOS COMO OPORTUNIDAD DE NEGOCIOS: SIMULACIÓN EN ESPAÑA Y ALEMANIA**

Roberto Andrade Martínez

## **RESUMEN**

A la luz de la creciente demanda de energía eléctrica a nivel nacional y global se realizó una simulación en el lenguaje de programación Python, utilizando la librería *Atlite* con el objetivo de demostrar la factibilidad tanto de potencial energético como de negocios de instalar paneles solares en zonas de desechos en México. El ejercicio consistió en la recopilación de datos de *Copernicus* –el programa de observación de la Tierra de la Unión Europea– de los años 2008 a 2017 para Alemania y España. Estos datos fueron acotados a aquellos que se encontraban en espacios geográficos cuya denominación de uso de suelo era para desechos, para posteriormente insertarse en el modelo de *Atlite*; éste dió como resultado el potencial energético (en Gigawatts) por cada hora de diez años.

Con base en estos resultados se muestra la estabilidad en la potencial producción de electricidad con paneles solares flotantes en un año cualquiera así como la oportunidad de negocios que presentan como un nicho de mercado para México.

**Palabras Clave:** Energía renovable; Energía en México; Simulación; Python.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Antecedentes**

La energía siempre ha sido y siempre será una necesidad y recurso estratégico imprescindible para un país por su papel en todas las actividades: esencialmente, sin energía, todo lo demás se paraliza. La demanda de energía eléctrica en México puede llegar a rebasar los 300 mil GWh en un año y, en vista del crecimiento tanto poblacional como de la economía, es previsible que esta demanda se incremente en el futuro.

Debido a esto, como país se deben considerar proyectos de producción de electricidad que garanticen el abasto de la futura demanda.

A la luz de la escasez de recursos energéticos no renovables, así como la huella de carbono sumamente dañina para el ambiente y los ciudadanos de estos, una alternativa deseable a explorar puede ser la energía solar, cuyo potencial en México es muy alto.

### **1.2. Oportunidad**

Una vez mencionado lo anterior, e independientemente del marco regulatorio vigente en cuanto al sector energético, desde el punto de vista de negocios resulta muy atractivo ese potencial energético en el país: se llega a decir que el peor sol en México produce más electricidad que el mejor sol en Alemania, país que ha invertido notoriamente en energía solar.

Sabiendo eso, ¿habrá alguna oportunidad para invertir en algún parque de energía en espacios que no hayan sido ocupados por empresas privadas o del Estado en el país?

### **1.3. Paneles solares fotovoltaicos**

La luz solar entrega, en promedio, alrededor de 1 kilowatt de potencia por cada metro cuadrado de superficie en la Tierra. Actualmente existe tecnología de tal manera que los paneles solares

fotovoltaicos tienen una eficiencia de conversión de energía de alrededor del 20%. Por esto, se dice que un panel solar de tamaño estándar, 1m x 1.65m, estaría generando entre 300 y 330 watts de energía. A esta generación se le llamará el *rating* del panel, y generará eso durante cada hora durante los picos de luz solar.

El pico de luz solar llega a ser de hasta 7 horas en regiones como Arizona, por ejemplo, y cerca de 3 horas en otras como Alaska. Por lo tanto, y considerando las fluctuaciones en la radiación solar, potencial presencia de nubes, polvo y mantenimiento requerido, un panel solar de *rating* de 300 W estaría generando entre 1 y 2.5 kWh al día.

Estos números no son muy impresionantes como tal –un domicilio promedio en los EEUU consume 30 kWh en un día– pero considerando el muy pequeño tamaño de los paneles, al agruparse –en un parque– se podría obtener en suma una cantidad considerable de energía.

Ahora bien, como potenciales espacios para instalar paneles solares para una producción a nivel industrial, ¿existirá algún espacio que esté ocioso y que tenga gran potencial de energía solar?

Ante la escasez de suelo utilizable para estos fines, sin que se interfiera con la naturaleza, un espacio potencial es aquel que actualmente ya es utilizado para fines de desalojo de desechos industriales y públicos.

Esto ya se ha implementado con éxito y el implementarse a mayor escala puede traer grandes beneficios. A continuación se especificarán algunos ejemplos.

### **Parque flotante en aguas residuales**

La empresa White Pine Renewables finalizó recientemente la instalación de una planta solar flotante en el norte de California, en Healdsburg y en donde actualmente se tiene una planta para trata de aguas residuales. La planta tiene un potencial de casi 5 MW y rebasa a una planta instalada en Sayreville, Nueva Jersey, cuyo potencial es de cerca de 4 MW como el proyecto más grande de paneles flotantes

en EEUU. Ambos proyectos, además de realizarse en un terreno que no interactúa con flora ni fauna acuática, se ven beneficiados por los efectos que tiene el agua sobre los paneles: al enfriarse incrementa su eficiencia y se reduce la evaporación del agua.

**IMAGEN 1.1.** Parque solar flotante de White Pine Renewables



White pine renewables.

El éxito de estos proyectos, además de su rápido desarrollo (alrededor de seis meses) son motivos de optimismo para implementarlos en lugares equivalentes en nuestro país. Igualmente se puede inferir el éxito de proyectos similares en aguas no necesariamente residuales, sino quizás en donde se tengan desechos químicos, por ejemplo.

**IMAGEN 1.2.** Estanque de desechos líquidos (Bulgaria)



Copernicus. Foto: Gy. Büttner

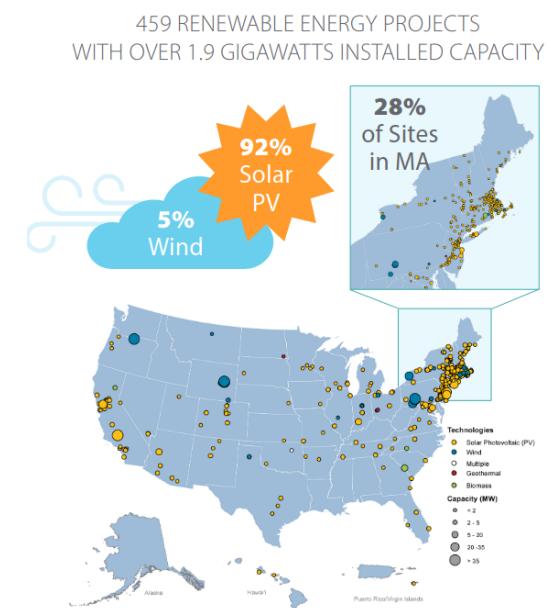
### **Parques en vertederos y zonas previamente contaminadas (*Brownfields*)**

La agencia de protección ambiental de los EEUU, EPA, lanzó la iniciativa *RE-Powering America's Land* en la que se alienta a desarrollar parques de energía renovable en terrenos actualmente o previamente contaminados, zonas industriales abandonadas, así como vertederos y minas. La iniciativa ha tenido éxito y en ese país hay hasta ahora más de 400 parques fotovoltaicos y un potencial total de casi 2 GW en capacidad instalada.

La iniciativa además muestra la tendencia claramente a la alza de esta clase de proyectos energéticos en los últimos años. Los proyectos han demostrado ser reddituables económicamente, además de los beneficios que trae implícitamente a las comunidades en donde estos se desarrollan.

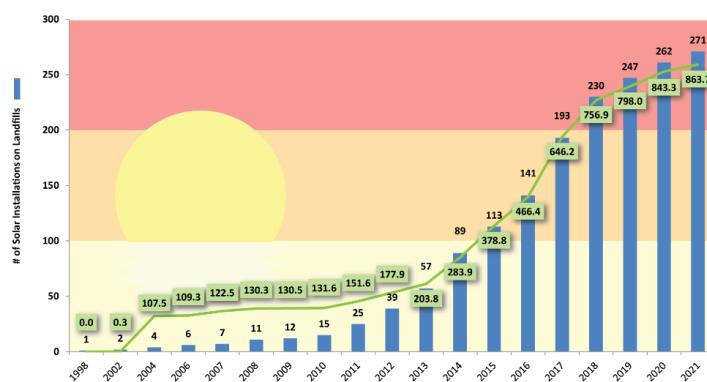
Sin duda se deberá tomar en cuenta como una oportunidad de negocios en este país, sobre todo ahora que aún no se ha desarrollado y se podría acceder a estos terrenos a un precio bastante más bajo por la nula demanda que hay de estos.

**IMAGEN 1.3.** Mapa de proyectos instalados EPA RE-Powering America's Land



RE-Powering America's Land project tracking matrix

**IMAGEN 1.4.** Capacidad instalada de PV proyecto EPA RE-Powering America's Land



RE-Powering America's Land project tracking matrix

Ahora bien, se pueden tomar algunas medidas para estar más seguros de la viabilidad de estos proyectos en el país:

#### **1.4. Pregunta y objetivo de trabajo**

Para asegurar que la alternativa es viable será necesario esclarecer los siguientes problemas: que la generación de energía sea suficientemente constante durante un año, a pesar de los cambios estacionales, y que la producción sea suficientemente grande para contribuir al sistema eléctrico nacional. A lo largo del trabajo se responderán estas preguntas.

Para analizar la viabilidad (en términos energéticos) de esos paneles en México se pueden tomar como referencia a algunos países de los que se tengan datos al respecto. Afortunadamente, la Unión Europea creó un observatorio meteorológico que ha recopilado información suficiente para estas evaluaciones.

#### **1.5. Hipótesis del trabajo**

Partiendo de la premisa de que un país, Alemania, cuyo potencial solar es pequeño debido a condiciones climatológicas adversas pero que con la inversión y tecnología adecuadas han logrado una generación estable y significativa para su red eléctrica, se presumirá que México tiene el potencial para implementar esas medidas efectivamente.

#### **1.6. Estrategia metodológica**

Para el proyecto de investigación se hará, esencialmente, un trabajo de simulación. El plan es simular diez años de generación de energía con paneles solares fotovoltaicos de silicio; el plazo aparentemente elevado se utilizará para garantizar que los resultados simulados sean coherentes y robustos ante mediciones mensuales o anuales atípicas.

A su vez, la simulación se realizará dos veces para recopilar datos de dos regiones: Alemania y España, países cuyas condiciones meteorológicas y potencial energético solar son distintos. Con esto se

tendrá mejor noción del potencial de estos paneles en un país con condiciones tan distintas regionalmente como México.

Para proceder con la simulación, en primer término, se tendrán que obtener los datos climatológicos del observatorio mencionado en **1.4.**, el programa Copernicus de Observación de la Tierra de la Unión Europea. En particular se utilizarán datos del servicio *Copernicus Climate Change Service* (C3S), utilizando el API del *Climate Data Store* que han hecho abierto para uso público.

Una vez que se tengan estos datos se introducirán al modelo para simulación que se tiene disponible, desarrollado por *Python for Power System Analysis* (PyPSA) y llamado *Atlite*. El modelo permitirá simular la producción de energía solar por hora durante el periodo establecido (en GigaWatts-h) y en la zonas indicadas (para esto último se utilizará la librería *GeoPandas* de Python); igualmente permitirá seleccionar hacer simulaciones con paneles solares de Silicón o de Cadmio Telurio.

Tras realizar las simulaciones, se espera tener suficiente información para analizar la viabilidad energética de los paneles solares en territorios *dump* en Alemania y España, de lo cuál se podría inferir la viabilidad de estos para México.

## **2. DESARROLLO**

### **2.1. Obtención de los datos para la simulación**

Como se mencionó en el apartado de la estrategia metodológica, la recopilación de los datos sería exclusivamente del repositorio de *Copernicus Data Store* (CDS), del proyecto de la Unión Europea. Ahora bien, afortunadamente existen herramientas de código abierto para acceder y manipular la información del CDS, de las que el proyecto se auxilió durante el desarrollo del mismo. En particular, de las librerías de Python *Atlite* y *GeoPandas*. A continuación se hará una breve descripción de éstas y cómo fueron utilizadas para el proyecto.

*Atlite* es una librería desarrollada inicialmente por el *Frankfurt Institute for Advanced Studies* y actualmente financiada por la Secretaría para Educación e Investigación de Alemania, que utiliza datos climatológicos para convertirlos en datos de sistemas energéticos. Es parte del proyecto PyPSA (*Python for Power System Analysis*) y en la práctica se utiliza para calcular el potencial energético de energías renovables.

Para la implementación de este paquete, se requerirá, entre otras cosas, acotar a qué periodo y qué territorio es del que se quiere obtener los datos climatológicos, considerando que se tiene disponibilidad de los países de la Unión Europea (más el Reino Unido) desde 1965 y hasta 2019. En cuanto al periodo, esto fue sencillo pues únicamente se requirió insertar las fechas de interés en la función del modelo.

Sin embargo, en cuanto al territorio fue necesario utilizar el paquete *GeoPandas*. Este paquete incluye, entre otras cosas, los datos precisos de cada país en cuanto a la localización de sus fronteras en todos los puntos. Con esto, se puede generar un mapa adecuado de cada país y, lo más importante para los fines del proyecto, permite insertar esos límites en la función del modelo. Con esos dos elementos,

tiempo y espacio geográfico, se podrá ejecutar la *query* adecuada para solicitar la información necesaria al sistema de *Copernicus*.

Al ejecutar la función se generará un *cutout* y un correspondiente archivo con terminación .nc en donde posteriormente se almacenarán los datos climatológicos descargados del CDS. En la práctica, un archivo de estos en que se tienen los datos de un país por un año ocupa alrededor de 1 GB de memoria y toma cerca de una hora en descargar. Es sin duda una enorme cantidad de información la que se necesita.

La última entrada que el modelo requiere tiene que ver con el uso de suelo que se le da a cada punto dentro del territorio de un país. Para esto se descargó un archivo llamado Corine.tif de *Copernicus*, en el que dentro del mapa de la Unión Europea se designa cada punto entre 44 distintos usos de suelo. A gran escala, estos usos de suelo se dividen en cinco grandes categorías: superficies artificiales; áreas de agricultura; bosques y áreas seminaturales; humedales; y cuerpos de agua.

## 2.2. Simulación

Como se mencionó anteriormente en la descripción de la estrategia metodológica, se decidió realizar la investigación en dos países con condiciones climatológicas sumamente diferentes: Alemania y España, y en un periodo de diez años, que para este caso se ocuparon los años 2008 a 2017. La última entrada del modelo fue referente al uso de suelo que se tiene en cada punto del territorio.

Para los fines de esta simulación, conforme a lo que se presentó como la oportunidad de negocios de interés, se consideraron los territorios con designación *dump* (desecho). Esta clase es descrita por *Copernicus* como aplicable para:

- vertederos de residuos públicos y comunales (*landfills*);
- vertederos de desechos industriales: desechos de roca después del procesamiento de diversas materias primas;

- vertederos de residuos de plantas de tratamiento de aguas residuales;
- estanques de aguas residuales/residuos líquidos, productos de diversos procesos químicos;
- terrenos asociados a las minas donde se vierten materiales estériles.

Estas descripciones son consistentes con los ejemplos mencionados que han tenido éxito tanto de la empresa White Pine Renewables como de los diversos proyectos de RE-Powering America's Land y donde potencialmente se podrían implementar en el país. A continuación se describe a detalle el *script* de la simulación.

En primer término, se utiliza la librería *Geopandas* mencionada en la subsección anterior. Con esto se tendrá acceso al mapa de los países de interés, así como a la localización de sus fronteras en un arreglo de longitud y latitud. Estas fronteras serán los límites que se usarán para solicitar la información a *Copernicus*, y las definiremos como *bounds*.

Con esta información junto con el periodo de interés, que en este caso serán los años 2008 a 2017, se puede crear lo que el sistema llama *cutout*, que será el esqueleto del archivo en el que se almacenarán los datos descargados de *Copernicus*, en particular de la base *ERA5*.

A continuación, en línea con las entradas del modelo requeridas, lo último que se requerirá agregar será en cuanto al uso de suelo de interés. Para esto se descargó el archivo Corine.tif del sitio web de *Copernicus* conforme se indicó en la subsección anterior, se guardó en una variable dentro del modelo y posteriormente se creó un objeto del tipo *ExclusionContainer*, al que llamaremos *excluder*. Dentro de este objeto es que se insertó como uso de suelo de interés el tipo *dump*. En los anexos se incluirá una lista de todos los usos de suelo disponibles.

Con el mapa y el uso de suelo, se podrá acotar exactamente dónde estarán los paneles solares de la simulación. Esto se verá reflejado con el siguiente paso, que es la creación de lo que se llamará *AvailabilityMatrix* que, como se puede inferir del nombre, será una matriz en la que para cada

coordenada del mapa (en bloques de 100m x 100m) de interés se indicará el potencial aprovechamiento de energía solar si es que cumple con el uso de suelo pedido.

Dado esto, se procede a correr una función llamada *prepare*, con la que se realiza la descarga de los datos de *Copernicus* y se almacenan en el archivo *cutout* mencionado anteriormente. Este será, por mucho, el proceso más tardado en la simulación. Afortunadamente sólo se tiene que realizar una vez y ya descargados los datos se podría volver a correr la simulación cambiando algunos parámetros como el uso de suelo rápidamente.

Finalmente, se tiene toda la información para correr la simulación. En última instancia, la función se corre como método del objeto *cutout* y requiere la matriz mencionada, así como un último parámetro: qué panel solar se quiere utilizar. Para esto, se optó por utilizar paneles solares de silicón convencional (CSi), que si bien no generan tanto como unos más modernos de cadmio telurio (CdTe), son más baratos y sencillos de conseguir. Esto pensando desde el punto de vista de negocios posteriormente: los costos de entrada serán los mínimos posibles.

El resultado es una serie de tiempo en intervalos de una hora desde el 1 de enero de 2008 al 31 de diciembre de 2017, con dos columnas: una por la generación en cada uno de los países en cuestión, con unidades en Gigawatts. Como índice se tendrán la fecha (año-mes-día) y hora para el periodo de tiempo señalado. Se debe aclarar que se considera zona horaria GMT y no la hora local de cada país.

### **2.3. Resultados**

Un ejemplo de los resultados obtenidos por un día de simulación:

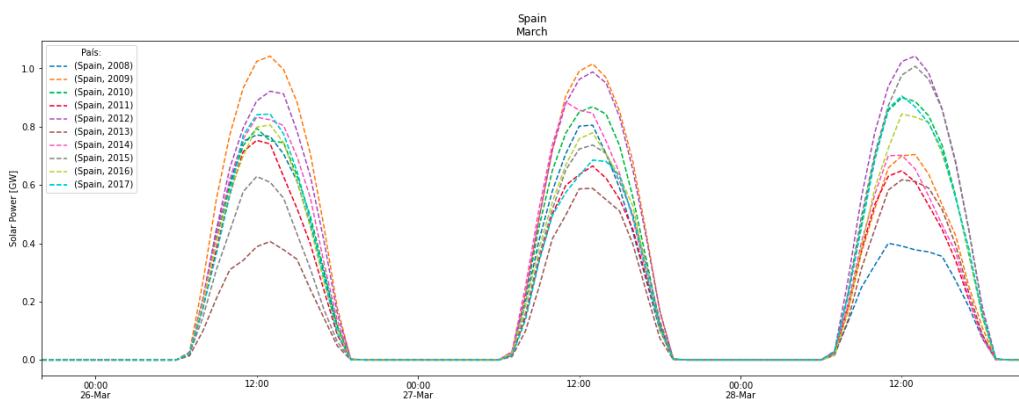
**TABLA 2.1.** Producción del 12 de agosto de 2010 en España y Alemania

	Spain	Germany
time		
2010-08-12 00:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 01:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 02:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 03:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 04:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 05:00:00	0.000000	0.010913
2010-08-12 06:00:00	0.001907	0.070881
2010-08-12 07:00:00	0.069702	0.179222
2010-08-12 08:00:00	0.262645	0.300228
2010-08-12 09:00:00	0.459709	0.417362
2010-08-12 10:00:00	0.628711	0.477037
2010-08-12 11:00:00	0.734746	0.508103
2010-08-12 12:00:00	0.790358	0.495787
2010-08-12 13:00:00	0.831055	0.419056
2010-08-12 14:00:00	0.797412	0.368347
2010-08-12 15:00:00	0.699087	0.279515
2010-08-12 16:00:00	0.576167	0.208423
2010-08-12 17:00:00	0.407288	0.114887
2010-08-12 18:00:00	0.202774	0.038569
2010-08-12 19:00:00	0.031489	0.002022
2010-08-12 20:00:00	0.000026	0.000000
2010-08-12 21:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 22:00:00	0.000000	0.000000
2010-08-12 23:00:00	0.000000	0.000000

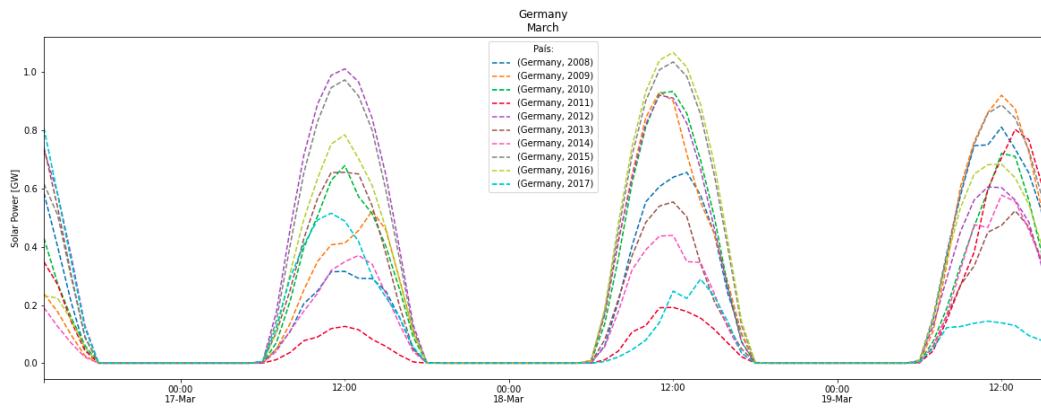
En total, se tienen casi 88 mil entradas con producción potencial de energía solar. Se puede observar que durante la noche la producción es 0 y que los picos se alcanzan alrededor del mediodía. En una gráfica se puede apreciar mejor esto, así como la capacidad de todos los parques combinados.

A continuación se muestra la producción en tres días aleatorios de un año calendario de ambos países, con la producción de cada año en un color distinto:

**GRÁFICA 2.1.** Marzo 26 a Marzo 28 en España



**GRÁFICA 2.2.** Marzo 17 a 19 en Alemania



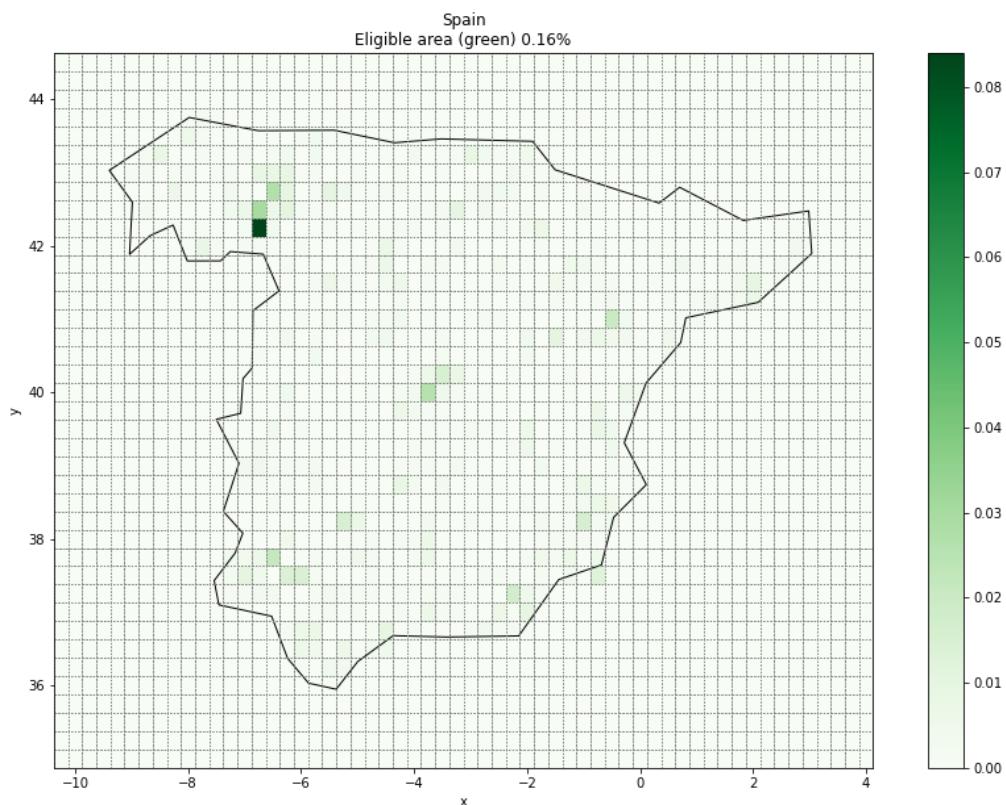
Al aplicar una función se encuentra que el pico de producción para ambos países ronda el 1.1 GW, por lo que la capacidad instalada combinada de parques solares en zonas *dump* podría ser hasta 1/40 de la demanda máxima de un día en España.

Ahora bien, para garantizar que la producción es suficientemente constante y relevante durante todo un año y no únicamente en días aleatorios, vale la pena un análisis más detallado de la producción en cada uno de estos países.

### 2.3.1. Producción en España

En primer término, es pertinente revisar qué partes del territorio se están considerando en el análisis. Utilizando la función GeoPandas mencionada anteriormente y al acotar como zona de interés aquellas con uso de suelo *dump*, el mapa del territorio así como el área disponible para parques solares es la siguiente:

## MAPA 2.1. Área disponible en España



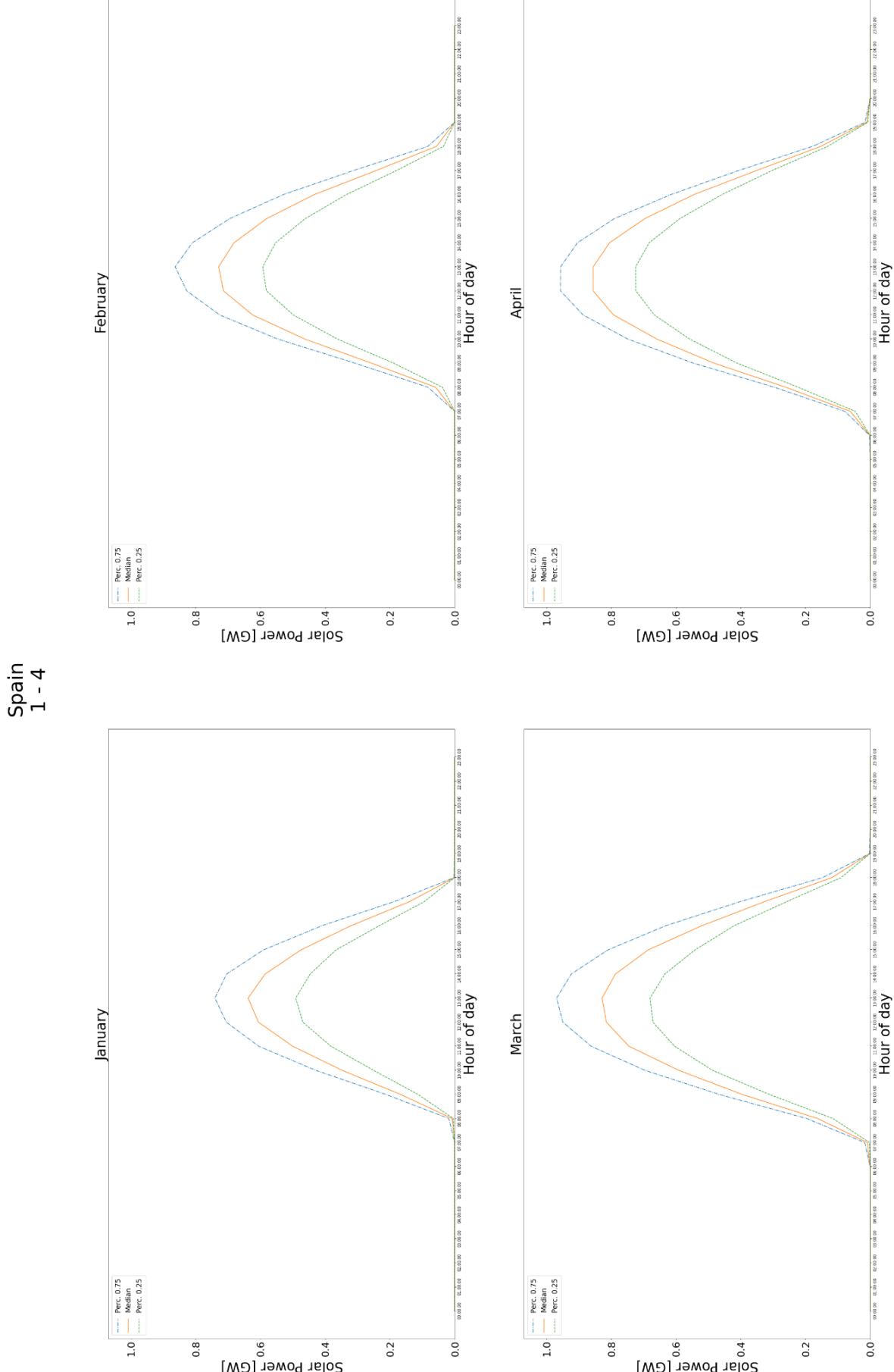
Nota: Como se mencionó durante la descripción de la simulación, la matriz de disponibilidad considera espacios de 100m x 100m y a esa escala es que se realizó la simulación. Sin embargo para fines de visibilidad para el mapa mostrado (así como el de Alemania posteriormente) se utilizan cuadros de 30km x 30km.

Se puede observar que los cuadros verde oscuro en donde se colocarían los parques no son muchos, sin embargo ya se ha mencionado que en conjunto el potencial de estos es de más de 1 GW y a continuación se dará cuenta de que en suma durante un año la energía que se puede vender de estos será muy redituable económicamente, más allá de los beneficios comunitarios que conlleva su instalación.

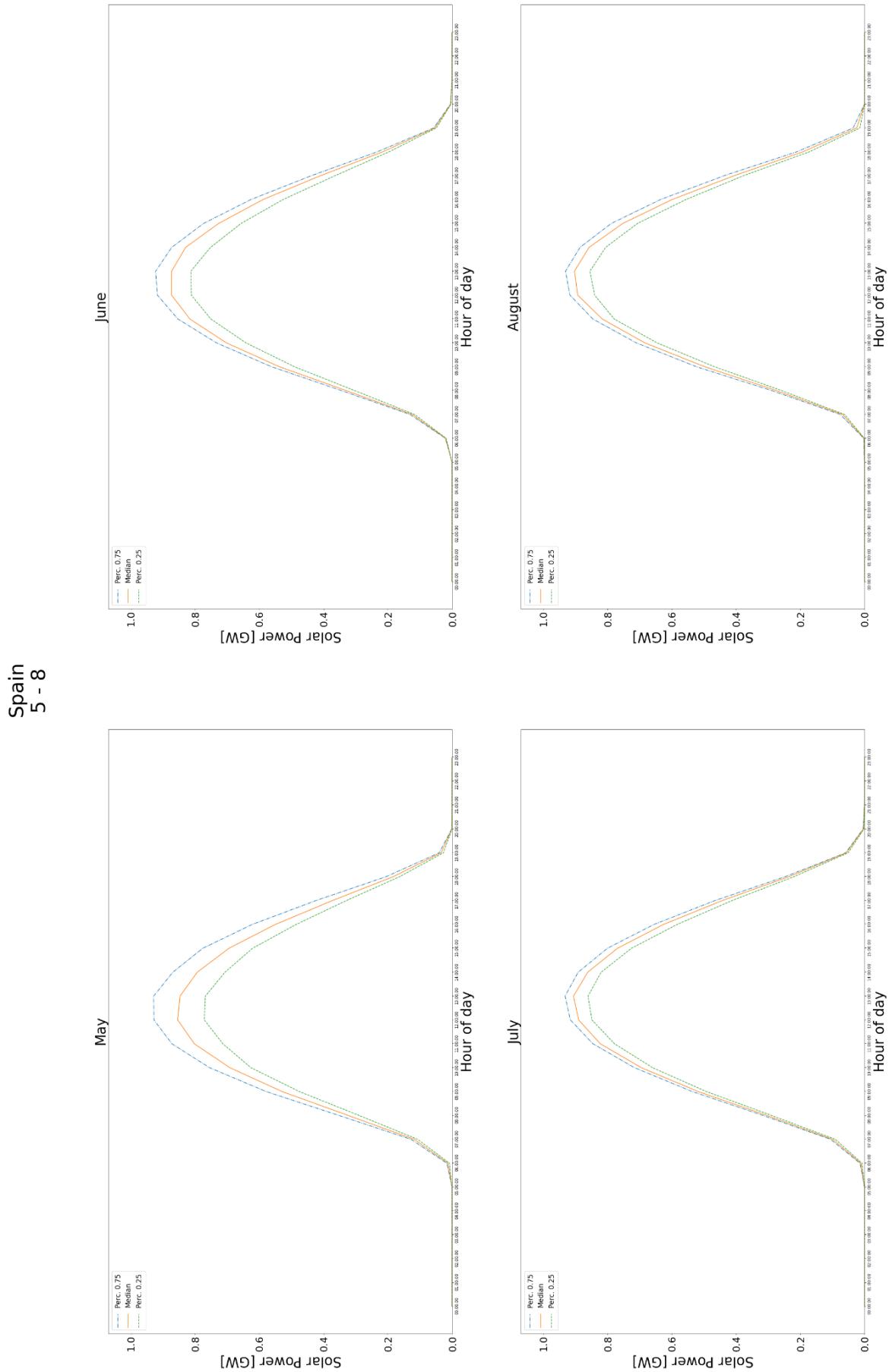
A continuación se mostrará un análisis gráfico de lo que es un día en cada mes del año según los resultados de la simulación, mostrando lo que es un día del percentil 75, percentil 50 y percentil 25 con un color distinto dentro de cada gráfica. Naturalmente se espera que los mejores meses de generación

serán aquellos de verano y los peores los meses de invierno, sin embargo quizás lo de mayor interés para fines de este análisis es que la producción en un mes sea poco variable año con año:

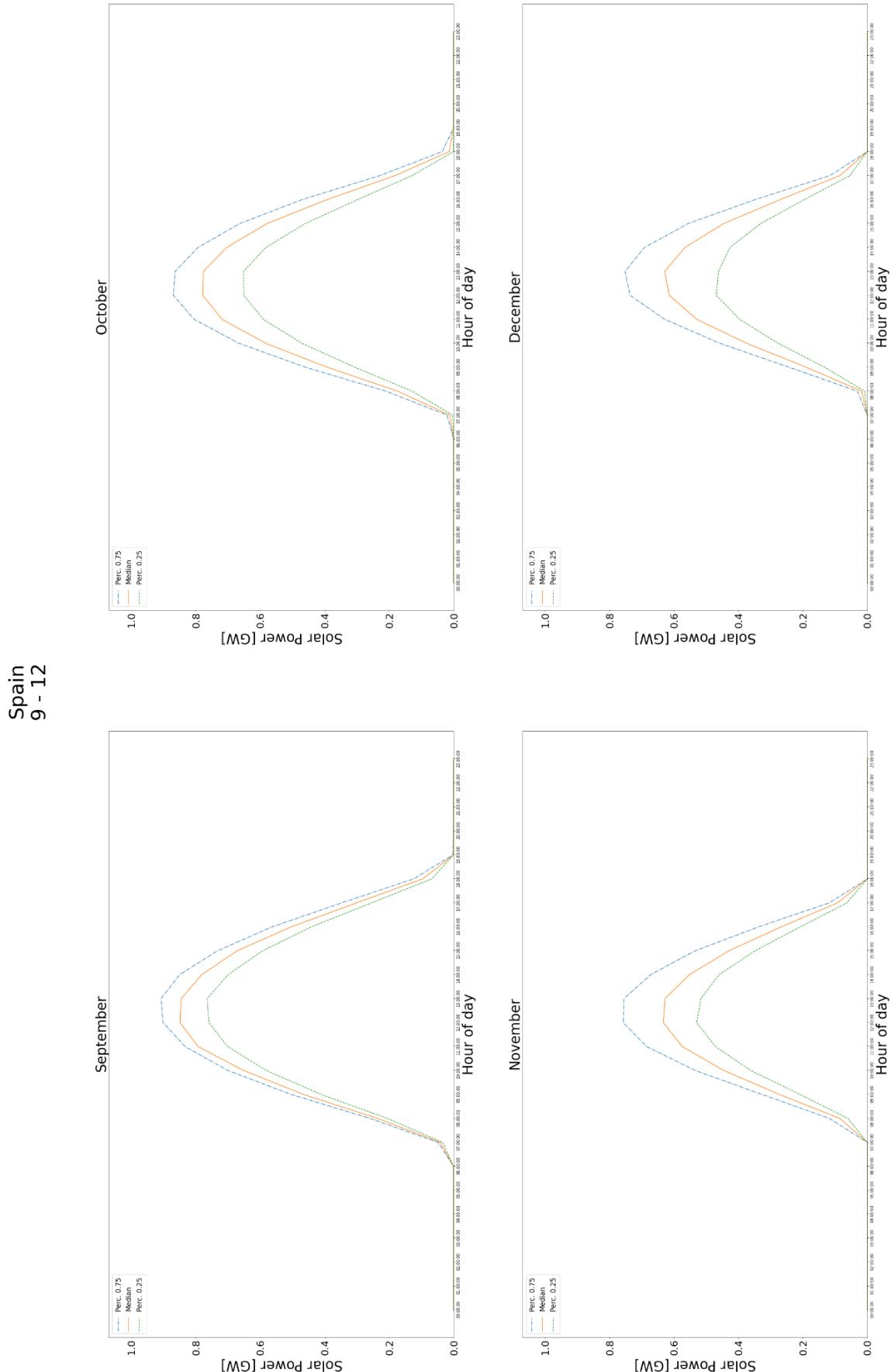
**GRÁFICO 2.3.** Primer cuatrimestre del año en España



**GRÁFICO 2.4.** Segundo cuatrimestre del año en España



**GRÁFICA 2.5.** Tercer cuatrimestre del año en España



De estos resultados es de interés resaltar particularmente en los meses de noviembre a marzo como tres cuartas partes de los días alcanzan la generación del 50% de la capacidad instalada o más en todos los meses y la mediana ronda el 65% de esa capacidad.

En los meses de abril a octubre se tiene que tres cuartas partes de los alcanzan casi el 80% de la capacidad instalada. Se puede decir que la generación a lo largo del año es, a pesar de la variabilidad estacional, muy buena. En este país se tendrían dos terceras partes excelentes del año para la generación e incluso en los meses malos la producción es en absoluto desdeñable.

En suma, a lo largo de todo el año, se está generando la siguiente cantidad de energía:

**TABLA 2.2. y TABLA 2.3.** Producción total por año y estadísticas descriptivas

GWh Spain	
2008	2012.569220
2009	2068.497769
2010	1972.003100
2011	2057.090720
2012	2105.052562
2013	2028.475450
2014	2000.478708
2015	2067.116762
2016	2012.581051
2017	2132.433017

GWh Spain	
count	10.000000
mean	2045.629836
std	49.576938
min	1972.003100
25%	2012.572178
50%	2042.783085
75%	2068.152517
max	2132.433017

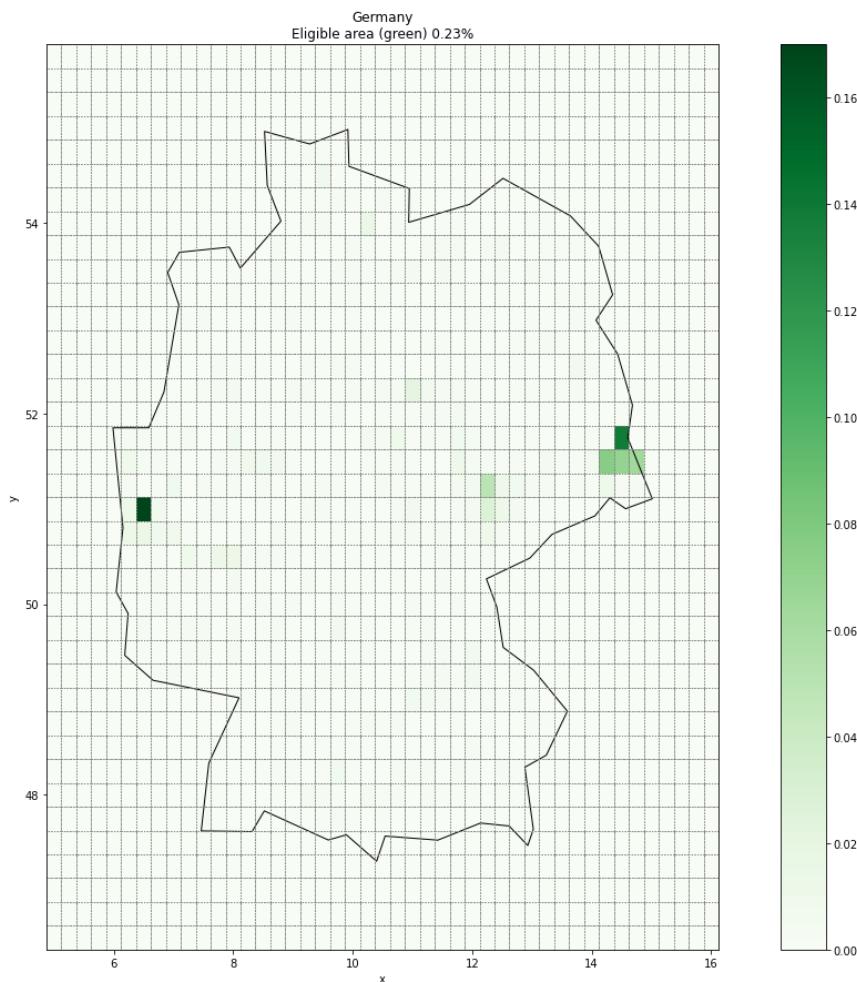
A primera vista es claro que la producción anual es poco variable. Considerando que la demanda anual de energía en España es de alrededor de 250,000 GWh y que, como en todo el mundo, esta demanda tenderá a crecer, la perspectiva de surtir la futura demanda con fuentes renovables en terrenos ociosos debe resultar atractiva tanto para los actores gubernamentales como la ciudadanía en general.

El otro punto de interés era que la producción fuera suficientemente grande para ser considerada relevante: es evidente que 2000 GWh son una gran cantidad de energía.

### 2.3.2. Producción en Alemania

Una vez más, es pertinente la revisión del mapa territorial acotado al uso de suelo de interés. Se tiene lo siguiente:

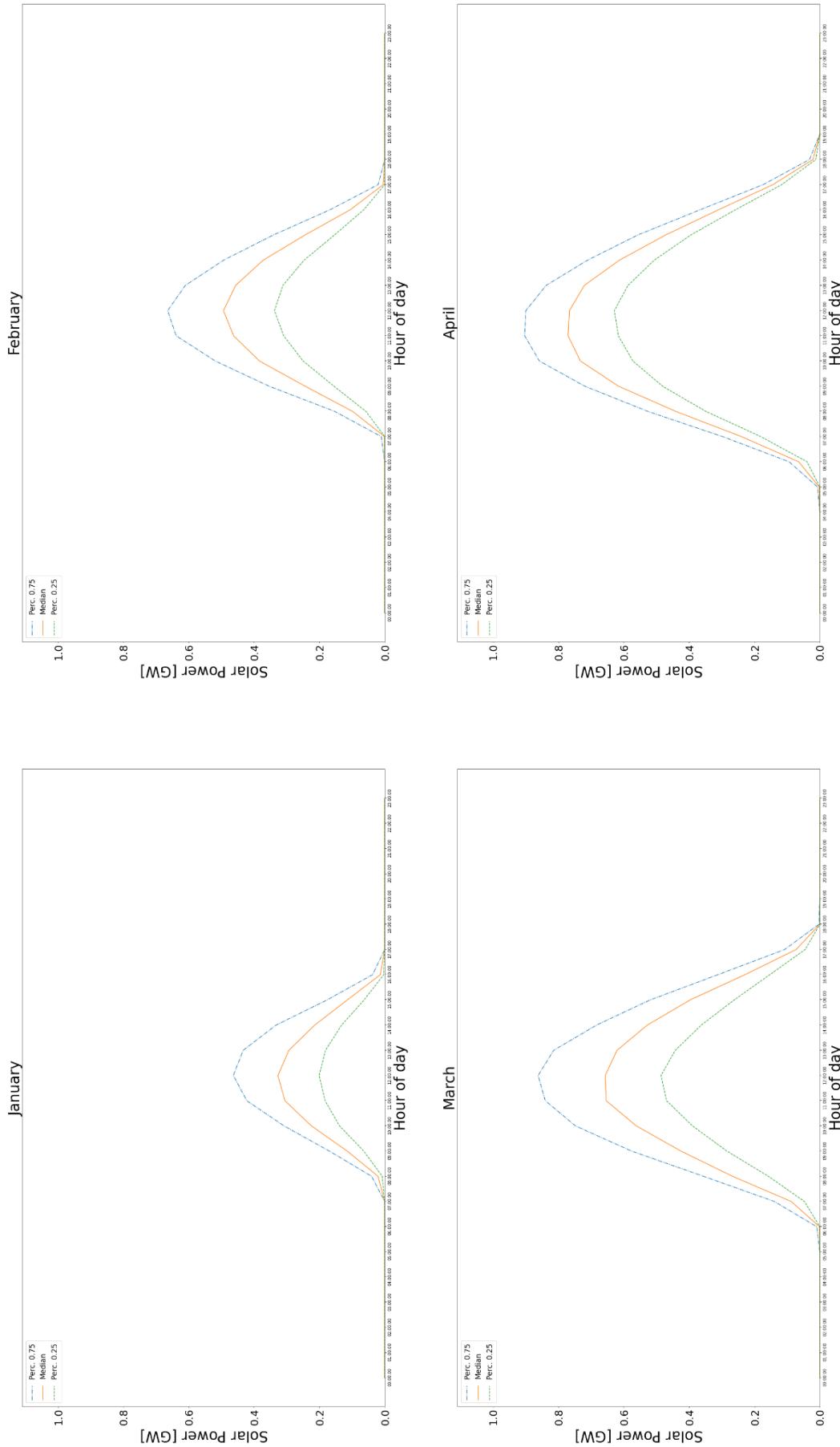
**MAPA 2.2.** Área disponible en Alemania



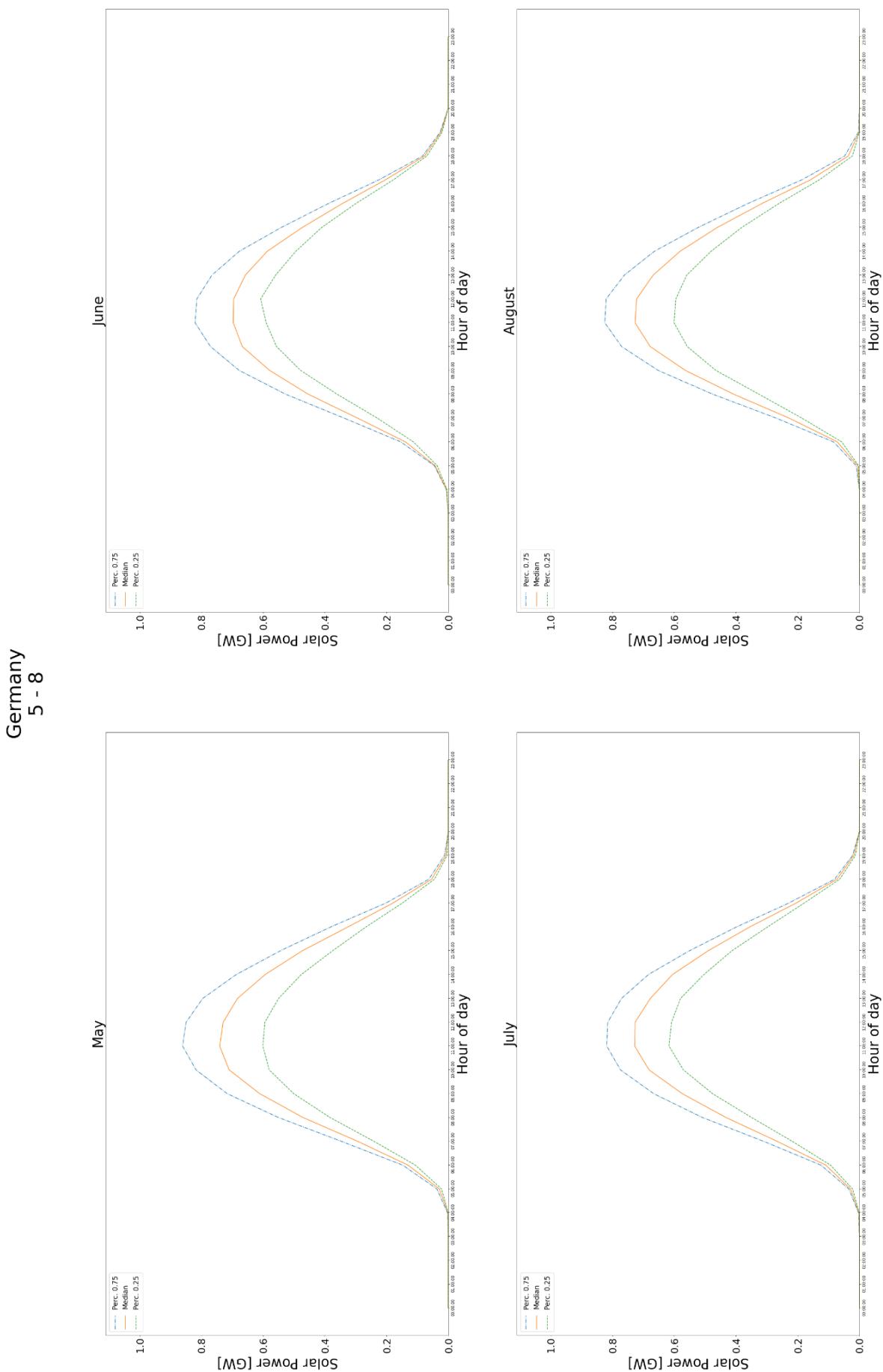
Es sabido que las condiciones climatológicas son menos favorables en este país. Sin embargo, se mostrará que a largo plazo incluso en un territorio más hostil la inversión será confiable. Una vez más, se muestran las gráficas de la producción en cada mes:

**GRÁFICA 2.6.** Primer cuatrimestre del año en Alemania

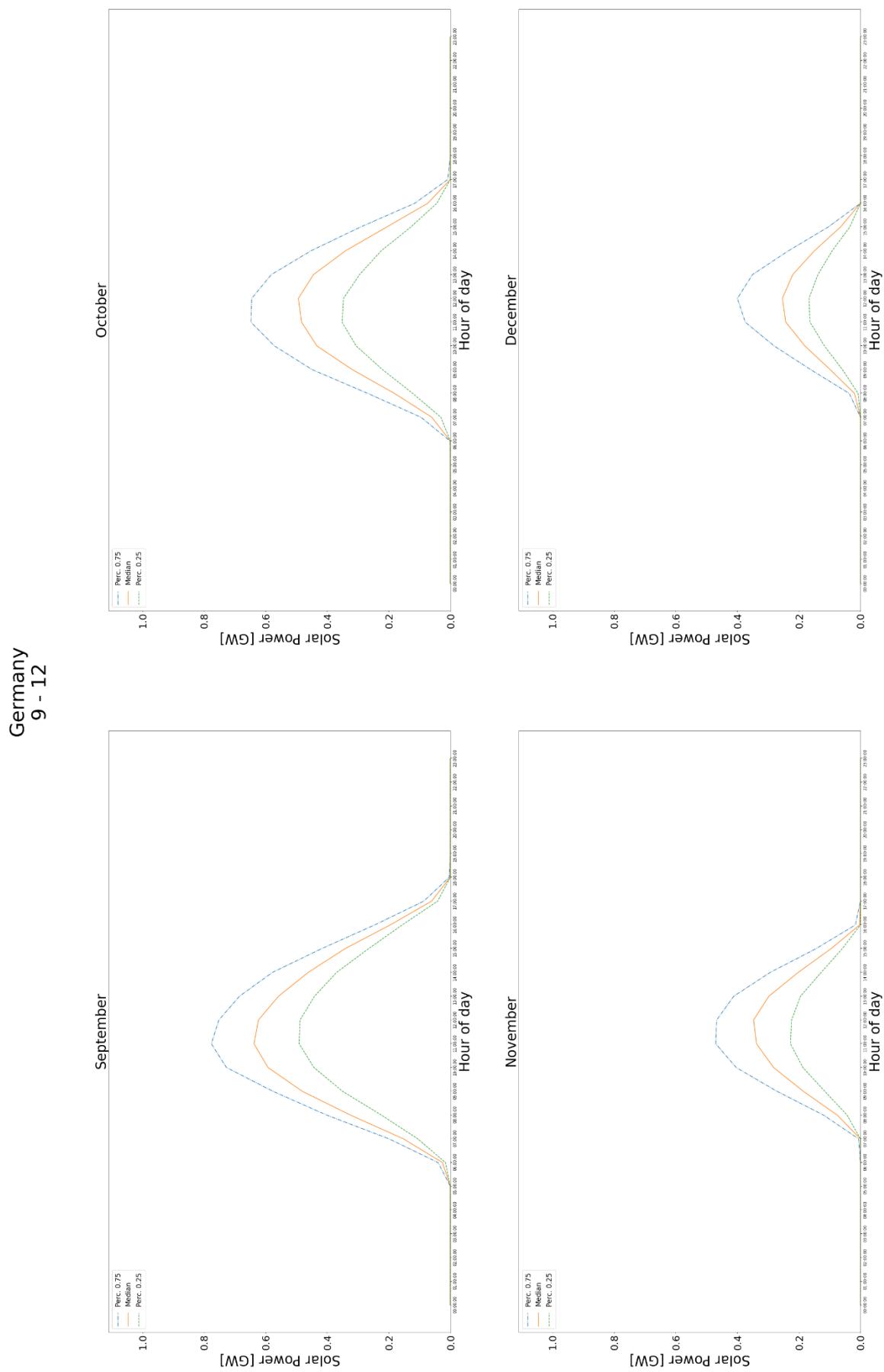
Germany  
1 - 4



**GRÁFICA 2.7.** Segundo cuatrimestre del año en Alemania



**GRÁFICA 2.8.** Tercer cuatrimestre del año en Alemania



Inmediatamente resalta que de noviembre a enero son meses malos para los paneles fotovoltaicos en el país. Consistentemente se alcanza únicamente hasta el 30% de la capacidad de generación. En los mejores casos apenas se alcanza a rebasar el 40% de ésta. No parece atractivo, sin embargo sumándose la producción en estos meses, al igual que en el total anual, serán muchos GWh.

Se observa que de marzo a septiembre la producción consistentemente ronda el 70% de la capacidad de instalada y por lo tanto se podrá decir que se tendría medio año de buena generación en energía solar.

**TABLAS 2.3.3 y 2.3.4** Producción total por año y estadísticas descriptivas

GWh Germany	
2008	1474.065860
2009	1483.227915
2010	1449.498471
2011	1594.108377
2012	1526.017762
2013	1406.765194
2014	1510.099366
2015	1550.228983
2016	1499.200884
2017	1474.287475

GWh Germany	
count	10.000000
mean	1496.750029
std	52.611177
min	1406.765194
25%	1474.121264
50%	1491.214399
75%	1522.038163
max	1594.108377

Se observa que en los diez años la variabilidad es bastante poca: se pueden esperar alrededor de 1500 GWh en cada año. Una producción menor a la de España, pero que esclarece los problemas en cuestión: la energía generada en un año es constante y significativa en ambos territorios.

## 2.4. Extrapolación a México

Considerando que el potencial eléctrico que se tuvo durante la simulación fue de 1 GW tanto en Alemania como en España, suena verosímil decir que existe un mayor potencial en México por su mayor extensión territorial.

Ahora bien, aunque al ser un país con cuatro veces más territorio que España y casi cinco veces más que en Alemania, para los fines de esta evaluación como oportunidad de negocios se supondrán 1 GW de capacidad total del país en este tipo de parques, que es la mitad de lo que actualmente se ha instalado en EEUU en proyectos similares.

Siguiendo con el símil de la simulación, supongamos que el caso de Alemania será el escenario base y piso de referencia de la producción total en un año en México, 1500 GWh, y que España será el mejor escenario posible y techo, con producción total anual de 2000 GWh.

La International Renewable Energy Agency (IRENA) ha constatado que el costo de producir energía solar se ha desplomado un 82% en la última década, por lo que se podría asumir que el costo seguirá bajando no sólo conforme va incrementando la oferta sino también con los cambios tecnológicos que incrementan la eficiencia de las celdas. En economías emergentes como India ya se ha logrado bajar los costos de capital en energía solar a 677 USD/kW, que además de los paneles solares como tal incluye el costo de subestaciones elevadoras para transmitir, *tracking*, etc.

Debido a esto, instalar 1 GW de capacidad implicaría una inversión de unos 677 millones de dólares (aunque esta cifra no considera los costos incurridos por el financiamiento como tal).

Basándose en precios anteriores de subastas y mercado energético en México para energías limpias, se tendría aproximadamente un precio de venta de 50 USD / MWh (conservativo, según los precios de mercado que se han visto en el país). Retomando las producciones anuales que se establecieron como piso y techo se estaría hablando de un negocio con ventas anuales de entre 75,000,000 de dólares (1,500 GWh a 50 USD / MWh) y 100,000,000 de dólares (2,000 GWh a 50 USD/ MWh).

Cabe aclarar también que la cifra mencionada en la introducción acerca de la generación de electricidad por luz de 1 kW por cada metro cuadrado es la cifra del promedio global. Tomando la

siguiente captura de Global Solar Atlas es evidente que México será un país con una producción muy por arriba de esa media:

**IMAGEN 2.1** Mapa solar de algunas regiones del mundo



Global Solar Atlas

También es claro que superará en irradiación por metro cuadrado tanto a España como a Alemania. Con total confianza se podrá decir que la producción que se está considerando para fines de negocios está muy subestimada: se estaría generando significativamente más energía (y por lo tanto ventas).

Simplificando la situación y temporalmente asumiendo que no hubo ningún financiamiento externo ni costos variables, se estaría hablando de que la inversión se recuperará en poco menos de 9 años en el peor de los casos. Considerando que la vida útil que las empresas de paneles solares garantizan actualmente a sus productos ronda los 25 años, parece un buen periodo de retorno. Más aún, en algunos proyectos de EEUU estos periodos han llegado a ser menores por las facilidades y ayuda que llegan a dar los gobiernos en cuanto a tasas preferenciales y exenciones de impuestos por invertir en energías que favorecen a la comunidad.

Un posible ejemplo para un primer proyecto en México sería el siguiente:

**IMAGEN 2.2.** Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco



Google Earth

De los proyectos de EPA que dan la información sobre la capacidad de sus parques, así como del área que ocupan, se tiene que en promedio 1 MW instalado requiere de 0.7 hectáreas de área. En la imagen mostrada anteriormente se puede observar que en esta planta de tratamiento de agua se tienen más de 80 hectáreas de área disponible para potencialmente instalar paneles.

Tomando como promedio las 5 horas de luz utilizables que tiene Pachuca como referencia para lo que se tendría en este parque, claramente hay sobre la mesa un gran potencial eléctrico disponible.

### **3. CONCLUSIONES**

Cabe recordar que al tener un territorio casi cuatro veces más grande que España, cuyo potencial energético en terrenos *dump* es de 1 GW según la simulación, con total certeza el potencial energético solar de estos terrenos será superior al 1 GW en México. Queda claro que estos serán espacios que en conjunto presentan oportunidades para grandes proyectos con buenos retornos y que esto será igualmente verdadero tanto para el conjunto global como para una inversión más factible para un grupo de inversionistas más pequeño. Un ejemplo sería replicar la planta de White Pine Renewables sobre un estanque de aguas residuales con capacidad de 5 MW en el norte de California. Ésta ha sido redituable a tal grado que la empresa actualmente está desarrollando otro proyecto así en Michigan.

Dados los costos de capital y que los requisitos en términos de cantidad de terreno, así como que los terrenos *dump* están esencialmente ociosos, los costos de entrada no serán un impedimento insuperable para invertir en estos proyectos. En cuanto a barreras legales, por el momento se puede proceder sin problemas, aunque habrá que estar al pendiente de la legislación vigente en cuanto a esto.

Debido a esto y a la suficiente constancia en la generación de electricidad con paneles solares, así como a que el tamaño en términos absolutos de ésta es significativa, se recomienda buscar y promover proyectos que busquen desarrollar parques solares fotovoltaicos en el país en terrenos *dump*. Estos generarán buenos flujos de efectivo, buenos retornos, generarán empleos y beneficios en las comunidades en que se implementen.

## ANEXO 1: USOS DE SUELO DE COPERNICUS

LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
1. ARTIFICIAL SURFACES	1.1. Urban fabric	1.1.1. Continuous urban fabric 1.1.2. Discontinuous urban fabric
	1.2. Industrial, commercial and transport units	1.2.1. Industrial or commercial units 1.2.2. Road and rail networks and associated land 1.2.3. Port areas 1.2.4. Airports
	1.3. Mine, dump and construction sites	1.3.1. Mineral extraction sites 1.3.2. Dump sites 1.3.3. Construction sites
	1.4. Artificial, non-agricultural vegetated areas	1.4.1. Green urban areas 1.4.2. Sport and leisure facilities
2. AGRICULTURAL AREAS	2.1. Arable land	2.1.1. Non-irrigated arable land 2.1.2. Permanently irrigated land 2.1.3. Rice fields
	2.2. Permanent crops	2.2.1. Vineyards 2.2.2. Fruit trees and berry plantations 2.2.3. Olive groves
	2.3. Pastures	2.3.1. Pastures
	2.4. Heterogeneous agricultural areas	2.4.1. Annual crops associated with permanent crops 2.4.2. Complex cultivation patterns 2.4.3. Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation 2.4.4. Agro-forestry areas
3. FOREST AND SEMI-NATURAL AREAS	3.1. Forests	3.1.1. Broad-leaved forest 3.1.2. Coniferous forest 3.1.3. Mixed forest
	3.2. Scrub and/or herbaceous associations	3.2.1. Natural grassland 3.2.2. Moors and heathland 3.2.3. Sclerophyllous vegetation 3.2.4. Transitional woodland-scrub
	3.3. Open spaces with little or no vegetation	3.3.1. Beaches, dunes, sands 3.3.2. Bare rocks 3.3.3. Sparsely vegetated areas 3.3.4. Burnt areas 3.3.5. Glaciers and perpetual snow
	3.4. Water bodies	3.4.1. Rivers, streams, brooks 3.4.2. Lakes 3.4.3. Ponds 3.4.4. Wet meadows 3.4.5. Marshes
4. WETLANDS	4.1. Inland wetlands	4.1.1. Inland marshes 4.1.2. Peat bogs
	4.2. Marine wetlands	4.2.1. Salt marshes 4.2.2. Salines 4.2.3. Intertidal flats
5. WATER BODIES	5.1. Inland waters	5.1.1. Water courses 5.1.2. Water bodies
	5.2. Marine waters	5.2.1. Coastal lagoons 5.2.2. Estuaries 5.2.3. Sea and ocean

## ANEXO 2: CÓDIGO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN

```
import atlite
import xarray as xr
import geopandas as gpd
import matplotlib.pyplot as plt
from rasterio.plot import show
from atlite.gis import shape_availability, ExclusionContainer
import pandas as pd
import os
os.chdir('../Titulación/Archivos')
## Para simulación
def solar_year(country,year):
    cadmio = atlite.solarpanels.CSi
    os.chdir('../Titulación/Archivos')
    world = gpd.read_file(gpd.datasets.get_path('naturalearth_lowres'))
    countries = [country]
    shapes = world[world.name.isin(countries)].set_index('name')
    bounds = shapes.unary_union.buffer(1).bounds
    name = country+str(year)+".nc"
    cutout = atlite.Cutout(name, module='era5', bounds=bounds,
    time=slice(str(year)+'-01-01', str(year+1)+'-01-01'))
    CORINE = 'corine.tif'
    excluder = ExclusionContainer()
    incluir = dump
    excluder.add_raster(CORINE, codes=incluir, invert=True)
    pais = shapes.loc[[country]].geometry.to_crs(excluder.crs)
    masked, transform = shape_availability(pais, excluder)
    eligible_share = masked.sum() * excluder.res**2 / pais.geometry.item().area
    A = cutout.availabilitymatrix(shapes, excluder)
    cap_per_sqkm = 1.7
    area = cutout.grid.set_index(['y', 'x']).to_crs(3035).area / 1e6
    area = xr.DataArray(area, dims=('spatial'))
```

```

capacity_matrix = A.stack(spatial=['y', 'x']) * area * cap_per_sqkm
cutout.prepare()

pv = cutout.pv(matrix=capacity_matrix, panel=cadmio,
                orientation='latitude_optimal', index=shapes.index)

pv.to_pandas().to_csv('Output/' + country + str(year) + '.csv')

## Para mapa

def area_elegible(country, includer):

    os.chdir('../Titulación/Archivos')

    world = gpd.read_file(gpd.datasets.get_path('naturalearth_lowres'))
    countries = [country]

    shapes = world[world.name.isin(countries)].set_index('name')

    bounds = shapes.unary_union.buffer(1).bounds

    name = country + ".nc"

    cutout      = atlite.Cutout(name,      module='era5',      bounds=bounds,
time=slice('2009-01-01', '2010-01-01'))

    CORINE = 'corine.tif'

    excluder = ExclusionContainer()

    incluir = dump

    excluder.add_raster(CORINE, codes=incluir, invert=True)

    pais = shapes.loc[[country]].geometry.to_crs(excluder.crs)

    masked, transform = shape_availability(pais, excluder)

    eligible_share = masked.sum() * excluder.res**2 / pais.geometry.item().area

    A = cutout.availabilitymatrix(shapes, excluder)

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(20,15))

    A.sel(name=country).plot(cmap='Greens')

    shapes.loc[[country]].plot(ax=ax, edgecolor='k', color='None')

    cutout.grid.plot(ax=ax, color='None', edgecolor='grey', ls=':')

    ax.set_title(f'{country}\nEligible area (green) {eligible_share * 100:2.2f} %');

```

## REFERENCIAS

Atlite. Fecha de consulta 1 de febrero de 2022. Disponible en

<<https://github.com/PyPSA/atlite>>

CENACE. 2022. *Precios de energía y servicios conexos MTR*. Fecha de consulta 6 de mayo de 2022. Disponible en

<<https://www.cenace.gob.mx/Paginas/SIM/Reportes/PreEnerServConMTR.aspx>>

Copernicus. *Europe's eyes on Earth*. Fecha de consulta 21 de enero de 2022. Disponible en

<<https://www.copernicus.eu/en>>

Copernicus. *CLC product user manual*. Disponible en

<<https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc-product-user-manual>>

Energías renovables. 2020. *España 2020, el país con 110.000 megavatios de potencia eléctrica y un máximo de demanda de 40.000*. Fecha de consulta 1 de mayo de 2022. Disponible en

<<https://www.energias-renovables.com/panorama/espana-2020-el-pais-con-110-000-20200124>>

EnergyData.info. *Global Solar Atlas*. Fecha de consulta 10 de mayo de 2022. Disponible en

<<https://globalsolaratlas.info/map?c=25.165173,-76.464844,3&s=31.052934,-116.191406&m=site&pv=hydro,180,10,1000>>

EPA. Octubre 2021. *Project tracking matrix*. Disponible en:

<[https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/re\\_on\\_cl\\_tracking\\_matrix\\_110321\\_508.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-11/re_on_cl_tracking_matrix_110321_508.pdf)>

Geopandas. Fecha de consulta 2 de febrero de 2022. Disponible en

<<https://geopandas.org/en/stable/>>

IEA. Actualizada 2020. *Capital costs of utility-scale solar PV in selected emerging economies*.

Fecha de consulta 1 de mayo de 2022. Disponible en

<<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/capital-costs-of-utility-scale-solar-pv-in-selected-emerging-economies>>

IRENA. 2021. *Renewable power generation costs in 2020*. Disponible en:

<[https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf)>

Mueller R. 2012. *Energy for future presidents*. Primera edición. Nueva York, EE UU: W.W. Norton. pp. 145 y 151

PV Magazine. 2021. *Watch: White Pine Renewables completes a floating solar project, one of the largest in the US*. Fecha de consulta 15 de abril de 2022. Disponible en <<https://pv-magazine-usa.com/2021/03/03/watch-white-pine-completes-a-floating-solar-project-one-of-the-largest-in-the-us/>>

PV Magazine. 2021. *White Pine Renewables to develop Michigan's first floating solar project*. Fecha de consulta 6 de mayo de 2022. Disponible en <<https://pv-magazine-usa.com/2021/11/19/white-pine-renewables-to-develop-michigans-first-floating-solar-project/>>

PyPSA. *Python for Power System Analysis*. Fecha de consulta 1 de febrero de 2022. Disponible en <<https://pypsa.org/>>

Romero S; Romero O.; Wood D. 2011. *Energías renovables : impulso político y tecnológico para un México sustentable*. Primera edición. México. ITAM.

Sistema de información energética. Secretaría de energía. *Balance Nacional de Energía: Indicadores económicos y energéticos*. Fecha de consulta: 9 de mayo de 2022. Disponible en <<https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE0C01>>

Solar reviews. Actualizada 2022. *What is a peak sun hour? What are peak sun hour numbers for your state?*. Fecha de consulta: 2 de mayo de 2022. Disponible en  
[<https://www.solarreviews.com/blog/peak-sun-hours-explained>](https://www.solarreviews.com/blog/peak-sun-hours-explained)

Solar Reviews. Actualizada febrero 2022. *Compared solar panel warranty information for SunPower, LG, Panasonic and Canadian Solar solar panels*. Fecha de consulta 10 de mayo de 2022. Disponible en  
[<https://www.solarreviews.com/blog/compared-solar-panel-warranty-information-for-sunpower-lg-panasonic-and-canadian-solar-solar-panels>](https://www.solarreviews.com/blog/compared-solar-panel-warranty-information-for-sunpower-lg-panasonic-and-canadian-solar-solar-panels)

Statista. 2022. *Demanda nacional de electricidad en España de 2011 a 2021 (en giga-vatios hora)*. Fecha de consulta 1 de mayo de 2022. Disponible en  
[=>](https://es.statista.com/estadisticas/991069/consumo-final-de-electricidad-en-espana/)

U.S. Energy Information Administration. Actualizada 2021. *How much electricity does an American home use?*. Fecha de consulta 28 de abril de 2022. Disponible en  
[<https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=97&t=3>](https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=97&t=3)

Worldometers. *Largest countries in the World (by area)*. Fecha de consulta 10 de mayo de 2022. Disponible en [<https://www.worldometers.info/geography/largest-countries-in-the-world>](https://www.worldometers.info/geography/largest-countries-in-the-world)