



UNIÓN DE ASOCIACIONES
DE INGENIEROS TÉCNICOS
INDUSTRIALES Y GRADUADOS
EN INGENIERÍA DE LA
RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA

UNIÓN DE ASOCIACIONES DE INGENIEROS TÉCNICOS INDUSTRIALES Y GRADUADOS EN INGENIERÍA DE LA RAMA INDUSTRIAL DE ESPAÑA (UAIITIE)

“CONVOCATORIA 2021”

VI PREMIO NACIONAL DE INICIACIÓN A LA INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

Análisis de los datos de Copernicus para el estudio de la
contaminación atmosférica y acción local para reducir las
emisiones contaminantes

AUTOR/ES:
Jaime Lleras Pérez
Miguel Soto Martín
Julia Vallés Ruescas

BLOQUE TEMÁTICO:
Ahorro Energético Sostenible

NIVEL EDUCATIVO:
2º de Bachillerato

COORDINADOR:
Raúl Martín Gómez

Abril de 2021

Resumen

Proyecto consistente en dos partes, una primera de investigación sobre la contaminación atmosférica aprovechando la excepcionalidad que han supuesto las medidas de restricción de la movilidad a consecuencia de la pandemia de la COVID-19. Para ello, se han analizado el NO₂, CO, O₃, SO₂ y CH₄ como indicadores mediante los datos proporcionados por los satélites Sentinel del proyecto Copernicus, centrado en 15 países del oeste de Europa. Se han descargado y tratado los datos de la evolución de las variables contaminantes antes, durante y después de las restricciones de movilidad con algoritmos implementados en los lenguajes de programación Python y R y la herramienta Earth Engine. Con toda esta información se ha creado una página web disponible en la URL: <https://miguelsoito.eu/proyecto>, y se han usado distintos métodos para visualizar los resultados de los distintos indicadores. Las herramientas creadas permitirán seguir analizando en un futuro la evolución de los diferentes gases automatizando su proceso de descarga e implementación en los visores de la web.

La conclusión de este primer estudio: una bajada en las concentraciones de las variables contaminantes mucho menor de lo esperado y la posibilidad de que nos encontremos ante un “punto de no retorno”, nos lleva a la segunda parte del proyecto en la que se ha planteado una acción local para contribuir en la mejora de las condiciones del aire: sustituir la caldera del instituto que quema al año 16.485 L de gasóleo, el elemento más contaminante del centro, por una instalación de aerotermia alimentada por energía solar fotovoltaica. Se ha estudiado la carga calorífica y frigorífica de un aula, las posibles dimensiones de la instalación y posteriormente su recuperación económica; analizando además la importancia de que se implemente la modalidad del balance neto relacionado con la producción fotovoltaica. Este proyecto está enfocado para todos: alumnos, profesores u otros centros; y como tal, tras la realización de una encuesta, se ha propuesto una campaña de concienciación en el propio centro al alumnado de ESO sobre el séptimo ODS: Energía asequible y no contaminante.

Palabras Clave

Copernicus; Contaminación del aire; Aerotermia; Energía solar fotovoltaica.



Índice

Resumen	1
Palabras Clave	1
1. Introducción	3
2. Objetivos del análisis de los datos de Copernicus	3
3. Metodología	4
4. Experimentación y desarrollo del proyecto	4
4.1 <i>Descarga de productos</i>	4
4.2 <i>Extracción y filtrado de datos</i>	5
4.3 <i>Combinación de productos</i>	5
4.4 <i>Recortar por coordenadas</i>	7
4.5 <i>Visualización y exportación</i>	7
4.6 <i>Mapas Earth Engine</i>	8
5. Resultados	8
6. Conclusiones del análisis de los datos de Copernicus	10
7. Sustitución de la caldera del instituto	11
7.1 <i>Instalación</i>	11
7.1.1 <i>Aeroterminia</i>	11
7.1.2 <i>Carga de calefacción en invierno</i>	11
7.1.3 <i>Carga de verano</i>	11
7.1.4 <i>Elección de modelo de bomba de calor</i>	12
7.1.5 <i>Consumo estimado en kWh</i>	12
7.1.6 <i>Paneles solares fotovoltaicos</i>	12
7.2 <i>Análisis de las curvas de consumo y producción</i>	14
7.2.1 <i>Consumo instantáneo</i>	14
7.2.2 <i>Balance neto</i>	15
7.3 <i>Instalación enfocada hacia el uso del balance neto</i>	15
7.3.1 <i>Cálculo de la potencia de la instalación</i>	15
7.4 <i>Recuperación de la inversión</i>	16
7.4.1 <i>Instalación de 59 kW enfocada al autoconsumo instantáneo</i>	16
7.4.2 <i>Instalación de 33 kW enfocada al balance neto</i>	17
7.5 <i>Impacto medioambiental</i>	17
8. Conclusiones del proyecto de sustitución de la caldera	18
Bibliografía	19

1. Introducción

Los niveles de contaminación atmosférica han aumentado rápidamente desde la revolución industrial dando lugar al conocido cambio climático, uno de los mayores problemas a los que se ha enfrentado la humanidad. Debido al gran riesgo global que representa, ha pasado de denominarse "crisis climática" a "emergencia climática". Actualmente, como consecuencia de las restricciones de movilidad que se han aplicado en casi todos los países del mundo durante el año 2020 a raíz de la pandemia, especialmente entre los meses de marzo y abril, se esperaba una reducción considerable de la contaminación atmosférica. Aprovechando esta circunstancia se ha planteado realizar un primer trabajo de investigación con el objetivo de cuantificar el efecto que las restricciones de movilidad han tenido en la contaminación del aire. Para llevarlo a cabo, se ha realizado el estudio de varios indicadores asociados a los principales elementos contaminantes obtenidos a través del satélite Sentinel-5p de Copernicus, un proyecto de la Comisión Europea lanzado para observar el medio ambiente desde el espacio. De esta forma, podemos entender mejor los cambios ambientales que se producen en la tierra y contribuir a la protección del medio ambiente, la salud y seguridad de los ciudadanos.

Tras analizar la gravedad de la problemática, actualizada con cifras después del confinamiento, creemos conveniente introducir una actuación a nivel local para disminuir las emisiones de nuestro centro escolar, I.E.S. Pintor Antonio López. Si los centros educativos defienden unos ideales, hay que ponerlos en marcha, si no, ¿Qué mensaje hipócrita estamos difundiendo a la comunidad? De nada sirve recalcar la importancia de disminuir la huella de carbono, si el instituto, o cualquier institución, sigue quemando litros y litros de gasóleo para calentar las aulas, cuando hay soluciones más ecológicas y, como veremos, más rentables.

2. Objetivos del análisis de los datos de Copernicus

El objetivo planteado en este trabajo es investigar la contaminación atmosférica en Europa y el impacto en esta de las restricciones de movilidad debidas a la COVID-19 a través del análisis de algunos de los gases contaminantes más relevantes. Aunque en un principio se había planteado realizar la investigación para todos los países de Europa, las dificultades en el procesamiento del volumen de datos utilizados y la capacidad de almacenamiento requerida para guardarlos, ha obligado a cambiar los objetivos iniciales, reduciendo el área de estudio finalmente a estos 15 países de Europa Occidental: Alemania, Austria, Bélgica, Chequia, Croacia, Dinamarca, Eslovenia, España, Francia, Irlanda, Italia, Países Bajos, Reino Unido, y Suiza. Dentro de España también se han analizado las comunidades autónomas y las provincias.

El cambio en los objetivos inicialmente planteados no resulta relevante para las conclusiones finales, puesto que la muestra de países es lo suficientemente amplia y significativa y los resultados se podrían extrapolar a otros países del entorno.



3. Metodología

Para la realización de la investigación se ha seguido un método de trabajo dividido en las siguientes fases:

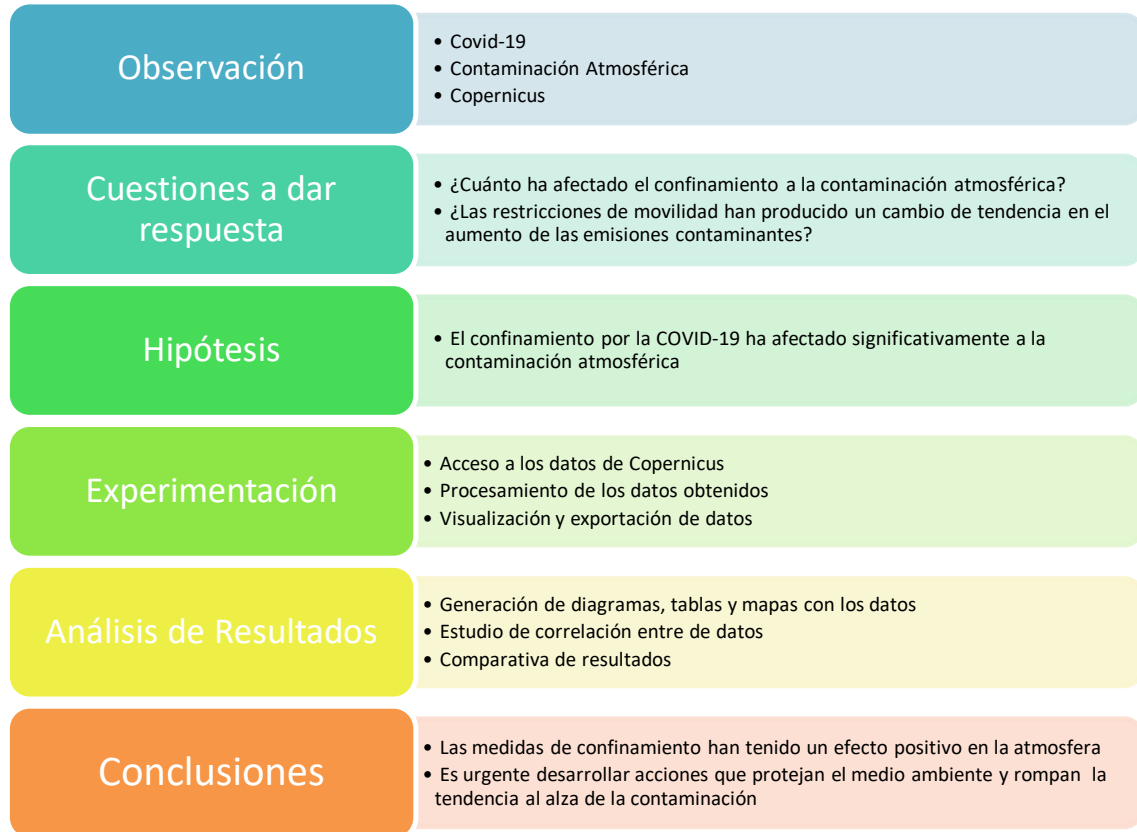


Fig. 1: Estructura de las diferentes fases del proyecto

Las tres primeras fases del proyecto, de observación y estudio de la situación, han sido descritas detalladamente en el proyecto original, pero por limitación de espacio, en este caso nos centraremos en las tres últimas fases centradas en la experimentación y en los resultados.

4. Experimentación y desarrollo del proyecto

Se describen a continuación las acciones más relevantes llevadas a cabo durante la fase de experimentación y desarrollo del proyecto:



Fig. 2: Tareas de experimentación y desarrollo del proyecto

4.1 Descarga de productos

Debido al gran tamaño de los productos de Sentinel-5P se han tenido problemas a la hora de trabajar con ellos, puesto que se requería una capacidad de procesamiento, de

almacenamiento y de memoria no disponible para llevar a cabo la investigación, por ello se ha reducido el ámbito inicial planteado para el proyecto a 15 países de Europa y sólo para los primeros 6 meses de 2019 y 2020. Se han descargado 8.381 productos Sentinel lo que ha supuesto un espacio de 3,16TB de datos y unas 4 semanas de tiempo descargando datos. Para analizar los datos de los dos últimos años completos, hubiera sido necesario descargar 16.737 productos y 6,27 GTB, siendo aún mucho mayor para un ámbito europeo completo. Los productos se han descargado desde Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu>) a través de la API Hub Access.

4.2 Extracción y filtrado de datos

Con objeto de reducir el tamaño de los productos de Sentinel se ha creado un programa en Python con nombre ejecutable “inicializacion.py” ([ver en carpeta de recursos](#)), que utiliza las Atmospheric Toolbox de Copernicus (<https://atmospherictoolbox.org>), para transformar estos productos en ficheros más pequeños en los que sólo están las variables a utilizar en el proyecto. De esta forma, se reduce el espacio y permite poder trabajar a pesar de los recursos limitados que disponíamos.

Para ello, se han realizado los siguientes filtros de datos:

1. Filtro de posición para obtener sólo los datos de la órbita que estén en una latitud mayor que 34 grados Norte y menor que 60 grados Norte ya que esta va a ser nuestra zona de análisis.
2. Aplicar un filtro de calidad, en función de las recomendaciones para cada producto. Por ejemplo, en el caso del NO₂, se toman los datos que tengan un valor de la variable “tropospheric_NO2_column_number_density_validity” mayor de 75.
3. Se obtienen sólo con las variables: latitude (latitud geográfica del centro del pixel de la medida), longitude (longitud geográfica del centro del pixel de la medida), latitude_bounds (latitud geográfica de los extremos del pixel de la medida), longitude_bounds (longitud de los extremos del pixel de la medida) y la variable de calidad en cuestión (tropospheric_NO2_column_number_density en el caso del NO₂).

Con estas operaciones de filtrado se consigue tener los datos necesarios, pero con ficheros de un tamaño unas 300 veces más pequeños que los originales.

4.3 Combinación de productos

Como cada producto dispone sólo de los datos de una órbita en un determinado periodo de tiempo, es necesario combinar distintos productos para abarcar el periodo de fechas que se desean procesar. Para ello, utilizando la librería HARP (*Data harmonization toolset for scientific earth observation data*), se ha creado el programa “juntardatos.py” ([ver en carpeta de recursos](#)) en Python que, dado un indicador y un período de tiempo combina los datos de ese indicador y periodo de tiempo en dos únicos ficheros:

- Crea un fichero que resulta de la media de todos los días. Esto permite crear un mapa general donde se podrá visualizar el indicador de interés en cada caso, con el



valor medio en el periodo de tiempo seleccionado, y además quitará la mayor parte de los huecos que tienen las imágenes diarias, bien porque no haya sido asignado valor, o bien porque este se ha quitado por el filtro de calidad indicado en el punto anterior.

- Crea un fichero con una variable de tiempo, que permitirá visualizar la evolución de los datos entre el periodo seleccionado, pero día a día. Esto será necesario para para observar los datos puntuales de cada día.

Para crear estos ficheros, se realizarán las siguientes operaciones:

1. Se importan los productos que cumplen las condiciones de los parámetros de llamada al programa (indicador y periodo de tiempo).
2. A estos productos, se les aplica las operaciones:

```
bin_spatial(lat_edge_length,lat_edge_offset,lat_edge_step,  
            lon_edge_length,lon_edge_offset,lon_edge_step)  
derive(latitude{latitude})  
derive(longitude {longitude})
```

Donde, mediante la primera función se define una cuadrícula con el área a trabajar, a través de los parámetros:

- lat_edge_length/lon_edge_length: Número de líneas verticales (latitud) y horizontales (longitud) que va a tener la cuadrícula
- lat_edge_offset/lon_edge_offset: Latitud y longitud mínima donde empieza la cuadrícula
- lat_edge_step/lon_edge_step: Salto existente entre dos existente entre dos líneas de la cuadrícula

Teniendo en cuenta los países objeto de análisis, se ejecuta la primera función siempre con estos datos: `bin_spatial(1301,34,0.02,1551,-11,0.02)`. Con esta operación se homogeneizan los datos para poder hacer mapas correctamente. Mediante las funciones `derive(latitude{latitude})` y `derive(longitude {longitude})`, se guardan los centros de los rectángulos generados en la cuadrícula de `bin_spatial`. Es necesaria esta operación ya que algunos visualizadores necesitan tener los centros para poder visualizar los datos.

3. Se combinan los distintos productos para crear un único fichero por día. Para hacer la media total, es necesario unificar primero los productos por día. Esto es así ya que las órbitas del satélite Sentinel-5P, se solapan en algunos puntos. Así, si hay puntos de los que se tiene más de una medida de un mismo día, si se quiere hacer la media por día correctamente, no puede ocurrir que los datos de un día se cuentan el doble. Por lo que, primero creamos una lista de productos HARP que muestran una imagen de indicador por día. Para ello, gracias a los nombres de los ficheros podemos identificar los productos que son del mismo día y llamar a la función `harp.concatenate()` que fusiona distintos productos en un producto de un solo día donde se hace la media en los puntos con varias órbitas. Además, para fusionar los distintos días en un solo fichero, finalmente realizaremos las operaciones: `bin(); suqash(time, (latitude,longitude))`. De esta forma se crean los ficheros que permitirán después visualizar los distintos mapas.

4.4 Recortar por coordenadas

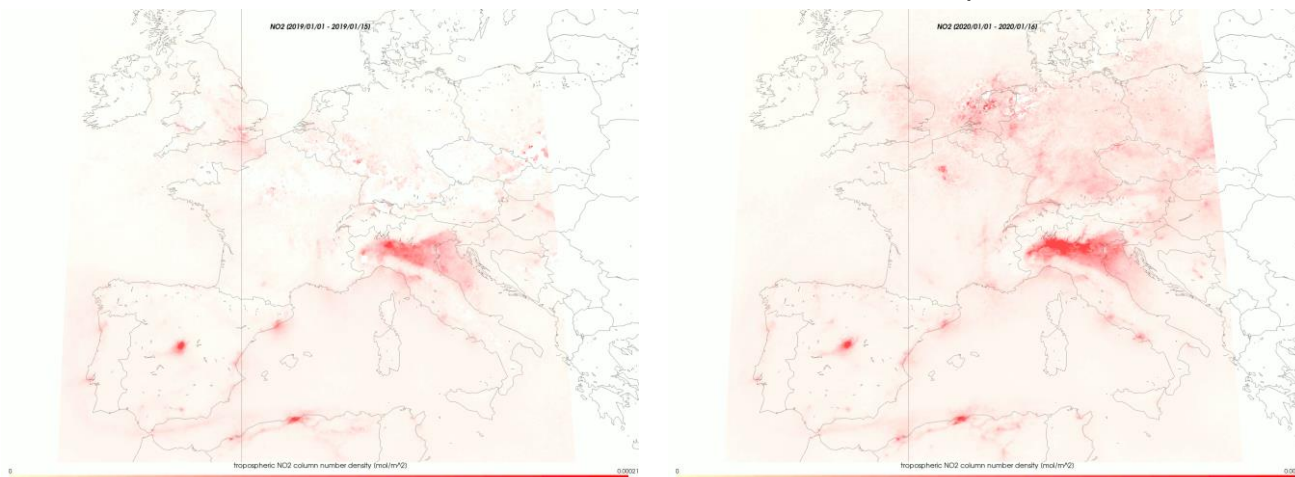
Mediante el programa creado en Python “shapefile.py” ([ver en carpeta de recursos](#)) se recortan los datos de cada área a estudiar, en este caso, para cada país europeo. Para ello se han obtenido las coordenadas de cada país de la página web de la Unión Europea “Eurostat”. El programa “shapefile.py”, dado un determinado indicador y un periodo de tiempo, realiza lo siguiente:

- Selecciona todos los datos entre esas dos fechas y para cada país objeto de estudio.
- Filtra todas las medidas con calidad adecuada que hay en cada país, para cada día y hace la media.

La salida de “shapefile.py” es un fichero que contiene la media de concentración de cada variable por país y fecha. Con estos ficheros se crearán las gráficas que muestran la evolución por país y día de cada variable, y que permitirá analizar la correlación entre datos de distintos periodos, por ejemplo, los datos del 2019 con los del 2020. Este último proceso es especialmente pesado, pues para tratar los datos de un mes se ha tardado un total de aproximadamente 50 horas.

4.5 Visualización y exportación

Una vez se han obtenido los datos de cada área a estudiar, se ha utilizado la herramienta VISAN para la visualización y análisis de los datos. VISAN es una herramienta de código abierto, proporcionada dentro del Atmospheric Toolbox de Copernicus, que interactúa a través de una interfaz de línea de comandos en Python. A través de VISAN se visualizan los datos obtenidos en forma de mapas:



Mapa de NO₂ del primer semestre 2019

Mapa de NO₂ del primer semestre 2020

Fig. 3: Mapa comparativo de NO₂

El resto de mapas de contaminación por elementos pueden ser consultados en la página web. El resto de gráficas y tablas de resultados se han obtenido a través de varios Jupyter notebooks realizados, principalmente el creado con el nombre “resultados.ipynb” ([ver en carpeta de recursos](#)) que es con el que se han creado las gráficas y las tablas comparativas del proyecto.

4.6 Mapas Earth Engine

También se han elaborado una serie de scripts en Earth Engine aprovechando las posibilidades que ofrece esta herramienta con sus diferentes datasets (Gorelick, 2017) lo que ha permitido realizar comparaciones entre los datos de Earth Engine y los resultados propios generados (<https://miguelsoito.eu/proyecto> apartado “Con Earth Engine”). También se han generado mapas de contaminación para determinadas ciudades de Europa (<https://miguelsoito.eu/proyecto> apartado “NO₂ en ciudades”).

5. Resultados

Una vez procesados y analizados todos los datos obtenidos de Copernicus se han obtenido como resultado del proyecto:

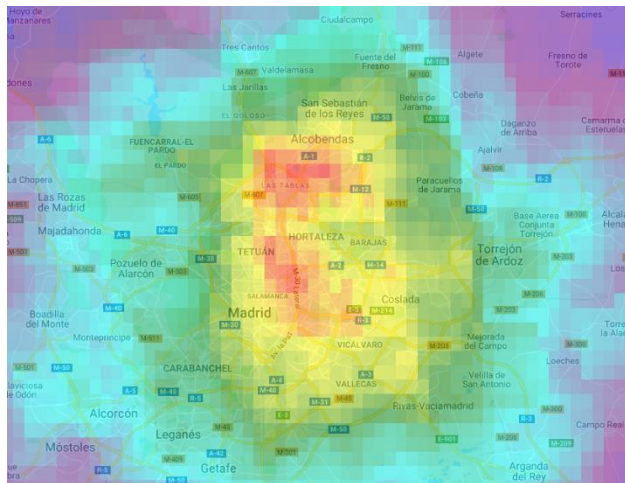
- **120 mapas** (24 mapas x 5 indicadores): Un mapa para cada indicador estudiado y para cada quincena durante los 6 primeros meses del 2019 y del 2020.
- **75 gráficos** comparativos por indicador y país (15 países x 5 indicadores) y otros **75 gráficos** con los datos sólo del año 2020: Una gráfica por cada indicador y elemento comparando la situación de los 6 primeros meses del 2019 y 2020.
- **19 mapas** en Earth Engine donde se compara la situación antes y después del inicio de la pandemia en 14 ciudades europeas y otros.
- **Una página web** que recoge toda la información del proyecto y que dispone de información más detallada para España a nivel de Comunidades Autónomas y Provincias con datos obtenidos de repositorios de datos públicos.

Con todos estos resultados generados se ha podido comprobar que, en la mayoría de los casos estudiados, los indicadores analizados disponen de valores menores después del confinamiento que antes de este, aunque no todos los gases han tenido un comportamiento equivalente.

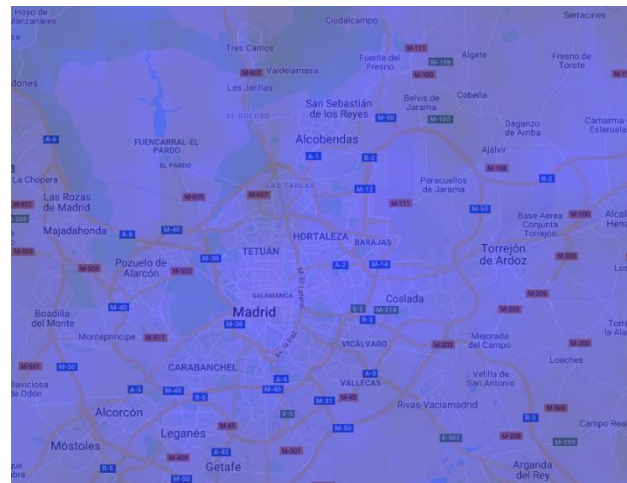
El contaminante en el que mejor se observa el cambio es el dióxido de nitrógeno (**NO₂**), ha sido el indicador que más rápido ha reflejado la reducción de la movilidad producida en el primer confinamiento. El NO₂ ha disminuido de forma considerable justo al poco de producirse las restricciones, en comparación con otros elementos como, por ejemplo, el O₃ o el CO. Comparando un periodo de tiempo antes del confinamiento con otro posterior (una vez que las restricciones se empiezan a flexibilizar) tenemos estos mapas: <https://miguelsoito.eu/proyecto/no2.html>

Más concretamente en países que fueron más golpeados por la pandemia y que consecuentemente tuvieron medidas más duras como puede ser el caso de España o Italia, vemos que, de febrero a junio de 2020, la concentración de NO₂ media baja un 26,5% y un 50.2% respectivamente. Si hacemos una estadística general, de febrero a junio de 2020, la concentración de NO₂ baja en media un 20% en los distintos países que hemos analizado.

Si la comparación la hacemos localmente con ciudades como Madrid, Barcelona o la zona norte de Italia, por ejemplo, se puede apreciar una gran diferencia de la situación del NO₂, antes y después del confinamiento. Esta es la situación de Madrid:



Madrid antes del confinamiento



Madrid después del confinamiento

Fig. 4: Comparativa de Madrid antes y después del confinamiento

Ha resultado curioso que el O_3 ha tenido su máximo justamente en el inicio del confinamiento (mes de marzo), pero finalmente ha disminuido hasta llevar al valor mínimo de todo el periodo estudiado en el mes de junio (véase <https://miguelsoto.eu/proyecto/o3.html>).

Algo similar ha ocurrido con el CO (véase <https://miguelsoto.eu/proyecto/co.html>). Llama la atención que este contaminante ha subido bastante en 2020 con respecto a sus valores 2019 y eso que una vez pasado el confinamiento ha tenido el mínimo del periodo analizado en todos los países. Esto indica que, para este contaminante, proveniente principalmente de la combustión de combustibles fósiles y la oxidación atmosférica del metano, se reflejan más lentamente los cambios en la atmósfera puesto que, como ocurre con el CH_4 es un gas más estable y tiene una duración mayor.

	2019	2020	pre	lockdown	post	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Alemania	0,0341193	0,0345176	0,0349877	0,0360535	0,0296647	0,0342113	0,0348275	0,0366395	0,0374248	0,0343637	0,0296647
Austria	0,0306788	0,0310696	0,0312958	0,0324176	0,027052	0,0310675	0,0310749	0,0325762	0,0342461	0,030423	0,027052
Bélgica	0,0341566	0,0347719	0,034979	0,0367274	0,0295374	0,0342223	0,0348776	0,0371661	0,0378274	0,0350616	0,0295374
Croacia	0,0336814	0,0344235	0,034924	0,0358606	0,0295632	0,0348098	0,0345573	0,0357527	0,0382095	0,0336655	0,0295632
Dinamarca	0,0345792	0,0349678	0,0357648	0,0364201	0,0294744	0,0353475	0,0357877	0,0374078	0,038059	0,0339322	0,0294744
Eslovenia	0,0325696	0,0329066	0,0333625	0,034211	0,0283516	0,0331633	0,0332803	0,0343912	0,0361496	0,0321501	0,0283516
España	0,0302681	0,0304365	0,0300683	0,0318657	0,0275919	0,0295146	0,0305277	0,0311629	0,0329748	0,0308837	0,0275919
Francia	0,0325375	0,0330954	0,0332243	0,0348596	0,0283624	0,0324493	0,033325	0,0350391	0,0359699	0,0334556	0,0283624
Irlanda	0,0327965	0,0334232	0,0337678	0,0351995	0,0279166	0,0330789	0,0339981	0,0358332	0,0362538	0,0336077	0,0279166
Italia	0,0322788	0,0327443	0,0326865	0,0342195	0,0287432	0,0324275	0,032828	0,0340168	0,0357485	0,0327163	0,0287432
Países Bajos	0,034765	0,0352961	0,0355175	0,0370709	0,0300317	0,0350949	0,0354568	0,0376466	0,0383622	0,0352073	0,0300317
Portugal	0,0317871	0,0319076	0,031647	0,0334238	0,0288784	0,0312349	0,0315771	0,033062	0,0337851	0,032378	0,0288784
Reino Unido	0,0330161	0,0336049	0,0339569	0,0355405	0,0282029	0,0334146	0,0334054	0,0360157	0,0367834	0,0338073	0,0282029
República Checa	0,0335766	0,0336563	0,0340783	0,0350364	0,0290875	0,0334012	0,0340083	0,0358007	0,0366693	0,0330044	0,0290875
Suiza	0,0285924	0,0292094	0,0291273	0,0307278	0,0255655	0,0290408	0,0290508	0,0301458	0,0319526	0,0294868	0,0255655

Fig. 5: Tabla comparativa de datos de Monóxido de carbono (CO) por países

El SO_2 , un contaminante fundamentalmente de origen antropogénico y que tiene una afección muy negativa en la salud humana y en el clima, también ha aumentado sus valores desde 2019 a 2020, pero ha reflejado rápidamente el efecto del confinamiento bajando ya en el mes de abril y mayo (<https://miguelsoto.eu/proyecto/so2.html>).

El Metano (CH_4), el contribuyente al efecto invernadero más importante después del CO_2 , según los datos generados ha tenido un comportamiento desigual en la península ibérica que en el resto de los países europeos. Si bien el resto de Europa ha disminuido tras el confinamiento, en España y Portugal, justo disminuyó en abril, en pleno confinamiento, pero aumentó en seguida en junio. De todas formas, los cambios en el CH_4 han sido menores que en otros gases, debido a que es un gas estable y duradero,

por lo que, los efectos que ha podido tener el confinamiento se reflejan más lentamente. También hay que destacar que este gas ha tenido un crecimiento entre el primer semestre de 2020 con respecto al de 2019, algo que resulta preocupante (<https://miguelsoto.eu/proyecto/ch4.html>).

En la web del proyecto se muestra información más detallada y los resultados sobre España a nivel de Comunidades Autónomas y provincias con datos obtenidos de repositorios de datos públicos (<https://miguelsoto.eu/proyecto> apartado “Desde la Tierra”).

6. Conclusiones del análisis de los datos de Copernicus

La realización de un confinamiento tan restrictivo en el primer semestre de 2020 ha supuesto una gran oportunidad para realizar estudios como este, sobre el medio ambiente, que de otra manera no habrían sido posibles.

Analizados los resultados para los distintos indicadores contaminantes estudiados en esta investigación, a partir de datos de Copernicus, se puede afirmar que las medidas de confinamiento y reducción de la movilidad han tenido un efecto positivo en la atmósfera, reduciendo los valores de prácticamente todos los contaminantes durante el periodo analizado. Ahora bien, no todos los indicadores han reaccionado de la misma manera, hay algunos como el NO₂ que rápidamente han reflejado los cambios, pero hay otros como el O₃, el CO o el CH₄ que han tardado más. Esto por un lado es consecuencia de que son gases más estables y tienen una duración mayor, por lo que se tarda más tiempo en visualizar los cambios, pero por otro puede ser un indicador de que nos encontramos cerca de un punto de no retorno en el que ni siquiera tomando medidas drásticas podría detenerse el aumento de estas emisiones.

Con los datos obtenidos, la reducción de los gases contaminantes no ha sido tan importante como se podría esperar después de unos confinamientos tan restrictivos, donde se paró la mayor parte de la actividad empresarial y se redujo considerablemente el uso de vehículos, incluidos aviones, así como indicaban previamente artículos sobre el tema (Xu, 2020) (Bashir, y otros, 2020) (Tobías, y otros, 2020) y otros. Pero esta conclusión también ha sido indicada por publicaciones más recientes (Shi1, y otros, 2021) donde afirman que “las mejoras en la calidad del aire fueron más limitadas de lo que sugerían informes previos”.

Ha sido una sorpresa el resultado obtenido sobre que las medias de los valores de contaminantes durante el primer semestre de 2020 han sido mayores que durante el mismo periodo de 2019. Esto a pesar de las duras medidas restrictivas llevadas a cabo en 2020. Hay que llamar la atención sobre este dato, pues es un indicador de alarma en cuanto al crecimiento que la contaminación está teniendo año tras año, por lo que es urgente tomar medidas de políticas ambientales que protejan el medio ambiente y que permitan romper esa tendencia cuanto antes. Estas conclusiones son las que han llevado este proyecto a la propuesta de una acción local, que veremos en los siguientes apartados, con el fin de disminuir las emisiones contaminantes.

7. Sustitución de la caldera del instituto

El proyecto más adecuado al creciente desarrollo de las energías renovables, el más rentable y el que más ahorro de emisiones supondría es la instalación de bombas de calor aire-aire (aeroterminia) alimentada por paneles solares fotovoltaicos. Es una tecnología cada vez más económica y con muchas posibilidades.

En un principio se propuso el uso de la energía solar térmica para así aprovechar la instalación de los radiadores existentes pero este sistema no era factible al plantearse un sistema de calefacción sin ningún tipo de apoyo de la caldera, ya que el objetivo del proyecto era eliminar por completo la utilización de energías fósiles.

El diseño de la instalación se lleva a cabo en el IES Pintor Antonio López situado en la localidad de Tres Cantos, Madrid.

7.1 Instalación

7.1.1 Aeroterminia

Las bombas de calor se deben adaptar a las aulas de forma precisa, adecuando la instalación a la demanda. La potencia instalada de paneles solares dependerá de la cantidad de energía eléctrica que se requiere para alimentarlas. Por lo que lo primero que se debe precisar es el número necesario de bombas de calor para cubrir la necesidad calorífica del edificio, dicho de otra forma, habrá que calcular la carga de calefacción o refrigeración. Esta es única en cada espacio cerrado; y para realizarlo se toma como referencia un aula de la tercera planta, en una esquina. Se elige esta localización con el fin de no obtener un resultado minimizado, sino al contrario. Es el aula con mayores pérdidas caloríficas ya que tanto sus dos paredes como el techo están en contacto con el exterior.

7.1.2 Carga de calefacción en invierno

La carga de calefacción se ha estudiado sólo durante los meses de invierno. Según un estudio del clima en la localidad de Tres Cantos (Spark, 2021) ([ver en carpeta de recursos](#)), la temporada fresca dura 3,7 meses, del 14 de noviembre al 4 de marzo, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 14 °C. Para simplificar, el invierno se considera desde octubre hasta marzo ya que son los meses de menores temperaturas y es cuando se busca calentar el centro.

Siendo por tanto la CARGA TOTAL DE CALEFACCIÓN igual a 5.458 kcal/h y la carga de calefacción por unidad de superficie por tanto 95,82 kcal/hm². La hoja de cálculo se puede consultar en la [carpeta de recursos](#).

Aclarar que 5.458 kcal/h (= 6347,65 W) es la potencia calorífica deseable que se necesita instalar para cubrir las necesidades del aula. Dividiendo ese valor entre la superficie del aula, se obtiene que por cada m² se debe instalar 111,36 W.

Con ayuda de los planos de los edificios, hacemos una estimación de la superficie a calentar y la potencia calorífica total: **301,1kW**.

7.1.3 Carga de verano

La carga de refrigeración se ha estudiado para los meses de mayo, junio y septiembre, ya que es cuando se necesitará una ventilación en el centro. La temporada calurosa, sin embargo, dura 2,9 meses, y se considera desde el 14 de junio al 9 de septiembre, y la temperatura máxima



promedio diaria es más de 28 °C. La hoja de cálculo se puede consultar en [la carpeta de recursos](#).

Se observa que la carga total por refrigeración (5365 kcal/h) es menor que la de calefacción, por lo que la potencia eléctrica calculada cubrirá la demanda durante el verano también y no habría que sobredimensionarla.

7.1.4 Elección de modelo de bomba de calor

Hay que tener en cuenta ciertas condiciones a la hora de elegir el modelo ideal de aire acondicionado: Modelo inverter, que sea silencioso, más eficiente al calefactar (ya que funcionará en su mayoría para este fin), que cubra la demanda calorífica de 111,36W por m² y que sea económicamente sea viable.

Nos decantamos finalmente por el *Aire acondicionado 1x1 Bosch climate 8500 4500 fg*. Su ficha técnica ([ver en carpeta de recursos](#)) informa de que tiene un SCOP de 5,1 y un consumo nominal en **calefacción** de 1 461 W (80 W menos que el de **refrigeración**), entre otros datos.

Para calcular el número necesario de dispositivos, se multiplica el SCOP y el consumo eléctrico para obtener una aproximación de la potencia calorífica individual (= 7451,1 W); y después es dividido entre la potencia calorífica total: $301\ 100 \div 7\ 451,1 = 40,4$

Necesitamos aproximadamente 40 bombas de calor de este modelo y su coste es de 47.789,6 €. Además, el coste de instalación de cada bomba de calor es de 274 €. Lo que elevaría el coste total a 58 749 €.

7.1.5 Consumo estimado en kWh

Las bombas de calor no están continuamente encendidas las horas que se requiere calefacción. Gracias al termostato, se encienden a una temperatura mínima y se apagan cuando la habitación alcanza una temperatura idónea. Depende de muchos factores como la cantidad de personas en el espacio, la ventilación, el aislamiento de las paredes... Se introduce entonces un coeficiente de reducción que se estima en torno a 0,4. Es decir, la bomba de calor estará un 40% del tiempo potencial de uso encendida. Idóneamente, un estudio habría sido lo propio para calcular con mayor fiabilidad este coeficiente. Midiendo el consumo de una bomba de calor instalada en el aula durante una semana nos daría un punto de referencia clave. Debido a la ventilación natural forzada, no se dieron las condiciones para efectuarlo.

En las horas de potencial uso no se consideran ni los días festivos ni los fines de semana y para no sobredimensionar la instalación, se considera que en septiembre y en mayo no se necesitará ni calentar ni refrigerar las aulas al menos durante dos semanas. El edificio principal demanda calefacción el doble de tiempo

Por último, se incide en que el consumo es mayor durante la refrigeración, es decir, tiene una mayor eficiencia calentando. Esta diferencia entre consumos es de un 0,05%.

En total, se consume anualmente una estimación de **59 121,12 kWh**. Tabla de Cálculo [en carpeta de recursos](#).

7.1.6 Paneles solares fotovoltaicos

7.1.6.1 Orientación óptima

La radiación solar que llega a la atmósfera externa varía entre los meses de invierno y verano, el valor medio es de 1353 W/m² (constante solar). Depende de la latitud del lugar, la inclinación de la superficie respecto a la horizontal y orientación respecto al sur (azimut). Al variar la altura del sol respecto al horizonte desde invierno (menor altura) a verano (mayor altura), la inclinación

óptima del colector para que la radiación incida perpendicularmente variará de forma inversa: mayor inclinación en invierno y menor en verano.

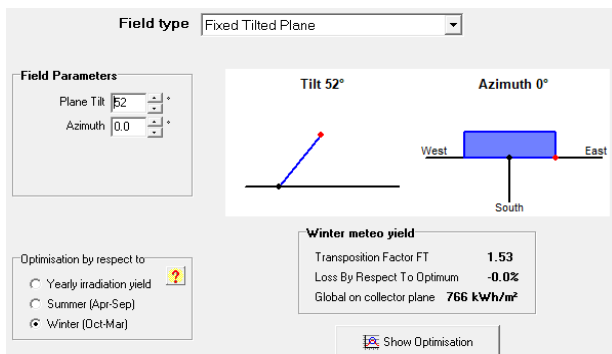


Fig. 6: Inclinación idónea (todo el año). Fuente: PVSYS.

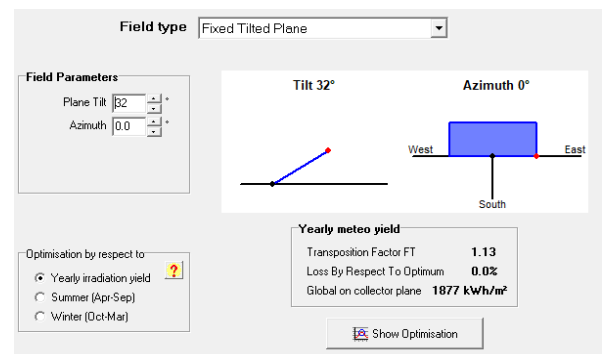


Fig. 7: Inclinación idónea (invierno). Fuente: PVSYS.

Por otro lado, para ser más precisos, el programa PVSYS (versión 5.0) nos proporciona el ángulo óptimo de inclinación para los distintos meses del año y la media aritmética de estos. Una vez especificada la ubicación exacta, la inclinación óptima que PVSYS nos proporciona para todo el año es de 32°. En este ángulo es donde mayor radiación va a recibir en total a lo largo del año, aproximadamente 1877 kWh/m² en los doce meses.

También nos interesa el dato del ángulo donde reciba la mayor radiación en invierno que el programa considera desde octubre hasta marzo, 53°. Recibirá una energía de 766 kWh/m² al año.

7.1.6.2 Elección de inclinación: ¿Balance neto o autoconsumo instantáneo?

A la hora de elegir la inclinación idónea, se debe hacer un análisis alrededor de la modalidad de consumo por la que nos decantemos:

- El autoconsumo instantáneo consiste en consumir en el mismo instante la energía que se produce, sin posibilidad de almacenamiento. Si en un día nublado no hay producción, la energía eléctrica consumida provendrá de la red común.
- El balance neto trabaja con la red eléctrica como si fuera una batería infinita. Nos permite verter a la red todo el exceso de energía eléctrica que hayamos producido a lo largo del año, y verlo descontado en la factura de la luz.

En España, en el momento en el que se está redactando este proyecto, no es una medida permitida. Sin embargo, observando el aumento de plantaciones fotovoltaicas en el país, es inevitable la llegada de esta legislación. Ya se presentan opciones cercanas, como la compensación por excedentes en el Real Decreto 244/2019.

Elegir una u otra modalidad influye directamente en la inclinación de nuestros paneles: Sabiendo que el proyecto tiene una proyección de por lo menos veinticinco años, si lo consideramos con la modalidad de balance neto, aprovecharíamos el 100% de la energía producida; nos interesa la inclinación de mayor producción, la que está enfocada a todo el año (32°). En cambio, si quisiéramos instalarlo en un futuro cercano, se opta por el autoconsumo instantáneo; y como el mayor consumo es en invierno, la inclinación ideal es la que está enfocada hacia el sol del invierno (52°). Finalmente, se resuelve esta toma de decisión invirtiendo en una estructura que permita variar el ángulo entre 30° y 50°. De esa forma, con una misma instalación, podremos adaptarnos en el futuro a lo que convenga.



7.1.6.3 Elección de producto

Primeramente, calculamos la energía eléctrica que consumirán todas las bombas de calor instaladas. El cálculo se efectúa dividiendo la potencia calorífica instalada entre el SCOP: $301 \div 5,1 = 59$ kW de energía eléctrica. En otras palabras, se debe hacer una instalación de paneles solares que sumen 59 kW de potencia.

Con ayuda de los modelos de kits fotovoltaicos ofertados en la empresa Autosolar, la instalación se comprende de: 151 paneles solares de 400kW *Monocrystalino PERC* de la marca ERA, un inversor, cables, un contador bidireccional *SolarEdge Energy Meter Modbus*, una pinza toroidal, conectores *Weidmuller PVstick* y 38 estructuras para Suelo Regulable entre 30° y 50° (ver fichas técnicas [en carpeta de recursos](#)). El coste se eleva a **41.929,76 €** en total.

7.1.6.4 Cálculo de la producción estimada

Producción estimada anual a una inclinación de los paneles solares de 32° :

$$1877 \text{ kWh} \cdot 0,195 \cdot 1,98 \cdot 151 = \mathbf{109\ 431 \text{ kWh}}$$

- 1877 kWh (como indica en la Fig. 6) es la radiación solar a lo largo de un año sobre un metro cuadrado a 32° .
- 0,195 es el coeficiente de eficiencia de los paneles solares (19,5%).
- 1,98 m² es la superficie de un panel.
- 151 es el número de paneles solares instalados.

De la misma forma, pero con un ángulo de 52° y sustituyendo el valor de la radiación solar por 766 kWh/m² (como indica en la Fig. 7): $766 \cdot 0,195 \cdot 151 \cdot 1,98 = \mathbf{44\ 658 \text{ kWh}}$

7.1.6.5 Localización

El instituto está localizado en las coordenadas $40^\circ 36' 07.5'' \text{N } 3^\circ 42' 09.1'' \text{W}$.

La superficie necesaria disponible para la colocación de los paneles es de 302m². La superficie del tejado del edificio principal, más las de las otras instalaciones sobrepasan con creces este valor. La instalación se efectuaría en este espacio.

7.2 Análisis de las curvas de consumo y producción

7.2.1 Consumo instantáneo

Observamos que la curva de consumo medio y de producción media coinciden en los meses cálidos (marzo – octubre).

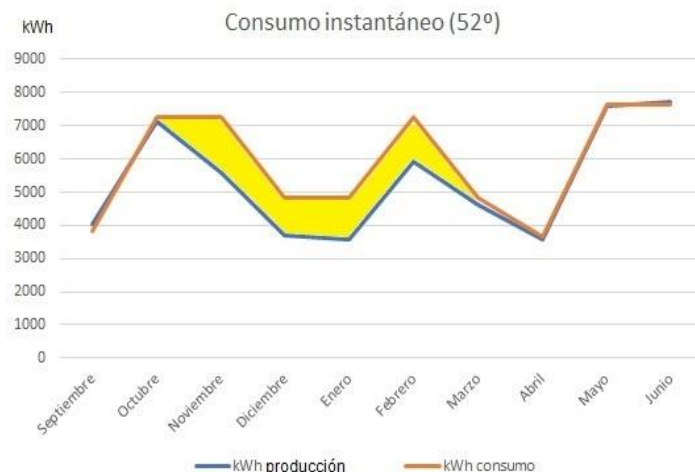


Fig. 8: Curvas de producción y consumo en autoconsumo instantáneo.

La gráfica indica una eficiencia excepcional ya que el centro consume energía durante el día, cuando se produce. No es el caso, por ejemplo, de una vivienda, que, entre semana, durante las horas de sol, no hay nadie en el hogar para consumir esa energía.

Aun así, cuando llega el invierno, la producción no cubre el consumo. El área sombreada en amarillo es la energía eléctrica que habrá que suministrar desde la red eléctrica. Esto es el sumatorio de las diferencias entre el consumo y la producción, 5 650,7 kWh.

7.2.2 Balance neto

En cambio, cuando observamos las curvas propias del balance neto, es opuesta a la anterior. En este caso, la producción está muy por encima del consumo porque la energía excedente que no es utilizada se vierte a la red y aprovechamos toda la capacidad de la instalación. Exactamente 62 766 kWh al año se vertería a la red, valorado en 7.531,9€ al año.

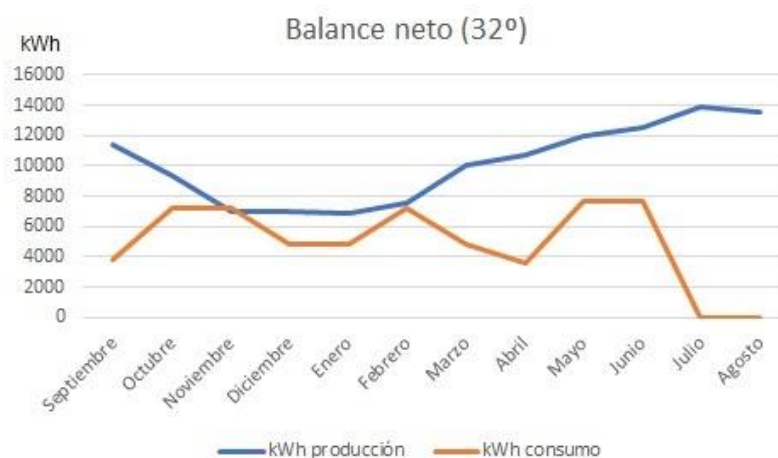


Fig. 9: Curvas de producción y consumo para balance neto.

Estos excesos tan grandes se traducen en que una instalación de 59kW enfocada hacia balance neto se sobredimensionaría.

7.3 Instalación enfocada hacia el uso del balance neto

7.3.1 Cálculo de la potencia de la instalación

Una instalación idónea es la que se adapta al consumo de las bombas de calor. Optamos como referencia el cálculo estimado hecho en el apartado 7.1.6.4. Se establece primero el factor de relación entre la producción anual (109 431 kWh) y la potencia instalada (59 kW), propia de la instalación y de la localización: $109\ 431 / 59 = 1\ 854,76$ kW. Dicho de otra forma, al año se produce 1 854,76 veces la potencia instalada en kW.

Al dividir el consumo anual (59 121,12 kWh) entre la ratio calculada anteriormente, se obtiene la potencia de una instalación que se adapta mejor al consumo de las bombas de calor:

$$59\ 121,12 / 1\ 854,76 = \mathbf{31,9\ kW}$$

Optamos por un kit ([ver en carpeta de recursos](#)) de 33 kW de potencia que incluye 85 paneles con una eficiencia del 19,5% y todos los elementos necesarios para instalarlos. El precio es de 19.867,35€.

La producción anual es de $1877\text{kWh} \cdot 0,195 \cdot 1,98 \cdot 85 = \mathbf{61\ 600,3\ kWh}$ que observamos se acerca mucho al consumo anual (59 121,12 kWh).

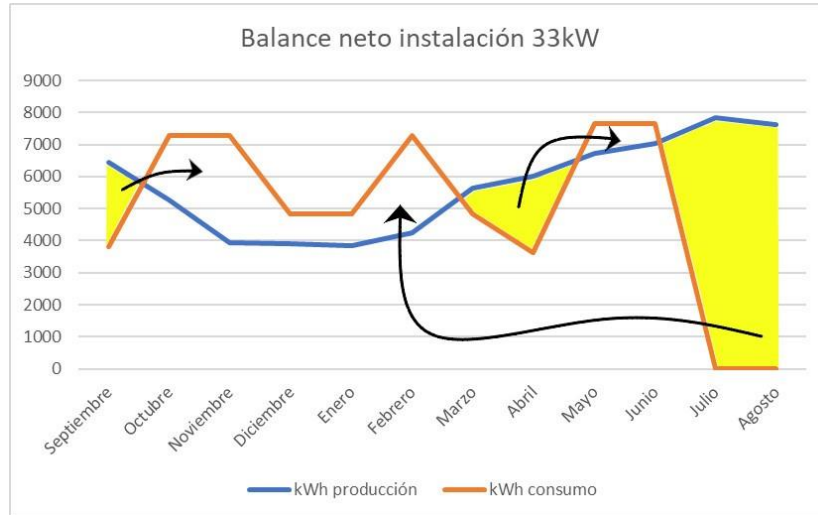


Fig. 10: Curvas de producción y consumo con balance neto (33kW).

La energía excedente (sombreado en amarillo) se vierte a red y cuando lleguen los meses de frío y la demanda sea mayor que la oferta, se consume energía de la red; es decir, utilizamos la energía excedente producida durante la época de mayor producción cuando no cubra el consumo eléctrico de las bombas de calor, en invierno. De esta forma, al final del año sobran solamente 2 479,18 kWh, que se valora en 297,5 €.

7.4 Recuperación de la inversión

Para establecer el ahorro que representaría cada una de las instalaciones se tiene en cuenta el consumo de petróleo C de la caldera (16485 L/año) y su precio actual (0,818 €/L). Es importante tener en cuenta que, al año, el centro paga 13.484,73 € en calefacción. Además, consideramos la duración del análisis los 25 años de eficiencia estimada de los paneles.

7.4.1 Instalación de 59 kW enfocada al autoconsumo instantáneo

El precio del material total es de 89.719,36 €, el de la instalación de la aerotermia es de 10.960 € y el de la instalación fotovoltaica se valora en un 30% el precio del material (12.578,9 €). Nos enfrentamos a una inversión de **113.258,28 €**.



Fig. 11: Recuperación de inversión en autoconsumo instantáneo.



Haciendo una media de los precios del kWh en horas llano y pico, más el IVA, el kWh tiene un coste de 0,12 €; multiplicándolo por la energía suministrada por la red eléctrica (5650,7 kWh), obtenemos que habría que pagar anualmente 678,08 € por la calefacción.

Al cabo de 25 años, existe un ahorro de 508.609,66€. Cálculos en [carpeta de recursos](#).

El valor del VAN obtenido (para una t del 5%) es de 211.625,33€, mayor que 0. La inversión es rentable. El valor del TIR (rentabilidad) obtenido es del 15,32%.

La inversión se recupera al cabo de 8 años y medio.

7.4.2 Instalación de 33 kW enfocada al balance neto

Los materiales suman 67.656,95 €, y las instalaciones 30.827,3 euros.

Al año, verteríamos a la red 2 479,18 kWh, que la red eléctrica nos lo pagaría a 297,5€.

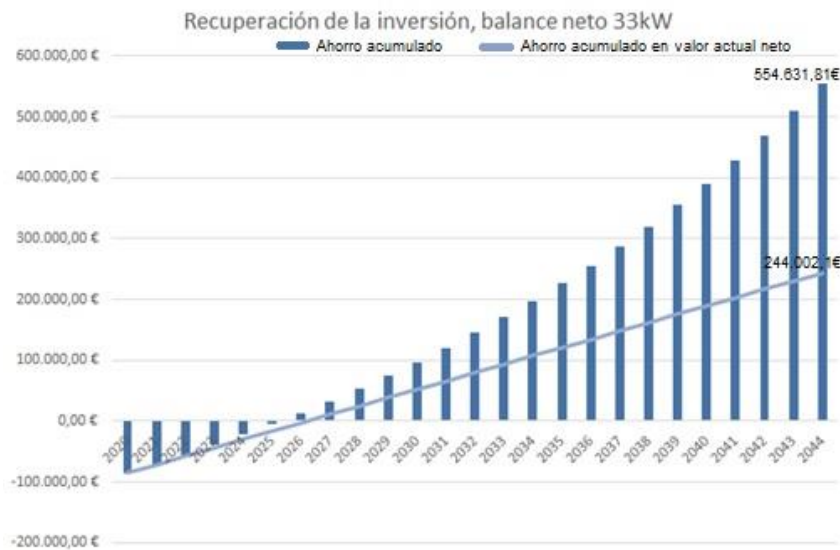


Fig. 12: Recuperación de inversión para la instalación de 33kW con balance neto.

El ahorro al cabo de 25 años es de 554.631,81€. Cálculos en [carpeta de recursos](#).

El valor del VAN obtenido (para una t del 5%) es de 244.002,1€, mayor que 0. La inversión es rentable. El valor del TIR (rentabilidad) obtenido es del 18,23%.

La inversión se recupera en 6 años y 3 meses.

Las formas de financiación engloban principalmente ayudas gubernamentales (fondos FEDER (Unión Europea, 2020) (PREE, 2020), Programa de Rehabilitación Energética de Edificios PEER (PREE, 2020) (IDAE, 2020), ayudas desde el ayuntamiento...)

7.5 Impacto medioambiental

Cabe destacar que la caldera de gasóleo es el elemento más contaminante de todo el centro. Al año se queman 16485 L de gasolina para calentar el instituto. Si cada litro libera 2,6 kg de CO₂, 16 485 L × 2,6 kg = **42,86 toneladas** de CO₂ se emiten anualmente (IDAE, 2020). Para hacernos una idea, equivale al CO₂ que absorbe 12,24 hectáreas de bosque. Por otra parte, un panel fotovoltaico contamina a lo largo de su producción casi 500 kg de CO₂.

En la instalación de 59 kW, equivaldría a 75,5 toneladas de CO₂ que tardaríamos en compensar en 1 año y 9 meses. En 25 años, se llega a ahorrar con autoconsumo instantáneo **995,5 toneladas de CO₂** porque pese a que se tenga que usar energía proveniente de la red, la compañía eléctrica contratada asegura que ofrece una energía 100% renovable, libre de emisiones.



La otra instalación de 33 kW, que incluye 85 paneles tiene una **huella de carbono** de 42,5 toneladas de CO₂. Se compensaría en menos de un año. Se vierte a la red anualmente 2 479,18 kWh, que se traduce en 1 016,46 Kg de CO₂ (ICAO, 2020). En 25 años, se ahorran **1054 toneladas de CO₂**.

8. Conclusiones del proyecto de sustitución de la caldera

- Es perfectamente viable una instalación de estas características, ya sea de las diferentes modalidades u opciones existentes. Si se busca un cambio inmediato, la instalación de 59 kW es la idónea. Gracias a la estructura variable, nos podremos adaptar al futuro cambio legislativo, y aprovechar al máximo la instalación. Si se elige esperar hasta la introducción del balance neto, se recomienda la instalación de 33 kW y así no enfrentarse a una inversión tan grande.
- La energía solar funciona excepcionalmente en centros educativos y se debe impulsar su uso. No solo presenta una ventaja económica y ecológica; si no que, pedagógicamente hablando, puede enseñar valores y conocimientos como el ahorro, la conciencia ecológica, la tecnología de energías renovables y dispositivos de gran eficiencia, el cuidado del planeta...
- El balance neto, pese a que aún no es una medida instaurada, será la única forma de obtener toda la energía del país proveniente de fuentes renovables. La modalidad de compensación de excedentes es un punto medio innecesario que atrasa el desarrollo español en comparación con el europeo. Es importante luchar para que se imponga lo antes posible para cumplir los objetivos de la Unión Europea de no emitir emisiones de CO₂ para el año 2050.
 - Se demuestra cómo a nivel económico es una enorme ventaja con respecto al autoconsumo instantáneo, se consigue el mismo objetivo con casi la mitad de la instalación original.
- La aerotermia es la manera más eficiente de calentar o refrigerar un espacio. Una ventaja clara es que con una misma instalación se pueden hacer dos procesos inversos muy necesarios debido a la localización. En España se necesita calentar tanto como refrigerar. Además, la eficiencia es del 510%, que no se consigue fácilmente con ninguna otra tecnología.
- Este proyecto debe ir acompañado del apoyo del alumnado y profesorado para que salga hacia delante. La concienciación medioambiental basada en argumentos científicos es esencial en la educación actual ya que, en un futuro, la energía solar se impondrá en todas las viviendas de España. Existe una gran obstaculización legislativa que hay que romper informando de la actual injusticia climática a los próximos consumidores.
- Vías de desarrollo:
 - La presencia de la COVID-19 ha puesto de manifiesto la importancia de renovar el aire de las aulas regularmente, lo que ocasiona en invierno una incomodidad con la ventilación natural forzada. La aerotermia presenta la opción de renovar el aire constantemente añadiendo un sistema de ventilación, que en vez de hacer circular el aire en circuito cerrado (recirculación), permite ajustar la tasa de renovación con aire limpio procedente del exterior. Habría que estudiar un modelo que nos permita esa opción y hacer un análisis de consumo para establecer la instalación ideal.
 - Teniendo en cuenta las ventajas de aprovechamiento energético que nos brinda el balance neto, se debería estudiar el dimensionado de la instalación con vistas a la futura recarga de los vehículos eléctricos.

Bibliografía

- Bashir, M. F., Ma, B., Bilal, Komal, B., Bashir, M. A., Tan, D., & Bashir, M. (2020). Correlation between climate indicators and COVID-19 pandemic in New York, USA. *Science of The Total Environment*, 728. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138835>
- Castro Gomez, M., & DAlessio, M. (6 de Mayo de 2020). Monitoring Pollution using Sentinel-5P data on ONDA. Obtenido de <https://register.gotowebinar.com/recording/recordingView?webinarKey=6178677411265733899®istrantEmail=miguel%40soto.es>
- Gorelick, N. H. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*(202), 18-27. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- ICAO, 2. (23 de noviembre de 2020). *ICAO carbon emissions calculator. (2016). ICAO environment.* . Obtenido de <https://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx>
- IDAE, 2. (10 de noviembre de 2020). *IDAE. (2011, noviembre). FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL -ENERGÍA PRIMARIA y FACTORES DE EMISIÓN DE CO2 - 2010.* Obtenido de [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_\(2010\)_931cce1e.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Factores_de_Conversion_Energia_y_CO2_(2010)_931cce1e.pdf)
- PREE, F. (1 de diciembre de 2020). *Programa de Rehabilitación Energética de Edificios - FENERCOM.* Obtenido de <https://www.fenercom.com/actuacion/programa-pree/>
- Shi1, Z., Song1, C., Liu, B., Lu1, G., Xu1, J., Vu, T. V., . . . and Harrison1, R. M. (2021). Abrupt but smaller than expected changes in surface air quality attributable to COVID-19 lockdowns. *Science Advances*, 7(3). doi:<https://doi.org/10.1126/sciadv.abd6696>
- Spark, W. (18 de Enero de 2021). *Clima promedio en Tres Cantos, España, durante todo el año - Weather Spark. (2021).* Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/36954/Clima-promedio-en-Tres-Cantos-Espa%C3%B1a-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Tobías, A., Carnerero, C., Reche, C., Massagué, J., Via, M., Minguillón, M. C., . . . Querol, X. (2020). Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic. *Science of The Total Environment*, 726, 138540. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138540>
- Unión Europea, 2. (17 de noviembre de 2020). *Unión Europea. (2000). Fondo Europeo de Desarrollo Regional. Política Regional - Comisión Europea.* Obtenido de https://ec.europa.eu/regional_policy/es/funding/erdf/
- Xu, H. Y. (2020). Possible environmental effects on the spread of COVID-19 in China. *The Science of the total environment*, 731, 139211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139211>