

Trabajo Fin de Máster Máster en Ingeniería Industrial

Análisis de Aerosoles en el
Emplazamiento de Sevilla Utilizando
Datos del Espectrorradiómetro POM-02:
Caracterización e identificación de periodos
atípicos.

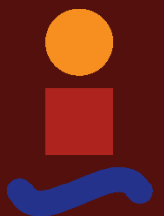
Autor: Juan Carlos Prieto Zazo

Tutor: Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

Cotutor: Manuel Antonio Silva Pérez

**Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2023



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

**Análisis de Aerosoles en el Emplazamiento de
Sevilla Utilizando Datos del
Espectrorradiómetro POM-02: Caracterización
e identificación de periodos atípicos.**

Autor:

Juan Carlos Prieto Zazo

Tutor:

Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

Investigador Contratado

Cotutor:

Manuel Antonio Silva Pérez

Profesor Titular

Dpto. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Máster: Análisis de Aerosoles en el Emplazamiento de Sevilla Utilizando Datos del Espectrorradiómetro POM-02: Caracterización e identificación de periodos atípicos.

Autor: Juan Carlos Prieto Zazo
Tutor: Miguel Larrañeta Gómez-Caminero
Cotutor: Manuel Antonio Silva Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Agradezco a mis tutores todo el trabajo realizado en este Trabajo Fin de Máster. A mis maestros y profesores, porque han constituido una parte fundamental de este camino. A mis compañeros o, mejor dicho, a mis amigos, por hacerme más amenas las horas de estudio dentro de la Escuela y también por los instantes fuera de ella.

Por último, y en el lugar más importante, a mi familia, por apoyarme en todos mis proyectos y por sostenerme en los momentos de zozobra. Jamás podré compensar toda la ayuda que me brindáis.

*Juan Carlos Prieto Zazo
Sevilla, 2023*

Resumen

El objeto del presente estudio es la caracterización de las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos medidas desde enero de 2019 hasta octubre de 2023 en la estación radiométrica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER), situada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Estas propiedades de los aerosoles atmosféricos se detallarán en el interior de este documento, y en su análisis se emplearán diagramas de dispersión y *boxplots* o diagramas de cajas para observar su variabilidad y juzgar la existencia de posibles estacionalidades.

Secundariamente, se va a tratar de componer una metodología que permita identificar días con presencia de aerosoles (calima). Para comprobar esta posibilidad, se va a llevar a cabo un procedimiento de *Machine Learning* denominado "Clustering", que consiste en un análisis de los datos clasificándolos en diferentes grupos a través de las similitudes entre los mismos. Con lo anterior, este Trabajo de Fin de Máster está dirigido a ampliar el campo de conocimiento sobre los aerosoles atmosféricos y a abrirle las puertas a futuras investigaciones en este ámbito.

Abstract

The objective of this study is the characterisation of the optical properties of atmospheric aerosols measured from January 2019 to October 2023 at the radiometric station of the Thermodynamics and Renewable Energies Group (GTER), located at the Higher Technical School of Engineering of Seville.

These properties of atmospheric aerosols will be detailed inside this paper, and their analysis will use scatter plots and box plots to observe their variability and judge the existence of possible seasonalities.

Secondly, an attempt will be made to compose a methodology to identify days with the presence of aerosols (haze). In order to test this possibility, a Machine Learning procedure called "Clustering" will be carried out, which consists of an analysis of the data by classifying them into different groups. With the above, this Master's Thesis is aimed at widening the field of knowledge about atmospheric aerosols and opening the doors to future research.

Nomenclatura

<i>AE</i>	Exponente de Ångström
<i>AOT</i>	Espesor Óptico del Aerosol
<i>DHI</i>	Irradiancia Difusa Horizontal
<i>DNI</i>	Irradiancia Directa Normal
<i>dVdlnr</i>	Distribución volumétrica del aerosol
<i>GHI</i>	Irradiancia Global Horizontal
<i>GTER</i>	Grupo de Termodinámica y Energías Renovables
<i>RI</i>	Parte compleja del Índice de Refracción
<i>SSA</i>	Albedo de Dispersión Simple

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Nomenclatura</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 El aerosol atmosférico	2
1.1.1 Impacto climático: forzamiento radiativo	2
1.1.2 Interacción aerosoles-radiación	2
2 Motivación	5
3 Objetivos	7
4 Metodología	9
4.1 Estación de medida	9
4.1.1 Radiómetro Solar Prede POM-02	10
4.2 Descripción de variables	11
4.2.1 Espesor Óptico del Aerosol	11
4.2.2 Albedo de Dispersión simple	12
4.2.3 Índice de Refracción	12
4.2.4 Distribución volumétrica de los aerosoles	13
4.2.5 Exponente de Ångström	13
4.2.6 Relaciones entre los parámetros	13
4.3 Tipos de aerosoles	14
4.4 Introducción a SKYNET	15
4.4.1 ¿Qué es SKYNET?	15
4.4.2 Flujos de análisis de datos	16
4.4.3 Procedimiento para la obtención de datos	17
5 Resultados	19
5.1 Caracterización de variables, evolución 2019-2023	19
5.1.1 Espesor Óptico del Aerosol (AOT)	19
5.1.2 Albedo de Dispersión Simple (SSA)	21
5.1.3 Índice de Refracción (RI)	22
5.1.4 Exponente de Ångström (AE)	23

5.1.5	Distribución volumétrica del aerosol (dVdInr)	25
5.2	Identificación visual de episodios de calima por radiación	26
5.3	Clustering	28
5.3.1	Fase de Entrenamiento	29
5.3.2	Identificación de días con calima por clusters	32
5.3.3	Fase de Prueba	38
6	Conclusiones	43
	<i>Índice de Figuras</i>	45
	<i>Índice de Tablas</i>	47
	<i>Bibliografía</i>	49

1 Introducción

La atmósfera es un sistema complejo que juega un papel fundamental en el desarrollo de la vida en la Tierra, debido en gran parte a su interacción con la energía radiante del Sol. Una parte de esta energía que incide sobre el planeta es absorbida, mientras que otra parte es reflejada y reemitida al espacio en longitudes de onda del infrarrojo térmico. De esta manera, se establece un balance global entre la energía procedente del Sol y la emitida por la superficie terrestre, tal y como se muestra en la Figura 1.1. Si este equilibrio se ve alterado por cualquier circunstancia, en última instancia también se verá alterado el clima del planeta.

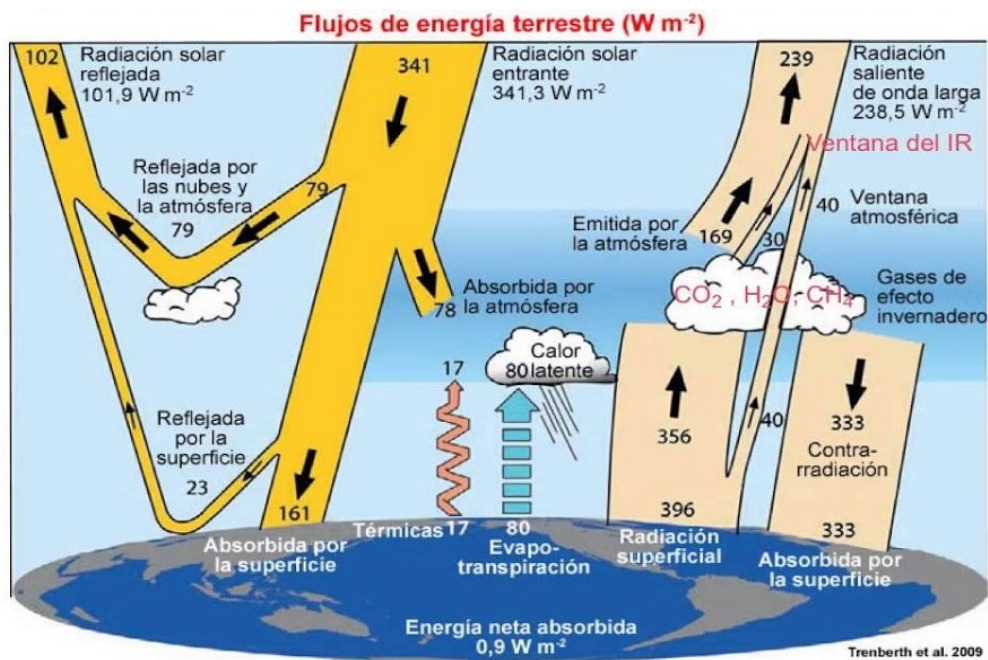


Figura 1.1 Balance energético en condiciones climáticas actuales. Unidades en $W m^{-2}$ [13].

El vertiginoso crecimiento experimentado por la actividad humana a partir de la Revolución Industrial a finales del siglo XVIII impulsó el progreso económico, tecnológico y social a escala global. Sin embargo, los numerosos avances también trajeron consigo otras consecuencias no tan positivas, como la emisión masiva a la atmósfera de sustancias que contaminan la atmósfera y que, como se verá más adelante, pueden afectar al balance energético naturalmente establecido en la

Tierra. Estas sustancias a las que se hace referencia reciben el nombre de *aerosoles atmosféricos*, y el papel protagonista que tomarán en esta investigación crea la necesidad de comenzar por los conceptos base.

1.1 El aerosol atmosférico

Un aerosol se define como un sistema formado por un gas y por partículas (ya sean sólidas o líquidas) que permanecen suspendidas en dicho gas. Cuando el gas referido es el aire atmosférico, al conjunto partícula-aire se le denomina aerosol atmosférico.

Los aerosoles atmosféricos varían en tamaño desde los nanómetros hasta los milímetros, y pueden tener su origen en fuentes diversas, aunque todas ellas están englobadas en dos grandes grupos:

- Naturales: es el caso de las partículas emitidas por erupciones volcánicas, durante el proceso de evaporación de los océanos o por la propia actividad biológica de los seres que habitan el planeta.
- Antropogénicas: debidas a la quema de biomasa y combustibles fósiles, a la agricultura, a la industrialización y, en definitiva, a todas aquellas actividades humanas que implican una emisión de partículas en su realización.

Las diminutas partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera juegan un papel crucial en la caracterización y comprensión de los fenómenos atmosféricos. En este contexto, los aerosoles han sido objeto de estudio en numerosas investigaciones, especialmente debido a su influencia en la calidad del aire y en la interacción con la radiación solar que, por ende, afecta al clima de todo el planeta. Sin embargo, estos no son los únicos campos en los que se han llevado a cabo estudios sobre los aerosoles, como se podrá comprobar en el Capítulo 2.

1.1.1 Impacto climático: forzamiento radiativo

El impacto climático provocado por los aerosoles atmosféricos es lo que se conoce como forzamiento radiativo, el cual puede ser positivo o negativo.

Sustancias como el dióxido de carbono (CO_2), el metano, el ozono y los óxidos de nitrógeno son radiativamente activas en el infrarrojo térmico y absorben de manera efectiva la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, actuando a modo de manta térmica y produciendo el conocido efecto invernadero que contribuye a aumentar la temperatura del planeta [9]. Esto se corresponde con un forzamiento radiativo positivo, pues la Tierra está dejando de liberar parte de la radiación saliente, generando un desequilibrio en el balance energético.

No obstante, la actividad humana también emite a la atmósfera otras sustancias como el polvo mineral o los sulfatos, los cuales son capaces de reflejar parte de la luz solar que incide sobre ellos hacia el espacio, actuando en este caso a modo de sombrilla que impide el paso de la radiación. En este caso se da un forzamiento radiativo negativo, ya que el planeta está dejando de recibir parte de la radiación incidente, lo que también desestabiliza el equilibrio energético.

1.1.2 Interacción aerosoles-radiación

La interacción de los aerosoles con la radiación solar es un fenómeno complejo, ya que en función de su tamaño, composición y forma, los aerosoles pueden absorber y/o dispersar la radiación solar. La dispersión y la absorción de la radiación solar por los aerosoles son procesos fundamentales que tienen un impacto directo en la intensidad de luz y radiación solar que llegan a la superficie de la Tierra, y por ello van a ser detallados a continuación.

La absorción es el proceso en el que un fotón incidente pasa a formar parte de la energía interna de la partícula con la que interacciona [9]. Este fenómeno es responsable de alrededor de un 20% de la reducción de la radiación incidente [8]. La capacidad de una molécula para absorber la radiación está relacionada con sus propiedades estructurales y su capacidad para vibrar o rotar en respuesta a la radiación. Para el caso de moléculas como el H_2O o el CO_2 , sus enlaces químicos polarizados pueden generar cambios en sus momentos dipolares durante la vibración o rotación. Dichos cambios en el dipolo eléctrico permiten que estas moléculas absorban ciertas longitudes de onda de la radiación, ganando así una energía que las hace vibrar. En cambio, moléculas como las del nitrógeno, mucho más abundantes en la atmósfera que las anteriores, no forman dipolos, por lo que carecen de este efecto absorbente.

Por su parte, la dispersión de la radiación solar por los aerosoles es un proceso que se rige por las leyes de dispersión de Rayleigh y Mie.

- La dispersión de Rayleigh ocurre cuando el tamaño de las partículas es mucho menor que la longitud de onda de la radiación incidente. Este tipo de dispersión es más eficiente en longitudes de onda cortas, lo que resulta en la dispersión preferente de la luz azul y violeta, contribuyendo así a la coloración del cielo.
- Por otro lado, la dispersión de Mie se produce cuando las partículas tienen un tamaño comparable (igual orden de magnitud) a la longitud de onda de la radiación incidente. En este caso, la dispersión es menos selectiva en términos de longitud de onda y puede afectar a la calidad de la luz solar de manera más significativa.

El ángulo de dispersión θ es aquel formado por la dirección en la que incide la radiación y la dirección en la que se dispersa. Cuando θ es igual a 0° , la dispersión se produciría en el sentido de la incidencia, mientras que si θ es igual a 180° se daría en el sentido opuesto, dando lugar a lo que se denomina retrodispersión.

En la Figura 1.2 se puede observar cómo la dispersión Rayleigh es completamente simétrica respecto a la dirección perpendicular a la de incidencia, siendo mínima para θ igual a $\pm 90^\circ$ y máxima cuando θ es 0° y 180° . Por el contrario, en la dispersión Mie la retrodispersión es mucho menor que la dispersión hacia delante, y si la partícula incidida posee un gran tamaño la fracción de radiación retrodispersada se sitúa por debajo del 10% del total. [9]

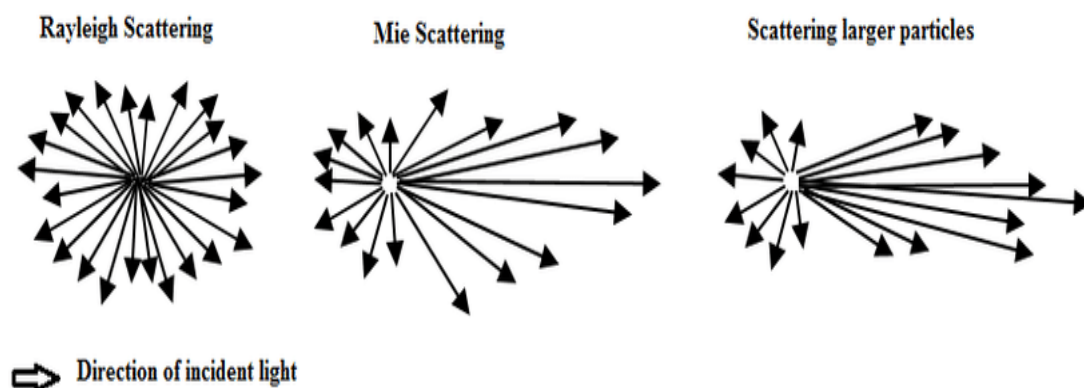


Figura 1.2 De izda a dcha: Dispersión Rayleigh, dispersión Mie y dispersión Mie para partículas de mayor tamaño [13].

En este trabajo de Fin de Máster, exploraremos en detalle la caracterización de los aerosoles en la atmósfera, centrándonos en su influencia en la interacción con la radiación solar a través de una serie de parámetros que se introducirán en el Capítulo 4. Comprender estas interacciones es esencial para evaluar su impacto en la climatología y para caracterizar los fenómenos atmosféricos que tienen lugar día tras día.

2 Motivación

La energía solar lleva tiempo siendo una pieza fundamental en el rompecabezas que compone la sociedad en la que vivimos. El creciente interés por la producción de energía limpia y segura, sin generar emisiones que contribuyan al calentamiento global, ha convertido al recurso solar en un tema de estudio sobre el que cada vez se indaga más y más, hasta llegar al punto de pretender caracterizar la interacción entre la radiación solar con las nubes y los aerosoles atmosféricos. Para entender el interés que esto suscita, se debe tener en cuenta que las nubes y los aerosoles atmosféricos son los únicos elementos que interactúan con la energía procedente del Sol, por lo que al caracterizar dichas partículas estaríamos en disposición de conocer el comportamiento de la radiación solar a la perfección.

Tras lo explicado anteriormente, se puede deducir que los aerosoles pueden afectar a la producción de sistemas de aprovechamiento de energía solar, tales como las centrales termosolares o los parques de paneles fotovoltaicos. En España, este suceso se pudo comprobar durante la calima de marzo de 2022, durante la cual la producción de energía solar cayó en un 50% [3]. Sumado a esto, se añade el hecho de que es habitual encontrar estos sistemas cerca de lugares desérticos en los que es sencillo que se encuentre arena o polvo en suspensión (formando la denominada calima), lo que tendrá un impacto elevado sobre la radiación solar incidente.

Otro ámbito en el que el estudio de las propiedades de los aerosoles atmosféricos puede ser de utilidad es en el cambio climático, debido a que, como ya se ha explicado en el apartado 1.1.1, los aerosoles pueden actuar como agentes tanto de enfriamiento como de calentamiento atmosférico. Algunos aerosoles como, por ejemplo, el llamado *black carbon* o carbono negro, se comportan de forma análoga a los gases de efecto invernadero, lo que contribuye a calentar el aire de la atmósfera (forzamiento radiativo positivo). Sin embargo, otros aerosoles como el polvo mineral o los sulfatos reflejan la luz hacia el espacio, impidiendo el paso de la radiación y reduciendo, por tanto, la temperatura del aire (forzamiento radiativo negativo). [11]

Por otro lado, también podría resultar de interés la relación de los aerosoles con fenómenos atmosféricos extremos, pues las partículas más pequeñas con un tamaño inferior a 50 nanómetros (como las producidas por vehículos y procesos industriales) pueden formar pequeñas gotas en las que se condensa el exceso de vapor de agua. Esa condensación libera calor, y ese calor hace que las corrientes de aire ascendentes sean de mayor intensidad, haciendo que se eleven las pequeñas gotas que terminan generando bolas de nieve, hielo y lluvia. [2]

Además, existe una gran preocupación por la calidad del aire y sus efectos directos en la salud humana, lo que ha catapultado la investigación de los aerosoles a la vanguardia de la ciencia ambiental. La reciente pandemia del virus SARS-CoV-2, más conocido como COVID-19, puso el

foco sobre los aerosoles (en este caso, no atmosféricos) que los seres humanos generaban en espacios interiores. Al inhalarse, y dependiendo de su tamaño, estas partículas se irían depositando en distintos lugares del sistema respiratorio, siendo aquellas más pequeñas (inferiores a 5 micrómetros) las que alcanzarían los alveolos pulmonares. Para frenar la transmisión de los aerosoles entre personas se tomaron una serie de medidas como el confinamiento masivo de la población, así como establecer una distancia de seguridad de unos 2 metros y el uso de mascarillas [5].

La exposición a partículas finas y sus consecuencias en enfermedades respiratorias también se ha tenido en cuenta en referencia a la polución emitida por la quema de combustibles fósiles y otros procesos industriales. En España, en septiembre de 2019 se aprobó el Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica (PNCCA), un conjunto de propuestas con las que reducir a la mitad las emisiones de partículas PM_{2.5}, es decir, de materia particulada con un tamaño inferior a 2.5 micras. Dichas partículas son peligrosas para la salud pues se consideran más nocivas que cualquier otro contaminante, y la mera exposición al aire con presencia de estas partículas puede causar irritación, enfermedades respiratorias y problemas cardíacos [6]. Esto también subraya la importancia de entender los aerosoles y sus propiedades, cuyo impacto trasciende los límites geográficos y afecta sin distinciones a toda la población.

En este contexto, y una vez expuestas las motivaciones que respaldan este trabajo, se reconoce la urgencia de comprender en profundidad los aerosoles atmosféricos y avanzar en nuestro conocimiento sobre el comportamiento de la radiación solar.

3 Objetivos

Una vez establecidos los argumentos en favor del desarrollo de este trabajo, se procede a presentar los objetivos que se han marcado, entre los que se diferencian:

- El objetivo principal: Caracterizar las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos en el emplazamiento de Sevilla. Para abordar este concepto que, al menos en primera instancia, parece ciertamente complejo, se va a seguir el procedimiento que se muestra a continuación:
 1. Establecer y comprender las propiedades ópticas de los aerosoles.
 2. Obtener los datos de dichas propiedades.
 3. Representar e interpretar gráficas que muestren la evolución de las propiedades de los aerosoles durante un período de tiempo lo suficientemente extenso. En nuestro caso, este período abarcará desde febrero de 2019 hasta octubre de 2023.
- El objetivo secundario: Establecer puntos de conexión entre las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos y la presencia de aerosoles en forma de calima procedentes de incendios o de polvo desértico, evaluando la posibilidad de identificar dicha presencia con exactitud a través de los valores de las propiedades. Seguidamente se va a detallar el procedimiento empleado para su consecución:
 1. Extraer valores o rango de valores característicos de las propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos en presencia de calima.
 2. Localizar episodios en los que se alcancen aquellos valores.
 3. Elaborar una clasificación de diferentes tipos de días empleando una herramienta de *clustering* o análisis de grupos.

4 Metodología

El creciente interés en los aerosoles suspendidos en la atmósfera ha traído consigo numerosos avances en el desarrollo de instrumentos científicos capaces de realizar medidas más precisas sobre sus propiedades. Para recabar datos acerca de las dimensiones y la forma de los aerosoles, es imprescindible efectuar mediciones de la radiación solar incidente, así como de la radiación dispersada y absorbida por los aerosoles, en ángulos de hasta 90 grados con respecto a la posición solar.

Con tal propósito fue creado el radiómetro solar Prede POM-02, una versión mejorada del radiómetro solar POM-01 con el que, adicionalmente, se pueden obtener medidas para un mayor rango de longitudes de onda.

En este apartado se van a detallar la localización y especificaciones del sensor POM-02, así como los parámetros que se obtienen con él y la forma de obtener dichos parámetros por medio de la web SKYNET.

4.1 Estación de medida

Las medidas experimentales empleadas en este estudio se han obtenido en la estación radiométrica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables (GTER, <http://estacionmeteo.us.gter.es/>) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI), localizada en la Isla de la Cartuja de Sevilla. Concretamente, la estación está situada en las coordenadas geográficas 37,40 °N, 6,01 °W. Sevilla se localiza en la llanura aluvial del río Guadalquivir y cuenta con una altura media de 7 metros sobre el nivel del mar. Su clima es mediterráneo (clasificación Csa en la climatología Köppen), con veranos secos y muy calurosos y con inviernos suaves en los que se concentran la mayor parte de las precipitaciones anuales. La temperatura media anual es de 19,2 °C, lo que la convierte en la zona con la más alta temperatura media anual en Europa continental. Durante el mes de julio, el más caluroso, la temperatura promedio es de 28,2 °C y la máxima suele subir por encima de los 40 °C, mientras que en la época más fría la temperatura media es de 11 grados.

Situada a unos 12 metros de altura sobre el nivel del mar, la estación radiométrica del GTER está integrada por una serie de sensores y equipos auxiliares destinados a medir, tratar y almacenar los principales parámetros de radiación. La estación presenta una continua evolución en forma de mejoras en el equipamiento, con el objetivo de incrementar el número de variables que se registran y de aumentar su fiabilidad.



Figura 4.1 Vista de la estación del GTER.

Entre los diversos dispositivos que componen la estación se encuentran: piranómetros, para la medida de la irradiancia global horizontal (GHI) y la irradiancia difusa horizontal (GHI); pirheliómetros, para la medida de la radiación directa normal (DNI); un seguidor solar, en el que va incorporado un pirheliómetro que, gracias al control de dos ejes mediante un microprocesador, siempre se mantiene alineado con el Sol; una sonda barométrica, para la medida de la presión atmosférica; una sonda de medida de humedad y temperatura ambiente; una cámara de cielo, etc. Sin embargo, de todos los sensores de los que dispone la estación radiométrica, el que adquiere un papel fundamental en la realización de este trabajo es el Radiómetro Solar Prede POM-02.

4.1.1 Radiómetro Solar Prede POM-02

Dado que el estudio de los aerosoles cobra cada vez más relevancia en el ámbito científico, los sensores para el monitoreo de aerosoles van siendo continuamente mejorados. Así logró desarrollarse el Radiómetro Solar Prede POM-02, capaz de realizar mediciones de: la intensidad del espectro de dispersión; de radiación directa usando un seguidor solar integrado; y de radiación difusa y reflejada con escaneos de cielo programados. Cuenta con un sistema óptico con detector de fotodiodos de silicio, y con un segundo sistema óptico con un detector infrarrojo de arseniuro de indio y galio.

Respecto a su versión anterior (el POM-01), presenta un alcance infrarrojo cercano ampliado, un mayor rango de temperaturas de operación (de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 4 longitudes de onda más, comprendiendo su rango espectral 11 bandas entre 315 y 2200 nanómetros.

Para poder realizar mediciones y almacenar datos, el POM-02 debe estar conectado a un ordenador que tenga instalado el software de control. Los datos pueden pos-procesarse con el software SKYRAD.pack de SKYNET.



Figura 4.2 Radiómetro solar Prede POM-02.

4.2 Descripción de variables

A continuación, se van a detallar los parámetros que van a ser objeto de estudio en este trabajo.

4.2.1 Espesor Óptico del Aerosol

El Espesor Óptico del Aerosol (*Aerosol Optical Thickness*, AOT) es un parámetro que se utiliza para cuantificar la cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera (aerosoles), así como su capacidad para tener interacción (absorber o dispersar) con la radiación solar.

El AOT es una propiedad adimensional que típicamente varía entre 0 y valores algo mayores que 1, siendo 3 o 4 un valor rara vez alcanzado. Un AOT igual a 0 indica que la atmósfera se encuentra libre de partículas suspendidas y que es completamente transparente a la radiación solar, mientras que cuanto mayor sea el AOT mayor será la cantidad de aerosoles que interactúan con la luz solar.

Este parámetro se obtiene de acuerdo a la ley de Beer-Lambert-Bouguer, la cual establece la relación entre las propiedades de un material y su absorción de intensidad luminosa al ser atravesado por un haz de luz. Siguiendo esta ley, la ecuación que permite obtener el valor de AOT para una determinada longitud de onda λ es la siguiente [4]:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda)d^2e^{-(\tau(\lambda)_{TOT}*m)}$$

Donde:

- $V(\lambda)$ es el voltaje medido por un fotómetro solar para λ , el cual es proporcional a la irradiancia espectral (I) que llega a un instrumento en la superficie terrestre.
- $V_0(\lambda)$ es el voltaje medido para la irradiancia espectral estimada en la parte superior de la atmósfera (I_0).
- d es la relación entre la distancia media y la distancia real Tierra-Sol.
- $\tau(\lambda)_{TOT}$ es el espesor óptico (AOT) total, que engloba el AOT de todos los componentes de la atmósfera.
- m es la masa óptica del aire.

Para obtener el AOT de los aerosoles, se debe descontar del AOT total el correspondiente a los demás componentes atmosféricos que contribuyen a dispersar la radiación, entre los que se encuentran: el agua (w), la dispersión Rayleigh, el dióxido de nitrógeno (NO_2), el ozono (O_3), el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4).

$$\tau(\lambda)_{Aerosol} = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_w - \tau(\lambda)_{Rayleigh} - \tau(\lambda)_{NO_2} - \tau(\lambda)_{O_3} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \tau(\lambda)_{CH_4}$$

4.2.2 Albedo de Dispersión simple

El Albedo de Dispersión Simple (*Simple Scattering Albedo*, SSA) es un parámetro que se utiliza en la ciencia atmosférica y climatología para describir la capacidad de una superficie (o, en nuestro caso, de una partícula en suspensión como un aerosol o una nube) para dispersar en todas las direcciones la radiación solar incidente. Más concretamente, es la fracción de la radiación atenuada (absorbida+dispersada) que es dispersada por una superficie o, en nuestro caso, aerosol.

$$SSA = \frac{E_{dispersada}}{E_{atenuada}}$$

El SSA es un parámetro adimensional que varía entre 0 y 1. Los valores de SSA tienen las siguientes interpretaciones:

- Cuando $SSA = 0$, significa que todas las partículas o la superficie absorben completamente la radiación incidente y, por tanto, nada de ella es dispersada.
- Cuando $SSA = 1$, significa que todas las partículas o la superficie dispersan completamente la radiación incidente y no la absorben en absoluto.
- Cuando el valor de SSA se encuentra en algún lugar entre 0 y 1, esto indica que parte de la radiación incidente es absorbida y parte es dispersada. La importancia intrínseca del SSA radica en que describe la proporción relativa de absorción y dispersión. Si se tiene un SSA igual a, por ejemplo, 0,8, esto indica que el 80% de la radiación atenuada por el aerosol es dispersada, mientras que el 20% habrá sido absorbida.

4.2.3 Índice de Refracción

El Índice de Refracción (*Refractive index*, RI) es una propiedad óptica adimensional que describe cómo la luz se propaga a través de un material. Es característica de cada sustancia y depende de la densidad y la composición del material. Varía para diferentes longitudes de onda y puede tener un valor diferente para la luz visible, la luz ultravioleta, la luz infrarroja, etc. El RI consta de dos partes: la parte real y la parte imaginaria.

$$RI = n - ik$$

La parte real describe la velocidad de la luz en ese material en comparación con su velocidad en el vacío. Se denota generalmente con la letra n y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{c}{v}$$

Donde:

- c es la velocidad de la luz en el vacío, que es una constante con un valor aproximado de 299.792.458 metros por segundo (m/s).
- v es la velocidad de la luz en el material en cuestión.

Sin embargo, en el desarrollo de este trabajo adquirirá una importancia esencial la parte imaginaria del RI, la cual se obtiene experimentalmente mediante espectroscopia y mediciones de absorbancia e indica cuánta energía es absorbida por una sustancia al ser atravesada por un haz de luz. Su valor mínimo es nulo y, para una longitud de onda dada, cuanto mayor sea su valor mayor será la absorción de la luz en ese material.

De ahora en adelante, cuando aparezca RI en realidad se hará referencia a la parte compleja del RI, pues la parte real no va a ser empleada en el desarrollo del trabajo.

4.2.4 Distribución volumétrica de los aerosoles

La distribución volumétrica de los aerosoles ($dVdn$, por su expresión matemática), también conocida como distribución de tamaño de partícula, describe la cantidad volumétrica de partículas presente para cada intervalo de tamaño. En base a esto se pueden distinguir dos modos o tipos de comportamiento de los aerosoles:

- El modo fino, para partículas cuyo diámetro va de 1 nanómetro (0,001 micra) hasta 1 micra.
- El modo grueso, para partículas con un diámetro entre 1 y 100 micras.

Es la única variable aportada por SKYNET que sí tiene dimensiones ($\mu m^3/\mu m^2$).

4.2.5 Exponente de Ångström

El exponente de Ångström (*Ångström Exponent*, AE) en óptica atmosférica es un parámetro que describe la dependencia espectral del espesor óptico del aerosol (AOT) y proporciona alguna información básica sobre la distribución del tamaño del aerosol. Puede calcularse a partir de dos o más longitudes de onda mediante un ajuste por mínimos cuadrados mediante la siguiente ecuación:

$$AOT(\lambda_1) = AOT(\lambda_2) * \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-AE}$$

Donde:

- λ_1 y λ_2 son pares de longitudes de onda.
- $AOT(\lambda_1)$ y $AOT(\lambda_2)$ son los AOT correspondientes a las longitudes de onda anteriores.

Los valores de AE suelen encontrarse entre 0 y 2,5, indicando aquellos valores superiores a 2,0 una mayor dispersión de la radiación solar en las longitudes de onda más cortas. Esto está asociado a la existencia de partículas más pequeñas o de modo fino (por ejemplo, partículas de humo y sulfatos). Por otro lado, los valores de AE cercanos a cero sugieren una mayor absorción de la radiación solar, lo que indica la presencia de partículas de mayor tamaño o de modo grueso (como el polvo del desierto). [7]

4.2.6 Relaciones entre los parámetros

El albedo de dispersión simple (SSA) es una fracción de la cantidad de radiación dispersada en relación con la radiación total atenuada en la atmósfera. El RI y el SSA están estrechamente relacionados, pues son dos formas diferentes de expresar el mismo fenómeno, el de la atenuación

de la radiación. Asimismo, si conocemos RI y SSA, podemos conocer con exactitud la cantidad de energía dispersada por el aerosol.

Por otra parte, la relación entre el AE y el AOT es más que evidente, pues el primero no se puede calcular sin el segundo. A esto se le debe añadir que el AE puede ayudar a predecir la forma de la distribución volumétrica, ya que, como se ha comentado anteriormente, los valores altos de AE hacen indicar una gran presencia de aerosoles de pequeño diámetro y viceversa.

4.3 Tipos de aerosoles

Una vez detalladas las diversas propiedades que se pueden medir sobre los aerosoles, se puede establecer una clasificación de los aerosoles basándose en el AOT y el AE de la siguiente forma [12]:

- Aerosol marítimo: es de gran relevancia, debido a que dos tercios de la superficie del planeta están cubiertos por agua. En su mayor parte está compuesto de partículas gruesas, por lo que toma valores de AOT bajos, menores de 0,15, y valores de AE también bajos, por debajo de 0,15 (en caso de no estar contaminado).
- Aerosol continental: Está compuesto en su mayoría por polvo y sustancias solubles en agua, aunque también minerales. Los valores de AOT son inferiores a 0,1 (en el caso limpio) y los de AE se sitúan por encima de 1,3.
- Aerosol desértico: es muy abundante en la atmósfera y, por tanto, tendrá una gran importancia en el clima. Está compuesto por partículas de diferentes tamaños, pero generalmente son grandes. Generalmente presenta valores de alta turbiedad, llegando a valores de AOT por encima de 1 y valores de AE bajos. Aunque en eventos menos importantes se pueden dar valores de AOT algo mayores a 0,2. Por otra parte, para este tipo de aerosol se ha observado una correlación negativa entre AOT y AE: cuando AOT aumenta, AE disminuye y viceversa.
- Aerosol procedente de quema de biomasa: es el tipo de aerosol que se produce en los incendios forestales, los cuales emiten partículas a la atmósfera de forma abundante. La combustión de biomasa genera numerosas partículas finas, lo que conlleva valores de AOT elevados, generalmente de más de 0,5, con alta dependencia espectral y por tanto con valores de AE también elevados, por encima de 1.
- Aerosol urbano/industrial: considerado de origen antropogénico, este tipo de aerosol se da en sitios cercanos a industrias y grandes núcleos de población. Dependiendo de la meteorología del lugar este tipo de aerosol tendrá mayor o menor impacto, pero por lo regular presentan valores de AE y AOT elevados, tal y como se puede observar en la Figura 4.3.
- Aerosol ártico/antártico: Este tipo de aerosol se origina en los océanos circundantes a los polos de los hemisferios norte y sur, respectivamente. Está compuesto en su mayoría de partículas marinas y minerales. Normalmente presenta valores muy bajos de AOT y valores de AE cercanos a 1. [8]

En el caso de Sevilla deberemos tener muy en cuenta los aerosoles de tipo urbano, desértico (calima procedente del Sáhara) y continental, descartando prácticamente los de tipo ártico/antártico debido a que, aunque los aerosoles pueden ser arrastrados por el viento durante centenas de kilómetros, la distancia de Sevilla a cualquiera de los polos se hace insalvable.

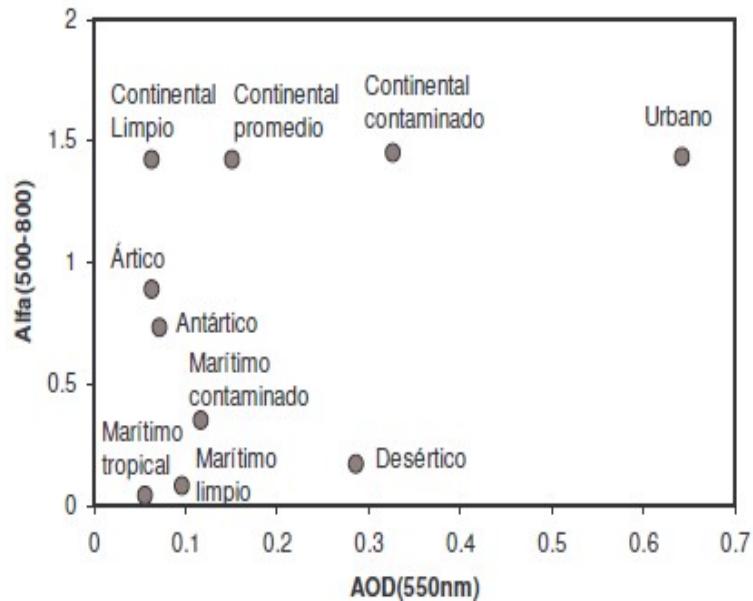


Figura 4.3 Diagrama de dispersión AOT(550nm) frente a EA(500-800) con los tipos de aerosoles [12].

4.4 Introducción a SKYNET

El siguiente apartado tendrá en consideración describir en detalle la fuente de los datos que se han empleado en este estudio, llamada SKYNET.

4.4.1 ¿Qué es SKYNET?

Es una red terrestre de observación de la radiación dedicada a la investigación de la interacción entre los aerosoles, las nubes y la radiación solar. Entre sus objetivos principales se encuentran:

- Evaluar cuantitativamente las variaciones a largo plazo de las propiedades de los aerosoles y las nubes y, por tanto, de la radiación atmosférica que llega a la superficie.
- Comprender sus efectos en el clima debido a la interacción aerosol-nube-solar.

Además, tanto la validación de las observaciones por satélite de las misiones de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), así como las simulaciones de modelos climáticos y la asimilación de datos, también forman parte del ámbito de actividad de SKYNET. Para alcanzar estos objetivos, SKYNET observa las propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles y las nubes y mide la radiación atmosférica basándose en una estrecha colaboración internacional entre agencias nacionales, institutos y universidades. [1]

El Centro Internacional de Datos SKYNET (ISDC), se creó en 2014 con el fin de proporcionar productos mediante el sistema común de análisis de datos. El ISDC elabora resultados con un formato estandarizado sobre las propiedades de los aerosoles utilizando los algoritmos aprobados por el Comité Internacional de SKYNET, y proporciona dichos resultados a través de su web.

SKYNET está organizada en siete subredes regionales, cuyos representantes forman parte del Comité Internacional de SKYNET, que es el órgano decisorio de la red. Cada subred contribuye al funcionamiento y mantenimiento de la instrumentación asociada. Algunas subredes disponen

de Centros Regionales de Datos SKYNET (RSDC), donde se acumulan los datos medidos en las estaciones de la subred. Más tarde, los datos brutos se transfieren desde cada RSDC al ISDC.

La red europea de radiómetros SKYNET (ESR) es la subred en la que nos encontramos. Cuenta con un RSDC, dirigido por el Instituto de Ciencias Atmosféricas y del Clima (ISAC) del Consejo Nacional de Investigación italiano (CNR) y también por la Universidad de Valencia. Por su parte, el CEReS (*Center for Environmental Remote Sensing*) de la Universidad de Chiba (Japón) lidera otro RSDC que recoge y analiza datos principalmente de las subredes japonesa, mongola y del sudeste asiático. Cada uno de estos dos RSDC mencionados han creado su propio flujo de análisis de datos con los que obtener los valores de las variables en formato estándar.

4.4.2 Flujos de análisis de datos

El ISDC implementa dos flujos de análisis de datos (SR-CEReS y ESR-MRI) y proporciona dos tipos de productos estándar mediante los dos flujos de análisis de datos mencionados. Ambos flujos típicamente proporcionan los siguientes productos:

- Espesor óptico del aerosol (AOT) para las longitudes de onda de 340, 380, 400, 500, 675, 870, 1020 nm.
- Albedo de dispersión simple (SSA) a las mismas longitudes de onda del AOT.
- Índice de refracción (RI) en las mismas longitudes de onda del AOT.
- Distribución volumétrica de los aerosoles ($dV/d\ln r$).
- Exponente de Ångström (AE).

Desde la ESR se promocionó el flujo ESR-MRI, con el que se publican los datos en dos niveles diferentes:

1. L2A: son datos proporcionados únicamente para ESR-MRI que se obtienen utilizando las constantes de calibración mensuales. Se publican en tiempo cuasi real.
2. L2: datos obtenidos reprocesando los datos L2A con las constantes de calibración actualizadas. Se publican a principios de cada mes, junto con las constantes de calibración.

Su algoritmo central se compone de dos partes:

- SUNRAD.pack: es un código abierto proporcionado por ESR que procesa únicamente las medidas directas del sol y se encarga de producir los resultados estándar de AOT y AE.
- SKYRAD_MRI.pack ha sido desarrollado en colaboración con el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI) de la Agencia Meteorológica de Japón (JMA). Sus productos son: SSA, RI, $dV/d\ln r$, función de fase y factor de asimetría.

Por su parte, el flujo SR-CEReS publica los datos solamente como Nivel 2 (L2) y emplea un solo algoritmo central que proporciona los datos de: AOT, SSA, RI, $dV/d\ln r$ y AE.

Para este estudio, se han empleado los resultados del flujo de análisis ESR-MRI, pues además de ser expresamente el desarrollado por la subred ESR de la que Sevilla forma parte, de esta forma también se pudo contar con la ayuda del Profesor V. Estelles de la Universidad de Valencia (uno de los 3 máximos responsables de la ESR) al contestar algunas de las cuestiones que surrieron inicialmente. Por último, se ha elegido el Nivel L2 pues se ha considerado que el reprocesamiento con las constantes de calibración actualizadas aumentaría la fiabilidad y precisión de las medidas respecto al L2A.

4.4.3 Procedimiento para la obtención de datos

Para poder conseguir los parámetros para el emplazamiento de Sevilla se ha seguido el procedimiento indicado a continuación.

1. En primer lugar, desde la página de inicio, hay que dirigirse al apartado *Data Download*.

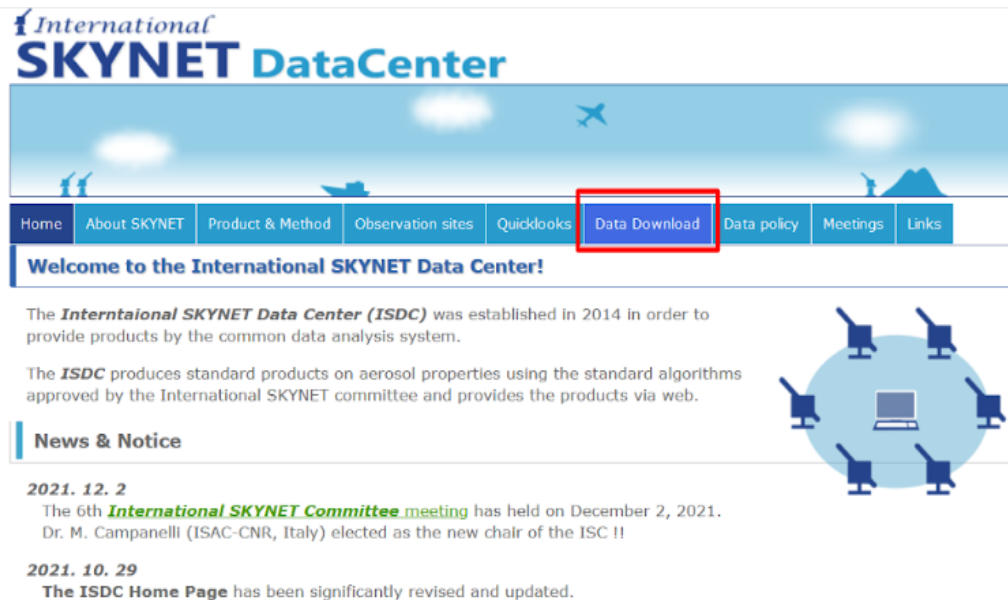


Figura 4.4 Página de inicio de la web SKYNET.

2. Una vez hecho esto, se deberá seleccionar el método deseado. En este apartado, los valores de AOT y AE se incluyen en ESR-sunrad, mientras que para descargar el SSA, el RI y la densidad volumétrica del aerosol se debe marcar ESR-MRI.

The screenshot shows the 'Data Download' section of the website. At the top, there is a navigation bar with items: Product & Method, Observation sites, Quicklooks, Data Download (selected), and Data policy. Below this is a sub-header 'd'. The main content area features a grid of dropdown menus for selecting parameters: Method (with options SR-CEReS, ESR-sunrad, ESR-MRI), Version, Level, Area, Country, Station, Device, and Year. To the right of the grid is a 'Reset Lists' button. Below the grid are two buttons: 'View' and 'Download', with the word 'or' centered between them.

Figura 4.5 Selección de método para la descarga de datos.

3. Para completar el proceso, se deberán introducir el nivel (L2), el área (Europa), el país (España), la estación (Sevilla), el dispositivo (POM-02) y el año deseado.

Method	Version	Level	Area
SR-CEReS	0.9	L2A	Antarctica
ESR-sunrad		L2	Asia
ESR-MRI			Europe
			North America
			Oceania

Country	Station	Device	Year
Czech Republic	Izana	pom02	2023
France	Seville		2022
Germany	Valencia		2021
Italy			2020
Spain			2019

Reset Lists

View

or

Download

Figura 4.6 Selección de método y emplazamiento para la descarga de datos.

Nota: Los archivos de datos se encuentran en formato ".nc". Para leer este tipo de archivo, será necesario obtener la extensión NetCDF/GRIB reader de Matlab.

5 Resultados

En este Capítulo se van a exponer una serie de resultados obtenidos para caracterizar las propiedades de los aerosoles (AOT, AE, RI, SSA y dV_{dlnr}) a través de las medidas realizadas en la estación del GTER (Sevilla) entre febrero de 2019 y octubre de 2023. Posteriormente, se tratarán de identificar episodios de calima que hayan tenido lugar en este período mediante la observación y representación de las propiedades anteriormente citadas.

5.1 Caracterización de variables, evolución 2019-2023

En los siguientes subapartados se han representado varios *boxplots* o diagramas de cajas, en los que cada caja se corresponde un mes concreto. Los diagramas de cajas que van a mostrarse en este capítulo ofrecen siempre la siguiente información: la línea roja dentro de la caja corresponderá a la mediana; los límites superior e inferior de cada caja representarán los percentiles P_{25} y P_{75} ; las líneas negras verticales que se extienden fuera de las cajas se denominan comúnmente "bigotes", y llegan hasta los valores máximo y mínimo que se encuentran a 2,5 veces la diferencia entre P_{25} y P_{75} y, por último, las aspas rojas corresponderán a los *outliers* o valores atípicos del conjunto de datos.

Por otro lado, cabe mencionar la elección de 500 nanómetros como longitud de onda de referencia para representar las propiedades de AOT, AE, RI y SSA. Esto es común en el contexto de la investigación atmosférica, puesto que en esta longitud de onda la luz se encuentra exclusivamente en la parte visible del espectro electromagnético, haciéndola especialmente sensible a la interacción con los aerosoles atmosféricos.

5.1.1 Espesor Óptico del Aerosol (AOT)

En la Figura 5.1 se refleja la evolución del AOT medido en Sevilla durante el período comprendido entre enero de 2019 y octubre de 2023. Nótese que la mayoría de los días cuentan con un AOT muy bajo (por debajo de 0,2), y que en escasas ocasiones el AOT es superior a 1. Tan solo en 4 ocasiones el AOT supera el valor de 1,5: en abril y junio de 2021 y en abril y mayo de 2023. Un mayor valor de AOT tiene relación con una presencia de aerosoles en la columna atmosférica más elevada. Abril es el mes en el que con mayor frecuencia el AOT es mayor de 0,5, mientras que los meses entre octubre y enero son aquellos en los que menos puntos con valores altos se pueden observar, lo que podría indicar un cierto carácter estacional en la presencia de aerosoles. Sin embargo, para poder concluir esto, será mejor analizar los datos mediante un diagrama de cajas.

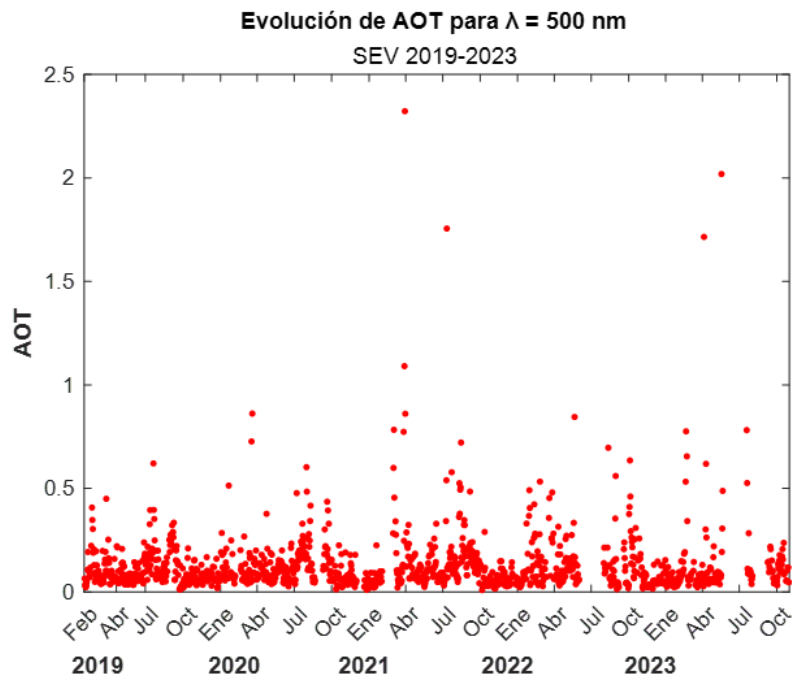


Figura 5.1 Evolución del promedio diario del Espesor Óptico del Aerosol para $\lambda = 500$ nm.

En la Figura 5.2 se han representado los datos de AOT agrupados por meses por medio de un diagrama de cajas, con lo que es posible estudiar la evolución interanual de una forma más conveniente. Como se intuía, los valores mínimos de AOT se dan en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Por otra parte, se observa que los 4 valores máximos de AOT comentados en la Figura 5.1 se corresponden con valores atípicos. Obviando estos, se encuentran otros 12 valores atípicos, 6 de ellos entre abril y julio de 2023. En los meses entre febrero y agosto el AOT presenta valores medios considerablemente mayores. Marzo de 2021 es el mes con mayores valores de toda la distribución, pues en él se alcanzan el mayor percentil P_{75} , el mayor extremo superior de "bigote" y el valor máximo de AOT.

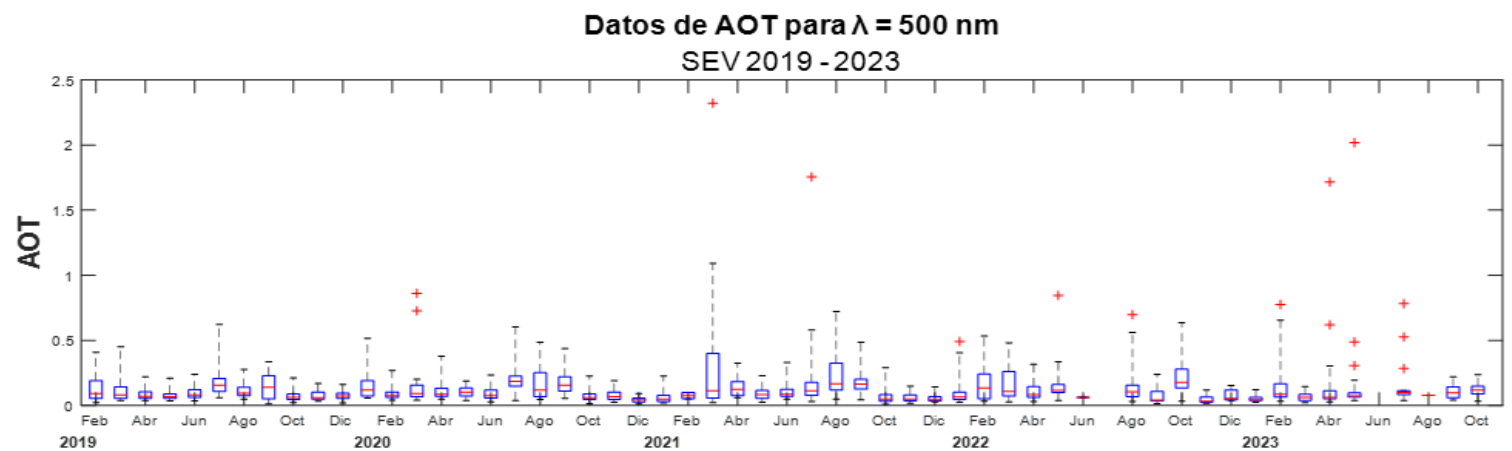


Figura 5.2 Evolución interanual de AOT para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses.

En esta Figura también se pueden contemplar algunos meses sin datos, generalmente correspondientes a los meses de verano, en los que en la estación del GTER se llevan a cabo parones en la alimentación para calibrar los sensores allí ubicados. Esto se repetirá también en el resto de parámetros.

5.1.2 Albedo de Dispersión Simple (SSA)

En la Figura 5.3 se ha representado la evolución del SSA medido en Sevilla durante el período comprendido entre febrero de 2019 y octubre de 2023. Este parámetro puede variar entre 0 y 1, aunque como se puede percibir en esta Figura suele situarse por encima de 0,8, y tan solo en una ocasión el SSA es inferior a 0,6. Esto quiere decir que la energía dispersada por los aerosoles es por lo general muy superior en relación con la energía absorbida por ellos.

Los valores mínimos de SSA se suelen alcanzar en los meses de agosto (como el de 2019) septiembre (como el de 2021) y octubre (como el de 2023). Por el contrario, los meses de noviembre, diciembre y enero suelen constituir períodos en los que el SSA se mantiene elevado (cercano a 1).

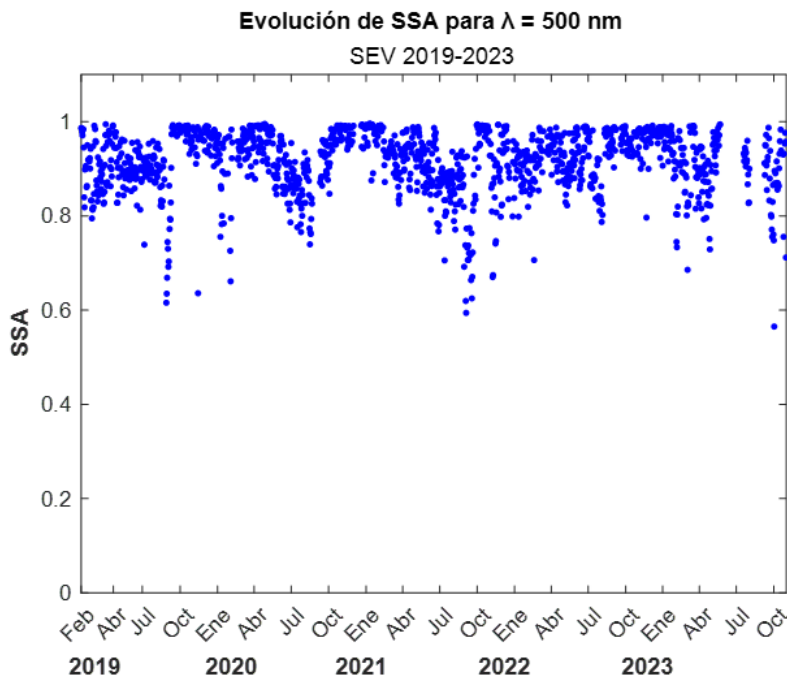


Figura 5.3 Evolución del promedio diario del Albedo de Dispersión Simple para $\lambda = 500$ nm.

Para analizar la evolución interanual del SSA, en la Figura 5.4 se representan los datos agrupados por meses por medio de un diagrama de cajas. El mes de septiembre de 2021 es aquel en el que se alcanzan los valores más bajos de P_{25} y mediana, mientras que el valor mínimo general de toda la distribución se dio en octubre de 2023. Cabe resaltar que únicamente se puede encontrar un valor atípico en toda la distribución, produciéndose en noviembre de 2019.

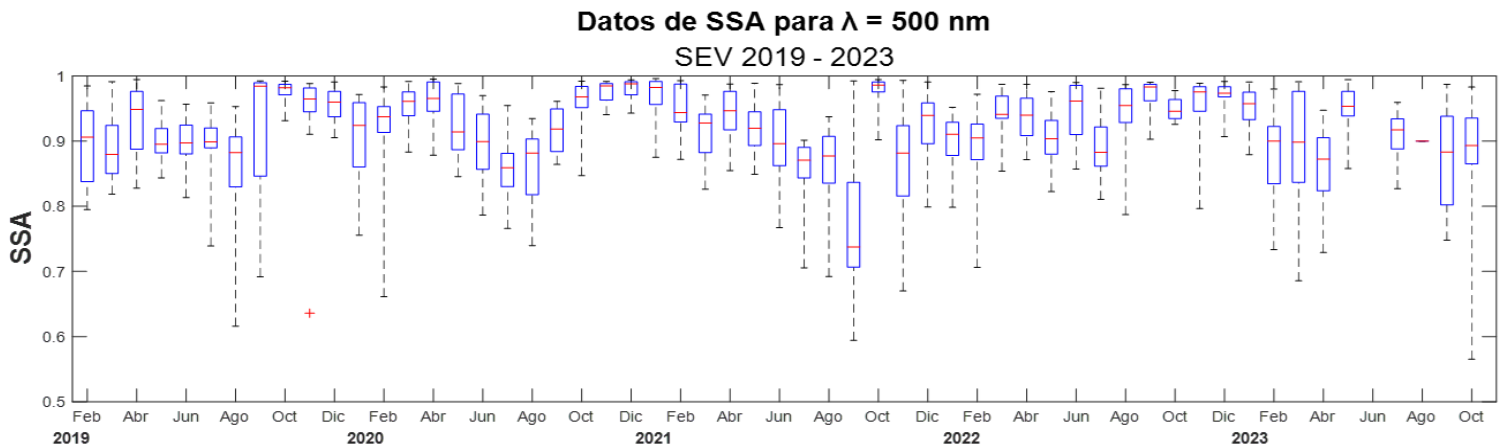


Figura 5.4 Evolución interanual de SSA para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses.

5.1.3 Índice de Refracción (RI)

En la Figura 5.5 se representa la evolución de la parte compleja del Índice de Refracción (RI) medido en Sevilla durante el período comprendido entre febrero de 2019 y octubre de 2023. Esta variable sirve para expresar la cantidad de energía absorbida por el aerosol, su valor mínimo es de 0 y su valor máximo no suele superar 0,15. Generalmente este parámetro tiene un valor muy cercano a cero durante los meses de octubre a diciembre, salvo en el otoño de 2021 donde sí que se aprecian algunos puntos elevados. Por otra parte, los valores más altos se suelen dar en los meses de julio a octubre, creando de esta forma una contraparte con el SSA.

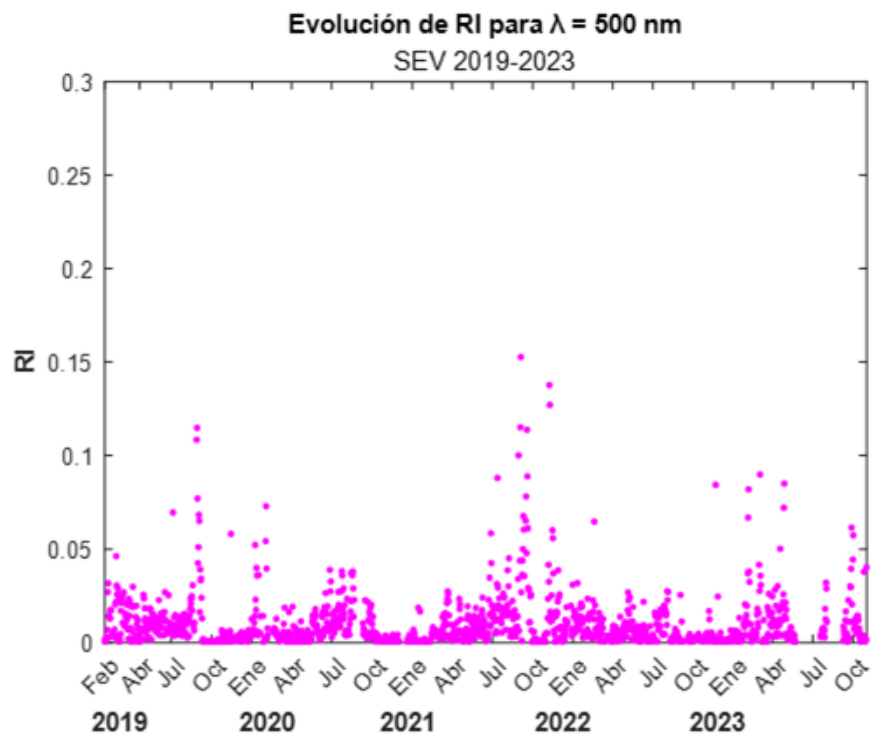


Figura 5.5 Evolución del promedio diario de la parte compleja del Índice de Refracción para $\lambda = 500$ nm.

El bajo valor de RI durante los otoños se puede relacionar con los altos valores de SSA en las mismas fechas, pues un SSA alto indica una alta dispersión de la radiación incidente, y una alta dispersión deriva en una absorción menor, con lo que se reduce el valor de RI. En lo relativo a los valores más altos, estos se suelen alcanzar entre julio y septiembre. El punto en el que se produjo la mayor absorción de radiación incidente se produjo el 4 de septiembre de 2021, llegando RI hasta un valor de 0,153.

Sin embargo, para realizar un análisis estacional de mayor precisión se va a representar el diagrama de cajas de los datos de RI agrupados por meses en la Figura 5.6.



Figura 5.6 Evolución interanual de RI para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses.

Como ya se podía intuir con la Figura anterior, es durante los meses de otoño donde los valores medios, los percentiles, las medianas y los valores máximos de los bigotes para cada mes se encuentran más bajos, salvo en el del año 2021. Es precisamente en este año cuando se alcanzan los dos valores máximos de RI, los percentiles P_{75} más elevados y las medianas más altas mes por mes. en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Ahora bien, no se puede decir que RI destaque por su estacionalidad en cuanto a sus valores más altos, pues mientras que en 2019 y 2021 se alcanzaron en agosto, en 2020 y 2023 los máximos anuales se localizaron en febrero. Por otra parte, se observan apenas 5 valores atípicos distribuidos en 5 meses de 3 años distintos.

5.1.4 Exponente de Ångström (AE)

En la Figura 5.7 se ha representado la evolución del AE medido en la estación del GTER durante el período comprendido entre enero de 2019 y octubre de 2023. El valor de esta propiedad suele oscilar entre 0 (su valor mínimo) y 4, aunque para el caso actual ni tan siquiera se alcanzará el valor de 3. Al contrario que los parámetros anteriores, el AE no suele tender a ninguno de sus límites (ya sea superior, como en el caso del SSA, o inferior, como para el AOT y RI), sino que su valor por lo general se encuentra disperso entre 0 y 2. Como con esta gráfica se hace difícil identificar patrón alguno, más adelante se recurrirá de nuevo a representar los datos mediante un diagrama de cajas.

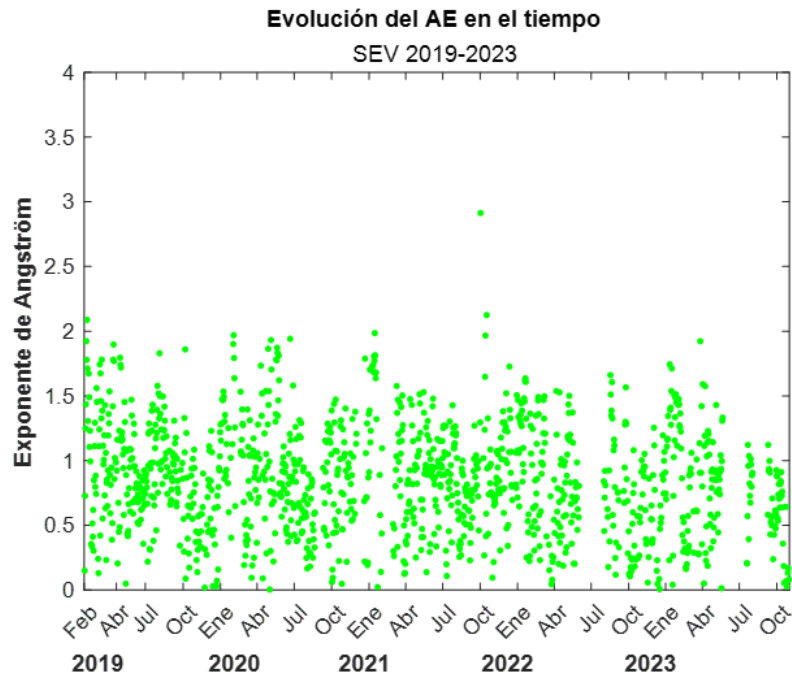


Figura 5.7 Evolución del promedio diario del Exponente de Ångström.

En la Figura 5.8 se contempla la evolución interanual del AE, con los datos agrupados por meses por medio de un diagrama de cajas. En él se puede encontrar una alta variabilidad a lo largo del año, experimentando continuas subidas y bajadas que dificultan el reconocimiento de una estacionalidad clara. De esta gráfica se puede destacar el mes de enero de 2021 por ser aquel en el que se encuentran los percentiles P_{25} y P_{75} con los valores más elevados, así como también contiene la mediana más alta de toda la distribución (en torno a 1,7). Esto sugiere que en este mes la dispersión de la radiación de onda corta fue muy efectiva, cosa que podemos corroborar observando la caja de SSA para el mismo mes, pues esta contiene valores muy próximos a 1.

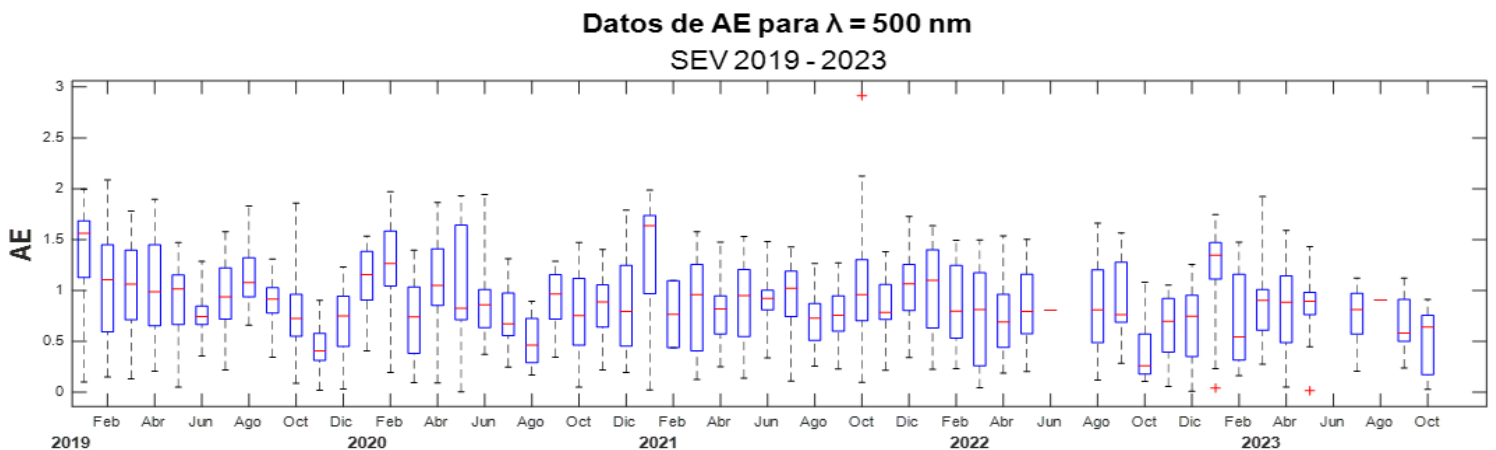


Figura 5.8 Evolución interanual de AE en la estación del GTER con los datos agrupados por meses.

Respecto a los valores atípicos, 2 se encuentran por debajo del límite inferior de los bigotes respectivos a los meses de enero y mayo de 2023, mientras que el máximo valor de AE de toda la gráfica (2,9137) se dio en octubre de 2021 y se corresponde con el tercer y último valor atípico.

5.1.5 Distribución volumétrica del aerosol (dVdlnr)

En lo relativo a esta propiedad, se debe comentar que se cuentan con las medidas de dVdlnr para 20 tamaños de radio de partícula, donde los tamaños límite se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 5.1 Tamaños de radio de partícula para los que se mide la dVdlnr.

	Radio de partícula (μm)		Radio de partícula (μm)
1	$1,20930 \cdot 10^{-2}$	11	$5,40810 \cdot 10^{-1}$
2	$1,76840 \cdot 10^{-2}$	12	$7,90850 \cdot 10^{-1}$
3	$2,58600 \cdot 10^{-2}$	13	1,15650
4	$3,78160 \cdot 10^{-2}$	14	1,69120
5	$5,53010 \cdot 10^{-2}$	15	2,47310
6	$8,08690 \cdot 10^{-2}$	16	3,61660
7	$1,18260 \cdot 10^{-1}$	17	5,28870
8	$1,72940 \cdot 10^{-1}$	18	7,73390
9	$2,52890 \cdot 10^{-1}$	19	11,3100
10	$3,69820 \cdot 10^{-1}$	20	16,5390

A continuación, se van a mostrar los valores promedio para cada tamaño de radio de partícula de los 4 años de los que se disponen de datos, con lo que la gráfica resultante en la Figura 5.9 será bastante representativa de los valores adquiridos durante un día común.

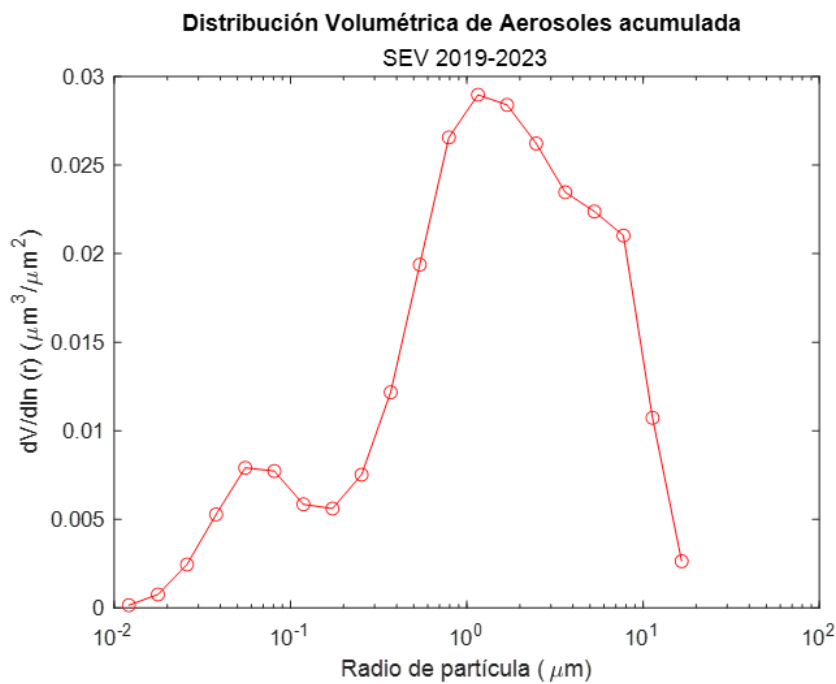


Figura 5.9 Distribución volumétrica acumulada para el período 2019-2023.

En la Figura 5.9 se pueden apreciar dos jorobas separadas por una ligera bajada. La primera de las jorobas es más pequeña y alcanza un valor máximo inferior a $0,01 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ entre los tamaños 5 y 6, mientras que la segunda es notablemente mayor, pues el valor máximo prácticamente triplica al de la primera. Tras esto, se produce una caída de gran pendiente en el valor de la $dV/d\ln r$ para los tamaños de partícula más grandes

Esta gráfica será utilizada posteriormente para compararla con aquellas distribuciones de los días identificados como días con calima, en los que la distribución volumétrica de los aerosoles varía en uno e incluso dos órdenes de magnitud de diferencia.

5.2 Identificación visual de episodios de calima por radiación

El siguiente paso tomado fue tratar de identificar episodios de calima evidente directamente por medio de las gráficas de GHI, DNI y DHI, para posteriormente contrastar los respectivos valores de los parámetros. Para ello, había que fijarse en aquellos días que presentaran una reducción considerable de DNI al mismo tiempo que la DHI aumentara sensiblemente, todo ello sin que hubiera una elevada presencia aparente de nubes que dificultaran este proceso. Como ejemplo visual, se pueden observar las Figuras 5.10 y 5.11, en las que con solo 6 días de diferencia se producen unas diferencias notables entre la DNI (I_{bn} , en rojo), la DHI (I_{d0} , en celeste) y la GHI (I_{g0} , en azul oscuro), manteniéndose la irradiancia extraterrestre (I_0 , en negro) prácticamente constante:

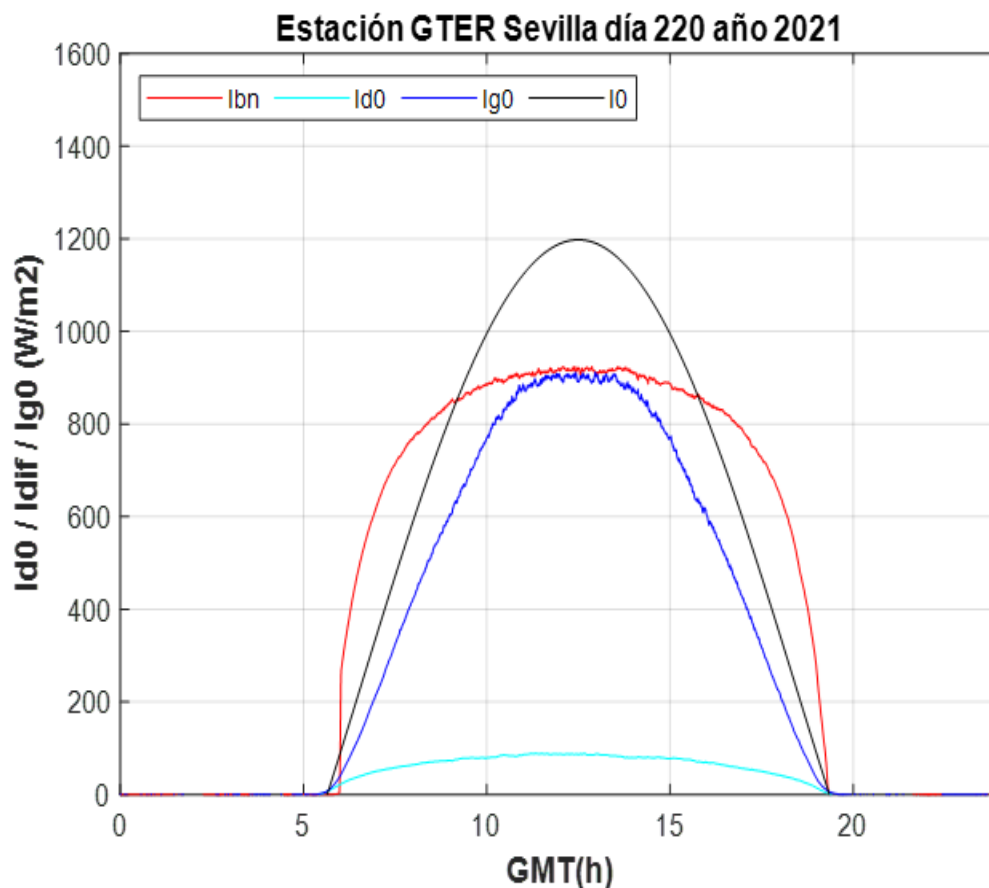


Figura 5.10 Gráfica del día 220 de 2021, Sevilla. Día despejado.

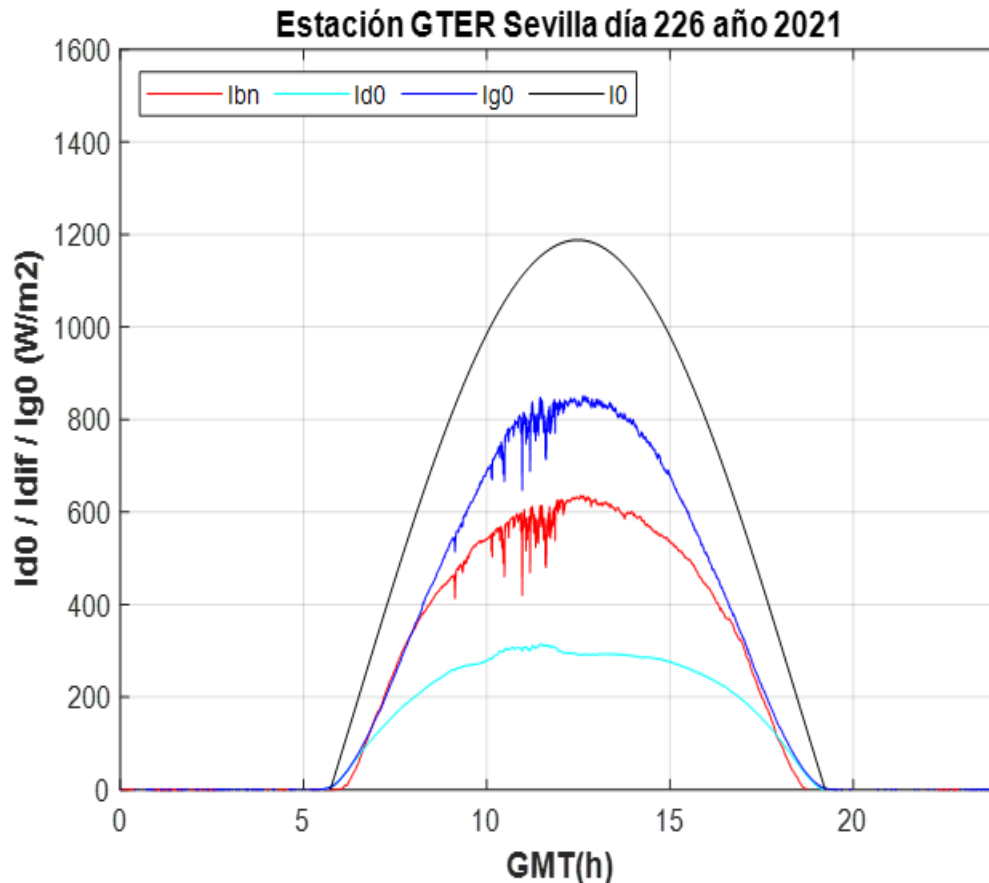


Figura 5.11 Gráfica del día 226 de 2021, Sevilla. Día con calima.

De esta manera, se pudieron identificar unos 10 días con calima evidente para el período analizado visualmente (desde 2021 hasta 2023 completamente), además de otros 12 días con una calima no tan marcada. La mayoría de estos días reflejan las siguientes particularidades.

1. El valor del AOT se encuentra entre 0,4 y 0,8.
2. El valor de SSA es mayor de 0,9, aunque no mucho mayor en varios casos.
3. El valor de RI se acerca notablemente a 0 (órdenes de magnitud de 10^{-3}).
4. El valor de AE no es demasiado alto, oscilando entre 0,1 y 0,3.

Todas estas características señalan que el origen de la calima es presumiblemente polvo procedente del desierto, dado el bajo valor de AE y que el AOT tampoco resulta muy elevado.

Sin embargo, esta forma de proceder cuenta con algunos inconvenientes, entre los que destaca que en los días con nubosidad muy intermitente se hace casi imposible poder determinar la presencia de calima. Es por este motivo que, para realizar una clasificación más precisa, se ha llevado a cabo un *Clustering* o análisis de grupo, una técnica de *Machine Learning* común en el análisis de datos estadísticos.

5.3 Clustering

En el contexto del *Machine Learning* o Aprendizaje Automático, el clustering es una técnica utilizada para agrupar un conjunto de datos en grupos o "*clusters*" basándose en la similitud entre los datos. La idea principal es que las observaciones dentro de un mismo cluster son más similares entre sí que con las observaciones de otros clusters. El algoritmo de clustering asigna automáticamente los datos a diferentes clusters, sin tener información previa sobre las etiquetas de clase. Es una forma de descubrir patrones subyacentes a la estructura del conjunto de datos.

Dentro de los diferentes algoritmos de clustering comunes que existen, en este estudio se va a emplear el método K-means. Este algoritmo divide los datos en k clusters, donde k es un número predefinido. Cada cluster está representado por un "*medoid*" o centroide, y los datos se asignan al cluster cuyo centroide es más cercano [10]. Es importante remarcar que cada centroide escogido por el algoritmo no es un punto con valores generados artificialmente, sino que de aquellos puntos que se han introducido se escogen los que pueden representar mejor los puntos que tienen a su alrededor.

Para este trabajo, se van a analizar los datos de AOT, AE y RI, que son los que se han creído más convenientes para poder clasificar los días del período 2019-2023. Se ha descartado el SSA por ser un parámetro algo redundante al contar ya con el RI para indicar la energía absorbida por los aerosoles, y la $dVdlnr$ por no poder elegir un único valor diario que sea representativo de este parámetro, aunque estas variables también serán revisadas para confirmar que los razonamientos alcanzados no carecen de sentido.

Para escoger el número óptimo de k clusters, se ha ejecutado el Método del Codo ("*Elbow Method*"). La idea detrás de este método es observar cómo varía la Suma de los Cuadrados de los Errores o SSE (*Sum of Squared Errors*) entre los puntos y sus respectivos centroides a medida que se aumenta el número de clusters. En este caso, se ha elegido un valor de 7 clusters, pues aumentar más el número de clusters no reduce significativamente el SSE, tal y como se ve en la Figura 5.12.

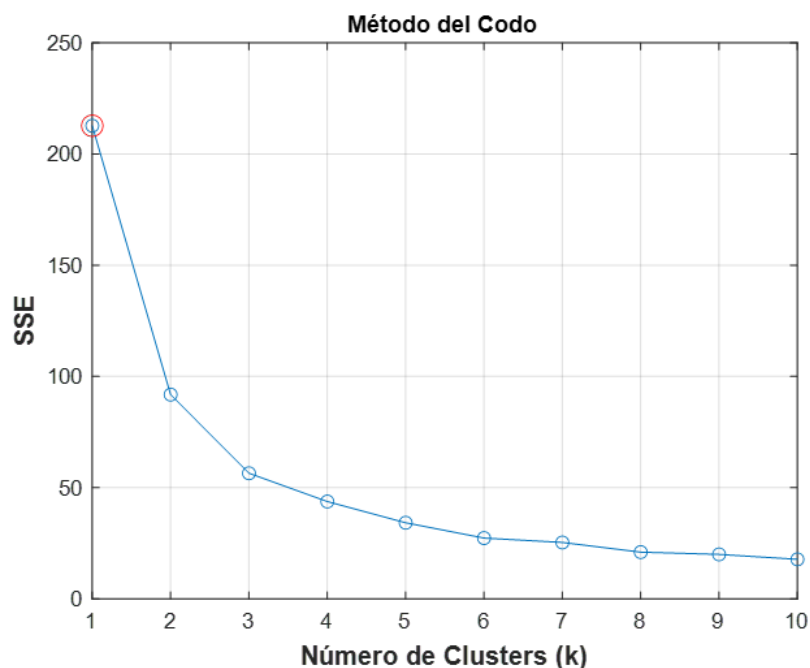


Figura 5.12 Método del Codo para la determinación del Número Óptimo de Clusters.

5.3.1 Fase de Entrenamiento

Una vez determinado el número óptimo de clusters, lo siguiente será emplear una técnica ampliamente utilizada en el *Machine Learning*: el Train-Test Split. Consiste en dividir el conjunto de datos (para este caso, 2019-2023) en dos conjuntos: el primero, que se empleará para entrenar (*train*) el modelo para que aprenda patrones, debe conformar aproximadamente el 80% del total de los datos, por lo que aquí se tomarán los años 2019, 2020, 2021 y 2022; el segundo, se utilizará para poner a prueba (*test*) el rendimiento del modelo con datos que no ha visto durante el entrenamiento, para lo que se introducirán los datos de 2023. El resultado obtenido al realizar el clustering 2019-2022 se puede observar en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16, donde cada punto visible en la gráfica representa un día con sus correspondientes valores de AOT, AE y RI:

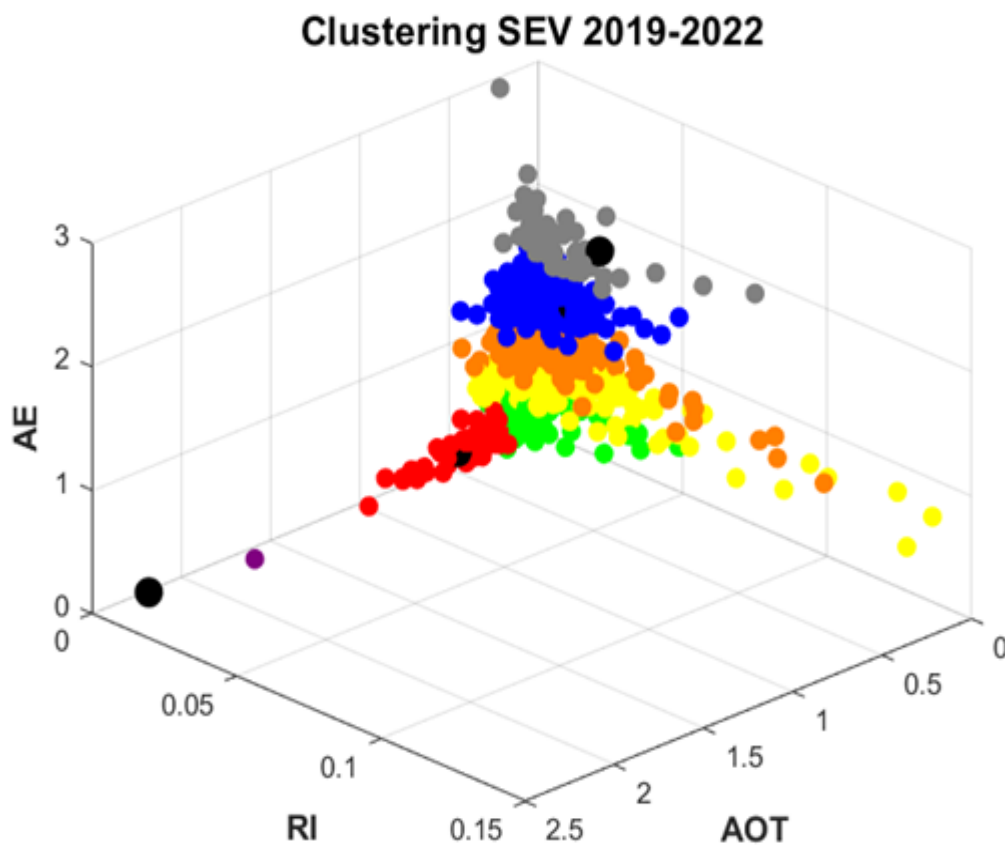


Figura 5.13 Clustering de los días del período 2019-2022. Vista 3D.

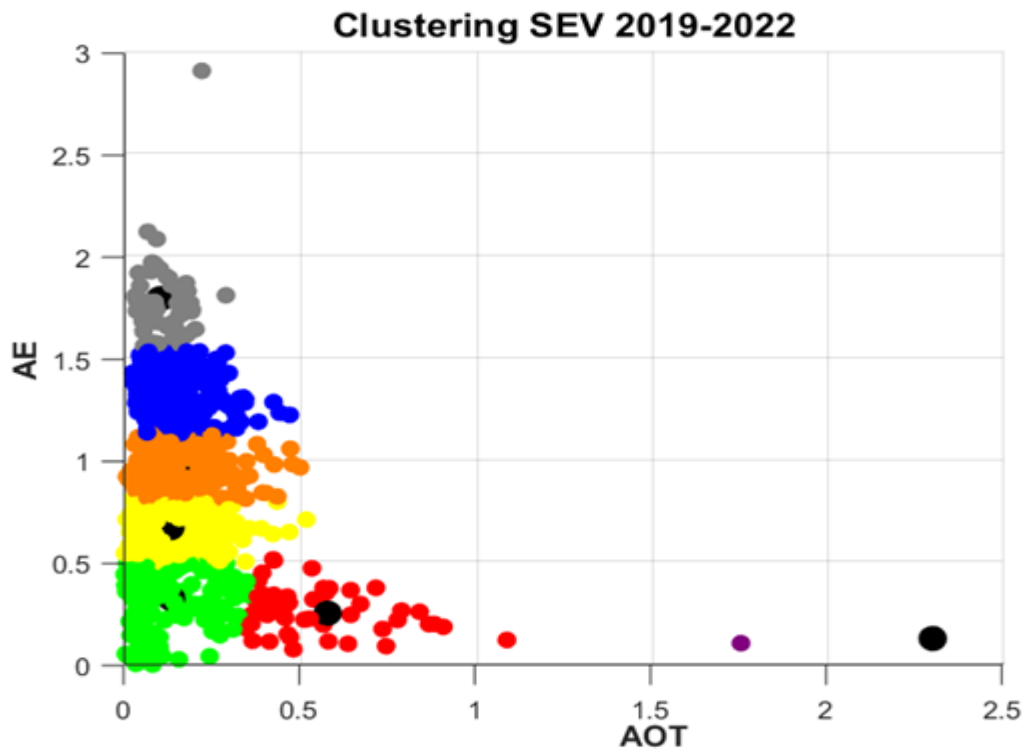


Figura 5.14 Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del AOT y del AE.

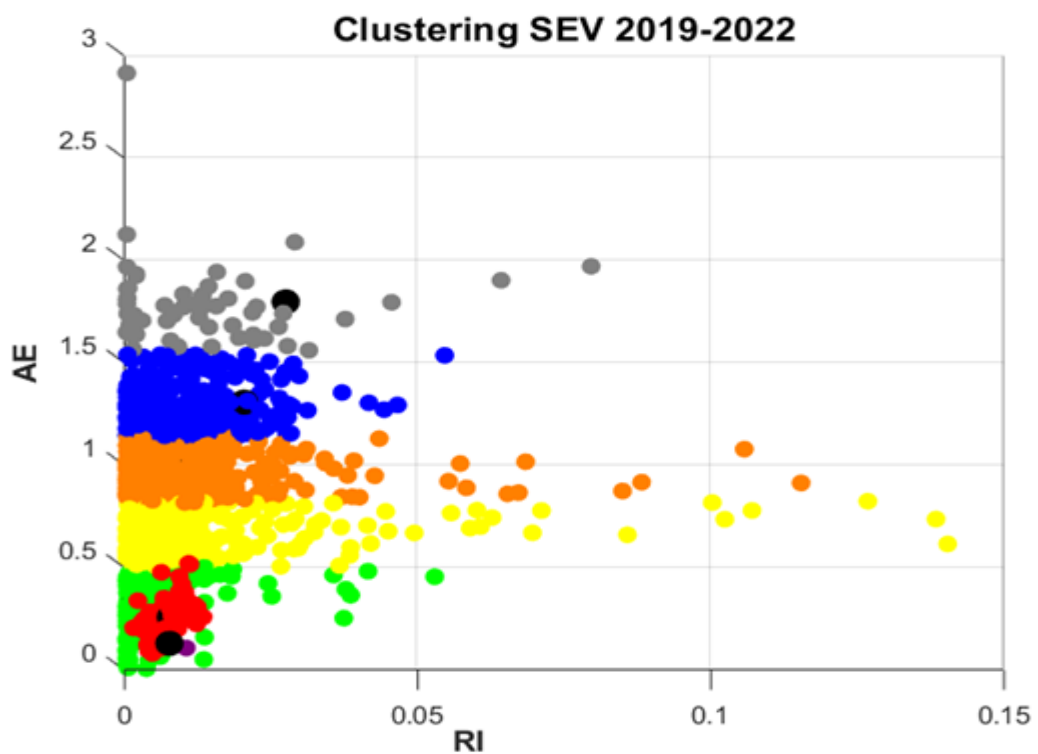


Figura 5.15 Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del RI y del AE.

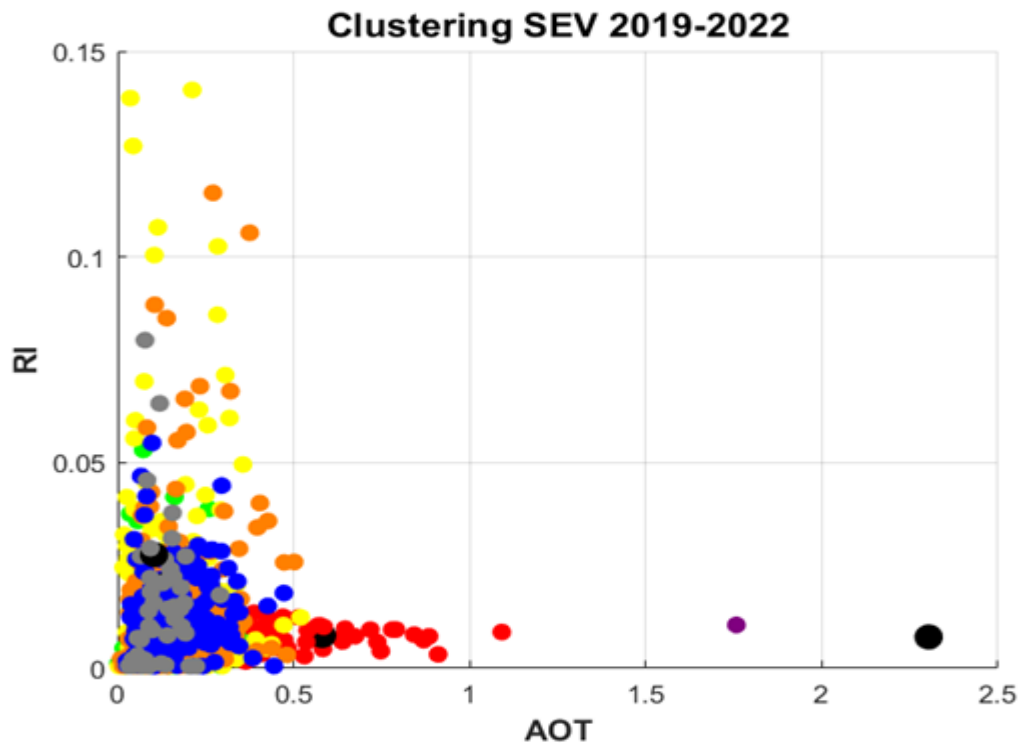


Figura 5.16 Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del RI y del AOT.

Los centroides resultantes del clustering se muestran en la Figura 5.17 con los correspondientes valores de AOT, AE y RI:

Centroide	Color	AOT	AE	RI
1	Morado	2,3032	0,1317	$7,629 \cdot 10^{-2}$
2	Rojo	0,5808	0,2555	$8,008 \cdot 10^{-3}$
3	Verde	0,1355	0,3288	$2,012 \cdot 10^{-3}$
4	Amarillo	0,1332	0,6741	$2,099 \cdot 10^{-3}$
5	Naranja	0,1468	0,9672	$8,656 \cdot 10^{-3}$
6	Azul	0,1422	1,306	$2,056 \cdot 10^{-2}$
7	Gris	0,1039	1,796	$2,765 \cdot 10^{-2}$

Figura 5.17 Centroides obtenidos mediante clustering junto con sus propiedades.

En las gráficas anteriores se puede observar que una gran porción de los días se acumula en la zona con valores bajos y medios de AE (entre 0 y 1,5) y con bajos valores de AOT y RI. Dicho de otra forma, hay pocos días que contengan un valor elevado de alguno de los parámetros, y generalmente si uno de los parámetros es alto el resto se mantienen bajos. Una vez establecido esto, podemos distinguir los siguientes clusters:

- El cluster morado, con sólo 2 días, presenta valores muy altos de AOT (mayores de 1,7) y valores extremadamente bajos de RI y AE. Estas características, especialmente el AOT elevado y el AE bajo, se corresponden con una fuerte presencia de aerosoles de origen desértico. Que

este cluster solo contenga 2 días en 4 años da buena muestra del carácter excepcional de este tipo de días.

- El cluster rojo, con 51 días, se corresponde con días con AOT medio (entre 0,4 y 1,2), manteniéndose el RI especialmente bajo y el AE por debajo de 0,5. Como se comentará más adelante, estos días se corresponden con el grueso de los días identificados (por medio de las gráficas de irradiancias) como calima. Presumiblemente y atendiendo a los rangos en los que se mueven los parámetros en este cluster, estos días contendrán una presencia moderada de calima desértica.
- El cluster verde, con 167 días, donde los días presentan valores de RI superiores a los clusters anteriores aunque sin ser particularmente altos, pues solo se supera en una ocasión el valor de 0,05. Por otra parte, tanto el AOT como el AE se mantienen en valores inferiores a 0,5.
- El cluster amarillo, con 267 días, contiene los mayores valores de RI, llegando en 2 ocasiones a rebasar el valor de 0,14. El AOT se mantiene bajo, sin superar los 0,5, mientras que el AE oscila entre 0,5 y 0,8.
- El cluster naranja, con 686 días, es aquel con mayor número de días. Presenta rangos muy similares al cluster gris, con la excepción del AE que abarca desde 0,8 hasta 1,2 aproximadamente.
- El cluster azul, con 223 días, recoge los días cuyo AE se encuentra entre 1,2 y 1,5 y cuyo AOT no supera 0,5 en ninguna ocasión. El RI se mantiene notablemente bajo, rara vez acercándose a 0,05.
- Por último, el cluster gris, con 64 días, es el que presenta mayores valores de AE (entre 1,5 y 3) y menores de AOT (entre 0 y 0,3). Por su parte, el RI se mantiene moderado, sin superar nunca 0,08.

En la Tabla 5.2 se resume la información expuesta en la lista anterior.

Tabla 5.2 Nº de días y rangos de parámetros para cada cluster.

Cluster	Color	AOT	AE	RI	Nº de días
1	Morado	1,7 - 2,4	0 - 0,25	0 - 0,01	2
2	Rojo	0,4 - 0,8	0 - 0,5	0 - 0,01	51
3	Verde	0 - 0,4	0 - 0,5	0 - 0,05	167
4	Amarillo	0 - 0,5	0,5 - 0,8	0 - 0,15	267
5	Naranja	0 - 0,5	0,8 - 1,2	0 - 0,12	686
6	Azul	0 - 0,5	1,2 - 1,6	0 - 0,06	223
7	Gris	0 - 0,5	1,6 - 3	0 - 0,08	64

5.3.2 Identificación de días con calima por clusters

El último procedimiento a realizar en este documento va a ser identificar la mayor cantidad de centroides posible con un tipo de día concreto (despejado, con calima intensa, con calima moderada, con presencia de nubes moderada o elevada, etc.). Para conseguirlo, se va a recurrir a las gráficas de irradiancia de los días elegidos como centroides por el algoritmo de clustering, así como las de los días que se encuentren alrededor del centroide, para comprobar hasta qué punto los días-centroides pueden representar al resto de días dentro su mismo cluster.

Comenzando por el cluster morado (días con muy alto AOT y bajos valores de AE y RI), tal y como se puede observar en la Figura 5.18 el día centroeide correspondiente a este cluster (31 de marzo de 2021) es un día típico de calima intensa, en la que la DHI se mantiene igual o superior a la DNI prácticamente durante la totalidad de las horas de sol.

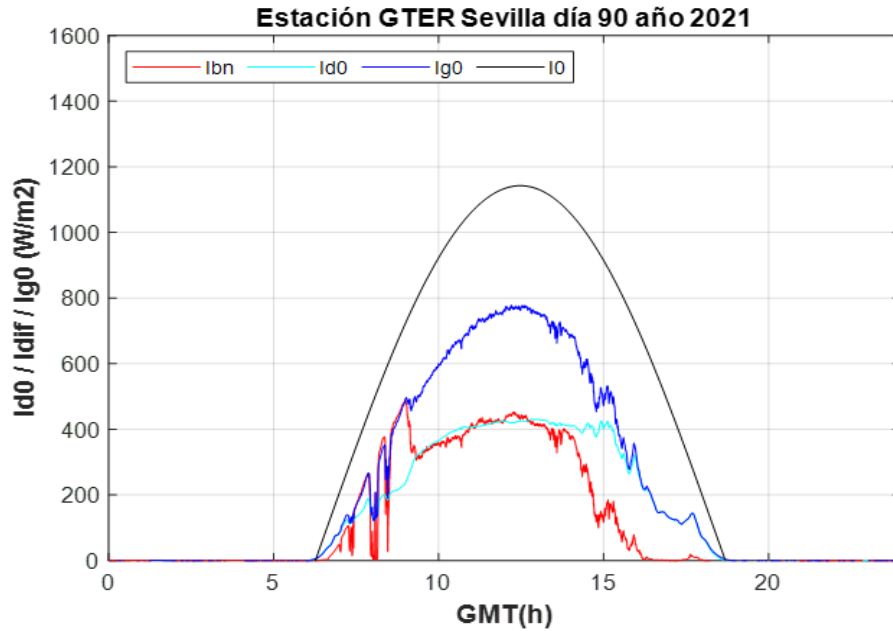


Figura 5.18 Gráfica del día 90 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster morado.

El resto de días del cluster morado han sido comprobados y también se confirman como días de calima intensa. A modo de ejemplo se representa la Figura 5.19 del día 11 de julio de 2021, donde la DHI se muestra claramente superior a la DNI:

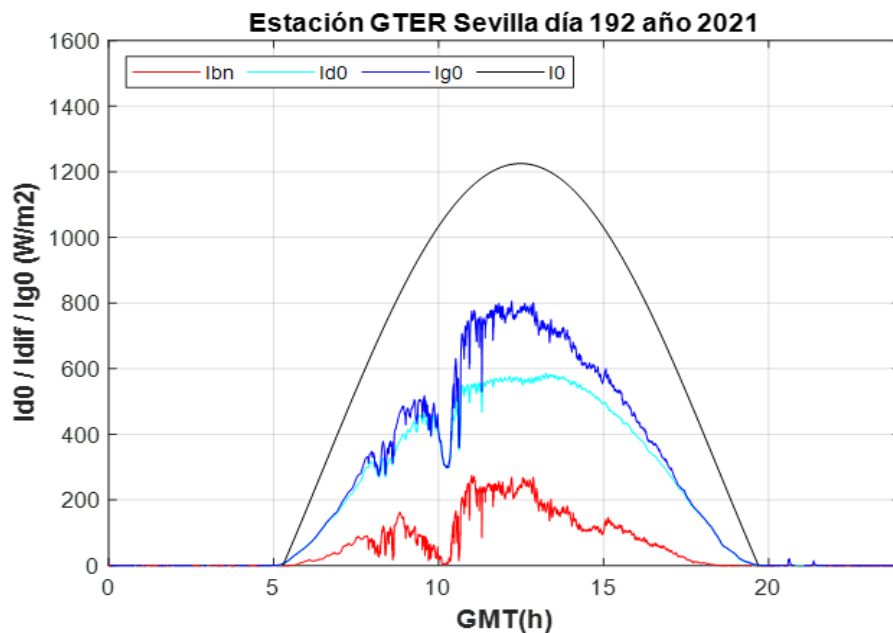


Figura 5.19 Gráfica del día 192 de 2021, Sevilla. Día del cluster morado.

Siguiendo con el cluster rojo (días con un AOT entre 0,4 y 0,8 y bajos valores de AE y RI), se ha averiguado que su día centroide se corresponde con el día 10 de agosto de 2021 y presenta la siguiente gráfica de irradiancias:

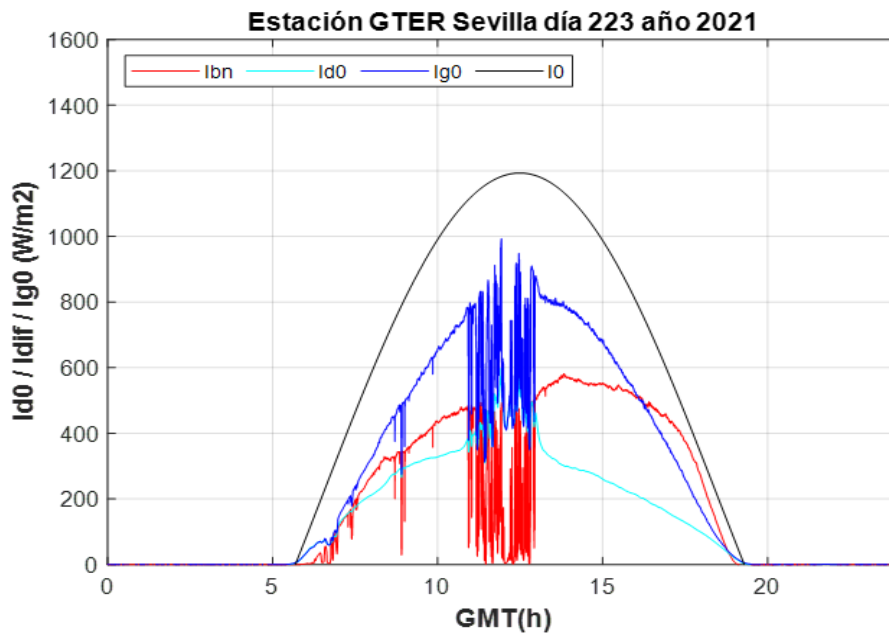


Figura 5.20 Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster rojo.

En este caso, también se puede apreciar la presencia de calima, pero la DNI se mantiene por encima de la DHI en todo momento (salvo un tramo nuboso en las horas centrales del día). Otro ejemplo de día que se encuentra próximo al centroide rojo en la gráfica de clustering es el 13 de agosto de 2021, cuya gráfica de irradiancias es la siguiente:

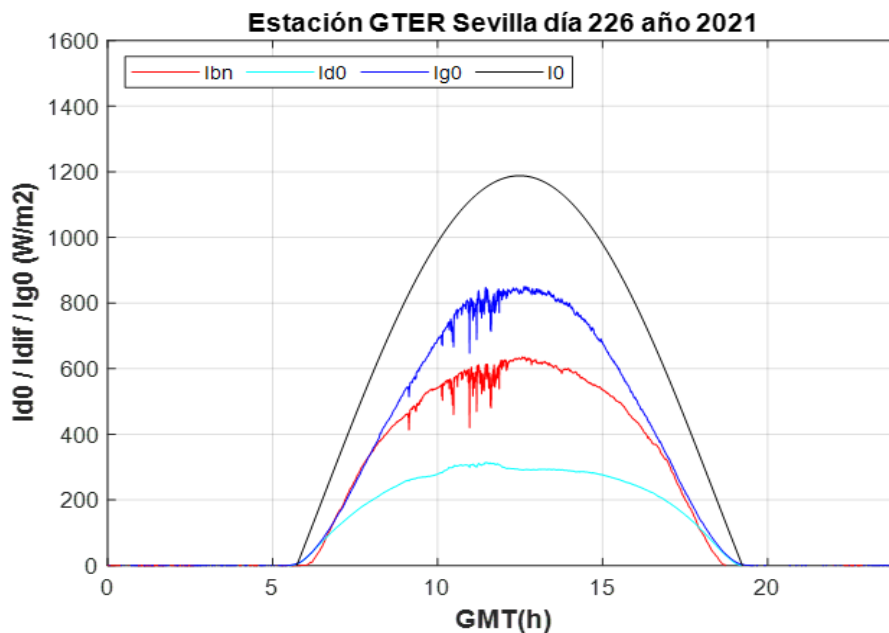


Figura 5.21 Gráfica del día 226 de 2021, Sevilla. Día del cluster rojo.

De igual forma, se han comprobado más días del cluster rojo y presentan características similares. Es cierto que a medida que disminuye el valor de AOT, la DNI toma valores más altos mientras que la DHI tiende a disminuir, dando lugar a días con menos calima o "más despejados", pero esto no impide afirmar que los días incluidos dentro del cluster rojo presentan una calima moderada. Que tanto en el cluster rojo como en el morado el AE sea bajo es indicativo de que en la distribución volumétrica predomina el modo grueso, una característica del polvo desértico. El RI en estos clusters es prácticamente igual a 0, lo que indica una baja absorción y, por tanto, una mayor dispersión de la radiación, otra característica de la calima (ya sea desértica o no).

Continuando con el cluster verde (días con bajo AOT y bajos valores de AE y RI), su día centroide es el 9 de mayo de 2021, tiene un valor de AOT de 0,1226, de RI de 0,0041 y de AE de 0,6979 (estos dos últimos parámetros son bastante más elevados que los de los días analizados hasta ahora) y presenta la siguiente gráfica de irradiancias:

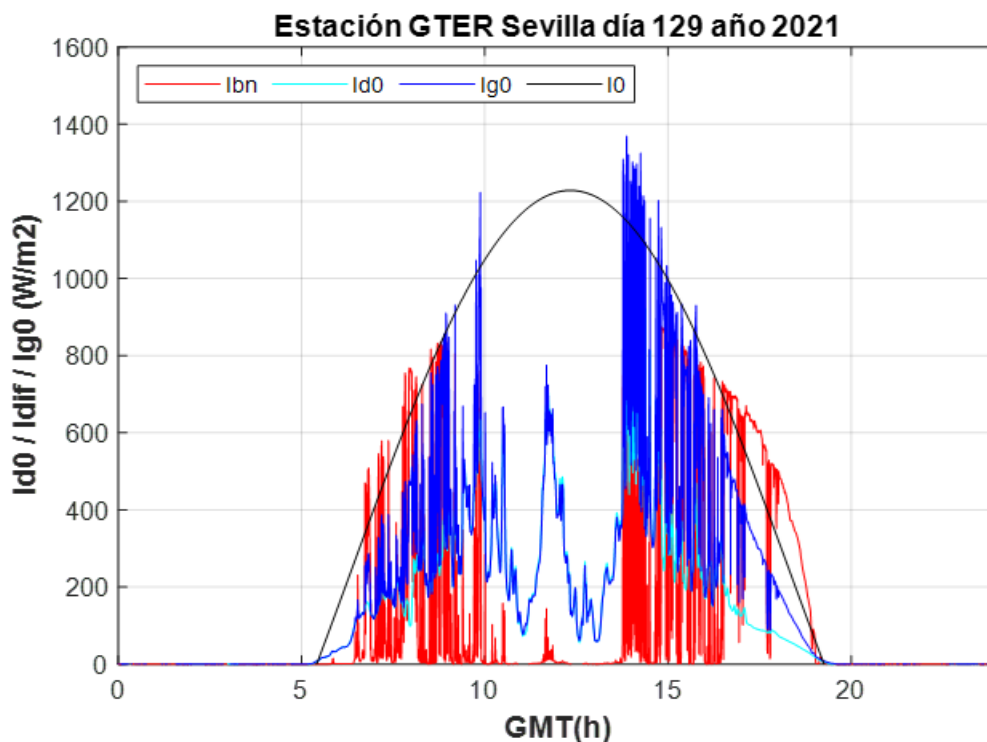


Figura 5.22 Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster verde.

Se puede comprobar que se trata de un día con una elevada presencia de nubosidad intermitente. Conforme se van analizando los días del cluster verde más cercanos al cluster rojo, encontramos gráficas de irradiancias tendentes hacia una calima leve, como en la Figura 5.23 correspondiente al 1 de mayo de 2022. Esto indica el carácter progresivo del que consta el agrupamiento realizado por el clustering, ya que los días que se encuentran cercanos entre clusters distintos tienen características similares entre sí, a pesar de tener también sus diferencias. Por tanto, mediante el clustering se ha alcanzado una solución de compromiso, en la que el número de clusters es el mínimo necesario para poder diferenciar días con calima intensa, moderada y leve.

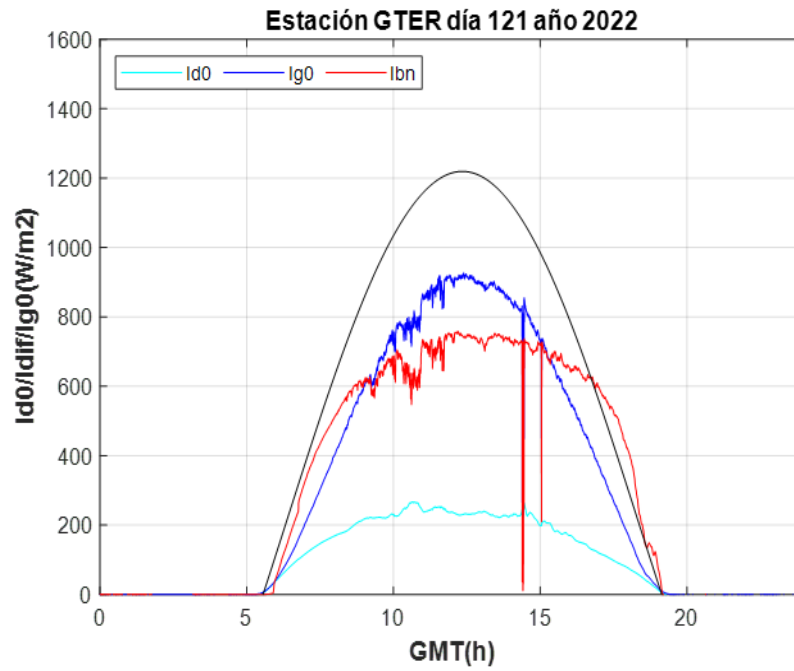


Figura 5.23 Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Día del cluster verde cercano al rojo.

A continuación, se van a representar las gráficas de irradiancia de los días centroides de los clusters amarillo, naranja, azul y gris en las Figuras , en las que se puede comprobar que los días tienden a ser despejados con alguna nubosidad en algún tramo del día al aumentar el AE y el RI sin aumentar el AOT.

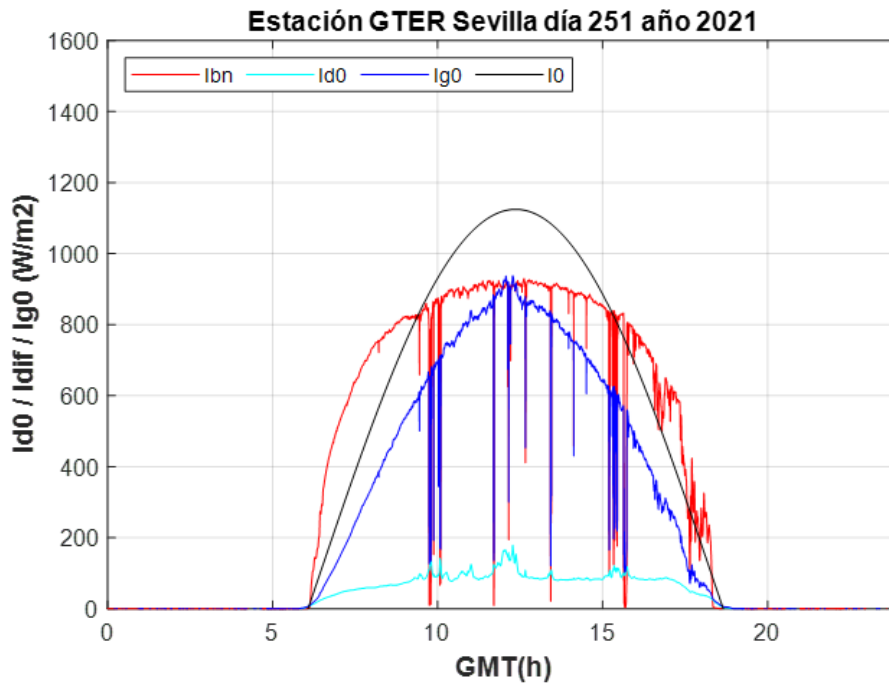


Figura 5.24 Gráfica del día 121 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster naranja.

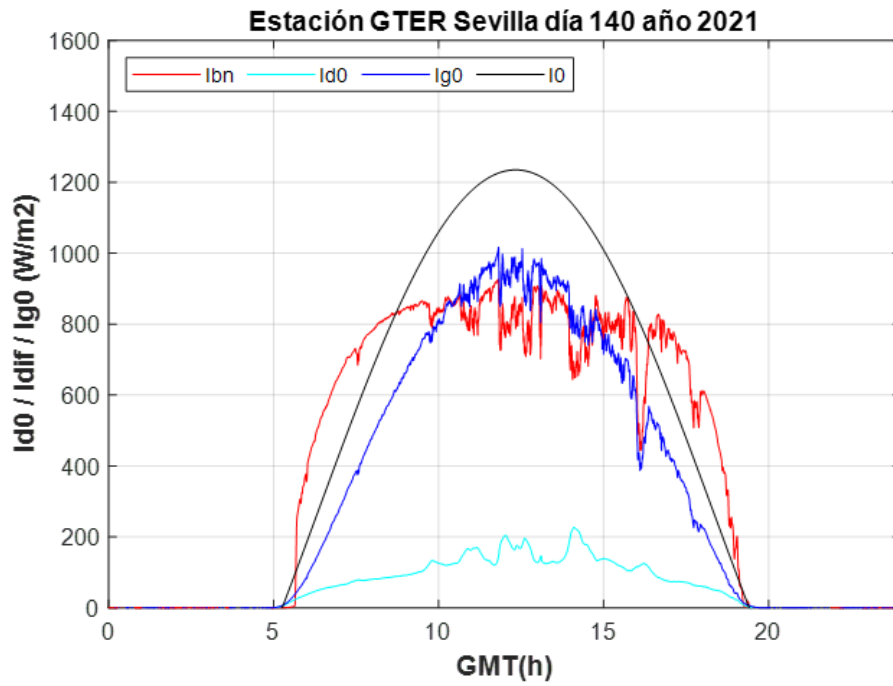


Figura 5.25 Gráfica del día 251 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster amarillo.

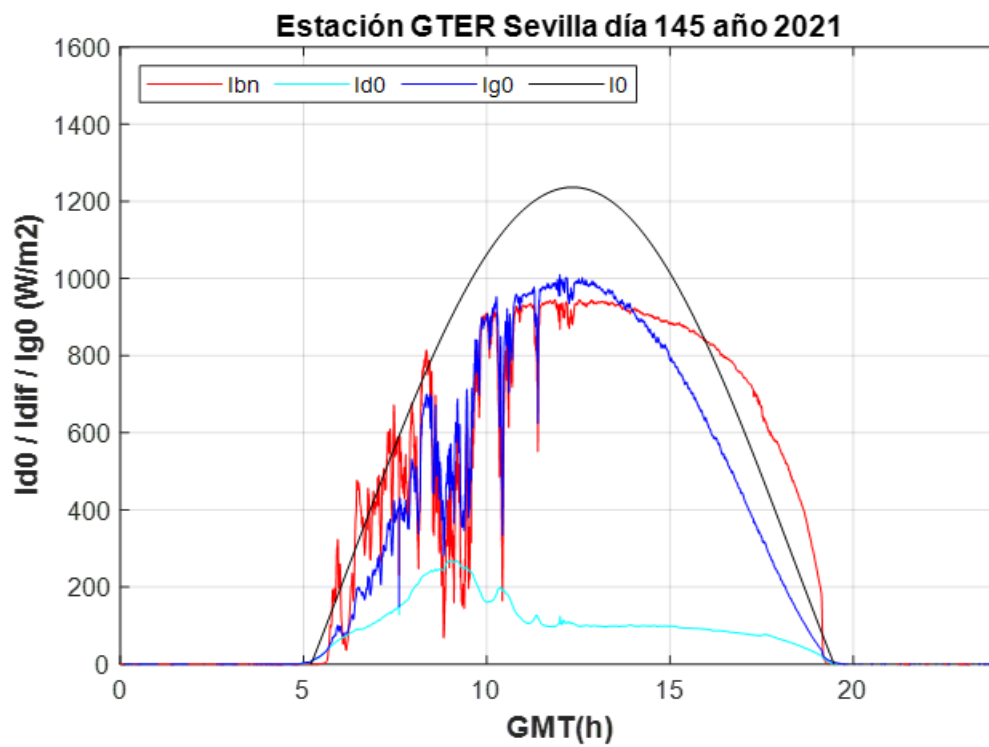


Figura 5.26 Gráfica del día 140 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster azul.

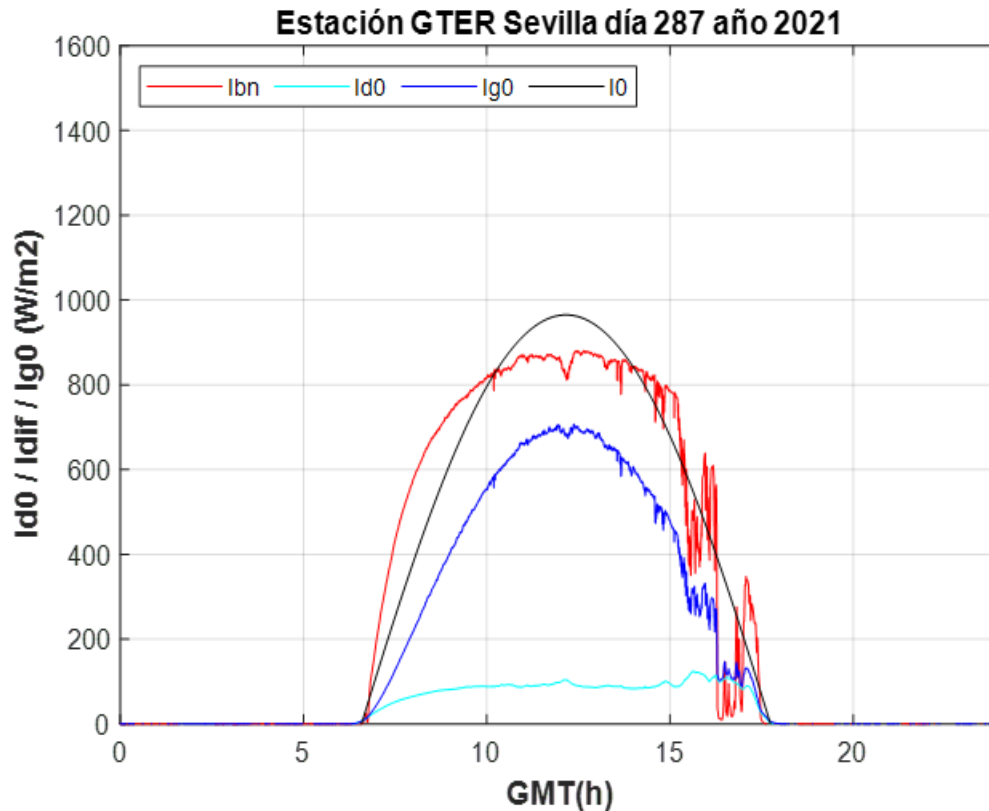


Figura 5.27 Gráfica del día 145 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster gris.

En resumen, los días pertenecientes al cluster morado son días identificados como calima intensa, mientras que los días que integran el cluster rojo se identifican como calima moderada. Aquellos días del cluster verde cercanos al cluster rojo pueden presentar una calima leve, y al incrementar los valores de AE y RI (y sin que el AOT crezca) para analizar los clusters amarillo, naranja, azul y gris únicamente se encuentran días con baja DHI y nubosidades sin presencia de calima.

Se concluye por tanto que el algoritmo de clustering ha tenido éxito, pues con él se ha conseguido una identificación más precisa de los días con calima (tanto fuerte como moderada) en Sevilla para el período estudiado.

5.3.3 Fase de Prueba

A continuación, se han introducido los datos relativos al año 2023 para poner a prueba el correcto funcionamiento del algoritmo y comprobar si la clasificación en grupos obtenida mediante el clustering se ajusta a diferentes tipos de días. El resultado son las Figuras 5.28, 5.29, 5.30 y 5.31:

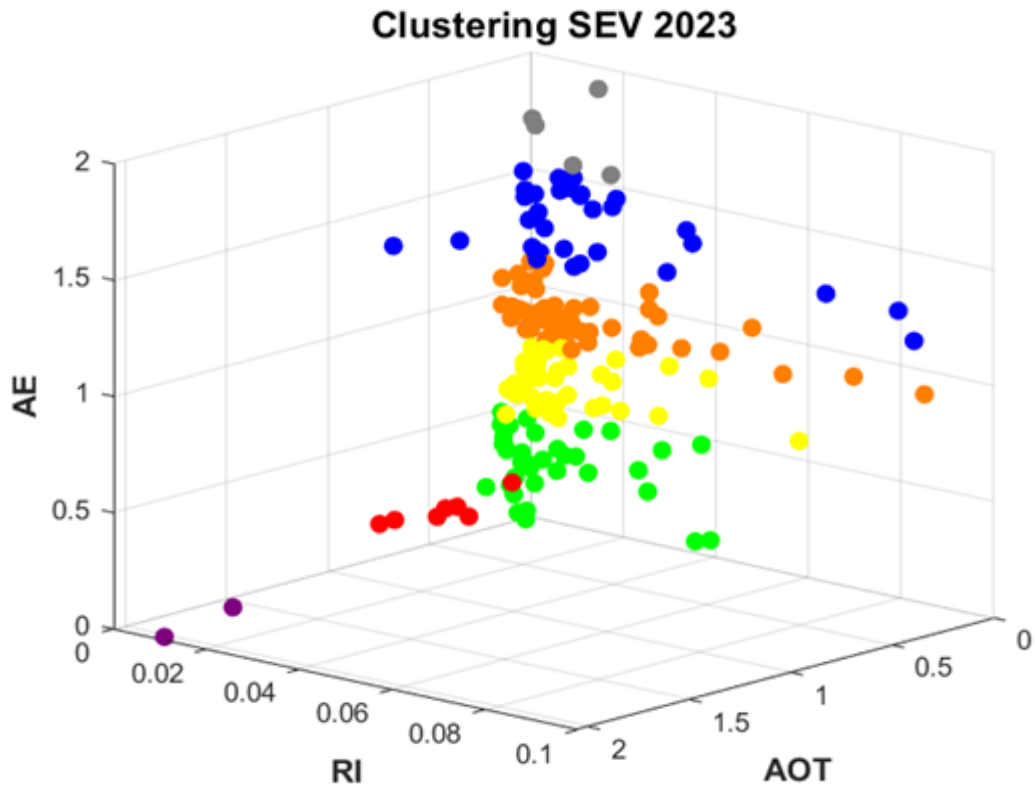


Figura 5.28 Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista 3D.

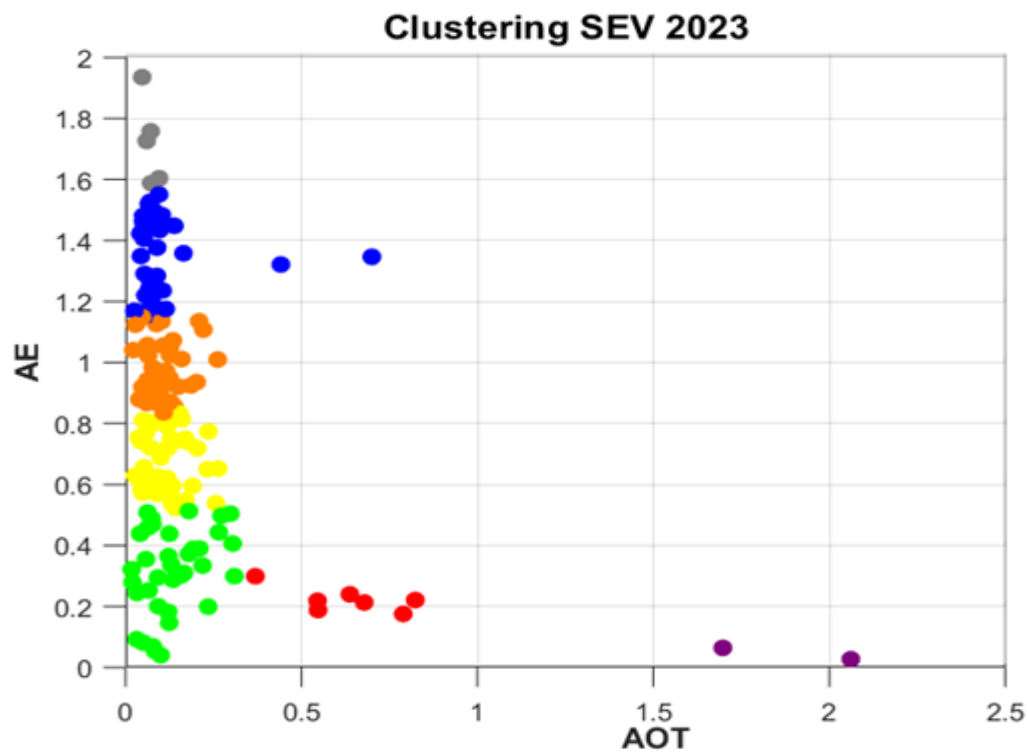


Figura 5.29 Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del AOT y del AE.

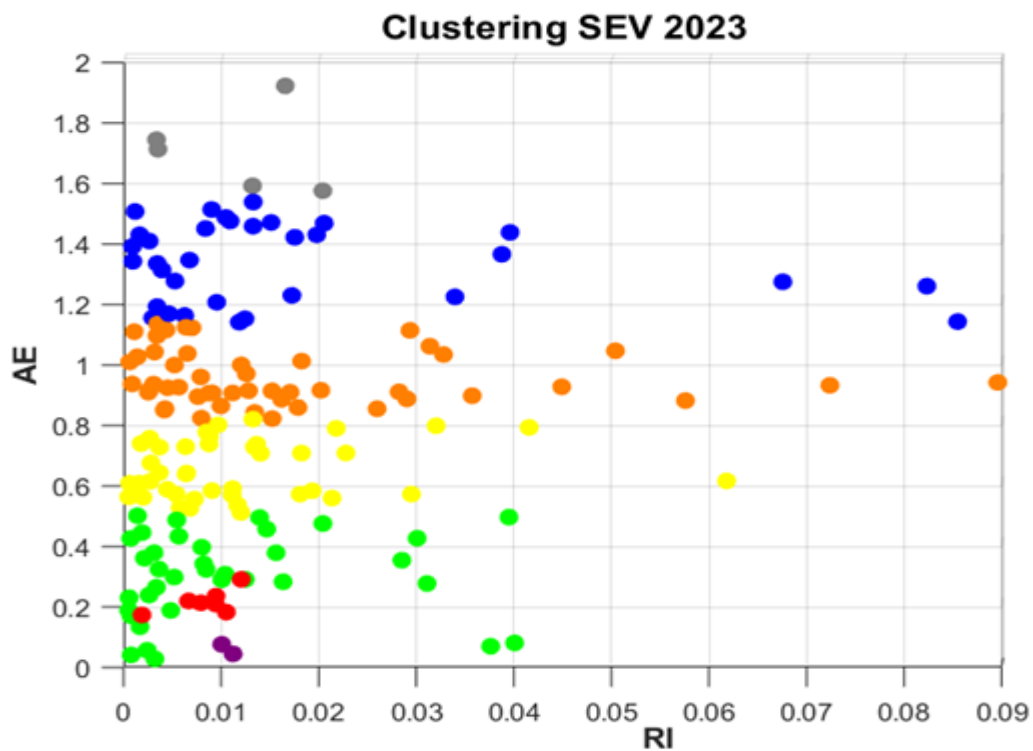


Figura 5.30 Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del RI y del AE.

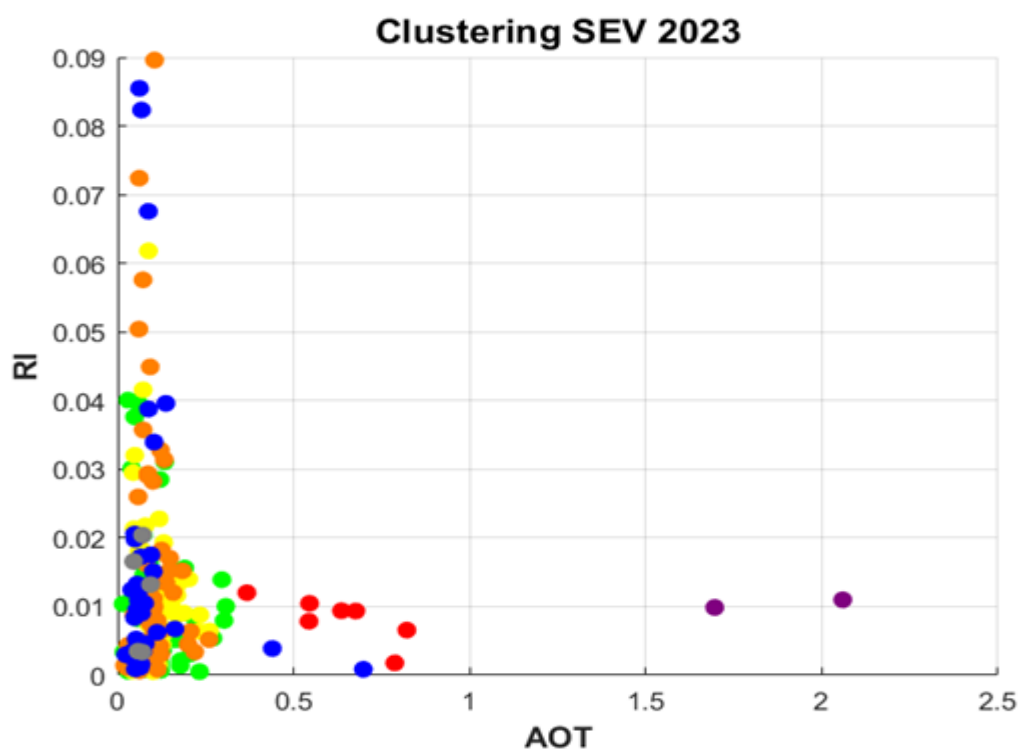


Figura 5.31 Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del RI y del AOT.

En las Figuras anteriores se puede visualizar que la distribución de los días sigue la misma

tendencia que la que se observaba en la Fase de Entrenamiento, con la mayoría de días presentando valores de AOT inferiores a 0,4, un grupo de tamaño mediano en el cluster rojo y tan solo 2 días en el cluster morado, que se destacan respecto de los demás por su elevado AOT. También se puede comprobar que durante este año, el valor de AE no es nunca superior a 2 (en la Fase de Entrenamiento el día el valor más elevado casi llegaba a 3) y el de RI nunca supera 0,1 (en la Fase de Entrenamiento esto lo cumplían 8 días). Es decir, los días de 2023 sí presentan valores de AOT tan elevados como sus años predecesores, pero en cambio no contienen valores de AE ni de RI tan extremos, aunque esto último puede ser debido a que claramente el tamaño de la muestra de 10 meses es muy inferior a una muestra de 3 años, con lo que habrá menos posibilidades de que alguno de sus días contenga un valor muy alto en alguno de sus parámetros.

6 Conclusiones

Con la finalidad de avanzar en el conocimiento sobre los aerosoles atmosféricos, en el presente estudio se ha realizado una caracterización de las propiedades del aerosol para el emplazamiento de Sevilla, encontrando una alta variabilidad y a su vez ciertas relaciones entre los parámetros que le dan sentido a la evolución de los mismos. Por ejemplo, los meses de otoño son aquellos en los valores de RI suelen ser mínimos, mientras que en la misma época los valores de SSA suelen ser los más elevados. Atendiendo al significado físico de estas propiedades, ambas concluyen que es durante estos meses cuando la dispersión de la radiación solar por parte de los aerosoles atmosféricos toma un papel protagonista respecto a la absorción.

En este trabajo también se ha propuesto la identificación de días con calima por medio de propiedades de los aerosoles, en la que los parámetros de RI y AE han sido útiles por los siguientes motivos: el primero, porque un valor bajo de RI indica una baja absorción de la radiación por parte de los aerosoles, con lo que se deduce que hay una alta dispersión de la radiación, lo cual es una de las características básicas de la calima; el segundo, porque una vez identificado por irradiancias un día de calima, un valor bajo de AE sugiere una distribución volumétrica tendente al modo grueso, y sabiendo que las partículas de polvo desértico tienen un tamaño grande, en consecuencia se puede deducir que la calima es de origen desértico.

Sin embargo, la propiedad que ha resultado más relevante a la hora de distinguir días con calima de días sin ella ha sido el AOT, pues solo con que un día tenga un valor promedio de AOT mayor de 0,5 ya se puede afirmar con total seguridad la presencia de una calima al menos moderada.

Con el clustering se han podido distinguir 4 días con fuerte presencia de calima desértica (cluster morado) y 58 días con calima desértica moderada (cluster rojo), una cifra considerablemente superior a la alcanzada mediante la identificación por irradiancias. Esto es debido a que el análisis puro de las propiedades ópticas de los aerosoles carece de las limitaciones de un análisis visual, ya que en los días con alta presencia de nubosidad es complejo dirimir si a su vez hay presencia de calima. Se puede afirmar rotundamente, por tanto, que el análisis de las variables por medio de clustering ha tenido éxito en su desempeño como identificador de días con calima.

Por último, cabe destacar que este trabajo deja abierta la puerta a otras investigaciones futuras en las que se compruebe, se corrija o se mejore la metodología aquí empleada, analizando un mayor número de variables, de longitudes de onda o diferentes emplazamientos con los que poder corroborar las conclusiones obtenidas.

Índice de Figuras

1.1	Balance energético en condiciones climáticas actuales. Unidades en $W m^{-2}$ [13]	1
1.2	De izda a dcha: Dispersión Rayleigh, dispersión Mie y dispersión Mie para partículas de mayor tamaño [13]	3
4.1	Vista de la estación del GTER	10
4.2	Radiómetro solar Prede POM-02	11
4.3	Diagrama de dispersión AOT(550nm) frente a EA(500-800) con los tipos de aerosoles [12]	15
4.4	Página de inicio de la web SKYNET	17
4.5	Selección de método para la descarga de datos	17
4.6	Selección de método y emplazamiento para la descarga de datos	18
5.1	Evolución del promedio diario del Espesor Óptico del Aerosol para $\lambda = 500$ nm	20
5.2	Evolución interanual de AOT para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses	20
5.3	Evolución del promedio diario del Albedo de Dispersión Simple para $\lambda = 500$ nm	21
5.4	Evolución interanual de SSA para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses	22
5.5	Evolución del promedio diario de la parte compleja del Índice de Refracción para $\lambda = 500$ nm	22
5.6	Evolución interanual de RI para $\lambda = 500$ nm en la estación del GTER con los datos agrupados por meses	23
5.7	Evolución del promedio diario del Exponente de Ångström	24
5.8	Evolución interanual de AE en la estación del GTER con los datos agrupados por meses	24
5.9	Distribución volumétrica acumulada para el período 2019-2023	25
5.10	Gráfica del día 220 de 2021, Sevilla. Día despejado	26
5.11	Gráfica del día 226 de 2021, Sevilla. Día con calima	27
5.12	Método del Codo para la determinación del Número Óptimo de Clusters	28
5.13	Clustering de los días del período 2019-2022. Vista 3D	29
5.14	Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del AOT y del AE	30
5.15	Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del RI y del AE	30
5.16	Clustering de los días del período 2019-2022. Vista del RI y del AOT	31
5.17	Centroides obtenidos mediante clustering junto con sus propiedades	31
5.18	Gráfica del día 90 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster morado	33
5.19	Gráfica del día 192 de 2021, Sevilla. Día del cluster morado	33
5.20	Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster rojo	34
5.21	Gráfica del día 226 de 2021, Sevilla. Día del cluster rojo	34
5.22	Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster verde	35

5.23	Gráfica del día 223 de 2021, Sevilla. Día del cluster verde cercano al rojo	36
5.24	Gráfica del día 121 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster naranja	36
5.25	Gráfica del día 251 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster amarillo	37
5.26	Gráfica del día 140 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster azul	37
5.27	Gráfica del día 145 de 2021, Sevilla. Centroide del cluster gris	38
5.28	Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista 3D	39
5.29	Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del AOT y del AE	39
5.30	Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del RI y del AE	40
5.31	Clustering de los días del año 2023 (de enero a octubre). Vista del RI y del AOT	40

Índice de Tablas

5.1	Tamaños de radio de partícula para los que se mide la $dVdlnr$	25
5.2	Nº de días y rangos de parámetros para cada cluster	32

Bibliografía

- [1] *About skynet | international skynet data center.*
- [2] *Los aerosoles tienen un gran impacto en las nubes de tormenta y la precipitación | iagua.*
- [3] *Spain hit by biggest solar radiation decline in 28 years in march – pv magazine international.*
- [4] *Aeronet, Aerosol optical depth.*
- [5] *Ministerio de Sanidad, Evaluación del riesgo de la transmisión de sars-cov-2 mediante aerosoles. medidas de prevención y recomendaciones, (2020).*
- [6] *Ministerio de Transición ecológica, I programa nacional de control de la contaminación atmosférica, 2019.*
- [7] T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, and S. Kinne, *Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols*, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **104** (1999), 31333–31349.
- [8] Santiago Martín Goizueta, Carlos Toledano Olmeda, and David Mateos Villán, *Evaluación del efecto radiativo de aerosol atmosférico y nubes en la ciudad de valladolid*, pp. 1–6.
- [9] Guerrero Rascado Juan Luis, *Técnica lidar para caracterización atmosférica mediante dispersión elástica y raman*, Editorial de la Universidad de Granada, 2009.
- [10] Carla Perucha Jurjo and Carlos Matrán Bea, *El método k-medias, facultad de ciencias*, 2022.
- [11] Xiaofan Ma, Gang Huang, and Junji Cao, *The significant roles of anthropogenic aerosols on surface temperature under carbon neutrality*, *Science Bulletin* **67** (2022), 470–473.
- [12] Carlos Toledano Olmeda, *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación él arenosillo de la red aeronet*, 2005, pp. 14–26.
- [13] Kevin E Trenberth, Yongxin Zhang, and John T Fasullo, *Observation-based estimates of global and basin ocean meridional heat transport time series.*