

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO  
*BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA*

Departamento de Máquinas y Motores Térmicos

## TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

---

**Título:** POTENCIAL TECNO-ECONÓMICO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN EL CAMPUS DE LEIOA DE LA UPV/EHU.

---

**DOCUMENTO: MEMORIA**

**Máster:** MASTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD EN INDUSTRIA, TRANSPORTE, EDIFICACIÓN Y URBANISMO

**Curso:** 2019 - 2020

**Autor:** DANIEL DE PRADO REQUENA

**Director:** JON TERÉS ZUBIAGA

**Codirector:** ÁLVARO CAMPOS CELADOR

---

# ÍNDICE

RESUMEN .....	7
LABURPENA .....	8
ABSTRACT .....	9
SIGLAS .....	10
NOMENCLATURA DE LOS MAPAS .....	11
1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO .....	12
1.1. Situación actual de la tecnología solar fotovoltaica en cubiertas de edificios ..	12
1.2. El programa Campus Bizia Lab y el proyecto EHUKhi .....	14
1.3. Antecedentes en las metodologías de análisis del potencial de energía fotovoltaica .....	15
1.4. Desarrollo de la metodología EHUKhi .....	19
1.5. Estudios del potencial fotovoltaico realizados en el entorno de la UPV/EHU y del proyecto EHUKhi .....	20
2. OBJETO DE ESTUDIO .....	21
3. ANÁLISIS DEL POTENCIAL TECNO-ECONÓMICO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA CON LA METODOLOGÍA EHUKHI .....	24
3.1. Tipología de los mapas y programas utilizados .....	24
3.2. Desarrollo de las tareas de la Metodología EHUKhi .....	25
4. TABLAS DE ATRIBUTOS DE LOS EDIFICIOS Y RESULTADOS .....	58
4.1. Tablas de atributos, gráficos y resultados .....	58
4.2. Discusión de los resultados y conclusiones .....	69
5. ANÁLISIS DE HIBRIDACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y EÓLICA .....	74
5.1. Introducción .....	74
5.2. Marco teórico .....	74
5.3. Datos existentes .....	82
5.4. Análisis de hibridación PV-Eólica .....	85
5.5. Discusión de los resultados y conclusiones .....	90
6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	91
7. BIBLIOGRAFÍA .....	92
7.1. Referencias .....	92
7.2. Enlaces y documentos útiles .....	99
7.3. Imágenes .....	100
7.4. Tablas .....	102
7.5. Ecuaciones .....	103

---

---

## ÍNDICE DE IMÁGENES

<b>Imagen 2-1.</b> Campus de Leioa de la UPV/EHU (GeoEuskadi). .....	21
<b>Imagen 2-2.</b> Detalle plano del campus de Leioa de la UPV/EHU .....	22
<b>Imagen 3-1.</b> Esquema explicativo de los pasos a seguir con la metodología EHUKhi. ...	25
<b>Imagen 3-2.</b> Mapa de alturas "Elevación_Leioa". .....	26
<b>Imagen 3-3.</b> Mapa de pendiente "slope_Leioa". .....	27
<b>Imagen 3-4.</b> Mapa de orientación "aspect_Leioa". .....	27
<b>Imagen 3-5.</b> Mapa de altura del horizonte en orientación este - 0° "horangle_Leioa_000". .....	28
<b>Imagen 3-6.</b> Mapa de radiación bruta para el 15 de mayo a las 14 horas "GIb_Leioa_05_14". .....	29
<b>Imagen 3-7.</b> Mapa de radiación bruta horizontal para el 15 de mayo "GHib_Leioa_05"	30
<b>Imagen 3-8.</b> Mapa de radiación neta para el 15 de mayo a las 14 horas "GIn_Leioa_05_14". .....	31
<b>Imagen 3-9.</b> Detalle del mapa de pendiente corregido "slope_Leioa_corregido". .....	32
<b>Imagen 3-10.</b> Detalle de mapa de filtrado de cubiertas en base a una inclinación de 12° "TipoCubierta_12_Leioa". .....	33
<b>Imagen 3-11.</b> Detalle del mapa de pendientes para superficies planas "slope_Pla_Leioa_corr". .....	33
<b>Imagen 3-12.</b> Detalle del mapa de pendientes para superficies inclinadas "slope_Inc_Leioa_corr". .....	34
<b>Imagen 3-13.</b> Detalle del mapa de producción para superficies planas "Epv_Pla_Leioa_anual". .....	35
<b>Imagen 3-14.</b> Detalle del mapa de producción para superficies inclinadas "Epv_Inc_Leioa_anual". .....	35
<b>Imagen 3-15.</b> Detalle del mapa de producción fotovoltaica "Epv_Leioa_anual". .....	36
<b>Imagen 3-16.</b> Detalle del mapa de PPBE para superficies inclinadas "PPBE_Inc_Leioa"	38
<b>Imagen 3-17.</b> Detalle del mapa de PPBE para superficies planas "PPBE_Pla_Leioa". ....	38
<b>Imagen 3-18.</b> Detalle del mapa de PPBE "PPBE_Leioa". .....	39
<b>Imagen 3-19.</b> Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 15 años "PPBE_Leioa_15". .....	39
<b>Imagen 3-20.</b> Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 9 años "PPBE_Leioa_9".	40
<b>Imagen 3-21.</b> Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 10 años "PPBE_Leioa_10". .....	40
<b>Imagen 3-22.</b> Detalle del mapa de inversión para superficies inclinadas "Inversión_Inc_Leioa". .....	41
<b>Imagen 3-23.</b> Detalle del mapa de inversión para superficies planas "Inversión_Pla_Leioa". .....	42

---

---

<b>Imagen 3-24.</b> Detalle del mapa de inversión "Inversión_Leioa".	42
<b>Imagen 3-25.</b> Detalle del mapa de PB para superficies inclinadas "PB_Inc_Leioa".	43
<b>Imagen 3-26.</b> Detalle del mapa de PB para superficies planas "PB_Pla_Leioa".	44
<b>Imagen 3-27.</b> Detalle del mapa de PB "PB_Leioa".	44
<b>Imagen 3-28.</b> Detalle del mapa de zonas con PB inferior a 7 años "PB_Leioa_7".	45
<b>Imagen 3-29.</b> Detalle del mapa de zonas con PB inferior a 8 años "PB_Leioa_8".	45
<b>Imagen 3-30.</b> Detalle del mapa de EROI para superficies inclinadas "EROI_Inc_Leioa".	47
<b>Imagen 3-31.</b> Detalle del mapa de EROI para superficies inclinadas "EROI_Inc_Leioa".	47
<b>Imagen 3-32.</b> Detalle del mapa de EROI "EROI_Leioa".	48
<b>Imagen 3-33.</b> Capa de edificaciones con geometrías corregidas "Edificaciones_Leioa_C".	49
<b>Imagen 3-34.</b> Capa ráster de producción anual en edificaciones "Epv_Leioa_anual".	50
<b>Imagen 3-35.</b> Capa vectorial corregida de producción anual en edificaciones "Epv_Leioa_anual_C".	51
<b>Imagen 3-36.</b> Capa de obstáculos en cubiertas "Obstáculos_Leioa".	52
<b>Imagen 3-37.</b> Capa de producción anual efectiva "Epv_Leioa_anual_efectivo".	52
<b>Imagen 3-38.</b> Capa de producción anual de cada edificación "Epv_Leioa_anual_edificaciones".	53
<b>Imagen 4-1.</b> Producción fotovoltaica anual relativa, respecto a la producción total, por zonas o facultades [%].	62
<b>Imagen 4-2.</b> Producción fotovoltaica mensual, por zonas o facultades [Wh]	62
<b>Imagen 4-3.</b> Producción horaria para el mes de enero, por zonas o facultades [Wh].	63
<b>Imagen 4-4.</b> Producción horaria para el mes de febrero, por zonas o facultades [Wh].	63
<b>Imagen 4-5.</b> Producción horaria para el mes de marzo, por zonas o facultades [Wh].	64
<b>Imagen 4-6.</b> Producción horaria para el mes de abril, por zonas o facultades [Wh].	64
<b>Imagen 4-7.</b> Producción horaria para el mes de mayo, por zonas o facultades [Wh].	65
<b>Imagen 4-8.</b> Producción horaria para el mes de junio, por zonas o facultades [Wh].	65
<b>Imagen 4-9.</b> Producción horaria para el mes de julio, por zonas o facultades [Wh].	66
<b>Imagen 4-10.</b> Producción horaria para el mes de agosto, por zonas o facultades [Wh]	66
<b>Imagen 4-11.</b> Producción horaria para el mes de septiembre, por zonas o facultades [Wh].	67
<b>Imagen 4-12.</b> Producción horaria para el mes de octubre, por zonas o facultades [Wh].	67
<b>Imagen 4-13.</b> Producción horaria para el mes de noviembre, por zonas o facultades [Wh].	68
<b>Imagen 4-14.</b> Producción horaria para el mes de diciembre, por zonas o facultades [Wh].	68
<b>Imagen 5-1.</b> Diseño de ROSEO-BIWT [61]	75
<b>Imagen 5-2.</b> Arista de la Facultad de Educación de Bilbao en la que Roseo ha instalado dos anemómetros. [17]	76

---



---

<b>Imagen 5-3.</b> Mallado de ERA5 (en azul) y ubicación de la Facultad de Educación de Bilbao (en rojo). [17] .....	77
<b>Imagen 5-4.</b> Rosa de los vientos obtenida mediante el re-análisis atmosférico ERA5 [17] .....	78
<b>Imagen 5-5.</b> Rosa de los vientos con sus respectivas velocidades, obtenida mediante el re-análisis atmosférico ERA5 [17] .....	78
<b>Imagen 5-6.</b> Rosa de los vientos obtenida mediante los datos medidos por los anemómetros [17] .....	79
<b>Imagen 5-7.</b> Rosa de los vientos con sus respectivas velocidades, obtenida mediante los datos medidos por los anemómetros [17] .....	79
<b>Imagen 5-8.</b> Consumo diario durante los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente). [77] .....	83
<b>Imagen 5-9.</b> Consumo mensual y radiación solar durante los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente). [77] .....	83
<b>Imagen 5-10.</b> Consumo mensual y media mensual de insolación diaria en los años 2017 y 2018. [77] .....	84
<b>Imagen 5-11.</b> Producción y consumo medios diarios de los meses de enero, febrero, marzo y abril. ....	86
<b>Imagen 5-12.</b> Producción y consumo medios diarios de los meses de mayo, junio, julio y agosto. ....	87
<b>Imagen 5-13.</b> Producción y consumo medios diarios de los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre. ....	88
<b>Imagen 5-14.</b> Estimación de generación eólica con distintos aerogeneradores existentes en el mercado. [17] .....	89

---

---

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 0-1.</b> Siglas.....	10
<b>Tabla 0-2.</b> Nomenclatura de mapas .....	11
<b>Tabla 3-1.</b> Día tipo para cada mes.....	28
<b>Tabla 3-2.</b> Cálculo del factor de claridad (FC) del cielo. (ADRASE / Elaboración propia) [54].....	30
<b>Tabla 3-3.</b> Prorratio de consumos en los distintos edificios en base a su volumen de ocupación.....	57
<b>Tabla 4-1.</b> Tabla de atributos relativa a las características de los edificios, radiación solar incidente, área aprovechable y producción fotovoltaica anual.....	59
<b>Tabla 4-2.</b> Tabla de atributos relativa a los indicadores de PPBE, Inversión, PB, EROI y Tasa de Autoabastecimiento. ....	60
<b>Tabla 4-3.</b> Tabla de producción fotovoltaica mensual .....	61
<b>Tabla 5-1.</b> Tabla de consumo, radiación solar e insolación diaria para los años 2017 y 2018. [77].....	82
<b>Tabla 5-2.</b> Tabla de consumo para el primer trimestre del año 2019. [77].....	82
<b>Tabla 5-3.</b> Estimación de generación eólica con distintos aerogeneradores existentes en el mercado. [17] .....	89

---

---

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 3-1.</b> Obtención del mapa de elevación de Leioa plano. ....	29
<b>Ecuación 3-2.</b> Fórmula para el cálculo del Factor de Corrección. ....	30
<b>Ecuación 3-3.</b> Fórmula para el cálculo de la radiación solar neta. ....	31
<b>Ecuación 3-4.</b> Fórmula genérica para el cálculo de la producción fotovoltaica. ....	31
<b>Ecuación 3-5.</b> Obtención del filtrado en base a la inclinación de las cubiertas. ....	33
<b>Ecuación 3-6.</b> Fórmula genérica para el cálculo de la producción fotovoltaica. ....	34
<b>Ecuación 3-7.</b> Fórmula para el cálculo de la producción fotovoltaica en cubiertas planas.....	34
<b>Ecuación 3-8.</b> Fórmula para el cálculo de la producción fotovoltaica en cubiertas inclinadas. ....	35
<b>Ecuación 3-9.</b> Energía producida por los paneles fotovoltaicos al cabo de n años. [58]	37
<b>Ecuación 3-10.</b> Energía producida por los paneles fotovoltaicos cuando PPBE = n [años].....	37
<b>Ecuación 3-11.</b> Fórmula genérica para el cálculo del PPBE. ....	37
<b>Ecuación 3-12.</b> Fórmula para el cálculo del PPBE en cubiertas inclinadas. ....	37
<b>Ecuación 3-13.</b> Fórmula para el cálculo del PPBE en cubiertas planas. ....	37
<b>Ecuación 3-14.</b> Obtención del filtrado del PPBE en base a los 15 años. ....	39
<b>Ecuación 3-15.</b> Fórmula para el cálculo de la Inversión en cubiertas inclinadas.....	41
<b>Ecuación 3-16.</b> Fórmula para el cálculo de la Inversión en cubiertas inclinadas.....	41
<b>Ecuación 3-17.</b> Fórmula para el cálculo del PB en cubiertas inclinadas.....	43
<b>Ecuación 3-18.</b> Fórmula para el cálculo del PB en cubiertas planas. ....	43
<b>Ecuación 3-19.</b> Obtención del filtrado del PB en base a los años. ....	45
<b>Ecuación 3-20.</b> Fórmula para el cálculo del EROI en cubiertas inclinadas. ....	46
<b>Ecuación 3-21.</b> Fórmula para el cálculo del EROI en cubiertas planas. ....	46
<b>Ecuación 3-22.</b> Fórmula para el cálculo del área aprovechable. ....	56
<b>Ecuación 3-23.</b> Fórmula genérica para el cálculo de la tasa de autoabastecimiento. ....	56
<b>Ecuación 3-24.</b> Fórmula para el cálculo de la tasa de autoabastecimiento. ....	57

---

## RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) forma parte del proyecto "EHUKhi: una plataforma para el desarrollo del potencial fotovoltaico de la UPV/EHU", enmarcado en el programa Campus Bizia Lab (CBL) de la UPV/EHU. CBL pretende desencadenar un proceso colaborativo entre personal de administración y servicios, estudiantes y profesorado (enfoque transdisciplinar) con objeto de responder a retos de sostenibilidad dentro de la propia Universidad.

El proyecto EHUKhi pretende evaluar el potencial físico, técnico y económico de la generación eléctrica renovable mediante paneles fotovoltaicos integrados en los edificios de los Campus de la UPV/EHU. Con este mismo objetivo se desarrolla el presente estudio, en el que se ha realizado un análisis para calcular el potencial de energía fotovoltaica en el campus de Leioa de la UPV/EHU.

Para realizar el estudio, se han utilizado distintos Sistemas de Información Geográfica (SIG/GIS) con mapas de diversa tipología, comenzando con mapas LiDAR que contienen información sobre los edificios y la orografía del terreno (altura, orientación, pendientes...). A partir de estos se han obtenido mapas ráster, con los cuales se ha trabajado en el programa GRASS GIS, realizando cálculos relativos a la radiación solar incidente (mediante el modelo de radiación solar integrado r.sun), la producción de electricidad y el análisis de varios indicadores energéticos y económicos. Por último, se ha trabajado con mapas vectoriales en el programa QGIS para hacer un tratamiento de los mapas ráster creados anteriormente, con el fin de obtener los resultados del análisis atribuidos a cada edificio que conforma el campus de Leioa de la UPV/EHU.

Por último, se ha considerado el caso particular de la Facultad de Educación de Bilbao, en la cuál se está llevando a cabo el proyecto de CBL "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)". En este caso, se ha realizado un análisis de los datos del consumo eléctrico para poder realizar un estudio de hibridación de tecnología fotovoltaica con tecnología eólica urbana, puesto que actualmente allí se ubican unos sensores de medición de diversos parámetros del viento, con el objetivo de realizar una instalación eólica en un futuro.

Palabras clave: fotovoltaica, urbana, GIS

## LABURPENA

Master Amaierako Lan (MAL) hau "EHUKhi: UPV/EHUren potentzial fotovoltaikoa garatzeko plataforma" proiektuaren parte da, EHUKo Campus Bizia Lab (CBL) programaren barruan. CBLk administrazio eta zerbitzuetako langileen, ikasleen eta irakasleen arteko lankidetzaren prozesua bultzatu nahi du (diziplina anitzeko ikuspegia), Unibertsitatearen beraren barruan iraunkortasunaren erronkei erantzute aldera.

EHUKhi proiektuaren bidez, EHUKo campusetako eraikinetan integratutako panel fotovoltaikoen bidez elektrizitate sorkuntza berriztagarriaren ahalmen fisiko, tekniko eta ekonomikoa ebaluatu nahi dira. Helburu horrekin berarekin garatu da azterlan hau, non EHUKo Leioako campusean energia fotovoltaikoaren potentziala kalkulatzeko azterketa bat egin baita.

Azterketa egiteko, hainbat motatako mapekin lan egin da Informazio Geografikoko Sistemak (IGS/GIS) erabiliz. Hasteko, eraikinei eta lurzoruen orografiari (altuera, orientazioa, maldak...) buruzko informazioa duten LiDAR mapak erabili dira. Horietatik abiatuta, raster mapak lortu dira, eta horiekin lan egin da GRASS GIS programan, eguzki-erradiazio erasotzaileari buruzko kalkulak eginez (programak integratuta dakarren r.sun eguzki-erradiazio ereduaren bidez), baita sorkuntza elektrizikoa eta hainbat adierazle energetiko eta ekonomiko aztertuz ere. Azkenik, mapa bektorialekin lan egin da QGIS programan, aurrez sortutako raster mapen tratamendua egiteko, EHUKo Leioako campusa osatzen duen eraikin bakoitzari dagozkion analisiaren emaitzak lortzeko.

Azkenik, Bilboko Hezkuntza Fakultatearen kasu berezia hartu da kontuan, non "Trantsizio energetikorantz disziplinazgandiko komunitatearen sorkuntza Bilboko Hezkuntza Fakultatean" CBL proiektua gauzatzen ari baita. Kasu honetan, kontsumo elektrikoari buruzko datuak aztertu dira, teknologia fotovoltaikoaren eta hiriko teknologia eolikoaren arteko hibridazio-azterketa egin ahal izateko; izan ere, gaur egun, haizearen hainbat parametro neurtzeko sentzore batzuk daude, etorkizunean instalazio eoliko bat egiteko helburuarekin.

Hitz gakoak: fotovoltaiko, hiritar, GIS

## ABSTRACT

This Master's Final Project (MFP) is part of the project "EHUKhi: a platform for the development of the photovoltaic potential of the UPV/EHU", belonging to the program Campus Bizia Lab (CBL) of the UPV/EHU. CBL aims to trigger a collaborative process between administration and services staff, students and teachers (transdisciplinary approach) in order to respond to sustainability challenges within the University itself.

The EHUKhi project aims to evaluate the physical, technical and economic potential of renewable electricity generation through photovoltaic panels integrated into the buildings of the UPV/EHU Campus. With this same objective the present study is developed, in which an analysis has been carried out to calculate the potential of photovoltaic energy in the Leioa (Biscay) campus of the UPV/EHU.

To carry out the study, different Geographic Information Systems (GIS) have been used with maps of different typology, starting with LiDAR maps containing information on buildings and terrain orography (height, orientation, slopes...). From these, raster maps have been obtained, with which it has been worked in the GRASS GIS program, carrying out calculations related to the incident solar radiation (using the integrated solar radiation model r.sun), the production of electricity and the analysis of several energy and economic indicators. Finally, the work was done with vector maps in the QGIS program to make a treatment of the raster maps created earlier, in order to obtain the results of the analysis attributed to each building that forms the Leioa campus of the UPV/EHU.

Finally, it has been considered the particular case of the Faculty of Education of Bilbao, in which is being carried out the project of CBL "Creation of interdisciplinary community towards the energy transition in the Faculty of Education of Bilbao (UPV/EHU)". In this case, an analysis of the data of the electric consumption has been done to be able to carry out a study of hybridization of photovoltaic technology with urban wind technology, since currently there are some sensors of measurement of various parameters of the wind, with the aim of realizing a wind installation in the future.

Keywords: photovoltaic, urban, GIS

**SIGLAS**

CBL	Campus Bizia Lab
UPV/EHU	Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea
TFM	Trabajo de Fin de Máster
TFG	Trabajo de Fin de Grado
SIG / GIS	Sistema de Información Geográfica / Geographic Information System
LiDAR	Light Detection And Ranging
GRASS	Geographical Resources Analysis Support System GIS
QGIS	Quantum GIS
PV	Photovoltaic / Fotovoltaica
PDI	Personal Docente e Investigador
PAS	Personal de Administración y Servicios
ESRA	European Solar Radiation Atlas
PVGIS	Photovoltaic Geographic Information System
CNIG	Centro Nacional de Información Geográfica
ADRASE	Acceso a Datos de Radiación Solar de España
Epv	Energía Fotovoltaica
PR	Performance Ratio
PPBE	Payback Energético con Depreciación
I	Inversión
PB	Payback Económico simple
EROI	Energy Return on Investment / Tasa de Retorno Energético
BIWT/BEWT	Building-Integrated Wind Turbine / Building Environment Wind Turbine
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
CFD	Computational Fluid Dynamics

**Tabla 0-1. Siglas**

**NOMENCLATURA DE LOS MAPAS**

elevación_Leioa	Mapa de elevación o alturas
slope_Leioa	Mapa de pendiente
aspect_Leioa	Mapa de orientación
horangle_Leioa	Mapa de altura del horizonte
GIb_Leioa	Mapa de radiación bruta
elevación_Leioa_flat	Mapa de elevación o alturas plano
slope_Leioa_flat	Mapa de pendiente plano
aspect_Leioa_flat	Mapa de orientación plano
GIHb_Leioa	Mapa de radiación bruta horizontal
GIn_Leioa	Mapa de radiación neta
slope_Leioa_corregido	Mapa de pendientes corregido
TipoCubierta_12_Leioa	Mapa de filtrado de cubiertas en base a inclinación de 12º
Epv_Leioa	Mapa de producción fotovoltaica
PPBE_Leioa	Mapa de Payback Energético con Depreciación
Inversión_Leioa	Mapa de Inversión
PB_Leioa	Mapa de Payback Económico Simple
EROI_Leioa	Mapa de Tasa de Retorno Energético
Edificaciones_Leioa	Mapa de edificaciones
Obstáculos_Leioa	Mapa de obstáculos de cubierta
Epv_Leioa_anual_efectivo	Mapa de producción efectiva (zonas sin obstáculos)
Epv_Leioa_anual_edificaciones	Mapa de producción fotovoltaica por edificios

**Tabla 0-2. Nomenclatura de mapas**



## 1. INTRODUCCIÓN Y MARCO TEÓRICO

### 1.1. *Situación actual de la tecnología solar fotovoltaica en cubiertas de edificios*

Durante los últimos 20 años, mientras que el uso de la energía procedente de combustibles fósiles ha aumentado drásticamente, el impacto del calentamiento global se ha hecho más claro [1]. Actualmente, de hecho, la Unión Europea tiene declarado el estado de emergencia climática. Aun así, en los últimos años, el rápido agotamiento de los combustibles fósiles y su asociación con el cambio climático han llevado a la vanguardia las tecnologías de energía renovable [2].

De entre las fuentes de energía renovable, cabe destacar la energía solar fotovoltaica, la cual ha tenido un crecimiento sostenido en los últimos años, alcanzando 227 GW de capacidad global en 2015, con 50 GW de adición durante el año 2016. Esta es una tecnología desarrollada que lleva años implantada en la Unión Europea y cumple un papel notable en la transición energética, puesto que tiene la mayor densidad de energía y potencial biofísico entre las energías renovables [3]. De hecho, en 2017, la contribución de la PV a la demanda de electricidad de la UE fue de 114 TWh, de una capacidad instalada de 107 GW [4]. Un estudio de Súri et al. [5] mostró que la PV ya puede contribuir significativamente a un escenario mixto de energías renovables en la actual Unión Europea y la futura (con más estados miembro). Para esto también es necesario conocer las características y la economía del sector de la energía solar para integrarlo en el mix de generación y consumo de energía [6].

Aun así, basar la transición en esta tecnología puede tener sus limitaciones, tal y como analizaron Capellán-Pérez et al. [3]. Según su estudio, la transición a las energías renovables intensificará la competencia mundial por los terrenos. Sin embargo, la mayoría de los análisis realizados hasta la fecha llegan a la conclusión de que la tierra no planteará limitaciones significativas en esta transición. Por ello, en su estudio estiman los requisitos de uso de la tierra para suministrar con energía solar doméstica toda la electricidad y energía final consumida para 40 países considerando dos cuestiones clave que generalmente no se toman en cuenta: (1) la necesidad de hacer frente a la variabilidad del recurso solar y (2) la ocupación terrestre real de las tecnologías solares. Este ejercicio mostró que para muchas economías capitalistas avanzadas los requisitos terrestres para cubrir su consumo actual de electricidad serían sustanciales, siendo la situación especialmente difícil para aquellos ubicados en latitudes septentrionales con altas densidades de población y un alto consumo de electricidad per cápita. Estos resultados ponen de manifiesto la gran importancia que va a tener la eficiencia energética en esta transición.

Por su parte, Fthenakis y Kim [7] hicieron un estudio de análisis de ciclo de vida (ACV) sobre el uso terrestre y la generación de electricidad, en el que concluyeron que, aunque las estimaciones varían según las condiciones regionales y tecnológicas, el ciclo de la fotovoltaica (PV) requiere la menor cantidad de tierra entre las opciones de energía renovable.

Una tecnología prometedora para proporcionar una fuente de alimentación sostenible es la conversión aplicada de energía solar en edificios locales utilizando un sistema fotovoltaico (PV) [1]. Comparado con otras opciones disponibles, la PV tiene una mayor aceptación entre el público, en parte porque hay menos competencia por la tierra y otros recursos [8]. Además, en los próximos años, las ciudades desempeñarán un papel importante en el gran

desafío de la descarbonización, donde la planificación energética a medio y largo plazo se ha convertido en un gran problema [9]. Por lo tanto, los sistemas de solar fotovoltaica (PV) en cubierta pueden contribuir significativamente a la transición energética en Europa [4].

A medida que se presta más atención a nivel mundial en el desarrollo de sistemas fotovoltaicos integrados en edificios, la evaluación técnica, económica y medioambiental de estos sistemas es crucial para determinar su viabilidad [10]. La generación local de electricidad renovable a través de sistemas fotovoltaicos (PV) montados en cubiertas de edificios en zonas urbanas proporciona un gran potencial para la mitigación de gases de efecto invernadero, [...] lo cual habitualmente resulta económicamente viable también [8]. Breyer et al. [11] estudiaron la rentabilidad de la mitigación del cambio climático con instalaciones de energía solar fotovoltaica; concluyeron que los costos de evitar emisiones de GEI utilizando sistemas en cubiertas urbanas son de 17-70 €/tCO<sub>2e</sub> [...], muy inferiores al umbral de 80 €/tCO<sub>2e</sub> para el costo de los impactos del cambio climático.

Bien habría que considerar que no todo el ciclo de vida de esta tecnología resulta tan sostenible. Como analizaron Oregi et al. [9], la fase crítica del ciclo de vida de los sistemas fotovoltaicos es el proceso de fabricación de módulos, que se caracteriza por un alto consumo de electricidad, que representa la mayor parte del impacto ambiental. Sin embargo, se ha demostrado que la aplicación de la tecnología fotovoltaica presenta importantes beneficios ambientales en comparación con los sistemas de producción de energía convencionales.

Esta tecnología, además de minimizar los problemas en cuestiones de cambio climático y uso terrestre, también ofrece beneficios propios de las tecnologías de generación distribuida, como minimizar las pérdidas en el transporte y la menor necesidad de instalar líneas eléctricas. No sólo eso, estos sistemas también pueden mejorar la autosuficiencia del suministro eléctrico [12].

Sin embargo, para darse todos estos beneficios asociados a la generación de electricidad con tecnología solar fotovoltaica, también es importante examinar los lugares adecuados para albergar las instalaciones, puesto que algunas cubiertas no son aptas para instalar sistemas fotovoltaicos [12]. En las áreas urbanas y, especialmente en las ciudades, donde el espacio tiene mayor valor y costos de oportunidad, encontrar espacios adecuados para implementar sistemas solares va a ser esencial para promover el uso de tecnologías solares [6]. Aún así, la influencia en la demanda energética final debido a la variación de los diferentes parámetros no sólo está influenciada por la ubicación y la climatología [...] ya que otros aspectos como la tipología del distrito (la antigüedad, el tamaño y la distribución de sus edificios) tienen una mayor influencia en los resultados [9].

El presente trabajo tiene el objetivo de implantar de manera adecuada esta tecnología, formando parte del proyecto "EHUKhi: una plataforma para el desarrollo del potencial fotovoltaico de la UPV/EHU" [13], el cual pretende evaluar el potencial físico, técnico y económico de la generación eléctrica renovable mediante paneles fotovoltaicos integrados en los edificios de los Campus de la UPV/EHU.

A su vez, este proyecto se enmarca en la tercera edición (2019/2020) del programa Campus Bizia Lab (CBL) de la UPV/EHU [14], dirigido a equipos de trabajo transdisciplinarios y multicolectivo (PDI, PAS y alumnado) que desarrollen proyectos en torno a un reto de sostenibilidad de la propia universidad y que responda a los objetivos de la EHUagenda2030 [15].

En el siguiente apartado se muestran con más detalle las características del programa Campus Bizia Lab (CBL) y, en especial, del proyecto EHUKhi.

## **1.2. El programa Campus Bizia Lab y el proyecto EHUKhi**

El presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) forma parte del programa Campus Bizia Lab (CBL) de la UPV/EHU, el cuál pretende desencadenar un proceso colaborativo entre personal de administración y servicios, estudiantes y profesorado (enfoque transdisciplinar) con objeto de responder a retos de sostenibilidad dentro de la propia Universidad [14]. Este pretende crear sinergias entre el profesorado que en los últimos años viene trabajando en el ámbito de la educación para la sostenibilidad en diferentes iniciativas y proyectos, realizando un aprendizaje basado en problemas o proyectos.

CBL consiste en un proceso de investigación o acción que tiene como objetivo desarrollar una práctica de alto impacto entre el alumnado, en la que el profesorado actuará como investigador de su propia práctica, la cuál tendrá un carácter curricular, en este caso materializándose a través del presente TFM.

Actualmente se encuentra convocada su tercera edición (2019/2020), dirigida a equipos de trabajo transdisciplinares y multicolectivo (PDI, PAS y alumnado) que desarrollen proyectos en torno a un reto de sostenibilidad de la propia universidad y que responda a los objetivos de la EHUagenda2030 [15].

Dentro del programa CBL estaría enmarcado el proyecto "EHUKhi: una plataforma para el desarrollo del potencial fotovoltaico de la UPV/EHU" [13]. El proyecto EHUKhi pretende evaluar el potencial físico, técnico y económico de la generación eléctrica renovable mediante paneles fotovoltaicos integrados en los edificios de los Campus de la UPV/EHU. Específicamente, se persigue:

- Estimar el nivel potencial de autosuficiencia eléctrica de los centros elegidos, en términos energéticos y económicos.
- Promover bajo distintas fórmulas la inversión en nuevas instalaciones fotovoltaicas, bajo la expectativa de recuperar la inversión por el ahorro generado en la factura de electricidad.
- Desarrollar una plataforma interactiva para la visualización del potencial fotovoltaico y de autosuficiencia eléctrica, con el fin de difundir los resultados del proyecto.

Además de trabajar en el proyecto EHUKhi, este TFM pretende crear sinergias con en el proyecto "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16], coordinado por José Ramón Díez. En este proyecto se han analizado el conocimiento sobre el sistema energético, los comportamientos y las costumbres sobre la energía mediante una encuesta realizada a 407 personas. También se han implementado intervenciones didácticas sobre la transición energética en los tres grados de la Facultad, además de recoger y analizar datos del consumo eléctrico.

La colaboración con este proyecto consiste en un análisis de los datos del consumo eléctrico para realizar un estudio de hibridación de tecnología fotovoltaica con la tecnología eólica de la empresa Roseo Eólica Urbana [17], la cuál actualmente se encuentra realizando mediciones de diversos parámetros del viento en la cornisa de la Facultad.

### **1.3. Antecedentes en las metodologías de análisis del potencial de energía fotovoltaica**

La evaluación del potencial (restante) para la generación de energía a partir de la PV es un campo de estudio importante [8]. El desarrollo de métodos y herramientas para permitir la caracterización de la demanda energética de los edificios de grandes áreas se está convirtiendo en uno de los principales desafíos en este campo. Se necesitan nuevos estudios centrados en el diagnóstico energético de distritos y ciudades con diferentes ubicaciones y condiciones climáticas para calibrar los métodos y supuestos actuales, así como para la replicación del método validado en otras ciudades del mundo [9]. Por lo tanto, los métodos y herramientas que permiten a los responsables de la toma de decisiones locales evaluar los potenciales fotovoltaicos en sus respectivas comunidades son de vital importancia para la transición energética [8]. Así que el hecho de definir la metodología más adecuada y fiable tendrá la misma importancia también.

Como bien se ha mencionado anteriormente, para hacer el análisis del potencial tecnológico de energía fotovoltaica (PV), se utilizarán los programas de software de Sistema de Información Geográfica Grass GIS y QGIS. Estos cuentan con ciertas herramientas que permiten evaluar el potencial en entornos urbanos, lugares similares al que este proyecto tiene como objeto de estudio. Con el fin de tener una idea del modo de trabajo para realizar esta labor y así definir la metodología que se va a aplicar, se ha optado por hacer un repaso de las metodologías utilizadas por otros autores en este ámbito.

Un buen punto de partida para este cometido es mencionar el estudio realizado por Sorensen [18] en el año 2001, donde empleó un sistema de información geográfica (GIS) para mapear los recursos solares sobre la base de datos satelitales (radiación en la parte superior de la atmósfera, albedo, radiación directa en la superficie) y para unirlo con el modelado de la demanda sobre una zona habitada (densidad de población, intensidad de la demanda de energía). El uso potencial de fotovoltaica se basó en estimaciones de áreas prácticas para el uso de generación (áreas de cubiertas de edificios, superficies adecuadamente inclinadas y orientadas) combinadas con datos de uso del suelo (importante para centrales solares de torre central). Los datos de medición locales se convirtieron al mallado de GIS empleado. Este fue un enfoque novedoso en comparación con anteriores evaluaciones, planificación y escenario global en el campo fotovoltaico, que tradicionalmente se ubicaban en el ámbito rural.

En 2004 Suri et al. [19] presentaron un nuevo modelo de radiación solar denominado r.sun en su artículo A New GIS-based Solar Radiation Model and Its Application to Photovoltaic Assessments. Esta es una herramienta flexible y eficiente para la estimación de la radiación solar para condiciones atmosféricas de cielos claros y nublados. A diferencia de otros modelos, r.sun considera todos los parámetros de entrada relevantes como entidades distribuidas espacialmente para habilitar los cálculos para áreas grandes con terreno complejo. Conceptualmente, el modelo se basa en ecuaciones publicadas en el Atlas Europeo de Radiación Solar (ESRA). Este modelo está totalmente integrado dentro del entorno de código abierto de GRASS GIS.

En 2005, Zaksek et al. [20] desarrollaron un modelo de radiación solar basado en la definición del ángulo de incidencia mediante la computación del plano tangente normal a la superficie y la dirección del Sol. [...] La determinación de sombras es una parte importante del modelo que desarrollaron. Además, tuvieron que integrarse los parámetros meteorológicos en el modelo [...], pudiendo distinguir entre radiación solar directa y difusa. El modelo fue probado e implementado para toda Eslovenia y también se comparó con estudios anteriores. Los datos de la superficie del estudio de caso se calcularon a partir del DEM con una resolución de 25 m. Los datos astronómicos, que eran necesarios para la

simulación virtual del movimiento del Sol alrededor de la Tierra, se derivaron del almanaque astronómico. Se adquirieron datos meteorológicos de los valores medios observados en 24 estaciones meteorológicas entre 1961 y 1990. Todos los cálculos se hicieron durante horas y décadas y, finalmente, la energía de radiación cuasiglobal anual, que es la energía recibida por el plano inclinado del Sol en un año, se calculó a partir de la suma de todas las energías de todas las décadas.

En 2007, Suri et al. [21] presentaron el trabajo realizado durante los años 2001-2005, en el que se desarrolló una base de datos europea de radiación solar utilizando un modelo de radiación solar y datos climáticos integrados en el Photovoltaic Geographic Information System (PVGIS). La base de datos, con una resolución de 1km x 1km, consta de promedios mensuales y anuales de irradiancia global y parámetros climáticos relacionados, que representan el período 1981-1990. La base de datos se utilizó para analizar las diferencias regionales y nacionales de los recursos de energía solar y para evaluar el potencial fotovoltaico (PV) en los 25 Estados miembros de la Unión Europea y 5 países candidatos. El análisis mostró que la energía fotovoltaica podía contribuir significativamente a una cartera mixta de energías renovables en la Unión Europea actual y futura.

En 2010, Nguyen y Pearce [22] utilizaron la herramienta r.sun incluida en Geographical Resources Analysis Support System (GRASS) para calcular la insolación, incluida la variación temporal y espacial del albedo y el rendimiento solar fotovoltaico. Presentaron un algoritmo completo que cubre los pasos de adquisición de datos y preprocesamiento para la simulación posterior mediante el cual se identificaron los terrenos candidatos para albergar nuevos proyectos de granjas solares. Se determinó que la resolución óptima para obtener resultados fiables para integrarse en el software de diseño de sistemas fotovoltaicos era de 1 km cuadrado.

Estos mismos autores [23], en 2012, realizaron un estudio para incorporar las pérdidas por sombras al análisis del potencial fotovoltaico. Su estudio proporcionó un nuevo algoritmo que (i) incorporaba efectos de sombra tanto en el terreno como cerca de la superficie en el componente de viga; (ii) reducía la escala de los componentes difusos de la irradiación global; y (iii) utilizaba GRASS, libre y de código abierto, y el módulo r.sun en el modelado de la irradiancia [...]. Esto se probó de forma piloto en datos LiDAR para 100 edificios en el centro de Kingston, Ontario.

En 2013, Schallenberg-Rodríguez [24] realizó un repaso de las metodologías de cálculo del área total de la cubierta, en el que destacó de entre toda la labor realizada hasta ese momento los trabajos que se mencionan en las siguientes líneas.

Uno de ellos era el trabajo de Bergamasco y Asinari [25], quienes estudiaron la Región de Piedmont (noroeste de Italia). Su objetivo era evaluar el área disponible de cubierta para instalaciones fotovoltaicas (PV) por municipio [...]. El cálculo de la superficie de la cubierta no se basó en muestras, sino en toda la base de datos cartográfica de la región. Su metodología calcula en primer lugar toda el área del tejado utilizando Sistemas de Información Geográfica (GIS) mediante la asociación de polígonos. Las entidades (cada entidad corresponde a un objeto, como edificios, carreteras, ríos, etc. y cada polígono almacena cierta información, como su área y perímetro) se han filtrado para calcular el número de edificios residenciales y edificios industriales por municipio y el área total disponible de cubierta. Los resultados se representan como histogramas de número de edificios y sus correspondientes superficies de cubierta, distinguiendo edificios residenciales y edificios industriales. Los autores del documento estiman un error total del 1,7% del área de cubierta, el cuál es, de hecho, bajo.

Otro trabajo era el de Defaix et al. [26], quienes estimaron el potencial para fotovoltaica (PV) integrada en edificios de Europa. Desarrollaron un método utilizando datos

estadísticos fácilmente disponibles sobre edificios de bases de datos europeas. Por lo tanto, calcularon toda la zona de la cubierta utilizando las Estadísticas Europeas. Para calcular el área de cubierta disponible, aplicaron un factor de utilización de 0,4 [...], ya que basaron su metodología en la desarrollada por Gutschner et al. [...].

También se mencionaba el de Tereci et al. [27], quienes usaron datos de Light Detection and Ranging (LiDAR) para construir un Modelo Digital de Superficie. Utilizando el programa software GeoMedia Grid, pudieron clasificar los tipos de cubierta en el área objeto de estudio (distrito urbano Scharnhauser Park, Ostfildern, Alemania) e identificar cubiertas aptas para albergar módulos solares (cubiertas planas o inclinadas, orientadas al sur y no muy inclinadas). Después determinaron el potencial PV anual usando un promedio de radiación global anual para toda la zona.

Otro de ellos era el trabajo de Brito et al. [28], quienes analizaron el potencial PV de un barrio residencial de Lisboa, construyendo un Modelo Digital del Terreno y un Modelo Digital de Superficie partiendo de datos LiDAR de alta resolución y fotografía aérea digital. Para calcular la radiación solar se utilizó una extensión GIS, la cuál permite la creación de mapas y el análisis de la radiación solar sobre un área geográfica por periodos específicos de tiempo. El potencial fotovoltaico total de los 538 edificios identificados fue de alrededor de 11,5GWh/año para una capacidad instalada de 7MW, lo que corresponde al 48% de la demanda local de electricidad.

Además de los anteriores, destacó el de Hofierka y Kanuk [29], quienes propusieron una metodología para el análisis del potencial fotovoltaico en áreas urbanas utilizando herramientas de radiación solar de código abierto, incluido el modelo de radiación solar r.sun (desarrollado por Sári et al. [19]) y la herramienta web de estimación PVGIS (desarrollada por Sári et al. [21]) que se puede utilizar eficazmente para una evaluación in situ de instalaciones fotovoltaicas. El área urbana está representada por un modelo de ciudad tridimensional (3D) implementado en una base de datos SIG. La aplicabilidad de la metodología se demuestra utilizando el ejemplo de una pequeña ciudad en el este de Eslovaquia. El análisis demostró un alto potencial fotovoltaico que podría cubrir alrededor de 2/3 del consumo eléctrico actual en la ciudad. Sin embargo, este potencial exhibió grandes variaciones espaciales y temporales causadas por factores globales y locales. Este estudio también demostró que las evaluaciones nacionales del potencial fotovoltaico pueden mejorarse mediante la extrapolación de evaluaciones locales utilizando bases de datos espaciales de áreas urbanas.

Por último, mostró el trabajo de Vardimon [30], quien usó un software GIS y ortofotos aéreas para calcular el área total de cubiertas en Israel. Las ortofotos que abarcaban todas las ciudades del país fueron analizadas por medios fotogramétricos para delimitar todos los edificios con polígonos. El conjunto de datos, compuesto por 1.200.000 edificios, abarcaban todo el país. Además, todos los edificios se clasificaron según su uso o finalidad (comercial, industrial, etc.) de acuerdo a estudios gubernamentales. Tras obtener el área total de las cubiertas, se usaron diferentes factores de utilización en base al tipo de edificación para calcular el área de cubierta disponible.

También en 2013, Jakubiec y Reinhart [31] presentaron [...] un método para predecir la generación de electricidad en toda la ciudad (Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos) a partir de paneles fotovoltaicos, en base a modelos detallados de masa urbana 3D combinados con simulaciones de irradiancia por hora basadas en Daysim, datos meteorológicos típicos del año climático y temperaturas de cubierta calculadas por hora [...]. El nuevo método constituyó la primera vinculación de conjuntos de datos urbanos GIS y LiDAR, cada vez más disponibles con el motor de simulación de rendimiento del edificio validado Daysim, utilizado hasta ahora principalmente a escala de edificios individuales o pequeños barrios urbanos.

Por su parte, ese mismo año Lukac [12] determinó el potencial solar de cubiertas por un método que combina la topografía urbana extraída de los datos de LiDAR con las mediciones del piranómetro de las irradiancias solares globales y difusas. El sombreado anual heurístico de la vegetación y un modelo de sombra de múltiples resoluciones completaban el método. La importancia de diferentes factores influyentes (por ejemplo, sombras) se analizó ampliamente. Una comparación entre los resultados obtenidos por el método propuesto y las mediciones realizadas en una instalación fotovoltaica real mostró un acuerdo de correlación del 97,4%.

En el año 2015, Kausika et al. [32] presentaron un modelo de trabajo para estimar el potencial solar fotovoltaico (en los Países Bajos) utilizando datos LiDAR de alta resolución y Sistemas de Información Geográfica. Este método de enfoque de abajo hacia arriba se seleccionó para llegar al potencial, ya que esto proporciona una mejor estimación que un enfoque de arriba hacia abajo. La novedad del estudio radicaba en estimar el potencial a alta resolución y clasificar el tejado como adecuado o no para instalaciones solares fotovoltaicas, basado en factores como la radiación, la pendiente y la orientación.

En 2016, Molin et al. [1] hicieron una publicación en la que se presentaba un método que utilizaba diferentes paquetes de software conocidos, como Google Earth, Autodesk Ecotect, PVsyst y MS Excel, para investigar en detalle el potencial total de suministro de energía en una región y analizar la coincidencia de la fuente de alimentación fotovoltaica con el patrón de carga eléctrica.

Ese mismo año, Martín-Chivelet [33] realizó una revisión de metodologías desarrolladas hasta ese momento y propuso un método que buscaba mejorar la claridad y coherencia de la evaluación del potencial técnico fotovoltaico, mediante la búsqueda de las principales variables y procesos implicados paso a paso, e incluyendo el factor de empaquetamiento en la ecuación de potencial técnico. Esto facilitaba el estudio de la influencia de diferentes criterios de diseño en el potencial técnico fotovoltaico.

En el año 2017, Kausika et al. [2] publicaron un método que combina Sistemas de Información Geográfica (GIS) y análisis de decisiones multicriterio (MCDA), que permitía determinar el potencial solar fotovoltaico. La estimación del máximo potencial solar fotovoltaico se dio mediante la aplicación de cuatro criterios técnicos: radiación solar, pendiente, elevación y orientación. En este caso, GIS ayudaba con el análisis espacial de los criterios.

En el mismo año, Ramírez-Sagner et al. [34] presentaron en un estudio un análisis económico de los sistemas fotovoltaicos residenciales y comerciales (PV) en Chile. En este caso, se obtuvieron y presentaron resultados de rendimiento económico de los sistemas fotovoltaicos residenciales y comerciales en mapas de sistemas de información georreferenciados (GIS).

En 2018, Oregi et al. [9] realizaron un análisis de sensibilidad de un modelo de caracterización de evaluación de energía a nivel distrital basado en datos catastrales. El riguroso análisis económico realizado mostró que, actualmente, la inversión en sistemas fotovoltaicos interconectados por la red con una potencia nominal que oscila entre 5 kWp y 10 kWp es en general económicamente atractiva. Los sistemas fotovoltaicos con capacidad de potencia inferior a 5 kWp no son viables, principalmente debido al alto coste de inversión y al bajo precio de venta de la electricidad.

Ese mismo año, Bottaccioli et al. [35] presentaron una infraestructura de software distribuida para modelar y simular la producción de energía de sistemas fotovoltaicos (PV) en contexto urbano. En su núcleo, realiza simulaciones en un dominio espacio-temporal

explotando sistemas de información geográfica junto con datos meteorológicos para estimar perfiles de generación fotovoltaica en condiciones operativas reales.

Por su parte, Gasparovic et al. [36] determinaron la Radiación Horizontal Global (GHI) para la República de Croacia utilizando el módulo r.sun de GRASS GIS y lo compararon con los valores de radiación solar obtenidos a partir de imágenes satelitales, mediciones en tierra y proveedores comerciales. Dado que los resultados obtenidos del módulo r.sun no tienen control de calidad, la evaluación de precisión se realizó en las mediciones de radiación solar terrestre obtenidas de las estaciones de Baseline Surface Radiation Network (BSRN) y las estaciones del Instituto Meteorológico e Hidrológico de Croacia (DHMZ).

En 2019, Bódis et al. [4] realizaron un análisis geoespacial de alta resolución del potencial solar fotovoltaico en cubiertas de Europa. Para esto, los autores desarrollaron una metodología geoespacialmente explícita utilizando información espacial actualizada del parque de edificios de la UE para cuantificar el área disponible en la azotea para los sistemas fotovoltaicos. Los resultados mostraron que los tejados de la UE podrían producir potencialmente 680 TWh de electricidad solar anualmente (lo que representa el 24,4% del consumo de electricidad actual), dos tercios de los cuales serían a un coste inferior al de las tarifas residenciales actuales.

Ese mismo año, Mansouri Kouhestani et al. [6] utilizaron sistemas de información geográfica (GIS), concretamente ArcGIS, y Light Detection and Ranging (LiDAR) para estimar el potencial de electricidad fotovoltaica en los tejados de edificios en el entorno urbano de la ciudad de Lethbridge, Canadá.

Por su parte, Pedrero et al. [37] realizaron un análisis de potencial a escala urbana para generación y consumo de solar PV. Utilizaron un mapa de ciudades GIS 3D para calcular la radiación solar. El uso de electricidad a nivel de edificio se calculó en función del tipo de construcción, la geometría y otras características inferidas de la edad del edificio, tomando el SIG del catastro como entrada principal. La metodología identifica el potencial realista para las instalaciones fotovoltaicas en los tejados, así como el tamaño óptimo que se instalará desde una perspectiva económica. Estudiaron el caso de Irún (Gipuzkoa) [...], población con un nivel bajo de radiación, donde obtuvieron un resultado de que hasta el 24% del consumo total de electricidad del edificio en la ciudad podría ser suministrado por paneles fotovoltaicos bajo la normativa vigente de autoconsumo, [...] aumentando hasta a un 48% si la medición neta anual estuviera en vigor, y al 59% para la producción máxima teórica de paneles fotovoltaicos en cubiertas.

#### **1.4. Desarrollo de la metodología EHUKhi**

Tras un análisis de las diferentes metodologías existentes para realizar un análisis de potencial tecno-económico de energía solar fotovoltaica (PV) en un entorno urbano, dentro del proyecto EHUKhi [13] se desarrolló una metodología, basada en el uso de archivos con datos LiDAR, el uso del modelo r.sun del software GRASS GIS y el posterior uso de QGIS para trabajar con los mapas obtenidos con el modelo de radiación, herramientas de código abierto y libres en su totalidad. Esta metodología se presentó en el estudio "Desarrollo de una metodología para la determinación del potencial de energía solar", realizado por Goikoetxea [38].

Esta ha sido la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo, denominada "Metodología EHUKhi", creada por el personal docente y el alumnado del proyecto EHUKhi. Esta recoge unas pautas comunes para que sean aplicadas a todos los proyectos de análisis del potencial fotovoltaico, aunque cabe la opción de poder realizar alguna modificación,



dependiendo de las características del lugar analizado. Dichas pautas se muestran de una manera detallada en apartados posteriores.

Para el aprendizaje de la Metodología EHUKhi se han utilizado una serie de vídeos a modo de tutoriales, los cuáles se encuentran en la plataforma YouTube, en el canal de Álvaro Campos [39].

## **1.5. Estudios del potencial fotovoltaico realizados en el entorno de la UPV/EHU y del proyecto EHUKhi**

### **1.5.1. Potencial solar fotovoltaico de las cubiertas edificatorias de la ciudad de Vitoria-Gasteiz: caracterización y análisis**

En 2019, Caamaño y Díaz-Palacios [40], del Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, analizaron el potencial fotovoltaico de las cubiertas de Vitoria-Gasteiz (entre ellas, las del campus de la UPV/EHU en dicha ciudad), con el fin de identificar las posibilidades de autoconsumo derivadas del aprovechamiento de energía solar. Para ello, utilizaron el SIG ArcGIS. Según sus resultados, se obtuvo una potencia instalable de 1258 MW para la ciudad, con una generación eléctrica anual de 1140 GWh (superior al consumo), lo cuál se traduce en una tasa de autoabastecimiento mayor al 100%.

### **1.5.2. Análisis del potencial de energía solar en Aiaraldea / Valle de Ayala**

En 2019, Etxebarria [41], estudiante del Grado de Ingeniería en Energías Renovables (Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa – Sección Eibar) realizó este Trabajo de Fin de Grado (TFG) bajo la dirección de Álvaro Campos (director del proyecto EHUKhi). Este proyecto sería el antecedente directo en los proyectos realizados con la metodología EHUKhi.

### **1.5.3. Análisis del potencial de energía fotovoltaica en la Escuela de Ingeniería de Bilbao**

En 2020, Uriarte [42], estudiante del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales (Escuela de Ingeniería de Bilbao) realizó este TFG bajo la dirección de Itziar Martínez de Alegría y Rosa María Lago. Este fue el primer proyecto de EHUKhi, siguiendo la metodología propuesta por Etxebarria [41].

### **1.5.4. Análisis del potencial fotovoltaico del campus de Álava**

En 2020, Echeverría [43], estudiante del Grado en Ciencias Ambientales (Facultad de Farmacia) realizó este TFG bajo la dirección de Estitxu Villamor. Fue el segundo proyecto de EHUKhi.

### **1.5.5. Potencial tecno-económico de energía fotovoltaica en el campus de Sarriko de la UPV/EHU**

En 2020, Varela [44], estudiante del Máster en Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo (Escuela de Ingeniería de Bilbao, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos) realizó este TFM bajo la dirección de Álvaro Campos y Jon Terés. Este fue el tercer proyecto de EHUKhi.

## 2. OBJETO DE ESTUDIO

El objeto de estudio es el Campus de Leioa de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Dicho campus universitario se encuentra en los municipios de Leioa y Erandio, en la provincia de Bizkaia (coordenadas: 43,33; -2,96). Los edificios de las distintas facultades se disponen en una orientación sur-suroeste y, por lo general, disponen de cubiertas planas (como más adelante se analizará), lo cual las hace idóneas para la albergar una instalación de energía solar fotovoltaica (PV). En la figura 2-1 se muestra una ortofoto del lugar, extraída del visor de GeoEuskadi [45]:

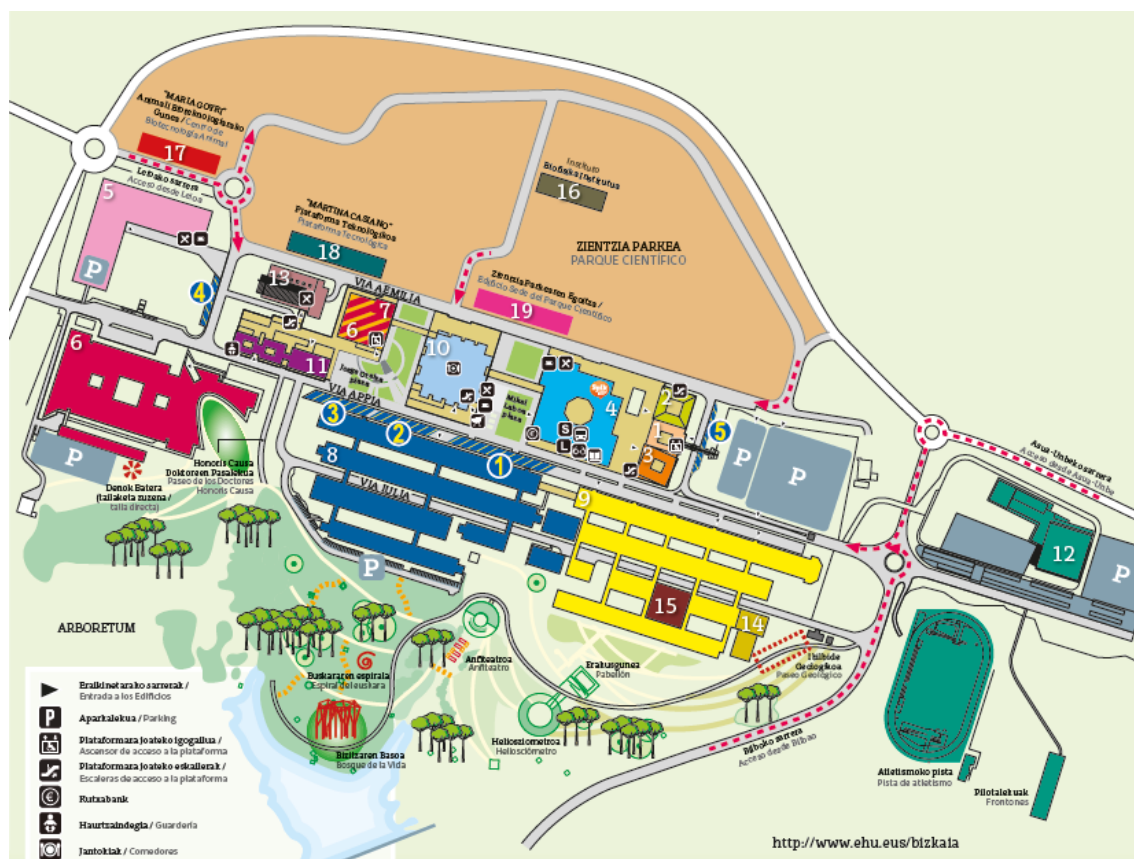


*Imagen 2-1. Campus de Leioa de la UPV/EHU (GeoEuskadi). [45]*

El trabajo desarrollado es el análisis del potencial tecno-económico de energía fotovoltaica (PV), el cuál se ha realizado mediante los programas de software de Sistema de Información Geográfica GRASS GIS (con su modelo solar r.sun) y QGIS. Para ello, en el siguiente apartado se explica paso a paso la aplicación de la metodología EHUKhi, desarrollada al amparo del proyecto "EHUKhi: una plataforma para el desarrollo del potencial fotovoltaico de la UPV/EHU" [13].

Además de trabajar en el proyecto EHUKhi, como se ha mencionado anteriormente, este TFM pretende crear sinergias con en el proyecto "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16], coordinado por José Ramón Díez. En este trabajo se analizarán los datos del consumo eléctrico para realizar un estudio de hibridación de tecnología fotovoltaica con la tecnología eólica de la empresa Roseo Eólica Urbana [17], mediante un repaso de su estudio sobre la estimación del viento en base a las mediciones que actualmente realizan en dicha facultad.

Para facilitar el trabajo, se ha dividido el campus en las diferentes zonas y edificios que lo conforman. Como referencia a la hora de asignar la numeración, se ha tomado el plano del campus de Leioa del que dispone la UPV/EHU [46]. En el caso de que una zona no dispusiese de número, se le ha asignado otro que todavía no se hubiese utilizado. Así quedaría, pues, dividido el campus (no tomar en cuenta los números amarillos en un círculo azul, correspondientes a las paradas de bus):



**Imagen 2-2. Detalle plano del campus de Leioa de la UPV/EHU. [46]**

En el plano de la Imagen 2-2 no aparecen ciertas zonas o edificios, ya sea por desuso o por no ser edificios o zonas destinadas a la docencia o a la investigación. Por lo tanto, se han asignado los siguientes números a dichas zonas:

- 20: Instituto Biofisika (Antiguo)
  - o Ubicado al sur de la Facultad de Bellas Artes (edificio 6)
- 21: Arboretum
  - o Zona verde de paseo con bosque, ubicada al sur de campus de Leioa de la UPV/EHU, en la cuál se encuentran pequeñas edificaciones.
- 22: Aparcamiento cubierto
  - o Aparcamiento cubierto ubicado al norte de la Facultad de Medicina y Enfermería (edificio 9)

Se resume la disposición de los edificios en la Tabla 2-1:

Nº	FACULTAD / ENTIDAD	EDIFICIO	OBSERVACIONES
1	AULARIO I		
2	FACULTAD DE DERECHO VICERRECTORADO CAMPUS DE BIZKAIA		La capa de edificios descargada en GeoEuskadi [45] considera como una sola unidad este conjunto de edificaciones.
3	FACULTAD DE RELACIONES LABORALES Y TRABAJO SOCIAL		
4	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DE LA COMUNICACIÓN		
5	FACULTAD DE EDUCACIÓN	PARTE NORTE PARTE SUR MARQUESINA NORTE MARQUESINA SUR	
6	FACULTAD DE BELLAS ARTES	CUBIERTA PATIO CASETA SERVICIOS SUR	El patio se distingue como otra unidad edificatoria. Caseta Servicios no apta para PV.
7 / 11	AULA MAGNA / RECTORADO	AULA MAGNA RECTORADO	Una sola unidad edificatoria [45].
8	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA	CUBIERTA NAVE INDUSTRIAL SALA DE CALDERAS CASETA CONTIGUA APARCAMIENTO	Se le añaden la sala de calderas y la caseta contigua por encontrarse en el mismo entorno.
9 / 15	FACULTAD DE MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	Una sola unidad edificatoria [45].
10	BIBLIOTECA CENTRAL		
12	POLIDEPORTIVO	GIMNASIO - CANCHA CASETA TRANSFORMADOR CASETA ATLETISMO FRONTONES	Se le añade la caseta del transformador por encontrarse en el mismo entorno.
13	IFP – ESCUELA DE HOSTELERÍA		
14	ANIMALARIO	PARTE SUR PARTE ESTE	Dos unidades edificatorias [45].
16	INSTITUTO BIOFISIKA		
17	CENTRO DE BIOTECNOLOGÍA ANIMAL "MARIA GOYRI"		
18	PLATAFORMA TECNOLÓGICA "MARTINA CASIANO"		
19	EDIFICIO SEDE DEL PARQUE CIENTÍFICO		
20	INSTITUTO BIOFISIKA (ANTIGUO)		En desuso, no apta para PV.
21	ARBORETUM	PABELLÓN CASETA NORTE CASETA SUR	Zona de paseo. Edificaciones consideradas no aptas para PV.
22	APARCAMIENTO CUBIERTO	CUBIERTA MARQUESINA NORTE MARQUESINA SUR	Se le añaden las marquesinas por encontrarse en el mismo entorno.

**Tabla 2-1. Disposición numeral de los edificios y zonas del campus de Leioa de la UPV/EHU.**

### **3. ANÁLISIS DEL POTENCIAL TECNO-ECONÓMICO DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA CON LA METODOLOGÍA EHUKHI**

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología que se ha utilizado para la estimación del potencial fotovoltaico en el campus de Leioa de la UPV/EHU es la denominada "Metodología EHUKhi", creada en el seno del proyecto homónimo. En este apartado se va a ir explicando de una manera detallada el orden de tareas seguido durante la realización del trabajo y los mapas utilizados en cada paso.

#### **3.1. Tipología de los mapas y programas utilizados**

Para realizar el proyecto con la metodología EHUKhi, se han utilizado mapas de distintos tipos: mapas LiDAR, mapas ráster y mapas vectoriales. Para visualizar estos mapas y realizar las operaciones necesarias, los programas utilizados son Cloud Compare y los Sistemas de Información Geográfica (SIG o GIS) GRASS GIS y QGIS. A continuación, se hace una breve descripción de estos mapas y su tratamiento en los distintos programas mencionados.

El LiDAR (de light detection and ranging) es una técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de la tierra produciendo mediciones exactas de x, y y z [47]. Esta tecnología se utiliza en aplicaciones de representación cartográfica láser aéreas, surgiendo como una alternativa rentable a las técnicas de topografía tradicionales, como la fotogrametría.

LIDAR produce conjuntos de datos en forma de nube de puntos masivos que se pueden administrar con distintos programas. Uno de ellos es CloudCompare, un software de edición y procesamiento de nubes de puntos 3D y mallas triangulares [48], además de otros algoritmos de procesamiento y herramientas de mejora de monitorización.

Los mapas ráster, en este trabajo, son archivos con extensión ".tiff". En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los ráster son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados [49]. Los datos almacenados en formato ráster representan fenómenos del mundo real, y se pueden clasificar en datos temáticos o discretos (que representan entidades como datos de la tierra o el uso de esa tierra), datos continuos (que representan fenómenos como la radiación solar, la cota o, incluso, datos espectrales como fotografías aéreas) e imágenes (mapas escaneados, dibujos o fotografías).

Para trabajar con mapas ráster, se ha utilizado GRASS GIS (Geographic Resources Analysis Support System), un software SIG bajo licencia GNU General Public License (GPL) [50]. Es un software libre que puede trabajar con información ráster y vectorial, y posee herramientas de procesamiento digital de imágenes. Se pueden administrar y analizar datos geoespaciales y procesar datos e imágenes. En el proyecto se ha trabajado principalmente con datos ráster, cuyos algoritmos se nombran con el prefijo "r.". De esta manera se han podido modificar y crear mapas ráster.

Por último, están los mapas vectoriales, que son archivos formados por un conjunto de polígonos y líneas, por lo que no forman una imagen de bits convencional, sino que son la suma de muchas formas geométricas que, además, pueden editarse [51]. Para administrar mapas vectoriales se ha utilizado QGIS (Quantum GIS), un sistema de información

geográfica de software libre, liberado bajo licencia GPL [52]. Este software permite visualizar, crear, editar y gestionar los datos de los mapas en diversos formatos y proyecciones, sin necesidad de conversión. Por lo tanto, al igual que GRASS GIS, puede trabajar con mapas ráster y vectoriales.

### 3.2. Desarrollo de las tareas de la Metodología EHUKhi

En este apartado se explicará, paso por paso, el desarrollo de todas las tareas que se han realizado a lo largo del proyecto utilizando la metodología EHUKhi, con el fin de obtener el potencial fotovoltaico en el campus de Leioa. A modo de resumen, en la Imagen 3-1 se muestra un esquema con los pasos dados.

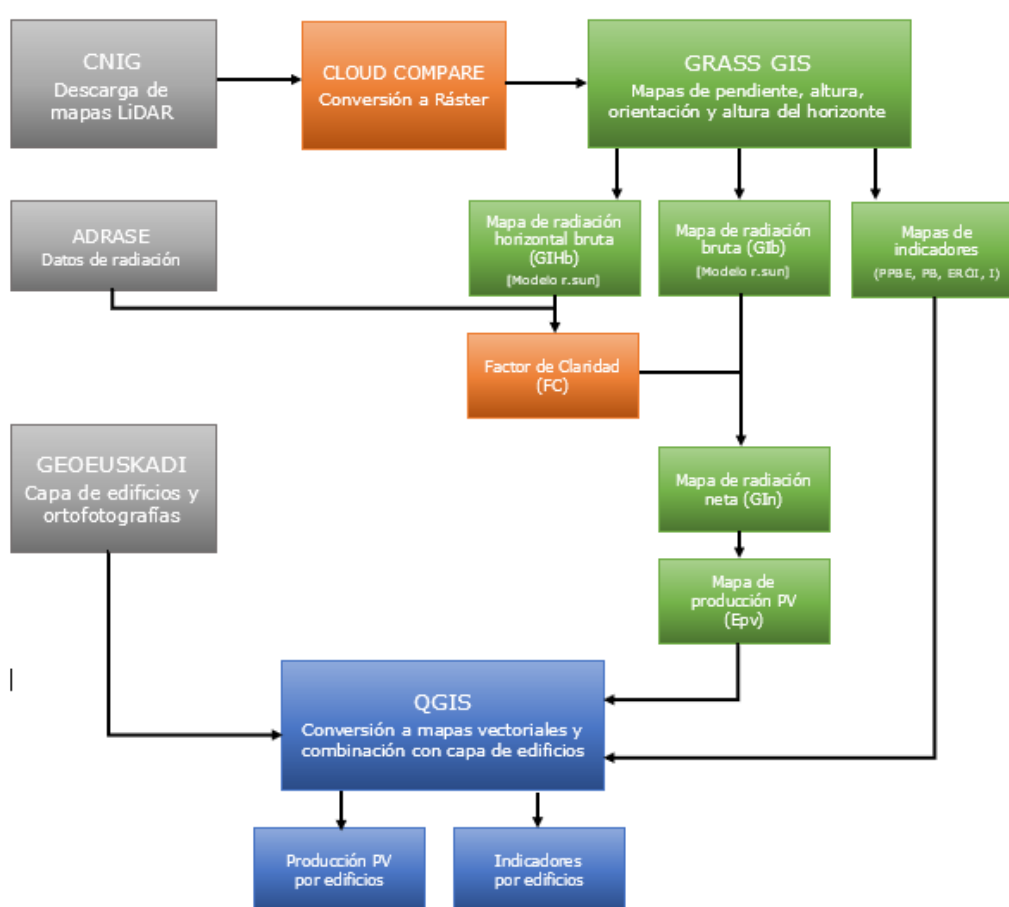


Imagen 3-1. Esquema explicativo de los pasos a seguir con la metodología EHUKhi.

#### 3.2.1. Obtención de mapas LIDAR y conversión a ráster

La tarea inicial del trabajo consiste en la descarga de mapas con datos LIDAR y su posterior conversión a formato ráster. Para ello, en primer lugar, se han descargado los mapas lídár en el Centro de Descargas del CNIG – Centro Nacional de Información Geográfica [53]. De los ficheros correspondientes al municipio de Leioa, los necesarios se encuentran en el apartado “Modelos Digitales de Elevaciones – LIDAR 1ª Cobertura (2008-2015)”.



Los archivos correspondientes a este trabajo son los denominados "PNOA\_2012\_LOTE\_PV\_502-4798\_ORT-CLA-COL" y "PNOA\_2012\_LOTE\_PV\_500-4798\_ORT-CLA-COL". Si bien el primer mapa abarca el campus de Leioa de la UPV/EHU en su totalidad, el complejo universitario se encuentra cerca del borde oeste del mapa; teniendo en cuenta que la orientación de los edificios es sur-suroeste, se ha optado por trabajar también con el mapa colindante, para contar con las posibles afecciones que pudieran tener los objetos cercanos sobre la radiación solar incidente en los edificios de la universidad.

Estos archivos se han convertido a formato ráster con Cloud Compare. El rasterizado se ha realizado para los datos de altura, en la dirección del eje Z y a las celdas vacías se les ha asignado su valor por interpolación.

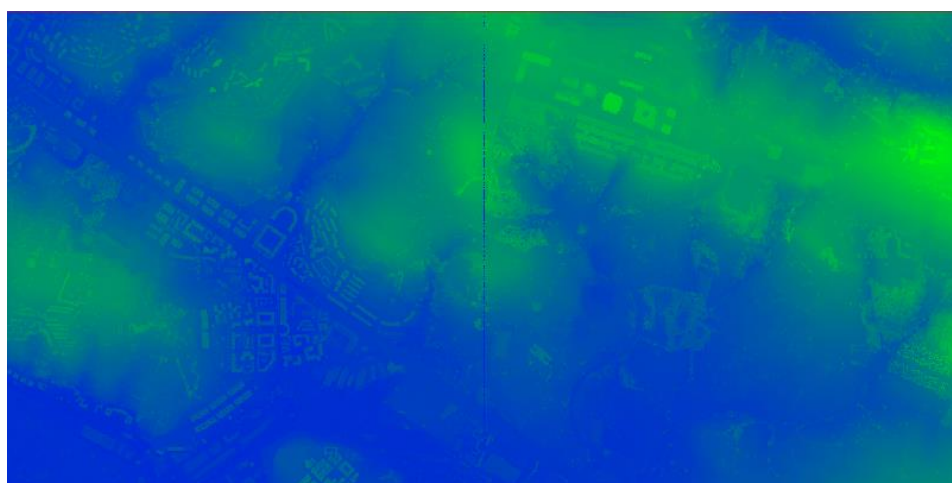
### **3.2.2. Trabajo con mapas ráster y obtención de mapas de radiación solar**

Una vez obtenidos los mapas ráster, se ha procedido a trabajar con el programa GRASS GIS, con el objetivo principal de obtener los mapas ráster de producción fotovoltaica (además de otros mapas con datos útiles para el trabajo). Con el fin de identificar los mapas de una manera fácil, se va a utilizar la nomenclatura específica de la metodología EHUKhi.

Todos los mapas se encuentran en la ubicación denominada "Leioa\_UTM", un directorio creado específicamente para este trabajo con la proyección ETRS89 / UTM zone 30 N (Código EPSG: 25830). En las siguientes líneas se mostrarán estos mapas junto a una explicación sobre las órdenes realizadas para obtenerlos.

#### **- elevación\_Leioa**

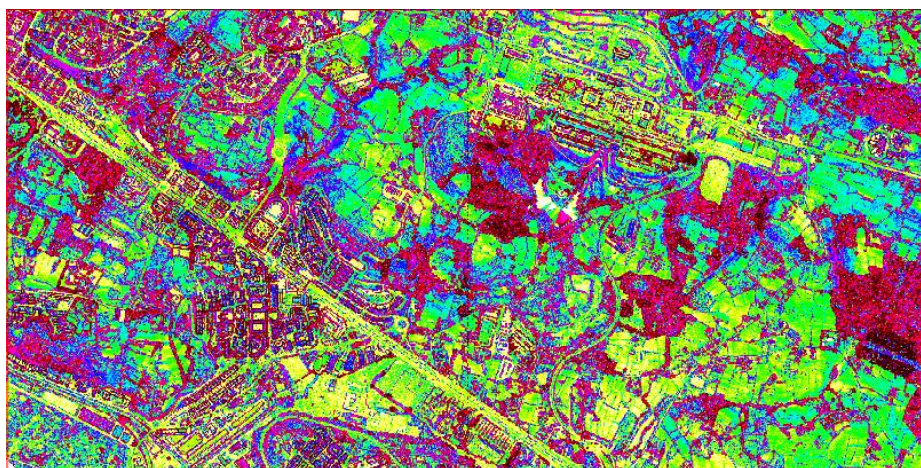
En primer lugar, se han enlazado los dos mapas convertidos anteriormente a formato ráster. Una vez que estos se visualizan en la pantalla, se ha establecido la región computacional (los límites del mapa ráster) mediante la función "g.region" y estos se han unido mediante la función "r.patch", para trabajar con un solo archivo. Este mapa contiene la cota de cada píxel, es decir, la elevación del terreno.



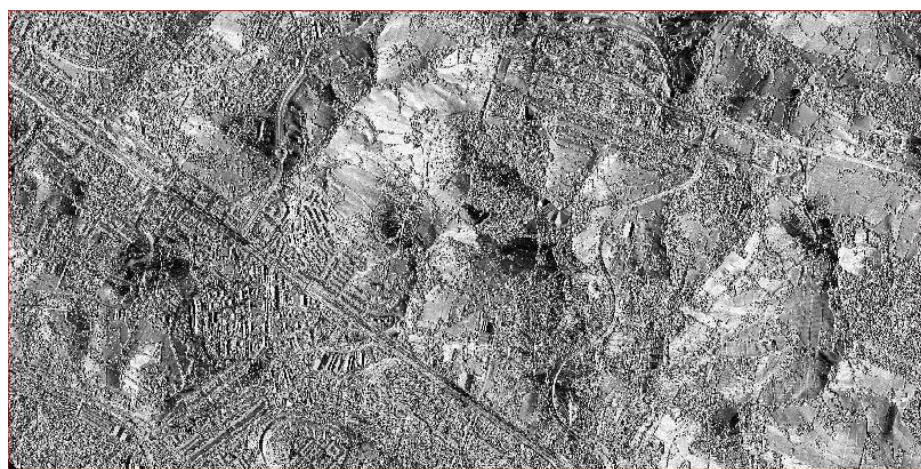
**Imagen 3-2. Mapa de alturas "Elevación\_Leioa".**

### - slope\_Leioa / aspect\_Leioa

A partir del mapa de elevación del terreno, aplicando la función "r.slope.aspect" se han generado los mapas ráster de pendiente y de orientación. En el primero, cada píxel contiene la información sobre el ángulo de inclinación del terreno; y en el segundo, cada píxel contiene la información sobre el ángulo de orientación de su ubicación, comenzando desde el este (0°) y aumentando su valor en sentido antihorario hasta los 360°.



*Imagen 3-3. Mapa de pendiente "slope\_Leioa".*



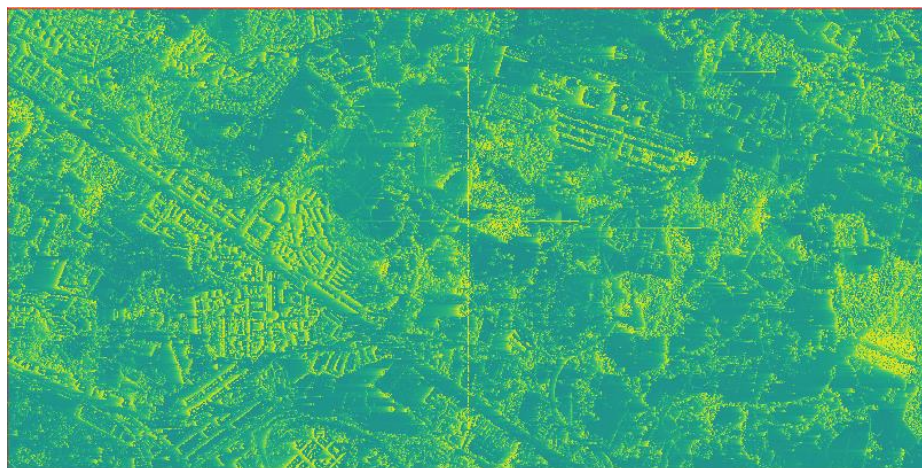
*Imagen 3-4. Mapa de orientación "aspect\_Leioa".*

### - horangle\_Leioa

A partir del mapa de elevación del terreno, aplicando la función "r.horizon" se han generado los mapas de altura del horizonte. Tal como su nombre indica, con esta función se calcula cuál sería la altura del horizonte para cada píxel.

La función depende de la dirección hacia la que se oriente, por lo que se hace un barrido de todo el mapa a través de 360°, con un paso de ángulo 15°, generando así 24 mapas, obteniendo una buena precisión sin la necesidad de generar demasiados datos. El valor del ángulo es de 0° en el este, aumentando su valor en sentido antihorario hasta los 360°.





*Imagen 3-5. Mapa de altura del horizonte en orientación este – 0° "horangle\_Leioa\_000".*

#### - **GIB\_Leioa**

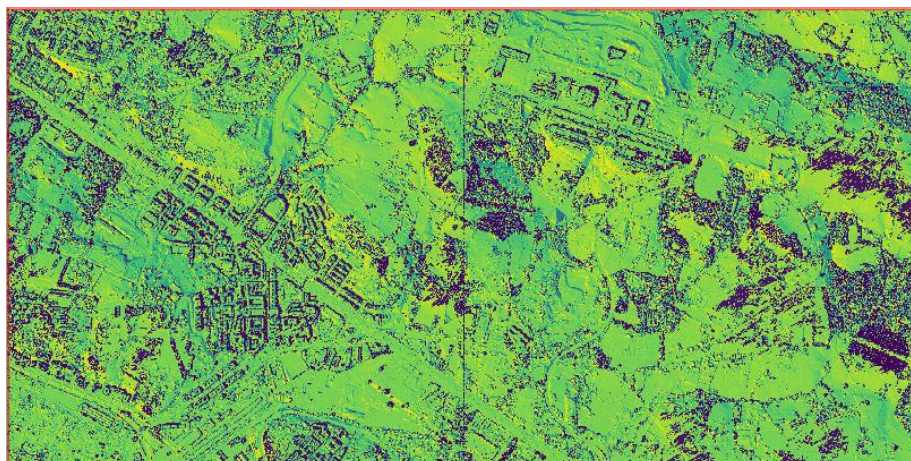
Esta denominación se refiere a los mapas de radiación bruta teórica, definidos de manera horaria para cada día tipo. Estos mapas muestran la radiación solar bruta que incide sobre cada píxel del mapa de elevación "elevación\_Leioa".

Para obtener este mapa, se ha utilizado la función "r.sun", en la cual se introducen los datos de los mapas de elevación ("elevación\_Leioa"), pendiente ("slope\_Leioa"), orientación ("aspect\_Leioa") y altura del horizonte ("horangle\_Leioa"), los cuáles se han generado anteriormente. Como se ha mencionado antes, estos mapas se han definido para un día tipo de cada mes (como referencia se toma el día 15 de cada mes) y para todas las horas, por lo que cada mapa generado mostrará la radiación bruta a cierta hora del día tipo. Por ejemplo, el mapa denominado "GIB\_Leioa\_05\_14" indicara la radiación bruta ( $\text{Wh/m}^2$ ) a las 14 horas del día 15 de mayo. Cada día tipo habrá que indicarlo respecto a los 365 días del año, quedando de la siguiente manera la identificación de estos días:

<b>MES</b>	<b>DÍA TIPO</b>
<b>Enero</b>	15
<b>Febrero</b>	46
<b>Marzo</b>	74
<b>Abril</b>	105
<b>Mayo</b>	135
<b>Junio</b>	166
<b>Julio</b>	196
<b>Agosto</b>	227
<b>Septiembre</b>	258
<b>Octubre</b>	288
<b>Noviembre</b>	319
<b>Diciembre</b>	349

*Tabla 3-1. Día tipo para cada mes.*

Para realizar esta función de manera secuencial, se ha realizado un script que se ejecuta en en la consola de Python que contiene GRASS GIS. En total, se han obtenido 300 mapas.



**Imagen 3-6. Mapa de radiación bruta para el 15 de mayo a las 14 horas "GIb\_Leioa\_05\_14".**

#### - Elevación\_Leioa\_flat / slope\_Leioa\_flat / aspect\_Leioa\_flat

Estos mapas se han generado para poder calcular el factor de claridad debido a la nubosidad, un coeficiente que se multiplica al valor de la radiación bruta para poder obtener la radiación neta. En este caso, se trata de generar unos mapas planos horizontales, ya que en la web ADRASE (Acceso a datos de radiación solar de España) [54] los datos obtenidos por interpolación de la información de las estaciones meteorológicas se muestran como "Irradiación solar global sobre plano horizontal – Valores diarios medios".

En estos mapas se ha creado una superficie horizontal a la cota del campus de Leioa (80 msnm) para obtener los valores de radiación bruta teórica, convirtiendo los valores teóricos anteriores a los valores de incidencia sobre una superficie plana. De esta manera, se puede comparar la radiación teórica con la real (datos de ADRASE), obteniendo de esa manera el factor de claridad.

En primer lugar, se ha obtenido el mapa de elevación de Leioa plano, utilizando la siguiente fórmula en la calculadora ráster:

$$\text{Elevación\_Leioa\_flat} = \text{elevación\_Leioa} \cdot 0 + 80$$

#### **Ecuación 3-1. Obtención del mapa de elevación de Leioa plano.**

El mapa obtenido es un mapa plano y monóculo en el que cualquier punto se encuentra a una altura de 80 m. A partir de este mapa, con la función "r.slope.aspect" se ha obtenido el mapa plano de pendiente "slope\_Leioa\_flat", el cual no tiene ninguna inclinación (zero slope), y el mapa plano de orientación "aspect\_Leioa\_flat", con valores nulos (zero aspect).

#### - GIHb\_Leioa

A partir de los anteriores mapas planos, se ha utilizado la función "r.sun" para obtener la radiación bruta teórica incidente sobre el terreno plano. De manera análoga a cuando se han obtenido los mapas de radiación bruta GIb\_Leioa, en este caso se han introducido los mapas planos de elevación, pendiente y orientación, además de los mismos mapas de

altura del horizonte utilizados anteriormente. A diferencia de los anteriores, en este caso se ha calculado el valor diario de cada día tipo (y no los valores horarios), coincidiendo con la información proporcionada por ADRASE. En la Imagen 3-7 se muestra el mapa con los valores a día 15 de mayo:



**Imagen 3-7. Mapa de radiación bruta horizontal para el 15 de mayo "GHib\_Leioa\_05".**

Se puede apreciar que entre el norte y el sur hay ligeras variaciones, por lo que con la función "r.stats" se calculará el valor promedio de la radiación incidente en todos los píxeles (un único rango). Repitiendo la misma orden en los 12 mapas, se obtendrá la radiación media diaria media de todos los mapas y se podrá comparar con los valores reales de radiación de ADRASE [54] para calcular el factor de claridad para cada mes (se cuenta con que la nubosidad varía notablemente cada mes). La fórmula para ello es la siguiente:

$$\text{Factor de Corrección} = FC = \frac{\text{Valor real máximo medio}}{\text{Valor teórico máximo medio}}$$

**Ecuación 3-2. Fórmula para el cálculo del Factor de Corrección.**

MES	VALOR DE RADIACIÓN MÁXIMA REAL GIHn (Wh/m <sup>2</sup> )	VALOR DE RADIACIÓN MÁXIMA TEÓRICA GHib (Wh/m <sup>2</sup> )	FACTOR DE CLARIDAD (FC)
<b>Enero</b>	1500	2346,1654	0,6393
<b>Febrero</b>	2400	3606,0040	0,6655
<b>Marzo</b>	3700	5259,7048	0,7034
<b>Abril</b>	4300	7053,9609	0,6095
<b>Mayo</b>	5600	8316,5307	0,6733
<b>Junio</b>	5700	8860,3603	0,6433
<b>Julio</b>	6100	8602,7353	0,7090
<b>Agosto</b>	5100	7580,9675	0,6727
<b>Septiembre</b>	4300	5971,4946	0,7200
<b>Octubre</b>	2900	4217,6594	0,6875
<b>Noviembre</b>	1700	2720,0379	0,6249
<b>Diciembre</b>	1400	2045,5443	0,6844

**Tabla 3-2. Cálculo del factor de claridad (FC) del cielo. (ADRASE / Elaboración propia) [54]**



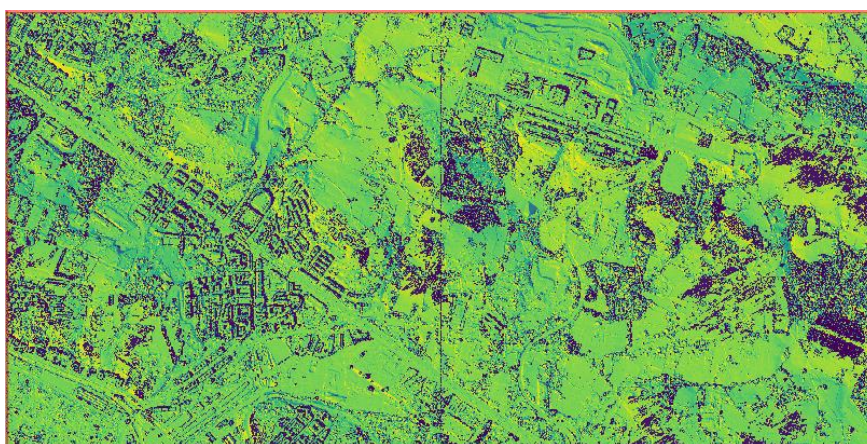
### - $G_{In\_Leioa}$

A partir de los mapas de radiación bruta teórica " $G_{IB\_Leioa}$ " y el factor de claridad, se han obtenido los mapas de radiación neta " $G_{In\_Leioa}$ ". Utilizando la función " $r.mapcalc$ ", se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$G_{In} = G_{Ib} \cdot FC$$

#### ***Ecuación 3-3. Fórmula para el cálculo de la radiación solar neta.***

Al igual que con la radiación bruta, en este caso también se han calculado los mapas para todas las horas de los 12 días tipo. Para realizar esta función de manera secuencial, se ha realizado un script que se ejecuta en la consola de Python que contiene GRASS GIS. En total, se han obtenido 300 mapas.



**Imagen 3-8. Mapa de radiación neta para el 15 de mayo a las 14 horas " $G_{In\_Leioa\_05\_14}$ ".**

### **3.2.3. Obtención de mapas ráster de producción fotovoltaica**

Todo el proceso anterior ha servido para obtener los mapas horarios de radiación neta. Esta radiación es la que se utiliza para calcular la producción fotovoltaica con la siguiente fórmula genérica:

$$E_{pv} = \frac{G_{In} \cdot A \cdot \eta_{pv} \cdot PR}{\cos \beta}$$

#### ***Ecuación 3-4. Fórmula genérica para el cálculo de la producción fotovoltaica.***

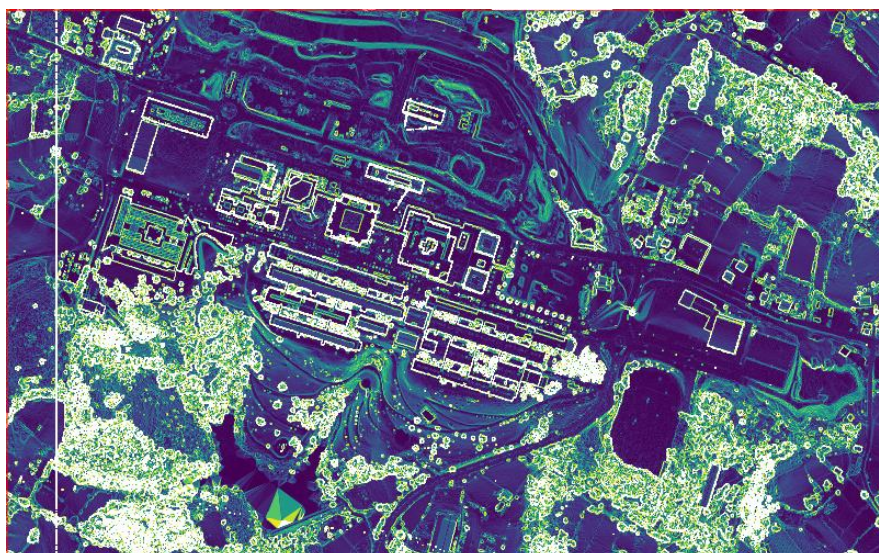
Donde  $G_{In}$  es la radiación neta incidente en cada píxel,  $A$  corresponde al área aprovechable del píxel (en el caso de las cubiertas inclinadas se considera el área de 1 m<sup>2</sup> del píxel; mientras, en el caso las cubiertas planas, al poder utilizar sólo la mitad de la superficie disponible, se considera la mitad del área del píxel, aunque se divide por el coseno del ángulo de inclinación, ya que en una cubierta "plana" con cierta inclinación y orientada al sur, la sombra es menor),  $\eta_{pv}$  es el rendimiento de los paneles (0,18) [3, 42, 55],  $PR$  corresponde al "performance ratio" de degradación de paneles (0,75) [42, 56, 57] y  $\beta$  corresponde a la inclinación de la cubierta en la que se instalan los paneles. En el caso de las cubiertas inclinadas, se utilizará esta inclinación; en las cubiertas planas, los paneles se instalarán con 30° de inclinación.

Los mapas de producción fotovoltaica calculados muestran datos horarios, mensuales y anuales. En las siguientes líneas se exponen los pasos dados para llevar a cabo el proceso de obtención de estos datos. A partir de ahora, los mapas, en vez de mostrar toda la zona anterior, mostrarán en detalle el campus de Leioa de la UPV/EHU.

#### - **slope\_Leioa\_corregido**

Las medidas que se hacen con tecnología LIDAR son discretas, por lo que la información del espacio entre dos puntos (en este caso la resolución de los puntos es de 1 x 1 m) se obtiene por interpolación. Cuando entre dos puntos hay una diferencia de altura significativa, como en los bordes de los edificios, aparecen datos de pendiente muy elevada, cuando en realidad es vertical.

Estas zonas no son interesantes para el aprovechamiento solar, por lo que se ha procedido a eliminar las pendientes superiores a 60°. Para ello, en primer lugar se ha utilizado la calculadora ráster (función "r.mapcalc"), con la que se han convertido a 90° todos los valores de pendiente mayores a 60°. Aún así, estas zonas hay que eliminarlas, con lo que utilizando la función "r.null" se han establecido a nulo todos los valores iguales a 90°.



*Imagen 3-9. Detalle del mapa de pendiente corregido "slope\_Leioa\_corregido".*

#### - **TipoCubierta\_12\_Leioa**

Para hacer un filtrado en base a la inclinación de las cubiertas, la metodología EHUKhi propone poner el límite de inclinación en 10° para considerar una cubierta como plana, siendo cubiertas inclinadas las que tengan una mayor inclinación. Sin embargo, este parámetro no siempre resultará ser efectivo, ya que las mediciones LIDAR no tienen por qué dar unos valores exactos y puede que se tomen por planas algunas cubiertas inclinadas. Por ello, en este caso se han generado varios mapas, variando el límite entre los 10° y los 15° (con una diferencia de 1° entre cada uno), resultando la inclinación de 12° un límite óptimo para los edificios de esta ubicación.

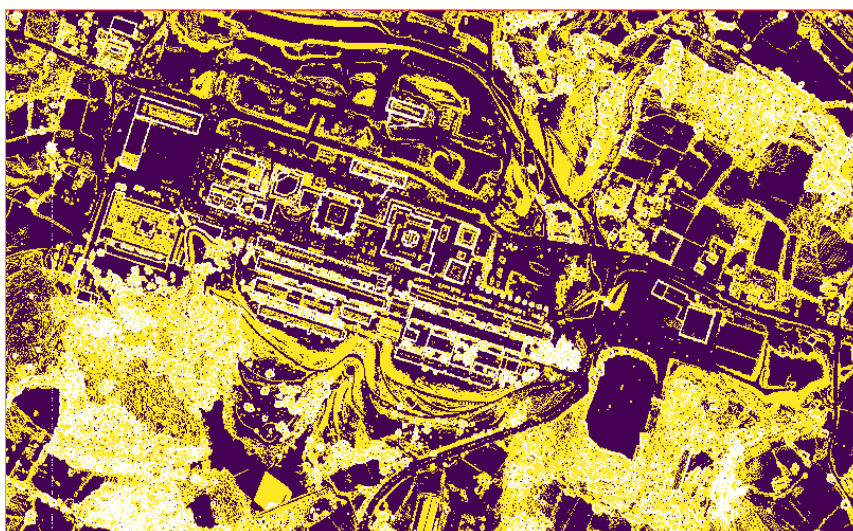
El mapa se ha generado con la calculadora ráster (función "r.mapcalc"), utilizando la siguiente fórmula:



$$\text{if}(\text{slope\_Leioa\_corregido@Mapas\_34} < 12, 1, 2)$$

**Ecuación 3-5. Obtención del filtrado en base a la inclinación de las cubiertas.**

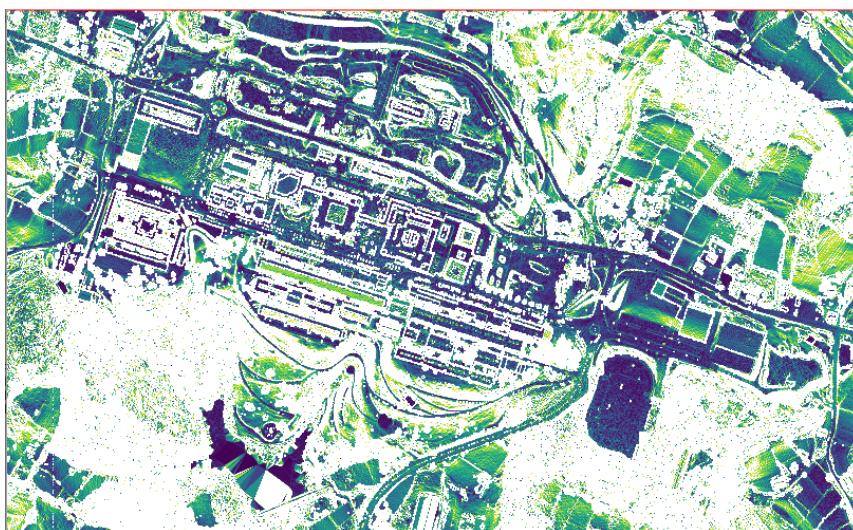
En el caso de las cubiertas planas, los píxeles tienen un valor de 1 y se muestran en color púrpura; en el caso de las cubiertas inclinadas, los píxeles tienen un valor de 2 y se muestran en color amarillo.



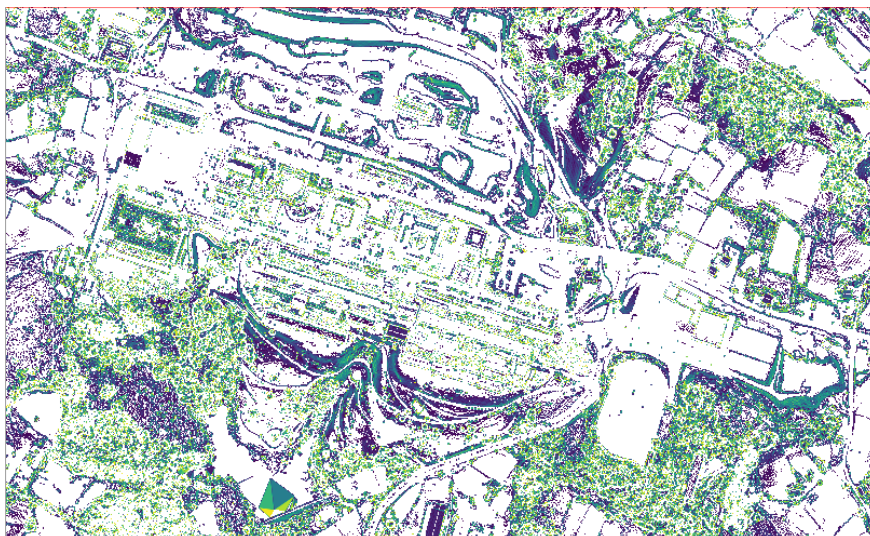
**Imagen 3-10. Detalle de mapa de filtrado de cubiertas en base a una inclinación de 12° "TipoCubierta\_12\_Leioa".**

- **slope\_Pla\_Leioa\_corr / slope\_Inc\_Leioa\_corr**

Conociendo que la inclinación óptima para el filtrado de tipos de cubiertas es 12°, se ha dividido el mapa de pendientes corregidas entre superficies planas y superficies inclinadas, generando, por tanto, un mapa de pendientes de superficies planas llamado "slope\_Pla\_Leioa\_corr" y un mapa de pendientes de superficies inclinadas llamado "slope\_Inc\_Leioa\_corr".



**Imagen 3-11. Detalle del mapa de pendientes para superficies planas "slope\_Pla\_Leioa\_corr".**



**Imagen 3-12. Detalle del mapa de pendientes para superficies inclinadas "slope\_Inc\_Leioa\_corr".**

#### - Epv\_Pla\_Leioa / Epv\_Inc\_Leioa

Para el cálculo de la energía generada con tecnología solar fotovoltaica, se ha utilizado la fórmula genérica mostrada anteriormente:

$$E_{pv} = \frac{G_{In} \cdot A \cdot \eta_{pv} \cdot PR}{\cos \beta}$$

#### **Ecuación 3-6. Fórmula genérica para el cálculo de la producción fotovoltaica.**

Esta fórmula se ha aplicado de distinta manera para cada tipo de cubierta, ya que, como se ha explicado, las características de una instalación varían dependiendo de la inclinación de una cubierta.

En el caso de las cubiertas planas, para la inclinación, los cálculos se han hecho en base al mapa "slope\_Pla\_Leioa\_corr", generando así el mapa denominado "Epv\_Pla\_Leioa". Para generar este mapa, se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$E_{pv} = \frac{G_{In} \cdot \eta_{pv} \cdot PR}{\cos \beta} \cdot \frac{(0,503 \cdot A)}{\cos(30^\circ)} = \frac{G_{In\_Leioa} \cdot (1 \cdot 0,503) \cdot 0,18 \cdot 0,75}{\cos(30^\circ) \cdot \cos(\text{slope\_Pla\_Leioa\_corr})}$$

#### **Ecuación 3-7. Fórmula para el cálculo de la producción fotovoltaica en cubiertas planas.**

Se aprecia que, a la hora de calcular el área aprovechable, se ha reducido ésta a la mitad y se ha dividido por el coseno de la inclinación que la cubierta tenga (de 0° a 12°). Esto se debe a que, en principio, debido a la sombra generada por los paneles con inclinación de 30°, se instalan la mitad de los que realmente entrarían; pero en caso de haber una pequeña pendiente, esta sombra se ve reducida (siempre en la orientación del sol).

Con las cubiertas inclinadas, se ha utilizado el mapa de pendientes "slope\_Inc\_Leioa\_corr", generando así el mapa denominado "Epv\_Inc\_Leioa". Para generar este mapa, se ha aplicado la siguiente fórmula:

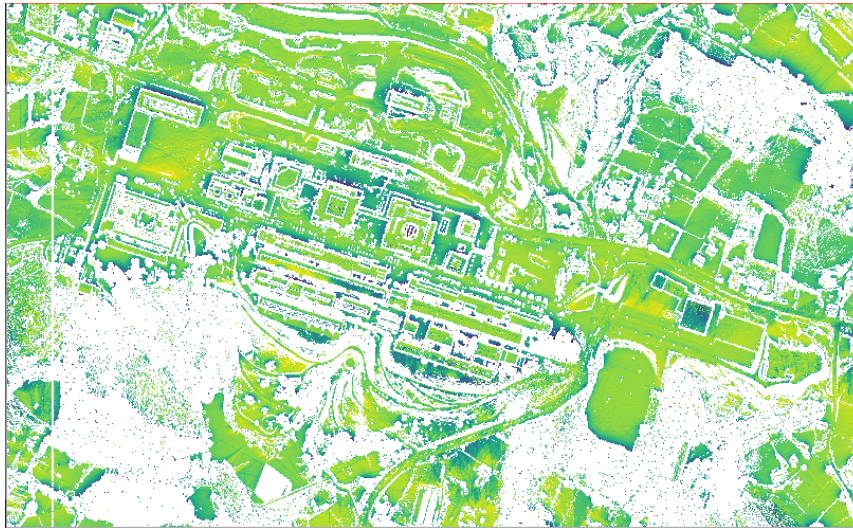


$$E_{pv} = \frac{G_{In} \cdot A \cdot \eta_{pv} \cdot PR}{\cos \beta} = \frac{G_{In\_Leioa} \cdot 1 \cdot 0,18 \cdot 0,75}{\cos(\text{slope\_Inc\_Leioa\_corr})}$$

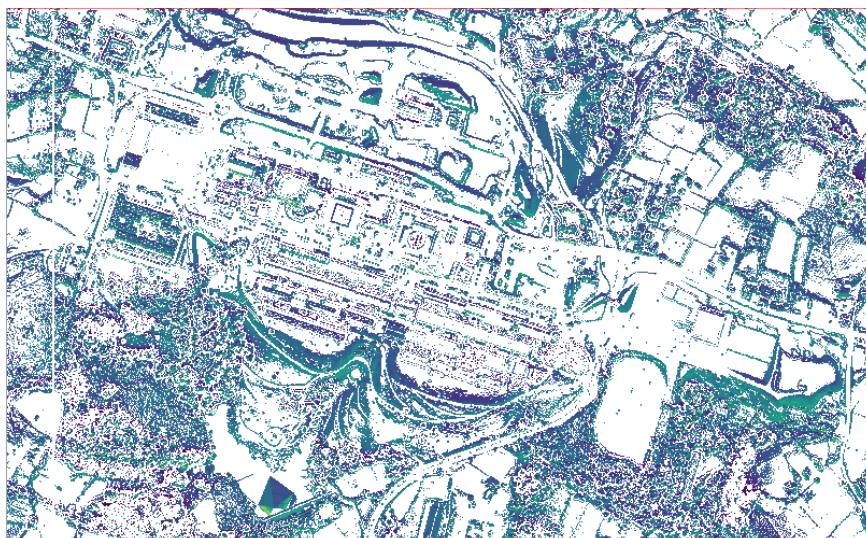
**Ecuación 3-8. Fórmula para el cálculo de la producción fotovoltaica en cubiertas inclinadas.**

En este caso, se aprovecha toda la superficie disponible para los paneles, ya que estos se instalan superpuestos, con la misma inclinación que la cubierta.

Cada mapa se ha realizado para mostrar datos de producción horarios, mensuales y anuales. Los horarios se han calculado con la función "r.mapcalc", partiendo de la radiación solar incidente y aplicando las fórmulas mostradas en este apartado. A partir de estos mapas horarios, sumando todos los resultados y multiplicando por el número de días de cada mes, se han calculado los datos de producción mensuales. Por último, sumando estos datos mensuales, se han generado los mapas de producción anuales, los cuáles se muestran a continuación:



**Imagen 3-13. Detalle del mapa de producción para superficies planas "Epv\_Pla\_Leioa\_anual".**

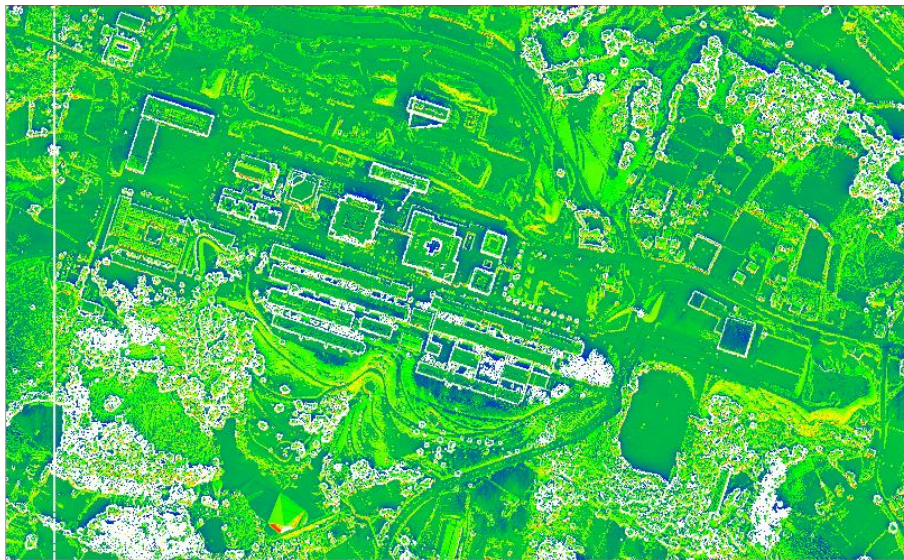


**Imagen 3-14. Detalle del mapa de producción para superficies inclinadas "Epv\_Inc\_Leioa\_anual".**



### - Epv\_Leioa

Finalmente, se han unido todos los mapas de cubiertas planas con sus análogos de cubiertas inclinadas para así obtener mapas de producción fotovoltaica integral. Para ello, se han parcheado los mapas ráster utilizando la función "r.patch". En la Imagen 3-15 se muestra lo propio con el mapa de producción anual:



*Imagen 3-15. Detalle del mapa de producción fotovoltaica "Epv\_Leioa\_anual".*

#### **3.2.4. Obtención de mapas ráster de análisis tecno-económico**

Con los mapas de producción fotovoltaica obtenidos, es imprescindible analizar en qué zonas sería viable realizar instalaciones. Para ello, el estudio se va a basar en diferentes indicadores de rentabilidad económica y energética, aplicado a los mapas ráster de producción de energía. Estos mapas se utilizarán posteriormente en el trabajo con QGIS, para filtrar los resultados por cada edificio y así poder ver la realidad de cada cubierta.

En este apartado, pues, se muestra el trabajo realizado en esta materia, exponiendo mapa a mapa los resultados.

### - **PPBE\_Pla\_Leioa / PPBE\_Inc\_Leioa** **(Payback energético con depreciación en base al tipo de cubierta)**

El payback energético indica el tiempo (en años) que tarda una instalación en generar la cantidad de energía consumida en la fabricación e instalación de los paneles. En este caso, se considera un payback energético con depreciación (PPBE), donde se considera una degradación de los paneles con el paso de los años, disminuyendo así cada año la energía generada. De acuerdo a Dupont et al. [58], la energía que producen los paneles fotovoltaicos al cabo de n años es:

$$E_n = \sum_i E_{PV}^i \frac{1 - (1 - \alpha)^n}{\alpha}$$

**Ecuación 3-9. Energía producida por los paneles fotovoltaicos al cabo de n años. [58]**

Donde  $\sum_i E_{PV}^i$  es la energía fotovoltaica generada el primer año de la instalación y  $\alpha$  el coeficiente de degradación (0,5%) [58].

Teniendo en cuenta que  $E_n$  igualara a la energía invertida en la fabricación e instalación del panel ( $E_{inv} = 1729 \text{ kWh/m}^2$ ) [42, 56] cuando el número de años n sea igual al PPBE, la anterior ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$E_{inv} \cdot S_a = \sum_i E_{PV}^i \frac{1 - (1 - \alpha)^{PPBE}}{\alpha}$$

**Ecuación 3-10. Energía producida por los paneles fotovoltaicos cuando PPBE = n [años].**

Se resuelve la ecuación, obteniendo la siguiente expresión genérica para el payback energético con depreciación:

$$PPBE = \frac{\ln(1 - \alpha \frac{E_{inv} \cdot S_a}{\sum_i E_{PV}^i})}{\ln(1 - \alpha)}$$

**Ecuación 3-11. Fórmula genérica para el cálculo del PPBE.**

Es preciso adaptar esta fórmula para las cubiertas planas e inclinadas, teniendo en cuenta las características de los paneles instalados en cada una, tal y como se ha explicado en apartados anteriores. La fórmula quedaría definida de la siguiente manera para cada caso:

- Cubiertas inclinadas

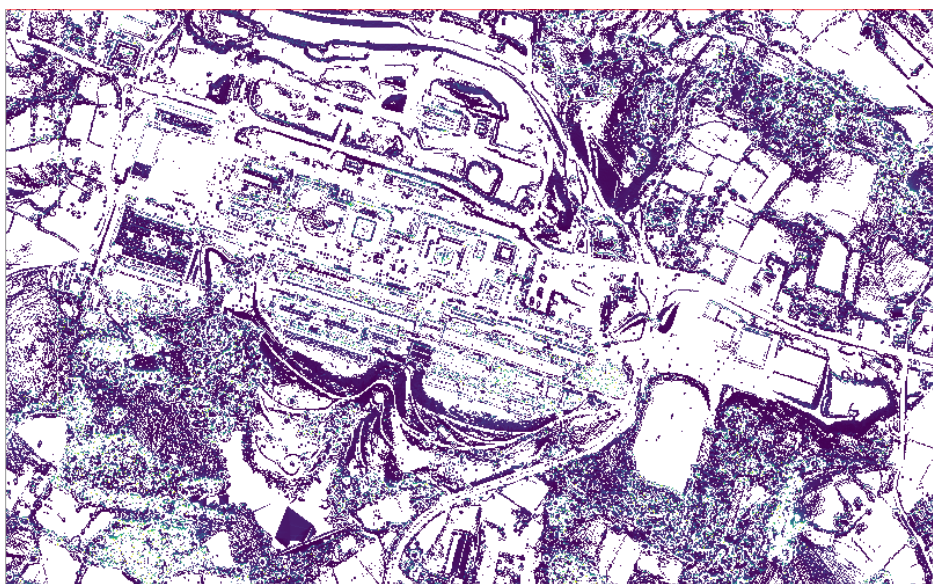
$$PPBE = \frac{\ln(1 - \alpha \frac{E_{inv} / \cos \beta}{\sum_i E_{PV}^i})}{\ln(1 - \alpha)}$$

**Ecuación 3-12. Fórmula para el cálculo del PPBE en cubiertas inclinadas.**

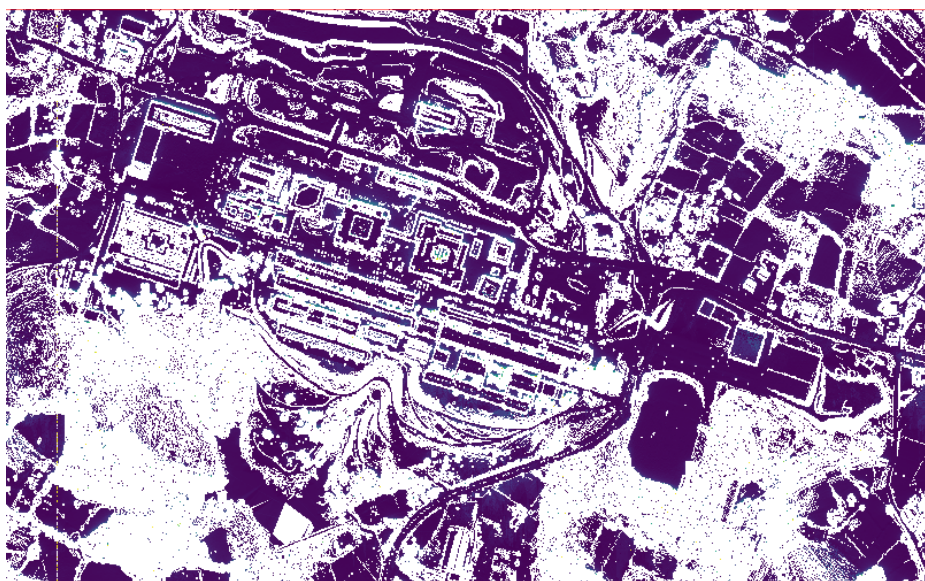
- Cubiertas planas

$$PPBE = \frac{\ln(1 - \alpha \frac{(0,503 \cdot E_{inv}) / (\cos \beta \cdot \cos(30^\circ))}{\sum_i E_{PV}^i})}{\ln(1 - \alpha)}$$

**Ecuación 3-13. Fórmula para el cálculo del PPBE en cubiertas planas.**



*Imagen 3-16. Detalle del mapa de PPBE para superficies inclinadas "PPBE\_Inc\_Leioa".*

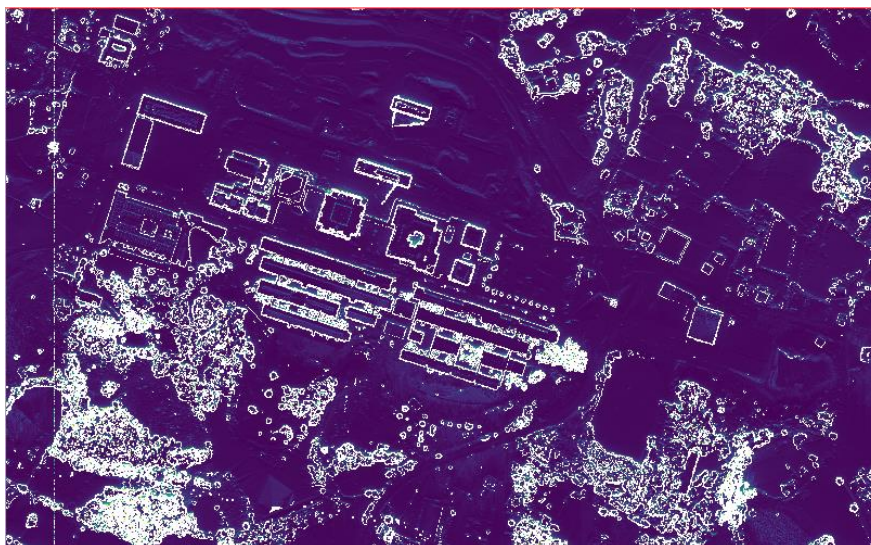


*Imagen 3-17. Detalle del mapa de PPBE para superficies planas "PPBE\_Pla\_Leioa".*

#### - **PPBE \_Leioa (Payback energético con depreciación)**

Para unir todo en un solo mapa, se ha parcheado el mapa ráster de cubiertas planas con su análogo de cubiertas inclinadas para así obtener el mapa de valores de payback energético con depreciación (PPBE). Para ello, se ha utilizado la función "r.patch". En la Imagen 3-18 se muestra dicho mapa:





**Imagen 3-18. Detalle del mapa de PPBE "PPBE\_Leioa".**

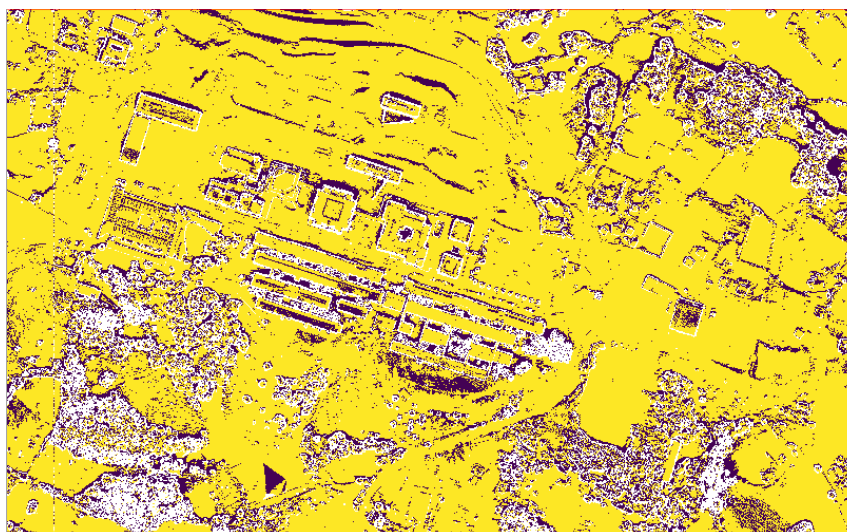
#### - **PPBE\_Leioa\_15 (Payback energético con depreciación – 15 Años)**

A partir del mapa anterior "PPBE\_Leioa", se ha realizado un filtrado en base a los años de payback energético con depreciación, con el fin de obtener una idea sobre las condiciones para que una cubierta albergue una instalación fotovoltaica. Teniendo en cuenta que la vida útil de la instalación sea de 25 años [57], se ha tomado como base para el filtrado un payback energético de 15 años. Para ello se ha utilizado la calculadora ráster (función "r.mapcalc") y se ha introducido la siguiente fórmula:

$$\text{if}(\text{PPBE\_Leioa@Mapas\_34} < 15, 1, 0)$$

**Ecuación 3-14. Obtención del filtrado del PPBE en base a los 15 años.**

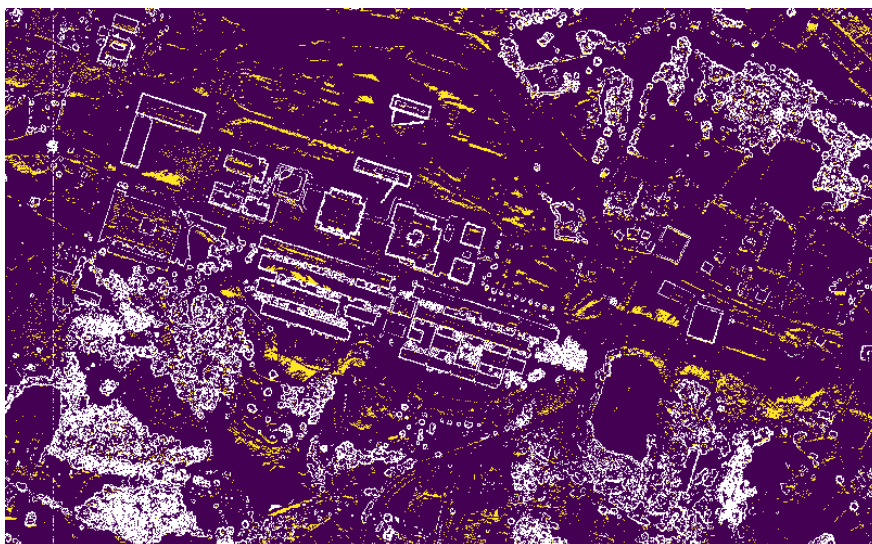
Este sería el estado de amortización energético para el año 15:



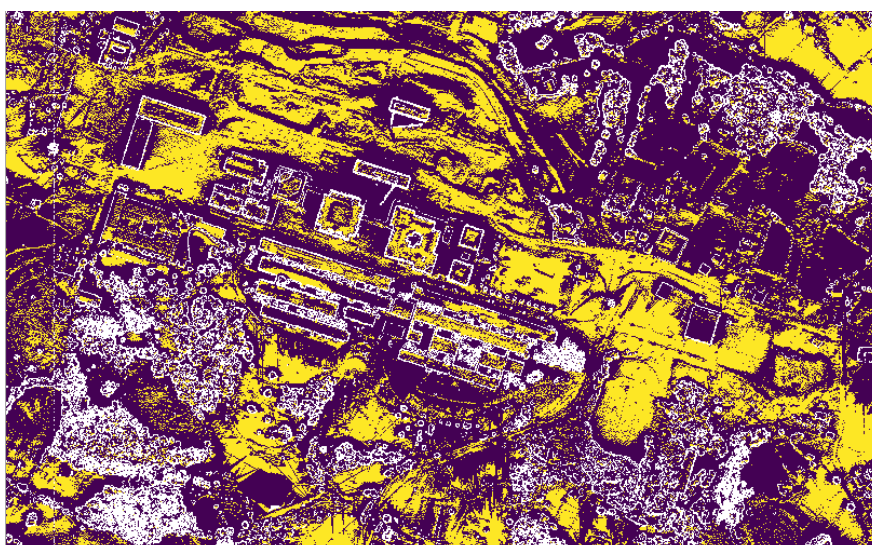
**Imagen 3-19. Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 15 años "PPBE\_Leioa\_15".**

Se puede observar que, a excepción de ciertas zonas, prácticamente toda la inversión energética de todas las cubiertas estaría amortizada para el año 15. En dichas zonas en las que no se amortiza del todo, el problema puede estar en ser una zona conflictiva en la que la pendiente sea cercana a  $12^{\circ}$ , ocurriendo que GRASS GIS le haya asignado en los cálculos unas características un poco alejadas de la realidad. Además, en muchos otros casos, estas zonas resultan ser píxeles aleatorios que no cumplen con la norma, mientras a su alrededor esto se cumple.

En el caso de las zonas en las que el payback energético fuese mayor a 15 años, la metodología EHUKhi planteaba filtrar y eliminarlas. Sin embargo, el autor ha decidido mantenerlas, con el fin de tener resultados más cercanos a la realidad. Una de las razones se basa en que, para el año 10, muchas de las instalaciones estarían amortizadas en términos energéticos. Además de ello, no es lógico eliminar pequeñas zonas que poco afectan al payback energético de la instalación en su totalidad. En cualquier caso, como posteriormente se hará un filtrado de los edificios en QGIS, si la instalación de un edificio no cumpliera esta norma, se valoraría su eliminación del proyecto.



**Imagen 3-20. Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 9 años "PPBE\_Leioa\_9".**



**Imagen 3-21. Detalle del mapa de zonas con PPBE inferior a 10 años "PPBE\_Leioa\_10".**



- **Inversión\_Inc\_Leioa / Inversión\_Pla\_Leioa**

Antes de proceder a los mapas de rentabilidad económica de las instalaciones, es preciso contar con un coste de inversión económica para poder llevar a cabo la instalación. Se ha estimado un valor de 212,3 €/m<sup>2</sup> (designado en las fórmulas como I) [59] para aplicar al coste de la fabricación e instalación de los paneles.

Para introducir los valores en mapas ráster, se ha utilizado la función calculadora ráster (función "r.mapcalc"), en la cuál se han aplicado las siguientes fórmulas, dependiendo de si son cubiertas inclinadas o planas:

- Cubiertas inclinadas

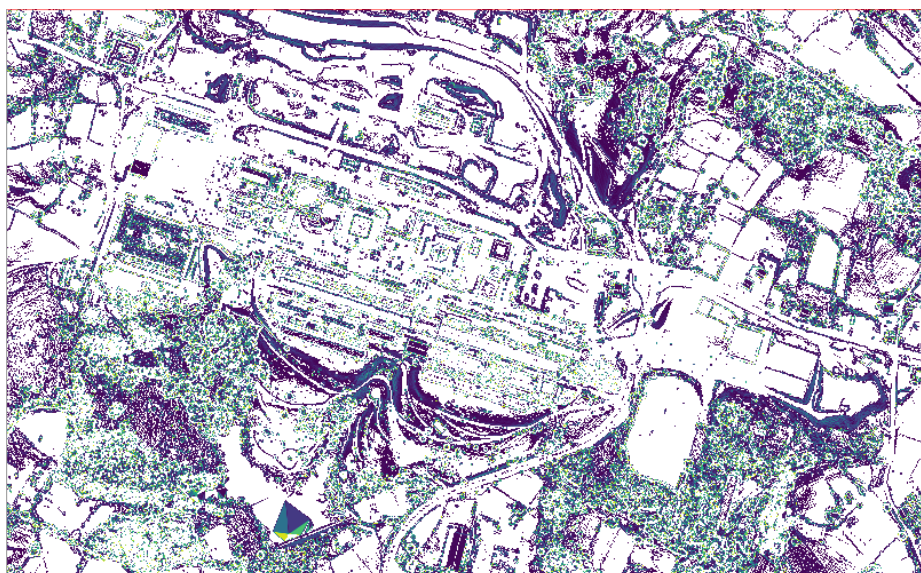
$$\text{Inversión} = I \cdot S_r = \frac{I \cdot A}{\cos \beta} = \frac{212,3 \cdot 1}{\cos(\text{slope\_Inc\_Leioa\_corr})}$$

**Ecuación 3-15. Fórmula para el cálculo de la Inversión en cubiertas inclinadas.**

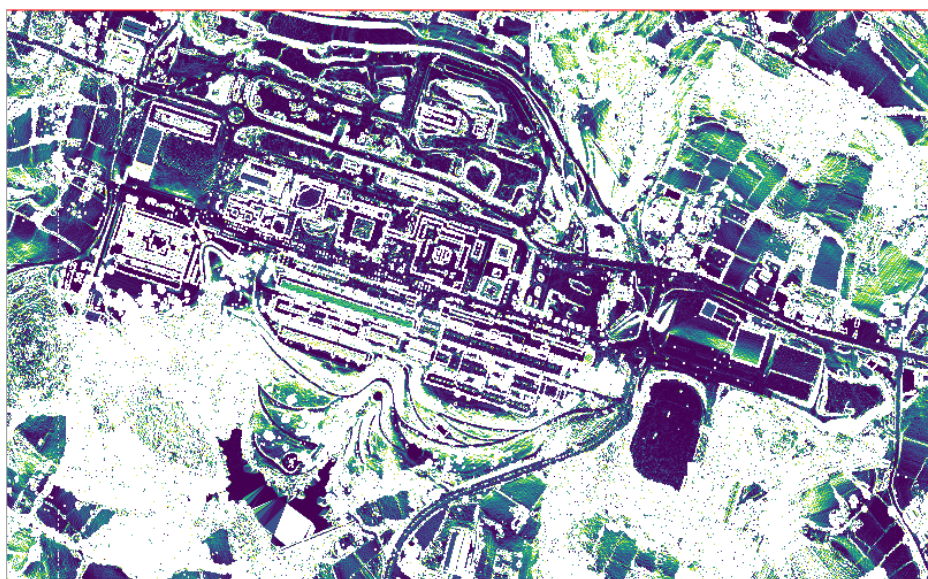
- Cubiertas planas

$$\text{Inversión} = 0,503 \cdot I \cdot S_r = \frac{I}{\cos \beta} \cdot \frac{(0,503 \cdot A)}{\cos(30^\circ)} = \frac{0,503 \cdot 212,3 \cdot 1}{\cos(\text{slope\_Pla\_Leioa\_corr}) \cdot \cos(30^\circ)}$$

**Ecuación 3-16. Fórmula para el cálculo de la Inversión en cubiertas inclinadas.**



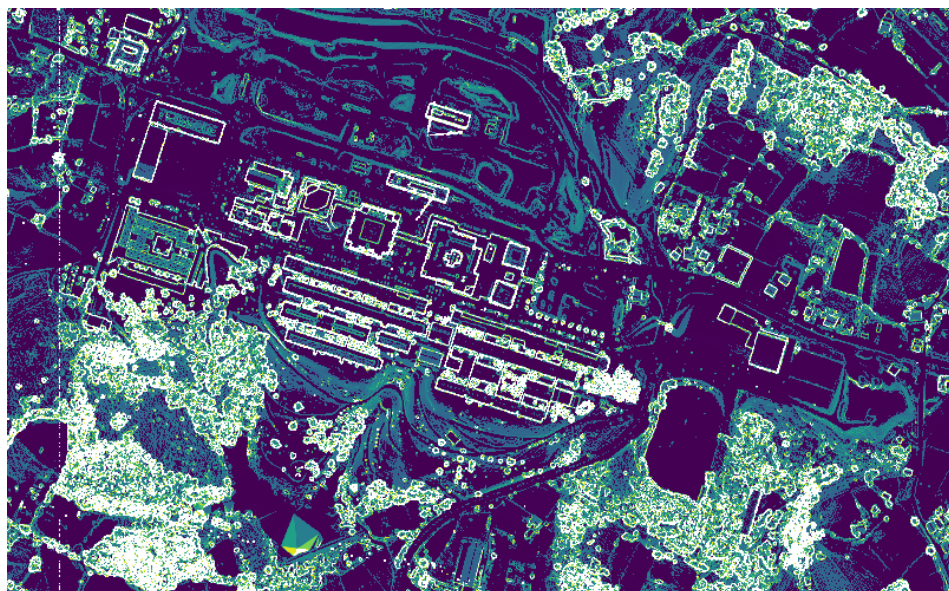
**Imagen 3-22. Detalle del mapa de inversión para superficies inclinadas "Inversión\_Inc\_Leioa".**



*Imagen 3-23. Detalle del mapa de inversión para superficies planas "Inversión\_Pla\_Leioa".*

#### - Inversión\_Leioa

A partir de los dos mapas generados anteriormente, se ha unido todo en un solo mapa. Este ha sido generado utilizando la función "r.patch", con la que se han parcheado los mapas divididos en cubiertas inclinadas y planas.



*Imagen 3-24. Detalle del mapa de inversión "Inversión\_Leioa".*



- **PB\_Pla\_Leioa / PB\_Inc\_Leioa**  
**(Payback económico en base al tipo de cubierta)**

El payback económico indica el tiempo (en años) que tarda una instalación en generar el mismo ahorro o las mismas ganancias que la inversión realizada. A partir de ese momento se podrá hablar realmente de un ahorro o unas ganancias generadas. Este indicador se podría calcular con depreciación, al igual que con el payback energético; sin embargo, en la metodología EHUKhi se propone calcular el payback económico simple.

En este caso también se ha hecho distinción entre cubiertas inclinadas y placas, puesto que, en el caso de estas últimas, si no se aplicase debidamente la fórmula, daría resultados con, prácticamente, el doble de valor. En cuanto al precio de la electricidad, se ha establecido un valor de 0,139 €/kWh [60]

Para calcular e introducir los valores en mapas ráster, se ha utilizado la calculadora ráster (función "r.mapcalc"), en la cuál se han aplicado las siguientes fórmulas, dependiendo de si son cubiertas inclinadas o planas:

- Cubiertas inclinadas

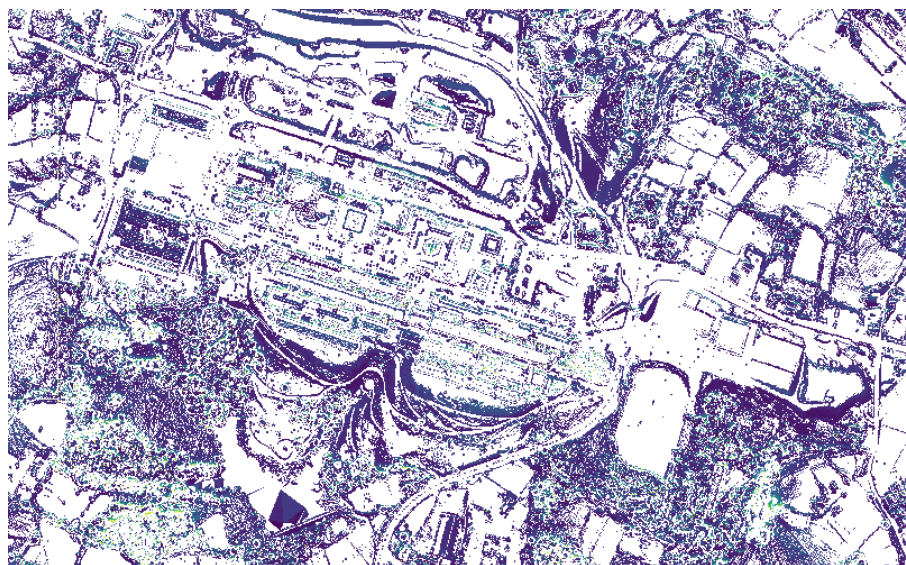
$$\text{Payback económico (PB)} = \frac{I}{\sum E_{pv} \cdot 0,139} = \frac{212,3}{E_{pv\_Inc\_Leioa\_anual} \cdot 0,139}$$

**Ecuación 3-17. Fórmula para el cálculo del PB en cubiertas inclinadas.**

- Cubiertas planas

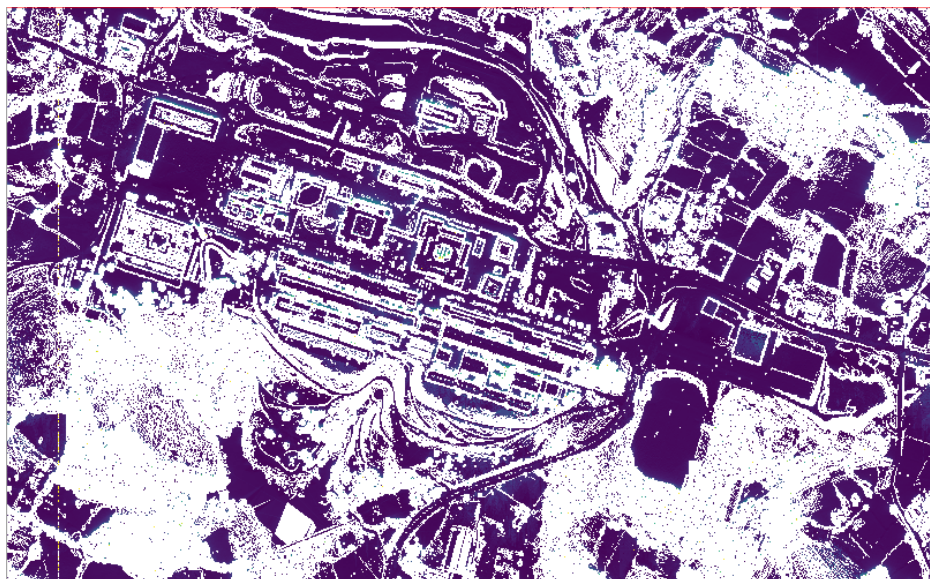
$$\text{Payback económico (PB)} = 0,503 \cdot \frac{I}{\sum E_{pv} \cdot 0,139} = 0,503 \cdot \frac{212,3}{E_{pv\_Pla\_Leioa\_anual} \cdot 0,139}$$

**Ecuación 3-18. Fórmula para el cálculo del PB en cubiertas planas.**



**Imagen 3-25. Detalle del mapa de PB para superficies inclinadas "PB\_Inc\_Leioa".**





*Imagen 3-26. Detalle del mapa de PB para superficies planas "PB\_Pla\_Leioa".*

#### - PB \_Leioa (Payback económico)

Para unir todo en un solo mapa, se ha parcheado el mapa ráster de cubiertas planas con su análogo de cubiertas inclinadas para así obtener el mapa de valores de payback económico simple (PB). Para ello, se ha utilizado la función "r.patch". En la Imagen 3-27 se muestra dicho mapa:



*Imagen 3-27. Detalle del mapa de PB "PB\_Leioa".*

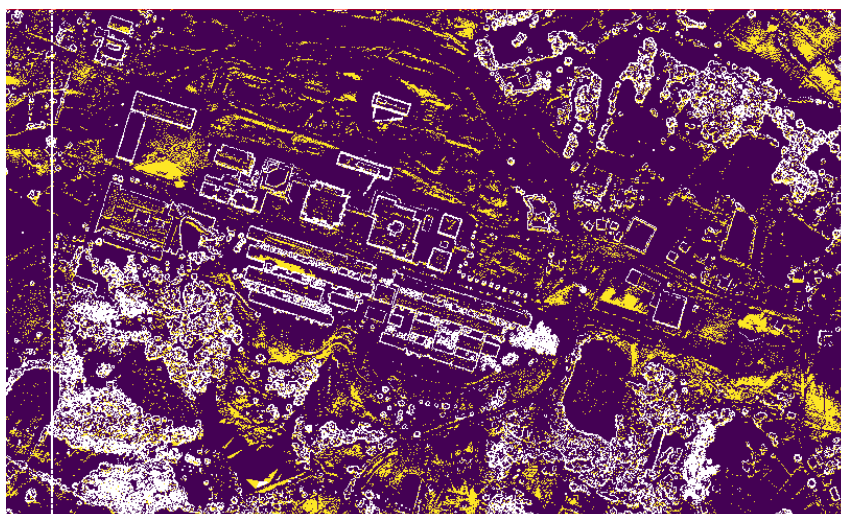
- **PB \_Leioa\_[años] (Payback económico – [años])**

A partir del mapa anterior "PB\_Leioa", se ha realizado un filtrado en base a los años de payback económico simple, con el fin de obtener una idea sobre las condiciones para que una cubierta albergue una instalación fotovoltaica. En este caso, no se ha tomado ninguna referencia concreta para este indicador, pero sí que se ha buscado el punto en el que la mayoría de las instalaciones se rentabilizan. Para ello se ha utilizado la calculadora ráster (función "r.mapcalc") y se ha introducido la siguiente fórmula:

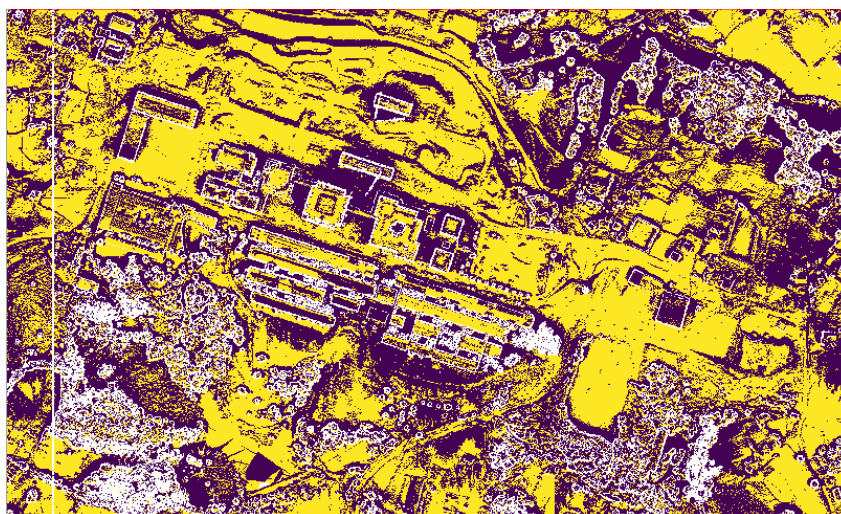
$$\text{if}(\text{PB\_Leioa@Mapas\_34} < [\text{años}], 1, 0)$$

**Ecuación 3-19. Obtención del filtrado del PB en base a los años.**

En el caso del payback económico, se ha observado que la mayoría de instalaciones no estarían rentabilizadas para el año 7, pero sí, en cambio, para el año 8. Se observa esto en las Imágenes 3-28 y 3-29:



**Imagen 3-28. Detalle del mapa de zonas con PB inferior a 7 años "PB\_Leioa\_7".**



**Imagen 3-29. Detalle del mapa de zonas con PB inferior a 8 años "PB\_Leioa\_8".**

Habitualmente, se toma como referencia un payback de entre 3 y 5 años para aceptar la inversión en un proyecto. Sin embargo, para proyectos fotovoltaicos es necesario cambiar la mentalidad para poder aprobar este tipo de proyectos. Un payback de 10 años puede resultar ser una buena solución.

- **EROI\_Inc\_Leioa / EROI\_Pla\_Leioa (EROI – Energy Return On Investment)**

El indicador EROI (Energy Return On Investment) determina la eficiencia energética de una tecnología, comparando su retorno de energía con la energía utilizada en su fabricación e instalación. Esta relación se ha calculado con la calculadora ráster (función "r.mapcalc"), distinguiendo en la fórmula si se trata de cubiertas inclinadas o planas:

- Cubiertas inclinadas

$$\text{EROI} = \frac{E_{PV}^{n=Vida\ útil} \cdot \cos \alpha}{E_{inv}} = \frac{\sum_i E_{PV}^i \frac{1 - (1 - \alpha)^{Vida\ útil}}{\alpha} \cdot \cos \alpha}{E_{inv}}$$

$$\text{EROI} = \frac{E_{pv\_Inc\_Leioa\_anual} \cdot \frac{1 - (1 - 0,005)^{25}}{0,005} \cdot \cos(\text{slope\_Inc\_Leioa\_corr})}{1729 \left(\frac{kWh}{m^2}\right) \cdot 1(m^2)}$$

**Ecuación 3-20. Fórmula para el cálculo del EROI en cubiertas inclinadas.**

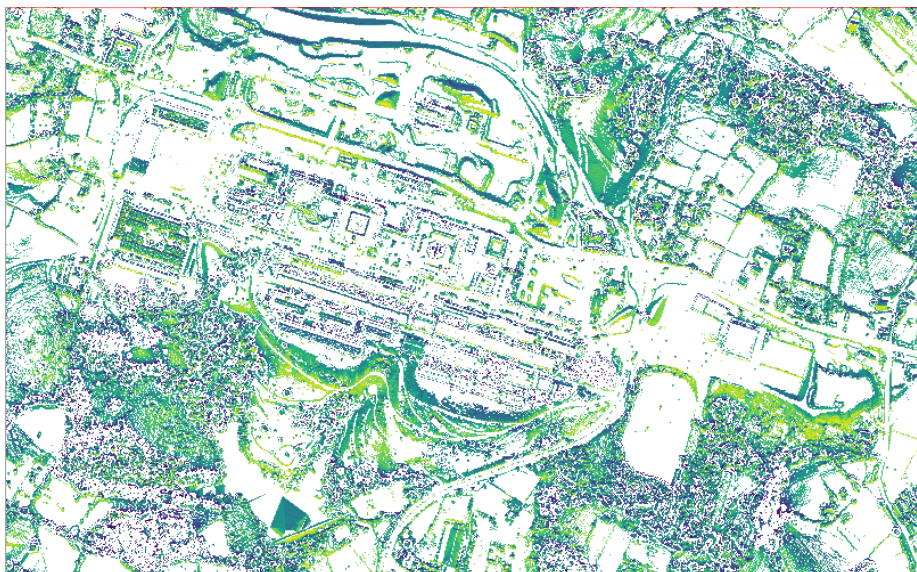
- Cubiertas planas

$$\text{EROI} = \frac{E_{PV}^{n=Vida\ útil} \cdot \cos \alpha \cdot \cos(30^\circ)}{0,503 \cdot E_{inv}} = \frac{\sum_i E_{PV}^i \frac{1 - (1 - \alpha)^{Vida\ útil}}{\alpha} \cdot \cos \alpha \cdot \cos(30^\circ)}{0,503 \cdot E_{inv}}$$

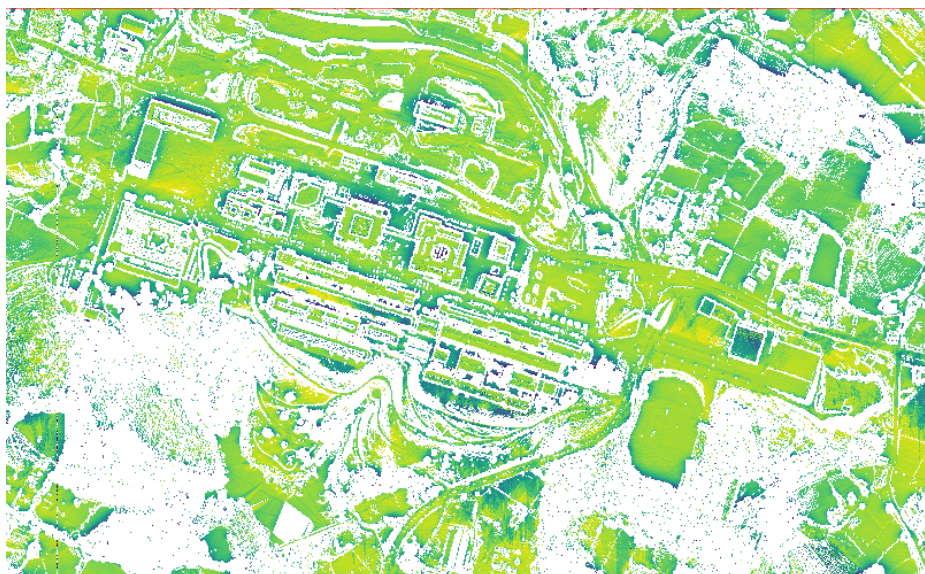
$$\text{EROI} = \frac{E_{pv\_Inc\_Leioa\_anual} \cdot \frac{1 - (1 - 0,005)^{25}}{0,005} \cdot \cos(\text{slope\_Inc\_Leioa\_corr}) \cdot \cos(30^\circ)}{0,503 \cdot 1729 \left(\frac{kWh}{m^2}\right) \cdot 1(m^2)}$$

**Ecuación 3-21. Fórmula para el cálculo del EROI en cubiertas planas.**





*Imagen 3-30. Detalle del mapa de EROI para superficies inclinadas "EROI\_Inc\_Leioa".*



*Imagen 3-31. Detalle del mapa de EROI para superficies inclinadas "EROI\_Inc\_Leioa".*

- **EROI\_Leioa (EROI – Energy Return On Investment)**

A partir de los dos mapas generados anteriormente, se ha unido todo en un solo mapa. Este ha sido generado utilizando la función "r.patch", con la que se han parcheado los mapas divididos en cubiertas inclinadas y planas.



**Imagen 3-32. Detalle del mapa de EROI "EROI\_Leioa".**

### **3.2.5. Trabajo con mapas vectoriales en QGIS**

Antes de empezar a trabajar con QGIS, es necesario exportar los mapas ráster en formato GTiff (.tiff). Para ello, en GRASS GIS se utiliza la función con comando "r.out.gdal" (exportación de mapas ráster en formatos de exportación comunes). Con esta tarea se posibilita que los mapas ráster se abran en QGIS.

Una vez se hayan exportado los mapas deseados, se procede a trabajar con QGIS. Al iniciar el programa, lo primero que se hace es crear un proyecto (al cuál se le ha llamado TFM\_Leioa) y asignarle una proyección; en este caso, ya que con la creación del proyecto se le ha asignado la "EPSG:25830 - ETRS89 / UTM zone 30N", será fácil encontrarla entre las proyecciones personalizadas.

Con el programa preparado para trabajar en el proyecto, a continuación, se muestran los pasos dados para obtener todos los datos necesarios mediante mapas. Principalmente este apartado se va a centrar en la obtención de los datos de producción fotovoltaica; aun así, más adelante se mostrarán otros atributos que se han obtenido realizando las mismas operaciones.

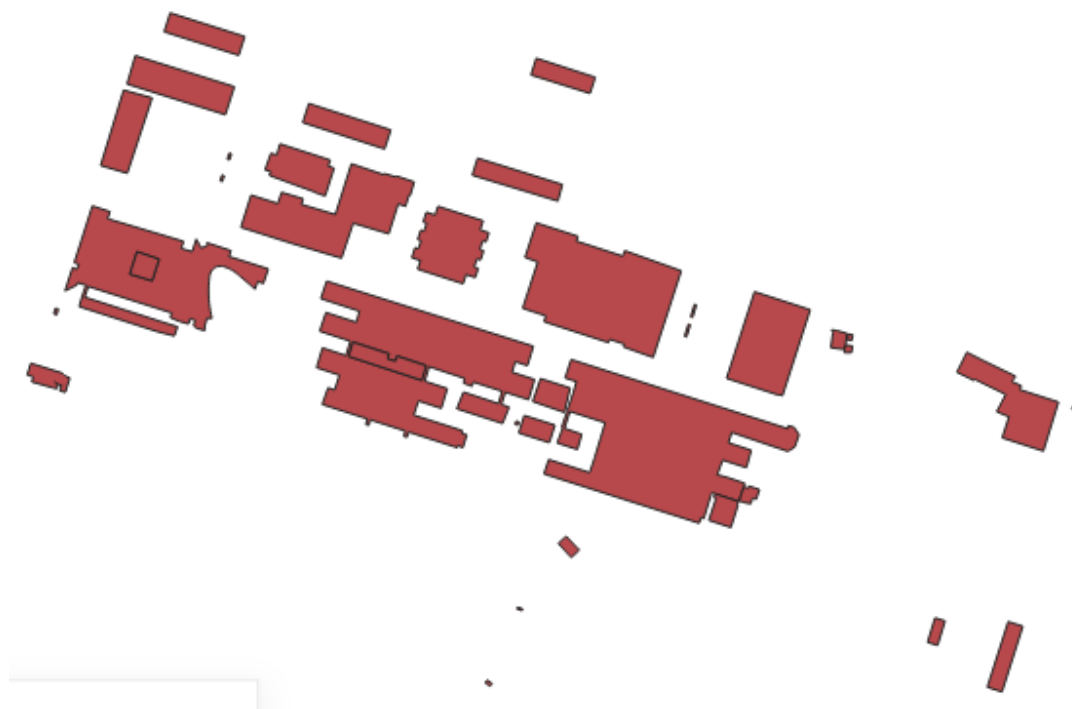
#### **- Edificaciones\_Leioa**

Primeramente, se necesita obtener la capa de edificios, la cuál será un mapa vectorial. Para ello, se han utilizado los recursos de GeoEuskadi, Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Euskadi. En este caso, se ha creado una ubicación de red con acceso al Servicio de Descarga FTP, para tener la cartografía a mano. Dentro de esta ubicación, se ha descargado la capa de edificaciones de la ubicación Cartografía\_Básica/BTA/Edificaciones, con nombre "BTA\_EDI\_EDIFICACIONES\_A\_5000\_ETRS89\_DICIEMBRE\_2018" (carpeta con mapas en proyección ETRS a escala 1:5000 con información del área de los edificios). Esta capa, ubicada en el archivo "BTA\_EDI\_EDIFICACIONES\_A\_5000.shp" (se trata de un archivo shape, un formato de mapa vectorial) incluye todos los edificios de Euskadi, por lo que habrá que filtrar los edificios pertenecientes al campus de Leioa de la UPV/EHU.

La capa se copiará para poder trabajar sobre ella, denominándola como "Edificaciones\_Leioa". Una vez que se enlaza la capa al proyecto, para poder seleccionar los edificios de la zona de trabajo se utiliza la herramienta "Seleccionar objetos espaciales por área o por clic único". Si se abre la tabla de atributos, se puede observar que aparecen seleccionados los edificios. Para eliminar los demás edificios, habrá que invertir esta selección para que se seleccionen los demás edificios de Euskadi y así poder borrarlos. Este filtrado, sin embargo, no es perfecto, ya que pueden quedar seleccionados edificios cercanos; estos se irán eliminando individualmente o en pequeños grupos de la misma manera que antes, hasta que la capa quede sólo con los edificios pertenecientes a la UPV/EHU.

#### - Edificaciones\_Leioa\_C

Al cortar los mapas, puede que queden fallos en los polígonos, los cuáles pueden generar problemas en operaciones posteriores. Para ello, es aconsejable siempre utilizar la herramienta "Corregir geometrías" para evitar futuras incidencias. En este caso, se ha hecho lo propio con la capa de edificaciones.



**Imagen 3-33. Capa de edificaciones con geometrías corregidas "Edificaciones\_Leioa\_C".**

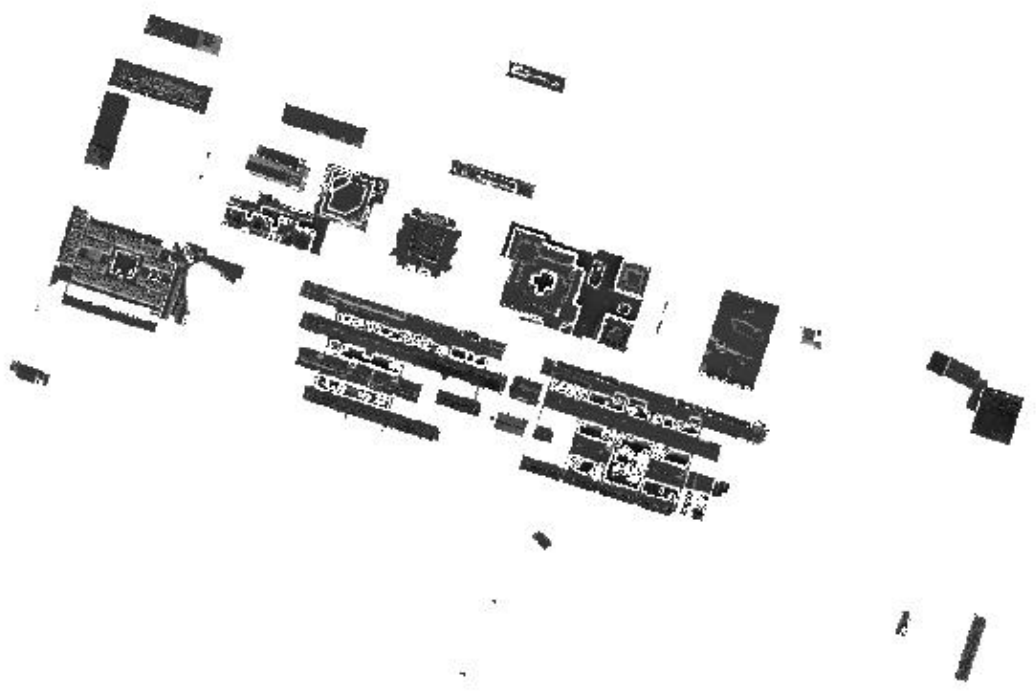
Nota: en la capa de la Imagen 3-33 se incluye el edificio de la Cafetería Baserri y la Copistería Baserri. Más adelante, en la operación de eliminar obstáculos, se ha eliminado este edificio.



### - Epv\_Leioa (mapas ráster en formato .tiff)

Los mapas ráster de producción fotovoltaica exportados en formato “.tiff” contienen, además de los datos de producción de los edificios, los datos para toda el área que se encuentra dentro de los dos cuadrantes con los que se ha trabajado en GRASS GIS. Trabajar con toda esta área supondría hacer operaciones con una gran cantidad de datos innecesarios que ralentizan el trabajo, además de que sus archivos tendrían un tamaño muy grande y ocuparían mucha memoria.

Es por ello que todos los mapas ráster de producción se han filtrado en base al área ocupada por la capa de edificios “Edificaciones\_Leioa\_C”. Para ello, se ha utilizado la herramienta “Cortar ráster por capa de máscara”. Esta operación se ha realizado con el mapa anual, los mensuales y los horarios, utilizando para ello un script.



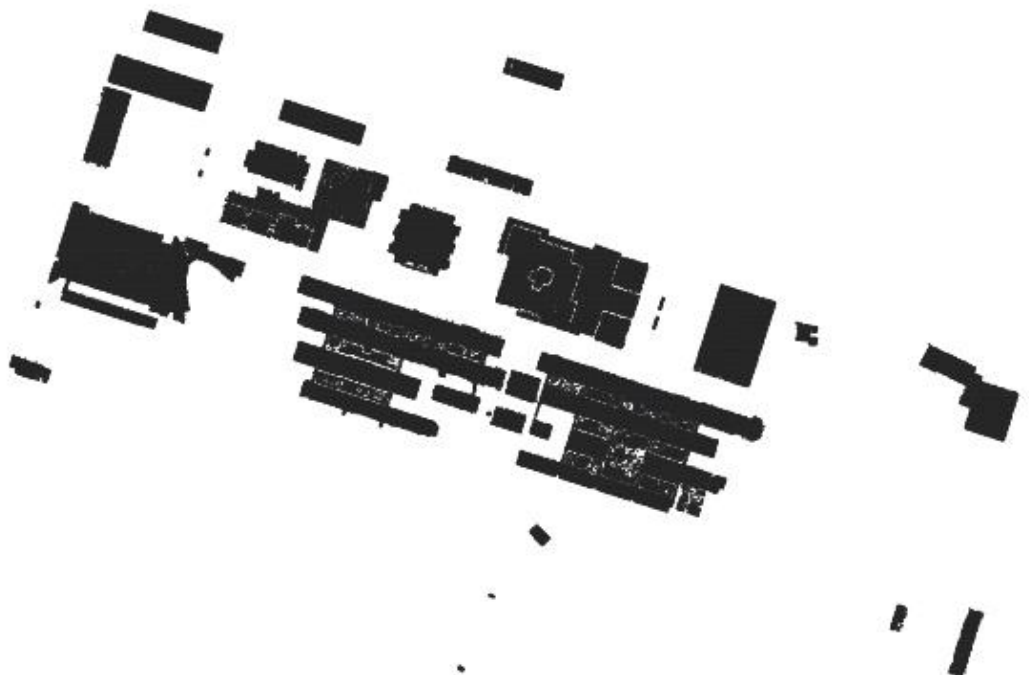
*Imagen 3-34. Capa ráster de producción anual en edificaciones “Epv\_Leioa\_anual”.*

### - Epv\_Leioa (mapas vectoriales en formato .shp)

En este paso se trata de convertir el mapa ráster de producción a formato vectorial. En este formato, cada píxel va a convertirse en un campo. Para ello, se utiliza la herramienta “Píxeles ráster a polígonos”, en la que se introducen los mapas ráster exportados y se le asigna el nombre “Epv” al campo cuyos datos van a convertirse de formato. A los mapas convertidos se les ha asignado el mismo nombre que a sus análogos en formato ráster; esto no causará ningún conflicto con la denominación, puesto que los mapas tienen distinto formato. Como se han convertido los mapas horarios, los mensuales y el anual, se ha utilizado un script.

### - Epv\_Leioa\_C (mapas vectoriales en formato .shp)

A los mapas creados se les ha corregido también las geometrías, para evitar problemas en operaciones posteriores. El resultado se puede observar en la Imagen 3-35:



*Imagen 3-35. Capa vectorial corregida de producción anual en edificaciones "Epv\_Leioa\_anual\_C".*

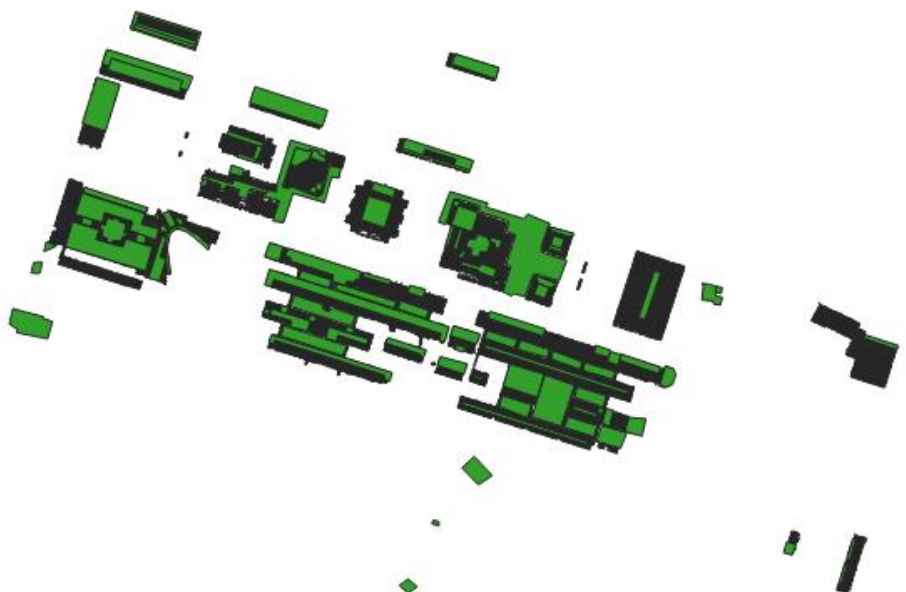
### - Leioa\_Obstáculos

Teniendo en cuenta que todas las áreas de las cubiertas de los edificios no tienen por qué ser óptimas para albergar una instalación de paneles solares fotovoltaicos, en este paso se ha hecho la operación para eliminar los datos de la potencial producción fotovoltaica en dichas zonas. Para conocer cuáles son estas áreas, se tomaron datos en una visita realizada al campus de Leioa, además de utilizar la ortofoto más reciente y con mayor resolución de la zona, la cuál se ha obtenido del visor de GeoEuskadi.

Para eliminar estas áreas, en primer lugar, se ha creado una capa de archivo shape, llamada "Obstáculos\_Leioa". En ella se han añadido los elementos necesarios con la herramienta "Añadir polígono", cubriendo de esta manera las zonas en las que no interesa instalar paneles fotovoltaicos.

En la Imagen 3-36 aparece la capa de obstáculos, en verde, superpuesta a la capa de producción fotovoltaica.

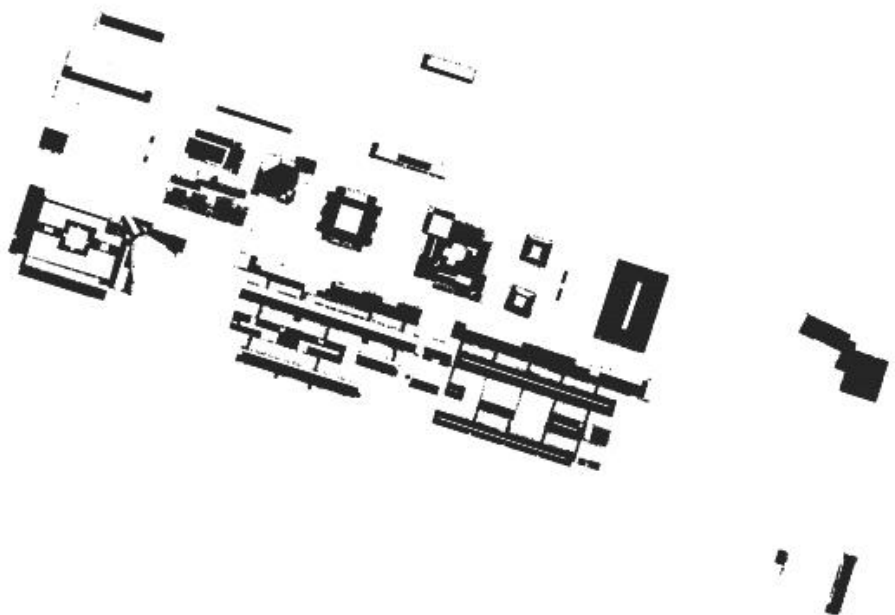




*Imagen 3-36. Capa de obstáculos en cubiertas "Obstáculos\_Leioa".*

#### - **Epv\_Leioa\_efectivo**

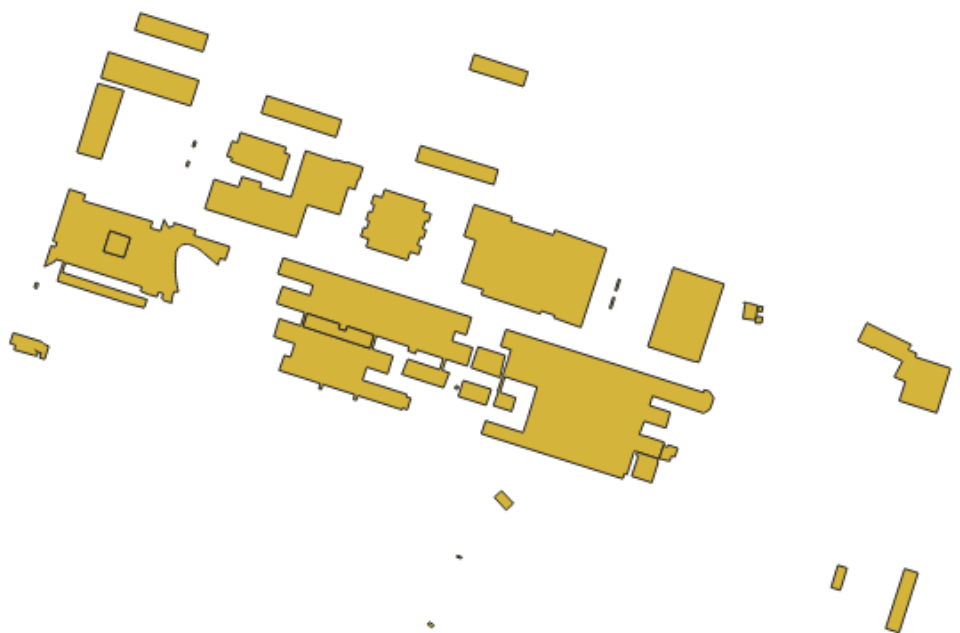
Una vez completada la capa de obstáculos, es necesario eliminar esas áreas del mapa vectorial de producción fotovoltaica. Para ello, se ha utilizado la herramienta de geoproceso "Diferencia". Así, quedaría un mapa de producción fotovoltaica solo con las zonas útiles para la instalación de paneles, al cuál se ha denominado "Epv\_Leioa\_Efectivo". Esta operación se ha realizado para los mapas horarios, mensuales y el anual mediante un script.



*Imagen 3-37. Capa de producción anual efectiva "Epv\_Leioa\_anual\_efectivo".*

### - Epv\_Leioa\_edificaciones

El último paso es cargar la información de la producción horaria, mensual y anual a cada edificio. Para ello, se ha utilizado la herramienta "Unir atributos por localización (resumen)", la cual carga los valores de los mapas poligonizados en los edificios, uniendo todo en un mismo mapa. Para realizar esta operación, se ha realizado un script.



**Imagen 3-38. Capa de producción anual de cada edificación "Epv\_Leioa\_anual\_edificaciones"**

Nota: en la Imagen 3-38 aparecen edificios pertenecientes a la UPV/EHU que no han sido considerados como útiles para albergar una instalación fotovoltaica. En ese caso, se hará constar en la tabla de atributos con valores nulos.

### **3.2.6. Mapas vectoriales de análisis tecno-económico**

De la misma manera que se ha hecho con los mapas de producción fotovoltaica, todos los indicadores de análisis tecno-económico también se han filtrado en base a los edificios. Para ello se han seguido exactamente los mismos pasos que con los mapas de producción fotovoltaica. En este apartado se enumeran los indicadores tecno-económicos analizados en GRASS GIS y filtrados en QGIS, junto a una breve explicación de la tarea realizada.

### - **PPBE\_Leioa (Payback energético con depreciación)**

Las tareas se han realizado en el siguiente orden:

- **PPBE\_Leioa (.tiff)**  
Mapa ráster en formato .tiff, filtrado (herramienta "Cortar ráster por capa de máscara") en base al área de la capa "Edificaciones\_Leioa\_C".
- **PPBE\_Leioa (mapa vectorial en formato .shp)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado con la herramienta "Píxeles ráster a polígonos" a partir del mapa anterior en formato ráster.
- **PPBE\_Leioa\_C (mapa vectorial en formato .shp, corregido)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior en formato vectorial, con geometrías corregidas (herramienta "Corregir geometrías")
- **PPBE\_Leioa\_efectivo**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir de eliminarle al mapa anterior las áreas de la capa "Leioa\_Obstáculos" mediante la herramienta "Diferencia", para dejar sólo disponibles las cubiertas de interés y las zonas libres de obstáculos.
- **PPBE\_Leioa\_edificaciones**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior, en el que se han filtrado los datos por cada edificación, añadiéndole los datos a cada una con la herramienta "Unir atributos por localización (resumen)".

### - **Inversión\_Leioa**

Las tareas se han realizado en el siguiente orden:

- **Inversión\_Leioa (.tiff)**  
Mapa ráster en formato .tiff, filtrado (herramienta "Cortar ráster por capa de máscara") en base al área de la capa "Edificaciones\_Leioa\_C".
- **Inversión\_Leioa (mapa vectorial en formato .shp)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado con la herramienta "Píxeles ráster a polígonos" a partir del mapa anterior en formato ráster.
- **Inversión\_Leioa\_C (mapa vectorial en formato .shp, corregido)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior en formato vectorial, con geometrías corregidas (herramienta "Corregir geometrías")
- **Inversión\_Leioa\_efectivo**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir de eliminarle al mapa anterior las áreas de la capa "Leioa\_Obstáculos" mediante la herramienta "Diferencia", para dejar sólo disponibles las cubiertas de interés y las zonas libres de obstáculos.
- **Inversión\_Leioa\_edificaciones**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior, en el que se han filtrado los datos por cada edificación, añadiéndole los datos a cada una con la herramienta "Unir atributos por localización (resumen)".

## - **PB\_Leioa**

Las tareas se han realizado en el siguiente orden:

- **PB\_Leioa (.tiff)**  
Mapa ráster en formato .tiff, filtrado (herramienta "Cortar ráster por capa de máscara") en base al área de la capa "Edificaciones\_Leioa\_C"
- **PB\_Leioa (.shp)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado con la herramienta "Píxeles ráster a polígonos" a partir del mapa anterior en formato ráster.
- **PB\_Leioa\_C (mapa vectorial en formato .shp, corregido)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior en formato vectorial, con geometrías corregidas (herramienta "Corregir geometrías")
- **PB\_Leioa\_efectivo**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir de eliminarle al mapa anterior las áreas de la capa "Leioa\_Obstáculos" mediante la herramienta "Diferencia", para dejar sólo disponibles las cubiertas de interés y las zonas libres de obstáculos.
- **PB\_Leioa\_edificaciones**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior, en el que se han filtrado los datos por cada edificación, añadiéndole los datos a cada una con la herramienta "Unir atributos por localización (resumen)".

## - **EROI\_Leioa**

Las tareas se han realizado en el siguiente orden:

- **EROI\_Leioa (.tiff)**  
Mapa ráster en formato .tiff, filtrado (herramienta "Cortar ráster por capa de máscara") en base al área de la capa "Edificaciones\_Leioa\_C"
- **EROI\_Leioa (mapa vectorial en formato .shp)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado con la herramienta "Píxeles ráster a polígonos" a partir del mapa anterior en formato ráster.
- **EROI\_Leioa\_C (mapa vectorial en formato .shp, corregido)**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior en formato vectorial, con geometrías corregidas (herramienta "Corregir geometrías")
- **EROI\_Leioa\_efectivo**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir de eliminarle al mapa anterior las áreas de la capa "Leioa\_Obstáculos" mediante la herramienta "Diferencia", para dejar sólo disponibles las cubiertas de interés y las zonas libres de obstáculos.
- **EROI\_Leioa\_edificaciones**  
Mapa vectorial en formato .shp, realizado a partir del mapa anterior, en el que se han filtrado los datos por cada edificación, añadiéndole los datos a cada una con la herramienta "Unir atributos por localización (resumen)".

### 3.2.7. Otros indicadores del análisis tecno-económico

#### - Área aprovechable (%)

Con el fin de conocer lo óptima que es una cubierta para albergar una instalación de paneles solares fotovoltaicos, suele resultar un buen indicador calcular el porcentaje de área aprovechable de la cubierta. En este trabajo, el área aprovechable se va a referir, por supuesto, a las zonas no ocupadas por obstáculos y, además, a las no ocupadas por otras instalaciones fotovoltaicas existentes (como las instalaciones de autoconsumo de los edificios de la Facultad de Ciencia y Tecnología y la Escuela de Hostelería), ya que no se conocen datos de dichas instalaciones. En consecuencia, los resultados obtenidos por este trabajo no tendrán en cuenta tampoco los paneles instalados actualmente.

El porcentaje del área aprovechable se ha hallado con la siguiente fórmula:

$$\text{Área aprovechable (\%)} = \frac{\text{Área}_{\text{Edificio}} - \text{Área}_{\text{obstáculos}}}{\text{Área}_{\text{Edificio}}} \cdot 100 = \frac{\text{Área}_{\text{Aprovechable}}}{\text{Área}_{\text{Edificio}}} \cdot 100$$

**Ecuación 3-22. Fórmula para el cálculo del área aprovechable.**

Para calcular el área de los edificios, se ha añadido un campo nuevo en la tabla de atributos de la capa "Edificaciones\_Leioa\_C" con la función "Campo nuevo" y en él se ha calculado el área con la función "Calculadora de campos".

Para calcular el área aprovechable, se ha creado una nueva capa denominada "Edificaciones\_Leioa\_C\_AreaApro" mediante la herramienta "Diferencia", eliminándole a la capa de edificaciones las partes correspondientes a los obstáculos. En esta nueva capa se ha creado otro campo para calcular el área, de la misma manera que en la capa de edificios.

Todos los datos se han exportado a una hoja de cálculo, en la cuál se han realizado los cálculos correspondientes para obtener el porcentaje de área aprovechable.

#### - Tasa de autoabastecimiento (%)

Otro indicador para valorar lo óptima que puede ser una instalación fotovoltaica en un edificio es la tasa de autoabastecimiento. Esta tasa, además, es de gran importancia a la hora de decidir si se quiere instalar un autoconsumo parcial (cuando la tasa sea menor al 100%), un autoconsumo total (con una tasa del 100%) o, si fuese posible, una instalación de generación distribuida para producción (una instalación con una tasa mayor al 100%).

La tasa de autoabastecimiento para cada edificio o para cada punto de consumo se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de autoabastecimiento (\%)} = \frac{\sum E_{pv} [MWh]}{\text{Consumo anual [MWh]}} \cdot 100$$

**Ecuación 3-23. Fórmula genérica para el cálculo de la tasa de autoabastecimiento.**

$\sum E_{pv}$  se refiere a la producción anual de los paneles que se pretenden instalar con este proyecto (sin tener en cuenta los instalados anteriormente, al no contar con los datos de producción de los mismos). Sin embargo, se podría hacer una aproximación, haciendo cálculos con el área ocupada.



Otro problema en esta fase será la falta de datos de consumo de cada edificio. La información obtenida se refiere a la medición en dos puntos consumo que cubren todo el campus. La única información individualizada que se ha obtenido es la del consumo de la Facultad de Educación de Bilbao, cedida por los coordinadores del proyecto "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16].

Para obtener una idea general del potencial autoabastecimiento de los edificios del campus, se ha hecho un prorrateo del consumo en base al área que ocupan y a su número de alturas. En algunos casos, estas plantas no ocupan en todo el edificio la misma área, por lo que se hace una aproximación del número de plantas que ocupan el área de la cubierta del edificio (por ejemplo, en caso de que dos pisos tengan la misma área y un tercer piso tenga la mitad de área, el valor será de 2,5 plantas). En los cálculos se han tenido en cuenta los edificios no aprovechables para albergar instalaciones PV (por su bajo o nulo consumo) ni el alumbrado exterior del campus. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$\text{Tasa de autoabastecimiento (\%)} = \frac{E_{pv} [\text{MWh}]}{\text{Consumo anual} [\text{MWh}]} \cdot 100 = \frac{E_{pv} [\text{MWh}] (\text{Individual})}{\frac{\text{Área} [\text{m}^2] \cdot \text{N}^{\circ} \text{ de Alturas}}{\sum (\text{Área} [\text{m}^2] \cdot \text{N}^{\circ} \text{ de Alturas})} \cdot \text{Consumo anual} [\text{MWh}]} \cdot 100$$

**Ecuación 3-24. Fórmula para el cálculo de la tasa de autoabastecimiento.**

Nº	FACULTAD / ENTIDAD	EDIFICIO	ÁREA (m <sup>2</sup> )	ALTURAS (Nº)	VOLUMEN DE CONSUMO (m <sup>2</sup> Nº)	PORCENTAJE VOLUMEN DE CONSUMO (%)	CONSUMO PRORRATEADO (MWh)
1	AULARIO I						
2	FACULTAD DE DERECHO		17487,49	3,25	56834,3425	14,040	2085,911861
3	VICERRECTORADO CAMPUS DE BIZKAIA						
4	FACULTAD DE RELACIONES LABORALES Y TRABAJO SOCIAL						
5	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DE LA COMUNICACIÓN						
5	FACULTAD DE EDUCACIÓN	PARTE NORTE	4165,21	4	16660,84	4,115	611,4796483
		PARTE SUR	3096,24	3,25	10062,78	2,485	369,3202249
		MARQUESINA NORTE	20,62	1	20,62	0,005	0,756787194
		MARQUESINA SUR	19,00	1	19	0,004	0,697330586
6	FACULTAD DE BELLAS ARTES	CUBIERTA	15905,06	1,3	20676,578	5,107	758,8636973
		PATIO	735,32	1	735,32	0,182	26,9874277
7 / 11	AULA MAGNA / RECTORADO	CASETA SERVICIOS SUR					
		AULA MAGNA RECTORADO	10271,06	3	30813,18	7,610	1130,893308
8	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA	CUBIERTA	24787,65	3,5	86756,775	21,428	3184,113302
		NAVE INDUSTRIAL	1083,83	2	2167,66	0,535	79,55661146
		SALA DE CALDERAS	806,07	1	806,07	0,199	29,5840666
		CASETA CONTIGUA	15,00	1	15	0,004	0,550524147
		APARCAMIENTO	-				
9 / 15	FACULTAD DE MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	27305,55	2,5	68263,875	16,860	2505,394102
10	BIBLIOTECA CENTRAL		5314,16	7	37199,12	9,188	1365,267586
12	POLIDEPORTIVO	GIMNASIO - CANCHA	5045,79	1,5	7568,685	1,869	277,7829234
		CASETA TRANSFORMADOR	18,25	1	18,25	0,004	0,669804378
		CASETA ATLETISMO	367,47	1	367,47	0,091	13,48674055
		FRONTONES	1450,58	1	1450,58	0,358	53,23862111
13	IFP - ESCUELA DE HOSTELERÍA		2804,88	2	5609,76	1,386	205,8872225
14	ANIMALARIO	PARTE SUR	862,26	1	862,26	0,213	31,64633005
		PARTE ESTE	316,27	1	316,27	0,078	11,60761813
16	INSTITUTO BIOFISIKA		1459,14	5	7295,7	1,802	267,7639345
17	CENTRO DE BIOTECNOLOGÍA ANIMAL "MARIA GOYRI"		2108,12	5	10540,6	2,603	386,856988
18	PLATAFORMA TECNOLÓGICA "MARTINA CASIANO"		2352,54	4	9410,16	2,324	345,3680203
19	EDIFICIO SEDE DEL PARQUE CIENTÍFICO		2127,68	4	8510,72	2,102	312,3571244
20	INSTITUTO BIOFISIKA (ANTIGUO)		-		0		0
21	ARBORETUM	PABELLÓN	-		0		0
		CASETA NORTE	-		0		0
		CASETA SUR	-		0		0
22	APARCAMIENTO CUBIERTO	CUBIERTA	7276,54	3	21829,62	5,392	801,1821949
		MARQUESINA NORTE	35,77	1	35,77	0,008	1,312816582
		MARQUESINA SUR	35,78	1	35,78	0,008	1,313183598

**Tabla 3-3. Prorrateo de consumos en los distintos edificios en base a su volumen de ocupación.**

Además de este método, se ha hecho el cálculo de la tasa de autoabastecimiento global para todos los edificios, el cuál puede dar una visión más general de este indicador.

## 4. TABLAS DE ATRIBUTOS DE LOS EDIFICIOS Y RESULTADOS

### 4.1. Tablas de atributos, gráficos y resultados

En las siguientes páginas se muestran todos los atributos y los resultados relativos a cada edificio y/o a cada zona o facultad que conforma el campus de Leioa de la UPV/EHU, todo ello representado mediante tablas y gráficos. A continuación, se detallan las características de cada figura:

- **Tabla 4-1:** se muestran todos los datos relativos a la ubicación y orientación de cada edificio, su radiación solar incidente, su área aprovechable para albergar una instalación y su generación de electricidad anual.
- **Tabla 4-2:** se muestran los datos relativos a la viabilidad en términos energéticos (PPBE y EROI), viabilidad en términos económicos (Inversión y PB) y tasa de autoabastecimiento.
- **Tabla 4-3:** se muestran los cálculos de producción fotovoltaica mensual de cada zona o facultad del campus.
- **Imagen 4-1:** se muestra, en porcentajes respecto a la producción total, la producción anual de cada zona o facultad del campus.
- **Imagen 4-2:** se muestra la producción mensual de cada zona o facultad del campus, sintetizado en una gráfica.
- **Imágenes 4-3 – 4-14:** se muestra la producción horaria media de cada día tipo de cada mes en cada zona o facultad del campus, sintetizado en 12 gráficos.

Se puede observar que en algunos edificios los cálculos aparecen de manera conjunta (los edificios 1, 2, 3 y 4 forman un conjunto; otro está formado por los edificios 7 y 11 y, además, hay un tercero formado por el 9 y el 15) porque en la capa descargada de GeoEuskadi [45] así constan. Además de esto, algunas zonas o facultades están divididas en más de una parte o edificio, por lo que los datos se muestran individualizados para cada unidad edificatoria; sin embargo, a la hora de realizar gráficos, se ha optado por unir todas las partes divididas por motivos de visibilidad.

Nº	FACULTAD / ENTIDAD	EDIFICIO	ALTURA	INCLINACIÓN	INCLINACIÓN PANELES	ORIENTACIÓN	Gin (MWh/m2)	ÁREA (m <sup>2</sup> )	ÁREA APROVECHABLE			Epv ANUAL (MWh)
			(msnm)	(°)	(°)	(° desde el E)			(m <sup>2</sup> )	(%)	(%)	
1	AULARIO I		87	1	-	-	9506,03633	17487,49	8000,73	45,75	54,56	841,5163249
2	FACULTAD DE DERECHO VICERRECTORADO CAMPUS DE BIZKAIA		102	21	21	255						
3	FACULTAD DE RELACIONES LABORALES Y TRABAJO SOCIAL		105	8	30	250						
4	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DE LA COMUNICACIÓN		101	1	30	255						
5	FACULTAD DE EDUCACIÓN	PARTE NORTE	100	1	30	255	1444,98609	4165,21	1121,93	26,94		131,4103731
		PARTE SUR	95	14	14	255	829,64930	3096,24	927,18	29,95		91,97857598
		MARQUESINA NORTE	86	1	30	255	29,79541	20,62	20,62	100		2,450521908
		MARQUESINA SUR	85	1	30	255	25,45568	19,00	19,00	100		2,188184251
6	FACULTAD DE BELLAS ARTES	CUBIERTA	87	1 / 50	30	255	9265,87751	15905,06	7412,47	46,60		965,8270472
		PATIO	87	1	30	255	86,10402	735,32	0	0		-
		CASETA SERVICIOS SUR	77	1	-	255	-	-	-	-		-
7/ 11	AULA MAGNA / RECTORADO	AULA MAGNA	97	1	30	255	6554,40694	10271,06	6307,21	61,41	54,56	625,1577328
		RECTORADO	98	1	30	255						
8	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA	CUBIERTA	90	1	30	255	14577,62463	24787,65	12992,59	52,42		1297,998439
		NAVE INDUSTRIAL	84	7	30	255	628,01830	1083,83	491,24	45,32		52,04009708
		SALA DE CALDERAS	82	17	17	255	398,94763	806,07	368,57	45,72		52,62466724
		CASETA CONTIGUA	80	1	30	255	8,65314	15,00	15,00	100		1,664708618
		APARCAMIENTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9/ 15	FACULTAD DE MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	MEDICINA Y ENFERMERÍA	89	1	30	255	18764,90738	27305,55	15177,42	55,58	54,56	1628,4708
		TITÁN	84	1	30	255						
10	BIBLIOTECA CENTRAL		111	1	30	255	4281,53673	5314,16	3767,26	70,89		365,6665197
12	POLIDEPORTIVO	GIMNASIO - CANCHA	89	1 / 10	30	240 / 255	4813,38204	5045,79	4822,31	95,57		421,9737566
		CASETA TRANSFORMADOR	84	1	30	255	17,45694	18,25	18,25	100		3,393265796
		CASETA ATLETISMO	76	15	15 / 30	165	179,09214	367,47	225,04	61,24		21,5298103
		FRONTONES	68	11	30	255	1397,70216	1450,58	1234,80	85,12		143,6169823
13	IFP - ESCUELA DE HOSTELERÍA		90	1 / 15	30 / 15	255	2685,50093	2804,88	2260,55	80,59		301,5353861
14	ANIMALARIO	PARTE SUR	86	3	30	255	216,03284	862,26	241,89	28,05		18,93761422
		PARTE ESTE	81	3	30	255	39,74126	316,27	26,28	8,31		2,931680624
16	INSTITUTO BIOFISIKA		97	1	30	255	537,54142	1459,14	503,63	34,52		43,51349732
17	CENTRO DE BIOTECNOLOGÍA ANIMAL "MARIA GOYRI"		103	1	30	255	1298,38548	2108,12	899,76	42,68		123,9696365
18	PLATAFORMA TECNOLÓGICA "MARTINA CASIANO"		103	1	30	255	656,66328	2352,54	437,00	18,58		66,14593366
19	EDIFICIO SEDE DEL PARQUE CIENTÍFICO		102	1	30	255	969,35932	2127,68	862,24	40,52		84,29978669
20	INSTITUTO BIOFISIKA (ANTIGUO)		-	-	-	-	-	-	-	-		-
21	ARBORETUM	PABELLÓN	68	1	-	-	-	-	-	-		-
		CASETA NORTE	-	-	-	-	-	-	-	-		-
		CASETA SUR	-	-	-	-	-	-	-	-		-
22	APARCAMIENTO CUBIERTO	CUBIERTA	92	1	30	255	8753,04887	7276,54	6646,92	91,35		760,5496402
		MARQUESINA NORTE	84	1	30	255	33,95864	35,77	35,77	100		5,464570803
		MARQUESINA SUR	84	1	30	255	34,84522	35,78	35,78	100		5,605798145

Tabla 4-1. Tabla de atributos relativa a las características de los edificios, radiación solar incidente, área aprovechable y producción fotovoltaica anual.

Nº	FACULTAD / ENTIDAD	EDIFICIO	PPBE				Inversión (€)	PB				EROI		Tasa autoabastecimiento	
			(años)					(años)						(%)	
			Media		Valor máximo			Media		Valor máximo		Media	Valor máximo	Individual	Global
1	AULARIO I														
2	FACULTAD DE DERECHO VICERRECTORADO CAMPUS DE BIZKAIA														
3	FACULTAD DE RELACIONES LABORALES Y TRABAJO SOCIAL		12,09	13	103,88	104	1160804,77	8,68	9	47,62	48	2,20	3,14	40,34	40,34
4	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DE LA COMUNICACIÓN														
5	FACULTAD DE EDUCACIÓN	PARTE NORTE	12,57	13	93,03	94	179712,16	8,86	9	48,20	49	2,21	3,11	21,49	23,21
		PARTE SUR	16,17	17	44,08	45	165998,81	12,87	13	22,84	23	1,59	2,94	24,90	
		MARQUESINA NORTE	9,22	10	9,89	10	2713,21	6,87	7	7,56	8	2,59	2,69	323,81	
		MARQUESINA SUR	9,25	10	9,75	10	2427,36	6,97	7	7,59	8	2,59	2,70	313,79	
6	FACULTAD DE BELLAS ARTES	CUBIERTA	12,75	13	96,91	97	1390597,93	8,81	9	45,29	46	2,13	3,14	127,27	127,27
		PATIO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		CASETA SERVICIOS SUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7 / 11	AULA MAGNA / RECTORADO	AULA MAGNA RECTORADO	14,90	15	103,85	104	991120,18	9,89	10	48,80	49	1,96	3,06	55,28	55,28
8	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA	CUBIERTA	13,65	14	103,36	104	1970482,58	9,71	10	48,29	49	2,03	3,12	40,76	42,64
		NAVE INDUSTRIAL	11,26	12	55,30	56	68483,52	8,13	9	21,66	22	2,26	3,03	65,41	
		SALA DE CALDERAS	13,23	14	26,89	27	81367,64	10,29	11	15,36	16	1,88	2,49	177,88	
		CASETA CONTIGUA	27,55	28	45,02	46	4695,93	15,35	16	25,71	26	1,06	1,93	302,39	
		APARCAMIENTO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
9 / 15	FACULTAD DE MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	11,81	12	102,27	103	2204215,10	8,32	9	48,71	49	2,24	3,13	65,00	65,00
10	BIBLIOTECA CENTRAL		12,49	13	103,61	104	506077,50	8,55	9	43,86	44	2,23	3,15	26,78	26,78
12	POLIDEPORTIVO	GIMNASIO - CANCHA	14,06	15	99,30	100	674080,09	10,04	11	47,01	48	1,86	2,94	151,91	171,08
		CASETA TRANSFORMADOR	15,72	16	26,50	27	5617,91	8,92	9	14,49	15	1,78	2,71	506,61	
		CASETA ATLETISMO	20,10	21	91,53	92	44258,37	12,52	13	41,65	42	1,50	2,25	159,64	
		FRONTONES	12,18	13	73,59	74	203610,86	9,12	10	48,86	49	2,07	2,79	269,76	
13	IFP – ESCUELA DE HOSTELERÍA		12,04	13	102,51	103	407040,22	8,35	9	39,74	40	2,21	3,12	146,46	146,46
14	ANIMALARIO	PARTE SUR	17,51	18	81,47	82	35483,25	11,69	12	39,96	40	1,6	2,68	59,84	50,56
		PARTE ESTE	14,52	15	26,45	27	4632,83	8,55	9	18,30	19	1,81	2,32	25,26	
16	INSTITUTO BIOFISIKA		12,88	13	47,57	48	64400,51	9,05	10	21,51	22	2,03	2,92	16,25	16,25
17	CENTRO DE BIOTECNOLOGÍA ANIMAL "MARIA GOYRI"		10,54	11	21,74	22	158180,95	7,82	8	14,74	15	2,33	2,87	32,05	32,05
18	PLATAFORMA TECNOLÓGICA "MARTINA CASIANO"		10,18	11	28,43	29	79841,92	7,53	8	19,25	20	2,41	3,06	19,15	19,15
19	EDIFICIO SEDE DEL PARQUE CIENTÍFICO		14,65	15	86,72	87	131037,49	9,7	10	48,54	49	2,00	2,98	26,99	26,99
20	INSTITUTO BIOFISIKA (ANTIGUO)		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	ARBORETUM	PABELLÓN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CASETA NORTE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CASETA SUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	APARCAMIENTO CUBIERTO	CUBIERTA	10,33	11	87,32	88	928234,41	7,65	8	45,61	46	2,4	3,13	94,93	96,00
		MARQUESINA NORTE	15,60	16	52,33	53	9605,34	9,77	10	22,95	23	1,73	2,41	416,25	
		MARQUESINA SUR	14,63	15	23,90	24	9468,11	9,47	10	16,06	17	1,78	2,56	426,89	

Tabla 4-2. Tabla de atributos relativa a los indicadores de PPBE, Inversión, PB, EROI y Tasa de Autoabastecimiento.

Nº	FACULTAD / ENTIDAD	EDIFICIO	PRODUCCIÓN FOTOVOLTAICA MENSUAL											
			(MWh)											
			Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
1	AULARIO I													
2	FACULTAD DE DERECHO VICERECTORADO CAMPUS DE BIZKAIA		29,0874	41,6597	68,7300	79,7074	108,4398	107,3567	118,1001	97,2608	78,0044	54,0871	31,7583	27,3247
3	FACULTAD DE RELACIONES LABORALES Y TRABAJO SOCIAL													
4	FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y DE LA COMUNICACIÓN													
5	FACULTAD DE EDUCACIÓN	PARTE NORTE	5,1699	7,0489	10,7960	12,1929	16,3032	16,0925	17,6915	14,6855	12,1745	8,7631	5,5559	4,9366
		PARTE SUR	3,8945	5,2256	6,4977	8,1266	11,9296	11,9486	12,8709	9,6771	8,4439	5,4081	4,1376	3,8183
		MARQUESINA NORTE	0,0925	0,1301	0,2079	0,2264	0,3024	0,2946	0,3274	0,2776	0,2329	0,1685	0,1020	0,0882
		MARQUESINA SUR	0,0769	0,1169	0,1915	0,2053	0,2712	0,2632	0,2928	0,2504	0,2117	0,1524	0,0823	0,0738
6	FACULTAD DE BELLAS ARTES	CUBIERTA	31,1598	46,0429	79,2379	91,8701	125,8781	125,0769	137,8590	113,1734	90,5850	61,6557	34,3294	28,9589
		PATIO	0,5479	0,6528	0,9601	0,9021	1,0787	1,0068	1,1292	1,0432	0,9933	0,8249	0,5633	0,5268
		CASETA SERVICIOS SUR												
7 / 11	AULA MAGNA / RECTORADO	AULA MAGNA	18,8484	28,8685	50,4219	60,9354	82,3120	82,6445	89,8145	74,4572	59,2407	38,8499	21,1146	17,6500
		RECTORADO												
8	FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA	CUBIERTA	38,1508	58,1442	99,5636	124,1134	176,4283	178,4291	192,2569	152,4980	121,9600	77,6862	42,9815	35,7865
		NAVE INDUSTRIAL	1,8846	2,6660	4,2373	4,8494	6,6808	6,5543	7,2456	5,8849	4,8274	3,3968	2,0446	1,7685
		SALA DE CALDERAS	1,6337	2,3901	3,9672	5,0585	7,2934	7,0782	7,8327	6,0534	4,8551	3,1322	1,7348	1,5953
		CASETA CONTIGUA	0,0428	0,0622	0,1139	0,1504	0,2457	0,2604	0,2822	0,1963	0,1370	0,0869	0,0455	0,0415
		APARCAMIENTO												
9 / 15	FACULTAD DE MEDICINA Y ENFERMERÍA TITÁN	MEDICINA Y ENFERMERÍA	52,4734	77,6355	133,5142	155,2017	212,5657	210,8827	231,9380	190,7008	152,9104	103,8963	57,9277	48,8243
		TITÁN												
10	BIBLIOTECA CENTRAL		12,8042	18,2863	30,2651	34,5269	46,6211	46,0415	50,8185	42,0688	34,2330	23,9617	13,9757	12,0637
12	POLIDEPORTIVO	GIMNASIO - CANCHA	13,5488	19,3955	31,8375	39,6910	57,8465	58,2159	63,1450	48,7860	36,8880	24,9434	14,7813	12,8947
		CASETA TRANSFORMADOR	0,0998	0,1538	0,2834	0,3178	0,4502	0,4575	0,5034	0,3941	0,3224	0,2036	0,1110	0,0961
		CASETA ATLETISMO	0,3364	0,7644	1,6635	2,2088	3,1451	3,1970	3,5020	2,7830	2,0464	1,1484	0,4330	0,3018
		FRONTONES	4,4063	6,4821	11,4409	14,0740	19,0729	18,9737	20,7243	17,2304	13,2069	8,9915	4,9199	4,0941
13	IFP – ESCUELA DE HOSTELERÍA		11,3263	16,1316	25,8183	28,4075	36,8613	36,4084	40,1950	33,7422	28,8609	20,7449	12,3695	10,6696
14	ANIMALARIO	PARTE SUR	0,6090	0,9263	1,5179	1,8476	2,4627	2,4527	2,6031	2,2113	1,8217	1,2104	0,7045	0,5704
		PARTE ESTE	0,0987	0,1366	0,2269	0,2791	0,3790	0,3893	0,4144	0,3573	0,2618	0,1912	0,1083	0,0892
16	INSTITUTO BIOFISIKA		1,4059	2,0198	3,6295	4,1951	5,6439	5,5784	6,1578	5,1408	4,1607	2,7365	1,5240	1,3211
17	CENTRO DE BIOTECNOLOGÍA ANIMAL "MARIA GOYRI"		4,2182	6,2850	10,6196	11,8993	15,5003	15,2761	16,8989	14,3152	11,9676	8,4169	4,6908	3,8817
18	PLATAFORMA TECNOLÓGICA "MARTINA CASIANO"		2,2131	3,5331	5,7850	6,2935	8,2737	8,0564	8,9476	7,5982	6,4129	4,6135	2,5576	1,8613
19	EDIFICIO SEDE DEL PARQUE CIENTÍFICO		2,7586	4,1569	6,9329	8,1424	10,7906	10,7889	11,7823	9,8203	7,8886	5,5075	3,1476	2,5832
20	INSTITUTO BIOFISIKA (ANTIGUO)													
21	ARBORETUM	PABELLÓN												
		CASETA NORTE												
		CASETA SUR												
22	APARCAMIENTO CUBIERTO	CUBIERTA	25,2988	37,2476	63,8455	72,1274	97,5968	96,1651	106,3202	88,5448	72,1782	49,8187	27,8702	23,5363
		MARQUESINA NORTE	0,1146	0,2161	0,4007	0,5570	0,7882	0,7798	0,8636	0,6963	0,5065	0,2982	0,1390	0,1045
		MARQUESINA SUR	0,1904	0,2803	0,4505	0,4920	0,7326	0,7706	0,8392	0,6055	0,4911	0,3722	0,2092	0,1721

Tabla 4-3. Tabla de producción fotovoltaica mensual



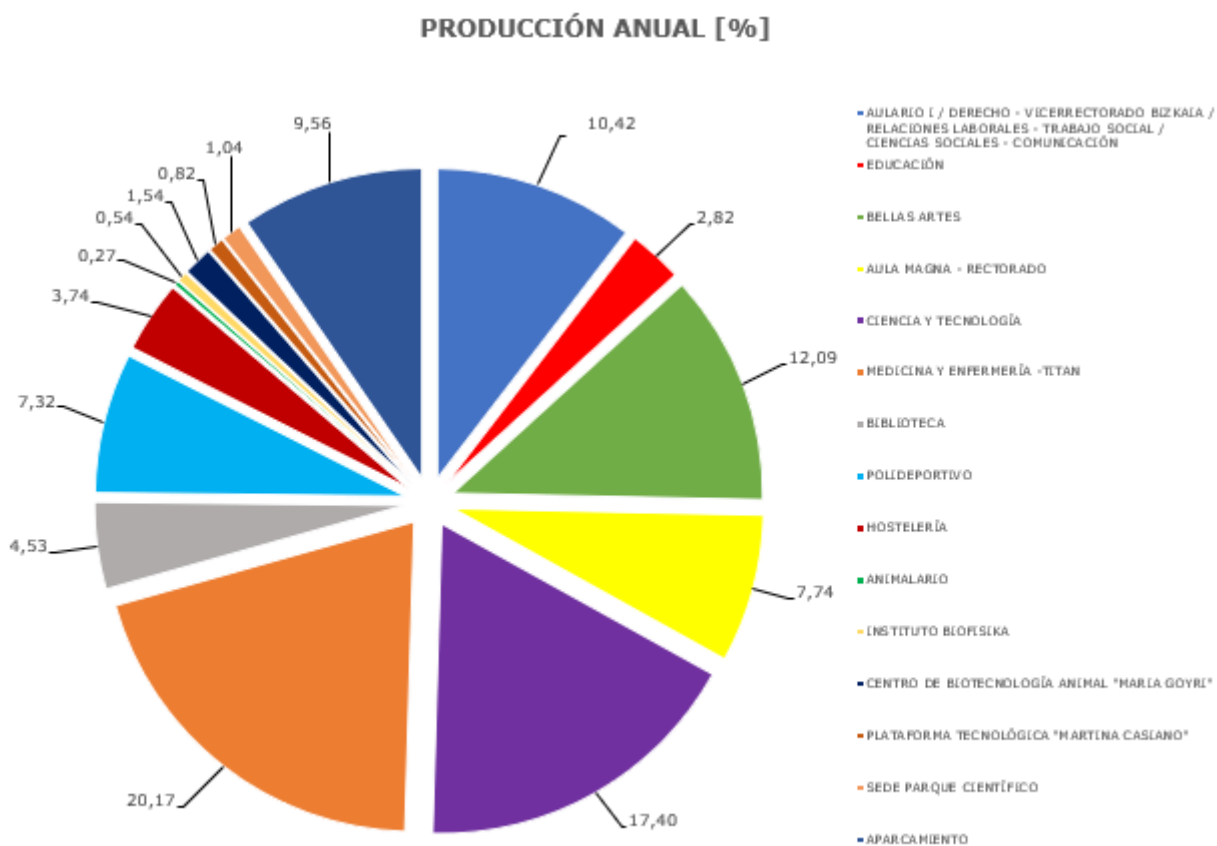


Imagen 4-1. Producción fotovoltaica anual relativa, respecto a la producción total, por zonas o facultades [%].

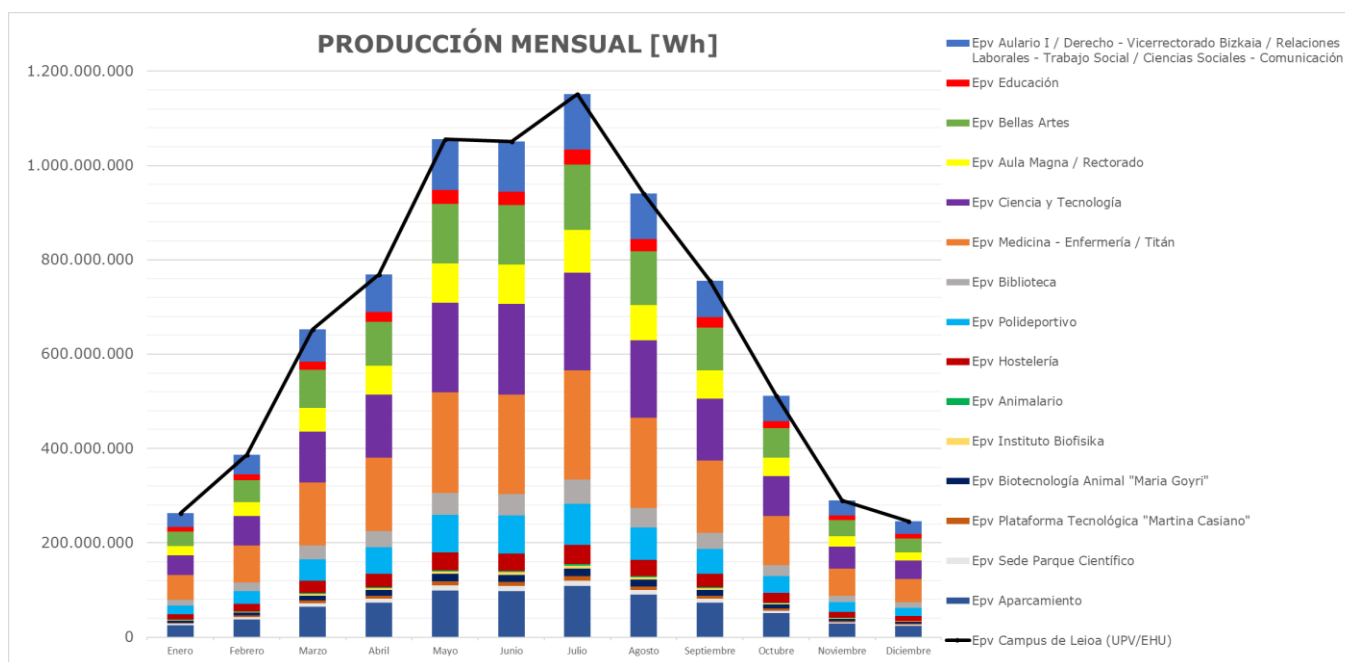


Imagen 4-2. Producción fotovoltaica mensual, por zonas o facultades [Wh]

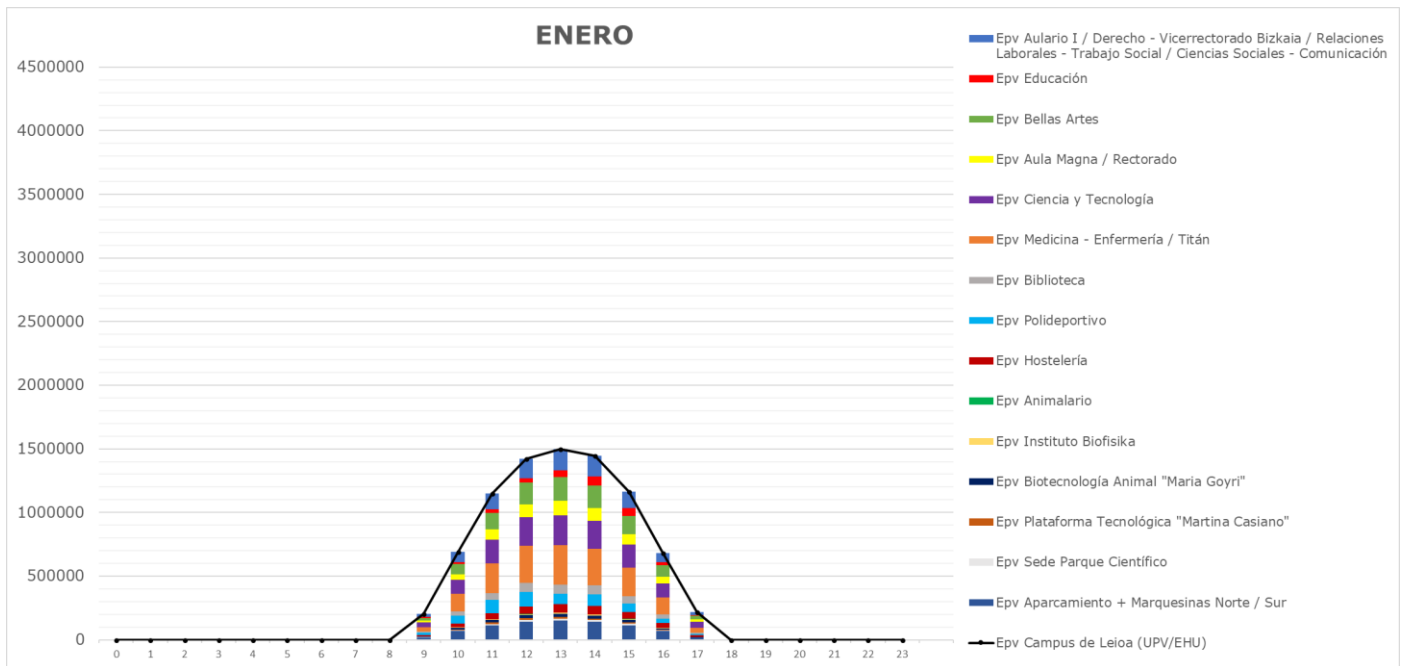


Imagen 4-3. Producción horaria para el mes de enero, por zonas o facultades [Wh].

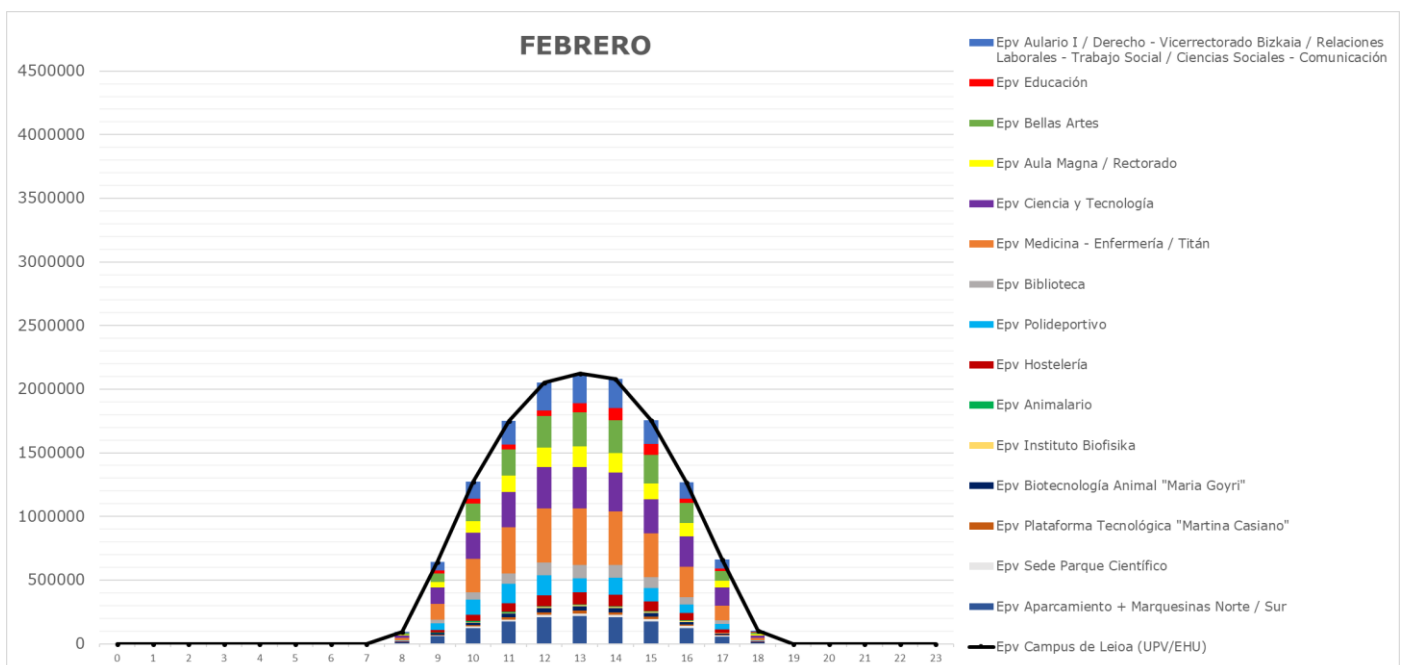


Imagen 4-4. Producción horaria para el mes de febrero, por zonas o facultades [Wh].

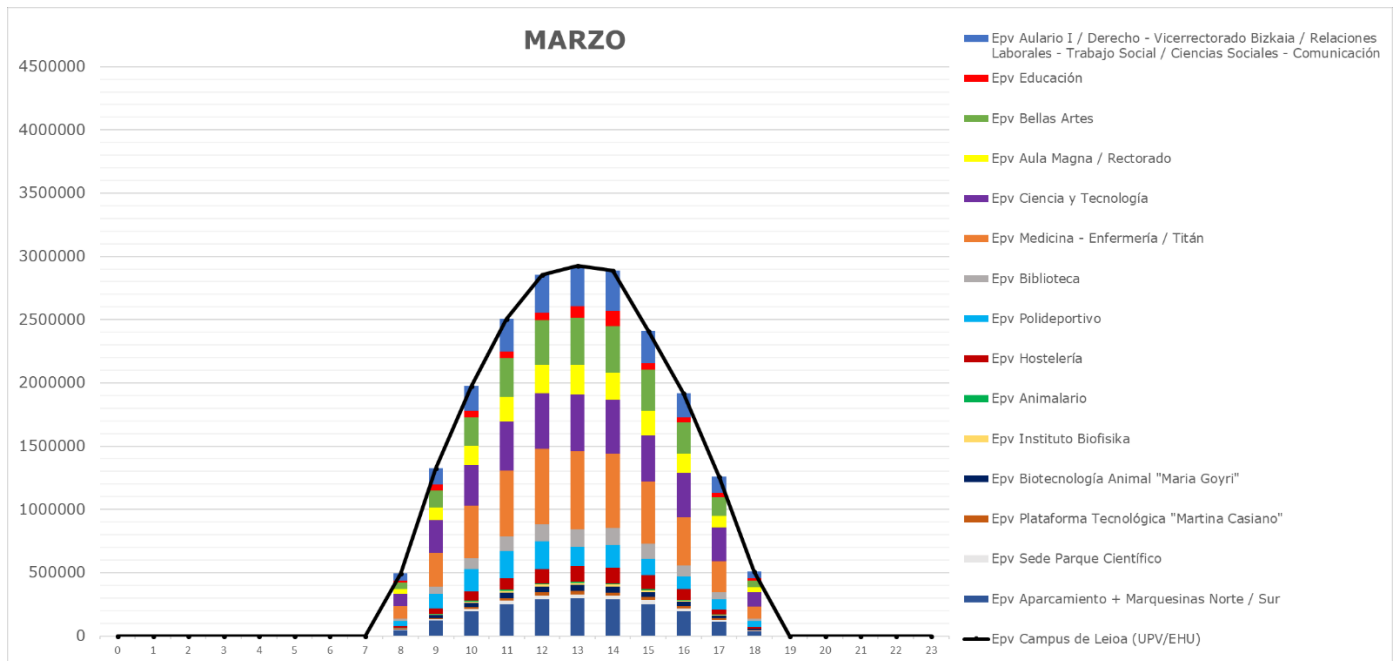


Imagen 4-5. Producción horaria para el mes de marzo, por zonas o facultades [Wh].

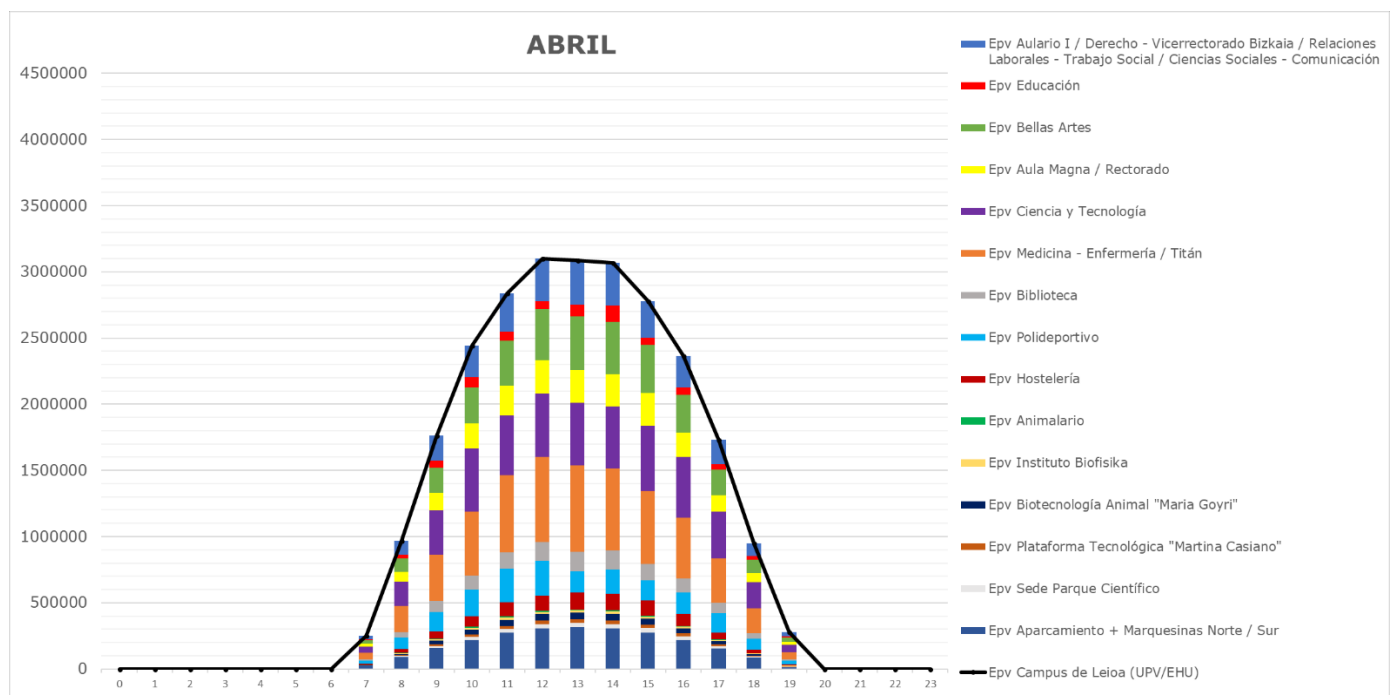


Imagen 4-6. Producción horaria para el mes de abril, por zonas o facultades [Wh].

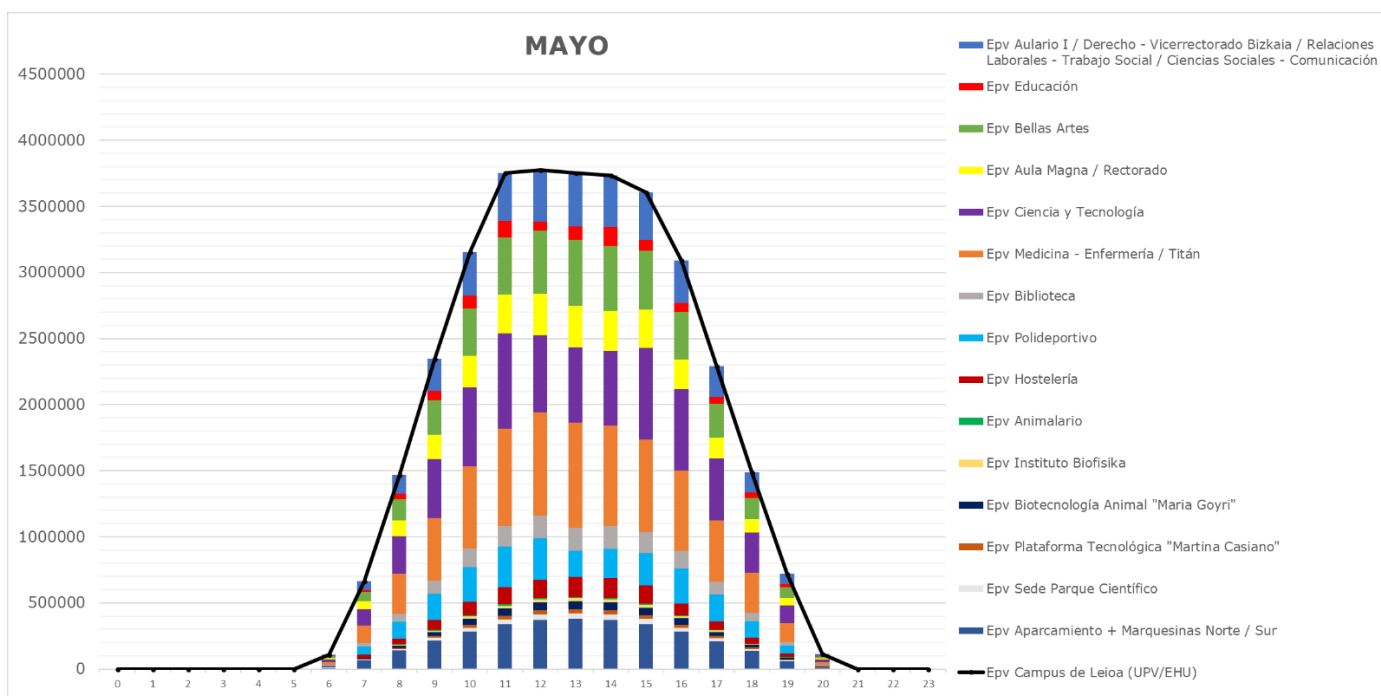


Imagen 4-7. Producción horaria para el mes de mayo, por zonas o facultades [Wh].

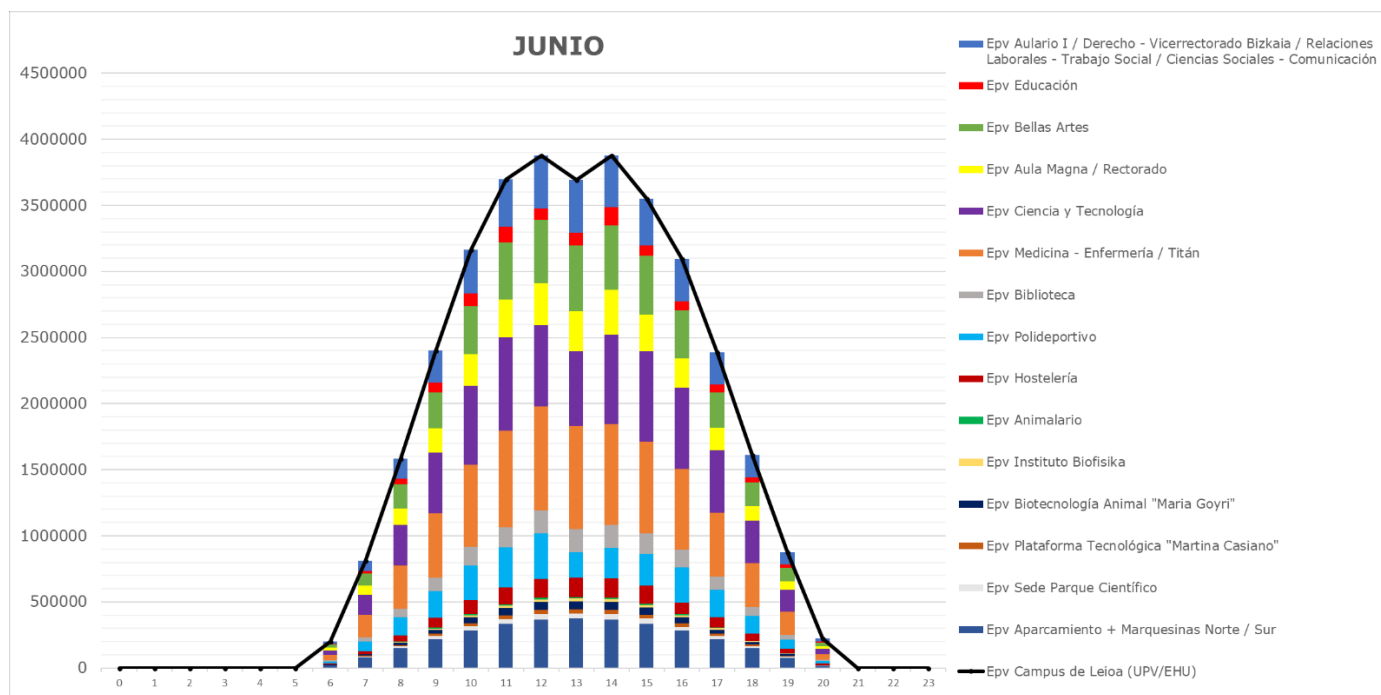


Imagen 4-8. Producción horaria para el mes de junio, por zonas o facultades [Wh].

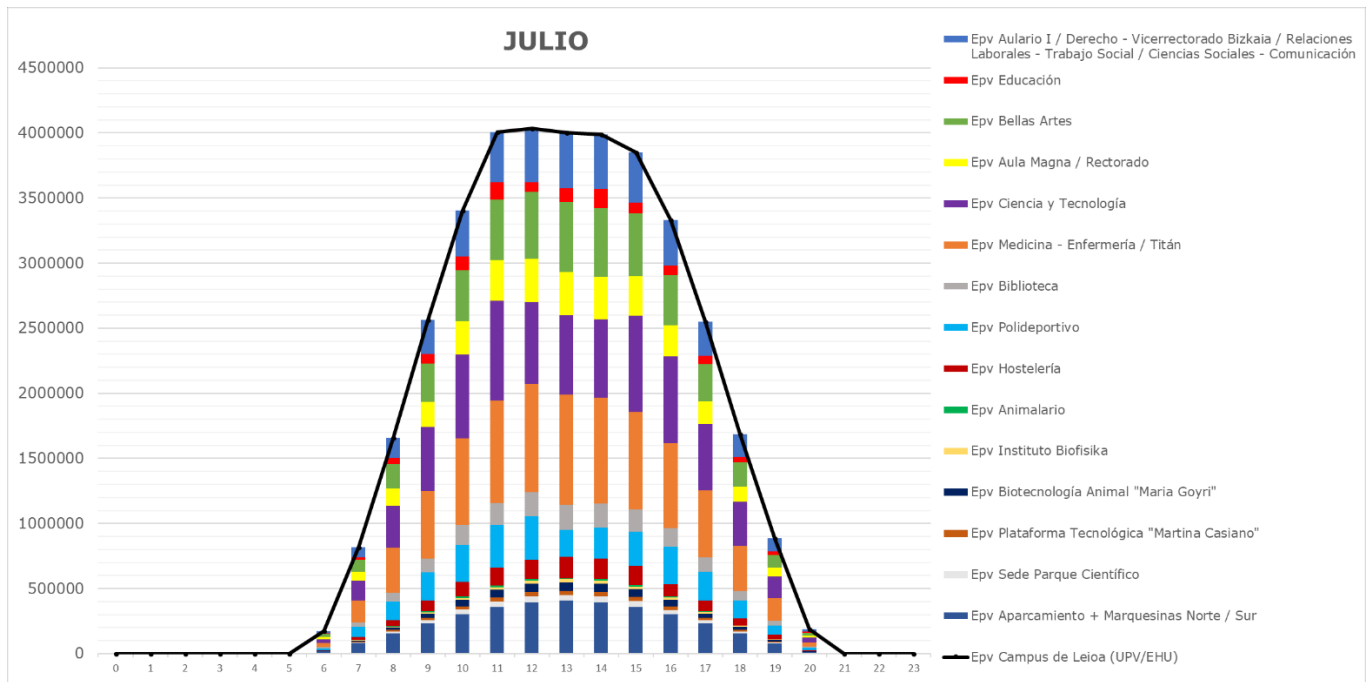


Imagen 4-9. Producción horaria para el mes de julio, por zonas o facultades [Wh].

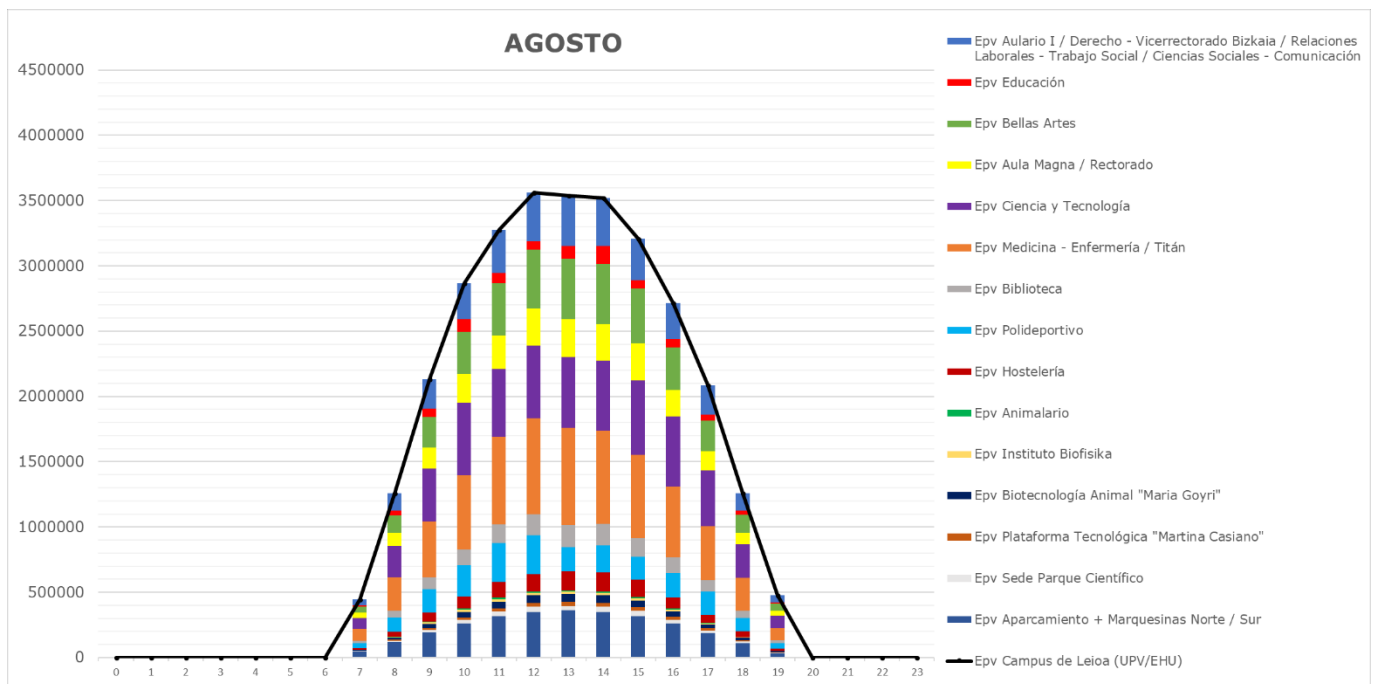


Imagen 4-10. Producción horaria para el mes de agosto, por zonas o facultades [Wh].



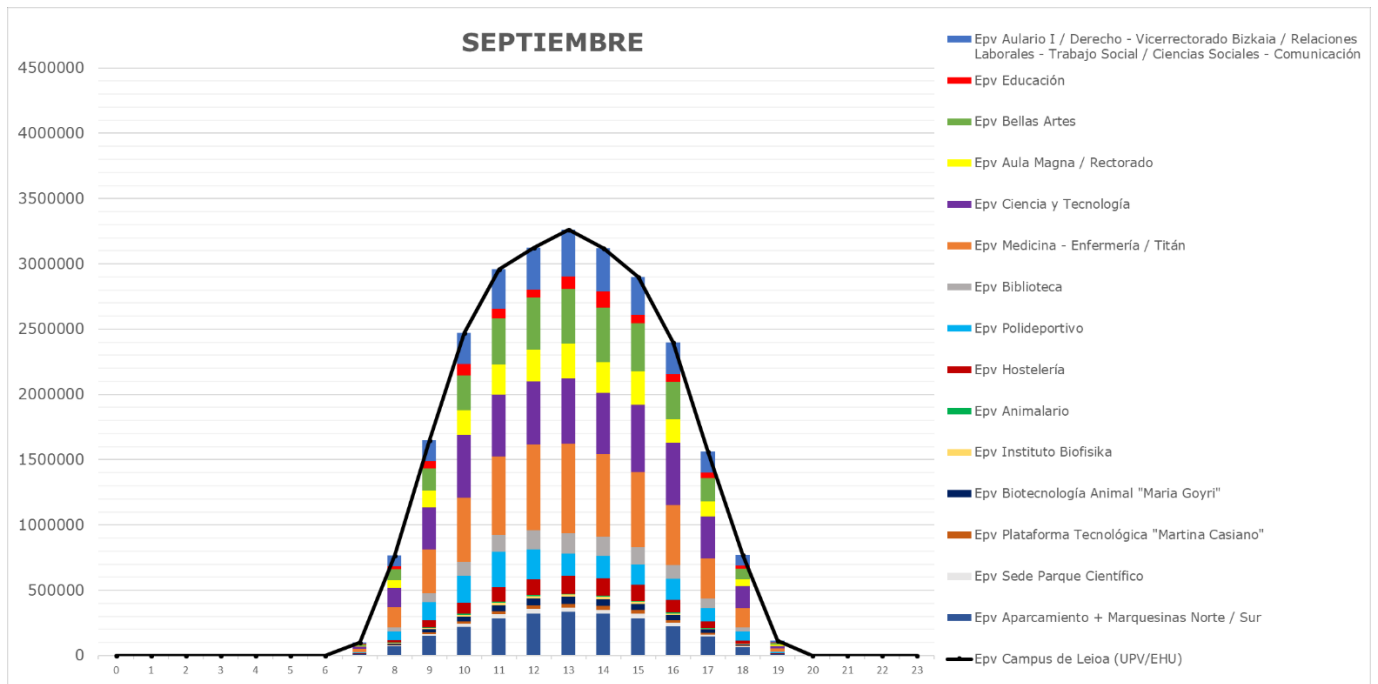


Imagen 4-11. Producción horaria para el mes de septiembre, por zonas o facultades [Wh].

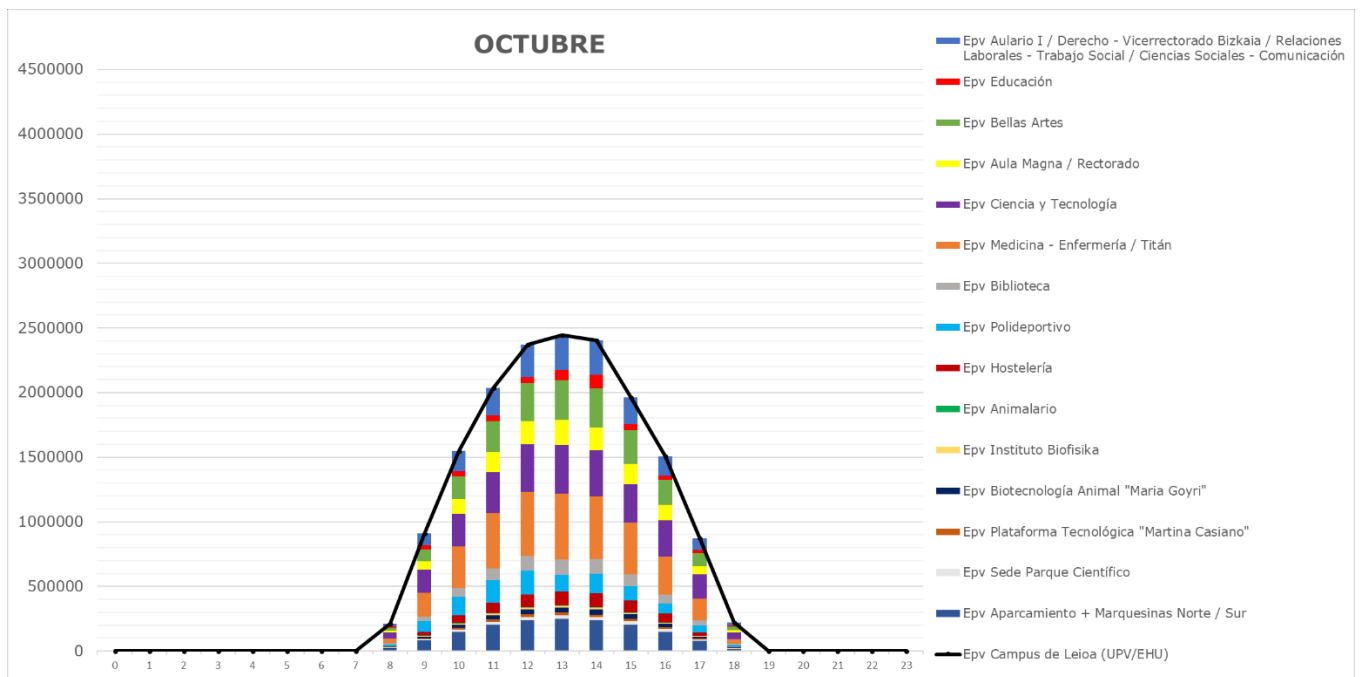


Imagen 4-12. Producción horaria para el mes de octubre, por zonas o facultades [Wh].

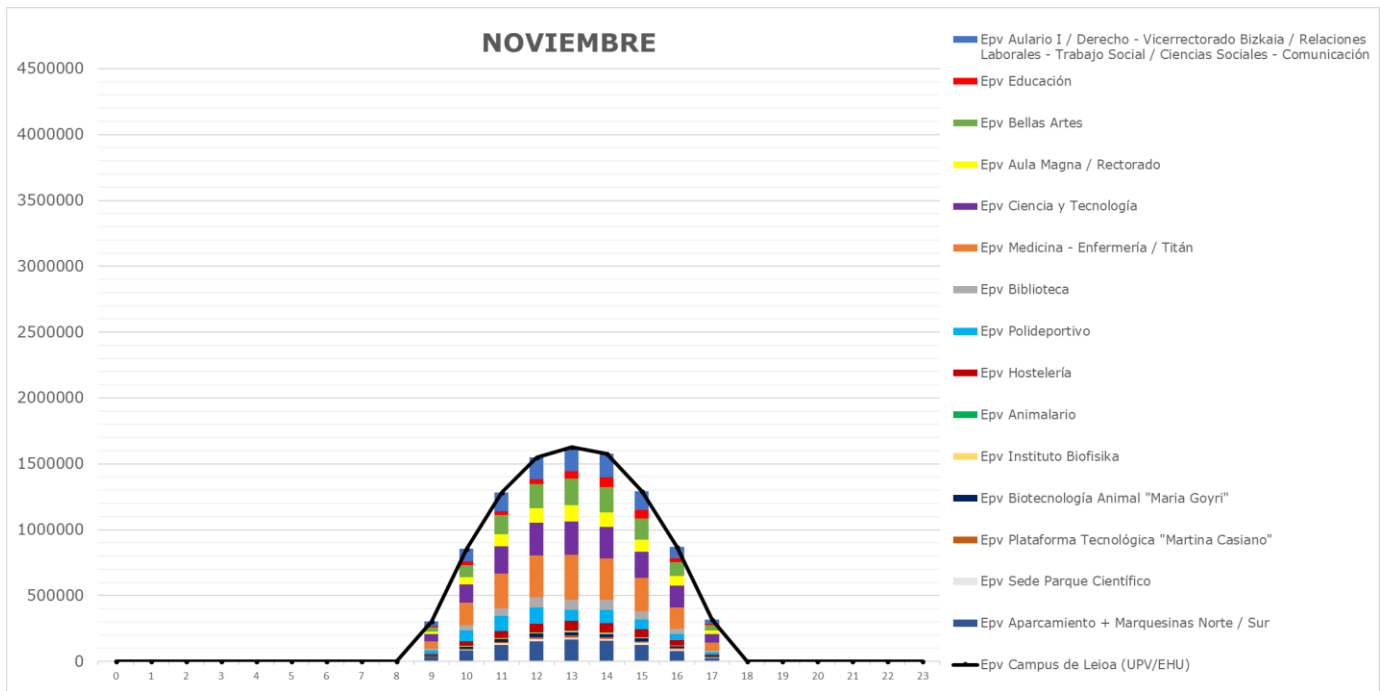


Imagen 4-13. Producción horaria para el mes de noviembre, por zonas o facultades [Wh].

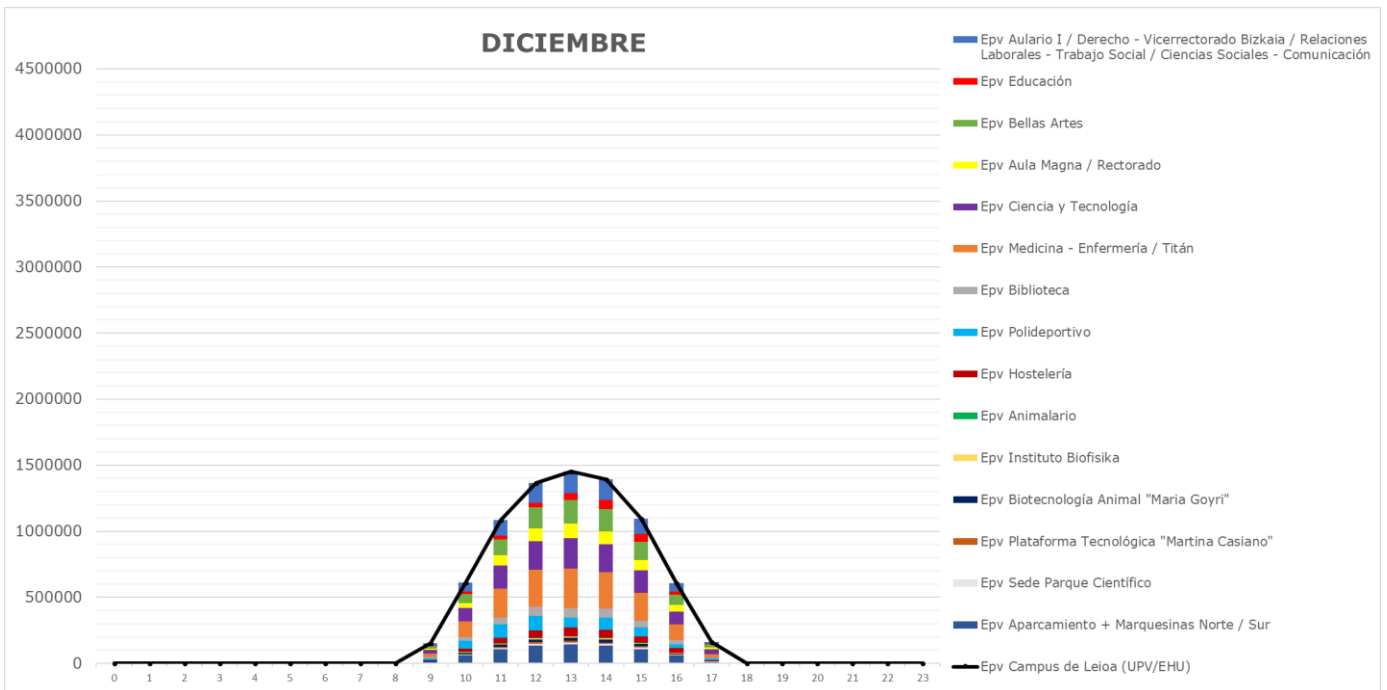


Imagen 4-14. Producción horaria para el mes de diciembre, por zonas o facultades [Wh].

## **4.2. Discusión de los resultados y conclusiones**

Comenzando la lectura de los resultados por los términos más generales, resulta positivo haber obtenido una tasa de autoabastecimiento global del 54,33% para el campus de Leioa de la UPV/EHU. Teniendo en cuenta elevado consumo eléctrico que tienen los edificios del campus, a partir de la instalación de sistemas de autoconsumo (si no antes), es necesario hacer hincapié en tomar medidas para la eficiencia energética en los edificios, tal y como se está haciendo actualmente en la Facultad de Educación de Bilbao (tema que se trata en el siguiente apartado). Estas medidas podrían incluso reducir la necesidad de inversión (y, en consecuencia, de fabricación) en instalaciones fotovoltaicas.

Como dato negativo está la baja tasa de autoabastecimiento que presentan los edificios de construcción más reciente. Estos edificios no cuentan con tanta superficie útil para albergar instalaciones fotovoltaicas como pueden tener otros edificios (por lo general, están por debajo de la media global del 54,56%). Esto se debe a la ubicación de los equipos industriales para distintos servicios del edificio (climatización, ventilación...), los cuáles se instalan en la azotea para aprovechar al máximo el espacio interior. Además, al instalar dichos equipos en la zona central de la cubierta, queda sombreada toda el área ubicada al norte. Sin embargo, como el consumo prorrateado no ha distinguido entre edificios nuevos y más antiguos, puede resultar que el consumo sea menor del calculado y, por lo tanto, la tasa de autoabastecimiento sería mayor.

En lo que respecta a los datos de rentabilidad en términos energéticos y económicos, si bien estos resultados no son negativos, podrían ser mejorables. Como este estudio se ha realizado con datos generales y siempre optando por hacer cálculos para el peor de los casos que marca la bibliografía, habría opción para que estos resultados mejorasen. Junto a esto, está la opción de centralizar lo máximo posible los puntos de instalación de equipos de conversión y regulación (reguladores de corriente continua, inversores y equipos auxiliares), para minimizar los costes.

A continuación, se realiza una breve lectura para cada facultad o zona, de manera individualizada.

### ***Grupo de edificios Aulario I / Facultad de Derecho – Vicerrectorado del Campus de Bizkaia / Facultad de Relaciones Laborales y Trabajo Social / Facultad de Ciencias Sociales y de la Comunicación***

Este grupo cuenta con algunos edificios que tienen bastante superficie útil y otros que apenas cuentan con una superficie para albergar una instalación fotovoltaica, quedando resultados de autoabastecimiento por debajo de la media para todo el conjunto. En cuanto a términos de rentabilidad, estos quedan en un término medio, no siendo excesivamente altos.

#### ***Facultad de Educación***

El potencial de esta facultad se encuentra muy por debajo de la media, ya que no cuenta con mucha superficie útil para albergar instalaciones. Esto hace obtener unos resultados de autoabastecimiento bajos en los edificios docentes. Si bien la parte norte tiene unos datos de rentabilidad mejores, la parte sur resulta más conflictiva; esto se debe a que los

píxeles ráster de la superficie inclinada donde irían instalados los paneles tienen valores cercanos a los 12º, por lo que algunas zonas las ha considerado como planas.

Las marquesinas de los aledaños presentan muy buenos resultados, ya que se ha considerado como útil toda la superficie de sus cubiertas. Los resultados en aspectos de rentabilidad también son buenos, pudiendo ser mejorables si las instalaciones se realizan de manera aislada y ajustadas para que la tasa de autoabastecimiento se acerque al 100%, sin necesidad de sobredimensionar la instalación, puesto que siendo cubiertas de un tamaño tan reducido, su aporte de energía no resulta muy alto para el conjunto, pudiendo evitar así la inversión en equipos.

### ***Facultad de Bellas Artes***

Este edificio, a simple vista, no resulta el más óptimo para albergar una instalación fotovoltaica, debido a las inclinaciones de su cubierta. Sin embargo, pensando en la posibilidad de poner los soportes adecuados, ha resultado tener un gran potencial fotovoltaico, hasta el punto de superar con creces el autoconsumo (tasa de autoabastecimiento de 127,27%). Si la idea es hacer una red de sistemas de generación distribuida, este edificio puede inyectar la energía sobrante a la red para que sea utilizada en otros puntos de consumo. Los datos de rentabilidad se mantienen en valores medios, pudiendo justificar algún valor alto con el elevado potencial de esta cubierta.

Convendría realizar un estudio de detalle de este potencial, puesto que al sur de este edificio se encuentra una zona arbolada que puede disminuir el potencial de energía solar.

### ***Grupo de edificios Aula Magna / Rectorado***

Este grupo de edificios cuenta con un potencial fotovoltaico por encima de la media, ya que su área aprovechable también está por encima de la media. Sin embargo, los datos de rentabilidad en términos energéticos y económicos también son más elevados que la media, por lo que convendría realizar un estudio de detalle para estas cubiertas. Estos resultados podrían mejorar realizando la instalación de equipos de conversión y regulación de manera centralizada; este grupo de edificios no representaría ningún problema para ello, puesto que se encuentra en la zona central del campus.

### ***Facultad de Ciencia y Tecnología***

En este grupo de edificios el área aprovechable está por debajo de la media, por lo que el potencial también ha resultado estar por debajo de la media. Su tasa de autoabastecimiento se encuentra por debajo de la media, aunque en realidad sería superior a la de los resultados obtenidos, puesto que esta facultad ya cuenta con una instalación fotovoltaica anterior. La rentabilidad en términos energéticos y económicos también da resultados ligeramente elevados; sin embargo, estos no resultan ser malos.

Al tratarse de uno de los edificios más antiguos del campus, los resultados podrían mejorar si se aplican medidas para el ahorro energético.

Convendría realizar un estudio de detalle de este potencial, puesto que en zonas verdes aledañas al edificio se encuentran zonas arboladas que pueden disminuir el potencial de energía solar.

### **Grupo de edificios Facultad de Medicina y Enfermería / Titán**

Aunque sea un edificio similar al de la Facultad de Ciencia y Tecnología, se han obtenido mejores resultados en este caso, empezando por la tasa de autoabastecimiento, la cuál está por encima de la media (se alcanza un 65%). En este caso, el área aprovechable también es un poco más elevado que la media. En lo que respecta a la rentabilidad en términos energéticos y económicos, se han obtenido mejores resultados que en otros casos, siendo estos valores relativamente normales.

Convendría realizar un estudio de detalle de este potencial, puesto que en zonas verdes aledañas al edificio se encuentran zonas arboladas que pueden disminuir el potencial de energía solar.

### **Biblioteca Central**

Pese a tener un área aprovechable muy superior a la media, este edificio no obtiene grandes resultados en términos de autoabastecimiento energético, puesto que al tener varias alturas, el consumo prorrateado que se ha calculado es elevado. Estos resultados podrían mejorar teniendo en cuenta que muchas estancias pueden permanecer vacías, ya que aquí no se imparten tantas clases como en otros sitios.

Respecto a los resultados de rentabilidad energética y económica tienen unos valores dentro de la media, por lo que la instalación no sería un despropósito, pese a tener una tasa de autoabastecimiento baja.

### **Zona del Polideportivo**

Pese a ser una zona muy heterogénea debido a que los edificios son muy distintos entre sí y se encuentran separados, se obtienen muy buenos resultados de autoabastecimiento, en todos los casos superando el 100%; en todos los casos, el área aprovechable está por encima de la media. Sin embargo, en términos de rentabilidad energética, hay ciertos edificios que no muestran tan buenos resultados, aunque esto no resulta tan malo si se tienen en cuenta los buenos resultados de generación. En cuanto a la rentabilidad económica, los resultados se encuentran alrededor de la media.

En el caso de algunos pequeños edificios, es conveniente realizar un análisis para determinar si es conveniente hacer una instalación sobredimensionada o ajustarla a las necesidades, para reducir los costes de inversión.

Convendría realizar un estudio de detalle de este potencial, puesto que en las zonas verdes aledañas al edificio se encuentran zonas arboladas que pueden disminuir el potencial de energía solar de manera considerable.



**IFP – Escuela de Hostelería**

Este edificio muestra uno de los mejores resultados, pues el 80,59% del área de su cubierta es aprovechable y tiene un 146,46% de tasa de autoabastecimiento (sin contar la aportación de la actual instalación fotovoltaica). Además, los resultados de rentabilidad en términos energéticos y económicos rondan los valores medios. Teniendo en cuenta que este es un edificio con un consumo alto (pues cuenta con cocinas y un comedor), los resultados son muy positivos.

**Animalario**

Se trata de un pequeño edificio adosado a la Facultad de Medicina y Enfermería, el cuál tiene un bajo porcentaje de área aprovechable y, por lo tanto, su tasa de autoabastecimiento es del 50,56%. En lo que respecta a la rentabilidad en términos económicos y energéticos, los valores calculados son relativamente altos, por lo que es dudoso que pueda albergar una instalación fotovoltaica de condiciones óptimas.

Convendría realizar un estudio de detalle de este potencial, puesto que en las zonas verdes aledañas al edificio se encuentran zonas arboladas que pueden disminuir el potencial de energía solar de manera considerable.

**Instituto Biofisika**

Este edificio de nueva construcción se encuentra en el Parque Científico. Los resultados obtenidos no son tan buenos en comparación con la media, debido a su bajo porcentaje de área aprovechable (34,52%) y, en consecuencia, por su baja tasa de autoabastecimiento (19,15%). Esta tasa puede que en realidad sea más alta, puesto que al tratarse de un edificio de nueva construcción, los consumos se pueden dar de una manera más eficiente. Respecto a los valores de rentabilidad en términos energéticos y económicos son más elevados que los valores medios. Estos podrían mejorar planteando una centralización de equipos de conversión y regulación.

**Centro de Biotecnología Animal "María Goyri"**

Este edificio de nueva construcción se encuentra en el Parque Científico. Se trata de uno de los edificios nuevos con mayor área aprovechable (42,68%), aunque la tasa de autoabastecimiento no resulte ser muy alta (32,05%). Esta tasa puede que en realidad sea más alta, puesto que al tratarse de un edificio de nueva construcción, los consumos se pueden dar de una manera más eficiente. En lo que respecta a los resultados de rentabilidad en términos energéticos y económicos, estos se encuentran en valores que rondan la media. Estos podrían mejorar planteando una centralización de equipos de conversión y regulación.

### **Plataforma Tecnológica "Martina Casiano"**

Este edificio de nueva construcción se encuentra en el Parque Científico. Los resultados obtenidos no son tan buenos en comparación con la media, debido a su bajo porcentaje de área aprovechable (18,58%) y, en consecuencia, por su baja tasa de autoabastecimiento (16,25%). Esta tasa puede que en realidad sea más alta, puesto que al tratarse de un edificio de nueva construcción, los consumos se pueden dar de una manera más eficiente. Respecto a los valores de rentabilidad en términos energéticos y económicos son más elevados que los valores medios. Estos podrían mejorar planteando una centralización de equipos de conversión y regulación.

### **Edificio Sede del Parque Científico**

Este edificio de nueva construcción se encuentra en el Parque Científico. Se trata de uno de los edificios nuevos con mayor área aprovechable (40,52%), aunque la tasa de autoabastecimiento no resulte ser muy alta (26,99%). Esta tasa puede que en realidad sea más alta, puesto que al tratarse de un edificio de nueva construcción, los consumos se pueden dar de una manera más eficiente. En lo que respecta a los resultados de rentabilidad en términos energéticos y económicos, estos son más altos que los valores que rondan la media. Estos podrían mejorar planteando una centralización de equipos de conversión y regulación.

### **Aparcamiento cubierto**

Por último, se encuentra el entorno del aparcamiento cubierto. En esta zona, se puede aprovechar prácticamente toda el área de las cubiertas, aunque en el caso del aparcamiento sería necesario instalar una cubierta para los paneles, ya que el aparcamiento del piso superior se encuentra descubierto. Según los cálculos con el consumo prorrateado, la tasa de autoabastecimiento sería del 94,93%, aunque tratándose de un edificio con poca iluminación, esta fácilmente podría superar el 100%. Además, la energía generada podría utilizarse para la recarga de vehículos eléctricos. Los resultados de rentabilidad en términos energéticos y económicos también son positivos, manteniéndose en valores medios.

Las marquesinas de los aledaños presentan muy buenos resultados, ya que se ha considerado como útil toda la superficie de sus cubiertas. Los resultados en aspectos de rentabilidad no son tan buenos, pero se pueden mejorar si las instalaciones se realizan de manera aislada y ajustadas para que la tasa de autoabastecimiento se acerque al 100%, sin necesidad de sobredimensionar la instalación, puesto que siendo cubiertas de un tamaño tan reducido, su aporte de energía no resulta muy alto para el conjunto, pudiendo evitar así la inversión en equipos.

## **5. ANÁLISIS DE HIBRIDACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA Y EÓLICA**

### **5.1. Introducción**

El proyecto EHUKhi pretende evaluar el potencial físico, técnico y económico de la generación eléctrica renovable mediante paneles fotovoltaicos integrados en los edificios de los Campus de la UPV/EHU [13]. Sin embargo, aunque otras tecnologías de energías renovables no figuren en este objetivo, en este proyecto cabe la posibilidad de hacer un estudio para su implantación.

Como se ha explicado anteriormente, este TFM pretende crear sinergias con en el proyecto CBL "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16], coordinado por José Ramón Díez. Actualmente, este proyecto cuenta con la colaboración de la empresa Roseo Eólica Urbana [17], la cuál está realizando mediciones de diversos parámetros del viento incidente mediante sensores instalados en la cornisa de dicha Facultad. Con los datos que obtengan en un futuro, se hará una valoración de la posibilidad para albergar en el edificio una instalación de turbinas eólicas para la generación de electricidad.

Se plantea en el presente trabajo realizar un estudio para analizar el potencial de aprovechamiento de energía eólica mediante las turbinas de Roseo Eólica Urbana para su hibridación con la fotovoltaica del proyecto realizado. Para ello, se ha procedido a barajar las posibilidades que hay actualmente de obtener datos fiables para pronosticar el potencial eólico en el entorno urbano. Además, al plantearse la posibilidad de desarrollar una metodología de trabajo mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS), se ha repasado la bibliografía existente en el campo del análisis del potencial eólico mediante GIS.

El objetivo principal de este análisis de hibridación es la obtención de resultados concluyentes para el estudio del potencial. Para ello, se han obtenido los datos de consumo de la Facultad de Educación de Bilbao, de la mano de los coordinadores del proyecto CBL "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16]. La colaboración de Roseo Eólica Urbana [17] también queda patente en el trabajo, ofreciendo sus recursos. Sin embargo, a la hora de trabajar se han encontrado muchas limitaciones para alcanzar dicho objetivo, por lo que se deja la puerta abierta a desarrollar el proyecto de una manera más extensa en el futuro.

### **5.2. Marco teórico**

#### **5.2.1. Marco teórico de ROSEO-BIWT y la medición de parámetros del viento**

Las instalaciones eólicas urbanas, conocidas también por el término Building-Integrated Wind Turbines – BIWT (Turbinas Eólicas Integradas en la Edificación), son una tecnología poco implantada actualmente. En términos generales, el mercado de las turbinas minieólicas actualmente se encuentra en crecimiento, aunque el sector de turbinas minieólicas destinadas a la instalación está creciendo a un ritmo más bajo [61]. De acuerdo con la World Wind Energy Association (WWEA) [62], la instalación de pequeños aerogeneradores aumentará alrededor de un 12% anual en el período 2015-2020.

El objetivo principal de estas turbinas es el de maximizar el nivel de eficiencia energética y reducir el uso de energía primaria derivada de recursos fósiles para que la demanda de energía requerida pueda ser satisfecha por fuentes renovables [61]. En este sentido, pues, la tecnología resulta idónea para edificios destinados a la educación, donde el gasto diario de electricidad es bastante alto (como se mostrará a continuación). Sin embargo, algunos desafíos tecnológicos, como las vibraciones, los niveles de ruido generados y la integración estética y arquitectónica, todavía están por resolver [61], siendo esto algo importante si va a estar destinado a un lugar de trabajo y aprendizaje.

En este sentido, Roseo Eólica Urbana [17] apuesta por la instalación de turbinas en las cornisas de edificios. La razón de ubicarlas en ese emplazamiento radica en que la mayoría de los estudios que han analizado el comportamiento de las corrientes de aire alrededor de los edificios coinciden en que la arista superior de la cara de barlovento de un edificio tiene un gran potencial de energía eólica. Esto se debe a que el viento tiene que rodear un objeto. El efecto es aún más intenso cuando el edificio es más alto y cuando la dirección del viento es perpendicular a la fachada del edificio [61]. Por ejemplo, en un edificio de cinco pisos, la velocidad del viento aumenta 1,2 veces en el borde de barlovento [63]. Estos resultados se han obtenido gracias a simulaciones CFD.

La turbina diseñada por Roseo Eólica Urbana consiste en un aerogenerador Savonius y unos paneles guía para acelerar el viento horizontal común, junto a la corriente de aire vertical ascendente en la pared. Este efecto de borde mejora el rendimiento de aerogenerador, resultando también beneficiosa su integración arquitectónica [61]. La turbina eólica Savonius es un dispositivo basado en el empuje o *drag* aerodinámico, a diferencia de la mayoría de las turbinas, que se basan en la sustentación o *lift*. Este aspecto en particular permite que haya bajos niveles de ruido y pocas vibraciones, factores importantes a la hora de hacer instalaciones en la edificación [64, 65].

El diseño de la turbina eólica de Roseo Eólica Urbana, ROSEO-BIWT, se muestra en la Imagen 5-1 [61]:



**Imagen 5-1. Diseño de ROSEO-BIWT [61]**

Además del diseño de la turbina eólica, Roseo Eólica Urbana también se encarga de la estimación del potencial eólico; evaluar con precisión el recurso eólico en el entorno urbano quizás el elemento más desafiante de un proyecto de Turbinas Eólicas en el Entorno de la Edificación (BEWT) [66]. Si bien existen tecnologías y métodos desarrollados muy sofisticados, ellos han desarrollado un método empírico para la estimación del potencial de energía eólica en edificios con un coste computacional bajo [61], si bien necesitan instalar físicamente sensores con anemómetros *in situ*. Para ello, utilizan una metodología llamada

“Quantile-Mapping Calibration” (Calibración de Mapeo Cuantitativo), también conocida como “Bias Correction” (Corrección de Sesgo). Explicado de manera resumida, este método de calibración o corrección de sesgo es fundamentalmente estadístico, y la idea es hacer coincidir los valores con el mismo cuantil en dos distribuciones de probabilidad empírica: la distribución a calibrar (con datos de ERA5), y la que es la base para la calibración (con datos de un anemómetro) [61]. Se explican estas herramientas a continuación, de una manera más detallada.



**Imagen 5-2. Arista de la Facultad de Educación de Bilbao en la que Roseo ha instalado dos anemómetros. [17]**

ERA5 es una potente herramienta para el re-análisis atmosférico global que se actualiza en tiempo real [61]. ERA5, que es el re-análisis atmosférico más reciente de la ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast), cubre la segunda mitad del siglo XX y este siglo [67]. Roseo, para sus estudios y para la calibración, utilizan más 40 años de datos (desde 1979 en adelante), porque el re-análisis completo no está todavía disponible. ERA5 ofrece una serie de puntos en los que se puede obtener información climatológica de todo tipo, aunque en su trabajo utilizan los datos de velocidad y dirección del viento a 10 metros de altura.

La correlación entre ERA5 y los anemómetros se computan dentro de su período de intersección (período en el que los anemómetros toman datos). Estos datos incluyen variables atmosféricas y oceánicas, y son una herramienta adecuada para estimar el potencial de energía eólica [68] *offshore* y *onshore*. Roseo [17] en sus estudios utiliza datos horarios de ERA5 con una resolución de  $0,3^\circ \times 0,3^\circ$ . En el caso de los anemómetros, toman datos de las características del viento cada 7 minutos, aunque como ERA5 utiliza datos horarios, en el tratamiento de estos datos se hace con una resolución de 1 hora también. Los anemómetros instalados en la Facultad de Educación de Bilbao está previsto que tomen datos durante un año al menos.

Aunque ERA5 es muy potente para este cometido, utiliza un mallado de puntos de  $10 \times 10$  km, así que en entornos urbanos pierde precisión, debido a la topografía compleja del lugar. Es por ello que hacer la calibración de datos resulta muy importante a la hora de estimar el potencial eólico en el entorno urbano, pues el rendimiento de un proyecto BEWT a menudo está sobreestimado en comparación con la producción real [66].



Si se repara a la Imagen 5-3, se muestran los puntos del mallado de ERA5 en azul junto a la ubicación de la Facultad de Educación de Bilbao en rojo:

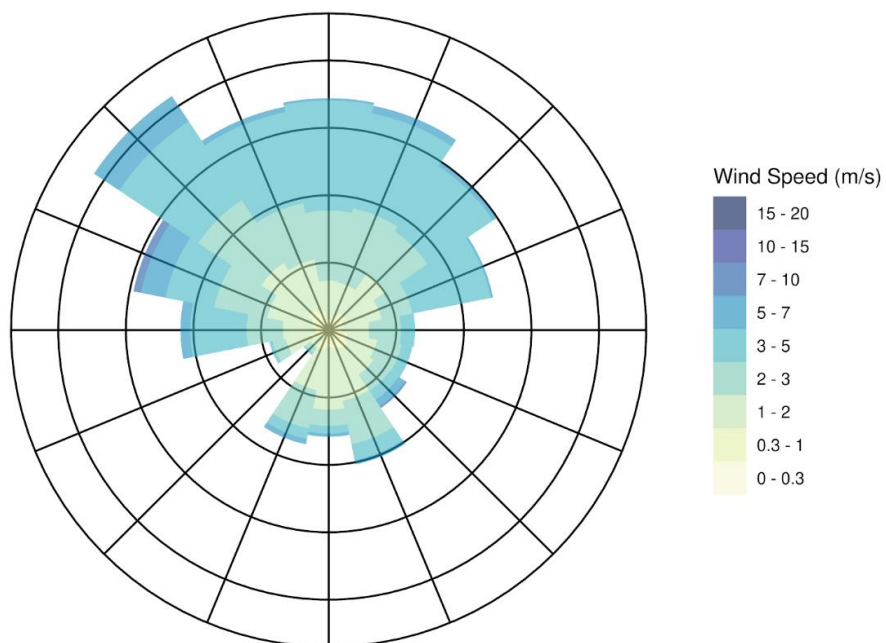


**Imagen 5-3. Mallado de ERA5 (en azul) y ubicación de la Facultad de Educación de Bilbao (en rojo). [17]**

El punto más cercano del mallado de ERA5 se encuentra a 4,25 km, en un entorno urbano totalmente distinto al del campus de Leioa de la UPV/EHU. Los otros 3 puntos que rodean al de la Facultad se encuentran a 7,01 km, 7,74 km y 9,54 km respectivamente, también se encuentran en entornos muy distintos entre sí: uno se encuentra en el mar, otro en una zona de monte y el tercero en el Valle de Asua o Txorierra (donde se encuentra el aeropuerto de Loiu). Siendo muy distinto el viento incidente en cada lugar, la estimación que se realice en la Facultad también puede verse alterada. Esto queda patente en las rosas de los vientos que muestran las Imágenes 5-4, 5-5, 5-6 y 5-7. Las dos primeras son las obtenidas mediante la herramienta de re-análisis ERA5, y las otras dos se han obtenido a partir de los parámetros medidos por los anemómetros:



**Imagen 5-4. Rosa de los vientos obtenida mediante el re-análisis atmosférico ERA5 [17]**

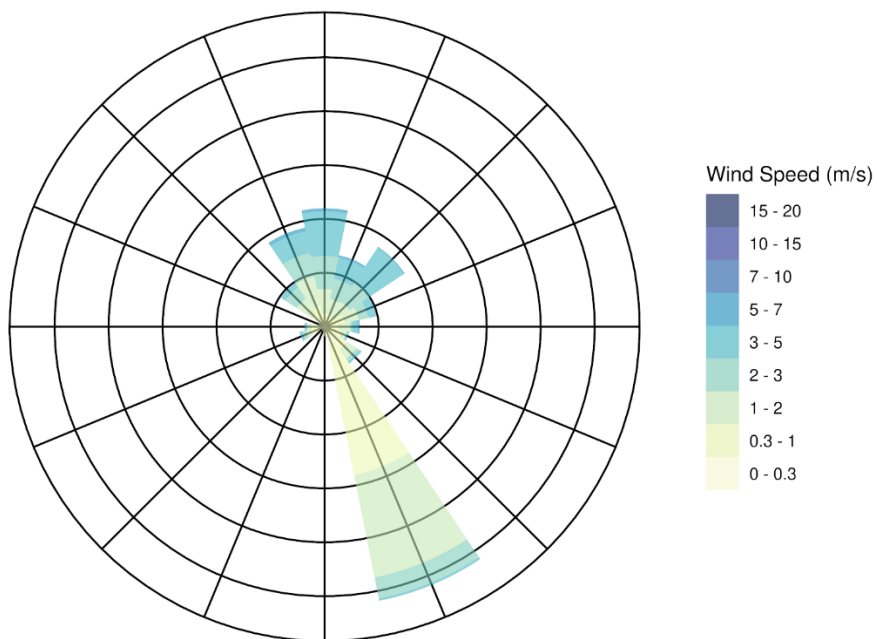


**Imagen 5-5. Rosa de los vientos con sus respectivas velocidades, obtenida mediante el re-análisis atmosférico ERA5 [17]**





**Imagen 5-6. Rosa de los vientos obtenida mediante los datos medidos por los anemómetros [17]**



**Imagen 5-7. Rosa de los vientos con sus respectivas velocidades, obtenida mediante los datos medidos por los anemómetros [17]**

Se observa que en la rosa de los vientos obtenida con ERA5 los vientos más frecuentes son los que inciden por el norte, destacando la incidencia por el noroeste. De entre estos vientos, los más frecuentes, con gran diferencia, son los del intervalo de velocidad 3-5 m/s, si bien hay instantes en los que la velocidad del viento es de 5-7 m/s; y muy raramente se dan vientos de 7-10 m/s. Según estos datos, las mejores aristas para ubicar las turbinas serían la norte (trasera) y la este (lateral izquierda).

En la rosa de los vientos obtenida mediante los datos medidos por los anemómetros, los vientos más frecuentes son, con mucha diferencia, los que inciden por el sur-sureste. De entre estos vientos, los más frecuentes son los de los intervalos de velocidad 0,3-1 m/s y 1-2 m/s, si bien hay instantes en los que la velocidad del viento es de 2-3 m/s. Según estos datos, la mejor arista para ubicar las turbinas sería la zona a la derecha de la fachada sur (delantera) y la oeste (lateral derecha). Sin embargo, es necesario comentar que estos datos todavía no tienen una alta fiabilidad, debido a que las mediciones solo llevan haciéndose desde marzo (6 meses) y desde Roseo Eólica Urbana [17] plantean hacer la toma de datos mínimo durante un año.

Se concluye, pues, recalcando la necesidad de realizar una calibración de mapeo cuantitativo para poder obtener datos fiables a la hora de analizar el potencial de energía eólica en el entorno urbano, donde las características del viento son muy distintas a las de entornos abiertos. Esto ha quedado patente en la comparación entre las dos rosas del viento, obtenidas con herramientas distintas, una consistente en un re-análisis atmosférico y otra consistente en dos anemómetros. En estos momentos, Roseo Eólica Urbana [17] se encuentra investigando la precisión que tienen los resultados de la calibración.

### **5.2.2. Marco teórico del análisis del potencial eólico o del ambiente eólico con el uso de GIS y metodologías derivadas**

Los estudios realizados utilizando los Sistemas de Información Geográfica (GIS) para estimar el potencial de energía eólica o analizar el ambiente eólico son relativamente pocos, y el número desciende en lo que respecta al análisis del potencial eólico en el entorno urbano. Esto se debe, en parte, a la baja implantación de la tecnología de eólica urbana y, en parte también, a la falta de datos respecto a las características del viento en entornos urbanos. Para solucionar esto, a veces se hace uso de simulaciones CFD (Computational Fluid Dynamics), una tecnología muy utilizada para la simulación en eólica.

En este apartado se procede a exponer diferentes estudios e investigaciones que se han realizado utilizando GIS para analizar el potencial y el ambiente eólico.

En 2014, Yin Jie et al. [69] analizaron la correlación entre la morfología urbana y el ambiente eólico en una ciudad digital utilizando GIS y simulaciones CFD. El análisis se debe a que se preveía que el 61% de la población china viviese en ciudades en 2020, incrementando a un 69% en 2030. Conociendo el deterioro que sufría el entorno urbano, decidieron explorar la relación entre la morfología urbana y el ambiente eólico urbano. A escala urbana, utilizando un análisis espacial basado en GIS y calculando la densidad de área frontal (FAD) y la longitud de rugosidad, la densidad del edificio y la densidad de volumen del edificio (BVD) pueden ayudar a mejorar el ambiente eólico urbano. A escala de barrios residenciales, a través de simulaciones CFD, se obtiene que la densidad del edificio tiene una gran relación con la velocidad media del viento a nivel peatonal; sin embargo, la relación del área del suelo, la altura media del edificio y la velocidad media del viento muestran una correlación débil. Si bien este estudio no tiene mucha relación con el análisis del potencial eólico, marca una metodología para el estudio de la incidencia del viento.

En 2015, Watson y Hudson [70] realizaron un análisis de idoneidad para parques eólicos y solares a una escala regional, utilizando una evaluación multicriterio asistida por GIS. El método que utilizaron se puede utilizar para ayudar a la selección adecuada de lugares para proyectos de energía renovable onshore en grandes áreas geográficas, ayudando a minimizar sus impactos ambientales. Si bien no se trata de un análisis del entorno urbano, en este caso sí que se utiliza GIS para evaluar el potencial eólico.

En 2018, Biao Wang et al. [71] realizaron una evaluación del potencial eólico con morfología urbana, haciendo un estudio en Beijing. Con el incremento de las nuevas tecnologías de turbinas eólicas y las técnicas de CFD, el viento urbano ha empezado a atraer la atención del público [...]. Por ello, su trabajo trató de estimar la energía eólica dentro del ángulo de la morfología urbana. Compararon siete tejidos urbanos diferentes, analizados con varios parámetros relevantes de morfología urbana. Realizaron simulaciones numéricas en CFD para visualizar el resultado de la energía eólica de cada tejido urbano. Los resultados mostraron que las formas con una ratio de área de suelo más bajo tienen la mayor densidad de potencial eólico, y las formas con mayor porosidad tienen la mayor densidad de potencial por unidad de área de cubierta. En este trabajo se analizaron diversas metodologías, entre las cuales se encuentra el uso de GIS.

En agosto de 2018, Díaz-Cuevas et al. [72] desarrollaron un mapa de potencial de energía eólica a escala regional usando GIS y métodos de decisión multicriterio (MCDM) para Cádiz. Su trabajo se centró en el análisis haciendo un uso combinado de GIS con MCDM al elaborar un modelo de apoyo a la toma de decisiones con el fin de determinar los emplazamientos más favorables para la instalación de aerogeneradores a escala regional. En este caso tampoco se tiene en cuenta el entorno urbano, pero se da un uso de GIS.

En diciembre de 2019, Kiliç [73] realizó una determinación de mapas de disipación eólica y potencia de energía eólica en la provincia de Burdur (Turquía) utilizando GIS. En este caso, utilizaron valores de velocidad de viento tomados entre 2009 y 2016 en cuatro estaciones diferentes ubicadas en la provincia de Burdur. Estos datos fueron examinados utilizando la metodología de Red Neuronal Artificial (Artificial Neural Network - ANN) y se determinó una predicción de los valores de velocidad del viento hasta el fin del año 2030. Los datos que obtuvieron mediante redes ANN fueron transferidos a GIS y se identificaron las áreas con alto potencial para futuras aplicaciones de energía eólica, creando además mapas de disipación del viento. Este artículo mostró que tanto los investigadores como los inversores del sector de la energía eólica pueden utilizar fácilmente ANN y GIS como alternativa a los métodos tradicionales de predicción. En este caso tampoco se tiene en cuenta el entorno urbano, pero se plantea una metodología con el uso de GIS que tiene un potencial uso para eólica urbana, realizando las adaptaciones necesarias.

En enero de 2020, Jingxuan Feng et al. [74] realizaron una evaluación del potencial de energía eólica onshore en la zona continental de China, basado en modelado GIS. En su estudio mencionaban las limitaciones geográficas de la energía eólica, las cuales tienen una repercusión significativa en el potencial neto. La metodología utilizada fue una combinación de modelado GIS, el rendimiento de los aerogeneradores y la distribución de la velocidad del viento con un gran conjunto de datos diario para estimar el potencial técnico de energía eólica. Además, se consideraron efectos topográficos locales más detallados (cambios en la densidad del aire, rugosidad de la superficie, densidad del aire, eficiencia de colocación de matriz) a pesar de la complejidad de aplicarlos a nivel de país.

Se han consultado también los trabajos de Ye Xu et al. [75], publicado en septiembre de 2020, y de Cunden et al. [76] que se publicará en noviembre de 2020, en el que utilizan GIS y MCDM para determinar los mejores lugares para aprovechamiento eólico en distintas regiones. Estos análisis tienen cierto parecido con el de Díaz-Cuevas [72] en metodología, pero con ciertas diferencias.



Se concluye que el uso de GIS en la estimación del potencial eólico es ínfimo, acentuándose esta carencia en el entorno urbano. Sin embargo, se plantea la posibilidad de combinar las metodologías utilizadas para eólica a gran escala basadas GIS con las utilizadas en el análisis del ambiente eólico urbano basadas en CFD. Además de esto, las mediciones realizadas con anemómetros y sensores medidores de las características del viento pueden contribuir de una manera notable a la precisión de las estimaciones. El desarrollo de metodologías de análisis del potencial eólico urbano resultará un gran avance en este sector.

### 5.3. Datos existentes

Para realizar el análisis de hibridación, se cuenta con las mediciones realizadas por los responsables del proyecto "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16]. Estas mediciones, por una parte, muestran datos de consumo diario, mensual y anual de energía eléctrica para los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente) y, por otra parte, datos mensuales de radiación solar incidente en el edificio, también para los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente). Los datos corresponden a los dos edificios que conforman la Facultad (denominados Parte Norte y Parte Sur en otros apartados), sin contar con las marquesinas de los alledaños.

A continuación, se muestran las Tablas 5-1 y 5-2 y los gráficos de las Imágenes 5-8, 5-9 y 5-10, que hacen una síntesis de todo el conjunto de datos del que se dispone.

MES	2017			2018		
	Consumo eléctrico (kWh)	Radiación solar (Wh/m <sup>2</sup> )	Insolación diaria (Media mensual) (Horas)	Consumo eléctrico (kWh)	Radiación solar (Wh/m <sup>2</sup> )	Insolación diaria (Media mensual) (Horas)
Enero	175802,5	5000,28	3,7	98707,8	3386,39	2,2
Febrero	100452,6	6267,50	3,8	92670,0	4655,83	1,8
Marzo	106184,0	10002,22	4,2	85367,0	9629,17	3,4
Abril	64019,5	14931,94	6,9	73764,6	12278,61	4,2
Mayo	68263,5	17226,11	6	91118,0	14050,83	4,5
Junio	51249,4	14842,50	4,9	94475,0	-	4,5
Julio	38886,5	15819,17	4,8	65674,5	15890,83	4,9
Agosto	39522,5	14553,06	5,8	34966,0	16224,72	6,6
Septiembre	47348,0	11642,22	4,9	70129,5	13003,06	6,3
Octubre	52086,0	8452,78	5,2	89955,0	8207,22	4,5
Noviembre	91476,5	5160,83	3,4	81959,5	-	3,3
Diciembre	79631,6	3386,39	2,2	68329,5	3881,67	2,4
<b>TOTAL</b>	<b>914922,6</b>	<b>127285</b>	<b>-</b>	<b>947116,4</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Tabla 5-1. Tabla de consumo, radiación solar e insolación diaria para los años 2017 y 2018. [77]

MES	2019
	Consumo eléctrico (kWh)
Enero	84467,0
Febrero	72314,5
Marzo	50730,5

Tabla 5-2. Tabla de consumo para el primer trimestre del año 2019. [77]

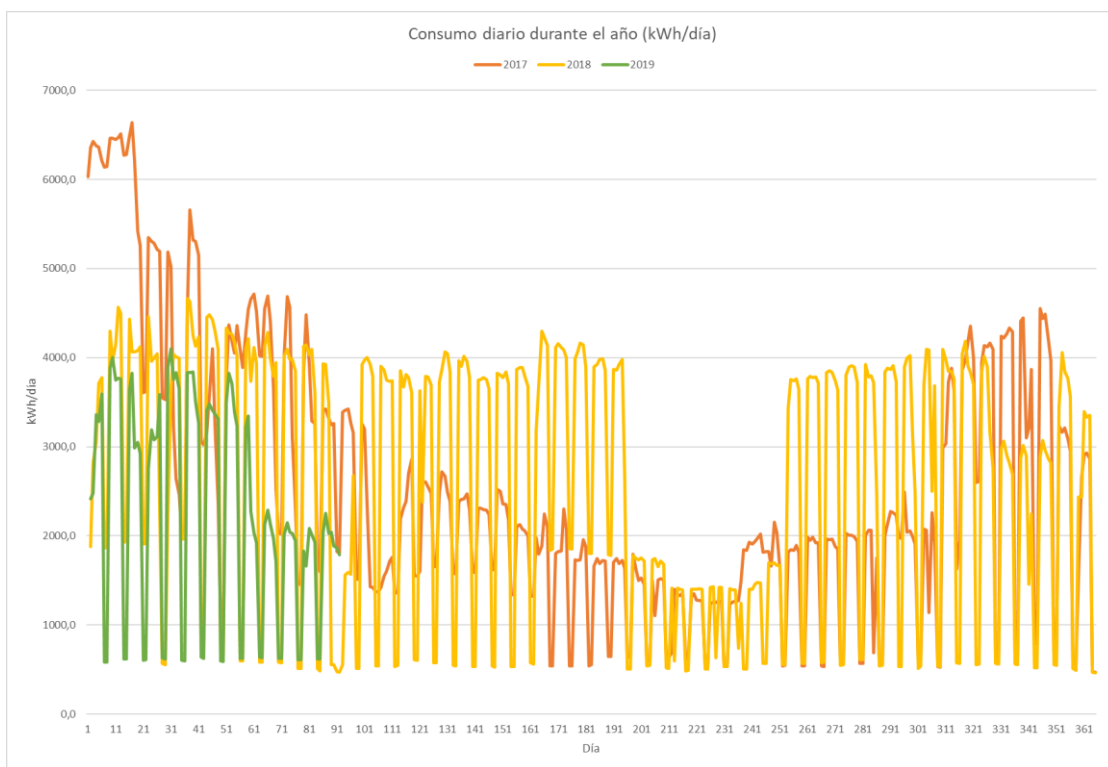


Imagen 5-8. Consumo diario durante los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente). [77]

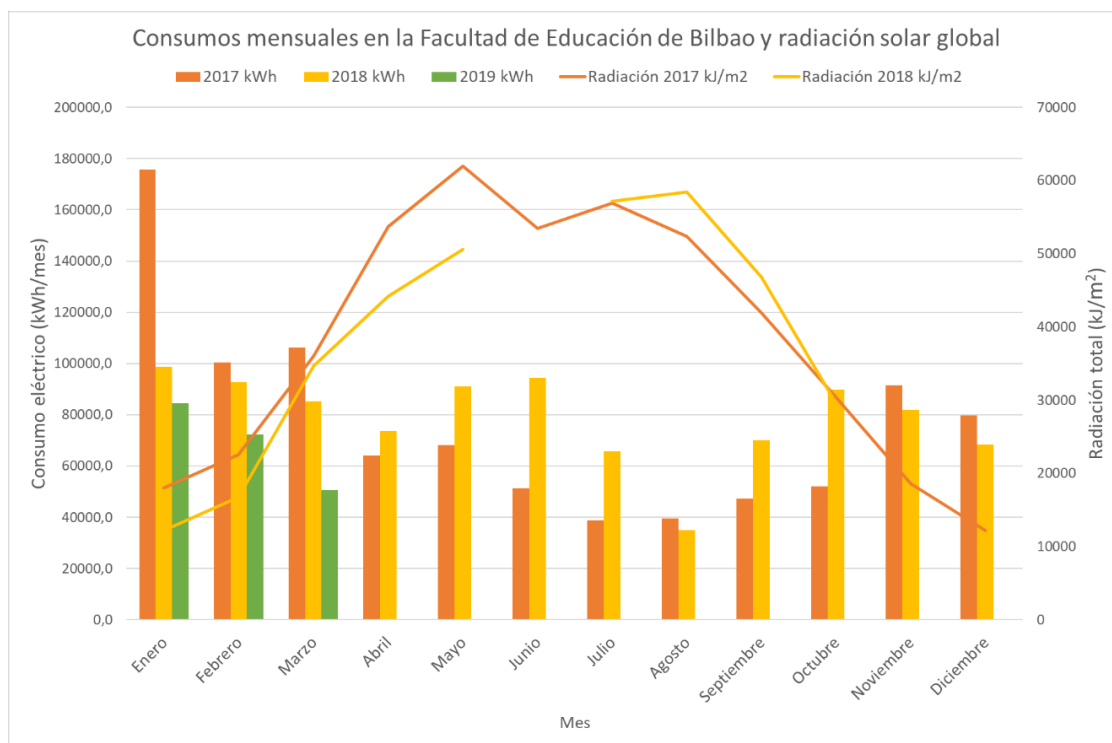
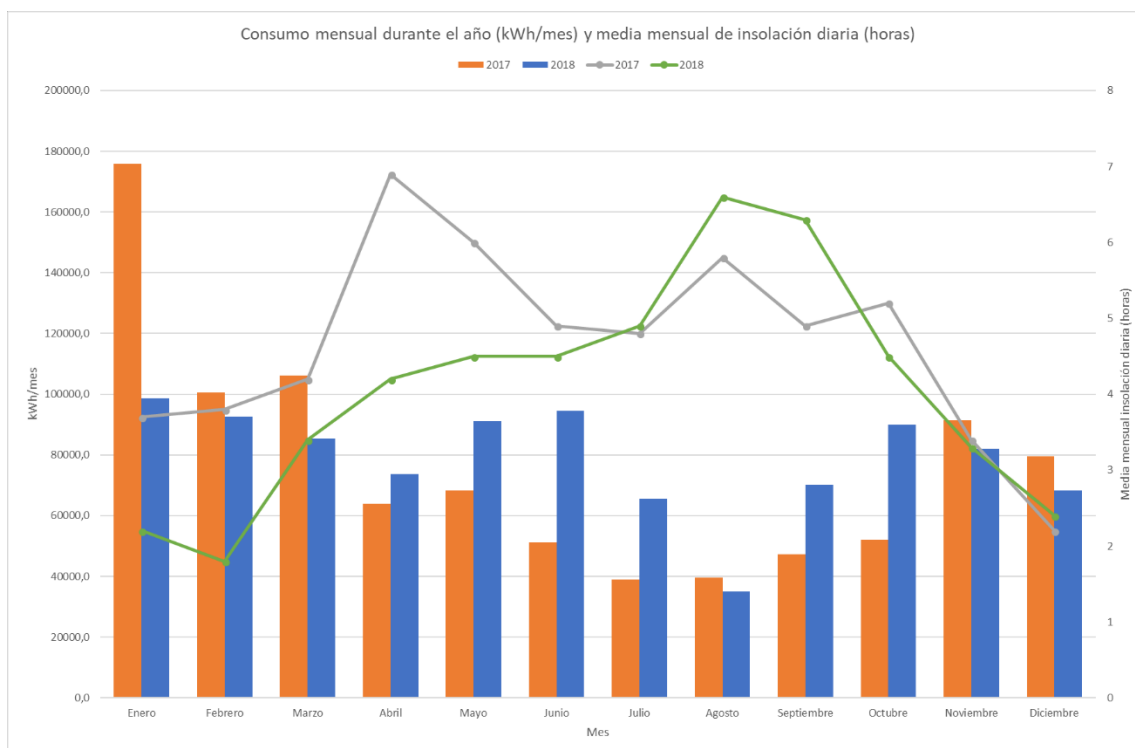


Imagen 5-9. Consumo mensual y radiación solar durante los años 2017, 2018 y 2019 (total o parcialmente). [77]



**Imagen 5-10. Consumo mensual y media mensual de insolación diaria en los años 2017 y 2018. [77]**

Realizando un breve análisis de los datos actuales, se puede concluir lo siguiente:

- Desde 2017, el consumo eléctrico en los meses más fríos y con menos insolación diaria (lo que se traduce en menos horas de luz natural) ha disminuido de manera considerable. Sin embargo, en 2018 ha habido un aumento en el consumo eléctrico durante los meses de primavera y otoño. Es cierto que, por lo general, en 2018 hubo menores niveles de insolación que en 2017, pudiendo ser esta una de las razones para el aumento, al ser necesaria una mayor iluminación. Esto ha provocado que el consumo anual de 2018 haya sido un 3,4% mayor que en 2017.
- En 2019 el consumo ha disminuido notablemente, siguiendo la misma tendencia que en los años anteriores. Queda patente que se han tomado todavía más medidas de ahorro energético. Lo importante sería que la tendencia continuase, para así disminuir notablemente el consumo.
- El consumo prorrateado anteriormente para el cálculo de la tasa de autoabastecimiento de la Facultad resulta ser muy similar que el real (de hecho, es un 6,7% más alto que el real de 2017 y un 3,4% más alto que el real de 2018). En el caso particular de esta facultad la tasa de autoabastecimiento va a ser mayor de la que se creía, siendo un punto positivo de la labor realizada con las medidas de eficiencia energética. Esto se analiza en el siguiente apartado.
- Las medidas de ahorro tomadas a partir del año 2018 muestran que el consumo durante el fin de semana tiene una disminución regular considerable respecto a la de los días de lunes a viernes. Este consumo cuando la Facultad está cerrada suele ser similar durante todos los fines de semana, a excepción de los períodos de exámenes (en enero y en junio). En el año 2019, sin embargo, no se produce este consumo en el período de exámenes (quizás se debe a que la Facultad pudiese permanecer cerrada).

## **5.4. Análisis de hibridación PV-Eólica**

### **5.4.1. Análisis detallado del potencial fotovoltaico**

El cometido en este apartado es valorar la opción de realizar una instalación híbrida de paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas en la cubierta de la Facultad de Educación de Bilbao. Para ello, en primer lugar, se opta por analizar el potencial de energía fotovoltaica de una manera más detallada que en el proyecto EHUKhi, utilizando para ello los datos de consumo reales.

Además de los valores numéricos, las curvas de generación y consumo en la Facultad resultan muy útiles a la hora de realizar el análisis. Es por eso que se van a utilizar gráficos en este estudio, puesto que dan la oportunidad de realizar el análisis de una manera más visual.

Para simplificar este análisis, se ha decidido comparar la producción media diaria de cada mes (de la manera en la que se obtuvo con la metodología EHUKhi) con el consumo medio diario de cada mes. En el caso del consumo, se va a distinguir entre el consumo medio de lunes a viernes y el consumo medio los fines de semana. De esta manera, se obtendrá una idea de los instantes en los que será más necesario surtir con energía eólica lo que la fotovoltaica no puede suministrar.

Los datos que más se asemejan a los de la tendencia de los hábitos de consumo actuales, además de estar completos, son los de 2018. Con estos datos, además, se tiene en cuenta la variable de que aumente el consumo durante los fines de semana de los períodos de exámenes, en los que cabe la posibilidad de que la Facultad ponga a disposición del alumando sus instalaciones.

A continuación, se muestran los gráficos que comparan la producción media diaria de cada mes con el consumo medio diario de cada mes.

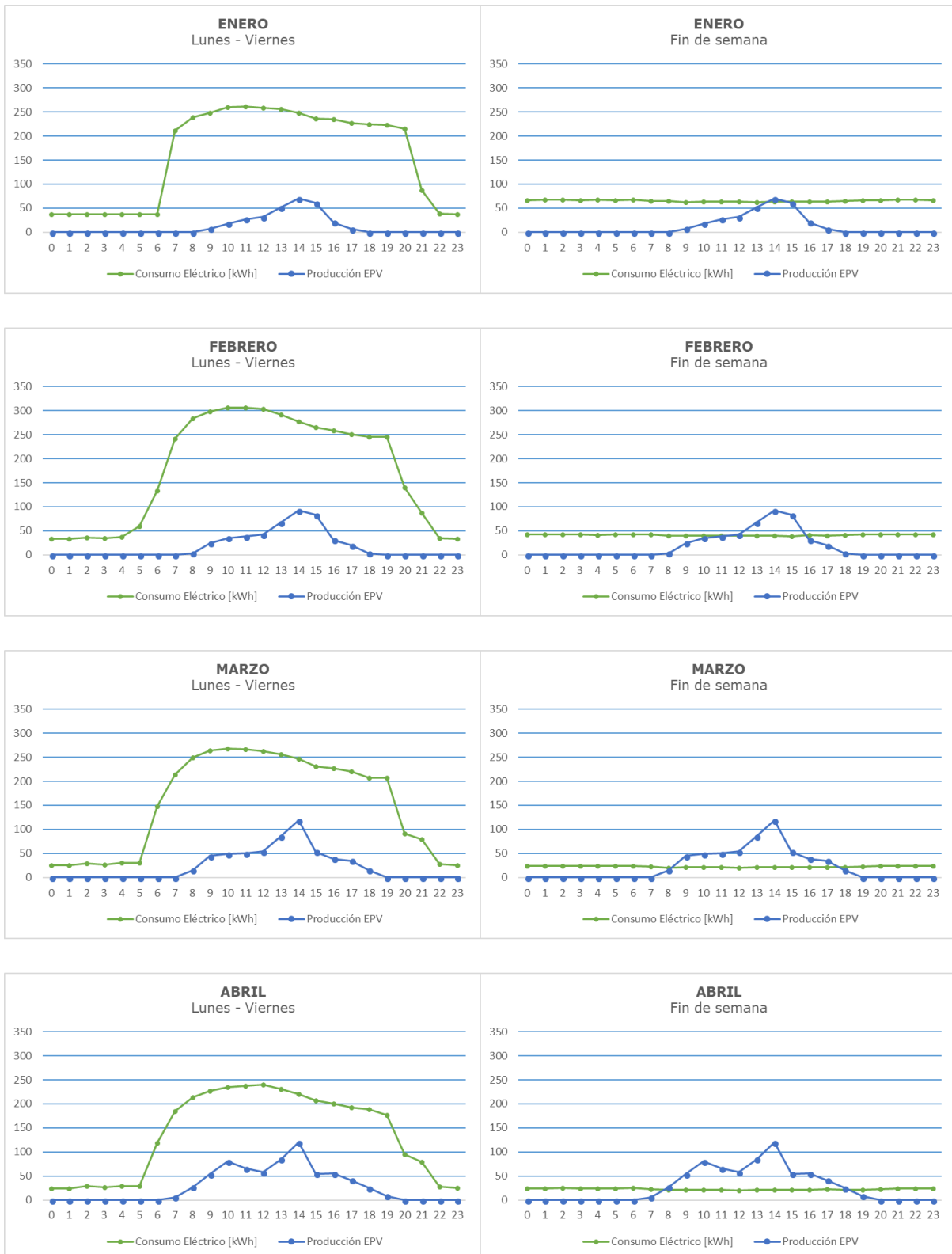
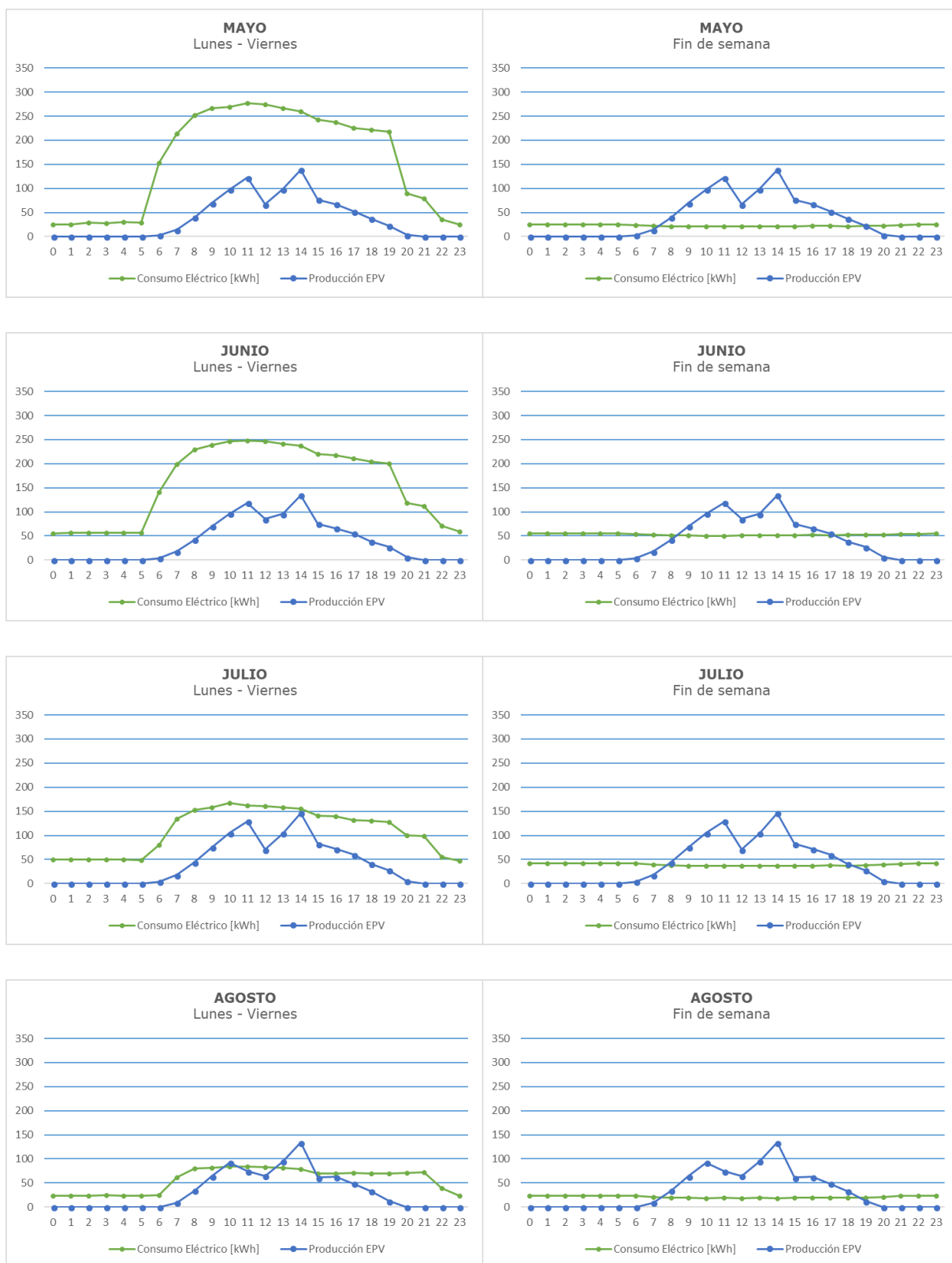
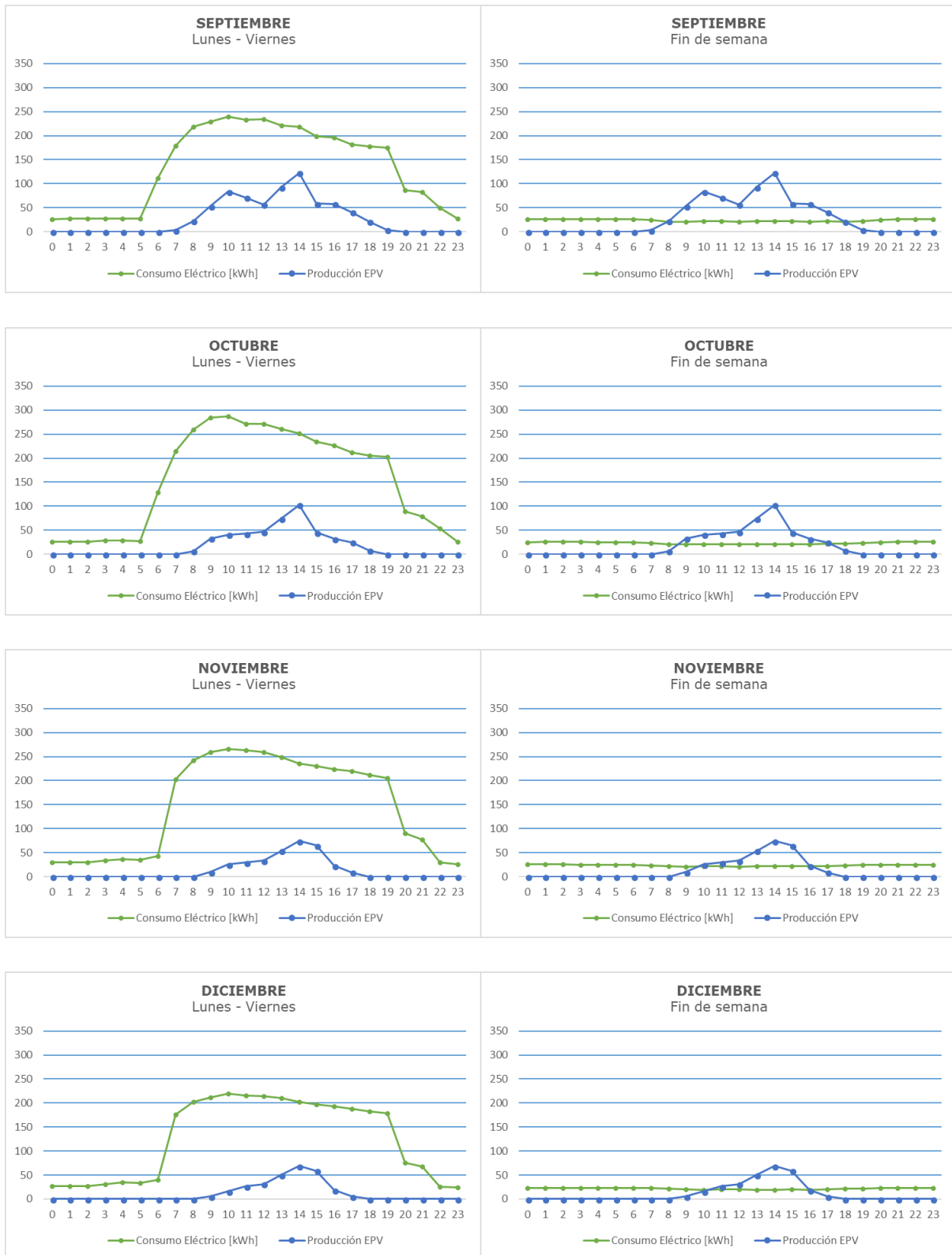


Imagen 5-11. Producción y consumo medios diarios de los meses de enero, febrero, marzo y abril.



**Imagen 5-12. Producción y consumo medios diarios de los meses de mayo, junio, julio y agosto.**





**Imagen 5-13. Producción y consumo medios diarios de los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre.**

### 5.4.2. Propuesta de aerogeneradores para hibridación PV-Eólica

Actualmente, aunque Roseo Eólica Urbana [17] disponga de su propio diseño de aerogenerador, no dispone físicamente de una turbina propia fabricada. Sin embargo, se encuentran trabajando en la curva de potencia teórica de su diseño, la cuál todavía no se encuentra terminada.

Además de todo ello, han trabajado en una herramienta de estimación de potencial eólico, la cual se puede aplicar a distintas zonas y a distintos aerogeneradores, dependiendo de las condiciones locales y las características técnicas de los aerogeneradores comerciales. Mediante esta herramienta han obtenido la estimación de generación eólica con distintos aerogeneradores existentes en el mercado. Los resultados se muestran en la Tabla 5-3 y la Imagen 5-14.

Generación [kWh]	Valor mínimo	1º Cuartil	Mediana	Valor medio	3º Cuartil	Valor máximo
<b>BORNAY 13</b>	2492	2767	3081	<b>3089</b>	3275	4150
<b>BORNAY 25_2</b>	4091	4609	5197	<b>5169</b>	5543	7051
<b>BORNAY 25_3</b>	7057	8039	9049	<b>8986</b>	9649	12329
<b>ENAIR 200</b>	49162	54942	61072	<b>60828</b>	64260	81447
<b>ENAIR 200L</b>	46277	51415	57389	<b>57025</b>	59707	76097
<b>ENAIR 30 PRO</b>	14235	15684	16761	<b>16999</b>	17757	22001
<b>ENAIR 70 PRO</b>	8710	9817	11145	<b>11047</b>	11888	15209
<b>SUPERWIND 1200</b>	1287	1571	1823	<b>1812</b>	2021	2624
<b>SUPERWIND 350</b>	171,1	213	246,2	<b>246,9</b>	276,6	364,1
<b>TESUP ATLAS 2.0</b>	8057	8865	9155	<b>9244</b>	9542	11134

Tabla 5-3. Estimación de generación eólica con distintos aerogeneradores existentes en el mercado. [17]

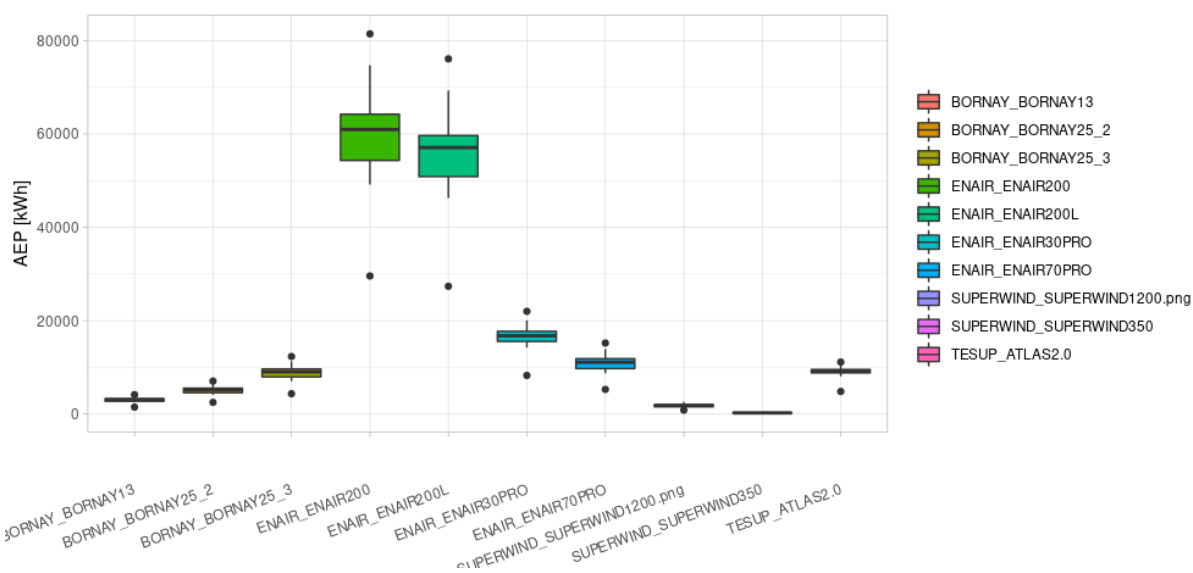


Imagen 5-14. Estimación de generación eólica con distintos aerogeneradores existentes en el mercado. [17]

Los resultados obtenidos hasta ahora se discuten en el siguiente apartado.

## **5.5. Discusión de los resultados y conclusiones**

Los resultados obtenidos en materia de potencial fotovoltaico no distan mucho de lo analizado con la metodología EHUKhi: con una generación como la calculada, tomando el consumo del año de 2017 la tasa de autoabastecimiento sería de un 24,42%, disminuyendo en 2018 al 23,59% debido al aumento del consumo global.

Para los tres primeros meses del año 2019 esta tasa sería del 20,57%, debido a que la generación fotovoltaica es menor que en otras estaciones y el consumo es elevado por haber días lectivos. Sin embargo, esta tasa resulta ser mayor que en los otros años, siendo del 10,10% en 2017 y 13,96% en 2018. Esto se traduce en un gran logro con la aplicación de medidas de eficiencia energética en la Facultad de Educación de Bilbao. Por lo tanto, si la tendencia del consumo siguiese de la misma manera, se podrían obtener mejores resultados en términos de tasa de autoabastecimiento.

Si se repara a la producción mensual, los días de lunes a viernes en el mes de agosto habría un intervalo de tiempo en el que la instalación inyectaría energía en la red, puesto que se da una mayor generación de energía que de consumo. Para el fin de semana, en cambio, se tienen momentos de mayor producción que consumo durante todo el año. Sin embargo, la gran mayoría del tiempo sucede lo contrario con el consumo y la producción.

Es por todo esto que no representa ningún problema la instalación de turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica. Esto podría aumentar los momentos diarios en los que se obtiene una tasa de autoconsumo mayor al 100%, además de minimizar la necesidad de consumir electricidad de la red durante las noches, cuando no hay generación de energía fotovoltaica, pero sí puede haber viento para generar electricidad con las turbinas eólicas.

En lo que respecta al desarrollo de una metodología para la estimación del potencial eólico urbano mediante Sistemas de Información Geográfica (GIS), se trataría de una metodología pionera. Haciendo un repaso de la bibliografía obtenida, el planteamiento consistiría en hibridar el uso de herramientas GIS para hacer un estudio del ambiente eólico urbano con el uso del GIS para la estimación del potencial eólico en una escala regional. Además, cabe destacar el uso de herramientas de CFD para el análisis en entornos urbanos, lo cuál va a ser clave para obtener resultados fiables.

Haciendo un paralelismo con la Metodología EHUKhi [13], actualmente no existe ningún modelo eólico de las características del r.sun (una especie de herramienta "r.wind"), en la que los obstáculos supongan una barrera o "sombra" para el viento, ya que las características del viento son muy aleatorias en comparación con los datos de radiación incidente; las explicaciones de la metodología utilizada por Roseo Eólica Urbana [17] han dejado esto patente. Por todo ello, una simulación con CFD es lo que podría aportar la información necesaria.

Por lo tanto, el desarrollo de una nueva metodología que permita analizar el potencial eólico con GIS, integrando los datos de la curva de potencia que actualmente están calculando en la investigación de Roseo Eólica Urbana [17], quedaría pendiente para poder completar este apartado de una manera fiable y certera.

## 6. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La energía fotovoltaica instalada en el entorno urbano es, actualmente, una fuente de energía que está en constante alza, siendo cada vez más demandada por la sociedad para ser consumidora de una energía de producción propia, de una energía limpia en su transformación a energía eléctrica, durante la fase de uso de los paneles. En el entorno de la generación distribuida, la energía fotovoltaica está sentando las bases de una transición energética cada vez más presente en el día a día, un cambio de modelo energético donde prime la eficiencia energética y el desarrollo sostenible, pasando de ser meros consumidores de una red eléctrica unidireccional a ser usuarios de una red bidireccional.

Las razones para la expansión de las instalaciones fotovoltaicas se basan en el amplio conocimiento de una tecnología que lleva años en el mercado y la facilidad para adaptarla a distintos escenarios, desde pequeñas instalaciones aisladas o de autoconsumo domésticas hasta grandes centrales que forman las denominadas huertas solares. Su rentabilidad económica también hace viable la instalación de paneles, resultando para ello muy necesario el análisis del potencial tecno-económico, la labor realizada en este TFM.

La energía eólica en el entorno urbano, en cambio, es una tecnología que se encuentra en desarrollo para poder hacer posible su expansión de manera similar a la energía fotovoltaica. Si bien se encuentra ampliamente desarrollada a gran escala, a pequeña escala han sido pocas las instalaciones realizadas, correspondiendo en su mayoría a entornos poco urbanizados donde se utilizaban para generar energía en una red aislada.

Resultan óptimos los centros docentes para la instalación de estas tecnologías, debido a la amplitud de las cubiertas de muchos de estos edificios y el alto consumo eléctrico que tienen diariamente. En el caso del campus de Leioa de la UPV/EHU, donde se podría obtener una tasa de autoabastecimiento del 54,33% para un consumo total de 14859,85 MWh en el año 2019, queda patente la gran oportunidad que brinda esta tecnología para que la Universidad sea consumidora de su propia energía; añadiéndole la posibilidad de generar energía eléctrica con turbinas eólicas, este potencial podría crecer de manera notable. Esto, junto a la aplicación de medidas en materia de eficiencia energética, constituirían los cimientos de una transición energética en la UPV/EHU hacia un modelo más sostenible.

En este sentido, el proyecto "EHUkhi: una plataforma para el desarrollo del potencial fotovoltaico de la UPV/EHU" [13], integrado en el programa Campus Bizia Lab [14], realiza una gran labor, fomentando la participación conjunta de alumnado, PDI y PAS, con el objetivo común de promover en la UPV/EHU la energía fotovoltaica para el autoconsumo.

Complementan la labor proyectos como el denominado "Creación de comunidad interdisciplinar hacia la transición energética en la Facultad de Educación de Bilbao (UPV/EHU)" [16], con el cuál ha habido una estrecha colaboración en este trabajo, aportando las herramientas necesarias para obtener un beneficio común que pueda ayudar en los dos proyectos de CBL que aquí se mencionan.

Ahora es el momento para llevar a cabo todas las acciones que fomenten un desarrollo sostenible. Es necesario para ello implicar a toda la sociedad, abarcando todos los ámbitos, destacando en este sentido lo que firman los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la ONU [78]. Está en nuestras manos sentar hoy las bases de un futuro en el que generaciones posteriores disfruten del entorno de la misma manera que otras generaciones anteriores pudieron hacerlo.

*"Mucha gente pequeña, en lugares pequeños, haciendo cosas pequeñas, pueden cambiar el mundo"*  
(Eduardo Galeano)

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### 7.1. Referencias

- [1] MOLIN, A., SCHNEIDER, S., ROHDIN, P. and MOSHFEGH, B. Assessing a Regional Building Applied PV Potential – Spatial and Dynamic Analysis of Supply and Load Matching. 2016 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148116300842> ISBN 0960-1481. DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.084>.
- [2] KAUSIKA, B.B., DOLLA, O. and van Sark, W. G. J. H. M. Assessment of Policy Based Residential Solar PV Potential using GIS-Based Multicriteria Decision Analysis: A Case Study of Apeldoorn, the Netherlands. , 2017 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217346738> ISBN 1876-6102. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.544>.
- [3] CAPELLÁN-PÉREZ, I., DE CASTRO, C. and ARTO, I. Assessing Vulnerabilities and Limits in the Transition to Renewable Energies: Land Requirements Under 100% Solar Energy Scenarios. , 2017 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117304720> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.137>.
- [4] BÓDIS, K., et al. A High-Resolution Geospatial Assessment of the Rooftop Solar Photovoltaic Potential in the European Union. , 2019 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119305179> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109309>.
- [5] SÚRI, M., HULD, T.A., DUNLOP, E.D. and OSSENBRINK, H.A. Potential of Solar Electricity Generation in the European Union Member States and Candidate Countries. , 2007 Available from: <http://www.sciencedirect.com/ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S0038092X07000229> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.solener.2006.12.007>.
- [6] MANSOURI KOUHESTANI, F., et al. Evaluating Solar Energy Technical and Economic Potential on Rooftops in an Urban Setting: The City of Lethbridge, Canada. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2019, vol. 10, no. 1. pp. 13-32. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/8007739781> WorldCat.org. ISSN 2008-9163. DOI 10.1007/s40095-018-0289-1
- [7] FTHENAKIS, V. and KIM, H.C. Land use and Electricity Generation: A Life-Cycle Analysis. , 2009 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001354> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.09.017>.
- [8] MAINZER, K., KILLINGER, S., MCKENNA, R. and FICHTNER, W. Assessment of Rooftop Photovoltaic Potentials at the Urban Level using Publicly Available Geodata and Image Recognition Techniques. , 2017 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17305686> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.065>.

- [9] OREGI, X., et al. Sensitivity Assessment of a District Energy Assessment Characterisation Model Based on Cadastral Data. , 2018 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218302091> ISBN 1876-6102. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.053>.
- [10] SAGANI, A., MIHELIS, J. and DEDOUSSIS, V. Techno-Economic Analysis and Life-Cycle Environmental Impacts of Small-Scale Building-Integrated PV Systems in Greece. , 2017 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817300671> ISBN 0378-7788. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.022>.
- [11] BREYER, C., KOSKINEN, O. and BLECHINGER, P. Profitable Climate Change Mitigation: The Case of Greenhouse Gas Emission Reduction Benefits Enabled by Solar Photovoltaic Systems. , 2015 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S1364032115003317> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.rser.2015.04.061>.
- [12] LUKAČ, N., et al. Rating of Roofs' Surfaces regarding their Solar Potential and Suitability for PV Systems, Based on LiDAR Data. , 2013 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912006162> ISBN 0306-2619. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.042>.
- [13] EHUKhi: Una Plataforma Para El Desarrollo Del Potencial Fotovoltaico De La UPV/EHU. 2019. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/ehukhi>.
- [14] ¿Qué Es Campus Bizia Lab?. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/campus-bizia-lab-zer-da>.
- [15] CBL 2019/20: Tercera Edición. 2019. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/campus-bizia-lab-2019-2020>.
- [16] Creación De Comunidad Interdisciplinar Hacia La Transición Energética En La Facultad De Educación De Bilbao (UPV/EHU). 2017. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/iraunkortasuna/hacia-transicion-energetica-facultad-educacion-bilbao>.
- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.
- [18] SØRENSEN, B. GIS Management of Solar Resource Data. , 2001 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S092702480003196> ISBN 0927-0248. DOI [https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/S0927-0248\(00\)00319-6](https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/S0927-0248(00)00319-6).
- [19] SÚRI, M. and HOFIERKA, J. A New GIS-Based Solar Radiation Model and its Application to Photovoltaic Assessments. Transactions in GIS, 2004, vol. 8, no. 2. pp. 175-190. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x> ISSN 1361-1682. DOI [10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2004.00174.x).
- [20] ZAKŠEK, K., PODOBNIKAR, T. and OŠTIR, K. Solar Radiation Modelling. , 2005 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S0098300404001980> ISBN 0098-3004. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.cageo.2004.09.018>.



- [21] SÚRI, M., HULD, T.A. and DUNLOP, E.D. PV-GIS: A Web-Based Solar Radiation Database for the Calculation of PV Potential in Europe. *International Journal of Sustainable Energy*, 2005, vol. 24, no. 2. pp. 55-67. Available from: <https://doi.org/10.1080/14786450512331329556> ISSN 1478-6451. DOI 10.1080/14786450512331329556.
- [22] NGUYEN, H.T. and PEARCE, J.M. Estimating Potential Photovoltaic Yield with R.Sun and the Open Source Geographical Resources Analysis Support System. , 2010 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S0038092X1000812> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.solener.2010.02.009>.
- [23] NGUYEN, H.T. and PEARCE, J.M. Incorporating Shading Losses in Solar Photovoltaic Potential Assessment at the Municipal Scale. , 2012 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12000333> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.01.017>.
- [24] 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, vol. 20. pp. 219-239. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/4937108481> WorldCat.org. ISSN 1364-0321. DOI 10.1016/j.rser.2012.11.078.
- [25] BERGAMASCO, L. and 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). , 2011 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11002830> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.010>.
- [26] DEFAIX, P.R., van Sark, W. G. J. H. M., WORRELL, E. and DE VISSER, E. Technical Potential for Photovoltaics on Buildings in the EU-27. , 2012 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X12002186> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.007>.
- [27] TEREČI, A., et al. Energy Saving Potential and Economical Analysis of Solar Systems in the Urban Quarter Scharnhauser Park. , 2009.
- [28] BRITO, M.C., GOMES, N., SANTOS, T. and TENEDÓRIO, J.A. Photovoltaic Potential in a Lisbon Suburb using LiDAR Data. , 2012 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11003574> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.031>.
- [29] HOFIERKA, J. and KAŇUK, J. Assessment of Photovoltaic Potential in Urban Areas using Open-Source Solar Radiation Tools. , 2009 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000949> ISBN 0960-1481. DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.02.021>.
- [30] VARDIMON, R. Assessment of the Potential for Distributed Photovoltaic Electricity Production in Israel. , 2011 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110003551> ISBN 0960-1481. DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.030>.

- [31] JAKUBIEC, J.A. and REINHART, C.F. A Method for Predicting City-Wide Electricity Gains from Photovoltaic Panels Based on LiDAR and GIS Data Combined with Hourly Daysim Simulations. , 2013 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13001291> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.03.022>.
- [32] KAUSIKA, B.B., et al. Bottom-Up Analysis of the Solar Photovoltaic Potential for a City in the Netherlands: A Working Model for Calculating the Potential using High Resolution LiDAR Data. , 2015 [viewed 19 December 2019]. Available from: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938788344&partnerID=40&md5=30f009a213900499b5437710f18c257b> SCOPUS.
- [33] MARTÍN-CHIVELET, N. Photovoltaic Potential and Land-use Estimation Methodology. Energy, 2016, vol. 94. pp. 233-242. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/5982723515> WorldCat.org. ISSN 0360-5442. DOI 10.1016/j.energy.2015.10.108.
- [34] RAMÍREZ-SAGNER, G., MATA-TORRES, C., PINO, A. and ESCOBAR, R.A. Economic Feasibility of Residential and Commercial PV Technology: The Chilean Case. , 2017 Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117303166> ISBN 0960-1481. DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.011>.
- [35] BOTTACCIOLI, L., PATTI, E., MACII, E. and ACQUAVIVA, A. GIS-Based Software Infrastructure to Model PV Generation in Fine-Grained Spatio-Temporal Domain. IEEE Systems Journal, 2018, vol. 12, no. 3. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/7104168712> WorldCat.org. ISSN 1932-8184. DOI 10.1109/JSYST.2017.2726350.
- [36] GAŠPAROVIĆ, I., GAŠPAROVIĆ, M. and MEDAK, D. Determining and Analysing Solar Irradiation Based on Freely Available Data: A Case Study from Croatia. , 2018 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S2211464517302105> ISBN 2211-4645. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.envdev.2018.04.001>.
- [37] PEDRERO, J., et al. Assessment of Urban-Scale Potential for Solar PV Generation and Consumption. IOP Publishing, 2019.
- [38] Goikoetxea, J. (2019). Desarrollo de una metodología para la determinación del potencial de energía solar (Trabajo de Fin de Máster). Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, Bilbao.
- [39] Alvaro Campos. YouTube, 2019. Disponibe en: <https://www.youtube.com/channel/UChr7BmdJm-VAe7RpPaTArfa>
- [40] Caamaño, E. & Díaz-Palacios, S. (2019). Potencial solar fotovoltaico de las cubiertas edificatorias de la ciudad de Vitoria-Gasteiz: caracterización y análisis. Universidad Politécnica de Madrid. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/j34/catalogo/01/85/potencialsolar19memoria.pdf>
- [41] ETXEBARRIA, O. (2019). Eguzki energia potentzialaren ikerketa Aiaraldean (Trabajo de Fin de Grado). Escuela de Ingeniería de Gipuzkoa, UPV/EHU, Eibar.

- [42] URIARTE, A. (2020). Bilboko Ingenieritza Eskolako energia fotovoltaikoaren potentzialaren analisia (Trabajo de Fin de Grado). Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, Bilbao.
- [43] ECHEVERRÍA, A. (2020). Análisis del potencial fotovoltaico del campus de Álava (Trabajo de Fin de Grado). Facultad de Farmacia, UPV/EHU, Bilbao.
- [44] VARELA, J. (2020). Potencial fotovoltaico de la Facultad de Economía y Empresa de Sarriko (Trabajo de Fin de Máster). Escuela de Ingeniería de Bilbao, UPV/EHU, Bilbao.
- [45] JAURLARITZA, G.V. and VASCO, G. GeoEuskadi. Infraestructura De Datos Espaciales, 2015. Disponible en: <https://www.geo.euskadi.eus/s69-15375/es/>
- [46] Plano Del Área De Leioa-Erandio. 2019. Disponible en: <https://www.ehu.eus/es/web/bizkaia/planuak>
- [47] ArcGIS Desktop. ¿Qué son los datos LIDAR?. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>
- [48] Cloud Compare. User manual. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>
- [49] ArcGIS Desktop. ¿Qué son los datos ráster?. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- [50] ALONSO, D. Qué podemos hacer con GRASS GIS 7. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://mappinggis.com/2016/05/puedo-grass-gis-7/>
- [51] Cartografía Digital. Mapas vectoriales, 2013. Disponible en: <https://www.cartografiadigital.es/2013/10/mapas-vectoriales.html>
- [52] Mancomún. QGIS: Solución de Sistema de Información Geográfica de Software Libre. 2018. Disponible en: <https://www.mancomun.gal/es/artigo-tic/qgis-solucion-de-sistema-de-informacion-xeografica-con-software-libre/>
- [53] CNIG. Centro Nacional de Información Geográfica. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscador.do>
- [54] ADRASE. Mapa zona península. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <http://www.adrase.com/>
- [55] EMERY, K., "Measurement and Characterization of Solar Cells and Modules," in Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons, Ltd, 2005, pp. 701–752.

- [56] BHANDARI, K. P., COLLIER, J. M., ELLINGSON, R. J. and APUL, D. S., "Energy payback time (EPBT) and energy return on energy invested (EROI) of solar photovoltaic systems: A systematic review and meta-analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 133–141, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.02.057.
- [57] RAUGEI, M., FULLANA-i-PALMER, P., and FTHENAKIS, V., "The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles," *Energy Policy*, vol. 45, pp. 576–582, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.008.
- [58] DUPONT, E., KOPPELAAR, R. and JEANMART, H., "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints," *Appl. Energy*, vol. 257, p. 113968, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113968.
- [59] BASTERRA, L., LEGARZA, C., PELEGRY, Á. and M. de, "Instalaciones fotovoltaicas aisladas y conectadas a la red eléctrica," p. 39, 2017.
- [60] EHUKhi. EHUKhi. METODOLOGÍA. UNIFICACIÓN DE CRITERIOS. 2020.
- [61] GARCÍA, O.; ULAZIA, A.; DEL RÍO, M.; CARREÑO-MADINABEITIA, S.; GONZALEZ-ARCEO, A. An Energy Potential Estimation Methodology and Novel Prototype Design for Building-Integrated Wind Turbines. *Energies* 2019, 12, 2027. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2027>
- [62] WWEA. WWEA Released Latest Global Small Wind Statistics; WWEA: Bonn, Germany, 2018
- [63] MERTENS, S. Wind Energy in the Built Environment: Concentrator Effects of Buildings. Doctoral Thesis, Delf University (TUDelf), Delft, The Netherlands, 2006; ISBN 0906522-35-8
- [64] ZEMAMOU, M.; AGGOUR, M.; TOUMI, A. Review of savonius wind turbine design and performance. *Energy Procedia* 2017, 141, 383–388.
- [65] KIM, S.; CHEONG, C. Development of low-noise drag-type vertical wind turbines. *Renew. Energy* 2015, 79, 199–208.
- [66] FIELDS, J., OTERI, F., PREUS, R. and BARING-GOULD, I. No Title. Deployment of Wind Turbines in the Built Environment: Risks, Lessons, and Recommended Practices, 2016.
- [67] HERSBACH, H. The ERA5 Atmospheric Reanalysis; AGU Fall Meeting Abstracts: San Francisco, CA, USA, 2016.
- [68] OLAUSON J. ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renew. Energy* 2018, 126, 322–331.
- [69] JIE, Y., et al. Correlation between Urban Morphology and Wind Environment in Digital City using GIS and CFD Simulations. *International Journal of Online Engineering (iJOE)*, 2014, vol. 10, no. 3. pp. 42. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/5581040617> WorldCat.org. ISSN 1868-1646. DOI 10.3991/ijoe.v10i3.3631.

- [70] WATSON, J.J.W. and HUDSON, M.D. Regional Scale Wind Farm and Solar Farm Suitability Assessment using GIS-Assisted Multi-Criteria Evaluation. *Landscape and Urban Planning*, 2015, vol. 138. pp. 20-31. Available from: <http://www.sciencedirect.com/ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S0169204615000249> ISSN 0169-2046. DOI <https://doi.org/ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.001>.
- [71] WANG, B., SUN, S. and DUAN, M. Wind Potential Evaluation with Urban Morphology - A Case Study in Beijing. *Energy Procedia*, 2018, vol. 153. pp. 62-67. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610218308919> ISSN 1876-6102. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.078>.
- [72] DÍAZ-CUEVAS, P., BIBERACHER, M., DOMÍNGUEZ-BRAVO, J. and SCHARDINGER, I. Developing a Wind Energy Potential Map on a Regional Scale using GIS and Multi-Criteria Decision Methods: The Case of Cadiz (South of Spain). *Clean Technologies and Environmental Policy: Focusing on Technology Research, Innovation, Demonstration, Insights and Policy Issues for Sustainable Technologies*, 2018, vol. 20, no. 6. pp. 1167-1183. Available from: <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/7782838267> WorldCat.org. ISSN 1618-954X. DOI 10.1007/s10098-018-1539-x.
- [73] KILIÇ, B. Determination of Wind Dissipation Maps and Wind Energy Potential in Burdur Province of Turkey using Geographic Information System (GIS). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, vol. 36. pp. 100555. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138819303972> ISSN 2213-1388. DOI <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100555>.
- [74] FENG, J., FENG, L., WANG, J. and KING, C.W. Evaluation of the Onshore Wind Energy Potential in Mainland China—Based on GIS Modeling and EROI Analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, vol. 152. pp. 104484. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919303908> ISSN 0921-3449. DOI <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104484>.
- [75] XU, Y., et al. Site Selection of Wind Farms using GIS and Multi-Criteria Decision Making Method in Wafangdian, China. *Energy*, 2020, vol. 207. pp. 118222. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220313293> ISSN 0360-5442. DOI <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118222>.
- [76] CUNDEN, T.S.M., DOORGA, J., LOLLCHUND, M.R. and Rughooputh, Soonil D. D. V. Multi-Level Constraints Wind Farms Siting for a Complex Terrain in a Tropical Region using MCDM Approach Coupled with GIS. *Energy*, 2020, vol. 211. pp. 118533. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220316418> ISSN 0360-5442. DOI <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118533>.
- [77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.
- [78] Naciones Unidas. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

## 7.2. Enlaces y documentos útiles

BLECHINGER, P., et al. Global Analysis of the Techno-Economic Potential of Renewable Energy Hybrid Systems on Small Islands. , 2016 Available from: <http://www.sciencedirect.com.ehu.idm.oclc.org/science/article/pii/S0301421516301471> ISBN 0301-4215. DOI <https://doi-org.ehu.idm.oclc.org/10.1016/j.enpol.2016.03.043>

CAMPUS BIZIA LAB. RELACIÓN DEFINITIVA DE SOLICITUDES COMPLETAS E INCOMPLETAS CORRESPONDIENTES A PROYECTOS CAMPUS BIZIA LAB 2019/20. Upv/ehu, 2019. Disponibe en: <https://www.ehu.eus/documents/4736101/12319151/Relaci%C3%B3n+definitiva+de+solicitudes+completas+e+incompletas+%2804-10-2019%29/06e5a9a1-0b05-791c-b42f-2cc7accfd66e>

FERNÁNDEZ, I. CONVOCATORIA DE PROYECTOS CAMPUS BIZIA LAB DEIALDIA 2019/20. UPV/EHU, 2019. Disponible en: <https://www.ehu.eus/documents/4736101/12319151/Convocatoria-CAMPUS-BIZIA-LAB-2019.pdf/e3b705bb-715d-3142-2976-82081fa5f904>



### 7.3. Imágenes

#### Imagen 2-1:

- [45] JAURLARITZA, G.V. and VASCO, G. GeoEuskadi. Infraestructura De Datos Espaciales, 2015. Disponible en: <https://www.geo.euskadi.eus/s69-15375/es/>

#### Imagen 2-2:

- [46] Plano Del Área De Leioa-Erandio. 2019. Disponible en: <https://www.ehu.es/es/web/bizkaia/planuak>

#### Imagen 5-1:

- [61] GARCÍA, O.; ULAZIA, A.; DEL RÍO, M.; CARREÑO-MADINABEITIA, S.; GONZALEZ-ARCEO, A. An Energy Potential Estimation Methodology and Novel Prototype Design for Building-Integrated Wind Turbines. Energies 2019, 12, 2027. Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/10/2027>

#### Imagen 5-2:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

#### Imagen 5-3:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

#### Imagen 5-4:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

#### Imagen 5-5:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

#### Imagen 5-6:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

#### Imagen 5-7:

- [17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

**Imagen 5-8:**

[77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.

**Imagen 5-9:**

[77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.

**Imagen 5-10:**

[77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.

**Imagen 5-14:**

[17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

## 7.4. Tablas

### Tabla 3-2:

[54] ADRASE. Mapa zona península. Última consulta: 15 de septiembre de 2020. Disponible en: <http://www.adrase.com/>

### Tabla 5-1:

[77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.

### Tabla 5-2:

[77] DÍEZ, J. R. 20190331\_BHF\_MonitElektr\_Eraikina. 2019.

### Tabla 5-3:

[17] GARCÍA, Ó., DEL RÍO, M. and ULAZIA, A. Roseo Eólica Urbana.

## **7.5. Ecuaciones**

### **Ecuación 3-9:**

- [58] DUPONT, E., KOPPELAAR, R. and JEANMART, H., "Global available solar energy under physical and energy return on investment constraints," Appl. Energy, vol. 257, p. 113968, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113968.