

METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA SOLAR DE LA HABANA (CUBA)

Martín Ávila, A.M.
Domínguez Bravo, J.
Zarzalejo Tirado, L.F.
Domínguez Benito, M.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

Publicación disponible en el [Catálogo general de publicaciones oficiales](#).

© CIEMAT, 2022

ISSN: 2695-8864

NIPO: 832-22-008-0

Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: editorial@ciemat.es

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA SOLAR DE LA HABANA (CUBA)

Martín Ávila, A.M.; Domínguez Bravo, J.; Zorzalejo Tirado, L.F.; Domínguez Benito, M.

53 pp, 34 fig., 28 tbl., 64 ref.

Resumen:

El aprovechamiento del potencial solar de un tejado está determinado por la superficie disponible, la radiación incidente y la producción final de energía. Para establecer este potencial, a nivel de toda una ciudad o vecindario, es preciso contar con información geográfica de una resolución y calidad adecuadas. En el caso de La Habana (Cuba) ha sido necesario diseñar una metodología *ad-hoc* ajustada a los datos disponibles. Las imágenes de *Sentinel-2*, *Google Earth* y la cartografía de *OpenStreetMap* son los recursos básicos disponibles para el desarrollo de esta nueva metodología. La unidad de representación, de acuerdo a la escala y resolución de estas bases de datos, serán las manzanas. Con la interpretación de las ortoimágenes se analiza la densidad de edificación, su tipología y se identifican las formas de los tejados. La aplicación del índice de vegetación NDVI a las imágenes *Sentinel-2* permiten evaluar la distribución de las zonas arboladas que pueden generar sombras y limitan la generación de energía solar. Estos datos proporcionan una base suficiente para estimar la superficie potencial de captación solar en el caso de estudio. La implementación de esta metodología ha permitido obtener un primer mapa web del potencial solar del municipio de Guanabacoa (La Habana) al que seguirán otras áreas de la provincia. Los resultados obtenidos en su aplicación arrojan un balance optimista para el desarrollo solar de la ciudad.

METHODOLOGY FOR THE ELABORATION OF THE HAVANA SOLAR MAP (CUBA)

Martín Ávila, A.M.; Domínguez Bravo, J.; Zorzalejo Tirado, L.F.; Domínguez Benito, M.

53 pp, 34 fig., 28 tbl., 64 ref.

Abstract:

Available surface area, incident radiation and final energy generation determine the utilisation of the roof's solar potential. To establish this potential, at the level of an entire city or neighbourhood, it is necessary to have geographic information of adequate resolution and quality. In the case of Havana (Cuba), it has been necessary to design an ad-hoc methodology adjusted to the available data. Sentinel-2 images, Google Earth and OpenStreetMap cartography are the basic resources available for the development of this new methodology. The blocks will be the representation unit. With the orthoimage's interpretation, the building density and typology are analysed and the roof shapes are identified. The application of the NDVI vegetation index to the Sentinel-2 images provides the distribution of wooded areas that can generate shadows and limit the generation of solar energy to be assessed. These data provide a sufficient basis for estimating the potential solar collector area in the case study. The implementation of this methodology has made it possible to obtain a first approximation web map of the solar potential of the municipality of Guanabacoa (Havana), which will be followed by new areas in the rest of the province. The results obtained in its application show an optimistic balance for the city's solar development.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	8
2	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
3	FUENTES DE DATOS CONSULTADOS.....	11
	3.1 BASE CARTOGRÁFICA.....	11
	3.2 IMÁGENES DE SATÉLITE	12
	3.3 MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE	14
	3.4 OTROS DATOS CONSULTADOS.....	15
4	METODOLOGÍA	17
	4.1 DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE TEJADOS DISPONIBLE	17
	4.2 EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR	35
	4.3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR	37
5	RESULTADOS	41
	5.1 SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS GLOBALES DE GUANABACOA.....	41
	5.2 GEOPORTAL PARA LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	44
6	CONCLUSIONES	47
7	BIBLIGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Población del municipio de Guanabacoa en el periodo 2016-2021 [12], [13].	9
Figura 2.	Mapa de situación de los Consejos Populares del municipio de Guanabacoa.	10
Figura 3.	Ejemplo de los datos originales descargados de OpenStreetMap y del resultado después de editar la información.	11
Figura 4.	Resolución espacial y longitud de onda de las imágenes Sentinel-2 [20].	13
Figura 5.	Imágenes Sentinel 2 de la zona de Guanabacoa.	14
Figura 6.	Modelo Digital de Superficie de la JAXA para la zona de Guanabacoa.	14
Figura 7.	Visor del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico (PVGIS).	15
Figura 8.	Visor Global Climate Monitor.	16
Figura 9.	Esquema general de la metodología para determinar el potencial solar de Guanabacoa.	17
Figura 10.	Muestra de los edificios representados en la cartografía de OpenStreetMap para el municipio de Guanabacoa.	18
Figura 11.	Ejemplo de la definición de las imágenes Sentinel-2.	18
Figura 12.	Porcentaje de superficie edificada del suelo. Guanabacoa.	19
Figura 13.	Ejemplos de parcelas urbanas para las diferentes categorías de ocupación del suelo.	20
Figura 14.	Ejemplo de los tipos de tejado de una parcela industrial.	21
Figura 15.	Comportamiento espectral de la vegetación [37][38].	22
Figura 16.	Índice NDVI de la imagen Sentinel-2 (03/04/2020). Guanabacoa.	23
Figura 17.	Índice NDVI de la imagen Sentinel-2 (03/04/2020) para dos de los valores establecidos (0,4 y 0,6).	24
Figura 18.	Esquema general de una matriz de confusión con dos clases.	25
Figura 19.	Puntos de control en una zona del núcleo urbano de Guanabacoa.	26
Figura 20.	Muestra de las parcelas urbanas seleccionadas según la ocupación del suelo.	28
Figura 21.	Ejemplo de la superficie calculada para una parcela con OS alta con dos imágenes diferentes: (a) GBCOA_5_20190129 (umbral 0,40) y (b) GBCOA_6_20190429 (umbral 0,40).	28
Figura 22.	Superficie de tejados disponible. Guanabacoa.	35

Figura 23. Irradiación solar global anual. Guanabacoa.....	35
Figura 24. Fotovoltaica: Potencia instalable para módulos de silicio multicristalino. Guanabacoa.	38
Figura 25. Fotovoltaica: Potencia instalable para módulos de silicio monocristalino. Guanabacoa.	39
Figura 26. Fotovoltaica: Energía anual generada para módulos de silicio multicristalino. Guanabacoa.	39
Figura 27. Fotovoltaica: Energía anual generada para módulos de silicio monocristalino. Guanabacoa.	39
Figura 28. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores planos no selectivos. Guanabacoa.	40
Figura 29. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores planos selectivos. Guanabacoa.	40
Figura 30. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores de tubo de vacío. Guanabacoa.	40
Figura 31. Porcentaje de la superficie urbanizada en relación el porcentaje de ocupación del suelo por edificaciones.....	41
Figura 32. Vista del geoportal Habana Ciudad Solar - Guanabacoa en ArcGIS Online.....	45
Figura 33. Ventana emergente. Geoportal Habana Ciudad Solar - Guanabacoa.	45
Figura 34. Vista del geoportal Habana Ciudad Solar - Guanabacoa en QGIS Cloud.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ficheros descargados con las imágenes de satélite Sentinel-2 para la zona de Guanabacoa.	13
Tabla 2.	Ficheros descargados con los MDE para la zona de Guanabacoa.	15
Tabla 3.	Valores de porcentaje para la ocupación del suelo por los edificios.....	19
Tabla 4.	Clasificación de los edificios por su uso.	20
Tabla 5.	Intervalos correspondientes al grado de acuerdo de los valores del coeficiente Kappa.....	25
Tabla 6.	Resultados para NDVI del porcentaje de acuerdo y coeficiente Kappa.	27
Tabla 7.	Imágenes Sentinel-2 seleccionadas para identificar las zonas arboladas.	29
Tabla 8.	Valores de porcentaje para la ocupación por el arbolado de las parcelas urbanas.	29
Tabla 9.	Valores para la restricción de construcción para cada tipo de edificios.	31
Tabla 10.	Valores para la restricción de sombras para los edificios industriales (industriales, agrícola / ganadero).	32
Tabla 11.	Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales apartamentos.....	32
Tabla 12.	Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales heterogéneos.	33
Tabla 13.	Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales aislados.	33
Tabla 14.	Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (administración, comercial y cultural).	33
Tabla 15.	Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (sanitario y educación).....	33
Tabla 16.	Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (penitenciario).....	33
Tabla 17.	Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (deportivo, transporte, energía, religioso y cementerio).	34
Tabla 18.	Valores para la restricción de la forma de los tejados para las diferentes orientaciones.....	34
Tabla 19.	Rendimiento óptico (η_0) y factores de pérdidas (a_1 y a_2) de tres tipos genéricos de colectores solares térmicos.	38

Tabla 20.	Distribución de la superficie urbana según la clasificación de las parcelas por el uso de los edificios.	42
Tabla 21.	Superficie de tejados disponible para la instalación de paneles solares en relación al área urbana.	42
Tabla 22.	Potencia instalada para fotovoltaica en relación al área urbana. Módulos de silicio multicristalino.	42
Tabla 23.	Potencia instalada para fotovoltaica en relación al área urbana. Módulos de silicio monocristalino.	43
Tabla 24.	Energía fotovoltaica anual generada en relación al área urbana. Módulos de silicio multicristalino.	43
Tabla 25.	Energía fotovoltaica anual generada en relación al área urbana. Módulos de silicio monocristalino.	43
Tabla 26.	Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores planos no selectivos.	43
Tabla 27.	Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores planos selectivos.	44
Tabla 28.	Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores de tubo de vacío.	44

1 INTRODUCCIÓN

Los objetivos de desarrollo sostenible acordados por Cuba para el 2030 están orientados a proporcionar servicios energéticos no contaminantes y asequibles, promover la eficiencia e incrementar las fuentes renovable en la producción energética [1]. En este sentido, el país mantiene una importante apuesta por el desarrollo de las energías renovables, tanto en generación distribuida como en sistemas aislados [2].

Desde este prisma, el proyecto Habana Ciudad Solar ha sido financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) con la referencia 2018/PRYC/001742. Sodepaz ha sido la entidad coordinadora y ha contado con Cubasolar y Cubaenergía como socios locales. El informe que aquí presentamos es, como no podía ser de otra forma, responsabilidad exclusiva de los autores firmantes, y no refleja, necesariamente, la postura de la AECID. Uno de los objetivos fundamentales del proyecto es la dotación de conocimiento científico y metodología propia para el análisis del potencial solar de toda la provincia de La Habana (Cuba). En este ámbito, el grupo de Tecnologías de la Información Geográfica y Energías Renovables del CIEMAT (gTIGER), trabaja en una línea de investigación dirigida a implementar herramientas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para incorporar los recursos renovables en las ciudades y potenciar el uso de la energía solar.

Uno de sus proyectos, [gSolarRoof](#) [3] está orientado a fomentar el desarrollo de modelos geográficos para la evaluación de la capacidad que tienen los entornos urbanos de generar su propia energía mediante la instalación de paneles solares en los edificios[4],[5]. Para este tipo de análisis geográficos, es habitual el empleo de cartografías urbanas catastrales como base para establecer su localización y superficie. Pueden encontrarse trabajos en los que se han considerado diferentes unidades geográficas de análisis, desde la escala nacional y regional[6], [7] a la local para las ciudades o distritos[8]. En la actualidad, los estudios relacionados con la evaluación del potencial solar emplean la tecnología LIDAR para la obtención de modelos tridimensionales de los edificios [9],[10]. Con los modelos digitales de superficies (MDS) obtenidos a partir de estos datos se puede definir la configuración del entorno urbano, identificar la forma de los tejados y determinar la distribución de la radiación solar.

Apoyándose en el conocimiento sobre cuáles son los parámetros que deben aplicarse en el estudio del aprovechamiento de la energía solar en zonas urbanas, se ha diseñado una metodología para la elaboración del mapa solar del municipio de Guanabacoa en la Provincia de La Habana. Primero, se presenta el área de estudio y la revisión de las fuentes de información recopiladas en las que se fundamentará la metodología. En según lugar, se describe el procedimiento para la estimación de la superficie de tejado disponible para instalar módulos solares. En esta sección se muestran los elementos que se han tenido en cuenta en la caracterización de la estructura urbana, el proceso para identificar las zonas con arbolado que puedan originar sombras a partir de la clasificación de las imágenes de satélite Sentinel-2, y los factores que se aplicarán para la obtención de la superficie potencial de captación en los tejados. A continuación, se describe el cálculo de la radiación solar global anual en la zona y la generación de energía fotovoltaica y térmica. Finalmente, se incluye una síntesis de los principales resultados obtenidos y su presentación en un geoportal web para la consulta de los mapas de Guanabacoa.

2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Guanabacoa es un municipio de la provincia de La Habana situado en la zona norte de la denominada región occidental de Cuba (latitud 23°6'29"N y longitud 82°13'57"O). El municipio, cercano a la Bahía de La Habana, limita al norte y al este con el municipio de Habana del Este, al suroeste con San Miguel del Padrón, al sur con Cotorro, al suroeste con San José de las Lajas y al oeste con Regla. El clima es tropical y se caracteriza por la influencia de su proximidad al mar. La temperatura media anual es de 25°C, los valores mínimos corresponden al mes de enero con 21,8°C y las máximas a agosto con 27,6°C. La precipitación media es de 1.200 milímetros, siendo el mes menos lluvioso marzo, mientras que mayo y octubre reciben las mayores precipitaciones [11]. Su relieve está formado por zonas de llanuras con la presencia de suaves colinas cuyas máximas alturas no superan los 160 m.

Guanabacoa es uno de los municipios de mayor extensión de la provincia y abarca un área de 129,48 km². La superficie del municipio más urbanizada se concentra en la zona oeste y representa aproximadamente el 16% de su territorio. La población, en continuo crecimiento, ha aumentado un 5% en los últimos seis años y actualmente el municipio cuenta con 127.445 habitantes (Figura 1). La densidad de población es la menor de la provincia (984,28 hab/Km²).

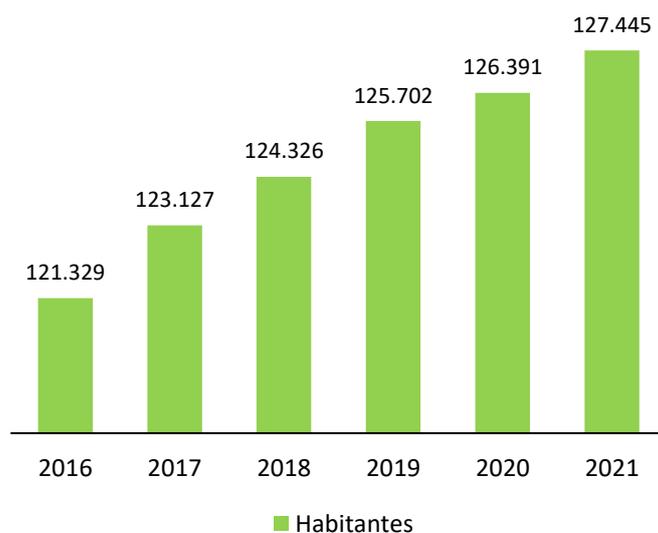


Figura 1. Población del municipio de Guanabacoa en el periodo 2016-2021 [12], [13].

El municipio está constituido por ocho consejos populares (Figura 2). Villa I que comprende el centro urbano y el casco histórico, Villa II, Mañana-Habana Nueva y Roble-Chibás, se sitúan al oeste del municipio. Se trata de las zonas de mayor densidad urbana en las que destaca el comercio, los servicios y algunas pequeñas industrias centradas mayoritariamente en la sideromecánica y el mineral. Al sur y oeste del centro urbano se encuentran D'Beche-Nalón, con un variado tejido industrial y empresarial y La Jata-Naranja. Ambos consejos populares representan zonas suburbanas con un nivel de urbanización intermedia. Hacia el este, Minas-Barreras junto con Peñalver-Bacuranao comprenden el área semirural del municipio. Esta zona es un territorio compuesto por comunidades y poblados independientes. La principal actividad económica está relacionada con el sector agropecuario y la producción de áridos con la presencia de algunas canteras.

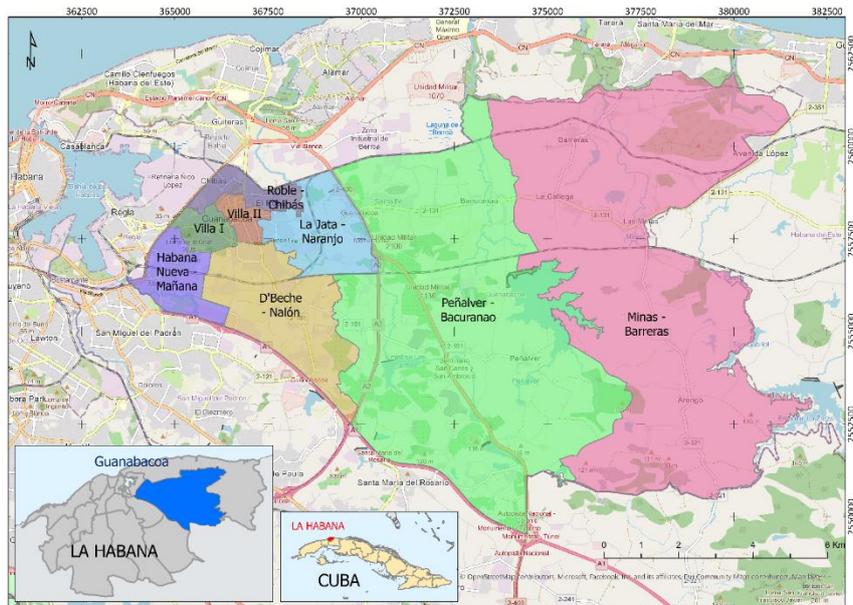


Figura 2. Mapa de situación de los Consejos Populares del municipio de Guanabacoa.

3 FUENTES DE DATOS CONSULTADOS

En la determinación del potencial solar es importante precisar cuál son los datos geográficos de partida disponibles para llevarlo a cabo. La revisión de las fuentes de datos se ha realizado en diferentes Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE) internacionales y bases de datos web que proporcionan datos cartográficos. Este caso de estudio se ha enfrentado a las limitaciones de realizar el análisis para una zona urbana con un escaso acceso a la información. La NASA [14], Google Earth [15] o algunos servicios web de la Unión Europea (UE), son algunos de los recursos que se han consultado. En general las IDE disponibles nos pueden proporcionar datos globales que abarcan el área del Caribe, aunque no suelen tener información urbana a la escala que necesitamos. Finalmente, se ha tenido en cuenta la condición de emplear datos de acceso libre que puedan ser consultados desde Cuba.

3.1 BASE CARTOGRÁFICA

En lo referente a la base cartográfica, se ha utilizado la información disponible en el proyecto de cartografía colaborativa OpenStreetMap que distribuye los datos generados bajo una licencia abierta [16]. Seleccionando una zona, el portal web permite descargar en bruto capas de datos vectoriales como las carreteras, hidrografía, límites administrativos, etc. Además, contiene información de usos del suelo y la localización de lugares o puntos de interés. Otra de las formas de acceder a las capas de datos para Cuba es la web de descarga Geofabrik [17]. También se puede hacer uso de la cartografía de OpenStreetMap como mapa base para visualizar los datos.

Los datos están agrupados en capas de líneas, puntos y polígonos en el sistema de coordenadas geográfica WGS 1984. Después de procesar toda la información (Figura 3), ha sido utilizado, principalmente, el entramado de la red viaria y la localización de algunos edificios del municipio. Aunque también, como complemento ha ayudado la clasificación de los usos del suelo que presentan algunos polígonos.

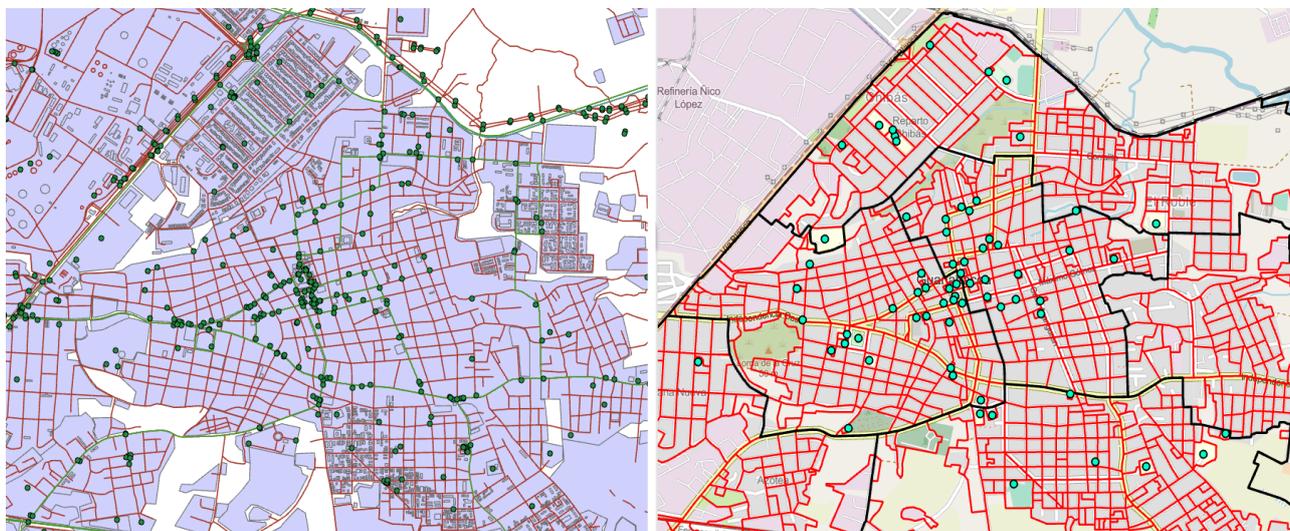


Figura 3. Ejemplo de los datos originales descargados de OpenStreetMap y del resultado después de editar la información.

3.2 IMÁGENES DE SATÉLITE

Otra de las fuentes de datos ha sido Copernicus, el programa de monitorización de la Tierra dirigido conjuntamente por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Unión Europea. Los datos geoespaciales que ofrecen están divididos en varias temáticas desde la observación atmosférica, terrestre y marina, a los programas de cambio climático y la gestión de emergencias. Entre los productos disponibles en este programa están la información proporcionada por las misiones Sentinel formadas por una constelación de satélites.

En este caso se han utilizado las imágenes de Sentinel-2 que monitoriza la superficie terrestre para estudiar la vegetación, los usos del terreno y de las aguas, los cauces navegables y las zonas costeras. Se trata de un satélite multispectral de alta resolución en órbita polar. Las imágenes representan los valores de reflectancia al nivel de la superficie, pero al tratarse de un sensor óptico no atraviesa la cobertura de nubes.

En general, las imágenes multispectrales capturan la información en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Permiten obtener información que el ojo humano no obtiene en el rojo, verde y azul. Las imágenes dividen la luz en varias bandas (entre 3 y 15). Existen también imágenes especiales, hiperespectrales que pueden tener cientos de bandas.

La misión Sentinel-2 está formada por un conjunto de dos satélites en órbita polar S2A y S2B, lanzados en junio de 2015 y marzo de 2017 respectivamente. Las características principales de la misión son las siguientes [18][19]:

- Los satélites revisitan un mismo lugar cada 10 días, pero al tratarse de dos satélites las imágenes tienen una resolución temporal de 5 días.
- La cobertura de la misión se sitúa entre las latitudes 56° S y 84° N y el ancho de la franja orbital abarca 290 km.
- Las imágenes tienen 13 bandas distribuidas en las regiones desde el visible (VIS) y el infrarrojo cercano (NIR) hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR). Hay 4 bandas de resolución espacial (tamaño del pixel) de 10 m, 6 bandas de 20 m y 3 bandas de 60 m. Las bandas de mayor resolución con 10 m son las del espectro visible (B2, B3, B4) correspondientes al rojo, verde y azul y una del infrarrojo cercano la banda 8 (Figura 4).
- La resolución radiométrica que indica la sensibilidad del sensor para captar pequeñas variaciones es de 12 bit (4.096 niveles de grises).

Las imágenes son de acceso libre y se pueden descargar en el visor de Copernicus *Open Hub* [21]. Para trabajar con las imágenes en Copernicus también disponen de un software llamado SNAP que también es gratuito y está preparado para el formato de imágenes que ofrecen [22]. Este programa permite procesar las imágenes, tiene herramientas para realizar clasificaciones y calcular índices espectrales para el estudio de la vegetación o el agua.

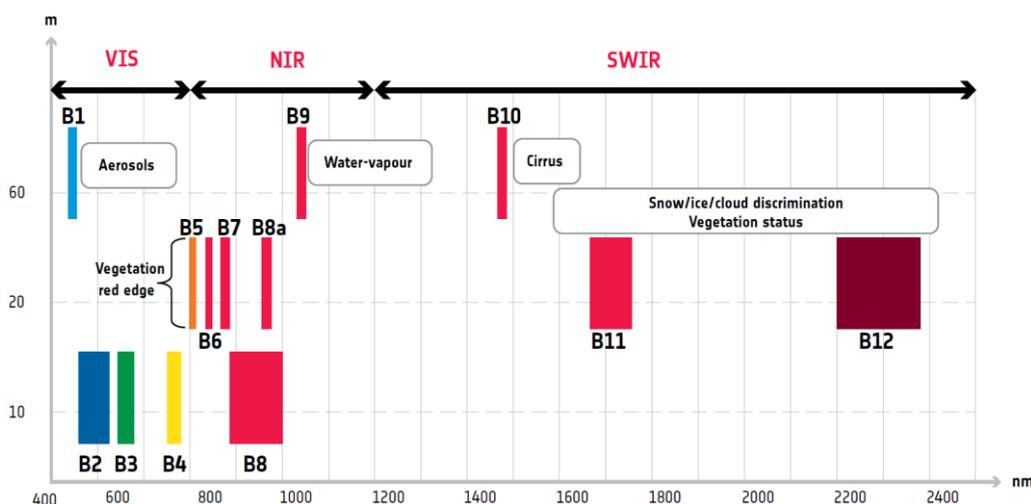


Figura 4. Resolución espacial y longitud de onda de las imágenes Sentinel-2 [20].

Las imágenes Sentinel-2 seleccionadas para el caso de Guanabacoa presentan un nivel 2A de procesamiento y ya se les ha aplicado correcciones atmosféricas (Figura 5). Además, están corregidas geométricamente y pueden ser georreferenciadas. Las imágenes pueden presentar nubosidad por lo que finalmente se ha obtenido una serie de 15 imágenes del periodo 2017 a 2021 (Tabla 1), aquellas con la menor presencia de nubes posible.

Número	Nombre del fichero	Satélite	Fecha	Imagen
1	S2A_MSIL1C_20171215T160651_N0206_R097_T17QLF_20171215T180208.zip	Sentinel 2A	15/12/2017	GBCOA_1_20171215.tif
2	S2B_MSIL1C_20171220T160649_N0206_R097_T17QLF_20171220T210954.zip	Sentinel 2B	20/12/2017	GBCOA_2_20171220.tif
3	S2A_MSIL1C_20180325T155911_N0206_R097_T17QLF_20180325T224013.zip	Sentinel 2A	25/03/2018	GBCOA_3_20180325.tif
4	S2B_MSIL1C_20181026T160339_N0206_R097_T17QLF_20181026T210944.zip	Sentinel 2B	26/10/2018	GBCOA_4_20181026.tif
5	S2A_MSIL2A_20190129T160521_N0211_R097_T17QLF_20190129T201604.zip	Sentinel 2A	29/01/2019	GBCOA_5_20190129.tif
6	S2A_MSIL2A_20190429T155911_N0211_R097_T17QLF_20190429T215021.zip	Sentinel 2A	29/04/2019	GBCOA_6_20190429.tif
7	S2A_MSIL2A_20190718T155911_N0213_R097_T17QLF_20190718T202937.zip	Sentinel 2A	18/07/2019	GBCOA_7_20190718.tif
8	S2B_MSIL2A_20191130T160619_N0213_R097_T17QLF_20191130T201643.zip	Sentinel 2B	30/11/2019	GBCOA_8_20191130.tif
9	S2A_MSIL2A_20200403T155901_N0214_R097_T17QLF_20200403T202919.zip	Sentinel 2A	03/04/2020	GBCOA_9_20200403.tif
10	S2B_MSIL2A_20200408T155819_N0214_R097_T17QLF_20200408T221711.zip	Sentinel 2B	08/04/2020	GBCOA_10_20200408.tif
11	S2B_MSIL2A_20200508T155819_N0214_R097_T17QLF_20200508T200155.zip	Sentinel 2B	08/05/2020	GBCOA_11_20200508.tif
12	S2B_MSIL2A_20210103T160649_N0214_R097_T17QLF_20210103T200704.zip	Sentinel 2B	03/01/2021	GBCOA_12_20210103.tif
13	S2B_MSIL2A_20210212T160359_N0214_R097_T17QLF_20210212T203323.zip	Sentinel 2B	12/02/2021	GBCOA_13_20210212.tif
14	S2B_MSIL2A_20210324T155819_N0214_R097_T17QLF_20210324T220205.zip	Sentinel 2B	24/03/2021	GBCOA_14_20210324.tif
15	S2B_MSIL2A_20210513T155819_N0300_R097_T17QLF_20210513T202827.zip	Sentinel 2B	13/05/2021	GBCOA_15_20210513.tif

Tabla 1. Ficheros descargados con las imágenes de satélite Sentinel-2 para la zona de Guanabacoa.

La distribución de las teselas de Sentinel para todo el mundo en formato 'kml' también es uno de los productos ofrecidos por el programa Copernicus [23]. Guanabacoa corresponde a la tesela número 17QLF.

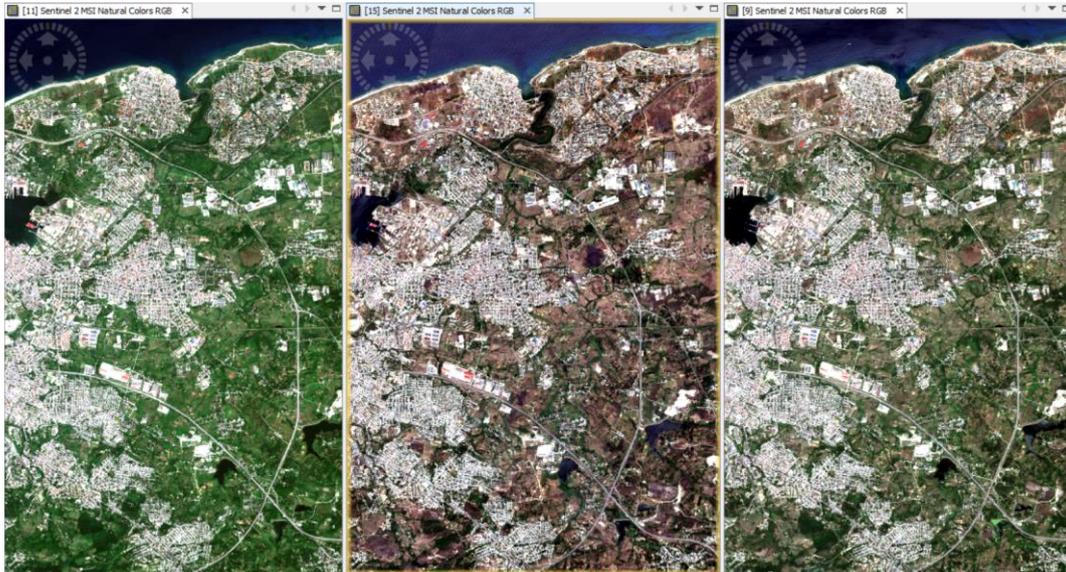


Figura 5. Imágenes Sentinel 2 de la zona de Guanabacoa.

3.3 MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE

Otra capa de información necesaria es el Modelo Digital de Superficies (MDS) obtenido del modelo global de la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). El MDS es necesario para obtener una visión tridimensional del terreno (Figura 6). Es un modelo que ya se ha utilizado en otros trabajos en Cuba y es de acceso gratuito [24]. Con una resolución de 30 metros, el MDE ha sido generado a partir de las imágenes obtenidas con el sensor óptico PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*) del satélite Advanced Land Observing Satellite 'DAICHI' (ALOS) entre los años 2006-2011. Para la zona de Guanabacoa se han obtenido 4 archivos en formato GeoTiff en el sistema de coordenadas geográfica WGS 1984 (Tabla 2).

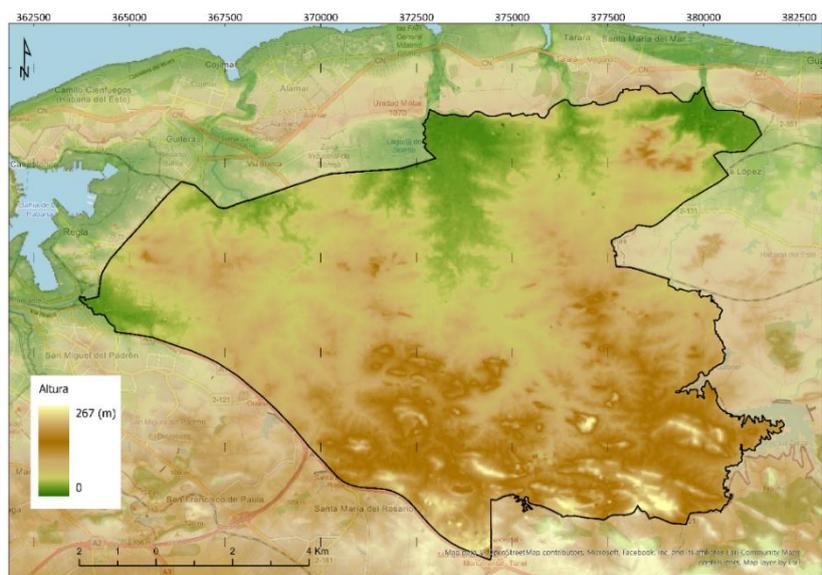


Figura 6. Modelo Digital de Superficie de la JAXA para la zona de Guanabacoa.

Número	Nombre del fichero	Imagen	Resolución	Fecha
1	N022W082	ALPSMLC30_N022W082_DSM.tif	30 m	31/03/2014
2	N022W083	ALPSMLC30_N022W083_DSM.tif	30 m	31/03/2014
3	N023W082	ALPSMLC30_N023W082_DSM.tif	30 m	31/03/2014
4	N023W083	ALPSMLC30_N023W083_DSM.tif	30 m	31/03/2014

Tabla 2. Ficheros descargados con los MDE para la zona de Guanabacoa.

3.4 OTROS DATOS CONSULTADOS

El Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico (PVGIS) [25] de la Comisión Europea ofrece datos relacionados con las instalaciones fotovoltaicas y la radiación solar. Este servicio (Figura 7), permite obtener datos seleccionando una ubicación, para la localización de Guanabacoa se han obtenido los datos de irradiación global horizontal mensual en el periodo 2005 a 2015 de la base de datos PVGIS-NSRDB. Los datos de radiación solar disponibles están calculados a partir de valores procedentes de la *National Solar Radiation Database* (NSRDB) del National Renewable Energy Laboratory (NREL) de Estados Unidos.

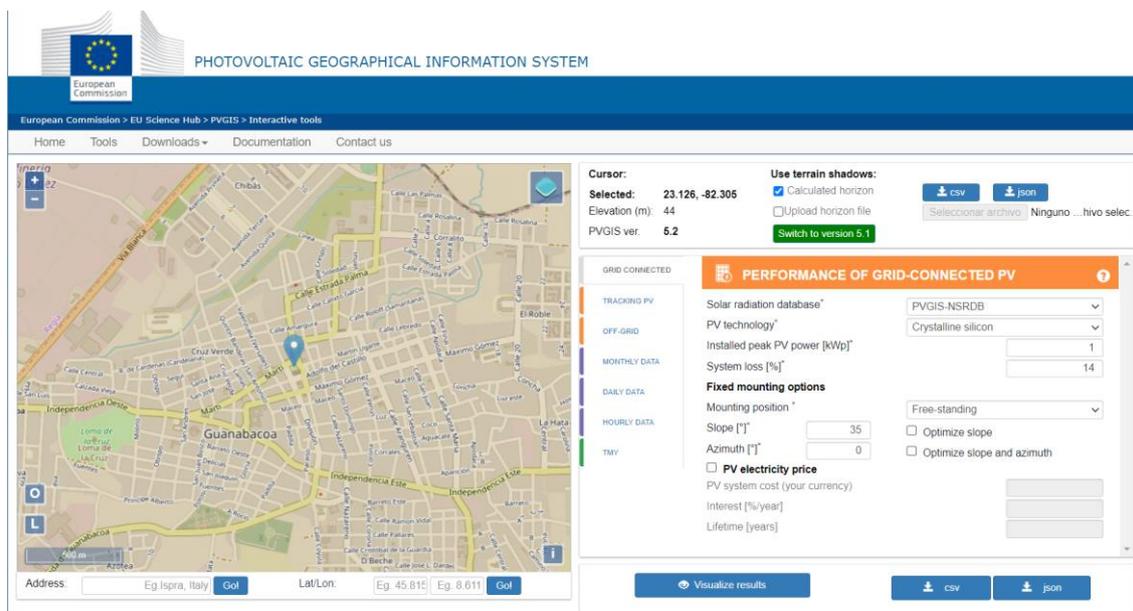


Figura 7. Visor del Sistema de Información Geográfica Fotovoltaico (PVGIS).

Otra de las fuentes consultadas es el visor *Global Climate Monitor* desarrollado en la Universidad de Sevilla [26], [27] que dispone de datos a escala global de varios parámetros climáticos. Este servicio (Figura 8) permite consultar y descargar valores mensuales, anuales, normales y tendencias de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Los datos obtenidos corresponden a las temperaturas medias mensuales. La información volcada tiene una procedencia diversa que incluye la Climatic Research Unit de la University of East Anglia, NOAA y el Global Precipitation Climatology Centre (GPCC). La aplicación ofrece descargas de los datos para una ubicación, una zona delimitada, países o del mapa completo en varios formatos (Shapefile, kml, csv, excel, jpeg y geotiff).

Otros datos han sido proporcionados por Cuba y el Instituto de Geografía Tropical. Las unidades de salud, localización de centros sanitarios, el mapa del centro histórico urbano de Guanabacoa, mapas

de usos del suelo, zonas catastrales y límites administrativos como los consejos populares forman parte de esta información. También se han consultado otras fuentes, como el callejero de Cuba, para la localización de edificios e identificación de sus usos [28],[29].

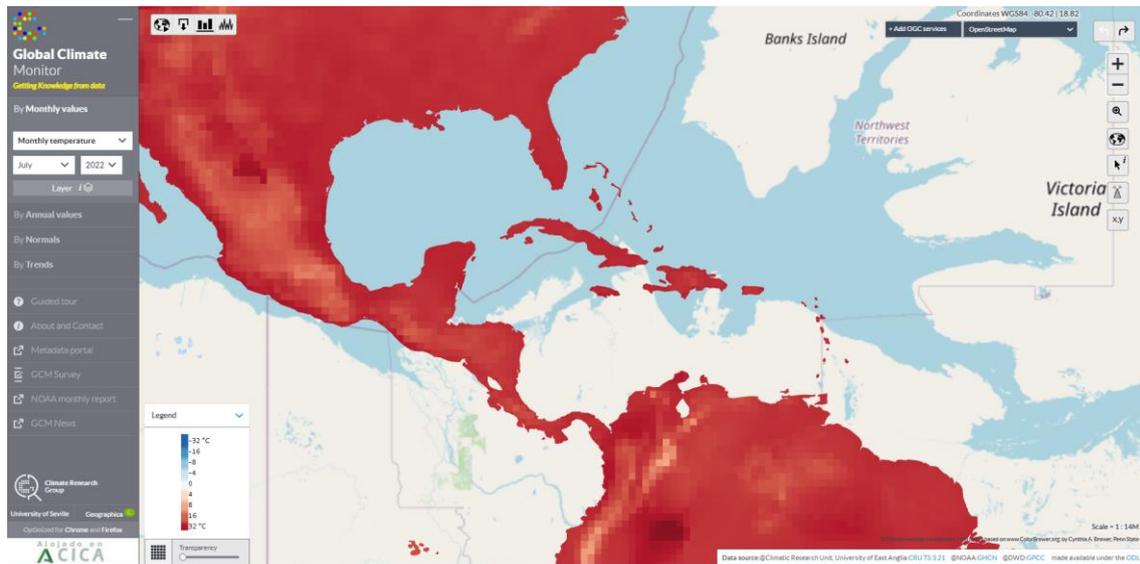


Figura 8. Visor Global Climate Monitor.

4 METODOLOGÍA

Para calcular el potencial solar en un área urbana fundamentalmente es necesario determinar tres elementos (Figura 9): (a) Conocer cuál es la superficie en los tejados de la que se puede disponer para la instalación de los módulos solares, (b) establecer la radiación solar en la zona analizada y (c) calcular la producción final de energía solar, en este caso fotovoltaica y térmica, que puede obtenerse.

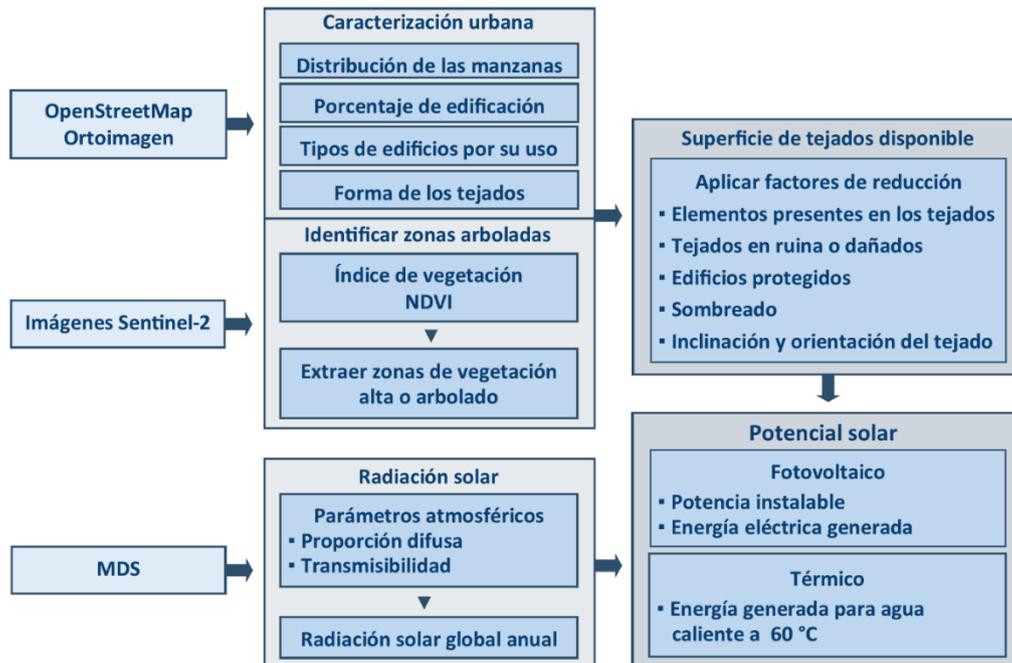


Figura 9. Esquema general de la metodología para determinar el potencial solar de Guanabacoa.

4.1 DETERMINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE TEJADOS DISPONIBLE

En la evaluación del potencial solar de los edificios primero se define cuál es la superficie de tejados útil para la instalación de los paneles solares. En general, esta superficie se determina a partir de la cartografía urbana proporcionada por IDEs regionales o, en las grandes ciudades, por los ayuntamientos. Pero también, es habitual el empleo de la información extraída de la cartografía catastral [30], [31]. Todas estas bases de datos geográficos aportan la localización de los edificios y la superficie que ocupan, además de información complementaria como el tipo de construcciones, la altura de los edificios o el uso de los mismos. Con este tipo de datos, se obtendría el área edificada de la zona urbana, sin embargo, en el municipio de Guanabacoa la única cartografía es la proporcionada por OpenStreetMap que, para el núcleo urbano, únicamente dispone de los polígonos de algunos edificios, insuficientes para poder calcular el área construida (Figura 10).

Otra alternativa consiste en determinar el área edificada mediante la clasificación de las imágenes de satélite multiespectrales [32], [33]. Aunque con la resolución de 10, 20 y 60 m que presentan las bandas de las imágenes Sentinel-2 (Figura 11) podrían llegar a extraerse la zona construida, las áreas con vegetación y las masas de agua, se obtendría tan solo una estimación global para todo el municipio. Finalmente, en Guanabacoa se ha optado por utilizar como base la capa de datos con el

trazado de las calles de OpenStreetMap y junto con la revisión de las ortoimágenes, generar un entramado urbano de parcelas. Cada unidad está formada principalmente por las manzanas, con algunas subdivisiones de las mismas cuando la tipología de los edificios o su entorno lo han requerido.

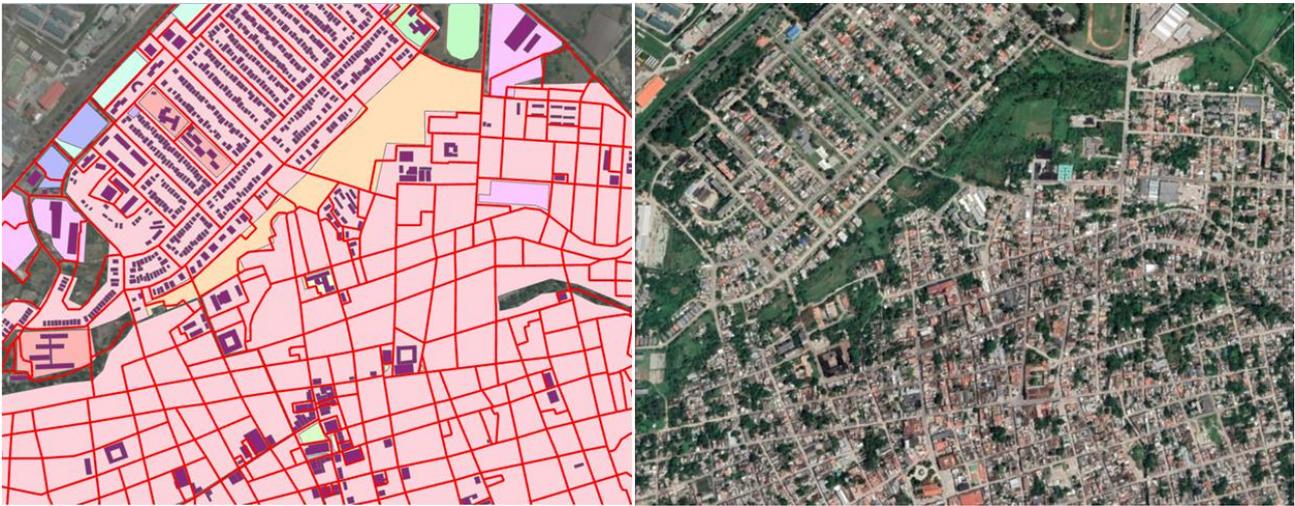


Figura 10. Muestra de los edificios representados en la cartografía de OpenStreetMap para el municipio de Guanabacoa.



Figura 11. Ejemplo de la definición de las imágenes Sentinel-2.

Una vez establecidas las parcelas como unidad básica de representación, para poder determinar su área construida y la superficie de tejados, primero se procede a la descripción y caracterización del entorno urbano. Esta fase se centra en realizar una aproximación de la superficie construida por cada parcela, asociarles el uso de los edificios e identificar la tipología de los tejados. A continuación, en función del área edificada observada se establece la superficie de tejados disponible. Hay que considerar los elementos de los edificios que no corresponden a los tejados y aquellas zonas de los mismos que no son adecuadas para las instalaciones solares. Para estimar finalmente el área utilizable se aplicarán coeficientes de reducción sobre la superficie media construida que incluyan estos condicionantes.

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO URBANO

En esta fase se lleva a cabo la creación de la base de datos asociada al entramado de parcelas urbanas que, para gran parte del municipio, corresponderán a las manzanas. La información que incluye se ha obtenido fundamentalmente a partir la cartografía de OpenStreetMap y la revisión de las ortoimágenes de la zona urbana del *Living Atlas* de *ArcGIS Online* [34] y de *Google Earth*. Los datos se completan con los de usos del suelo urbano, y la recopilación de la información puntual con la localización de edificios de los diferentes servicios públicos y equipamientos.

4.1.1.1 ÁREA EDIFICADA

Una vez definida la base cartográfica del parcelario, el proceso de caracterización primero determina la superficie edificada total de las mismas (Figura 12) utilizando un valor de cobertura u ocupación del suelo (OS). El porcentaje de la superficie de las parcelas ocupadas por los edificios, se establece mediante la interpretación de las ortoimágenes del municipio. Se realiza una estimación en la que se han establecido unos rangos para el porcentaje de construcción, con una OS mínima y máxima para cada tipo de ocupación (Tabla 3). Para identificar los diferentes tipos de OS (Figura 13) se han tomado como referencia las clases para zonas urbanas del mapa *Urban Atlas* de cobertura y usos del suelo del programa Copernicus [35].

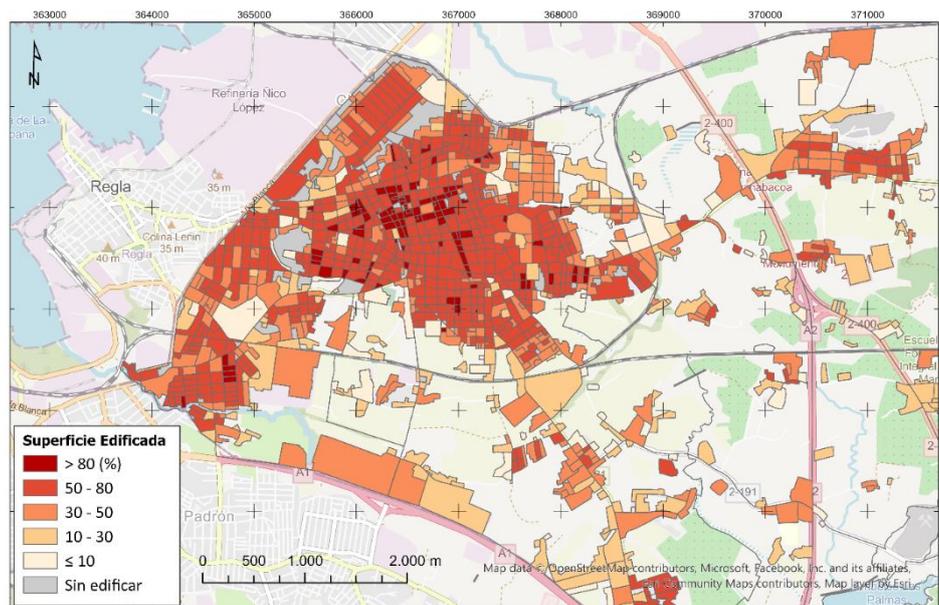


Figura 12. Porcentaje de superficie edificada del suelo. Guanabacoa.

Ocupación del suelo	Categoría
OS = 0	Nula (N)
OS < 10	Muy baja (MB)
10 > OS ≤ 30	Baja (B)
30 > OS ≤ 50	Media (M)
50 > OS ≤ 80	Alta (A)
OS > 80	Muy Alta (MA)

Tabla 3. Valores de porcentaje para la ocupación del suelo por los edificios.



Figura 13. Ejemplos de parcelas urbanas para las diferentes categorías de ocupación del suelo.

4.1.1.2 CLASIFICACIÓN DE LOS EDIFICIOS POR SU USO

Las parcelas urbanas con construcciones se clasifican teniendo en cuenta el uso que tienen asociados los tipos de edificios. Los usos se han dividido en tres categorías generales cada una de las cuales agrupa una serie de usos básicos (Tabla 4).

- Industrial corresponde a las parcelas con naves industriales y las instalaciones agrícolas/ganaderas.
- Residencial incluye las viviendas multifamiliares (apartamentos), el uso heterogéneo y las edificaciones aisladas. El tipo heterogéneo es el que predomina en el municipio ya que agrupa las viviendas, las parcelas con un uso complejo y aquellas que no se han podido identificar como pertenecientes al resto de las clases.
- Servicios se refiere a los edificios públicos, equipamientos y zonas comerciales. En esta categoría únicamente se han incluido las parcelas para las que se disponía de información.

Categoría	Uso	Categoría	Uso
Industrial	Industrial	Servicios	Sanitario
Industrial	Agrícola / Ganadero	Servicios	Educación
Residencial	Heterogéneo	Servicios	Deportivo
Residencial	Apartamentos	Servicios	Transporte
Residencial	Edificios aislados	Servicios	Energía
Servicios	Administración	Servicios	Penitenciario
Servicios	Comercial	Servicios	Religioso
Servicios	Cultural	Servicios	Cementerio

Tabla 4. Clasificación de los edificios por su uso.

4.1.1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE TEJADOS

Por último, en las parcelas se identifican los tejados de los edificios según su forma y distribución. Se incluye datos con la descripción del tipo de tejados por la forma dominante en cada parcela (inclinados, planos y complejos). La clase complejos se asigna a las parcelas con edificios de diferentes tipos de tejados o cuando la forma de los mismos es difícil de ver con la resolución de la imagen. En el caso de parcelas clasificadas complejas, siempre que sean fácilmente identificables en la ortoimagen, si se mezclen tejados inclinados y planos se determinará la proporción encontrada de cada uno de ellos. Además, en las parcelas clasificadas como inclinadas se intentará establecer la proporción de los tejados acorde a la dirección de la orientación observada (N-S, E-O, NE-SO, NO-SE). En general, el municipio es bastante complejo en la mayoría de las parcelas urbanas y ha sido difícil determinar la forma de los tejados. Sin embargo, sobre todo en aquellas parcelas con edificios de gran tamaño como los apartamentos, algunos edificios de servicios y zonas industriales (Figura 14), ha sido posible realizar una aproximación del porcentaje de tejados de cada tipo.



Figura 14. Ejemplo de los tipos de tejado de una parcela industrial.

4.1.2 **IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS ARBOLADAS**

La presencia de zonas arboladas que puedan sombrear los edificios e impedir el aprovechamiento de la energía solar se determina por medio del cálculo de índices espectrales de vegetación de las imágenes Sentinel-2. Primero se calcula el índice de vegetación NDVI de las imágenes y se extraen de ellas las zonas arboladas. A continuación, se seleccionan las imágenes cuyos resultados de NDVI tengan la mayor precisión mediante el análisis de los resultados con matrices de confusión, y por último, se estima la superficie ocupada por el arbolado para las parcelas urbanas.

4.1.2.1 ÍNDICE DE VEGETACIÓN NDVI

Existen un gran número de índices que pueden aplicarse para analizar diferentes aspectos como la vegetación, el suelo, las áreas construidas o el agua, entre otros. Uno de los índices habitualmente empleado es Índice Diferencial de Vegetación Normalizado o NDVI [36]. Este índice está relacionado con la presencia de vegetación y se utiliza para estimar la densidad de la vegetación, su estado de desarrollo y la calidad o vitalidad de la misma. Además, permite la diferenciación entre la vegetación

y otros elementos. NDVI utiliza las diferentes características de las bandas del espectro electromagnético, la absorción de la pigmentación de vegetación en la banda roja (RED) y la reflectividad de las plantas en la banda infrarroja cercana (NIR) (Figura 15). Los valores de NDVI altos, entre 0,7 y 1,3 μm , corresponden a zonas que reflejan más en el espectro del infrarrojo cercano y representa una vegetación más densa y saludable.

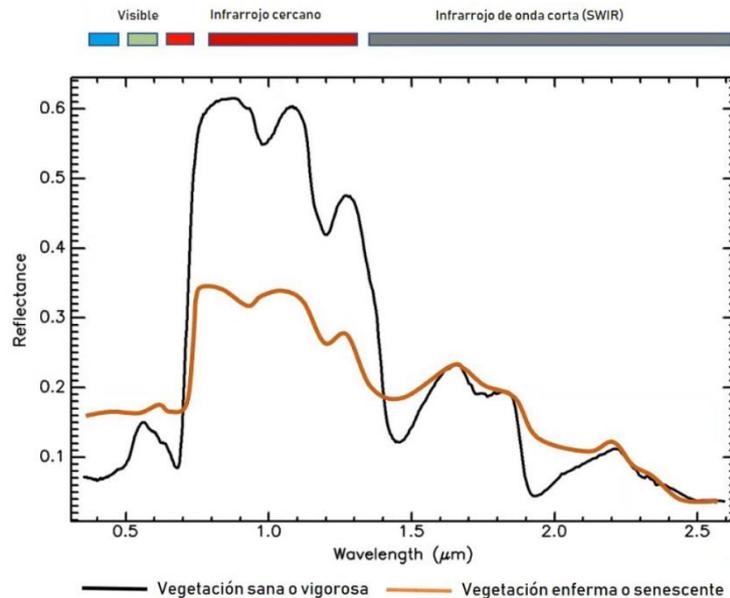


Figura 15. Comportamiento espectral de la vegetación [37][38].

La ecuación para el cálculo de índice NDVI es la siguiente:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1)$$

NIR = valores de píxel de la banda infrarroja cercana (Banda 8); RED = valores de píxel de la banda roja cercana (Banda 4)¹.

NDVI calcula los valores entre -1,0 y 1,0 (Figura 16). Un valor más alto de NDVI refleja un infrarrojo cercano (NIR) alto, lo que significa una vegetación densa. Generalmente, las plantas siempre tendrán valores positivos entre 0,2 y 1. El dosel de la vegetación densa y saludable debería estar por encima de 0,5 y la vegetación dispersa muy probablemente estará dentro del rango de 0,2 a 0,5. Sin embargo, es una aproximación general y siempre es importante tener en cuenta las estaciones, el tipo de plantas y las peculiaridades regionales para interpretar adecuadamente los valores. Abutaleb et al. [39] para Johannesburgo presenta valores diferenciando la calidad de verdor entre (-1 a 0,25) para baja, (0,25-0,5) como moderada, (0,5- 0,75) en alta calidad y (0,75-1) en calidad muy alta. Para identificar las clases de vegetación en Kuala Lumpur, Hashim et al. [40] definen valores parecidos de NDVI de (-1 a 0,2) en zonas baldías, edificadas y la red viaria, (0,2-0,5) para zonas de pastizales y arbustivas, y (0,5-1,0) para los bosques urbanos en zonas templadas y tropicales.

¹ Las bandas 4 y 8 se refieren a la numeración de las bandas multispectrales del satélite Sentinel-2. Si se utilizan imágenes de otros satélites estos valores pueden cambiar, siendo necesario consultar la distribución de bandas correspondientes.

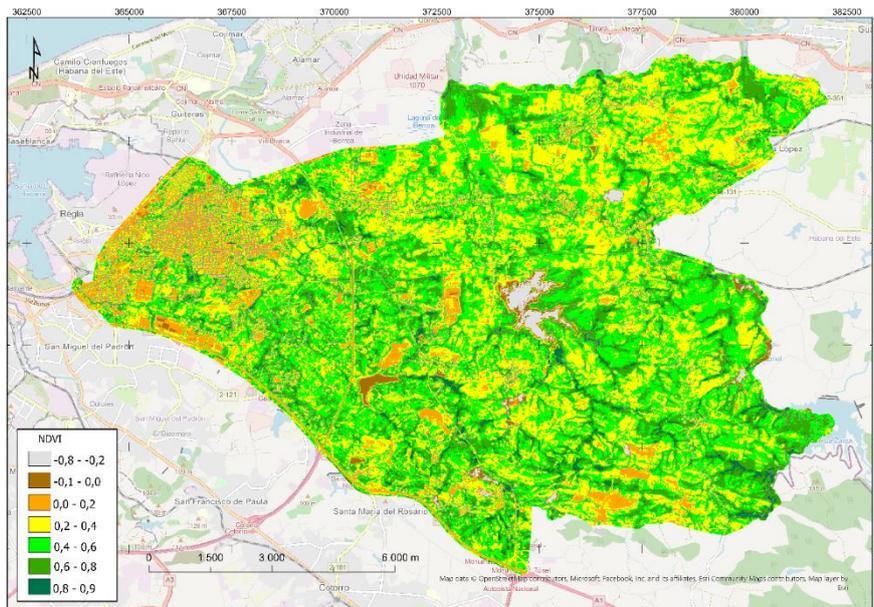


Figura 16. Índice NDVI de la imagen Sentinel-2 (03/04/2020). Guanabacoa.

En el caso de estudio de Guanabacoa la identificación de la vegetación se lleva a cabo calculando para todas las imágenes Sentinel-2 el índice de vegetación NDVI y seleccionando, a continuación, aquellos valores que correspondan a la vegetación alta (arbolado). Teniendo en cuenta las características globales del clima de Cuba [41] con una estación lluviosa de mayo a octubre y otra poco lluviosa de noviembre a abril. Los resultados variarán dependiendo del estado de la cobertura de vegetación en cada época del año. El objetivo es identificar las zonas arboladas en los recintos urbanos por lo que se revisarán los resultados obtenidos para seleccionar tanto los rangos de NDVI correspondientes al arbolado y la imagen que proporcione los resultados más ajustados.

Tomando como referencia de NDVI el valor umbral central de 0,5 para separar los edificios y el terreno de la vegetación alta o arbolado, se realizan pruebas de segmentación de la imagen con valores cercanos superiores e inferiores, desde el mínimo de 0,4 al máximo 0,6, con un intervalo de 0,05. Los valores mayores a cada uno de los rangos establecidos se identifican como el arbolado. Para Guanabacoa se ha analizado el índice NDVI de las 15 las imágenes Sentinel-2 disponibles, clasificando cada una de ellas en 'edificios-terreno' y 'arbolado' según los cinco rangos establecidos (0,40 / 0,45 / 0,50 / 0,55 / 0,60). La Figura 17 muestra un ejemplo de NDVI de una de las imágenes Sentinel-2 para dos de los umbrales establecidos (0,4 y 0,6).

De la serie de mapas obtenidos con las distintas imágenes, se seleccionarán aquellos que proporcionen los resultados más ajustados a las zonas arboladas en los recintos urbanos. En el siguiente apartado se describe el procedimiento seguido en el análisis de la clasificación del arbolado para verificar cuáles son los rangos de NDVI y las imágenes de mayor precisión.

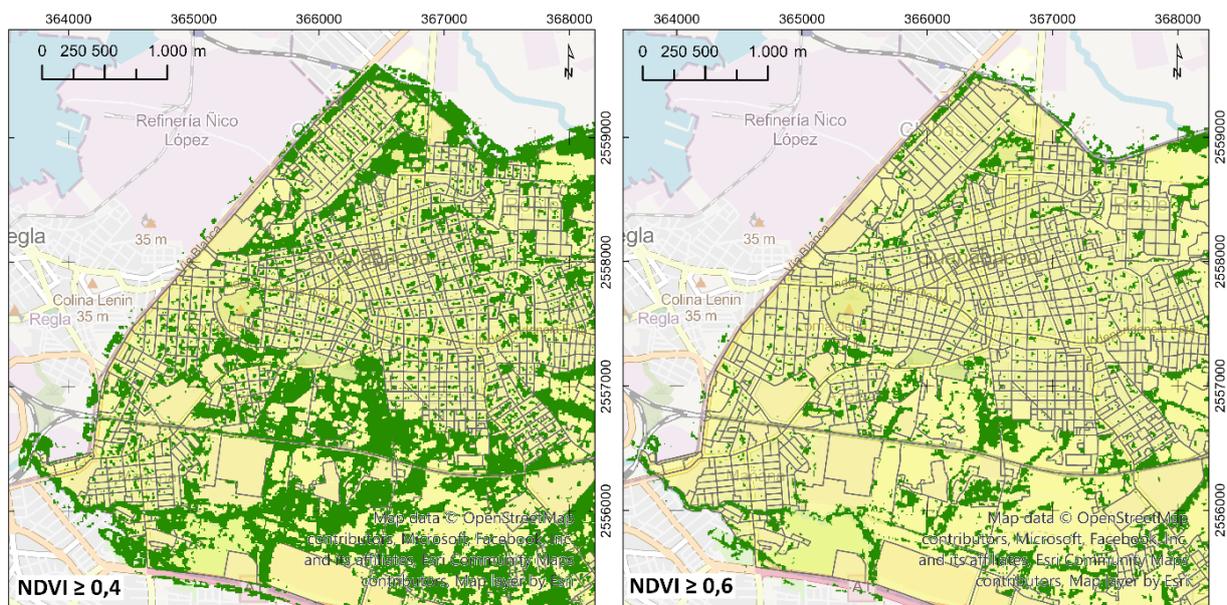


Figura 17. Índice NDVI de la imagen Sentinel-2 (03/04/2020) para dos de los valores establecidos (0,4 y 0,6).

4.1.2.2 EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN

La evaluación de la precisión de la clasificación del arbolado con el índice NDVI se realiza mediante una matriz de confusión. La matriz de confusión se construye a partir de N puntos de control clasificados en M número de clases a considerar y representará la exactitud de la clasificación realizada en la imagen comparándolo con el grupo de puntos de referencia que representan el tipo real del terreno. Las columnas representan las clases reales del terreno y las filas las clases del mapa. La diagonal de la matriz corresponde a los puntos de referencia bien clasificados en la matriz y el resto de celdas representan la confusión, los errores de omisión y comisión (Figura 18). Con la matriz de confusión también se obtienen dos índices globales, el porcentaje de acuerdo y el coeficiente Kappa[42], [41], [44]:

La exactitud del usuario (EU) relaciona el número de puntos de la muestra correctamente clasificados en relación al número total de puntos en el mapa. Determina los puntos de una clase asignados a una categoría en el mapa a la que no pertenecen. Los datos se leen en las filas de la tabla.

$$EU = n_{ii}/n_{i+} \quad (2)$$

n_{ii} = número de caso de la diagonal de la matriz; n_{i+} = total de los elementos de una fila de la matriz

La exactitud del productor (EP) relaciona el número de puntos de la muestra correctamente clasificados en relación al número total de puntos en el terreno. Determina los puntos para una clase esté bien asignada en el mapa. Los datos se leen en las columnas de la tabla.

$$EP = n_{ii}/n_{+i} \quad (3)$$

n_{ii} = número de caso de la diagonal de la matriz; n_{+i} = total de los elementos de una columna de la matriz.

El porcentaje de acuerdo o acuerdo observado (P_a) muestra la proporción del total de tipos clasificados correctamente.

$$P_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M n_{ii} \quad (4)$$

N = número de puntos de referencia para los que se ha calculado la matriz; M = número de clases analizadas en la matriz; n_{ii} = número de caso de la diagonal de la matriz.

El coeficiente Kappa (k) mide la concordancia entre los valores si se considera la parte de la clasificación que se produce de forma aleatoria.

$$k = (P_a - P_e) / (1 - P_e) \quad (6)$$

P_a = porcentaje de acuerdo; P_e = acuerdo aleatorio a posteriori.

$$P_e = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M n_{i+} \cdot n_{+i} \quad (5)$$

N = número de puntos de referencia para los que se ha calculado la matriz; M = número de clases analizadas en la matriz; n_{i+} = total de los elementos de una fila de la matriz; n_{+i} = total de los elementos de una columna de la matriz.

		Campo			Exactitud usuario
		Clase 1	Clase 2	Total	
Mapa	Clase 1	a	b	a + b	a / (a + b)
	Clase 2	c	d	c + d	d / (c + d)
	Total	a + c	b + d	a + b + c + d	
	Exactitud productor	a / (a + c)	d / (b + d)		

Figura 18. Esquema general de una matriz de confusión con dos clases.

Los resultados del índice Kappa oscilan entre 0 y 1 (Tabla 5). El valor 1 representa 100 % de exactitud.

Kappa (k)	Grado de acuerdo
< 0	Sin acuerdo
0,00 - 0,20	Insignificante
0,21 - 0,40	Bajo
0,41 - 0,60	Moderado
0,60 - 0,80	Bueno
0,81 - 1,00	Muy bueno

Tabla 5. Intervalos correspondientes al grado de acuerdo de los valores del coeficiente Kappa.

En el municipio de Guanabacoa la selección de la muestra de puntos de control del arbolado se realiza mediante la revisión de las ortoimágenes (Figura 19). Se han obtenido 1.250 puntos considerándose dos clases:

- Tipo 1 (edificado y suelo): Representa zonas edificadas, explanadas y zonas sin vegetación.
- Tipo 2 (vegetación alta o arbolado): Representa las zonas arboladas y los árboles aislados.

Es importante señalar que, en la localización de los puntos, cuando se marcan árboles aislados hay que considerar su tamaño. Los árboles han de tener la suficiente copa para el tamaño de píxel de 10 m de resolución de Sentinel-2. Al utilizar una ortoimagen de mayor resolución para localizar los árboles, respecto a la imagen de satélite puede existir cierta incertidumbre en relación a su localización.

Las matrices de confusión y el índice Kappa se ha calculado para las 15 imágenes Sentinel-2 analizadas y con cada uno de los umbrales del índice NDVI establecidos para diferenciar el arbolado (0,40 / 0,45 / 0,50 / 0,55 / 0,60). De las 15 imágenes finalmente han sido seleccionadas 3 con un coeficiente Kappa superior a 0,80 (Tabla 6). Los valores umbrales para la clasificación del arbolado que presentan están entre 0,40 y 0,50.



Figura 19. Puntos de control en una zona del núcleo urbano de Guanabacoa.

Como las imágenes tienen valores muy parecidos de concordancia, para poder seleccionar la imagen y el umbral de NDVI más adecuados, finalmente se extraen varias parcelas del municipio con diferente cobertura de arbolado con las que acotar mejor los resultados. Como base se han utilizado los intervalos de OS de las parcelas urbanas (Figura 20), seleccionando 10 parcelas para cada intervalo.

IMAGEN	UMBRAL 0,40		UMBRAL 0,45		UMBRAL 0,50		UMBRAL 0,55		UMBRAL 0,60	
	Acuerdo	Kappa								
GBCOA_1_20171215	0,85	0,65	0,83	0,62	0,81	0,55	0,79	0,47	0,76	0,37
GBCOA_2_20171220	0,74	0,41	0,74	0,37	0,73	0,31	0,72	0,25	0,71	0,20
GBCOA_3_20180325	0,89	0,75	0,86	0,66	0,83	0,56	0,78	0,40	0,74	0,26
GBCOA_4_20181026	0,72	0,34	0,72	0,31	0,72	0,29	0,72	0,25	0,71	0,19
GBCOA_5_20190129	0,90	0,79	0,92	0,82	0,91	0,81	0,90	0,77	0,88	0,72
GBCOA_6_20190429	0,91	0,80	0,90	0,76	0,87	0,70	0,85	0,62	0,82	0,53
GBCOA_7_20190718	0,89	0,76	0,89	0,75	0,88	0,72	0,86	0,67	0,83	0,60
GBCOA_8_20191130	0,86	0,69	0,86	0,69	0,86	0,68	0,85	0,64	0,83	0,60
GBCOA_9_20200403	0,93	0,83	0,90	0,77	0,87	0,68	0,83	0,57	0,79	0,44
GBCOA_10_20200408	0,89	0,75	0,88	0,70	0,85	0,61	0,81	0,51	0,78	0,40
GBCOA_11_20200508	0,84	0,60	0,78	0,40	0,73	0,23	0,69	0,09	0,67	0,03
GBCOA_12_20210103	0,84	0,66	0,86	0,69	0,86	0,68	0,85	0,65	0,84	0,61
GBCOA_13_20210212	0,87	0,71	0,87	0,69	0,86	0,66	0,84	0,60	0,81	0,52
GBCOA_14_20210324	0,90	0,77	0,88	0,72	0,85	0,64	0,82	0,55	0,79	0,44
GBCOA_15_20210513	0,90	0,76	0,88	0,70	0,85	0,61	0,82	0,52	0,78	0,42

Tabla 6. Resultados para NDVI del porcentaje de acuerdo y coeficiente Kappa.



Figura 20. Muestra de las parcelas urbanas seleccionadas según la ocupación del suelo.

Se han revisado todas las muestras comparando la superficie calculada de arbolado con la que se muestra en la ortoimagen (Figura 21). Para cada rango de OS se han seleccionado aquellas imágenes en las que se observan una mayor coincidencia entre ambas superficies en el mayor número de parcelas. En la Tabla 7 se muestran las dos imágenes, correspondientes al mes de abril de los años 2019 y 2020, que mejor se adaptan en la mayoría de las parcelas dependiendo de la OS. La diferencia más destacada entre las dos imágenes corresponde a las manzanas con baja OS, donde en el terreno despejado puede darse una mayor presencia de vegetación baja cuyo verdor puede mezclarse con el arbolado.

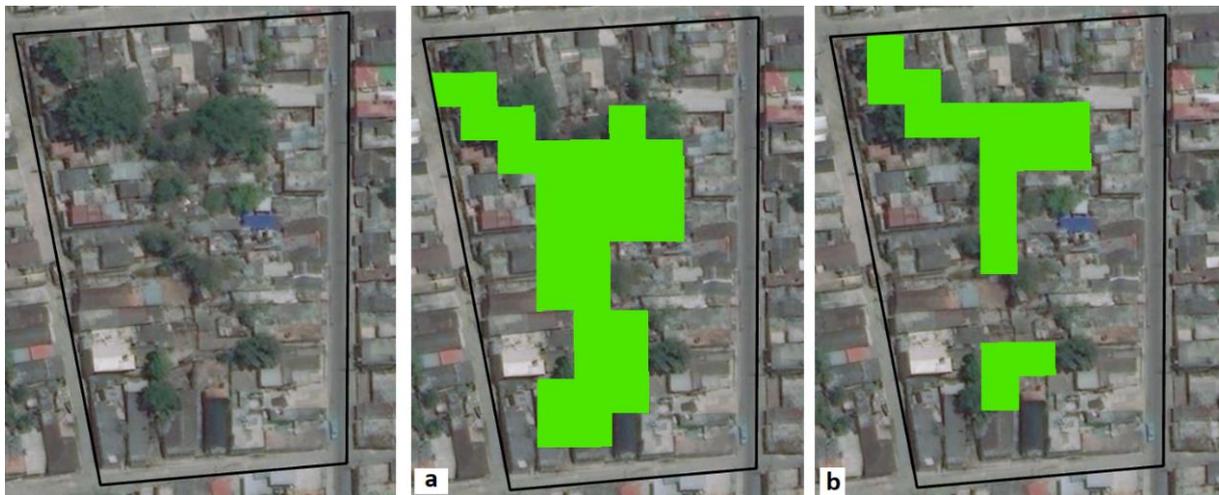


Figura 21. Ejemplo de la superficie calculada para una parcela con OS alta con dos imágenes diferentes: (a) GBCOA_5_20190129 (umbral 0,40) y (b) GBCOA_6_20190429 (umbral 0,40).

Ocupación del suelo (%)	Imagen	Umbral
OS < 10	GBCOA_9_20200403	0,40
10 < OS ≤ 30	GBCOA_9_20200403	0,40
30 < OS ≤ 50	GBCOA_9_20200403	0,40
50 < OS ≤ 80	GBCOA_6_20190429	0,40
OS > 80	GBCOA_6_20190429	0,40

Tabla 7. Imágenes Sentinel-2 seleccionadas para identificar las zonas arboladas.

4.1.2.3 APROXIMACIÓN DE LA SUPERFICIE ARBOLADA

Con las imágenes seleccionadas anteriormente, se determina la superficie ocupada por las zonas arboladas realizando una estimación de su presencia en las parcelas urbanas. Esta operación puede llevarse a cabo con las herramientas GIS que calculan estadísticas de zona [45], sumando la superficie de los píxeles arbolados que están dentro de cada una de las parcelas. A las parcelas se les asignará la superficie arbolada obtenida en el cálculo de NDVI de la imagen que le corresponda atendiendo a su rango de ocupación del suelo por edificios (Tabla 7).

A partir de los resultados de las áreas arboladas, se realiza una estimación del porcentaje de la superficie de las parcelas cubierta por los árboles. Utilizando como referencia esta aproximación, de forma similar a la clasificación de la OS edificada, se le asociará un valor del porcentaje de superficie de la parcela ocupada por el arbolado (OA) dividido en varias categorías (Tabla 8). Estos datos de OA se emplearán después en la determinación del sombreado para definir si existe una mayor o menor probabilidad de generarse sombras sobre los edificios.

Ocupación arbolado	Categoría
OA = 0	Nula (N)
OA < 10	Muy baja (MB)
10 > OA ≤ 30	Baja (B)
30 > OA ≤ 50	Media (M)
50 > OA ≤ 80	Alta (A)
OA > 80	Muy Alta (MA)

Tabla 8. Valores de porcentaje para la ocupación por el arbolado de las parcelas urbanas.

4.1.3 **ESTIMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE TEJADOS DISPONIBLE**

No toda el área edificada de los edificios corresponde a los tejados y, además, no toda la zona de los tejados puede emplearse para la instalación de paneles solares. El sombreado que cubre los tejados ocasionado por los edificios y las masas de árboles o la forma y distribución de las cubiertas limitan el área disponible. Pero también, el espacio ocupado por chimeneas y otras instalaciones o que el tejado pueda tener otro uso incompatible con las instalaciones solares, disminuyen la superficie aprovechable. Al área total de los tejados se les pueden aplicar diferentes coeficientes o factores de reducción para definir la superficie idónea donde instalar los paneles solares.

Algunos estudios establecen unos coeficientes generales para todos los edificios [1], otros los definen según el tipo de edificios y la disposición de los tejados [41], [47], [48] o también detallan la ocupación de los tejados por otros elementos según sean residenciales, industriales o de servicios [49]. Los coeficientes empleados pueden variar dependiendo de las características de entorno urbano y la información disponible para definirlos. En este caso de estudio, partiendo de los datos asignados a las parcelas urbanas, se definen los diferentes coeficientes conforme a los tipos de edificios, sus usos y las clases de tejados, que incluyen las siguientes restricciones:

- **Restricción de cubiertas (RCU):** Superficie ocupada por los edificios que no corresponde a los tejados, como los patios, terrazas u otros elementos constructivos. Se considerará para todas las parcelas un 20 % de la superficie construida afectada por lo tanto se asigna un valor único a RCU de 0,80.
- **Restricción de construcción (RC):** Representa a los elementos que pueden localizarse sobre los tejados (instalaciones de climatización, ascensores, escaleras, ventanas, chimeneas, antenas, depósitos de agua, etc.). A cada tipo de edificio se le asigna un valor diferente de RC (Tabla 9). Debido a que se considera que la presencia de elementos en los tejados puede variar dependiendo del uso de los edificios se ha realizado una estimación de los posibles elementos que podrían encontrarse en cada uno de ellos.
- **Restricción de protección (RP):** Corresponde a los edificios históricos o monumentos y cualquier edificio con alguna categoría de protección del patrimonio. Estos edificios se los excluye de la instalación de paneles solares por lo que la restricción en estos edificios será de 100 %. Los edificios protegidos tendrán un valor de RP de 0 y el resto de edificios de 1.
- **Restricción del estado de los tejados (RET):** Representa a aquellos edificios que pueden estar en ruina o cuyos tejados se observa que están dañados o en mal estado. Para la descripción del estado de conservación de los tejados, si todos los edificios de una parcela están en ruina o dañados se asignará un 100 % de restricción, y para el resto de parcelas se realizará una aproximación al porcentaje de los tejados que se observa que están deteriorados. El valor de RET para los edificios en buen estado será 1 y variará entre 0 y 1 para el resto según su grado de deterioro.
- **Restricción de las sombras (RS):** Tiene en cuenta el efecto de las sombras generadas por los objetos en los tejados, las secciones de los edificios, los edificios cercanos y el arbolado. Esta restricción tiene en cuenta las posibles zonas sombreadas según el tipo de edificio y la composición del entorno urbano. Engloba cuatro categorías dependiendo del tipo de elemento sombreador:
 - El efecto de las sombras generadas por los elementos situados en los tejados.
 - La integración urbana relacionada con secciones de edificios o edificios contiguos.
 - Edificios de gran altura.
 - La presencia de masas de árboles.

Categoría del edificio	Uso del edificio	Instalación de climatización en tejado	Ascensores o escaleras en tejado	Chimeneas en tejado	Antenas en tejado	Depósito de agua en tejado	RC
Industrial	Industrial	-	-	x	-	-	0,95
Industrial	Agrícola / Ganadero	-	-	x	-	-	0,95
Residencial	Heterogéneo	x	-	x	x	x	0,80
Residencial	Apartamentos	-	x	x	x	x	0,75
Residencial	Edificios aislados	x	-	x	x	x	0,80
Servicios	Administración	x	x	x	-	-	0,80
Servicios	Comercial	x	x	x	-	-	0,80
Servicios	Cultural	x	x	x	-	-	0,80
Servicios	Sanitario	x	x	x	-	x	0,75
Servicios	Educación	x	x	x	-	x	0,75
Servicios	Deportivo	-	-	x	-	-	0,95
Servicios	Transporte	-	-	x	-	-	0,95
Servicios	Energía	-	-	x	-	-	0,95
Servicios	Penitenciario	x	-	x	x	x	0,80
Servicios	Religioso	-	-	x	-	-	0,95
Servicios	Cementerio	-	-	x	-	-	0,95

Tabla 9. Valores para la restricción de construcción para cada tipo de edificios.

Los edificios industriales (Tabla 10) suelen estar bastante aislados, tienen grandes superficies de tejados con pocos elementos sobre ellos. La superficie de tejados afectada es la menor de todos los tipos de edificios. Se considera un factor de reducción por sombras del 5 % ya que únicamente se tienen en cuenta los elementos de los tejados. En las parcelas industriales la presencia de edificios de gran altura y arbolado es menor.

En los edificios residenciales de tipo apartamentos (Tabla 11) de gran altura, se consideran los elementos presentes en el tejado con un 25 %. En el municipio, cuando forman grupos, presentan una cierta separación entre ellos y, si están mezclados con otros edificios, suelen ser unidades aisladas. Por su altura dominan sobre cualquier otro elemento del entorno urbano. No suelen sombreadarse entre ellos o cubiertos por árboles, pero si existe alguno de mayor altura a los demás se considerarán.

Para todos los edificios residenciales clasificados como heterogéneos (Tabla 12) los elementos presentes en el tejado representan, junto con su integración en el conjunto urbano, un 30 % de restricción. Los edificios residenciales aislados (Tabla 13) consideran los elementos presentes en el tejado y las secciones del propio edificio con un 20 %. En relación a los edificios de servicios (Tabla 14 a Tabla 17), dependiendo de su uso tendrán mayor o igual presencia de elementos en su tejado que los industriales, aunque se considera que es menor que los residenciales.

Finalmente, para todas las parcelas, si existe algún edificio cercano de gran altura que pueda afectar a la zona, se considerará un 10 % más, su integración en el conjunto urbano representará otro 10 % y si existe arbolado que pueda sombrear dependerá de la cobertura del mismo, afectando entre 5-25 % más.

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,95
x	x	x	x	x	-	-	x	0,90 0,80 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	-	x	x	0,85
x	x	x	x	x	-	x	x	0,80 0,75 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	-	x	0,85
x	x	x	x	x	x	-	x	0,80 0,75 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	x	x	0,75
x	x	x	x	x	x	x	x	0,70 0,65 0,60 0,35 0,10

Tabla 10. Valores para la restricción de sombras para los edificios industriales (industriales, agrícola / ganadero).

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,75
x	x	x	x	x	-	-	x	0,70 0,65 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	-	x	0,65
x	x	x	x	x	x	-	x	0,60 0,55 0,50 0,35 0,10

Tabla 11. Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales apartamentos.

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	x	x	0,70
x	x	x	x	x	-	x	x	0,65 0,60 0,55 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	x	x	0,60
x	x	x	x	x	x	x	x	0,55 0,50 0,45 0,35 0,10

Tabla 12. Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales heterogéneos.

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,80
x	x	x	x	x	-	-	x	0,75 0,70 0,60 0,35 0,10

Tabla 13. Valores para la restricción de sombras para los edificios residenciales aislados.

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,80
x	x	x	x	x	-	-	x	0,75 0,70 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	-	x	x	0,70
x	x	x	x	x	-	x	x	0,65 0,60 0,55 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	-	x	0,70
x	x	x	x	x	x	-	x	0,65 0,60 0,55 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	x	x	0,60
x	x	x	x	x	x	x	x	0,55 0,50 0,45 0,35 0,10

Tabla 14. Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (administración, comercial y cultural).

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,75
x	x	x	x	x	-	-	x	0,70 0,65 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	-	x	x	0,65
x	x	x	x	x	-	x	x	0,60 0,55 0,50 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	-	x	0,65
x	x	x	x	x	x	-	x	0,60 0,55 0,50 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	x	x	0,55
x	x	x	x	x	x	x	x	0,50 0,45 0,40 0,35 0,10

Tabla 15. Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (sanitario y educación).

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,80
x	x	x	x	x	-	-	x	0,75 0,70 0,60 0,35 0,10

Tabla 16. Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (penitenciario).

ARBOLADO					EDIFICIOS DE GRAN ALTURA	INTEGRACIÓN URBANA	ELEMENTOS EN LOS TEJADOS	RS
MB	B	M	A	MA				
-	-	-	-	-	-	-	x	0,95
x	x	x	x	x	-	-	x	0,90 0,80 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	-	x	x	0,85
x	x	x	x	x	-	x	x	0,80 0,75 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	-	x	0,85
x	x	x	x	x	x	-	x	0,80 0,75 0,60 0,35 0,10
-	-	-	-	-	x	x	x	0,75
x	x	x	x	x	x	x	x	0,70 0,65 0,60 0,35 0,10

Tabla 17. Valores para la restricción de sombras para los edificios de servicios (deportivo, transporte, energía, religioso y cementerio).

- Restricción por la forma de los tejados (RFT):** Está relacionada con el aprovechamiento de la radiación solar incidente y relacionada con la inclinación y orientación de los tejados. Los tejados planos y con menor inclinación como los edificios industriales (industrial y agrícola/ganadero) y servicios (deportivo, energía y transporte) se considera que son prácticamente aprovechables en su totalidad $RFT = 1$. Respecto a las parcelas en las que los tejados se han clasificado con inclinación y orientación múltiples se considerará $RFT = 0,5$. Si todos los tejados son inclinados y hay varias orientaciones se considera el porcentaje para cada orientación. También, si la parcela es compleja y hay tejados inclinados y planos, también se considera el porcentaje de cada uno de ellos.

Orientación	RFT
Norte - Sur (N - S)	0,50
Este - Oeste (E - O)	1,00
Noroeste - Sureste (NO - SE)	0,50
Noreste - Suroeste (NE - SO)	0,50

Tabla 18. Valores para la restricción de la forma de los tejados para las diferentes orientaciones.

La superficie de tejados disponible (Figura 22) para instalar paneles solares (S_T) se determina con el producto de los coeficientes de cada restricción y la superficie edificada:

$$S_T = S_M \cdot C_{RCU} \cdot C_{RC} \cdot C_{RP} \cdot C_{RET} \cdot C_{RS} \cdot C_{RFT} \quad (7)$$

S_M = Superficie media edificada; C_{RCU} = Coeficiente de restricción de cubiertas; C_{RC} = Coeficiente de restricción de construcción; C_{RP} = Coeficiente de restricción de protección; C_{RET} = Coeficiente de restricción del estado de los tejados; C_{RS} = Coeficiente de restricción de las sombras; C_{RFT} = Coeficiente de restricción por la forma de los tejados.

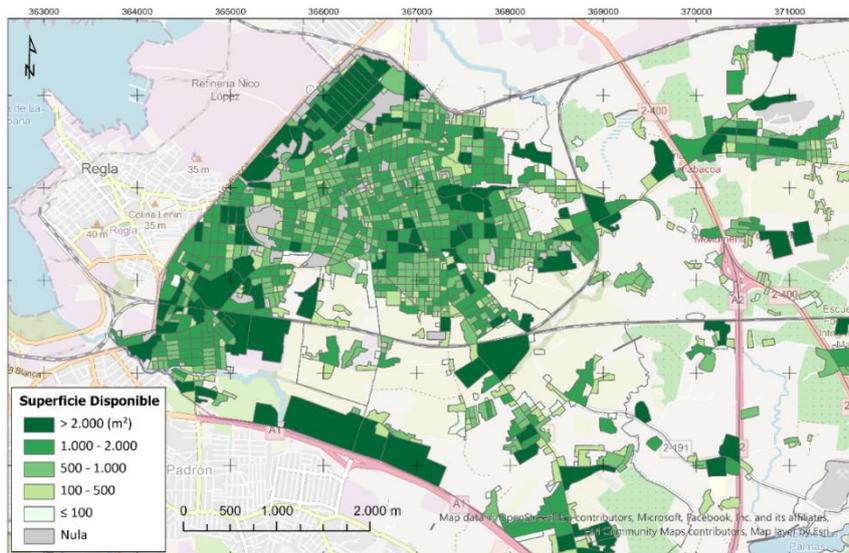


Figura 22. Superficie de tejados disponible. Guanabacoa.

4.2 EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

En el análisis de la radiación solar se deben tener en cuenta factores que afectan a su distribución en el territorio, como el relieve, las superficies sombreadas, las condiciones atmosféricas o las diferencias estacionales. Para determinar la radiación solar, hemos empleado el procedimiento incluido en el modelo gSolarRoof que utiliza la herramienta 'Radiación solar de áreas' integrada en el software ArcGIS [50], que calcula la radiación en un periodo de tiempo definido para un área geográfica. Para delimitar el área de Guanabacoa se utiliza como dato de entrada el MDS de la JAXA [24], aplicado en otros estudios de radiación solar en esta zona [51], que proporcionará la estimación de la radiación solar sobre el terreno con una resolución de 30 m.

El modelo de radiación se caracteriza por calcular los parámetros relacionados con las condiciones atmosféricas para adaptar la radiación solar a las variaciones a lo largo del año [52]. A partir del MDS y los factores atmosféricos se determina un mapa de radiación solar global de todos los meses del año con los que se calcula después el mapa total anual (Figura 23).

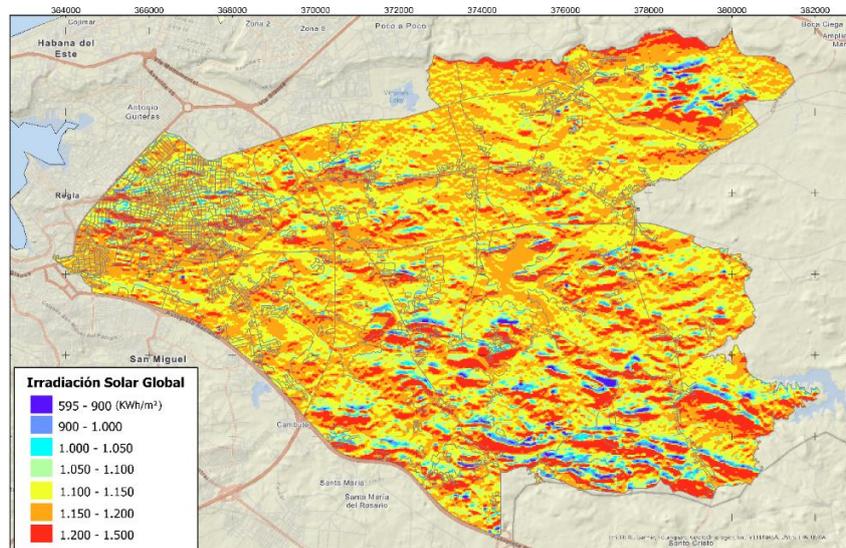


Figura 23. Irradiación solar global anual. Guanabacoa.

Los parámetros atmosféricos se incluyen mediante dos factores, la transmisibilidad y la proporción difusa, estimando los valores mensuales a partir de datos de radiación solar horizontal en la localización de Guanabacoa obtenidos de PVGIS [25] y tomando como referencia un día promedio de cada mes del año:

- **Índice de claridad/transparencia atmosférica** (KT) es la proporción de la radiación solar que atraviesa la atmósfera e incide en la superficie de la Tierra (radiación global sobre superficie horizontal GHI) en relación a la radiación extraterrestre que llega a la atmósfera [53]:

$$K_T = GHI/I_0 \quad (8)$$

La radiación solar extraterrestre incidente en un plano horizontal (I_0) se calcula mediante la expresión:

$$I_0 = I_{SC} \cdot \left(1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365,25}\right)\right) \cdot (\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega_s + \sin \phi \cdot \sin \delta) \quad (9)$$

I_{SC} = constante solar (1367 W/m²-día); n = día del año dado para cada mes; Φ = latitud; ω_s = ángulo horario solar; δ = declinación.

Una forma de obtener la declinación (δ) para un día del año (n) es a partir de la ecuación [54]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (10)$$

El ángulo horario solar (ω_s) se obtiene con [55]:

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \cdot \tan \delta \quad (11)$$

Φ = latitud; δ = declinación.

Los valores que puede tomar la transmisibilidad varían entre 0 y 1 (sin transmisión a transmisión completa), considerándose que 0,7 corresponde a un cielo generalmente despejado.

- **Proporción difusa** (KD) representa la relación entre la componente difusa de la radiación solar y la radiación global sobre superficie horizontal [53]:

$$K_D = DHI/GHI \quad (12)$$

A partir del índice de transparencia atmosférica (KT), este parámetro puede calcularse a partir de correlaciones lineales como, por ejemplo [56]:

$$K_D = 0,91138 - 0,6225 \cdot K_T \quad (13)$$

Los valores de este parámetro varían de 0 a 1, estableciéndose 0,3 para condiciones de cielo generalmente claro.

4.3 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR

4.3.1 POTENCIAL FOTOVOLTAICO

Después de estimar la superficie disponible para las instalaciones solares con la aplicación de los factores de reducción definitivos a las parcelas urbanas, el siguiente paso es el análisis del potencial de los tejados para la producción de energía eléctrica anual en función de la radiación solar incidente. El potencial fotovoltaico se determina para dos tecnologías de módulos con diferente eficiencia de los tipos silicio monocristalino (18,1 %) y multicristalino (16,8 %)². Estos valores están en constante mejora y pueden ser considerados como una aproximación conservadora.

Se considera la **potencia instalable** (Figura 24 y Figura 25) como la máxima de energía eléctrica que puede generarse por una instalación fotovoltaica que opera en condiciones estándar de medida³. La potencia se calcula con la expresión [47]:

$$P = A_{PV} \cdot H_g \cdot e \quad (14)$$

P = potencia instalada (kWp); A_{PV} = superficie de tejado disponible (m²); H_g = radiación solar global = 1 kW/m² en condiciones estándar de medida; e = eficiencia de los módulos fotovoltaicos que dependerá del módulo utilizado.

La energía anual generada (Figura 26 y Figura 27) en función de la radiación solar para una superficie determinada se calcula a partir de la expresión [60]:

$$E = A_{PV} \cdot H_g \cdot e \cdot PR \quad (15)$$

E = energía anual (kWh/año); A_{PV} = superficie de tejado disponible (m²); H_g = Radiación solar global anual (kWh/m²·año); e = eficiencia de los módulos fotovoltaicos; PR = Performance ratio.

El coeficiente *performance ratio* (PR) representa el rendimiento energético de la instalación fotovoltaica y en su valor influyen las pérdidas debidas a la presencia de suciedad en la instalación, la influencia de la temperatura y el cableado, el inversor u otros componentes del sistema. En el cálculo se aplica un valor por defecto del 80 % [60], [61].

4.3.2 POTENCIAL TÉRMICO

Por otro lado, la producción de energía anual con colectores solares térmicos se calculará para alcanzar una temperatura de 60 °C. La energía térmica generada (Figura 28 a Figura 30) dependerá de la temperatura a alcanzar y el rendimiento de los colectores solares térmicos [62]:

$$E_{CAP} = \eta \cdot A_{CAP} \cdot H_g \quad (16)$$

η = rendimiento del captador; A_{CAP} = superficie útil (m²); H_g = radiación solar global anual (kWh/m²·año).

² Como referencia para la eficiencia de los módulos fotovoltaicos se ha tomado los datos del módulo Vitovolt 300 M2950A (silicio monocristalino) [55] y Canadian Solar 275P (silicio multicristalino) [56].

³ Condiciones utilizadas para la caracterización de las células y módulos fotovoltaicos que equivalen a: Irradiancia solar (1000 W/m²), distribución espectral AM (1,5 G) y temperatura de la célula (25 °C) [57].

El rendimiento de un captador térmico se define en función de la temperatura con la siguiente ecuación:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_{uso} - T_a}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_{uso} - T_a)^2}{G} \quad (17)$$

η_0 = rendimiento óptico del captador; a_1 = factor de pérdidas lineal del captador; a_2 = factor de pérdidas cuadrático del captador; T_{uso} = temperatura de uso = 60 °C; T_a = temperatura ambiente[27].

Para la energía térmica se han considerado colectores solares térmicos (Tabla 19) de los tipos tubo de vacío, plano selectivo y plano no selectivo. A la superficie de los colectores de placa plana selectivos se les aplica un tratamiento electroquímico o pintura que aumenta la absorción de la radiación solar.

Colector solar	η_0	a_1	a_2
Tubo de vacío	0,75	2,0	0,020
Plano selectivo	0,80	4,0	0,025
Plano no selectivo	0,85	8,5	0,030

Tabla 19. Rendimiento óptico (η_0) y factores de pérdidas (a_1 y a_2) de tres tipos genéricos de colectores solares térmicos.

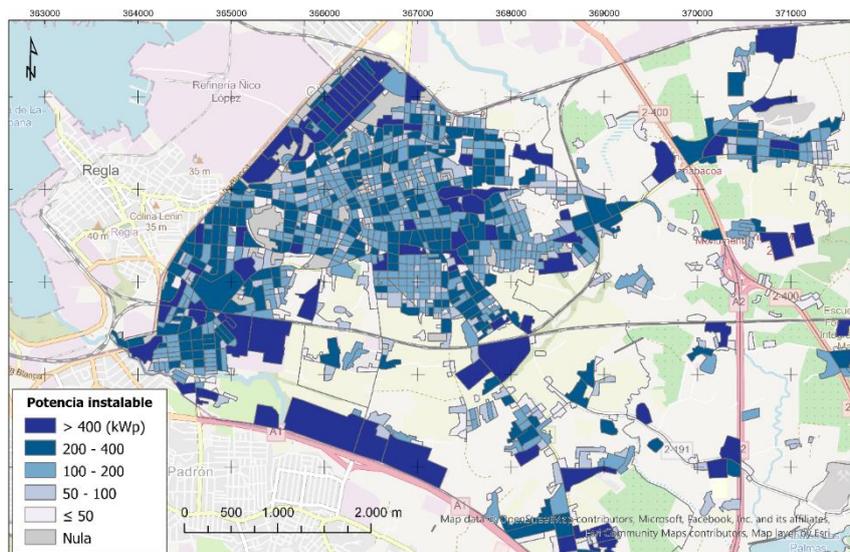


Figura 24. Fotovoltaica: Potencia instalable para módulos de silicio multicristalino. Guanabacoa.

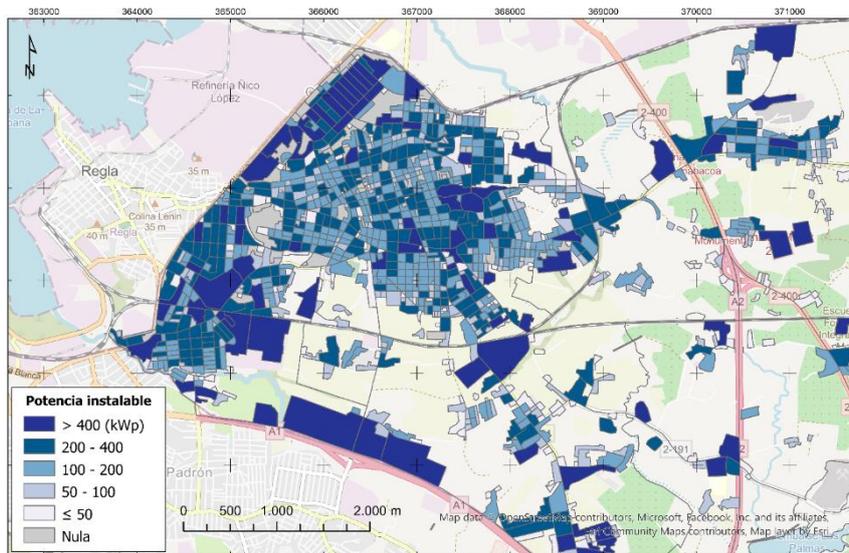


Figura 25. Fotovoltaica: Potencia instalable para módulos de silicio monocristalino. Guanabacoa.

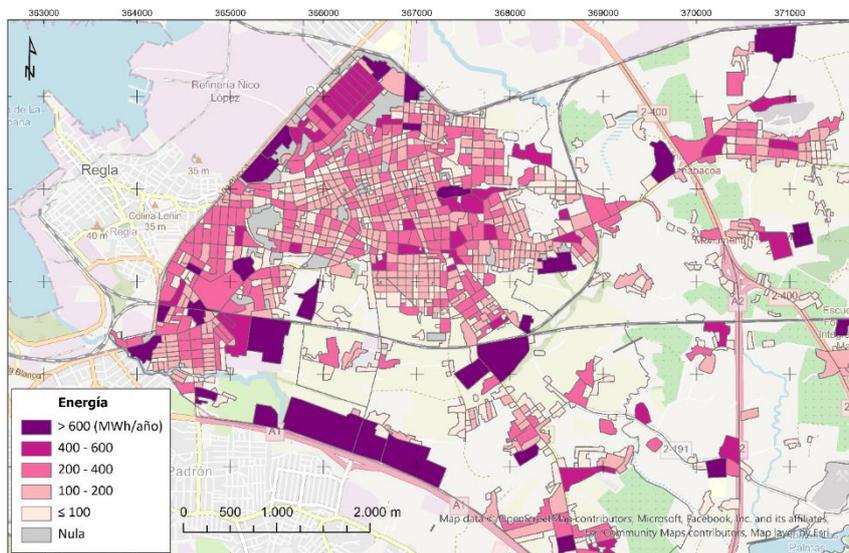


Figura 26. Fotovoltaica: Energía anual generada para módulos de silicio multicristalino. Guanabacoa.

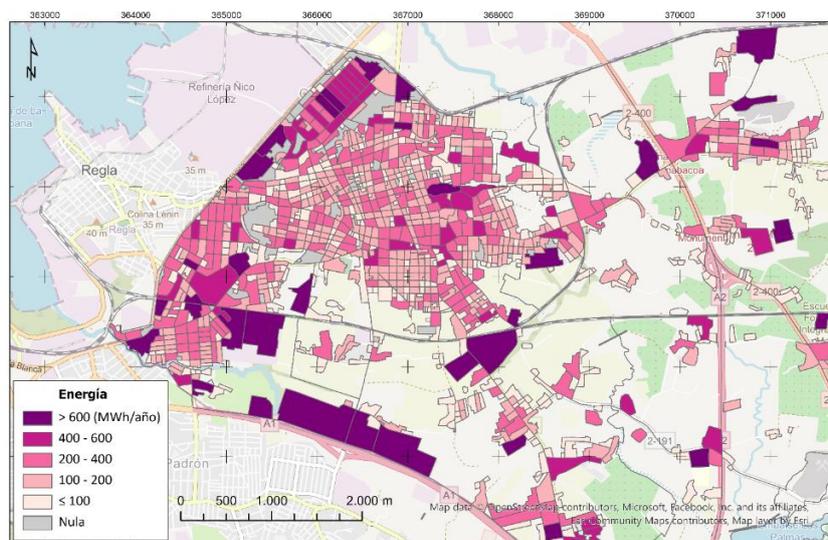


Figura 27. Fotovoltaica: Energía anual generada para módulos de silicio monocristalino. Guanabacoa.

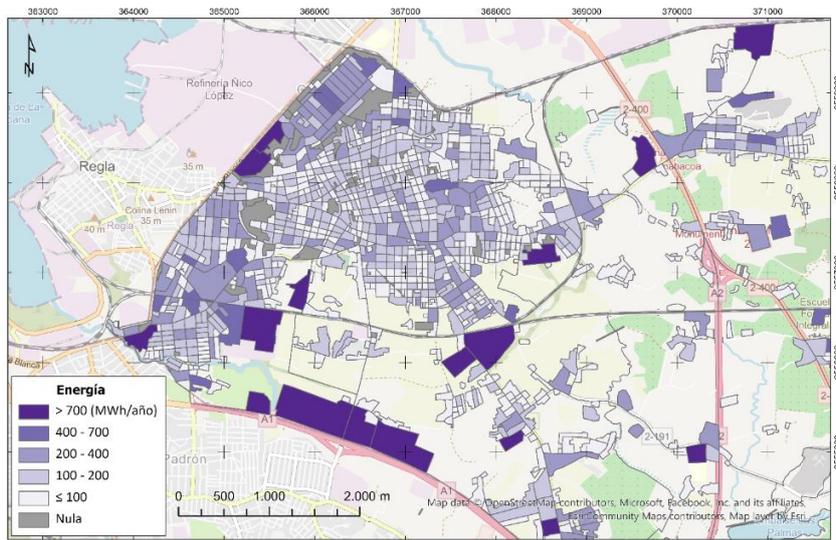


Figura 28. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores planos no selectivos. Guanabacoa.

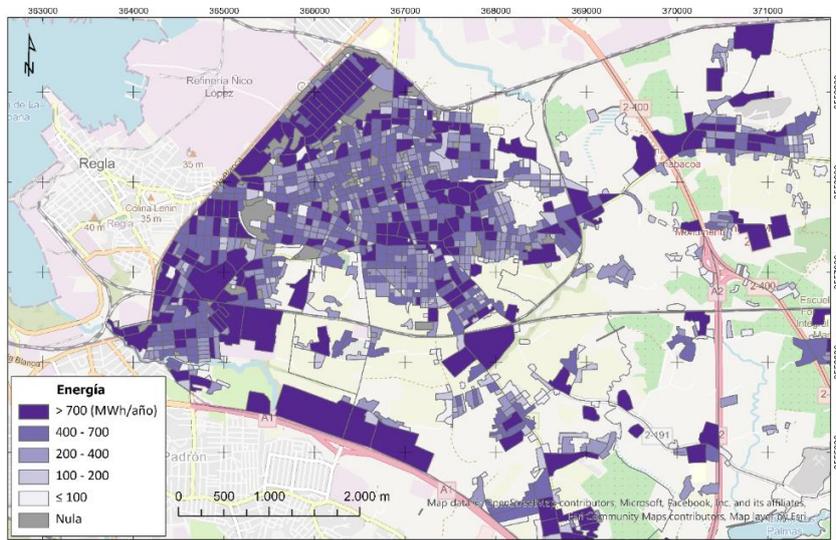


Figura 29. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores planos selectivos. Guanabacoa.

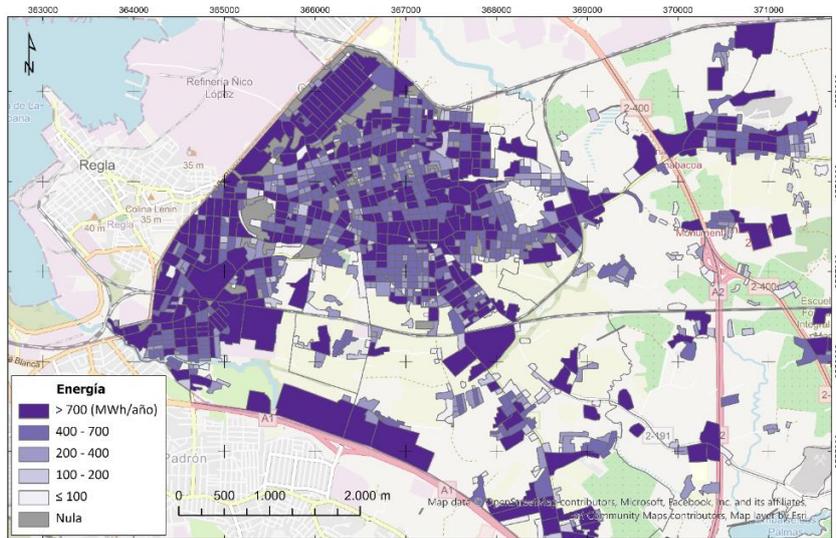


Figura 30. Térmica: Energía térmica anual generada para agua caliente a 60 °C para colectores de tubo de vacío. Guanabacoa.

5 RESULTADOS

5.1 SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS GLOBALES DE GUANABACOA

La zona urbanizada analizada abarca un área de 1.925 ha y se ha dividido en 1.673 parcelas urbanas. Las parcelas están formadas en su mayoría por el entramado de manzanas que constituyen el municipio, aunque también pueden corresponder a divisiones de las mismas cuando ha sido necesario diferenciar en ellas entre los usos urbanos (residencial, industrial y servicios) o la clasificación de los edificios. En el 96 % de las parcelas analizadas se observa la presencia de algún tipo de edificación (Figura 31). La superficie urbana con una edificación muy baja (hasta un 10 % de ocupación por edificios) apenas representa un 10 % de la zona urbanizada. Las áreas más densamente construidas se distribuyen principalmente en las parcelas de una ocupación media (30 - 50 % edificado) con el 31 %, seguidas por aquellas con una ocupación alta o muy alta con el 35 % de la superficie urbanizada.

En lo referente a los tipos de edificios y teniendo en cuenta las limitaciones de la información disponible sobre su uso, el 16,8 % de la superficie son zonas industriales, el 74,4 % corresponde a las áreas residenciales (incluyen las viviendas, pero también pueden mezclarse con otros tipos de construcciones) y un 5,1 % está ocupado por los servicios. Destacar, en la clasificación de los edificios y los tipos de sus tejados, que la forma de los mismos ha sido difícil de observar adecuadamente debido a la resolución de la ortoimagen. El 79,5 % del parcelario urbano analizado con edificaciones ha sido clasificado como tejados complejos sin una forma identificable, de ellos, el 65,4 % corresponden a la categoría de edificios residenciales heterogéneos (Tabla 20). Únicamente en un 20,5 % del parcelario ha sido posible identificar adecuadamente la forma de los tejados como inclinados o planos. En general, a este conjunto de parcelas pertenecen grandes edificios cuya amplia extensión de los tejados ha permitido visualizarlos, en su mayoría corresponden a las zonas industriales, los servicios y los edificios de apartamentos.

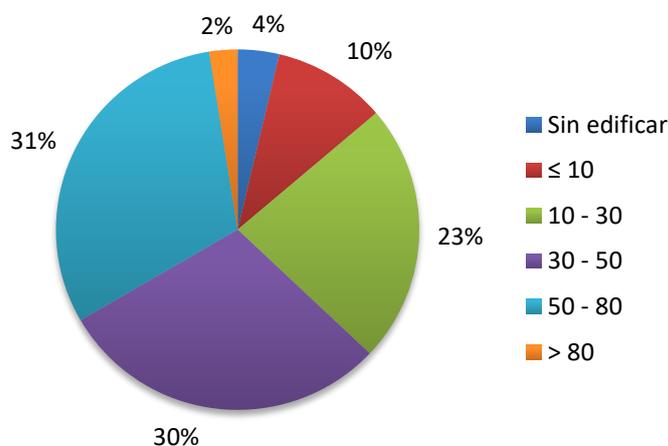


Figura 31. Porcentaje de la superficie urbanizada en relación con el porcentaje de ocupación del suelo por edificaciones.

Categoría	Uso	Parcelas	Superficie (m ²)	Superficie (%)
Industrial	Industrial	76	2.937.883	15,3
Industrial	Agrícola / Ganadero	24	291.740	1,5
Residencial	Heterogéneo	1.110	11.684.514	60,7
Residencial	Apartamentos	67	425.408	2,2
Residencial	Edificios aislados	215	2.217.164	11,5
Servicios	Administración	5	11.176	0,1
Servicios	Comercial	15	84.955	0,4
Servicios	Cultural	10	23.175	0,1
Servicios	Sanitario	12	54.998	0,3
Servicios	Educación	28	263.526	1,4
Servicios	Deportivo	2	80.914	0,4
Servicios	Transporte	5	88.508	0,5
Servicios	Energía	1	43.612	0,2
Servicios	Penitenciario	2	193.474	1,0
Servicios	Religioso	11	60.383	0,3
Servicios	Cementerio	3	80.359	0,4
Otros	Sin edificar	87	712.366	3,7

Tabla 20. Distribución de la superficie urbana según la clasificación de las parcelas por el uso de los edificios.

En las siguientes tablas puede verse una síntesis de los resultados (Tabla 21 a Tabla 28).

Tejados (m ²)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	152	9,1	74,6	3,9
100 - 500	447	26,7	313,2	16,3
500 - 1.000	473	28,3	396,6	20,6
1.000 - 2.000	362	21,6	510,1	26,5
> 2.000	140	8,4	552,4	28,7

Tabla 21. Superficie de tejados disponible para la instalación de paneles solares en relación al área urbana.

Potencia (kWp)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 50	381	22,8	229,7	11,9
50 - 100	327	19,5	236,3	12,3
100 - 200	474	28,3	433,6	22,5
200 - 400	290	17,3	484,0	25,1
> 400	102	6,1	463,4	24,1

Tabla 22. Potencia instalada para fotovoltaica en relación al área urbana. Módulos de silicio multicristalino.

Potencia (kWp)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 50	352	21,0	207,0	10,7
50 - 100	310	18,5	225,4	11,7
100 - 200	475	28,4	421,8	21,9
200 - 400	321	19,2	490,1	25,5
> 400	116	6,9	502,8	26,1

Tabla 23. Potencia instalada para fotovoltaica en relación al área urbana. Módulos de silicio monocristalino.

Energía (MWh)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	748	44,7	496,8	25,8
100 - 200	478	28,6	456,4	23,7
200 - 400	260	15,5	470,7	24,4
400 - 600	49	2,9	153,1	8,0
> 600	39	2,3	269,9	14,0

Tabla 24. Energía fotovoltaica anual generada en relación al área urbana. Módulos de silicio multicristalino.

Energía (MWh)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	710	42,4	469,5	24,4
100 - 200	478	28,6	437,7	22,7
200 - 400	284	17,0	463,8	24,1
400 - 600	54	3,2	169,7	8,8
> 600	48	2,9	306,2	15,9

Tabla 25. Energía fotovoltaica anual generada en relación al área urbana. Módulos de silicio monocristalino.

Energía (MWh)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	962	57,5	679,6	35,3
100 - 200	416	24,9	503,2	26,1
200 - 400	148	8,8	358,0	18,6
400 - 700	27	1,6	97,3	5,1
> 700	21	1,3	208,9	10,9

Tabla 26. Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores planos no selectivos.

Energía (MWh)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	283	16,9	158,2	8,2
100 - 200	248	14,8	182,3	9,5
200 - 400	425	25,4	334,4	17,4
400 - 700	363	21,7	409,6	21,3
> 700	255	15,2	762,3	39,6

Tabla 27. Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores planos selectivos.

Energía (MWh)	Parcelas	Parcelas (%)	Área urbana (ha)	Área urbana (%)
Nula	99	5,9	78,5	4,1
≤ 100	225	13,4	121,5	6,3
100 - 200	192	11,5	134,0	7,0
200 - 400	336	20,1	244,8	12,7
400 - 700	410	24,5	380,3	19,8
> 700	411	24,6	966,3	50,2

Tabla 28. Energía térmica anual generada en relación al área urbana. Colectores de tubo de vacío.

5.2 GEOPORTAL PARA LA PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para la representación de los principales resultados obtenidos se ha creado un [geoportal](#) o visor cartográfico online donde se alojan los mapas del municipio [63]. En los mapas web los usuarios pueden realizar consultas y visualizar los datos de las parcelas urbanas de una forma sencilla. Existen diferentes plataformas en internet donde se puede alojar la información geográfica para difundir los datos, en el caso de estudio de Guanabacoa hemos optado por el software comercial ArcGIS Online. El geoportal (Figura 32) es un visor de acceso libre que ha sido diseñado empleando el módulo 'Web AppBuilder'. Esta aplicación permite personalizar la configuración del visor y el sistema de consulta para moverse por el mapa, acceder a la información y realizar búsquedas. Al seleccionar cualquier parcela urbana en el mapa se muestran sus principales características. En la ventana emergente que se despliega (Figura 33) se pueden consultar la información sobre el potencial fotovoltaico y térmico asociado a cada parcela.

Como alternativa, también se han publicado los mapas en la plataforma [QGIS Cloud](#) [64]. Los mapas web publicados también son de acceso libre (Figura 34). Los mapas se crean en QGIS Desktop y a continuación las capas de datos y los mapas se publican en la web los datos y los mapas con el plugin de QGIS Cloud. Este servicio permite cargar mapas hasta un máximo de 50 Mb de información de forma gratuita, si se quiere acceder a otros servicios existe una versión comercial.

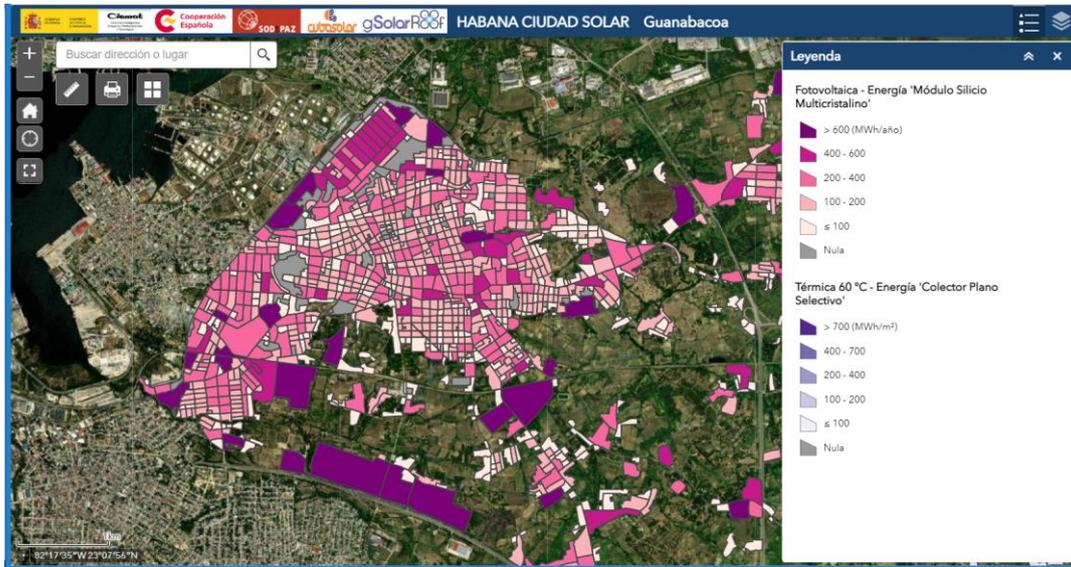


Figura 32. Vista del geoportel Habana Ciudad Solar - Guanabacoa en ArcGIS Online.

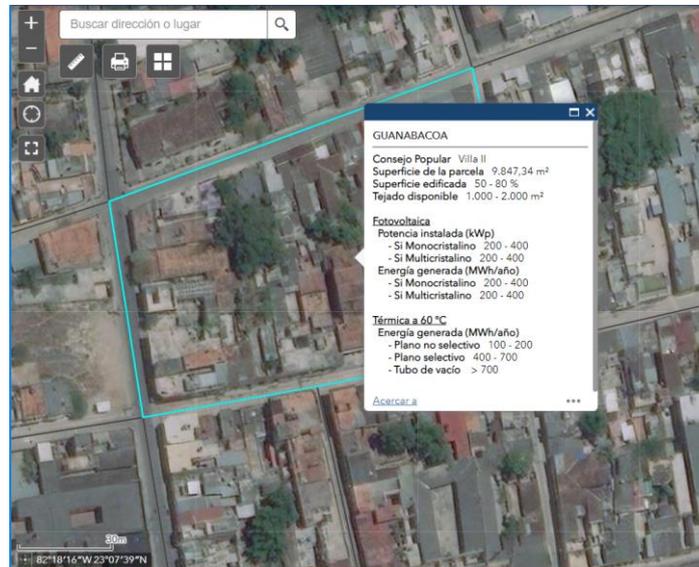


Figura 33. Ventana emergente. Geoportel Habana Ciudad Solar - Guanabacoa.

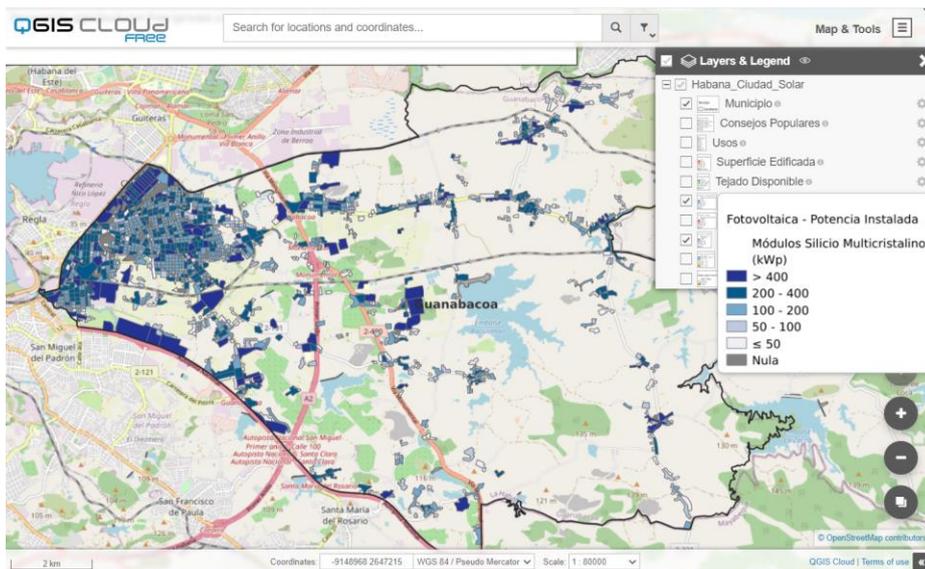


Figura 34. Vista del geoportel Habana Ciudad Solar - Guanabacoa en QGIS Cloud.

Las capas de datos que pueden consultarse en ambos mapas web son las siguientes:

- Límites del término municipal de Guanabacoa.
- Límites de los Consejos Populares.
- Distribución de las parcelas urbanas analizadas del municipio.
- Clasificación de las parcelas según los usos de los edificios.
- Superficie de tejados disponible para instalar módulos (m^2).
- Fotovoltaica: Potencia instalada (kWp).
- Fotovoltaica: Energía anual generada (MWh).
- Térmica: Energía anual generada (MWh).
- Irradiación solar global anual ($kWh/m^2/año$).
- Modelo Digital de Superficie (m).

6 CONCLUSIONES

Con la realización de este proyecto, se inicia la primera fase para dotar a toda La Habana del conocimiento necesario para implantar la energía solar como una alternativa que mejore la sostenibilidad y la calidad ambiental de la ciudad. Como podemos apreciar, la adaptación de modelos desarrollados con condiciones iniciales de alta disponibilidad de información geográfica no es sencilla. Una premisa fundamental será la accesibilidad de la información que se ha de utilizar. Desde esta perspectiva, la propuesta de esta metodología *ad-hoc* para el proyecto Habana Ciudad Solar significa un análisis profundo de las fuentes disponibles y un intento por simplificar tareas que puedan ser continuadas por otros grupos de trabajo locales en un futuro próximo.

De sus resultados, se obtiene una visión optimista del papel que ha de tener la energía solar para la sostenibilidad y el futuro de La Habana. Desde el CIEMAT, seguiremos trabajando con esta idea y apoyando los objetivos que contribuyan a la mejora de las condiciones ambientales, sociales y económicas de nuestras ciudades.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo Sostenible en Cuba. ONU; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://gsolarroof.eu/>
- [2] Bértiz Pérez L, Arencibia Aruca A. El desarrollo en Cuba de las fuentes renovables de energía. En: Domínguez Bravo, editor. Cogeneración de energía, eléctrica y térmica, mediante un sistema híbrido biomasa-solar para explotaciones agropecuarias en la Isla de Cuba. Madrid: CIEMAT; 2017. p. 23-44.
- [3] Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). gSolarRoof. CIEMAT; 2020 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://gsolarroof.eu/>
- [4] Martín Ávila AM, Domínguez Bravo J, Amador Guerra J. Desarrollo de un modelo geográfico para la evaluación del potencial fotovoltaico en entornos urbanos. GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica. 2016;8:147-167. doi: 10.21138/GF.483
- [5] Martín Ávila AM, Domínguez Bravo J, Ferrer Tebar JA, Díaz Herrero G. Study of the solar potential with the application of the gSolarRoof methodology in the industrial estates of Don Benito and Plasencia (Spain). Madrid: CIEMAT; 2021.
- [6] Izquierdo S, Rodrigues M, Fueyo N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. Solar Energy. 2008;82(10):929-39. doi: 10.1016/j.solener.2008.03.007
- [7] Sun YW, Hof A, Wang R, Liu J, Lin YJ, Yang DW. GIS-based approach for potential analysis of solar PV generation at the regional scale: A case study of Fujian Province. Energy Policy. 2013;58:248-59. doi: 10.1016/j.enpol.2013.03.002
- [8] Byrne J, Taminiu J, Kurdgelashvili L, Kim KN. A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014;41:830-44. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.023
- [9] Li ZQ, Zhang ZD, Davey K. Estimating Geographical PV Potential Using LiDAR Data for Buildings in Downtown San Francisco. Transactions in Gis. 2015;19(6):930-63. doi: 10.1111/tgis.12140
- [10] Gergelova MB, Labant S, Kuzevic S, Kuzevicova Z, Pavolova H. Identification of Roof Surfaces from LiDAR Cloud Points by GIS Tools: A Case Study of Lučenec, Slovakia. Sustainability. 2020;12(17). doi: 10.3390/su12176847
- [11] Ecured. Guanabacoa. 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: https://www.ecured.cu/EcuRed:Enciclopedia_cubana

- [12] Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). Anuario estadístico de Cuba. Población. Edición 2022. República de Cuba; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: http://www.onei.gob.cu/sites/default/files/03_poblacion_2021.pdf
- [13] Oficina Nacional de Estadística e Información (ONEI). Anuario estadístico de La Habana 2020. Edición 2021. República de Cuba; 2021 [31/08/2022]. Recuperado de: http://www.onei.gob.cu/sites/default/files/anuario_est_provincial/anuario_estadistico_provincial_la_habana_2020.pdf
- [14] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Story Map. NASA Earth Observations for Electrical Utility Applications. NASA; 2021 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://itcanbedone.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=f3f5aa31bd5f4eb7b3abe033a403ab4f>
- [15] Google Earth 2022. [31/08/2022]. Recuperado de: <https://www.google.com/intl/es/earth/>
- [16] OpenStreetMap. 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://www.openstreetmap.org>
- [17] Geofabrik GmbH, OpenStreetMap. Download OpenStreetMap data for this region: Cuba. Geofabrik Download; 2018 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://download.geofabrik.de/central-america/cuba.html>
- [18] European Space Agency (ESA). Sentinel-2 MSI User Guide. ESA; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
- [19] Bruno Pérez Martín B, Serna Martínez AR, Delgado Hernández J, Caballero García ME, Villa Alcázar G. El Programa Copernicus para la monitorización del territorio y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Madrid: Centro Nacional de Información Geográfica; 2020. 240 p. doi: 10.7419/162.13.2020
- [20] European Space Agency (ESA). Color Vision for Copernicus. The story of Sentinel-2. Bulletin 161. ESA's Sentinel-2 team; 2015 [31/08/2022]. Recuperado de: https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/Sentinel-2_ESA_Bulletin161.pdf
- [21] European Space Agency (ESA). Copernicus Open Access Hub. ESA; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- [22] European Space Agency (ESA). Snap Download. ESA; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- [23] European Space Agency (ESA). Sentinel Online. Data Product. ESA; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/data-products>
- [24] Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D-30m" (AW3D30). JAXA; 2017 [31/08/2022]. Recuperado de: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm

- [25] European Commission. PVGIS Photovoltaic Geographical Information System. EU Science Hub; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/
- [26] Camarillo-Naranjo JM, Álvarez-Francoso JI, Limones-Rodríguez N, Pita-López MF, Aguilar-Alba M. The global climate monitor system: from climate data-handling to knowledge dissemination. *International Journal of Digital Earth*. 2018;12(4):394-414. doi: 10.1080/17538947.2018.1429502
- [27] Universidad de Sevilla, Geographica. Global Climate Monitor. 2020 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://www.globalclimatemonitor.org/>
- [28] Infomed. Biblioteca virtual en salud. Directorio de Instituciones. Infomed Red de Salud de Cuba; 2021 [31/08/2022]. Recuperado de: https://www.sld.cu/infosearch_simple_search/?infoSid=63&text=guanabacoa&offset=10
- [29] Callejero de Cuba. Callejero de Guanabacoa, La Habana. Callejero de Cuba. 2021 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://callejero-cuba.openalfa.com/>
- [30] Agugiario G, Nex F, Remondino F, De Filippi R, Droghetti S, Furlanello C, editors. Solar radiation estimation on building roofs an Web-Based solar cadastre. XXII ISPRS Congress; 2012. Melbourne: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. doi: 10.5194/isprsannals-I-2-177-2012
- [31] Byrne J, Taminiu J, Kurdgelashvili L, Kim KN. A review of the solar city concept and methods to assess rooftop solar electric potential, with an illustrative application to the city of Seoul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;41:830-44. doi: 10.1016/j.rser.2014.08.023
- [32] Bramhe V, Ghosh S, Garg P. Extraction of built-up area by combining textural features and spectral indices from Landsat-8 multispectral image. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018;XLII-5:727-33. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-727-2018
- [33] Rouibah K, Belabbas M. Applying Multi-Index Approach from Sentinel-2 Inagery to Extract Urban Areas in Dry Season (Semi-Arid Land in North East Algeria). *Revista de Teledetección*. 2020;56,89-101. doi: 10.4995/raet.2020.13787
- [34] ESRI. Living Atlas. Word Imagery. ESRI; 2021 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://livingatlas.arcgis.com/es/home/>
- [35] European Union. Mapping guide for a European Urban Atlas. Copernicus The European Earth Observation Programme; 2016 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/urban-atlas-mapping-guide>
- [36] Lillesand TM, Chipman JW, Kiefer RW, Chipman JW, Kieffer RW. *Remote sensing and image interpretatio*. 5 ed: John Wiley & Sons; 2004.

- [37] Instituto Geográfico Nacional (IGN). (05) Curso de procesamiento de imágenes Sentinel con SNAP–Generación de índices espectrales. IGN; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://www.ign.es/web/ign/portal/tutoriales-copernicus-espanol>
- [38] Kokaly RF, Clark RN, Swayze GA, Livo KE, Hoefen TM, Pearson NC, Wise RA, Benzel WM, Lowers HA, Driscoll RL, Klein AJ. USGS Spectral Library Version 7. Report. Reston, VA: 2017;1035. doi: 10.3133/ds1035
- [39] Abutaleb K, Freddy Mudede M, Nkongolo N, Newete SW. Estimating urban greenness index using remote sensing data: A case study of an affluent vs poor suburbs in the city of Johannesburg. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2021;24(3, Part 1):343-51. doi: 10.1016/j.ejrs.2020.07.002
- [40] Hashim H, Abd Latif Z, Adnan N. Urban Vegetation classification with NDVI threshold value method with very high resolution (VHR) Pleiades imagery. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019;XLII-4/W16, 237-240. doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W16-237-2019
- [41] Instituto de Meteorología (INSME). El clima de Cuba. Características generales. Instituto de Meteorología de la República de Cuba. INSME; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TBO=PLANTILLAS&TB1=CLIMAC&TB2=/clima/ClimaCuba.htm>
- [42] Cohen, J. A coefficient of Agreement for Nominal Scale. *Educational and Psychological Measurement* 1960;20(1), 37-46 doi: 10.1177/001316446002000104
- [43] Ariza-López FJ, Rodríguez-Avi J, Alba-Fernández V. Control estricto de matrices de confusión por medio de distribuciones multinomiales. *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*. 2018;21,215-226. doi: 10.21138/GF.591
- [44] Sanchez Muños JM. Análisis de Calidad Cartográfica mediante el estudio de la Matriz de Confusión. *Revista de Investigación Pensamiento Matemático*. 2016;VI(2),9-26 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5998855>
- [45] Esri. ArcGIS Pro. Zona Statistics (Spatial Analyst). Esri; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/zonal-statistics.htm>
- [46] Ordóñez J, Jadraque E, Alegre J, Martínez E. Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14,7,2122-2130. doi: 10.1016/j.rser.2010.01.001
- [47] Wiginton LK, Nguyen HT, Pearce JM. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010;34(4),345-357. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2010.01.001

- [48] Bergamasco L, Asinari P. Scalable methodology for the photovoltaic solar energy potential assessment based on available roof surface area: Further improvements by ortho-image analysis and application to Turin (Italy). *Solar Energy*. 2011;85,11,2741-2756. doi: 10.1016/j.solener.2011.08.010
- [49] Schallenberg-Rodríguez J. Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: The case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;2,219-239. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.078
- [50] Esri. ArcGis Pro. Area Solar Radiation (Spatial Analyst). Esri; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/area-solar-radiation.htm>
- [51] Cutié Rizo F, Hernández Mestre D, Armesto Fals L. Estimación de la radiación potencial global solar sobre la superficie del municipio Guanabacoa. Cuba. Instituto de Geografía Tropical; 2021.
- [52] Martín AM, Domínguez J. Solar Radiation Interpolation. En: Polo J, Martín-Pomares L, Sanfilippo A, editors. *Solar Resources Mapping: Fundamentals and Applications*. Springer; 2019. p. 221-243. doi: 10.1007/978-3-319-97484-2_8
- [53] Liu, BYH, Jordan, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*. 1960;4(3),1-19. doi: 10.1016/0038-092X(60)90062-1
- [54] Cooper, PI. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*. 1969;12(3),333-346. doi: 10.1016/0038-092X(69)90047-4
- [55] Duffie, JA, Beckman, WA. *Solar engineering of thermal processes*. New Jersey: John Wiley & Son; 2013. 910p.
- [56] Gopinathan KK, Soler, A. Diffuse radiation models and monthly-average, daily, diffuse data for a wide latitude range. *Energy*, 1995;20(7),657-667. doi: 10.1016/0360-5442(95)00004-Z
- [57] Viessmann. Datos técnicos VITOVOLT 300. Modelo M2900A, M2950A, M3000A. Viessmann, S.L.; 2016.
- [58] Canadian Solar. PV Module Product Datasheet V5.531EN. CS6K-260|265|270|275P. Canadian Solar Inc.; 2017.
- [59] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica. Pliego de Condiciones Técnicas de Instalaciones Conectadas a Red. IDAE; 2011 [31/08/2022]. Recuperado de: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos_5654_FV_pliego_condiciones_tecnicas_instalaciones_conectadas_a_red_C20_Julio_2011_3498eaaf.pdf

- [60] Defaix PR, Van Sark WGJHM, Worrell E, De Visser E. Technical potential for photovoltaics on buildings in the EU-27. Solar Energy. 2012;86(9),2644-2653. doi: 10.1016/j.solener.2012.06.007
- [61] Assouline D, Mohajeri N, Scartezzini JL. Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. Solar Energy. 2017;141,278-296. doi: 10.1016/j.solener.2016.11.045
- [62] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) y Asociación Solar de la Industria Térmica (ASIT). (2020). Guía IDAE 022: Guía técnica de energía solar térmica. IDAE y ASIT; 2020 [31/08/2022]. Recuperado de: https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/guiasolartermica_idae-asit_v3.0_20210111_nipo.pdf
- [63] Centro de Investigaciones Energética, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Habana Ciudad Solar. Guanabacoa. ArcGIS Online. CIEMAT; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: <https://ciemat.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5dd1d7a685e4443cb0286a2446634209>
- [64] Centro de Investigaciones Energética, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Habana Ciudad Solar. Guanabacoa. QGIS Cloud free. CIEMAT; 2022 [31/08/2022]. Recuperado de: https://qgiscloud.com/gSolarRoof_CIEMAT/Habana_Ciudad_Solar/

