

# Trabajo de Fin de Grado Ingeniería de la Energía

## Caracterización de la nubosidad en Sevilla mediante medidas de un ceilómetro

Autor: Alberto Pérez Gallego

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

Cotutor: Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

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

Sevilla, 2019



Grupo de Investigación de  
Termodinámica y Energías Renovables



Trabajo de Fin de Grado  
Ingeniería de la Energía

# **Caracterización de la nubosidad en Sevilla mediante medidas de un ceilómetro**

Autor:

Alberto Pérez Gallego

Tutor:

Isidoro Lillo Bravo

Cotutor:

Miguel Larrañeta Gómez-Caminero

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

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera: Caracterización de la nubosidad en Sevilla mediante medidas de un ceilómetro

Autor: Alberto Pérez Gallego

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

Cotutor: Miguel Larrañeta Gómez-  
Caminero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

A mi familia, por su inestimable apoyo. Por creer en mí. Sin ellos, hoy no estaría escribiendo estas líneas.

A Kiali, por su paciencia, confianza y apoyo incondicional. A mis amigos, por la comprensión y los días de estudio compartidos.

Agradecer también a Isidoro Lillo y a Miguel Larrañeta por su ayuda y consejos en la realización de este trabajo. También a aquellos profesores que me transmitieron mediante su enseñanza el amor a la profesión.

*Alberto Pérez Gallego*

Sevilla, 2019



# Resumen

---

Caracterizar la nubosidad en un emplazamiento resulta de gran utilidad para proyectos energéticos. La nubosidad es el principal factor de la variabilidad de la radiación solar, conocer la interacción de la nubosidad con la radiación resulta de gran utilidad para la estimación y predicción de la misma.

En este estudio se realiza una revisión de algunos estudios sobre nubosidad realizados hasta la fecha. Se describen los tipos de nubes, la interacción de éstas con la radiación solar, y se describe la instrumentación dedicada a la observación de la nubosidad. Se realiza una revisión más detallada del ceilómetro, instrumento utilizado en este estudio para llevar a cabo una descripción de la nubosidad en Sevilla.

La información proporcionada por el ceilómetro resulta de gran utilidad para la predicción de la radiación solar, ya que proporciona información acerca de la altura de la base de la nube, su espesor óptico y su extensión vertical. Pese a su alto coste, su alta resolución temporal, y el mínimo mantenimiento requerido hacen del ceilómetro un instrumento de gran utilidad no solo en el ámbito de la predicción de radiación solar, sino también en otras aplicaciones en ingeniería, como la evaluación del potencial de enfriamiento nocturno, o en el enfriamiento nocturno de paneles fotovoltaicos haciendo uso de materiales de cambio de fase, aplicaciones que dependen en gran medida de la nubosidad.

Para caracterizar la nubosidad en Sevilla, se analiza la ocurrencia de nubes (definida como la relación entre el número de registros con nubes y el número total de registros), la altura de base de la nube, y se obtiene el espesor óptico y extensión vertical de la nube mediante el análisis de la señal proporcionada por el ceilómetro.

Algunos resultados obtenidos por el ceilómetros son los siguientes: la ocurrencia de nubes alcanza un mínimo durante los meses de verano, y un máximo en los meses de primavera e invierno. A su vez, la ocurrencia de nubes es mayoritaria en las capas bajas durante la mayor parte del año. Asimismo, las nubes en la capa baja son las de mayor espesor óptico. Las nubes en la capa media cuentan con un espesor óptico ligeramente menor a las de la capa baja, mientras que el espesor óptico de las nubes en la capa alta es considerablemente inferior al del resto de las capas. Finalmente, las nubes en la capa alta cuentan con una extensión vertical considerablemente mayor a las nubes en capas bajas.



# Abstract

---

Characterizing cloudiness of a location is quite useful for energy projects. Cloudiness is the main cause of variability in solar radiation. Characterizing the interaction between cloudiness and solar radiation is useful in estimating and predicting the solar resource.

Ceilometers provide information that is quite useful to predicting solar radiation. They provide information of cloud base height, optical thickness and vertical extension. Their high temporal resolution, along with their relatively low cost and minimum needs of maintenance suits them as an extremely useful instrument for predicting solar radiation as well as other engineering application such as night cooling of photovoltaic modules using phase change materials, or the evaluation of night radiative cooling's potential, given that these applications are highly dependent on cloudiness.

To characterize cloudiness in Sevilla, we analyze cloud occurrence (defined as the relation between the number of registers with clouds and the total number of registers) and cloud base height. We also obtain cloud optical depth and the vertical extension of clouds by analyzing the backscatter signal provided by the ceilometer.

Some results obtained by the ceilometer are: Cloud occurrence reaches a minimum during summer, and a maximum during spring and winter. Also, cloud occurrence in the low layer is higher than cloud occurrence in other layers for most of the year. We found that clouds in the low layer are optically thicker than those in other layers. While clouds in middle clouds are slightly optically thinner, clouds in high layer present a much lower optical thickness. Finally, clouds in high layer present a vertical extensión much larger than clouds in lower layers.



# Glosario

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| CBH                | Cloud Base Height                                 |
| LIDAR              | Light Detection and Ranging                       |
| RADAR              | Radio Detection and Ranging                       |
| Backscatter Signal | Señal de retrodispersión                          |
| WMO                | World Meteorological Organization                 |
| DIAL               | Differential Absorbtion Lidar                     |
| ISCCP              | International Satellite Cloud Climatology Project |
| WCRP               | World Climate Research Program                    |
| ARM                | Atmospheric Radiation Measurement                 |
| IPCC               | Intergovernmental Panel for Climate Change        |
| TCC                | Total Cloud Cover                                 |
| BCC                | Base Cloud Cover                                  |
| CTH                | Cloud Top Height                                  |
| MODIS              | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer     |



# Índice

---

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Agradecimientos</b>   | <b>vii</b>  |
| <b>Resumen</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>Abstract</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>Glosario</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>Índice</b>  | <b>xv</b>   |
| <b>Índice de Tablas</b>  | <b>xvii</b> |
| <b>Índice de Figuras</b>   | <b>xix</b>  |
| <b>1 Objetivo</b>  | <b>21</b>   |
| <b>2 Fundamentos</b>   | <b>22</b>   |
| 2.1 <i>Definición y clasificación de las nubes.</i>              | 22          |
| 2.1.1 Nubes en capas altas:                                      | 22          |
| 2.1.2 Nubes en capas medias                                      | 24          |
| 2.1.3 Nubes en capas bajas                                       | 25          |
| 2.1.4 Nubes con desarrollo vertical                              | 26          |
| 2.2 <i>Fundamentos del enfriamiento nocturno</i>                 | 28          |
| 2.3 <i>Influencia de la nubosidad en la radiación solar</i>      | 30          |
| 2.4 <i>Estudios de nubosidad</i>                                 | 30          |
| <b>3 Instrumentación</b>   | <b>33</b>   |
| <b>4 Metodología.</b>  | <b>38</b>   |
| 4.1 <i>Base de datos</i>   | 38          |
| 4.2 <i>Caracterización de la nubosidad</i>                       | 40          |
| 4.3 <i>Procesado de datos</i>                                    | 41          |
| 4.3.1 Elaboración de la matriz horaria de ocurrencia de nubes    | 42          |
| 4.3.2 Elaboración de matriz horaria de la señal del ceilómetro   | 43          |
| 4.3.3 Obtención del espesor óptico y extensión vertical          | 45          |
| <b>5 Resultados y discusión.</b>                                 | <b>46</b>   |
| 5.1 <i>Ocurrencia de nubes</i>                                   | 46          |
| 5.1.1 Ocurrencia de nubes media mensual                          | 46          |
| 5.1.2 Ocurrencia de nubes media mensual en las distintas capas   | 47          |
| 5.1.3 Ocurrencia de nubes durante el día y la noche              | 48          |
| 5.2 <i>Altura de base de la nube</i>                             | 49          |
| 5.2.1 Altura media mensual de base de la nube                    | 50          |
| 5.2.2 Altura media mensual de base de la nube en capa 1 (0-2km)  | 52          |
| 5.2.3 Altura media mensual de base de la nube en capa 2 (2-7 km) | 53          |
| 5.2.4 Altura media mensual de base de la nube en capa 3          | 55          |
| 5.3 <i>Espesor óptico y tamaño de nube</i>                       | 56          |
| 5.3.1 Espesor óptico de nube                                     | 56          |
| 5.3.2 Extensión vertical de las nubes                            | 57          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>Sumario y Conclusiones.</b>         | <b>59</b> |
| <b>7</b> | <b>Líneas futuras de investigación</b> | <b>61</b> |
|          | <b>Referencias</b>                     | <b>62</b> |
|          | <b>Anexos</b>                          | <b>65</b> |
|          | <i>Anexo 1</i>                         | <i>65</i> |
|          | <i>Anexo 2</i>                         | <i>68</i> |

# ÍNDICE DE TABLAS

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 2-1: Genera de nubes en distintas capas                        | 22 |
| Tabla 4-1: Localización de la estación meteorológica                 | 38 |
| Tabla 4-2: Variables reportadas por el ceilómetro                    | 39 |
| Tabla 4-4: Capas de nubes y rangos                                   | 40 |
| Tabla 5-1: Ocurrencia de nubes media mensual en distintas capas      | 46 |
| Tabla 5-2: Ocurrencia de nubes diurna y nocturna                     | 48 |
| Tabla 5-3: Altura media mensual de base de la nube                   | 49 |
| Tabla 5-4: Altura de base de la nube media mensual diurna y nocturna | 49 |



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 2-1: Genus Cirrus. Stephen Burt. WMO Gallery  | 23 |
| Ilustración 2-2: Man, K. (2013), Cirrostratus. Recuperado de <a href="https://cloudatlas.wmo.int">https://cloudatlas.wmo.int</a> .  | 24 |
| Ilustración 2-3: Ho, T.C (2015) Alto cumululus. Recuperado de <a href="https://cloudatlas.wmo.int">https://cloudatlas.wmo.int</a> .   | 24 |
| Ilustración 2-4: Rangno, A. (2010). Altostratus. Recuperado de <a href="https://cloudatlas.wmo.int">https://cloudatlas.wmo.int</a> .  | 25 |
| Ilustración 2-5: Gudd, M. (2015) Stratus. Recuperado de <a href="https://cloudatlas.wmo.int">https://cloudatlas.wmo.int</a> .   | 26 |
| Ilustración 2-6: Xu, D.W. (2015). Cumulus. Recuperado de <a href="https://cloudatlas.wmo.int">https://cloudatlas.wmo.int</a> .  | 27 |
| Ilustración 2-7: Genera en cada capa. Fuente: [4]   | 28 |
| Ilustración 3-1: Piranómetro instalado en la estación meteorológica de la ETSI de Sevilla. Fuente: <a href="http://estacionmeteo.us.gter.es/">http://estacionmeteo.us.gter.es/</a>                      | 34 |
| Ilustración 3-2: Componentes de un sistema LIDAR. Fuente: [18]  | 35 |
| Ilustración 3-3: Señal de retrodispersión instantánea reportada por el ceilómetro   | 37 |
| Ilustración 4-1: Estación Meteorológica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la ETSI de Sevilla. Fuente: <a href="http://estacionmeteo.us.gter.es/">http://estacionmeteo.us.gter.es/</a> | 38 |
| Ilustración 4-2: Ceilómetro instalado en la ETSI de Sevilla. Fuente: <a href="http://estacionmeteo.us.gter.es/">http://estacionmeteo.us.gter.es/</a>  | 39 |
| Ilustración 4-3: Perfil de intensidad de la señal de retrodispersión. 1 de abril de 2018.   | 44 |
| Ilustración 4-4: Perfil de intensidad de la señal de retrodispersión simplificado. 1 de abril de 2018.  | 45 |
| Ilustración 5-1: Ocurrencia de nubes media mensual  | 47 |
| Ilustración 5-2: Ocurrencia de nubes media mensual desglosada por capas   | 47 |
| Ilustración 5-3: Ocurrencia de nubes media mensual diurna y nocturna  | 48 |
| Ilustración 5-4: Altura media mensual de base de la nube  | 50 |
| Ilustración 5-5: Histograma de Altura de base de la nube  | 51 |
| Ilustración 5-6: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna  | 51 |
| Ilustración 5-7: Altura media de base de la nube en capa 1  | 52 |
| Ilustración 5-8: Histograma de altura de base de la nube en capa 1  | 52 |
| Ilustración 5-9: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna en capa 1  | 53 |
| Ilustración 5-10: Altura media mensual de base de la nube en capa 2   | 53 |
| Ilustración 5-11: Histograma de altura de base de la nube en capa 2   | 54 |
| Ilustración 5-12: Altura media mensual diurna y nocturna de base de la nube en capa 2   | 54 |
| Ilustración 5-13: Altura media mensual de base de la nube en capa 3   | 55 |
| Ilustración 5-14: Histograma de altura de base de la nube en capa 3   | 55 |
| Ilustración 5-15: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna en capa 3   | 56 |
| Ilustración 5-16: Espesor óptico de nube  | 56 |
| Ilustración 5-17: Histograma de tamaño de nubes en capa baja  | 57 |
| Ilustración 5-18: Histograma de tamaño de nubes en capa baja  | 58 |
| Ilustración 5-19: Histograma de tamaño de nubes en capa alta  | 58 |



---

# 1 OBJETIVO

---

La progresiva implantación de sistemas de energía solar en la red eléctrica hace necesaria una mejora de las predicciones de radiación solar, que permitan obtener predicciones en alta resolución temporal. La principal fuente de variabilidad de la radiación solar es la nubosidad. El ceilómetro ofrece información de utilidad para caracterizar la nubosidad y su variabilidad temporal y espacial, y por ende, ofrecer predicciones de radiación solar más precisas.

Este proyecto tiene como objetivo la caracterización de la nubosidad en Sevilla mediante el análisis de las medidas de un año completo comprendido entre marzo 2018 y febrero 2019 obtenidas por un ceilómetro. Dicha caracterización será de utilidad en dos aplicaciones: la predicción de la radiación solar y la influencia de la nubosidad en el enfriamiento nocturno de un fluido utilizado en climatización de espacios abiertos. En el caso de la predicción de radiación solar, se pretende obtener aquellas variables de la nubosidad que permitan estimar la atenuación que éstas realizan sobre la radiación solar. En el caso del enfriamiento nocturno del fluido, se pretende determinar en qué medida la presencia de nubes impide el intercambio radiante del fluido con la atmósfera. Para ello se hará uso de las siguientes variables obtenidas por el ceilómetro: la altura de la base de la nube y la ocurrencia de nube (definida como la relación entre números de registros con nubes y número de registros totales). Se clasificarán estas dos variables en tres capas, divididas por alturas. También se hará uso de la señal de retrodispersión para la elaboración de perfiles de intensidad, así como una estimación del espesor óptico de la nube. Se dividirán las medidas en diurnas y nocturnas para obtener resultados de utilización en ambas aplicaciones. Posteriormente, se obtendrá una matriz de valores horarios con la siguiente información: La clasificación de cada hora como nubosa (cuando más de la mitad de los registros de dicha hora cuentan con nubes) o despejada, así como los valores medios de la señal de retrodispersión a cada altura de la hora correspondiente. Finalmente, se obtendrá una estimación del espesor óptico de las nubes y su tamaño. Dicha información será de utilidad para determinar cómo afecta la nubosidad a las aplicaciones antes mencionadas.

## 2 FUNDAMENTOS

### 2.1 Definición y clasificación de las nubes

Una nube es “un agregado visible de pequeñas gotas de agua y cristales de hielo suspendidos en el aire”. Las nubes existen en infinidad de formas, tamaños y espesores. El primer sistema de clasificación ampliamente aceptado fue propuesto por el científico naturalista Luke Howard en 1802 (que a su vez se basó en los trabajos del francés Lamarck), el cual se vería ampliado por R. Abercromby y H. Hildebrandsson en 1887, siendo éste el sistema ampliamente aceptado en la actualidad [1]

Este sistema emplea un conjunto de nombres en latín para clasificar las nubes en función de su apariencia física. Este sistema identifica 10 tipos (o *genera*) de nubes, según sus formas básicas. Estos tipos son clasificados en cuatro grupos, en función de la altura a la que se desarrollan (Nubes altas, Nubes medias, Nubes bajas y Nubes con desarrollo vertical) [2] [3]

La clasificación de los tipos según la altura es distinta según la latitud de la zona que estemos considerando, debido a la variación de la temperatura.

A continuación, se presenta una tabla con los diferentes *genera* de nubes, y la altura a la que se dan en función de la latitud:

| Nivel | Genera             | Región Polar | Región Templada | Región tropical |
|-------|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| Alto  | Cirrus (Ci)        | 3-8 km       | 5-13 km         | 6-18 km         |
|       | Cirrocumulus (Cc)  |              |                 |                 |
|       | Cirrostratus (Cs)  |              |                 |                 |
| Medio | Alto cumulus (Ac)  | 2-4 km       | 2-7 km          | 2-8 km          |
|       | Altostratus (As)   |              |                 |                 |
|       | Nimbostratus (Ns)  |              |                 |                 |
| Bajo  | Stratus (St)       | 0-2 km       | 0-2 km          | 0-2 km          |
|       | Stratocumulus (Sc) |              |                 |                 |
|       | Cumulus (Cu)       |              |                 |                 |
|       | Cumulonimbus (Cb)  |              |                 |                 |

Tabla 2-1: Genera de nubes en distintas capas

Las nubes *Cumulus* y *Cumulonimbus* se llaman nubes de desarrollo vertical. Quedan clasificadas como nubes de capa baja por encontrarse su base a estas alturas, pero pueden extenderse a capas superiores.

Sevilla es un clima subtropical de verano seco, según la clasificación de Köppen (Csa), o mediterráneo cálido.

#### 2.1.1 Nubes en capas altas

Las nubes en capas altas están formadas principalmente por cristales de hielo, debido a las bajas temperaturas y al escaso contenido de humedad en el aire a esta altura.

### 2.1.1.1 Cirrus (Ci)

Las más comunes de las nubes altas, con apariencia de filamentos delgados y tenues, translúcidos o transparentes. Por si solas no provocan precipitaciones, aunque la presencia de multitud de grupos de *Cirrus* puede ser indicador de la proximidad de una tormenta

Están compuestas casi exclusivamente por cristales de hielo muy dispersos entre sí, lo que justifica la transparencia de estas nubes [4]



Ilustración 2-1: Genus Cirrus. Stephen Burt. WMO Gallery

### 2.1.1.2 Cirrocumulus (Cc)

Menos frecuentes que el *genus cirrus*. Formadas por multitud de pequeñas nubes con la apariencia de granos, dispuestos de forma más o menos ordenada. Están compuestos mayoritariamente por cristales de hielo.

### 2.1.1.3 Cirrostratus (Cs)

Se caracterizan por su forma laminar y continua y su delgadez, que permite ver a través de ellas. Al pasar la luz del sol por la nube se produce la formación de un halo. La presencia de capas gruesas de *cirrostratus*, junto con nubes de media altitud, pueden ser indicador de una lluvias o nevadas próximas [1]



Ilustración 2-2: Man, K. (2013), Cirrostratus. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int>.

## 2.1.2 Nubes en capas medias

Estas nubes están compuestas en su mayor parte por gotas de agua y, si las temperaturas son lo suficientemente frías, por algunos cristales de hielo. Son generalmente de mayor grosor que las de capas altas, y en ocasiones dan lugar a precipitaciones

### 2.1.2.1 Altocumulus (Ac)

Compuestas mayoritariamente por gotas de agua, lo que les confiere un color grisáceo que permite diferenciarlas de los *genera* de capas altas. Su grosor suele ser menor que 1 km, debido a la alta concentración de gotas de agua, lo cual puede originar un oscurecimiento parcial del disco solar. Se caracterizan por una apariencia hinchada. En ocasiones pueden darse bandas paralelas de este tipo de nubes.



Ilustración 2-3: Ho, T.C (2015) Altocumulus. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int>.

### 2.1.2.2 Altostratus (As)

Compuestas mayoritariamente por cristales de hielo, aunque también se observa la presencia de gotas de agua. La presencia de cristales de hielo le proporcionan una apariencia difusa. Se caracterizan por un color grisáceo y azulado.

Son frecuentes los espesores mayores de 2 km. A pesar de su espesor, y debido a que la concentración de partículas es baja, es posible apreciar la presencia del sol como un débil disco.

En ocasiones, la altura del tope de la nube es cercana a la base de las nubes de la capa alta. Normalmente cubren gran parte del cielo. Su presencia suele ser indicador de precipitaciones inminentes.



Ilustración 2-4: Rangno, A. (2010). Altostratus. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int>.

### 2.1.3 Nubes en capas bajas

#### 2.1.3.1 Nimbostratus (Ns)

Apariencia y composición muy similar a *Altostratus*, pero con un color grisáceo más oscuro. Esto se debe a que en su base los cristales de hielo están fundiéndose a gotas de agua. Esto provoca que la altura de la base de la nube parezca ser más baja y sea difícil de diferenciar. Producen precipitación ligera o moderada de manera más o menos continua.

Las nubes de *genera Nimbostratus* generalmente se forman en la capa media, pero se desarrollan verticalmente hacia las capas baja y alta. Por ello, en otros textos pueden ser clasificadas como nubes de capa baja, aunque en este documento las clasificaremos como nubes de capa media.

A diferencia de la *Altostratus*, la *Nimbostratus* provocan una total obscuración del sol, debido a la precipitación y posterior evaporación del agua y su mezcla con el aire.

#### 2.1.3.2 Stratus (St)

Son nubes generalmente grises, uniformes, similares a una niebla que no toca el suelo. Su espesor no suele alcanzar 1 km y suelen ocupar la totalidad del cielo. Están formadas en su mayor parte por gotas de agua, aunque pueden aparecer algunos cristales de hielo en la zona alta de la nube si la temperatura es suficientemente baja. Suele ocasionar llovizna.



Ilustración 2-5: Gudd, M. (2015) Stratus. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int>.

### 2.1.3.3 Stratocumulus (Sc)

Presentan una forma abultada, irregular y menos uniforme que las *Stratus*. La altura de la base de la nube es mayor que la de las *Stratus*. Se caracterizan por tonalidades grises con regiones más claras y oscuras. Al igual que las *Stratus*, producen llovizna.

### 2.1.4 Nubes con desarrollo vertical

Estas nubes deben su formación a un proceso convectivo, que se produce en condiciones de atmósfera inestable. En estas condiciones, se favorece la circulación vertical del aire, produciéndose la condensación del agua presente en él y formando nubes. En general, raramente cubren la totalidad del cielo, lo que permite diferenciarlas de otros tipos de nubes.

#### 2.1.4.1 Cumulus (Cu):

Se caracterizan por su apariencia hinchada, que recuerda al algodón, y una base relativamente plana, de color blanco o gris. Generalmente aparecen como nubes aisladas con importantes distancias entre sí. La base de la nube se encuentra generalmente por encima de los 1000 m, extendiéndose horizontalmente 1 km aproximadamente. El desarrollo de estas nubes depende de las condiciones de estabilidad atmosférica y la humedad del aire.

Estas nubes se extienden verticalmente, tomando su parte alta forma de torre. Su desarrollo vertical es limitado. Aquellas con un crecimiento vertical menor se producen en días soleados y cálidos, y forman parte de la especie *humilis*. No suelen producir precipitación.

Cuando su desarrollo vertical es mayor y toman la apariencia de una coliflor, se clasifican en la especie *congestus*. Producen precipitación cuando su espesor supera los 3 km [1]



Ilustración 2-6: Xu, D.W. (2015). Cumulus. Recuperado de <https://cloudatlas.wmo.int>.

#### 2.1.4.2 Cumulonimbus (Cb)

Cuando las nubes *cumulus* de especie *congestus* continúan su desarrollo vertical, pasan a formar parte del *genera cumulonimbus*. Estas nubes provocan importantes precipitaciones e incluso tormentas. Además, debido al importante intercambio energético que se produce en la condensación del vapor de agua, se producen corrientes de aire de hasta 70 nudos [1].

Estas nubes se caracterizan por su extensión vertical: La base de la nube puede encontrarse a 600 metros y extenderse hasta los 12000 metros

En la siguiente figura se representan la totalidad de los *genera* de nubes que se producen en las distintas capas, para así facilitar su distinción

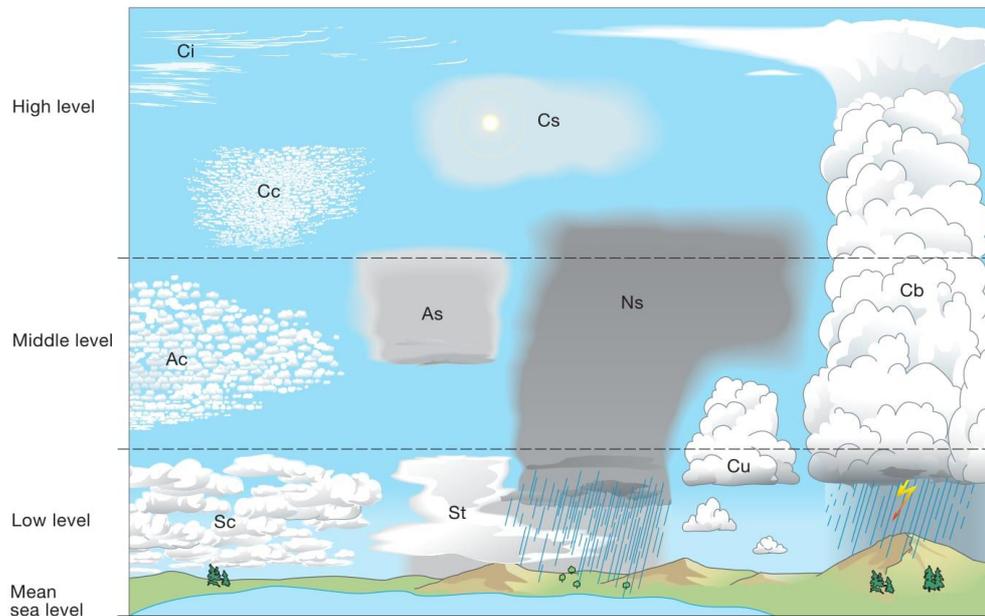


Ilustración 2-7: Genera en cada capa. Fuente: [4]

## 2.2 Fundamentos del enfriamiento nocturno

El enfriamiento nocturno de un cuerpo consiste en la pérdida de calor de dicho cuerpo debido al intercambio radiante de éste con el espacio exterior, el cual actúa como sumidero de calor al encontrarse a una temperatura de aproximadamente 3 K.

Un cuerpo a una temperatura ambiente emite gran parte de su radiación en el espectro infrarrojo. En longitudes de onda entre los 8 y 13  $\mu\text{m}$  (y en condiciones de cielo claro) la atmósfera permite el paso de radiación infrarroja sin que esta sea absorbida, haciendo posible el enfriamiento radiante. Este rango de longitudes de onda se conoce como ventana atmosférica infrarroja. Además, es en esta ventana de longitudes de onda en la que la radiación de onda larga se emite a intensidad máxima.

La radiación neta emitida por una superficie puede obtenerse como la diferencia entre la radiación infrarroja emitida por la superficie y la radiación infrarroja emitida por la atmósfera y absorbida por la superficie [5].

La radiación infrarroja emitida por una superficie puede calcularse conocida la temperatura del cuerpo mediante la ley de Stefan-Boltzmann

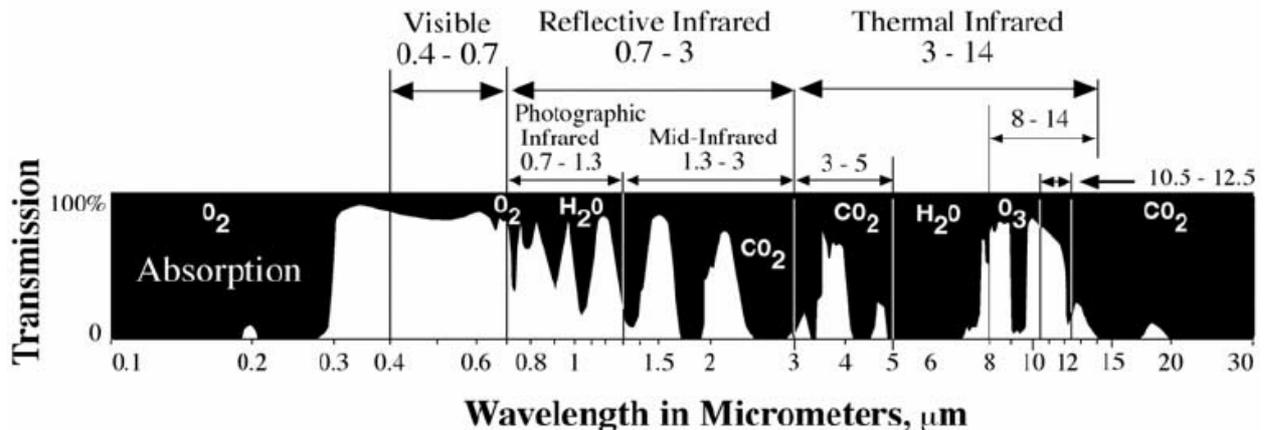


Figure 1: Ventana atmosférica. Emam, A.R. (2008) Fuente: Alavi Panah et al. Criteria of selecting satellite data for studying land resources.

La radiación atmosférica infrarroja es emitida por gases que componen la atmósfera como vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, etc.

En [5] se recogen los métodos presentados por distintos autores para el cálculo de la radiación infrarroja emitida por la atmósfera hacia la superficie en función de distintos datos de partida.

Se proponen dos métodos para calcular la emisividad del cielo: Basándose en mediciones de la radiación infrarroja incidente procedente de la atmósfera y generando correlaciones, o bien obteniendo la composición de la atmósfera para calcular las propiedades radiantes de ésta. Este último método es considerablemente más complejo.

En [6] se recogen correlaciones para estimar la radiación infrarroja procedente de la atmósfera tanto en situaciones de cielo claro como cielo con presencia de nubes. La potencialidad del enfriamiento nocturno depende de la cantidad de vapor de agua presente en la atmósfera, de la humedad relativa y de la cobertura de nubes, ya que impiden el intercambio radiante con el espacio, ejerciéndolo en cambio con las nubes que se encuentran a mayor temperatura.

Las nubes reducen la radiación de onda larga emitida desde la superficie al espacio, ya que la absorben, ejerciendo el llamado efecto invernadero de las nubes. La energía absorbida por la nube puede ser emitida desde el tope de la nube, a una temperatura más baja, o puede ser emitida de vuelta a la superficie. Por tanto, en presencia de nubes, el intercambio radiante del fluido, en lugar de producirse con la atmósfera, a una temperatura aproximada de 3 K, se realiza con las nubes, que se encuentran a una temperatura considerablemente mayor. Además, parte de la radiación emitida por el fluido puede ser absorbida por las nubes y emitida de vuelta al fluido, limitando aún más la capacidad de enfriamiento nocturno.

Las correlaciones que se recogen en [5] requieren del conocimiento de diversas variables meteorológicas, las cuales son fuertemente dependientes del emplazamiento. Variables como la temperatura de bulbo seco y húmedo, humedad relativa, radiación infrarroja emitida recibida desde la atmósfera, entre otras, se encuentran disponibles generalmente, mientras que resulta más complicado obtener información de la nubosidad. Las imágenes de satélite, aunque se puede disponer de ellas fácilmente, no ofrecen gran detalle de una localización concreta (su resolución espacial es baja), ni su resolución temporal es suficientemente alta. En cambio, el ceilómetro ofrece información de la nubosidad con una resolución temporal alta (15 segundos en el modelo de ceilómetro empleado en este estudio) de la localidad objeto de estudio. Algunas variables obtenidas, como la ocurrencia de nubes, altura de base de la nube y cobertura de nubes puede ser utilizada en correlaciones ya propuestas en [5], o bien ser utilizadas, junto a otras variables meteorológicas para la elaboración de correlaciones que estimen la capacidad de enfriamiento radiativo.

La influencia de la nubosidad en la potencialidad del enfriamiento nocturno depende en gran medida del espesor óptico de las nubes (el cual depende de la composición de éstas, qué hidrometeoros la forman y cuál es su tamaño) y la estructura vertical de la nubosidad, ya que la forma de las nubes, su composición y espesor óptico dependen en cierta medida de la altura a la que estas ocurren. Por ello, el estudio de la nubosidad en Sevilla que se realiza en este trabajo puede ser de gran utilidad a la hora de determinar la potencialidad del

enfriamiento nocturno de un fluido y los efectos de la nubosidad en éste.

## 2.3 Influencia de la nubosidad en la radiación solar

La variabilidad en el recurso solar se debe principalmente a dos factores: por el movimiento aparente del sol en la bóveda celeste y por la ocurrencia de nubes. En el primer caso, esta variabilidad es predecible haciendo uso de las relaciones geométricas existentes entre tierra y sol. Sin embargo, la variabilidad del recurso solar debida a la nubosidad es difícilmente predecible [6]. Esta variabilidad resulta de interés para el operador de la red eléctrica, ya que puede drásticamente la potencia producida por instalaciones fotovoltaicas y de energía solar térmica, dificultando la operación del sistema eléctrico.

A su paso por la atmósfera, la radiación interacciona con los distintos componentes atmosféricos, produciéndose procesos de reflexión, absorción y difusión. La atenuación de la radiación se debe principalmente a las nubes y a los aerosoles presentes en la atmósfera. Los efectos radiantes de las nubes dependen del tipo de nube, cobertura de nube y sus propiedades microfísicas. [7]

La precisión de las predicciones de radiación solar es en gran medida dependiente de la habilidad de predecir el comportamiento de las nubes [8] Por ello, toda información que caracterice la nubosidad resulta de gran valor: tipo de nube, altura de la nube, movimiento relativo, áreas de formación, composición de la nube, espesor óptico, propiedades radiantes, etc. A este respecto, el ceilómetro ofrece ciertas ventajas respecto a otra instrumentación.

El modelado y predicción de radiación solar comenzó a ser objeto de estudio en los últimos años. Las propiedades físicas de la nubosidad, como su transmitancia, junto con su variada distribución espacial y temporal, son los principales obstáculos en la predicción de radiación solar [6].

En [9] se realiza una extensa revisión de los métodos de predicción y modelos de radiación solar utilizados en la industria de la energía renovable. Se define la variabilidad de la radiación solar como:

$$V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left( \frac{I_t}{I_t^{clear}} - \frac{I_{t-\Delta t}}{I_{t-\Delta t}^{clear}} \right)^2} \quad (1)$$

Como se ha mencionado anteriormente, las variaciones de la radiación solar se deben a la posición del sol (componente determinista) y a la interacción de la radiación con las nubes (componente estocástica). En esta definición de variabilidad se tiene en cuenta únicamente la variación de la radiación solar debido a la componente estocástica, es decir, a la nubosidad, definiendo la variabilidad como la desviación estándar del paso temporal de la radiación solar obtenida según un modelo de cielo claro.

En [10] se caracteriza la variabilidad de la radiación solar sobre la superficie utilizando algunas propiedades de la nubosidad obtenidas desde imágenes de satélite. Se clasifican las nubes en grupos según una serie de características proporcionadas por las imágenes de satélite.

En [7] se analiza el impacto de la radiación solar mediante el análisis de imágenes de una cámara de cielo. Dicho instrumento provee de información acerca del tipo de nube y la cobertura de nubes, mientras que el emplazamiento también dispone de un piranómetro que ofrece medidas de radiación global horizontal. Se analiza el efecto radiante de la nubosidad en función de dos parámetros, la cobertura de nubes y el ángulo cenital solar.

En este trabajo se obtendrán estimaciones del espesor óptico de la nube y su tamaño. La caracterización del impacto de las nubes en la radiación solar queda pendiente para futuros trabajos.

## 2.4 Estudios de nubosidad

Aunque la mayor parte de estudios realizados sobre el clima se han centrado en el estudio de otras variables meteorológicas como la temperatura o precipitación, existen numerosos estudios que han contribuido a un mayor entendimiento de la nubosidad.

En 1982 se pone en marcha el International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) como parte del

World Climate Research Program (WCRP). Este proyecto recoge medidas de satélite para obtener la distribución global de las nubes, sus propiedades, así como la variación diaria, estacional e interanual de la nubosidad. Los resultados de este proyecto han permitido un mejor entendimiento del papel que desempeñan las nubes en el clima, sus efectos en el balance energético terrestre y su papel en el ciclo hidrológico. (<https://isccp.giss.nasa.gov/about/>)

En 1989 se pone en marcha el Atmospheric Radiation Measurement Climate Research Facility con el objetivo de obtener un mayor entendimiento de las propiedades de las nubes y aerosoles y su impacto en el balance energético de la tierra, del sistema climático, así como ayudar al desarrollo de modelos del clima. ARM cuenta con tres observatorios fijos: en las Grandes Llanuras del Sur de Oklahoma, en la Pendiente Norte de Alaska y en Isla Graciosa, perteneciente a Azores, Portugal. Es destacable que el emplazamiento en Oklahoma es la instalación de investigación climática más grande en la actualidad. Una lista detallada de la instrumentación puede consultarse en <https://www.arm.gov/capabilities/instruments>.

A continuación, se recogen algunos de los estudios de la nubosidad realizados haciendo uso de las medidas de distintos modelos de ceilómetro.

A continuación, se recogen algunos de los estudios de la nubosidad realizados haciendo uso de las medidas de distintos modelos de ceilómetro.

En [11] se analizan las medidas recogidas por un ceilómetro instalado en la Escuela Politécnica superior de la Universidad de Girona. En este documento se toma la ocurrencia de nubes, definida como la relación entre el número de registros con nubes y el número total de registros, como estimador de la cobertura de nubes, parámetro que se refiere a la fracción del cielo cubierta por nubes. Mientras que el ceilómetro ofrece una buena resolución vertical, y una resolución temporal considerablemente mayor que observaciones visuales o satelitales, su campo de visión es limitado, por lo que debemos ser cautos en el uso de la ocurrencia de nubes como estimador de la cobertura de nubes. Se recogen en este estudio la ocurrencia de nubes media mensual, y se observa que la tendencia seguida es muy similar a la cobertura de nubes media mensual obtenida mediante observaciones visuales en el aeropuerto de Girona. Además, la ocurrencia de nubes obtenida con el ceilómetro es consistente con la cobertura total de nubes obtenida en [12]. Por tanto, asumiremos que la variabilidad temporal de la nubosidad en el campo de visión del ceilómetro es representativa de la variabilidad espacial de las nubes en el cielo, y usaremos la ocurrencia de nubes como estimador de la cobertura de nubes. Obviamente, esta hipótesis inducirá ciertos errores, como se explica en [13].

En [12] se presenta una descripción climática de la nubosidad en la península ibérica, obtenida con datos de tres fuentes distintas: imágenes de satélite, observaciones desde la superficie y por último, un grupo consistente en distintos tipos de observaciones desde la superficie. Los resultados muestran una cobertura de nubes media anual que varía entre 35 y 65 %, dependiendo de la fuente de datos y de la zona geográfica. En el sur de España se tiene una cobertura media de nubes de 35-45%. La evolución estacional de la nubosidad muestra un claro mínimo en verano y un máximo en invierno. Además, este estudio se centra en los cambios en la nubosidad durante un largo periodo de tiempo (1982-2002), lo cual se escapa del alcance de este trabajo ya que solo contamos con las medidas de un año de ceilómetro. En cualquier caso, compararemos los resultados obtenidos del análisis de las medidas del ceilómetro con la descripción climática de la nubosidad realizada en este estudio.

En [11] se obtiene también la estructura vertical de la nubosidad, esto es, el número de casos en el que obtenemos una única capa o varias capas de nubes. En los cuatro años estudiados se obtuvieron un 89.7% de casos con una única capa de nubes, un 9.4% de registros con dos capas simultáneas y 0.9% de registros con 3 capas simultáneas. De la comparación de estos resultados con imágenes de satélite se desprende que el ceilómetro sobreestima el número de registros con una única nube. Por último, se estudia la evolución temporal de la altura de la base de la nube y se representan los valores obtenidos en un histograma.

En [13] se validan los resultados obtenidos por un ceilómetro, contra otra instrumentación como una cámara de cielo y un Micropulse Lidar para caracterizar los errores típicos cometidos por un ceilómetro. El ceilómetro usado tiene un rango vertical de 7700 m, y solo detecta bases de nubes que se encuentran a una altura menor de 3600 m, por lo que en numerosas ocasiones no detecta nubes en capas altas. Sin embargo, el ceilómetro del que se dispone en nuestro estudio tiene un rango vertical de 15000 m, por lo que es de esperar que detecte con mayor precisión las nubes presentes en capas altas. Otra fuente de error en las medidas del ceilómetro se debe a su limitado campo de visión, dado que no siempre es cierto que la variabilidad temporal de la nubosidad en la dimensión medida por el ceilómetro sea representativa de la variabilidad espacial de la nubosidad. Este

estudio determina que este tipo de errores son menores en determinadas condiciones de nubosidad, en concreto cuando la cobertura de nubes se mueve en el rango 25-50%. En condiciones de cielo claro y cielo cubierto se producen las mayores discrepancias entre los resultados obtenidos por el ceilómetro y la cámara de cielo.

En [14] se comparan los resultados obtenidos por dos ceilómetros. Se analizan los resultados de altura de base de la nube provistos por cada ceilómetro, los cuales son calculados por algoritmos incorporados por el fabricante. Esta comparación muestra que la altura de base reportada por cada ceilómetro muestra considerables diferencias. Sin embargo, cuando se aplica el mismo algoritmo a la señal de retrodispersión para el cálculo de altura de base de la nube a ambos ceilómetros, los resultados obtenidos son muy parecidos. También se muestra que la precisión de los algoritmos incorporados por los fabricantes decrece cuando se produce la ocurrencia simultánea de más de una capa de nubes. Además, el algoritmo propuesto en [14] al reduce el número de falsas ocurrencias de nube.

## 3 INSTRUMENTACIÓN

Podemos dividir la instrumentación usada para la medición de las distintas variables que describen la nubosidad en dos grupos principales: Instrumentación terrestre y satélites meteorológicos.

Los satélites permiten obtener mediciones de grandes superficies de terreno, en contraposición a la instrumentación terrestre, que se caracteriza por su estrecho campo de visión, pudiendo por tanto obtener datos de la localidad en la que se encuentran. El coste de los satélites meteorológicos es en general mucho mayor que la instrumentación terrestre, con la excepción de algunos equipos como los sistemas RADAR. La resolución temporal de las mediciones realizadas por instrumentación terrestre es mucho mayor que las realizadas por satélites

La información proporcionada por el ceilómetro puede resultar de interés en diversas aplicaciones, pero especialmente en radiación solar. La progresiva implantación de sistemas de energía solar, especialmente de sistemas de energía solar fotovoltaica de forma masiva ha puesto de manifiesto la necesidad de mejora de las predicciones de radiación solar, especialmente a muy corto plazo. Dado que la nubosidad es la principal fuente de variabilidad de la radiación solar, una mejora de las predicciones pasa por una caracterización de la nubosidad. Para realizar predicciones a muy corto plazo, para un emplazamiento concreto, se necesita de instrumentación que proporcione información de la nubosidad a una alta resolución temporal para así caracterizar la alta variabilidad espacial y temporal de la nubosidad. Es en este aspecto en el que instrumentación como el ceilómetro o la cámara de cielo proporcionan información que puede ser de mayor utilidad que las imágenes de satélite, que ha históricamente la fuente de información principal para caracterizar la nubosidad.

### 3.1.1.1 Instrumentación Terrestre

Pueden distinguirse tres tipos de instrumentación terrestre. En primer lugar, los radiómetros, que miden la radiación incidente en un espectro electromagnético específico. En segundo lugar, las cámaras de cielo, que realizan fotografías del en los espectros visible, infrarrojo o ultravioleta y por último los radares, que miden la intensidad de la señal reflejada por las nubes.

#### 3.1.1.1.1 Radiómetros

Los radiómetros reciben un nombre distinto en función del espectro electromagnético percibido. El piranómetro mide la radiación global de onda corta (300-3000nm) mientras que el pirheliómetro mide la radiación directa normal (200-4000). El pirradiómetro mide la radiación total incidente, en un rango de 300-60000 nm.

La comparación de las medidas de radiación obtenidas mediante el uso de esta instrumentación con la radiación estimada según los modelos de cielo claro permite observar la variación de la radiación debido a las nubes. En [15] se propone un método para la clasificación de nubes usando únicamente las medidas de un piranómetro. Para ello realiza un análisis estadístico de las medidas de irradiancia y las compara con la irradiancia de cielo claro. El resultado de este método concuerda con las observaciones humanas en un 45%, con una tendencia general de subestimar la ocurrencia de nubes. La problemática de este método reside en que:

- Es incapaz de detectar nubes cuando éstas se encuentran fuera del camino entre el sol y el piranómetro.
- El efecto de los aerosoles produce una falsa detección de nubes en casos correspondientes a cielo claro.



Ilustración 3-1: Piranómetro instalado en la estación meteorológica de la ETSI de Sevilla. Fuente: <http://estacionmeteo.us.gter.es/>

#### 3.1.1.1.2 Cámaras de cielo

Las cámaras de cielo identifican el cielo mediante fotografías en el espectro visible, infrarrojo o ultravioleta. El método de detección y clasificación de las nubes es diferente en función del espectro en el que se realiza la fotografía [16]. Las cámaras que fotografían el espectro visible realizan la detección de las nubes identificando diferencias en el color e intensidad entre los distintos tipos de nubes y el cielo. Las cámaras de espectro infrarrojo, en cambio, se basan en la diferencia en radiación reflejada y radiación térmica infrarroja de las distintas nubes y el cielo. Por último, las cámaras de espectro ultravioleta realizan la clasificación de las distintas nubes basándose en la diferente absorción de la radiación ultravioleta que se produce en los distintos tipos de nubes.

La mayoría de los algoritmos de procesamiento de datos usados en este equipamiento comprueban si el color de los píxeles que componen la imagen se corresponde con una porción del cielo nublada o despejada.

Las principales dificultades que presenta el uso de este equipamiento es el fallo en la detección de nubes de poco espesor, y la distinción entre distintos tipos de nubes [17]

#### 3.1.1.1.3 RADAR

El término radar deriva del acrónimo inglés (Radio Detection and Ranging). Este tipo de equipos se enmarca en los sistemas de detección activa, los cuales se caracterizan por contar con sensores que emiten ondas electromagnéticas con una determinada longitud de onda y la comparan con las características de la onda recibida (especialmente con el tiempo de vuelta de la onda y su intensidad). Las diferentes tecnologías en uso para la detección de nubes se clasifican en función de la longitud de onda utilizada.

#### 3.1.1.1.4 LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) es un grupo de tecnologías basadas en la aplicación de láseres compuestos de luz monocromática [16]. Los dispositivos láser emiten un haz de luz coherente, tanto espacial como temporalmente. Dicha propiedad permite la concentración del láser en un punto muy pequeño, debido a la escasa dispersión de la luz, y su emisión en un espectro muy estrecho, consiguiendo una luz monocromática [18].

El principio de funcionamiento del LIDAR es el mismo que el del radar: La emisión de un haz de luz y posterior detección de la luz reflejada. Por tanto, Lidar y Radar difieren únicamente en la longitud de onda de la luz usada.

La interacción del láser emitido con aerosoles y nubes depende de la longitud de onda de éste. Es por ello que

existen distintas tecnologías Lidar, que emplean longitudes de onda distintas en función del objeto de la medición. Los tipos de Lidar más conocidos son: DIAL (Differential absorption Lidar), MPL (Micro Pulse Lidar), Raman Lidar.

Estos sistemas comparten una estructura similar, formada por tres subsistemas principales: Transmisor, Receptor y Detector [19] [18]

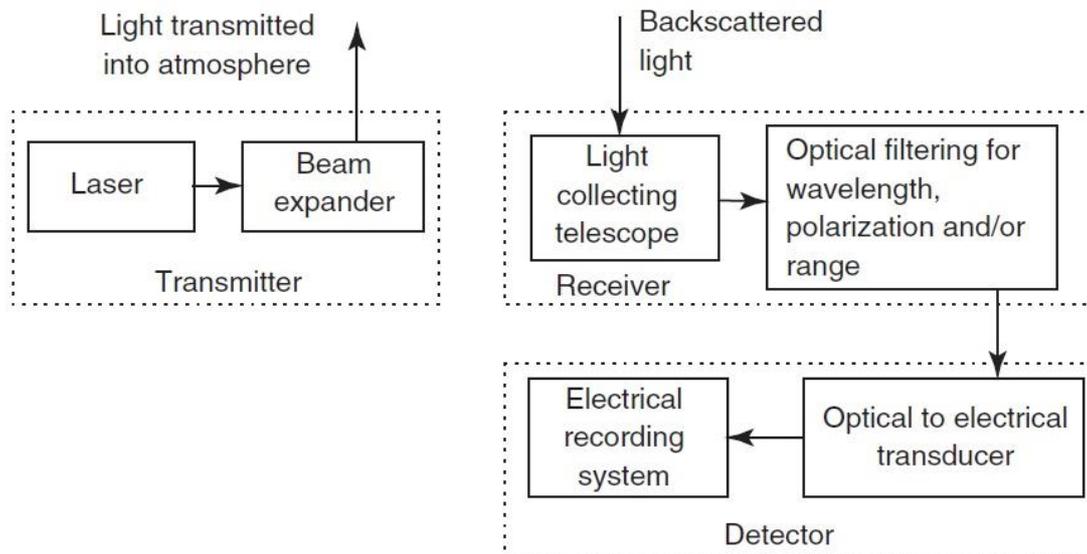


Ilustración 3-2: Componentes de un sistema LIDAR. Fuente: [18]

El transmisor se encarga de la generación de los pulsos de luz y su emisión a la atmósfera en las condiciones requeridas. En ocasiones, el subsistema transmisor incorpora un expansor de haz cuyo objetivo es la reducción de la divergencia de dicho haz, permitiendo así reducir el ruido en la señal.

El receptor se encarga de filtrar y dirigir la luz reflejada hacia el detector. Se trata de un sistema de componentes ópticos que tienen como objetivo dirigir la luz reflejada, separándola de otras señales (radiación solar, iluminación artificial, etc)

El sistema detector registra la señal procedente del receptor, creando perfiles de intensidad de la señal medida en función de la altura. Actualmente se tratan de dispositivos electrónicos que traducen la señal medida en corriente eléctrica, que será dirigida a un microprocesador.

Se presenta a continuación una introducción teórica a los sistemas Lidar, los procesos físicos que se producen en la medición y las variables que describen estos procesos. [20]

En su desplazamiento por la atmósfera, la radiación electromagnética se ve sometida a procesos físicos que provocan su atenuación. Dichos procesos son la absorción y la dispersión, y se deben a las partículas presentes en la atmósfera.

La absorción es el proceso por el cual la radiación electromagnética es captada por la materia. La dispersión es el proceso por el cual se produce la desviación de la radiación electromagnética en uno o más caminos. Se distinguen dos procesos de dispersión: Dispersión de Rayleigh (dispersión elástica de la luz debida a moléculas de tamaño pequeño comparado a la longitud de onda de la luz) y dispersión de Mie (dispersión de la luz debida a moléculas esféricas de tamaño mayor que la longitud de onda de la luz).

Por la composición de la atmósfera podemos determinar que la dispersión de Rayleigh se producirá en aquellas regiones en las que los aerosoles son prácticamente no existentes, lo cual ocurre, de forma general, por encima de los 4000 m

Volviendo a la tecnología Lidar, la intensidad de la señal recibida tras su reflexión depende de los fenómenos de dispersión y absorción a los que se ve sometida la luz en su camino.

La potencia de la señal recibida viene dada por la expresión:

$$P(r, \lambda) = P_0 \frac{c\tau}{2} A\epsilon \cdot \frac{O(r)}{r^2} \cdot \beta(r, \lambda) \cdot \exp\left(-2 \int_0^\tau \alpha(r, \lambda) dr\right) \quad (2)$$

Donde:

$P_0 \frac{c\tau}{2} A\epsilon$  es una constante del sistema, donde  $P_0$  es la potencia del pulso láser, el término  $c\tau$  es la distancia geométrica entre el punto en el que se produce la dispersión y el receptor.  $c$  es la velocidad de la luz y  $\tau$  es el tiempo de vuelo, medido en segundos.  $A$  es la apertura de la óptica primaria del receptor, y finalmente  $\epsilon$  es la eficiencia de los componentes ópticos y electrónicos del Lidar.

El término  $\frac{O(r)}{r^2}$  tiene en cuenta la dependencia del sistema con la distancia.  $r$  es la distancia entre la salida del láser y el punto en el que se produce la dispersión, y  $O(r)$  es la función de superposición (del inglés 'Overlap'), que varía entre 0 y 1, efectuando una corrección cuando la se produce una falta de coincidencia entre el haz de luz y el rango de visión del receptor cuando el rango es menor que la altura de superposición total.

Estos dos primeros términos vienen determinados por la configuración del ceilómetro, por lo que son conocidos a priori. Son los siguientes términos los que son desconocidos y el objeto de las medidas del instrumento.

Los términos  $\alpha(r, \lambda)$  y  $\beta(r, \lambda)$  representan, respectivamente, los coeficientes de extinción y retrodispersión, dependientes de la distancia  $r$  y la longitud de onda  $\lambda$ . Dado que la longitud de onda suele mantenerse constante durante las mediciones, esta dependencia queda eliminada. Finalmente, el último término  $\exp(-2 \int_0^\tau \alpha(r, \lambda) dr)$  se conoce como transmisión atmosférica, y representa la atenuación de la señal emitida en la ida y vuelta desde el ceilómetro hasta una distancia  $r$ .

El coeficiente de retrodispersión tiene en cuenta la ocurrencia de fenómenos de dispersión por dispersión de Rayleigh y de Mie. Por tanto, puede expresarse como

$$\beta(r, \lambda) = \beta_{mol}(r, \lambda) + \beta_{aer}(r, \lambda) \quad (3)$$

Al coeficiente de extinción contribuyen los fenómenos de dispersión y absorción debido a la interacción de moléculas y partículas, por lo que análogamente al apartado anterior, puede definirse como:

$$\alpha(r, \lambda) = \alpha_{mol,sca}(r, \lambda) + \alpha_{aer,sca}(r, \lambda) + \alpha_{mol,abs}(r, \lambda) + \alpha_{aer,abs}(r, \lambda) \quad (4)$$

El ceilómetro incorpora un algoritmo interno que resuelve la ecuación del Lidar para obtener perfiles de retrodispersión atenuados. Dichos perfiles son analizados por el algoritmo para, mediante la aplicación de ciertos valores límite, detectar nubes y aerosoles.

En la actualidad, uno de los equipos de mayor uso en la observación de las nubes es el ceilómetro láser. Los ceilómetros son un tipo específico de Lidar, y permite, entre otras funciones, la detección simultánea de varias capas de nubes, la altura de su base y su espesor. Estos equipos forman parte de la tecnología Lidar: Emiten un pulso de luz coherente en dirección vertical, parte de la cual, en caso de existir una nube sobre el instrumento, se refleja de vuelta a este tras impactar en los hidrometeoros que forman la nube o aerosoles presentes en la atmósfera. Además, el flujo radiante reflejado decrece con el cuadrado de la distancia al receptor, por lo que es preciso una corrección por rango de la señal obtenida. [2] [21]

El ceilómetro incorpora un algoritmo interno que resuelve la ecuación del Lidar para obtener perfiles de retrodispersión atenuados. Dichos perfiles son analizados por el algoritmo para, mediante la aplicación de ciertos valores límite, detectar nubes y aerosoles.

A continuación, se detallan las variables recogidas por el ceilómetro CHM15k y su significado físico. Dichas variables quedan registradas en un un fichero NetCDF, el cual fue especialmente diseñado para observaciones meteorológicas. Una descripción de las variables recogidas en los archivos NetCDF de los modelos de ceilómetro más comercializados se recogen en [22]

Mediante la siguiente fórmula se calcula la potencia de retrodispersión normalizada:

$$P(r) = \frac{P_{raw}(r) - b}{c_s \cdot O(r) \cdot p_{calc}} \quad (5)$$

Donde:

$P(r)$  es la señal de retrodispersión normalizada.

$P_{raw}$  es la potencia de la señal recibida, calculada por la ecuación del lidar detallada anteriormente (5)

El término  $b$ , expresado como *base* en el archivo NetCDF representa el número de fotones de luz solar que llegan al receptor, el cual debe ser descontado para que las mediciones se limiten a la luz de retrodispersión.

$p_{calc}$  es la intensidad media del pulso de prueba

$c_s$  es la constante de calibración

Debido a la atenuación de la señal de retrodispersión con el cuadrado de la distancia, es necesario una corrección por rango que se lleva a cabo multiplicando por  $r^2$ . El resultado es la señal de retrodispersión atenuada, normalizada y corregida por rango, cuyo nombre en los archivos NetCDF del ceilómetro CHM15K comercializado por Lufft es *beta\_raw*.

$$\beta_{att} = P(r) \cdot r^2 \quad (6)$$

El algoritmo incorporado en el ceilómetro analiza los perfiles de dicha señal para detectar distintas hasta 3 capas de nubes simultáneas. De forma general, la presencia de los hidrometeoros que forman la nube produce un aumento de la señal de retrodispersión en varios órdenes de magnitud [23]. El algoritmo interno del ceilómetro también es capaz de detectar determinadas situaciones atmosféricas, como precipitación o niebla, los cuales se caracterizan por la producción de dispersión múltiple.

Se representa en la siguiente ilustración un ejemplo de la señal de retrodispersión obtenida por el ceilómetro, en la que pueden identificarse las bases de nube en aquellos puntos en los que se produce un aumento considerable de la señal de retrodispersión.

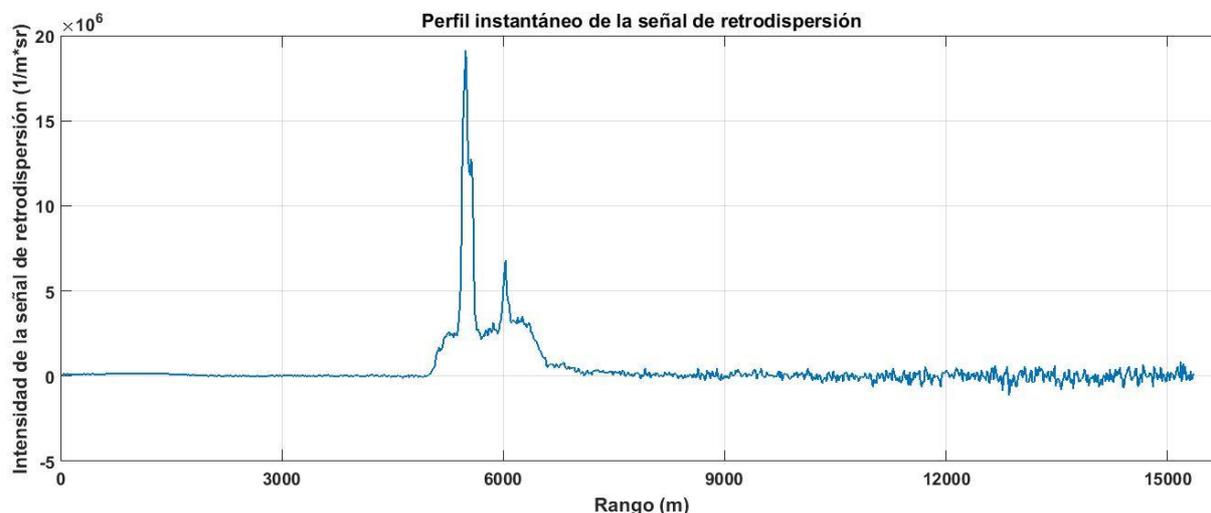


Ilustración 3-3: Señal de retrodispersión instantánea reportada por el ceilómetro

En [24] se proponen rangos y valores típicos de los coeficientes de extinción y retrodispersión ante distintos componentes meteorológicos.

En [14] se realiza un análisis de los perfiles de las medidas obtenidas por dos ceilómetros, aplicando el mismo algoritmo (Temporal Height Tracking Algorithm) a los datos brutos de ambos instrumentos. La conclusión de este análisis es que los resultados de CBH de los ceilómetros difieren enormemente cuando se aplica el algoritmo interno de éstos, pero muestran resultados más parecidos cuando se les aplica el algoritmo THT. Además, se observa que la discrepancia entre resultados en el caso de utilizar los algoritmos propios es mayor cuando se produce la ocurrencia de varias capas de nubes.

## 4 METODOLOGÍA

### 4.1 Base de datos

El grupo de investigación de Termodinámica y Energías Renovables de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Sevilla mantiene en sus instalaciones una estación de medidas radiométricas y meteorológicas. Entre los sensores con los que cuenta esta instalación (cuya lista puede encontrarse en <http://estacionmeteo.us.gter.es/>) se encuentra el ceilómetro CHM 15k "NIMBUS", comercializado por la empresa Lufft. Se dispone de un año completo de medidas. La localización del emplazamiento, así como la clasificación climática del mismo según Köppen-Geiger se detalla en la siguiente tabla.



Ilustración 4-1: Estación Meteorológica del Grupo de Termodinámica y Energías Renovables de la ETSI de Sevilla. Fuente: <http://estacionmeteo.us.gter.es/>

|         | Latitud (°N) | Longitud (°W) | Altitud (m) | Clasificación Climática Köppen-Geiger |
|---------|--------------|---------------|-------------|---------------------------------------|
| Sevilla | 37.4         | 6.0           | 12          | Csa                                   |

Tabla 4-1: Localización de la estación meteorológica

Se utilizarán los datos del ceilómetro para realizar una descripción de la nubosidad en Sevilla. Se analizará el comportamiento temporal de la cobertura total de nubes, la altura de la base de la nube, espesor de nube, estructura vertical de la nubosidad, etc.

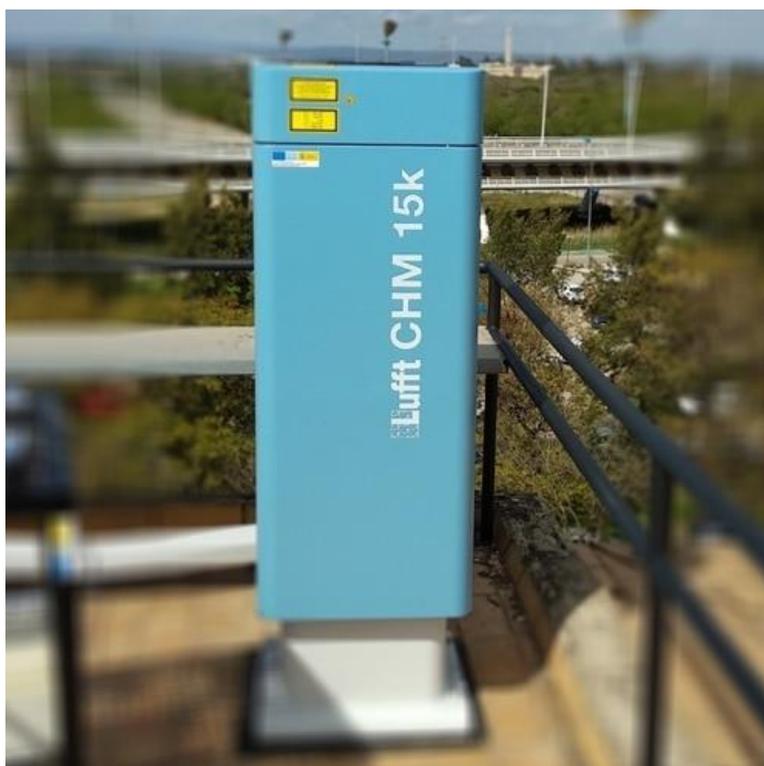


Ilustración 4-2: Ceilómetro instalado en la ETSI de Sevilla. Fuente: <http://estacionmeteo.us.gter.es/>

El ceilómetro genera ficheros NetCDF diarios, en los que se almacenan las variables medidas. Los ficheros NetCDF (Network Common Data Form) fueron desarrollados por University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) y son de uso común en meteorología y climatología. Son ficheros autodestructivos: cada una de las variables almacenadas cuenta con una pequeña descripción, se especifica su dimensión, así como sus unidades.

En el documento [22], elaborado por profesionales del programa E-PROFILE (enmarcado en EUTMETNET) se recogen las definiciones más usadas en la comunidad LIDAR. Provee de los conceptos teóricos necesarios para la comprensión de las variables utilizadas en ceilómetros, las diferentes nomenclaturas utilizadas y una descripción de los archivos NetCDF generados por distintos ceilómetros, entre los que se encuentra el CHM15K.

El acceso y lectura de las variables almacenadas en los ficheros se realizará en Matlab, que dispone de una librería específica para el tratamiento de archivos NetCDF. Se desarrolla un script que permite la lectura y copia automática de las variables de interés. Estas variables son:

| Variable                     | Nombre de la variable en archivo NetCDF     |
|------------------------------|---|
| Altura de la base de la nube | CBH (cloud base height)                     |
| Espesor de la nube           | CDP (cloud depth)                           |
| Cobertura total de nubes     | Tcc (total cloud cover)                     |
| Señal de retrodispersión     | Beta_raw (nomalized range corrected signal) |
| Rango                        | Range                                       |

Tabla 4-2: Variables reportadas por el ceilómetro

El rango de medición del ceilómetro se extiende hasta los 15000 m, con una resolución vertical de 15 m. Esta es la resolución vertical por defecto, pero puede ser ajustada por el usuario en el rango de 5 a 30 m, en saltos de 5 m. En su ajuste por defecto, el ceilómetro es capaz de detectar hasta tres capas de nubes, pero puede ser ajustado para la detección de hasta 9 capas de nubes simultáneas. En su configuración por defecto, el ceilómetro tiene una resolución temporal de 15 segundos. Durante este lapso realiza mediciones, para devolver como resultado la media de éstas. Esta configuración puede modificarse cambiando la variable *average\_time*.

Cada uno de los archivos contiene las mediciones correspondientes a un día. Las variables son almacenadas en matrices, cada una de ellas con 5760 columnas, debido a que se realizan mediciones cada 15 segundos.

En el caso de la variable ‘CBH’, ésta consta de tres filas, correspondientes a las tres capas de nubes que el ceilómetro es capaz de detectar. Cabe señalar que estas filas no tienen relación con la clasificación de nubes en capas bajas, medias y altas, sino con el orden en el que el ceilómetro detecta las nubes. Es decir, cuando sólo se detecta una nube, la altura de su base quedará registrada en la primera fila. Si en cambio se detectan dos, se registrarán en las respectivas filas según el orden de detección, e independientemente de su altura.

Por ello, se incorpora en el script de Matlab las operaciones necesarias para realizar la clasificación en distintas capas de nubes. Debemos recordar que los límites de cada una de las capas son distintos en función de la latitud del emplazamiento. En el caso de Sevilla, tratándose de un clima mediterráneo cálido, se toman los siguientes niveles:

| Capa de nube | Distancia (km) |
|--------------|----------------|
| Baja         | 0 – 2          |
| Media        | 2 – 7          |
| Alta         | 7 - 18         |

Tabla 4-3: Capas de nubes y rangos

Una vez realizada dicha clasificación, se calculará la ocurrencia de nubes total y la ocurrencia de nubes en cada una de las distintas capas.

Respecto a la señal de retrodispersión, esta es almacenada en una matriz de dimensiones 1024x5760. Las 5760 columnas se corresponden con la resolución temporal de 15 segundos, mientras que las 1024 filas se deben a la resolución vertical de 15 m. Por tanto, cada uno de los registros de la matriz se corresponde con la potencia de la señal de retrodispersión recibida por el ceilómetro desde un rango o distancia determinada en un instante concreto.

La cobertura total de nubes calculada por el ceilómetro queda registrada en la variable *tcc*, un vector con 5760 registros correspondientes a las medidas cada 15 segundos. Sin embargo, debido al método de cálculo de la cobertura de nubes (explicada anteriormente), esta medida puede ser representativa de un estado del cielo que puede no corresponderse con el actual. El objetivo del programa escrito es la automatización de la lectura y análisis de las medidas del ceilómetro para la obtención de estadísticos que describan la nubosidad en Sevilla.

## 4.2 Caracterización de la nubosidad

El objetivo de este estudio es la caracterización de la nubosidad y su impacto en la radiación solar y en la potencialidad del enfriamiento nocturno haciendo uso de las medidas proporcionadas por el ceilómetro. Las variables que utilizaremos para caracterizar la nubosidad en Sevilla serán:

- Ocurrencia de nubes: Definida como la relación entre el número de registros con nubes y el número de registros totales. Este parámetro es utilizado como estimador de la cobertura de nubes
- Altura de la base de la nube: El ceilómetro) identifica la base de la nube cuando se produce un incremento notable de la señal de retrodispersión.

- Espesor óptico de nube: es la variable de mayor importancia en el efecto atenuante que las nubes ejercen sobre la radiación [25]. Se trata de un parámetro adimensional que mide la atenuación de la radiación solar debido a los procesos de dispersión y absorción producida por los hidrometeoros que forman la nube. Para el cálculo del espesor óptico es necesario conocer el coeficiente de extinción, que es suma de los coeficientes de absorción y dispersión.

El espesor óptico viene dado por la expresión:

$$\tau = \int_0^H \sigma_{ext}(z) dz$$

Donde H es la extensión vertical de la nube (también denominada espesor geométrico, [25]), z es la coordenada vertical y  $\sigma_{ext}$  es el coeficiente de extinción, que representa la fracción de flujo radiante extinguida por unidad de espesor. Este coeficiente no es facilitado directamente por el ceilómetro, pero es directamente proporcional a la concentración de hidrometeoros en la nube y el tamaño de éstos, al igual que la señal de retrodispersión proporcionada por aquél, por lo que en este trabajo se hará uso de la señal de retrodispersión para estimar la extensión vertical de las nubes y su espesor óptico.

- Señal de retrodispersión: Se utilizará la intensidad de la señal para la elaboración de perfiles de intensidad diarios. De forma general, la señal de retrodispersión proporcionada por el ceilómetro es de mayor intensidad cuanto mayor es la densidad óptica de la nube, esto es, cuanto más grandes son los hidrometeoros que la forman y menor es la distancia entre ellos. Por ello, se utilizará la señal de retrodispersión para estimar el espesor óptico de la nube.

Se obtendrán los valores medios mensuales de estas la altura de base de la nube y la ocurrencia de nubes, considerando tanto la totalidad de los registros como desglosados por capas y divididos en día y noche, a efectos de analizar los impactos en ambas aplicaciones comentadas anteriormente.

Finalmente, se elaborará una matriz con valores horarios que clasificará las horas en nubosas (cuando más de la mitad de los registros cuentan con nubes) o despejadas, así como los valores medios horarios de la señal de retrodispersión. El objetivo de la elaboración de esta matriz es obtener una serie anual que permita caracterizar la nubosidad en términos de la ocurrencia de nubes y del espesor óptico de las nubes que sea de aplicación para cuantificar cómo afecta la nubosidad a la radiación solar y a la potencialidad del enfriamiento nocturno.

### 4.3 Procesado de datos

Los archivos NetCDF se almacenan en un directorio, que contiene subdirectorios correspondientes a cada uno de los meses de los que se disponen de mediciones. Las primeras operaciones del script consisten en seleccionar el directorio que contiene los archivos NetCDF y añadir las carpetas

El nombre de los archivos NetCDF tiene la forma **YYYYMMDD\_[location]\_[Device]\_[Index].nc**. Por tanto, la fecha en formato YYYYMMDD identifica unívocamente los archivos generados diariamente. En el script realizado en Matlab se generarán los identificadores tipo YYYYMMDD de cada día para llevar a cabo la lectura de las variables contenidas en cada archivo NetCDF. Se incorpora en el script una rutina para generar únicamente aquellos identificadores tipo YYYYMMDD para los cuales existe una medición, para así evitar la creación de un cell array con registros vacíos, que puede resultar en errores en la manipulación de datos posterior.

En primer lugar, se realizan las operaciones de copia de las variables a analizar: CBH, TCC y señal de retrodispersión. Dichos datos se almacenarán en una variable tipo cell array, que permite el almacenamiento de datos de distinta tipología y tamaño. Matlab cuenta con una librería para el tratamiento de archivos NetCDF. La función *ncread* permite la lectura y copia de cada una de las variables. Su estructura general es *ncread('nombre del archivo NetCDF', 'Nombre de la variable')*. También resulta de utilidad la función *ncdisp*, que devuelve información acerca del dispositivo, su ubicación, día, mes y año de la medición, así como una lista de las variables recogidas en el archivo NetCDF con una descripción concisa, dimensiones y unidades.

Cabe destacar que las operaciones de lectura y copia usando *ncread* son, con diferencia, las más lentas del código. Por ello, en este script se realizará una primera copia y almacenamiento de las variables en un cell array, para que, en su uso posterior se acceda a la información desde éste cell array y no realizando de nuevo operaciones de lectura usando *ncread*. También hemos separado la copia de la señal de retrodispersión del

resto de las variables, ya que esta es considerablemente mayor y podemos tener problemas de memoria RAM. Si aún así volvemos a obtener problemas de memoria, debemos incrementar la memoria swap disponible al sistema operativo.

Una vez realizada la copia de estos archivos, se realiza la separación de las medidas de día y noche. Para ello se ha usado un vector con la evolución diaria de la altura solar. Mediante la función *find* podemos hallar la posición de aquellos elementos del vector de altura solar mayores que cero. Conocida la posición de éstos, resulta inmediato obtener aquellas medidas correspondientes al día y la noche. Sin embargo, este método no resulta de aplicación en días de los que carecemos de la totalidad de medidas, ya que la posición de las medidas cuya altura solar es mayor que cero puede no estar contenida en la matriz que contiene las medidas, resultando en un error. Para evitar este error se han excluido aquellos días que no cuentan con la totalidad de las medidas.

A continuación, se calcula la ocurrencia de nubes, definida ésta como el número de registros que cuentan con nubes dividido entre el número total de registros. Debemos tener en cuenta que, cuando el ceilómetro no detecta nubes, la medición registrada en la altura de base de la nube equivale a -1. Por ello, para obtener aquellos registros con ocurrencia de nubes, basta con obtener los valores de CBH mayores que 0. Esto mismo puede aplicarse para obtener los registros de nubes en cada capa. Para el cálculo de ocurrencia de nubes, tanto total como en cada capa, el procedimiento es similar: Aplicamos la condición lógica que corresponda, y obtendremos una matriz con valores lógicos, de mismas dimensiones de CBH. Basta con contar el número de unos en la primera fila para obtener la ocurrencia de nubes. Además, si contamos el número de unos en la segunda y tercera fila obtendremos el número de mediciones con dos y tres capas simultáneas.

Una vez obtenidos los valores diarios de ocurrencia de nube, pueden obtenerse los valores de ocurrencia de nube mensuales. Esto es inmediato mediante la conversión de cell array a tabla. Esto se lleva a cabo ya que mediante el uso de tablas resulta sencillo el cálculo de valores medios mensuales. Para ello basta con aplicar la función *mean* a la tabla usando las variables *mes* y *año* como variables agrupadoras. Mediante este procedimiento, Matlab tomará todos los valores correspondientes a un mes y realizará la media sobre ellos. Así obtendremos los valores medios mensuales de ocurrencia de nubes total y en cada capa, tanto del día completo como del día y la noche por separado.

Para la elaboración de estadísticos que describan el comportamiento de la altura de la base de la nube, el procedimiento a seguir es similar. Se obtendrá una matriz con los registros de CBH, en la cual, en lugar de los -1 correspondientes a ausencia de nube, se tendrán ceros. Esto se lleva a cabo obteniendo los valores de CBH mayores que cero, mediante el uso de condiciones lógicas, que nos dará una matriz de valores lógicos, con unos y ceros. A continuación, se multiplica la matriz original y la matriz lógica, obteniendo una matriz con los valores de CBH mayores que cero, y ceros para aquellos registros sin medición (en lugar de los -1 original). Este procedimiento se lleva también a cabo para las matrices de CBH de cada capa, con la única diferencia de que la condición lógica a imponer será distinta en cada resultado.

A continuación, se aplicará la función *nonzeros* a las matrices de CBH. Esta función almacena en un vector las medidas distintas de cero. Por tanto, obtendremos un vector por cada matriz de CBH correspondiente a cada capa. La obtención de los valores medios diarios de CBH es inmediata, sin más que aplicar la función *mean*. Sin embargo, para la obtención de los valores medios mensuales no es aplicable lo explicado anteriormente para el caso de ocurrencia de nubes. Para agrupar las medidas por mes se usa la función *findgroups*. Ésta debe tener como entrada las variables *mes* y *año*, para evitar clasificar en el mismo grupo las medidas del mismo mes de distinto año. Obtendremos entonces un vector de valores categóricos, de manera que a cada las mediciones de cada mes le corresponde unívocamente un valor del vector de valores categóricos (Esto es, a marzo de 2018, le corresponde el valor 1, a abril el valor 2, etc.). A continuación, se agrupan las mediciones en función de los valores del vector de valores categóricos y se copian a una tabla, de manera que ahora tenemos distintas tablas, cada una de las cuales agrupa las mediciones de un único mes. Para obtener los valores medios mensuales de CBH se agrupan verticalmente los vectores con mediciones de CBH de cada tabla y se aplica la media.

#### 4.3.1 Elaboración de la matriz horaria de ocurrencia de nubes

Para la elaboración de la matriz horaria de caracterización de la nubosidad se han elaborado de forma separada una matriz de ocurrencia de nubes y una matriz simplificada de la matriz de la señal del ceilómetro. Se decide agrupar los datos registrados a paso horario ya que es el paso habitual en las series meteorológicas gratuitas

disponibles.

Para la elaboración de la matriz de ocurrencia de nubes horaria utilizaremos los cálculos realizados anteriormente. En el procesado de datos, para el cálculo de la ocurrencia de nubes, se habían obtenido matrices lógicas, con unos para aquellos registros con nubes y ceros para aquellos sin nubes. Debemos recordar que contábamos con tres matrices por día, correspondientes a cada una de las capas en las que hemos dividido las mediciones. De dichas matrices, a efectos de saber en qué instante el ceilómetro detecta una nube, sólo resulta de interés la primera fila, ya que la segunda y tercera contarán con registros solo cuando se produce la detección simultánea de varias capas de nubes. Por tanto, se formará una matriz con la primera fila de cada matriz, resultando en una matriz de valores lógicos en la que cada fila corresponde a cada una de las capas. Para la elaboración de la matriz de ocurrencia horaria se agruparán las mediciones en grupos de 240 mediciones, ya que el ceilómetro reporta medidas cada 15 segundos, luego las 240 medidas representan las mediciones de una hora. A continuación, se contarán el número de registros con nubes en cada grupo de 240 medidas, y si más de la mitad de los registros cuentan con nubes, se clasificará dicha hora como nubosa, asignándole el valor 1. En caso contrario, dicha hora será clasificada como despejada, y se le asignará el valor 0.

Es posible realizar esta operación de dos formas distintas, en función de cómo agrupamos los datos. Debemos recordar que, dado que el ceilómetro genera ficheros diarios, tendremos una matriz lógica diaria de ocurrencia de nubes. Por tanto, tenemos dos opciones:

Podemos en primer lugar concatenar las matrices lógicas de registros de nubes correspondientes a cada día y capa, de manera que obtendremos tres matrices (una por capa) con la ocurrencia de nubes en cada capa. De cada una de estas matrices, a efectos de obtener la ocurrencia de nubes, únicamente nos interesa la primera fila (la segunda y tercera fila cuentan con registros en caso de ocurrencia simultánea de nubes). Por tanto, de las matrices ya concatenadas, podemos extraer la primera fila de cada una de ellas, y formar una única matriz con la ocurrencia de nubes en cada capa. A continuación, se agrupan las medidas en grupos de 240 mediciones, se cuenta el número de mediciones con nubes en cada grupo y si más de la mitad registran nubes, se clasificará dicha hora como nubosa. Este ha sido el proceso que se planteó en el script de Matlab en primer lugar, pero debido a la imposibilidad de realizar la misma operación con la señal de retrodispersión (debido a que el tamaño de la matriz resultante de concatenar las matrices de la señal del ceilómetro es demasiado grande para ser almacenada en Matlab), se ha optado por el procedimiento explicado en el siguiente punto.

En lugar de comenzar el proceso con la concatenación de las matrices, se elabora la matriz horaria de ocurrencia de nubes para cada uno de los días. El proceso es el mismo: Se toma la primera fila de cada una de las matrices lógicas de ocurrencia de nubes correspondiente a cada capa, se cuenta el número de registros con nubes y se clasifica esa hora como nubosa o despejada. Por tanto, obtendremos matrices horarias de ocurrencia de nube para cada día, y se concatenan para obtener una única matriz de ocurrencia de nubes horaria.

La razón por la que se ha optado por el procedimiento seguido en el segundo punto es que, al aplicar el procedimiento aplicado en el primer punto a la señal del ceilómetro y concatenar todas las matrices de la señal del ceilómetro, obtenemos un error porque la matriz resultante es de un tamaño demasiado grande para ser almacenado por Matlab. Podría haberse optado por aplicar el procedimiento explicado en el primer punto para obtener la matriz horaria de ocurrencia de nubes, y el segundo para obtener la matriz de la señal del ceilómetro, pero hubiera resultado en matrices de distintas dimensiones.

La realización del segundo procedimiento presenta cierta problemática en la agrupación de las medidas, ya que existen varios días en nuestra serie temporal que, por diversas razones, cuentan con menos medidas que las 5760 medidas habituales en la mayoría de los días (correspondientes a medidas cada 15 segundos durante 24 horas). Por ello, para evitar errores en la ejecución del programa, se han incorporado en el script las operaciones necesarias para obtener el número de medidas de cada día y evitar posibles errores.

#### 4.3.2 Elaboración de matriz horaria de la señal del ceilómetro

El procedimiento a seguir para la elaboración de la matriz horaria de la señal del ceilómetro es muy similar al aplicado en la obtención de la matriz horaria de ocurrencia de nube.

La matriz de la señal de retrodispersión recogida en un día tiene unas dimensiones de 1024x5760. Se muestra un ejemplo a continuación. Las 1024 filas se corresponden con la distancia al ceilómetro, con una resolución

vertical de 15m. Las 5760 columnas se deben a las medidas reportadas por el ceilómetro cada 15 segundos. Elaboraremos una matriz de la señal de retrodispersión con una resolución temporal de una hora, con lo que las dimensiones de la matriz será 1024x24

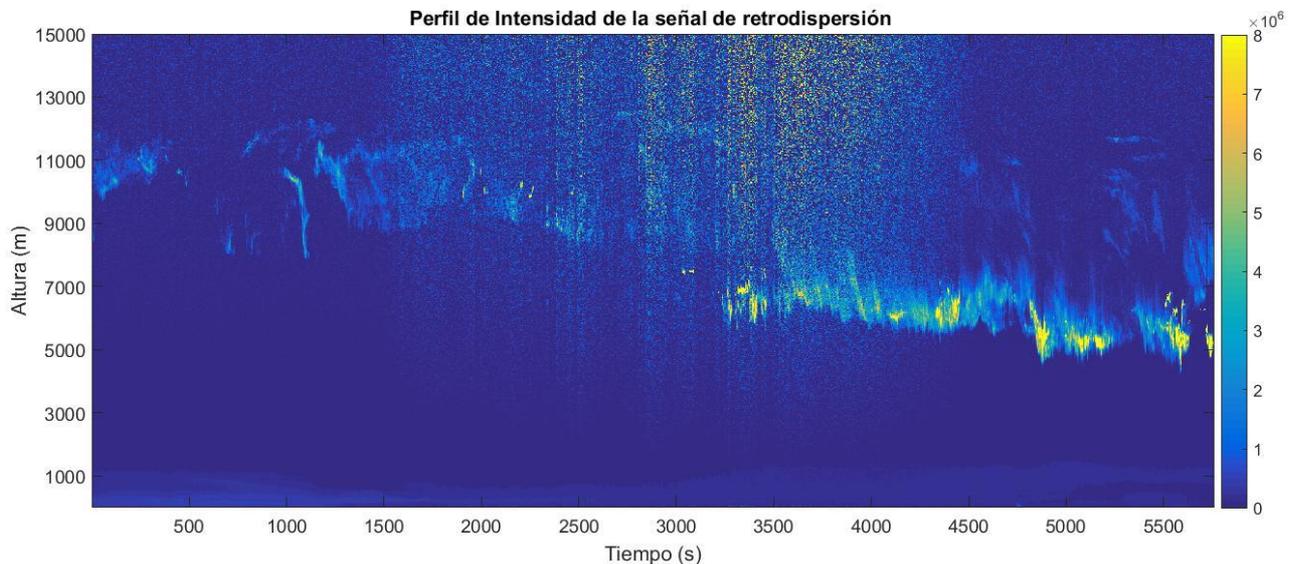


Ilustración 4-3: Perfil de intensidad de la señal de retrodispersión. 1 de abril de 2018.

En este caso, se agruparán las medidas correspondientes a cada hora y se calculará el valor medio del backscatter durante dicha hora a distintas alturas: esto es, para la matriz de 1024x5760 se agruparán horizontalmente 240 medidas y se calculará su media, repitiéndose dicho proceso para la totalidad de las columnas que forman la matriz.

La matriz horaria obtenida, aunque ofrece menor detalle que la original, permite manipular los datos de manera mucho más rápida, ya que el tamaño de la matriz resultante es mucho menor. También permite analizar de forma más rápida el espesor óptico de las nubes en cada capa en una determinada hora. Se muestra en la siguiente imagen el resultado obtenido para el perfil de intensidad anterior.

Aunque se escapa del alcance de este trabajo, resultaría sencillo modificar el script realizado para automatizar la obtención de perfiles de retrodispersión simplificados a petición del usuario, de manera que éste pueda tener acceso a la información registrada de forma visual cuando esta sea necesaria para obtener una mejor comprensión de las medidas proporcionadas por el ceilómetro

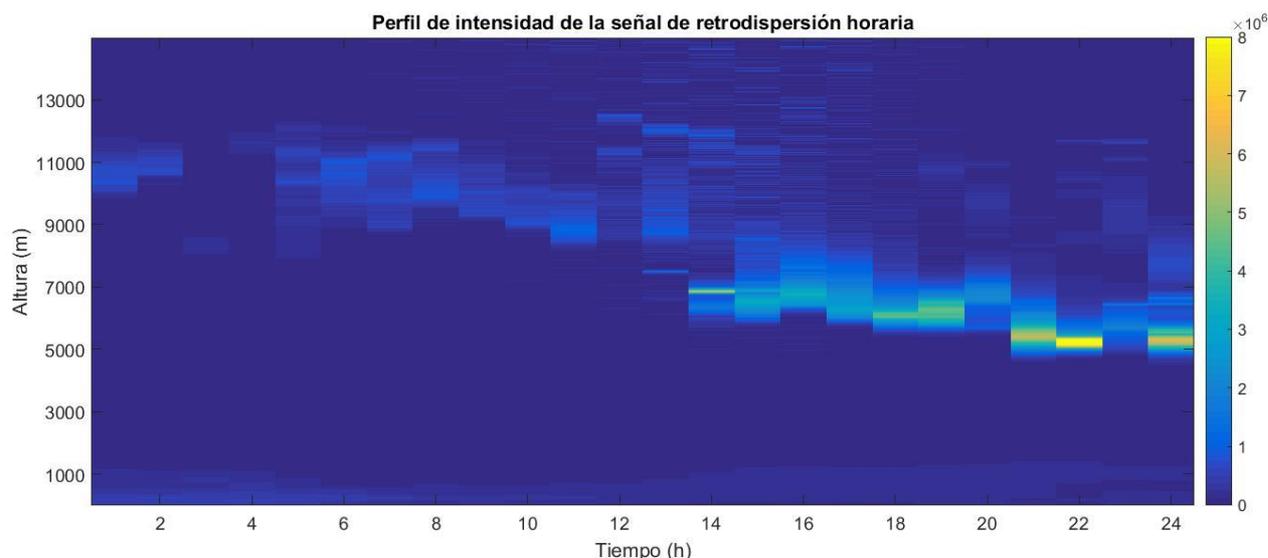


Ilustración 4-4: Perfil de intensidad de la señal de retrodispersión simplificado. 1 de abril de 2018.

### 4.3.3 Obtención del espesor óptico y extensión vertical

Haciendo uso de la matriz horaria de la señal del ceilómetro obtenida en el apartado anterior, se obtendrá una estimación del espesor óptico de la nube y de su tamaño. Para ello, teniendo en cuenta que el tamaño de los hidrometeoros que forman las nubes depende en gran medida de la altura a la que éstas se producen, estableceremos un valor umbral de la señal del ceilómetro para cada capa. Dicho umbral será mayor para la capa baja que para las capas media y alta. Por encima de este valor umbral, consideraremos la presencia de una nube. Conocido el número de filas cuya señal es mayor que el umbral establecido, y teniendo en cuenta que la resolución vertical del ceilómetro es de 15 metros, podemos obtener el tamaño de nube (su extensión vertical).

A continuación, para obtener una estimación del espesor óptico de la nube, tendremos en cuenta que la señal del ceilómetro es proporcional al tamaño de los hidrometeoros que forman la nube y por tanto, a su espesor óptico. Por tanto, para cada hora (es decir, para cada columna de la matriz horaria de la señal de retrodispersión) tomaremos, para cada capa, aquellos valores de la señal del ceilómetro mayores que el valor umbral correspondiente, y hallaremos la media de dichos valores, usándolos como estimador del espesor óptico de nube.

El método descrito, aunque menos riguroso y preciso que otros estudios que tienen como objetivo determinar el espesor óptico de las nubes (utilizando distinta instrumentación), presenta como ventaja su sencillez y el potencial para obtener estimaciones en tiempo real del espesor óptico de nube.

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Ocurrencia de nubes

Para el cálculo de la ocurrencia de nubes media mensual, se han agrupado los registros del ceilómetro por mes. A continuación, para cada uno de los meses, se obtiene la relación entre número de registros con nubes y número total de registros. Dicha operación se lleva a cabo teniendo en cuenta la totalidad de los registros, obteniendo la ocurrencia de nubes media, y los registros en cada capa por separado, para obtener la ocurrencia de nubes media mensual en cada capa.

| Mes | Ocurrencia de nubes media (%) | Ocurrencia de nubes media en capa 1 (%) | Ocurrencia de nubes media en capa 2 (%) | Ocurrencia de nubes media en capa 3 (%) |
|-----|-------------------------------|---|---|---|
| 1   | 36                            | 17                                      | 12                                      | 7                                       |
| 2   | 35                            | 7                                       | 8                                       | 20                                      |
| 3   | 43                            | 21                                      | 7                                       | 16                                      |
| 4   | 52                            | 21                                      | 21                                      | 10                                      |
| 5   | 46                            | 18                                      | 22                                      | 6                                       |
| 6   | 37                            | 15                                      | 15                                      | 7                                       |
| 7   | 11                            | 11                                      | 0                                       | 0                                       |
| 8   | 10                            | 3                                       | 5                                       | 3                                       |
| 9   | 25                            | 10                                      | 10                                      | 6                                       |
| 10  | 48                            | 20                                      | 19                                      | 8                                       |
| 11  | 65                            | 35                                      | 19                                      | 12                                      |
| 12  | 50                            | 11                                      | 7                                       | 32                                      |

Tabla 5-1: Ocurrencia de nubes media mensual en distintas capas

#### 5.1.1 Ocurrencia de nubes media mensual

La ocurrencia de nubes es mínima en los meses de verano, especialmente en los meses de julio y agosto. Vemos que la ocurrencia de nubes alcanza máximos en los meses de noviembre y abril, con valores de 0.65 y 0.5 respectivamente. Desde el máximo de abril se inicia una tendencia descendente hasta los valores mínimos de julio y agosto, con una ocurrencia de nubes de 0.1. A partir de agosto se inicia una tendencia ascendente, (con una pendiente de aproximadamente 0.1/mes) hasta alcanzar el máximo en el mes de noviembre. A partir de este mes vuelve a iniciarse una tendencia descendente de la ocurrencia de nubes.

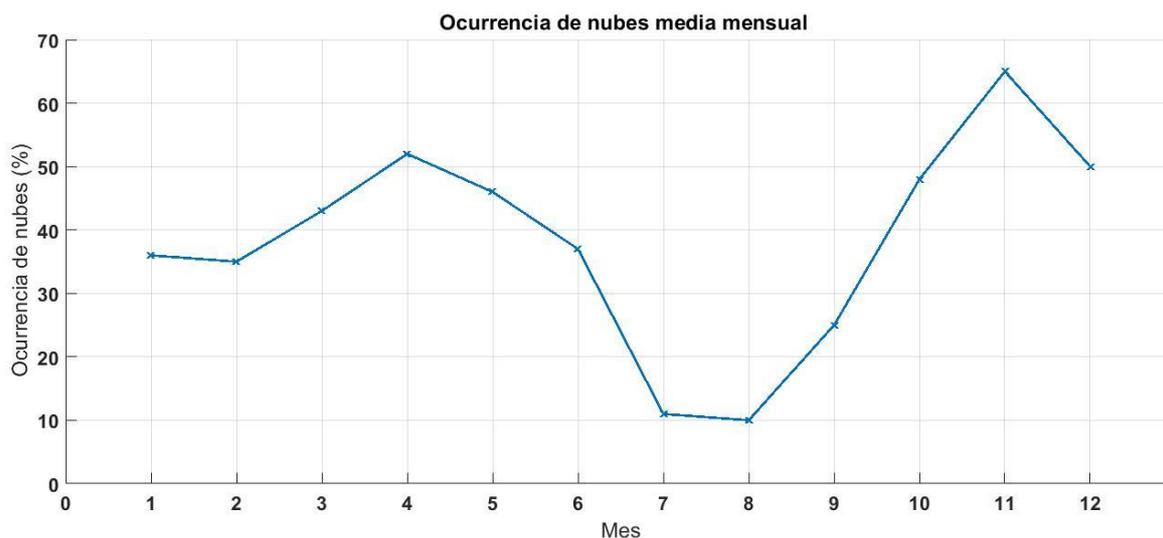


Ilustración 5-1: Ocurrencia de nubes media mensual

### 5.1.2 Ocurrencia de nubes media mensual en las distintas capas

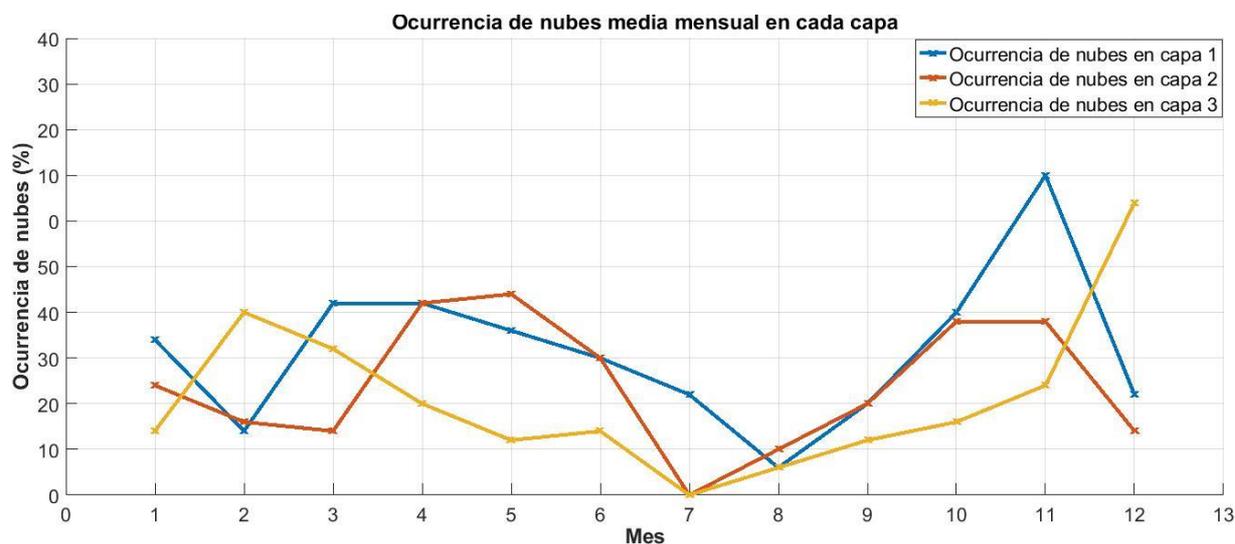


Ilustración 5-2. Ocurrencia de nubes media mensual desglosada por capas

La ocurrencia de nubes es, de forma general, predominante en la capa baja, que se extiende desde la superficie a los 2000 m. La ocurrencia de nubes en la capa más alta es notablemente menor a la ocurrencia de nubes en el resto de las capas en la mayor parte de meses. Una excepción a esta regla se encuentra en el mes de diciembre (número 10), en el que se produce un descenso de la ocurrencia de nubes en las capas baja y media en favor de una mayor ocurrencia de nubes en la capa alta

Otra excepción a esta tendencia puede observarse en el mes de mayo, en el que la ocurrencia de nubes en la capa media es sensiblemente mayor que la ocurrencia de nubes en la capa baja. A partir de este mes se inicia una tendencia descendente de la ocurrencia de nubes en todas las capas, llegando a ser nula la ocurrencia de nubes en las capas media y alta en el mes de julio. A partir de julio se inicia una tendencia ascendente de la ocurrencia de nubes. Desde agosto a octubre los valores de ocurrencia de nubes en las capas media y baja son aproximadamente iguales. A partir de octubre la ocurrencia de nubes en la capa media decrece. La ocurrencia de nubes en la capa baja sigue creciendo hasta alcanzar un máximo en el mes de noviembre, con un valor de 35 %. Se inicia entonces una tendencia con un decrecimiento acusado de la ocurrencia de nubes en las capas baja y media, que llegan a valores cercanos al 10 %, mientras que la ocurrencia de nubes en capas altas crece hasta aproximadamente un 32 %

De los datos del ceilómetro podemos también determinar el número de ocurrencias de una o múltiples capas.

Se obtiene que, de la totalidad de registros con nubes, en un 81.5% de las ocasiones tenemos una única capa de nubes, un 15.7% tenemos dos capas simultáneas y un 2.7% de ocasiones con tres capas simultáneas

### 5.1.3 Ocurrencia de nubes durante el día y la noche

A efectos de aplicar los resultados de este estudio para evaluar la influencia de la nubosidad en la radiación solar y la potencialidad del enfriamiento nocturno, se ha obtenido la ocurrencia de nubes diurna y nocturna

| Mes | Ocurrencia de nubes diurna (%) | Ocurrencia de nubes nocturna (%) |
|-----|--------------------------------|----------------------------------|
| 1   | 37                             | 38                               |
| 2   | 29                             | 39                               |
| 3   | 44                             | 47                               |
| 4   | 54                             | 50                               |
| 5   | 49                             | 43                               |
| 6   | 40                             | 35                               |
| 7   | 13                             | 10                               |
| 8   | 10                             | 9                                |
| 9   | 25                             | 27                               |
| 10  | 46                             | 50                               |
| 11  | 66                             | 64                               |
| 12  | 45                             | 53                               |

Tabla 5-2: Ocurrencia de nubes diurna y nocturna

La representación gráfica de estos valores:

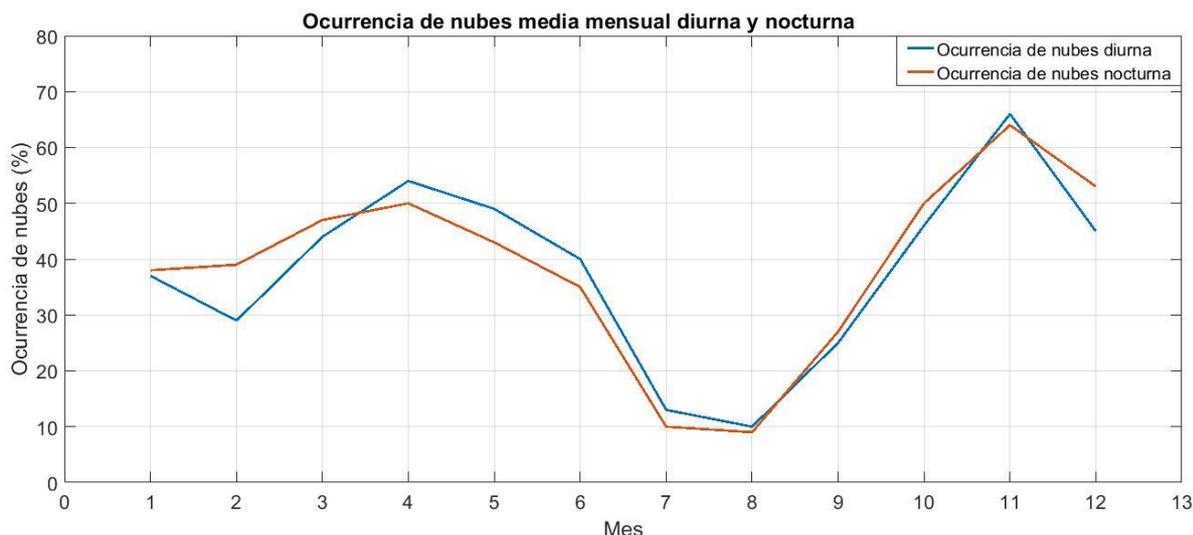


Ilustración 5-3: Ocurrencia de nubes media mensual diurna y nocturna

Vemos que la ocurrencia de nubes diurna y nocturna son muy similares, al menos en términos mensuales. Durante parte de la primavera y el verano, la ocurrencia de nubes diurna es mayor que la nocturna, mientras que dicha tendencia se invierte durante los meses de otoño e invierno. La mayor diferencia entre ocurrencia de nubes diurna y nocturna se produce en febrero, mes en el que la ocurrencia de nubes nocturna es 10 puntos

mayor a la diurna

## 5.2 Altura de base de la nube

Respecto a la altura de la base de la nube, tenemos:

| Mes | CBH Media<br>(m) | CBH Media Capa 1<br>(m) | CBH Media Capa 2<br>(m) | CBH Media Capa 3<br>(m) |
|-----|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1   | 4221             | 816                     | 4430                    | 9341                    |
| 2   | 7083             | 982                     | 4534                    | 9709                    |
| 3   | 4647             | 1086                    | 3168                    | 10169                   |
| 4   | 4180             | 1116                    | 4087                    | 10012                   |
| 5   | 3603             | 1010                    | 3891                    | 8761                    |
| 6   | 4122             | 1207                    | 4153                    | 9020                    |
| 7   | 875              | 627                     | 2827                    | 9242                    |
| 8   | 4867             | 465                     | 5187                    | 9395                    |
| 9   | 4637             | 1065                    | 4067                    | 10015                   |
| 10  | 3896             | 1038                    | 3804                    | 9842                    |
| 11  | 3645             | 891                     | 3773                    | 9868                    |
| 12  | 7719             | 855                     | 4833                    | 10386                   |

Tabla 5-3: Altura media mensual de base de la nube

Se ha realizado también la división de los registros de altura de nube entre diurnos y nocturnos. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

| Mes | CBH media diurna<br>(m) | CBH media nocturna<br>(m) | CBH media diurna capa 1<br>(m) | CBH media diurna capa 2<br>(m) | CBH media diurna capa 3<br>(m) | CBH media nocturna capa 1<br>(m) | CBH media nocturna capa 2<br>(m) | CBH media nocturna capa 3<br>(m) |
|-----|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1   | 3976                    | 4398                      | 882                            | 4338                           | 8988                           | 767                              | 4508                             | 9547                             |
| 2   | 6504                    | 7336                      | 938                            | 4291                           | 9680                           | 1016                             | 4622                             | 9721                             |
| 3   | 2746                    | 5565                      | 1015                           | 2354                           | 10379                          | 1176                             | 3395                             | 10270                            |
| 4   | 3337                    | 4809                      | 1148                           | 4031                           | 9703                           | 1074                             | 4120                             | 10130                            |
| 5   | 3211                    | 4139                      | 1124                           | 3808                           | 8942                           | 781                              | 4163                             | 8703                             |
| 6   | 3624                    | 4622                      | 1255                           | 4378                           | 8866                           | 1080                             | 3933                             | 9051                             |
| 7   | 926                     | 788                       | 813                            | 2121                           | 9461                           | 300                              | 5586                             | 9164                             |
| 8   | 4856                    | 6345                      | 329                            | 5072                           | 9284                           | 264                              | 5520                             | 9637                             |
| 9   | 4516                    | 4791                      | 1191                           | 4120                           | 9623                           | 834                              | 4019                             | 10569                            |
| 10  | 3640                    | 4208                      | 1083                           | 3558                           | 9835                           | 959                              | 4021                             | 9850                             |
| 11  | 3336                    | 4020                      | 869                            | 3727                           | 9503                           | 922                              | 3822                             | 10237                            |
| 12  | 8141                    | 8005                      | 1052                           | 5431                           | 10397                          | 951                              | 4444                             | 10368                            |

Tabla 5-4: Altura de base de la nube media mensual diurna y nocturna

Se representará a continuación el contenido de ambas tablas. En primer lugar, se representarán los valores de la altura media mensual de la base de la nube. Seguidamente, los valores de la altura media mensual de base de la nube en cada una de las capas. Para cada uno de estos apartados, se representarán los valores medios mensuales, obtenidos de la totalidad de medidas del mes, y a continuación los valores medios mensuales diurnos y nocturnos.

### 5.2.1 Altura media mensual de base de la nube

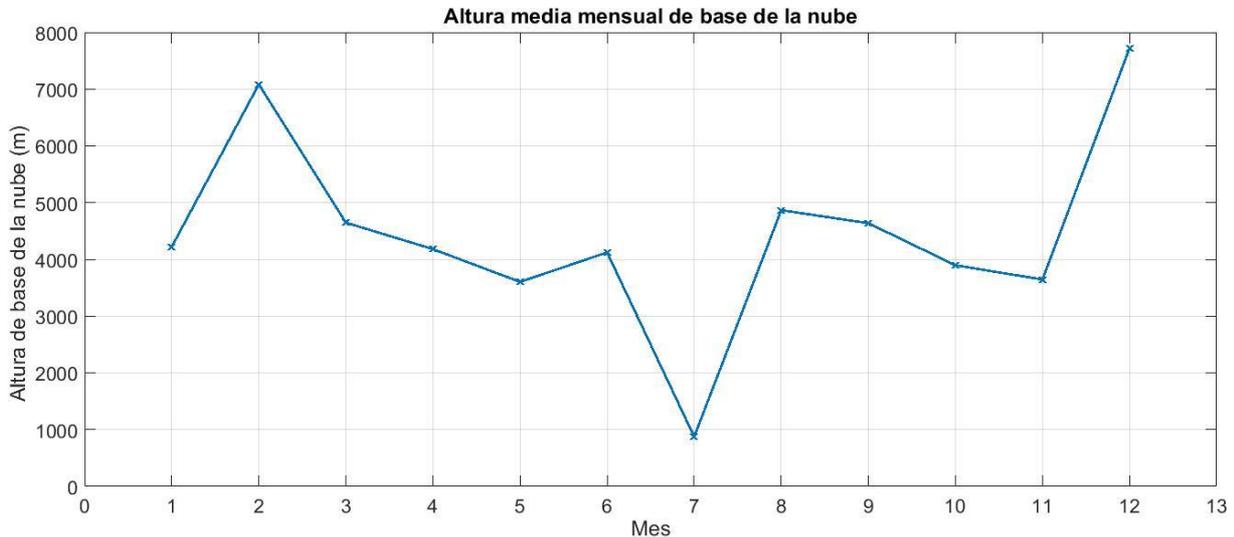


Ilustración 5-4: Altura media mensual de base de la nube

Respecto a la altura media mensual de la base de la nube (calculada usando todos los registros con nubes), vemos que durante varios meses se registran valores en torno a los 4000 y 5000 m, con excepción del mes de julio, con nubes en una altura alrededor de los 1000 m y del mes de diciembre de 2018 y febrero de 2019 con nubes en torno a los 7000 - 8000 m.

El cambio de tendencia observado en noviembre, con una altura media de base de la nube en torno a los 7000 – 8000 m se debe al descenso en la ocurrencia de nubes en capas bajas y medias y predominancia de las nubes en capa alta, como se ha descrito anteriormente.

Se observa también, como norma general, un descenso en la altura de base de la nube en los meses finales de la primavera y comienzos del verano, con la excepción del mes de agosto, en el que se produce un importante aumento de la altura de base de las nubes en la capa media.

Se tienen un total de 920129 registros con nubes. La distribución de frecuencias de la altura de nube de esos registros se representa a continuación:

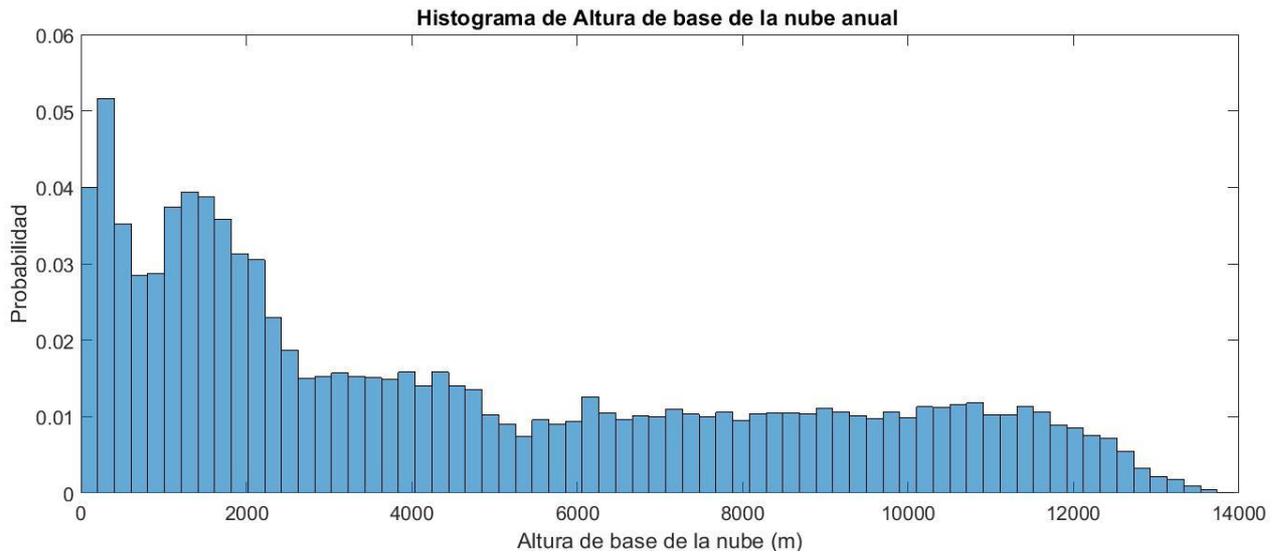


Ilustración 5-5: Histograma de Altura de base de la nube

Cada una de las barras del histograma representa, aproximadamente, una altura de 200 metros. Cabe destacar que un número considerable de nubes ocurren en una altura inferior a los 2500 metros, más concretamente un 43% de ellas. A partir de los 2500 metros, la distribución de las nubes es más o menos equitativa

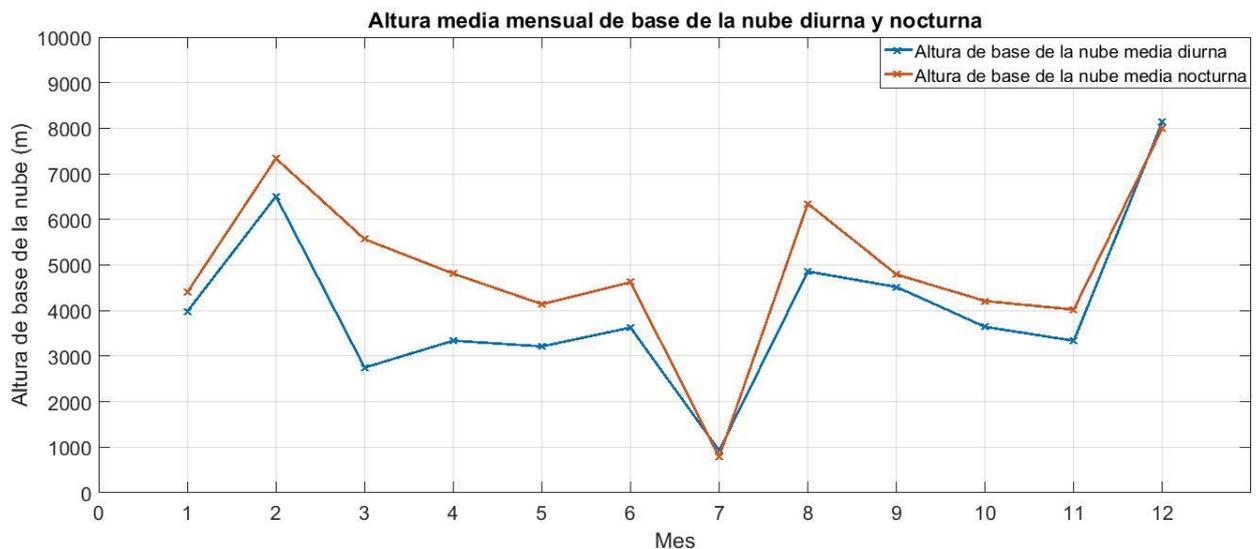


Ilustración 5-6: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna

Se observa una diferencia significativa entre la altura de base de la nube diurna y nocturna en los meses de mayo y junio, en los que las nubes que se producen por la noche son más altas que las diurnas. El resto de meses, la altura de base de la nube diurna y nocturna siguen tendencias muy similares, manteniéndose la altura de base de la nube media nocturna ligeramente superior a la diurna durante todos los meses.

### 5.2.2 Altura media mensual de base de la nube en capa 1 (0-2km)

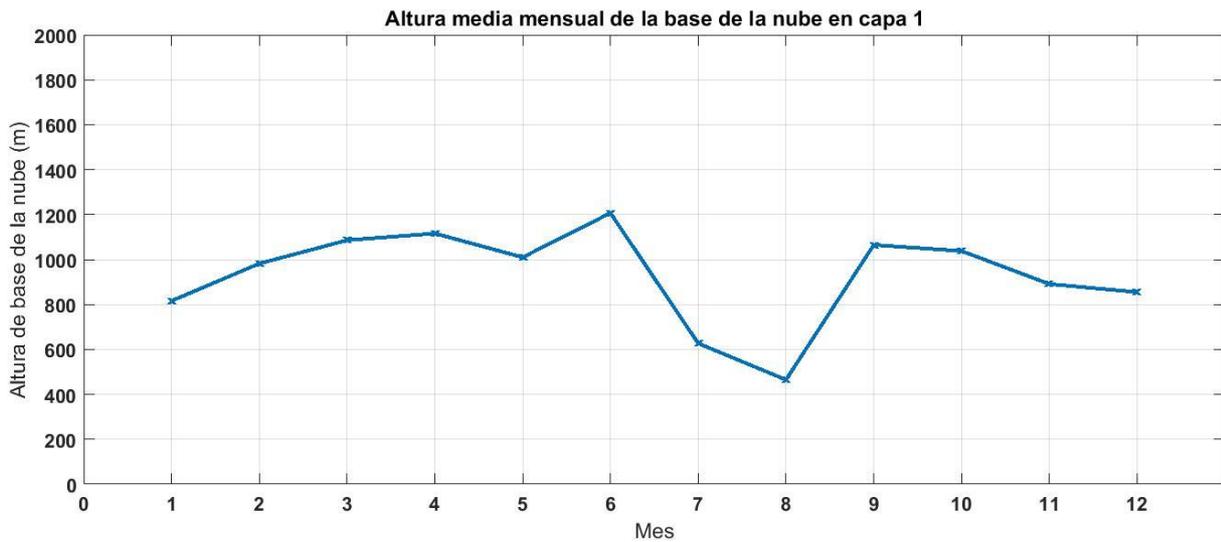


Ilustración 5-7: Altura media de base de la nube en capa 1

Vemos que la tendencia seguida por las nubes en la capa baja es similar a la antes descrita: Los valores medios mensuales varían poco respecto de un valor constante durante la mayor parte del año, excepto los meses de verano en los que se aprecian nubes de altura más baja. La ocurrencia de nubes en la capa baja es mayor que en el resto de las capas, luego ésta es, por lo general, una mejor representación de la nubosidad.

A continuación se representa la distribución de frecuencias de alturas de base de la nube en la capa 1.

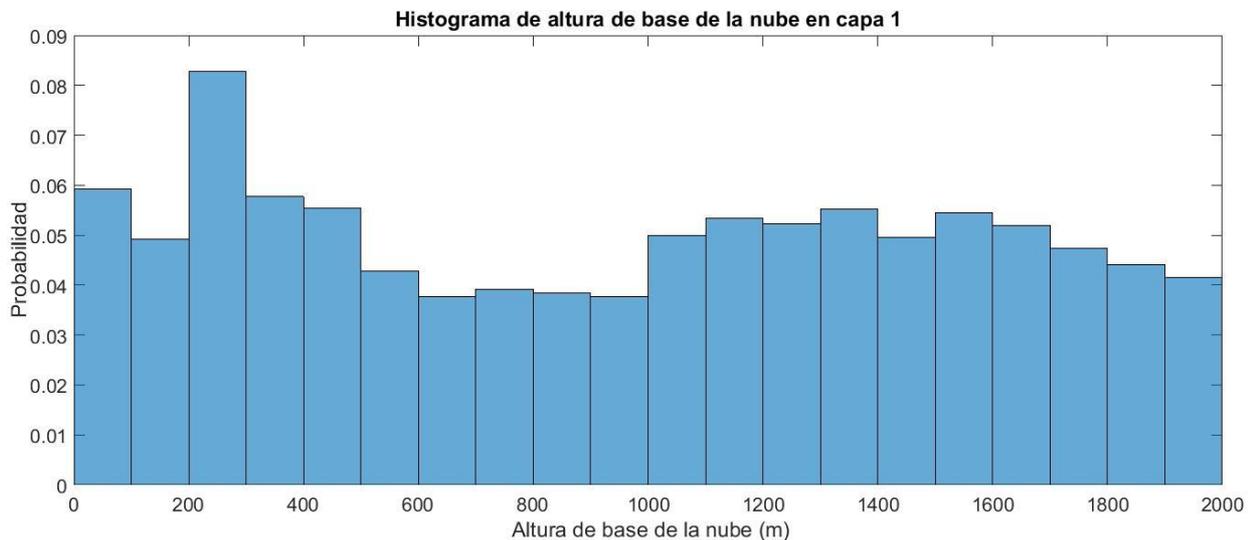


Ilustración 5-8: Histograma de altura de base de la nube en capa 1

De la distribución de frecuencias llama la atención que la probabilidad de altura de base de la nube más alta se encuentra en los 300 metros. También se ha de destacar que la probabilidad de encontrar una base de nube entre los 600 y 1000 metros es menor que en otros rangos de altura. Debemos también tener en cuenta que la precipitación provoca falsas detecciones de base de nube a alturas bajas, por lo que cabe esperar que la probabilidad de base de nube a menores alturas esté sobreestimada.

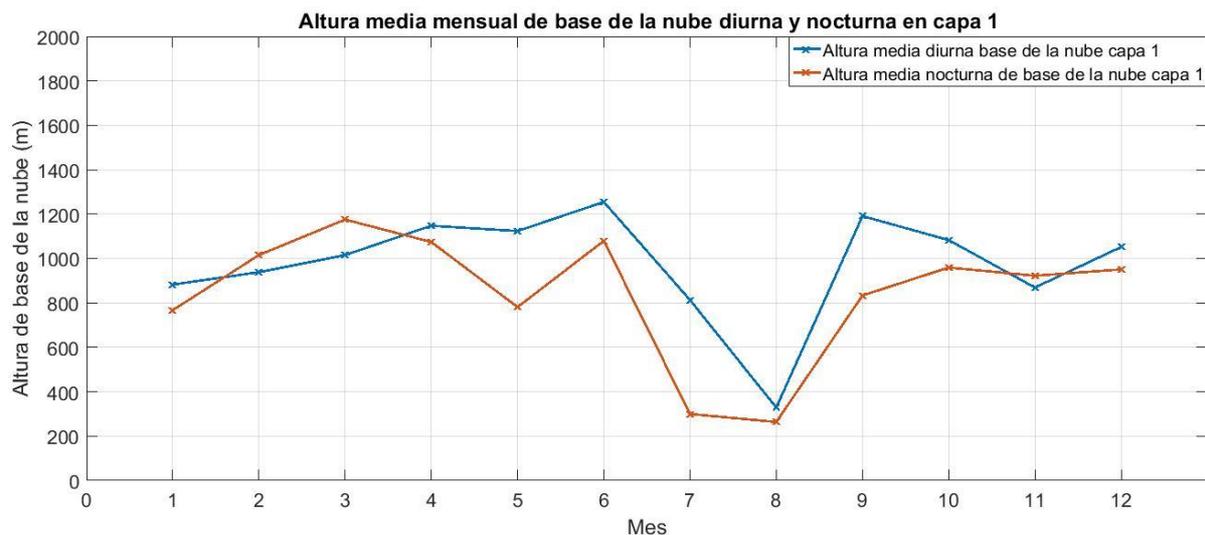


Ilustración 5-9: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna en capa 1

Vemos que, aunque en líneas generales las tendencias seguidas por ambas series son similares, no muestran tanta similitud como la altura mensual media de la nube diurna y nocturna teniendo en cuenta la totalidad de las nubes. Cabe destacar que la altura de las nubes diurnas es, de media, mayor que las nubes nocturnas para la mayoría de los meses. Para la mayor parte de los meses las nubes de la primera capa, tanto de día como de noche, se encuentran en el rango de los 800-1200 metros, a excepción del verano, en el que las nubes cuentan con una altura menor. Las nubes en la capa baja muestran una tendencia similar a la mostrada por la totalidad de los registros con nubes, con la excepción de algunos meses en los que la altura de las nubes nocturna es mayor que la diurna

### 5.2.3 Altura media mensual de base de la nube en capa 2 (2-7 km)

Vemos que una parte importante de los meses cuentan con una altura media de base de la nube en torno a los 4000 m. Algunas excepciones a tener en cuenta son marzo (mes 3) y julio (mes 7) con alturas medias en torno a los 3000 m. También resulta llamativo que la altura media máxima (de 5000 m aproximadamente) se produzca en agosto, cuando la altura media mínima se ha producido en julio (en torno a los 3000 m).

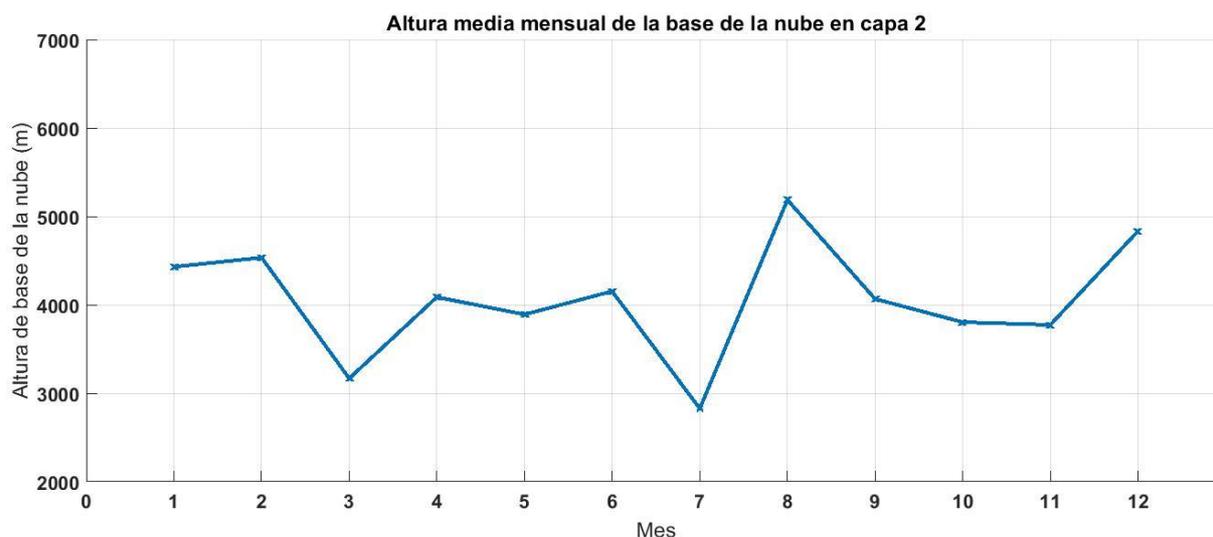


Ilustración 5-10: Altura media mensual de base de la nube en capa 2

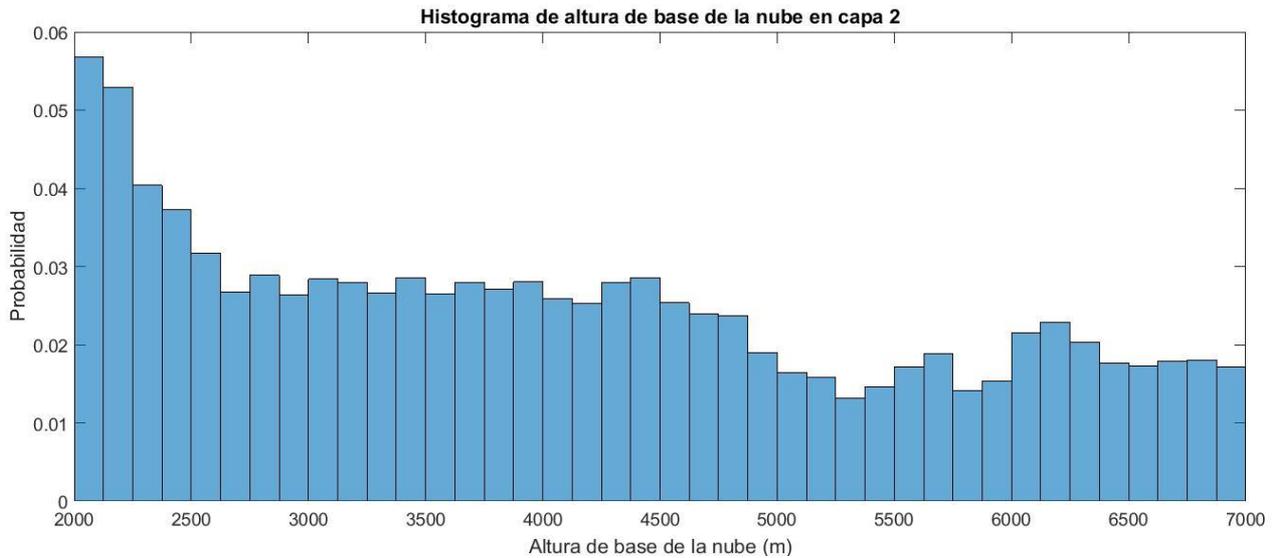


Ilustración 5-11: Histograma de altura de base de la nube en capa 2

Vemos que la probabilidad de que la nube se encuentre a una altura de entre 2000 y 2500 metros es ligeramente superior a la del resto de alturas, encontrándose una probabilidad máxima de 0.057 en los primeros 100 metros de la segunda capa. Desde los 2500 a los 4500 metros la probabilidad de que la base de la nube se encuentre a esta altura permanece prácticamente constante para cada una de las barras del histograma, en torno a 0.03. Desde los 5000 a los 7000 metros se aprecia una menor probabilidad de que la base de la nube se encuentre en éste rango, con las barras del histograma rondando una probabilidad de 0.02.

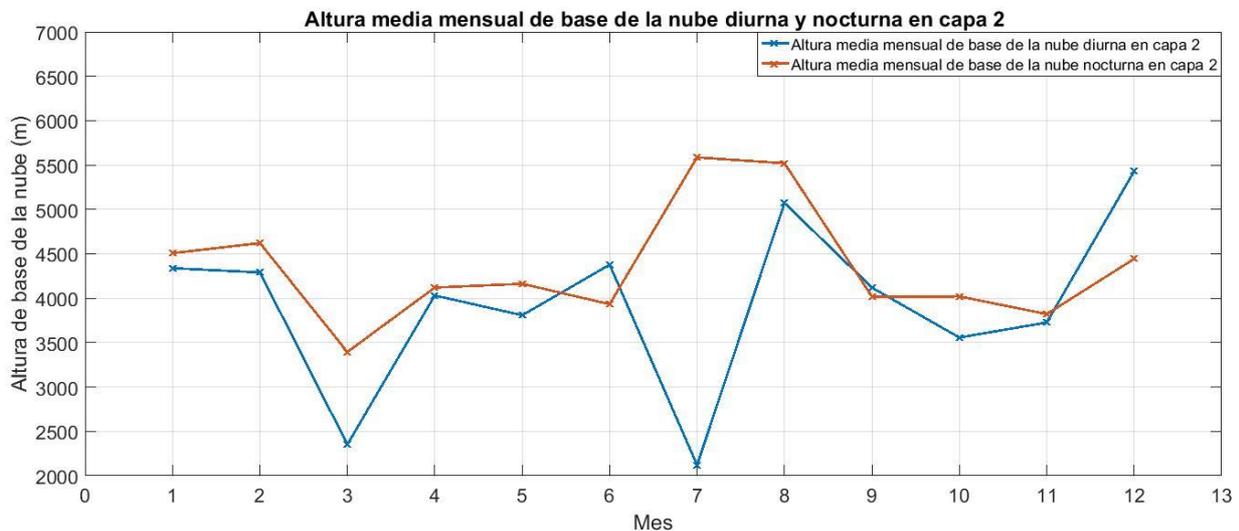


Ilustración 5-12: Altura media mensual diurna y nocturna de base de la nube en capa 2

Representando las alturas de base de la nube diurna y nocturna llama la atención la diferencia de alturas diurna y nocturna que se produce en el mes de julio, en el que se produce un mínimo de la altura de base de las nubes diurnas, en torno a los 2000 metros, mientras que se produce un máximo de la altura de la base de las nubes nocturnas, en torno a los 5500 metros. Al contrario que las tendencias descritas, teniendo en cuenta la totalidad de las capas y sólo la primera, las nubes nocturnas se producen, para la mayoría de las meses, a una mayor altura que las diurnas.

### 5.2.4 Altura media mensual de base de la nube en capa 3 (7-15 km)

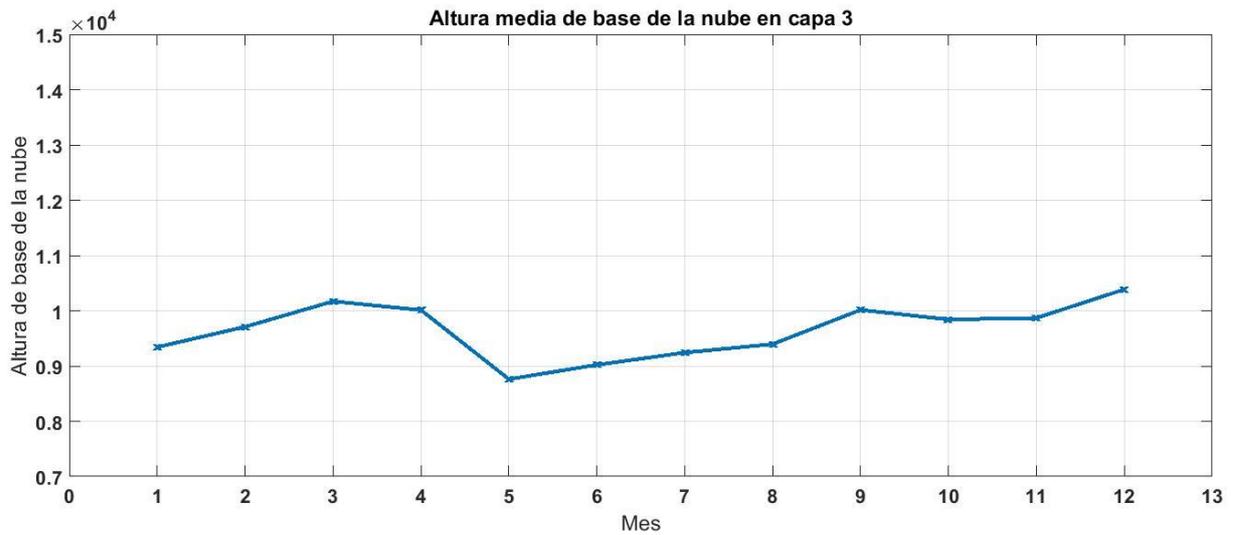


Ilustración 5-13: Altura media mensual de base de la nube en capa 3

Vemos que la altura media mensual de base de las nubes en la capa 3 se encuentra, para la mayor parte de los registros, entre los 9000 y 10000 metros aproximadamente. Respecto a las nubes en la tercera capa, vemos que se aprecia la altura media de la base de la nube es más baja desde mayo a agosto. Comparando con el resto de las capas, las nubes en la capa 3 muestran una variabilidad interanual menor que la observada en el resto de capas, en las que las diferencias entre las distintas estaciones es más acusada.

A continuación, se representa la distribución de frecuencias de altura de base de la nube en la capa 3. Como puede observarse, la probabilidad que la altura de nube se encuentre entre 700 y 1200 metros es aproximadamente la misma para la mayor parte de las barras, con una probabilidad de 0.04 aproximadamente. A partir de los 1200 metros se observa un descenso de probabilidad de que la altura de la nube se encuentre en estos rangos. La equiprobabilidad de la ocurrencia de nubes para la mayor parte de la capa, de los 700 a los 1200 metros, explica la varianza tan baja de los valores medios mensuales de altura de base de la nube en esta capa.

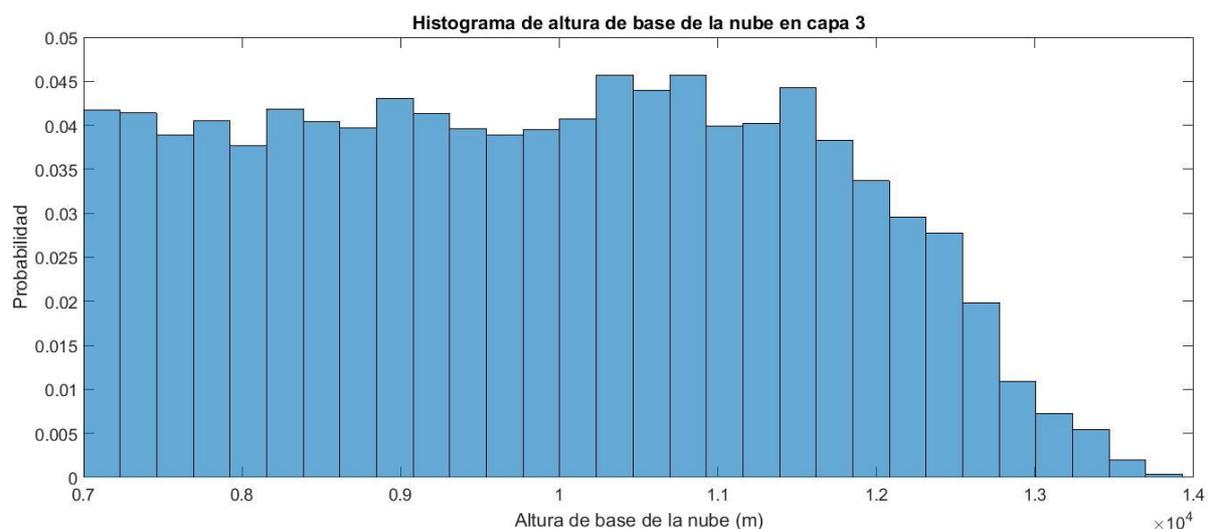


Ilustración 5-14: Histograma de altura de base de la nube en capa 3

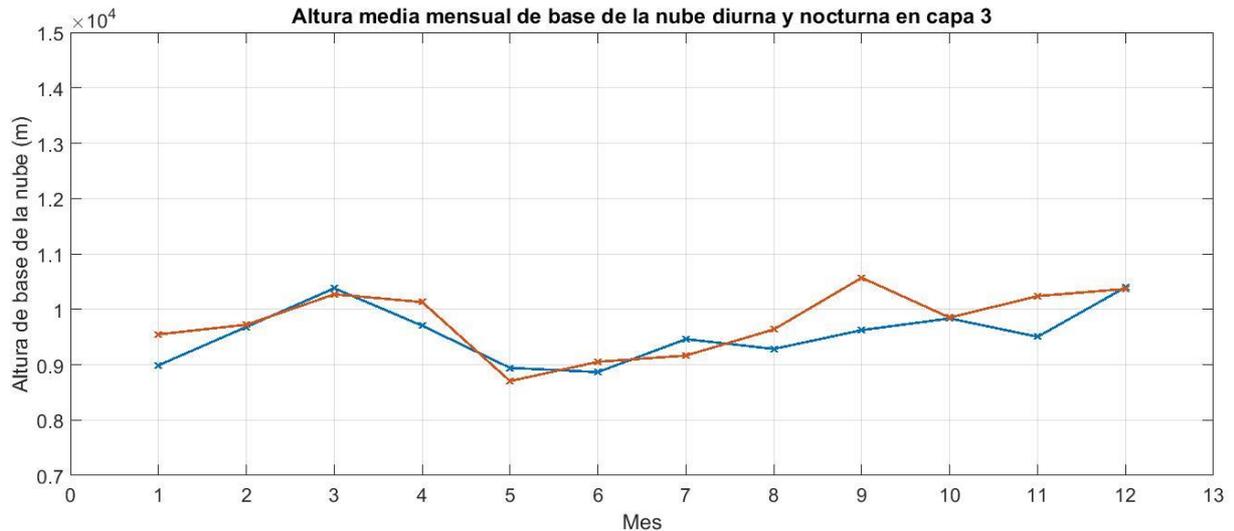


Ilustración 5-15: Altura media mensual de base de la nube diurna y nocturna en capa 3

Los comentarios realizados sobre la altura media mensual de base de la nube considerando la totalidad de registros es aplicable a los registros diurnos y nocturnos: La mayoría de meses, tanto para valores nocturnos como diurnos, se encuentra en el rango de los 900 y 1100 metros, observándose el mínimo de estos valores durante los meses de verano.

### 5.3 Espesor óptico y tamaño de nube

#### 5.3.1 Espesor óptico de nube

Se representan a continuación la serie horaria de los valores medios de la señal de retrodispersión de las nubes detectadas según el método descrito en la metodología, sirviendo dichos resultados como un estimador del espesor óptico de la nube.

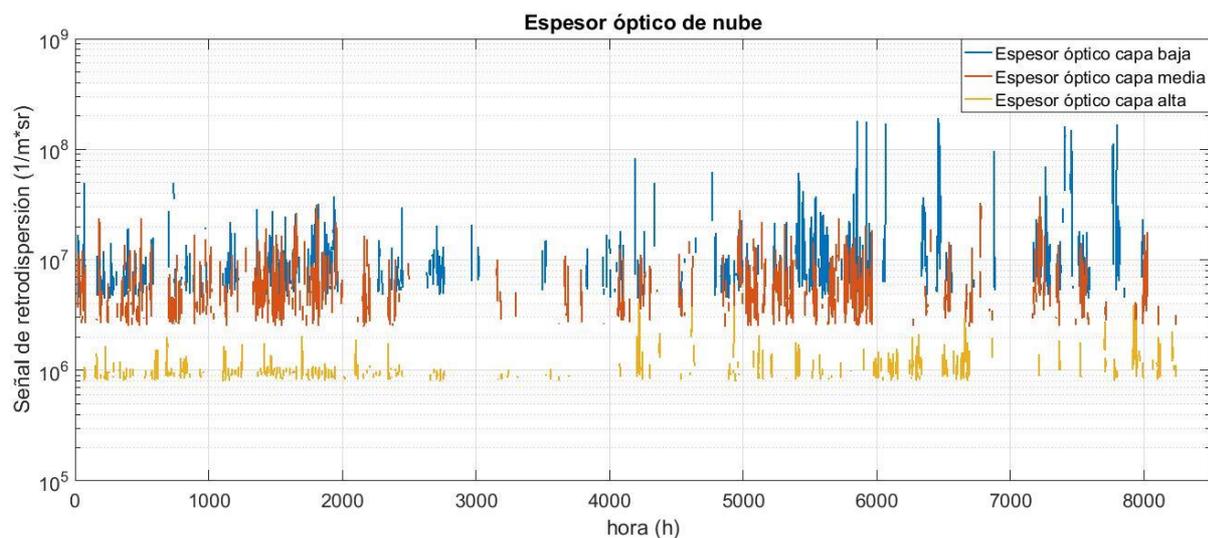


Ilustración 5-16: Espesor óptico de nube

Vemos que los resultados confirman la hipótesis adoptada anteriormente: Cuanto más baja es la nube, mayores son los hidrometeoros que la forman. Vemos que el espesor óptico de la capa alta (7-15 km) es considerablemente más bajo que el de las capas media y alta, debido a que los hidrometeoros que forman estas

nubes son principalmente pequeños cristales de hielo, más dispersos entre sí que los hidrometeoros en nubes más bajas.

A la vista de los resultados, las nubes bajas serán las de mayor impacto en la radiación solar. Las nubes en la segunda capa, aunque de menor espesor óptico, también pueden tener un impacto considerable. Por último, las nubes en la tercera capa son las de menor espesor óptico y por tanto su impacto en la radiación solar es de esperar que sea considerablemente menor. Un estudio de la extensión vertical de la nube es necesario para extraer conclusiones más acertadas acerca del impacto de las nubes en cada capa en la radiación solar.

### 5.3.2 Extensión vertical de las nubes

Se representan a continuación los histogramas de tamaño de las nubes en distintas capas

#### 5.3.2.1 Tamaño de nubes bajas

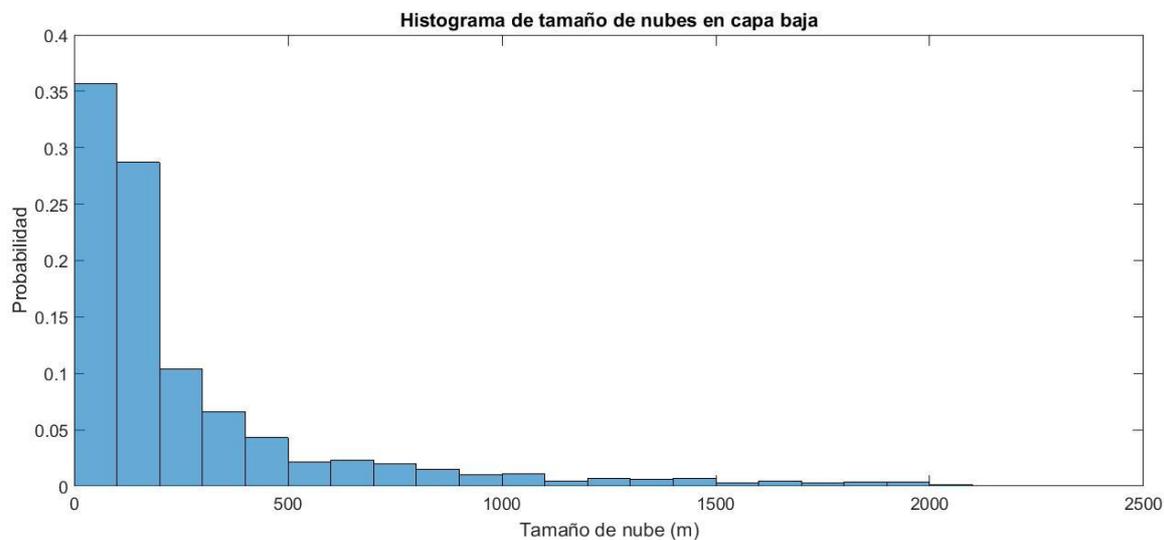


Ilustración 5-17: Histograma de tamaño de nubes en capa baja

Como vemos, la mayoría de las nubes (un 63 % aproximadamente) tienen un tamaño menor de 200 m. Un 35 % de las nubes en la capa baja tienen un tamaño menor de 100 m. Un 85 % de las nubes tienen un tamaño menor de 500 metros.

### 5.3.2.2 Tamaño de nubes medias

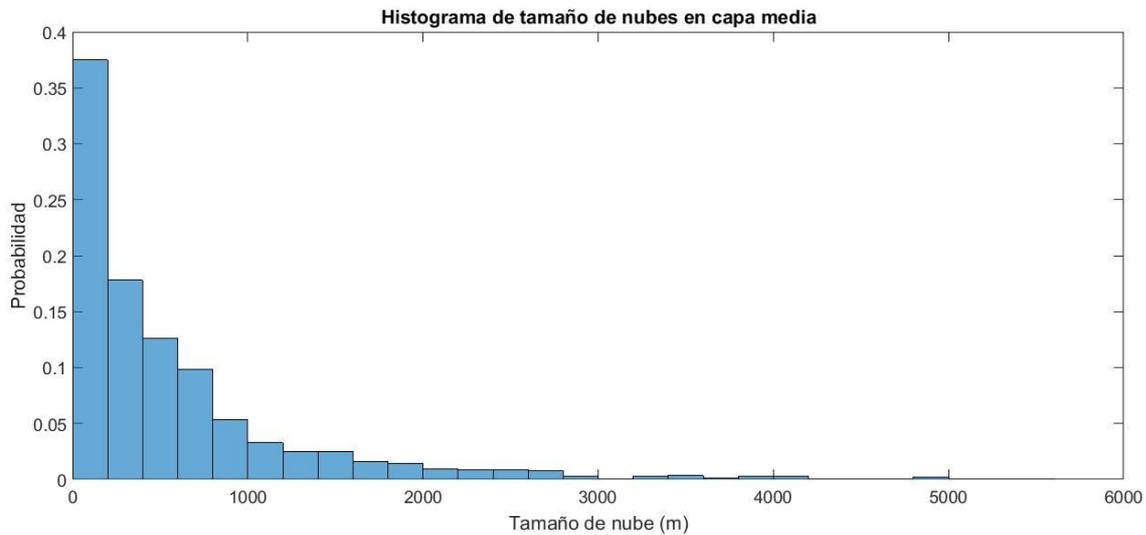


Ilustración 5-18: Histograma de tamaño de nubes en capa baja

En este caso pueden apreciarse tamaños de nube mayores que en la capa 1. Un 63 % de las nubes tienen un tamaño menor de 500 metros, y un 83 % de las nubes tienen un tamaño menor que los 1000 metros.

### 5.3.2.3 Tamaño de nubes altas

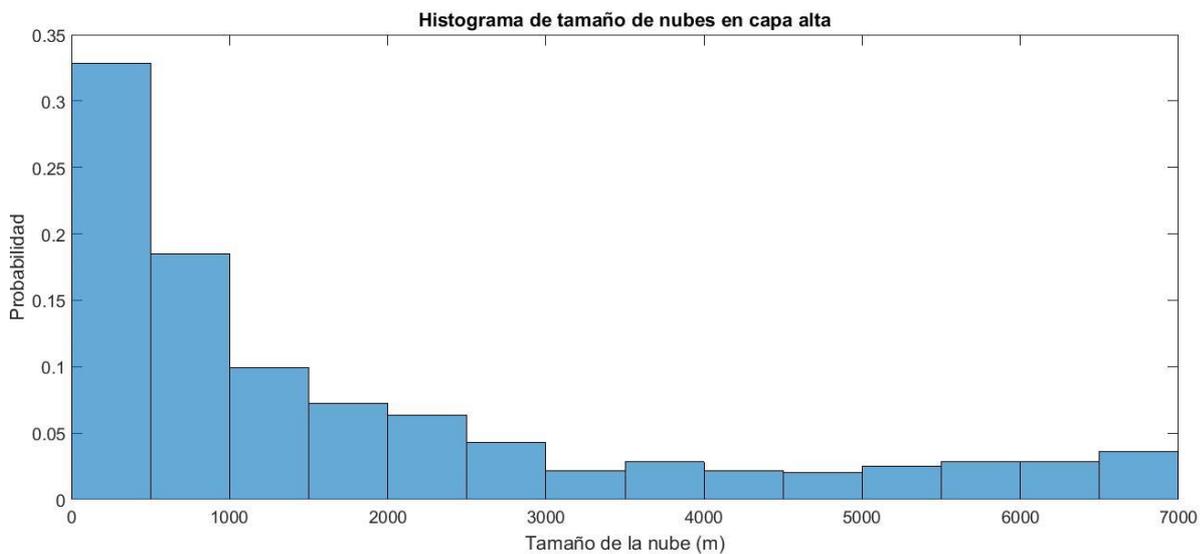


Ilustración 5-19: Histograma de tamaño de nubes en capa alta

Las nubes en la capa alta tienen una extensión vertical considerablemente mayor a la de las nubes en el resto de las capas. Solo un 51.3 % de las nubes tienen un espesor menor que 1000 metros, mientras que un 68.5% tiene un espesor menor que los 2000 metros. Llama la atención que hay un número no despreciable de nubes cuyo tamaño ronda los 5-7 kilómetros. Si bien puede haber ciertos algunos casos de nubes con dicho espesor, el número de casos obtenidos creemos que es desproporcionado, y lo atribuimos al ruido presente en la señal del ceilómetro a largos rangos

## 6 SUMARIO Y CONCLUSIONES

En el presente TFG se ha analizado un año completo de medidas de un Ceilómetro 15k Nimbus para el emplazamiento de Sevilla, de los resultados obtenidos del análisis de las medidas proporcionadas por el dispositivo se extraen los siguientes resultados:

Los meses con mayor ocurrencia de nubes son abril y noviembre (52 % y 65 % respectivamente), mientras que aquellos con menor ocurrencia son julio y agosto (10 %). La ocurrencia de nubes es mayoritaria en la capa baja durante la mayor parte del año, con algunas excepciones puntuales como diciembre de 2018 y febrero de 2019, meses en los que las capas altas son predominantes. Sin tener en cuenta los máximos y mínimos de ocurrencia de nubes antes mencionados, la ocurrencia de nubes se mueve a lo largo del año entre el 35 y el 45 %, resultados similares a los obtenidos en [12]. La ocurrencia de nubes nocturna y diurna presentan tendencias similares para la mayoría de los meses, siendo ligeramente superior la ocurrencia de nubes diurna parte de la primavera y el verano, y ligeramente superior la nocturna durante los meses de otoño e invierno.

Respecto a la estructura vertical de la nubosidad, de la totalidad de registros nubosos obtenidos con el ceilómetro, un 81.5% de éstos corresponden a una sola capa de nubes, un 15.7 % a dos capas y un 2.7 % a tres capas. Respecto a la altura de base de la nube, se dividen los registros de nubes en tres capas: Una capa baja, de 0 a 2 km, una media, de 2 a 7 km y otra alta, de 7 a 15 km. Las nubes en la capa baja tienen una altura de aproximadamente 1000 m a lo largo del año, con un mínimo en torno a los 600 m durante los meses de julio y agosto. Respecto a la capa media, la mayor parte de registros se encuentran entre los 3 y 5 km, con un mínimo en el mes de julio. Respecto a la capa alta, la mayor parte de registros se mueven en el rango de los 9-10 km, encontrándose los valores mínimos en los meses de mayo, junio y julio.

En cuanto al espesor óptico y tamaño de las nubes, los resultados muestran que las nubes en las capas bajas son las de mayor espesor óptico, pero menor extensión vertical. Las nubes en la capa media tienen un espesor óptico sensiblemente a las nubes en la primera capa, pero se extienden verticalmente por una distancia mayor. En cambio, las nubes en la capa alta son aquellas con mayor extensión vertical pero su espesor óptico es considerablemente menor.

Las nubes en la capa baja son las que cuentan, de forma general, con mayor ocurrencia a lo largo del año. La ocurrencia de nube en la capa baja ronda, durante la mayor parte del año, valores de entre 0.15 y 0.20. Además, su efecto en la radiación solar es importante ya que las nubes en la capa baja cuentan con un espesor óptico considerable. Se tratan de nubes con un espesor relativamente pequeño, ya que hasta un 63% de ellas tiene un espesor menor a los 200 metros, y un 85% tiene un espesor menor a los 500 m. Su altura varía entre los 800 y los 1200 metros a lo largo del año. Destacamos el mes de julio, en el que la ocurrencia de nubes en la capa baja es de 0.11, mientras que en el resto de capas es nula. Dicha ocurrencia, junto con las características de la nubosidad mencionadas anteriormente nos hacen llegar a la conclusión de que, incluso en meses de nubosidad escasa, resulta razonable prever que un número no despreciable de días se produzca una variabilidad importante de la radiación solar y por tanto un descenso de la producción de energía de la planta termosolar. En resumen, las nubes en la capa baja son las que tienen un mayor impacto en la radiación solar, y por tanto son éstas de las que resulta de mayor interés realizar una caracterización más precisa.

Las nubes en la capa media cuentan, de forma general, con una ocurrencia ligeramente menor a las de la capa baja. El espesor óptico de las nubes en la capa media es también ligeramente menor a la de las nubes en la capa baja, pero, en cambio, el espesor de nube es mayor (un 63% de las nubes tienen un espesor menor de 500 m). Por tanto, aunque las nubes bajas tienen mayor impacto en la radiación solar, el impacto de las nubes medias en la radiación es similar, ya que el descenso en espesor óptico puede verse compensado por la mayor extensión vertical de las nubes.

Respecto a las nubes en la capa alta, la ocurrencia es significativamente menor a la del resto de capas, por lo que sus efectos en la radiación solar serán menores. En este caso, la extensión vertical de las nubes es notablemente mayor, llegando algunas nubes a extenderse por 2-3 km. Sin embargo, dicha extensión vertical puede haber sido sobreestimada, debido al ruido presente en la señal del ceilómetro a estas alturas. En cuanto al espesor óptico, éste es significativamente menor en las nubes altas, por lo que el efecto en la radiación solar de las nubes en la capa alta no sea significativo. Como se explica en el apartado 2.1, las nubes en capa alta se caracterizan por su transparencia debida al pequeño tamaño de los hidrometeoros que la forman y la dispersión de estos entre sí, características que provocan que estas nubes sean muy transparentes a la radiación solar.

Considerando los registros de todas las capas, la altura de base de la nube media mensual nocturna es, para todos los meses del año, superior a la altura de base de la nube media mensual diurna. Esta diferencia es especialmente acusada en los meses de mayo y junio. En la primera capa la altura de la base de las nubes nocturnas es inferior para la mayoría de los meses, excepto abril y mayo, meses en los que la altura de la base de las nubes nocturnas es ligeramente superior a la de las diurnas. Respecto a la segunda capa, la altura de base de la nube nocturna y diurna muestran tendencias similares para gran parte de los meses, excepto en septiembre, mes en el que se produce un máximo en las nubes nocturnas, con una altura media de 5500 metros, y un mínimo en las nubes diurnas, con una altura media de 2000 metros. Finalmente, en la capa 3, no se producen grandes diferencias entre las tendencias mostradas por las nubes diurnas y nocturnas, estando la mayoría de ellas.

## 7 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

---

El ceilómetro provee de información de gran utilidad, que puede utilizarse en diversas aplicaciones:

- El análisis conjunto de la información proporcionada por el ceilómetro junto con la información proporcionada por otra instrumentación como cámaras de cielo o radiómetros permitiría definir de manera más precisa la ocurrencia, densidad y tamaño de nubes y su interacción con la radiación solar.
- El análisis de la señal de retrodispersión proporcionada por el ceilómetro en días despejados permite obtener información de los aerosoles presentes en la atmósfera y su impacto en la radiación solar.
- La información proporcionada por el ceilómetro puede ser utilizada para otras aplicaciones, como la evaluación del potencial del enfriamiento evaporativo. Para ello, se podría registrar la temperatura de una placa de la que se conocen sus propiedades radiantes de tal manera que se pueda relacionar el tipo de nube con el intercambio radiante y el potencial de enfriamiento nocturno de un emplazamiento.
- La implantación progresiva de una amplia red de ceilómetros en el marco del programa EARLINET [26] proporcionaría información acerca de los aerosoles atmosféricos, de gran utilidad para determinar el impacto de éstos en el clima, el medio ambiente y la salud.
- La información proporcionada por el ceilómetro puede ser de gran utilidad para detectar cambios interanuales en la nubosidad. Dado el papel fundamental de la nubosidad en el clima, un estudio de la nubosidad durante un número suficiente de años, y el análisis de los cambios que se han producido en la nubosidad en este periodo de tiempo podría ayudar a determinar los efectos del cambio climático.

# REFERENCIAS

---

- [1] D. H. Ahrens, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate and the Environment*, 12 edición, Cengage, 2017.
- [2] World Meteorological Organization, *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Capítulo 15: Observaciones de nubes. 7a edición., WMO, 2008.
- [3] A. L. Rangno, «Classification of Clouds,» *Encyclopedia of Atmospheric Sciences. Clouds and Fog*, vol. 2, pp. 141-160, 2015.
- [4] World Meteorological Organization, *Cloud Atlas*.
- [5] S. Vall y A. Castell, «Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 803-820, Septiembre 2017.
- [6] D. R. Myers, *Solar Radiation. Practical Modelling for Renewable Energy Applications*, CRC Press, 2017.
- [7] P. Tzoumanikas, E. Nikitidou , A. Bais y A. Kazantzidis, «The effect of clouds on surface solar irradiance, based on data from an all-sky imaging system,» *Renewable Energy*, vol. 95, pp. 314-322, Septiembre 2016.
- [8] R. Perez y T. E. Hoff, «Capítulo 6: Solar Resource Variability,» de *Solar Energy Forecasting and Resource Assesment.*, Elsevier, 2013, pp. 133-148.
- [9] R. H. Inman, H. T. Pedro y C. F. Coimbra, «Solar forecasting methods for Renewable Energy integration,» *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 39, nº 6, pp. 535-576, Diciembre 2013.
- [10] T. Watanabe, Y. Oishi y T. Y. Nakajima, «Characterization of surface solar-irradiance variability using cloud properties based on satellite observations,» *Solar Energy*, vol. 140, pp. 83-92, Diciembre 2016.
- [11] M. Costa-Surós, J. Calbó, J. González y J. Martin-Vide, «Behaviour of Cloud Base Height from Ceilometer Measurements,» *Atmospheric Research*, vol. 127, pp. 64-76, Junio 2013.
- [12] J. Calbó y A. Sanchez-Lorenzo, «Cloudiness Climatology in the Iberian Peninsula from three global gridded datasets (ISCCP, CRU, TS 2.1, ERA-40),» *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 96, nº 1, pp. 105-115, Abril 2009.
- [13] T. J. Wagner y J. M. Kleiss, «Error Characteristics of Ceilometer-Based Observations of cloud amount,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 33, p. 1557–1567, Julio 2016.
- [14] G. Martucci, C. Milroy y C. D. O'Dowd, «Detection of Cloud-Base Height Using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 Ceilometers,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 27, pp. 305-318, Febrero 2010.
- [15] C. E. Duchon y M. S. O'Malley, «Estimating Cloud Type from Piranometer Observations,» *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 38, pp. 132-141, Enero 1999.

- [16] R. Tapakis y A. Charalambides, «Equipment and Methodologies for Cloud Detection: A review,» *Solar Energy*, vol. 95, pp. 392-430, Septiembre 2013.
- [17] J. Calbó y J. Sabburg, «Feature Extraction from Whole-Sky Ground-Based Images for Cloud-Type Recognition,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 25, pp. 3-14, Enero 2008.
- [18] P. S. Argall y R. Sica, «LIDAR. Atmospheric Sounding Introduction,» de *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, 2015, pp. 262-269.
- [19] M. Costa-Surós, Tesis Doctoral: Geometric Characteristics of clouds from Ceilometer Measurements and Radiosounding Methods., Universitat de Girona, 2014, p. 165.
- [20] C. Weitkamp, LIDAR: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer-Verlag New York, 2005, p. 456.
- [21] J. D. Vande Hey, A Novel Lidar Ceilometer: Design, Implementation and Characterisation. ISBN 978-3-319-12613-5, Springer, 2005.
- [22] I. Mattis y F. Wagner, «Glossary of Lidar and Ceilometer Variables. Internal Report. EUMETNET,» 2014.
- [23] W. Eberhard, «Cloud Signals from LIDAR and Rotating Beam Ceilometer compared with Pilot Ceiling,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 3, pp. 499-512, Febrero 1986.
- [24] R. Rogers y M. Lamoureaux, «Quantitative interpretation of Laser Ceilometer Intensity Profiles,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 14, pp. 396-411, Junio 1997.
- [25] D. Serrano Alcañiz, Tesis Doctoral: Estudio del espesor óptico de nubes a partir de radiación solar. Universitat de Valencia, 2015.
- [26] M. Wiegner, F. Madonna, I. Biniotoglou, R. Forkel, J. Gasteiger, A. Geiß, G. Pappalardo y K. Schäfer, «What is the benefit of ceilometers for aerosol remote sensing? An answer from EARLINET,» *Atmospheric Measurements Techniques*, vol. 7, pp. 1979-1997, Julio 2014.



## Anexo 1

Los resultados obtenidos en este estudio se han recogido en un ‘abstract’ presentado a SolarPACES, una red internacional de investigadores y profesionales dedicados al desarrollo de sistemas de energía solar térmica.

### Cloudiness Characterization in Seville using Ceilometer Measurements

Larrañeta, M.<sup>1</sup>, Pérez-Gallego, A.<sup>2</sup>, Silva-Pérez, M. A.<sup>2</sup>, Lillo-Bravo, I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Andalusian Association for Research and Industrial Cooperation (AICIA). Miguel Larrañeta, Camino de los Descubrimientos s/n. 41092, Seville, Spain. Phone: (+34)954487237. E-mail: mlarraneta@ger.es

<sup>2</sup> Department of Energy Engineering, University of Seville.

#### 1. Introduction

Laser Ceilometers make use of the elastic LIDAR by emitting signals vertically in the atmosphere and analyzing the profile of the backscattered signal to detect clouds and calculate cloud-base height (CBH) [1]. Due to the high temporal and vertical resolution, the data provided by the ceilometer is rather useful in several engineering applications, such as solar radiation forecasting or assessing the potential of night radiative cooling of a fluid. To characterize cloudiness, we calculated the cloud occurrence and frequency distribution of CBH in Seville, in a similar way to [2]. Furthermore, we analyze the backscatter signal to obtain a time series, with hourly resolution, of estimated cloud depth and cloud optical thickness that will be useful to determine the effects of clouds on solar radiation and night radiative cooling.

#### 2. Methodology and Database

The data used for this study corresponds to one year of measurements obtained by a CHM15K Ceilometer from March 2018 to February 2019. The ceilometer provides measurements with a temporal resolution of 15 s and a vertical resolution of 15 m. The variables delivered by the ceilometer used in this study are cloud-base height and backscatter signal. The device is located at the meteorological station of the Group of Thermodynamics and Renewable Energy of the University of Seville.

Cloud occurrence could be considered as cloud cover [2]. We define cloud occurrence as the relation between the number of records identified with clouds and the total number of records. Daily and monthly cloud occurrence, as well as cloud occurrence in each of three considered layers is calculated. To estimate the cloud depth and cloud optical thickness we analyze the backscatter signal provided by the ceilometer (Fig 1). Firstly, we integrate the backscatter signal into hourly values. Secondly, given that the output of the backscatter signal is proportional to the size of the hydrometeor that causes the scatter, and that the lower the cloud, the larger the hydrometeors that form them, we set a different threshold value to identify clouds in each layer. The cloud depth is estimated by finding the distance between those points where the backscatter signal is greater than the defined threshold values. Finally, we estimate the optical thickness of the cloud as the mean backscatter signal of those points.

#### 3. Results and conclusions

The monthly cloud occurrence calculated for each cloud layer is shown in Fig 2. The cloud occurrence in the lower layer (0-2km) is higher than the cloud occurrence in other layers for the most part of the year. The analysis of the cloud optical depth shows that lower clouds result in a higher backscatter signal due to larger

hydrometeors composing the cloud (Fig 3). Some peaks in the backscatter signal, especially in the first layer, are caused by events of rain and fog. In respect to cloud depth, we found that thicker clouds occur in the first and second layers (0-2 km and 2-7 km respectively), but clouds in the third layer (7-12 km) are thinner. In the extended article, we perform a deeper characterization of cloud occurrence, depth and optical thickness for the location of Seville.

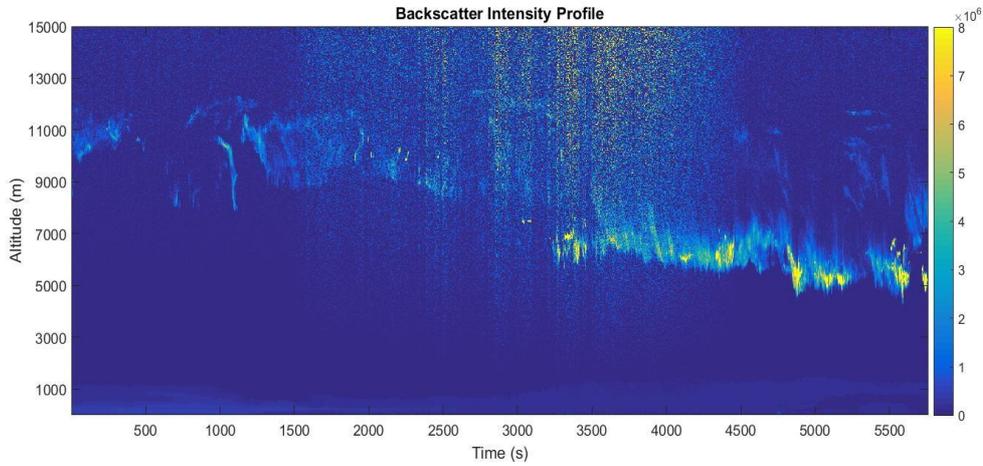


Figure 1. Backscatter Intensity Profile. April 1st 2018

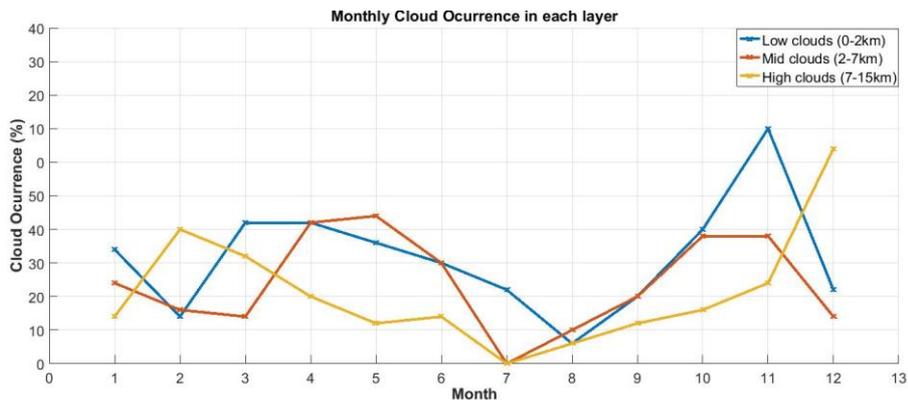


Figure 2. Monthly cloud occurrence

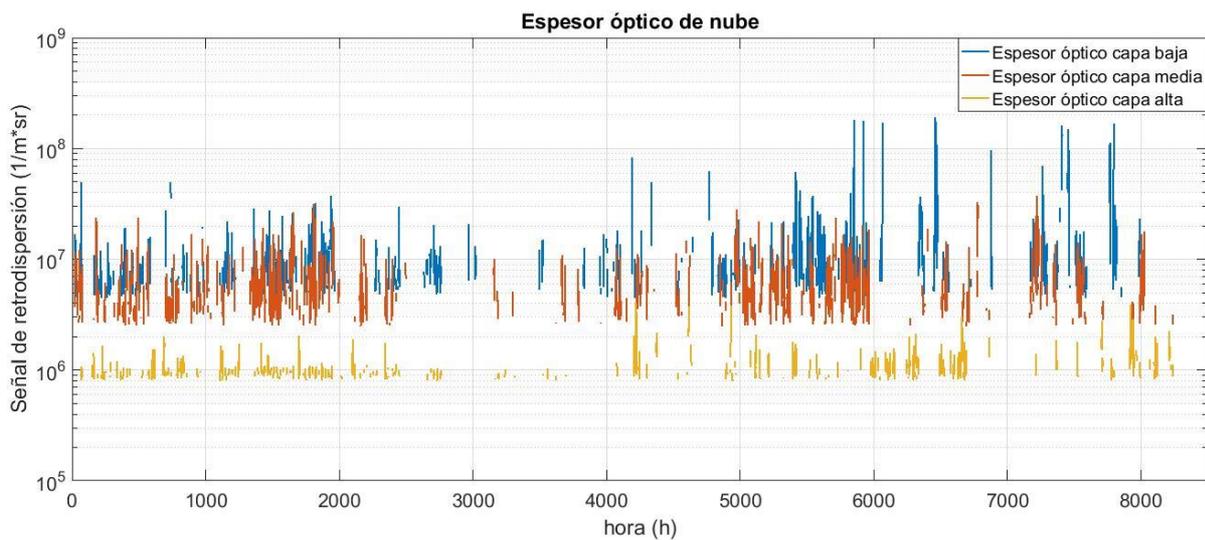


Figure 3. Mean backscatter signal depending on cloud height

We can observe the monthly variability of the solar radiation and its impact on the production of a CSP solar plant. For a location such as Seville with a mediterranean climate, there is a low variability in the production on summer months (Jul-Sep) and the greater variability is found in Spring (Mar-May).

## References

[1] Ramirez, L., Nielsen, K. P., Vignola, F., Blanco, M., Blanc, P., Meyer, R., & Wilbert, S. (2017). Road Map for Creation of Advanced Meteorological Data Sets for CSP Performance Simulations (Doctoral dissertation, IEA SolarPACES).

[2] Larrañeta, M., Fernandez-Peruchena, C., Silva-Pérez, M.A., Lillo-bravo, I., Grantham, A., Boland, J. 2019. Generation of synthetic solar datasets for risk analysis. Solar Energy (Under Review)

## Anexo 2

Se adjunta a continuación el programa escrito para la lectura de datos y cálculo de los resultados obtenidos en el estudio. El propósito es que éste código sea de utilidad para futuros alumnos que en el futuro continúen con esta línea de investigación y tengan acceso directo a los datos proporcionados por el ceilómetro.

```
%%Lectura Datos

%% Seleccionar directorio que contiene los archivos NetCDF
cd D:\CeilometerData\ %Carpeta principal que incluye todas las subcarpetas
mensuales
addpath(genpath('D:\CeilometerData\')) %Añade al path todas las subcarpetas

%% 2) Generación de fechas e identificador de archivo

t1=datetime(2018,1,1); %Establecer las fechas de inicio y final de las
mediciones
t2=datetime(2019,4,1);
t=t1:t2;
t=transpose(t); %Generación de todas las fechas entre las de inicio y fin y
transposición
filenames=yyyymmdd(t); %Expreso las fechas en formato yyyymmdd con el
objetivo de usarlas en la lectura de los archivos
%clear t1 t2

for i=1:length(filenames) %este bucle detecta cuál es el primer día con
medidas, para empezar a contar desde aquí. Me facilita la creación de tablas
ncFilename=sprintf('%d_SEVILLE_CHM170121_000.nc',filenames(i));
if exist(ncFilename, 'file')==2
    break
end
i=i+1;
t1=datetime(filenames(i), 'ConvertFrom', 'yyyymmdd');
t1=datetime(year(t1), month(t1), day(t1));

end
t2=datetime(2019,3,1);
t=t1:t2;
t=transpose(t);
filenames=yyyymmdd(t);

for i=1:length(filenames) %este bucle detecta cuál es el último día con
medidas, para empezar a contar desde aquí. Me facilita la creación de tablas
porque evito copiar celdas vacías.
ncFilename=sprintf('%d_SEVILLE_CHM170121_000.nc',filenames(i));
if exist(ncFilename, 'file')==0

    break
end

t2=datetime(filenames(i), 'ConvertFrom', 'yyyymmdd');
t2=datetime(year(t2), month(t2), day(t2));

end

t=t1:t2;
t=transpose(t);
filenames=yyyymmdd(t);

%% 3) Lectura y copia de las variables de interés
load('AlturaSolar.mat')
```

```

CloudData=cell(length(t),7);      %Se genera el cell array primero para
reservar espacio en la memoria
i=0;
for i=1:length(t)                %este bucle copia la fecha de cada día en la primera
columna, como un string
CloudData{i,1}=datestr(t(i));    %si quiero ponerlo en formato datetime,
sustituir la sentencia de esta linea(datestr(t(i))) por data{i,1}=t(i);
end

for i=1:length(filenamees)
ncFilename=sprintf('%d_SEVILLE_CHM170121_000.nc',filenamees(i));
if exist(ncFilename, 'file')==2
CloudData{i,2}=ncread(ncFilename, 'cbh');          %Cloud Base Height
CloudData{i,3}=ncread(ncFilename, 'cdp');          %cloud depth
CloudData{i,4}=ncread(ncFilename, 'tcc');          %Total cloud cover
CloudData{i,5}=transpose(ncread(ncFilename, 'time')); %Time
CloudData{i,6}=AlturaSolar{i,1};                  %Altura solar
end
i=i+1;

end
save('CloudVariables', 'CloudData');
%clear CloudData

%% 4) Copia Backscatter
BackscatterData=cell(length(CloudData),2);
for i=1:length(filenamees)
ncFilename=sprintf('%d_SEVILLE_CHM170121_000.nc',filenamees(i));
if exist(ncFilename, 'file')==2
BackscatterData{i,1}=ncread(ncFilename, 'beta_raw'); %Backscatter signal
end
end
save('Backscatter', 'BackscatterData', '-v7.3');

%% Separación de valores dia y noche
CBHdia=cell(length(CloudData),1);
CBHnoche=cell(length(CloudData),1);
for i=1:length(CloudData)
indices=find(CloudData{i,6}); %Devuelve indices de valores distinto de 0
a=indices(1);
b=indices(length(indices));
A=rand(5760,3); %Para reservar espacio
B=rand(5760,3);
if length(CloudData{i,2})<5700
CBHdia{i,1}='Dia con medidas incompletas';
else
A=CloudData{i,2};
B=A(1:3, a:b);
CBHdia{i,1}=B;
A(:, a:b)=[];
CBHnoche{i,1}=A;
end
end
end

clear a b indices i n1 n2 A B C
%% Clasificación en capas. Obtención de ocurrencia de nubes y CBH media

layers=cell(length(t),40);

for row=1:length(filenamees)

```

```

layers{row,1}=CloudData{row,1}; %Copia fechas
layers{row,2}=CloudData{row,2}; %Copia CBH
layers{row,3}=int16((CloudData{row,2}>0)); %Ocurrencia de nubes. Devuelve
1 cuando hay medición
layers{row,4}=int16((CloudData{row,2}>0 & CloudData{row,2}<2000)); %Capa 1
(lógicos)
layers{row,5}=int16((CloudData{row,2}>2001 & CloudData{row,2}<7000));
%Capa 2 (lógicos)
layers{row,6}=int16((CloudData{row,2}>7001 & CloudData{row,2}<15000));
%Capa 3 (lógicos)
layers{row,7}=sum(layers{row,3},2); %n° de registros total con nubes
layers{row,8}=sum(layers{row,4},2); %n° de registros con nubes en capa
1
layers{row,9}=sum(layers{row,5},2); %n° de registros con nubes en capa
2
layers{row,10}=sum(layers{row,6},2); %n° de registros con nubes en capa
3
layers{row,11}=layers{row,7}(1,1)/length(layers{row,2}); %Cloud occurence
total (=n° registros con nubes/registros totales)
layers{row,12}=layers{row,8}(1,1)/length(layers{row,2}); %Cloud occurence
capa 1
layers{row,13}=layers{row,9}(1,1)/length(layers{row,2}); %Cloud occurence
capa 2
layers{row,14}=layers{row,10}(1,1)/length(layers{row,2}); %Cloud occurence
capa 3
layers{row,15}=double(layers{row,3}).*double(CloudData{row,2}); %Valores de
CBH
layers{row,16}=double(layers{row,4}).*double(CloudData{row,2}); %Valores de
CBH en capa 1
layers{row,17}=double(layers{row,5}).*double(CloudData{row,2}); %Valores de
CBH en capa 2
layers{row,18}=double(layers{row,6}).*double(CloudData{row,2}); %Valores de
CBH en capa 3
layers{row,19}=mean(nonzeros(layers{row,15})); %Valores medios diarios de
CBH
layers{row,20}=mean(nonzeros(layers{row,16})); % " "
layers{row,21}=mean(nonzeros(layers{row,17}));
layers{row,22}=mean(nonzeros(layers{row,18}));
layers{row,23}=(CloudData{row,3}>0); %CDP
layers{row,24}=(CloudData{row,3}.*(int16(layers{row,3}))); %Valores de CDP
de todas las nubes
layers{row,25}=(CloudData{row,3}.*(int16(layers{row,4}))); %Valores de CDP
de las nubes de la capa 1
layers{row,26}=(CloudData{row,3}.*(int16(layers{row,5}))); %Valores de CDP
de las nubes de la capa 2
layers{row,27}=(CloudData{row,3}.*(int16(layers{row,6}))); %Valores de CDP
de las nubes de la capa 3
layers{row,28}=nonzeros(layers{row,24}); %Conjunto de mediciones de CDP
layers{row,29}=nonzeros(layers{row,25}); %Conjunto de mediciones de CDP
capa 1
layers{row,30}=nonzeros(layers{row,26}); %Conjunto de mediciones de CDP
capa 2
layers{row,31}=nonzeros(layers{row,27}); %Conjunto de mediciones de CDP
capa 3
layers{row,32}=mean(layers{row,28}); %Valores medios diarios de CDP
layers{row,33}=mean(layers{row,29}); %Valores medios diarios de CDP capa 1
layers{row,34}=mean(layers{row,30}); %Valores medios diarios de CDP capa 2
layers{row,35}=mean(layers{row,31}); %Valores medios diarios de CDP capa 3
layers{row,36}=nonzeros(layers{row,15});
layers{row,37}=layers{row,7}(1);
layers{row,38}=layers{row,7}(2);

```

```

layers{row,39}=layers{row,7}(3);
layers{row,40}=layers{row,7}(1)/length(layers{row,36}); %N° de registros
con una única capa (en %, dividido por el n° de registros con nubes)
layers{row,41}=layers{row,7}(2)/length(layers{row,36}); %N° de registros
con dos capas
layers{row,42}=layers{row,7}(3)/length(layers{row,36});%N° de registros
con tres capas

%A continuación se realizan los mismos cálculos pero separando valores
%de día y noche
%VALORES DÍA
error='Dia con medidas incompletas'; %Los dias con medidas incompletas
me dan error debido a la altura solar
tf=strcmp(CBHdia{row,1},error);
if tf==1

else
layers{row,43}=CBHdia{row,1};
layers{row,44}=int16((layers{row,43}>0)); %Ocurrencia de nubes. Devuelve
1 cuando hay medición
layers{row,45}=int16((layers{row,43}>0 & layers{row,43}<2000)); %Capa 1
(lógicos)
layers{row,46}=int16((layers{row,43}>2001 & layers{row,43}<7000));
%Capa 2 (lógicos)
layers{row,47}=int16((layers{row,43}>7001 & layers{row,43}<15000));
%Capa 3 (lógicos)
layers{row,48}=sum(layers{row,44},2); %n° de registros total con
nubes
layers{row,49}=sum(layers{row,45},2); %n° de registros con nubes en
capa 1
layers{row,50}=sum(layers{row,46},2); %n° de registros con nubes en
capa 2
layers{row,51}=sum(layers{row,47},2); %n° de registros con nubes en
capa 3
layers{row,52}=layers{row,48}(1,1)/length(layers{row,43}); %Cloud
occurrence total (=n° registros con nubes/registros totales)
layers{row,53}=layers{row,49}(1,1)/length(layers{row,43}); %Cloud
occurrence capa 1
layers{row,54}=layers{row,50}(1,1)/length(layers{row,43}); %Cloud
occurrence capa 2
layers{row,55}=layers{row,51}(1,1)/length(layers{row,43});%Cloud
occurrence capa 3
layers{row,56}=double(layers{row,44})*double(layers{row,43});%Valores de
CBH Dia
layers{row,57}=double(layers{row,45})*double(layers{row,43});%Valores de
CBH en capa 1 Dia
layers{row,58}=double(layers{row,46})*double(layers{row,43});%Valores de
CBH en capa 2 Dia
layers{row,59}=double(layers{row,47})*double(layers{row,43});%Valores de
CBH en capa 3 Dia

%VALORES NOCHE
layers{row,60}=CBHnoche{row,1};
layers{row,61}=int16((layers{row,60}>0)); %Ocurrencia de nubes. Devuelve
1 cuando hay medición
layers{row,62}=int16((layers{row,60}>0 & layers{row,60}<2000)); %Capa 1
(lógicos)
layers{row,63}=int16((layers{row,60}>2001 & layers{row,60}<7000));
%Capa 2 (lógicos)
layers{row,64}=int16((layers{row,60}>7001 & layers{row,60}<15000));
%Capa 3 (lógicos)
layers{row,65}=sum(layers{row,61},2); %n° de registros total con
nubes

```

```

        layers{row,66}=sum(layers{row,62},2);      %n° de registros con nubes en
capa 1
        layers{row,67}=sum(layers{row,63},2);      %n° de registros con nubes en
capa 2
        layers{row,68}=sum(layers{row,64},2);      %n° de registros con nubes en
capa 3
        layers{row,69}=layers{row,65}(1,1)/length(layers{row,60}); %Cloud
occurrence total (=n° registros con nubes/registros totales)
        layers{row,70}=layers{row,66}(1,1)/length(layers{row,60}); %Cloud
occurrence capa 1
        layers{row,71}=layers{row,67}(1,1)/length(layers{row,60}); %Cloud
occurrence capa 2
        layers{row,72}=layers{row,68}(1,1)/length(layers{row,60});%Cloud
occurrence capa 3
        layers{row,73}=double(layers{row,61}).*double(layers{row,60});%Valores de
CBH Noche
        layers{row,74}=double(layers{row,62}).*double(layers{row,60});%Valores de
CBH en capa 1 Noche
        layers{row,75}=double(layers{row,63}).*double(layers{row,60});%Valores de
CBH en capa 2 Noche
        layers{row,76}=double(layers{row,64}).*double(layers{row,60});%Valores de
CBH en capa 3 Noche

    end

end
save('layers','layers')
    numeromedidas=length(vertcat(layers{:,36}));
    onelayer=sum(vertcat(layers{:,37}))/numeromedidas;
    twolayer=sum(vertcat(layers{:,38}))/numeromedidas;
    threelayer=sum(vertcat(layers{:,39}))/numeromedidas;
    clear i ncFilename t1 t2 row error
%% Análisis mensual
%Mí primera intención ha sido seguir usando cell arrays pero quizá va a ser
%mejor cambiar a usar tablas (o timetable) porque me va a facilitar
%agrupar las variables por mes
%Problema: Timetables se introdujeron en Matlab 2016b. No pasa nada,
%table
%admite tipos datetime. Puedo usar "cell2table" para crear una tabla a
%partir del cell array
cellaux=cell(length(filenamees),7);
for row=1:length(filenamees)
    cellaux{row,1}=CloudData{row,1};
    cellaux{row,2}=layers{row,11};      %Cloud occurrence
    cellaux{row,3}=layers{row,12};      %Cloud occurrence layer 1
    cellaux{row,4}=layers{row,13};      %Cloud occurrence layer 2
    cellaux{row,5}=layers{row,14};      %Cloud occurrence layer 3
    cellaux{row,6}=month(CloudData{row,1});%mes
    cellaux{row,7}=year(CloudData{row,1});%año
end

cloudoctable=cell2table(cellaux,'VariableNames',{'Date','Cloud_Occurrence','C
loud_Occurrence_layer_1','Cloud_Occurrence_layer_2','Cloud_Occurrence_layer_3
','month','year'});
clear cellaux

%Tabla de ocurrencia de nubes para solo valores dia y noche
cellaux=cell(length(filenamees),7);
error='Dia con medidas incompletas';
i=1;
%Los dias con medidas incompletas me dan error debido a la altura solar
for row=1:length(filenamees)

```

```

tf=strcmp(CBHdia{row,1},error); %Compruebo si el día es un día de medidas
incompletas

if tf==0

cellaux{row,1}=layers{row,52}; %Daytime Cloud occurrence
cellaux{row,2}=layers{row,53}; %Daytime Cloud occurrence layer 1
cellaux{row,3}=layers{row,54}; %Daytime Cloud occurrence layer 2
cellaux{row,4}=layers{row,55}; %Daytime Cloud occurrence layer 3
cellaux{row,5}=layers{row,69}; %NighttimeCloud occurrence
cellaux{row,6}=layers{row,70}; %NighttimeCloud occurrence layer 1
cellaux{row,7}=layers{row,71}; %NighttimeCloud occurrence layer 2
cellaux{row,8}=layers{row,72}; %NighttimeCloud occurrence layer 3
cellaux{row,9}=month(CloudData{row,1});%mes
cellaux{row,10}=year(CloudData{row,1});%año
end
end
emptycells = cellfun(@isempty, cellaux); %find empty cells in the whole
cell array
cellaux(any(emptycells(:,[1]),2),:)=[]; %remove rows for which any of column
1
dayandnighttable=cell2table(cellaux,'VariableNames',{'Daytime_Cloud_occurrenc
e','Daytime_Cloud_occurrence_layer_1','Daytime_Cloud_occurrence_layer_2','Day
time_Cloud_occurrence_layer_3','NighttimeCloud_ocurrence','NighttimeCloud_ocu
rence_layer_1','NighttimeCloud_ocurrence_layer_2','NighttimeCloud_ocurrence_
layer_3','month','year'});
DaytimeAvgCloudOc=varfun(@mean,dayandnighttable,'GroupingVariables',{'year','
month'},'InputVariable','Daytime_Cloud_occurrence');
NighttimeAvgCloudOc=varfun(@mean,dayandnighttable,'GroupingVariables',{'year'
,'month'},'InputVariable','NighttimeCloud_ocurrence');
%DEBERÍA CALCULAR TAMBIEN OCURRENCIA DE NUBES DIA Y NOCHE EN CADA CAPA?
DayandNight=join(DaytimeAvgCloudOc,NighttimeAvgCloudOc);
cellaux2=cell(length(filenamees),9);
for row=1:length(filenamees)
cellaux2{row,1}=CloudData{row,1}; %Date
cellaux2{row,2}=nonzeros(layers{row,15}); %CBH
cellaux2{row,3}=nonzeros(layers{row,16}); %CBH Layer 1
cellaux2{row,4}=nonzeros(layers{row,17}); %CBH Layer 2
cellaux2{row,5}=nonzeros(layers{row,18}); %CBH Layer 3
cellaux2{row,6}=nonzeros(layers{row,24}); %CDP
cellaux2{row,7}=nonzeros(layers{row,25}); %CDP layer 1
cellaux2{row,8}=nonzeros(layers{row,26}); %CDP layer 2
cellaux2{row,9}=nonzeros(layers{row,27}); %CDP layer 3
cellaux2{row,10}=CloudData{row,4}; %TCC
cellaux2{row,11}=nonzeros(layers{row,56}); %CBH Daytime
cellaux2{row,12}=nonzeros(layers{row,57}); %CBH Layer 1 Daytime
cellaux2{row,13}=nonzeros(layers{row,58}); %CBH Layer 2 Daytime
cellaux2{row,14}=nonzeros(layers{row,59}); %CBH Layer 3 Daytime
cellaux2{row,15}=nonzeros(layers{row,73}); %CBH Nighttime
cellaux2{row,16}=nonzeros(layers{row,74}); %CBH Layer 1 Nighttime
cellaux2{row,17}=nonzeros(layers{row,75}); %CBH Layer 2 Nighttime
cellaux2{row,18}=nonzeros(layers{row,76}); %CBH Layer 3 Nighttime
cellaux2{row,19}=month(CloudData{row,1});%mes
cellaux2{row,20}=year(CloudData{row,1});%año

end
CBHtable=cell2table(cellaux2,'VariableNames',{'Date','CBH','CBH_Layer1','CBH_
Layer2','CBH_Layer3','CDP','CDP_Layer1','CDP_Layer2','CDP_Layer3','TCC','CBH_
Daytime','CBH_Daytime_Layer1','CBH_Daytime_Layer2','CBH_Daytime_Layer3','CBH_
Nighttime','CBH_Nighttime_Layer1','CBH_Nighttime_Layer2','CBH_Nighttime_Layer3
','month','year'});
G=findgroups(CBHtable.month,CBHtable.year);

```

```

for i=1:length(G)
    CBHtable.MonthAndYear(i)=G(i); %Esta operación me da un warning, pero
parece estar bien
end
clear cellaux2 i row

%Tabla de ocurrencia de nubes
AvgCloudOc=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','month'],'In
putVariable','Cloud_Occurrence');
AvgCloudOc_low=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','month'}
,'InputVariable','Cloud_Occurrence_layer_1');
AvgCloudOc_mid=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','month'}
,'InputVariable','Cloud_Occurrence_layer_2');
AvgCloudOc_high=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','month'}
),'InputVariable','Cloud_Occurrence_layer_3');
%AvgCloudOc_Daytime=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','mo
nth'],'InputVariable','Daytime_Cloud_Ocurrence');
%AvgCloudOc_Nighttime=varfun(@mean,cloudoctable,'GroupingVariables',{'year','
month'],'InputVariable','Nighttime_Cloud_Ocurrence');

%Puedo usar join para unir las tablas en una
A=join(AvgCloudOc,AvgCloudOc_low);
B=join(AvgCloudOc_mid,AvgCloudOc_high);
AvgCloudOc=join(A,B);
clear A B AvgCloudOc_low AvgCloudOc_mid AvgCloudOc_high

%% Creación de tablas de valores CBH mensuales

%La clasificación en valores mensuales es, más concretamente, por mes y
%año. Se ha utilizado el comando "findgroups" para clasificar las
%mediciones por mes y año ('MonthAndYear' en tabla CBHtable). A
%continuación se utiliza la función find para agrupar las mediciones de un
%mismo mes del año
a=categories(categorical(G)); %Diferentes valores de mes y año
cellaux3=cell(length(a),1);

MonthlyCBH=cell(length(a),1);

for i=1:length(a)
    b=find(G==i);
    start=b(1);
    final=b(length(b));
    cellaux3{i,1}=CBHtable(start:final,1:20);
    MonthlyCBH{i,1}=CBHtable.month(start);
    MonthlyCBH{i,2}=CBHtable.year(start);
    %MonthlyCBH{i,1}=cell2table(MonthlyCBH{i,1});
end
clear a b
for i=1:length(cellaux3)
    a=table2cell(cellaux3{i,1});
    CBH=vertcat(a{:},2);
    CBH1=vertcat(a{:},3);
    CBH2=vertcat(a{:},4);
    CBH3=vertcat(a{:},5);
    CDP=vertcat(a{:},6);
    CDP1=vertcat(a{:},7);
    CDP2=vertcat(a{:},8);
    CDP3=vertcat(a{:},9);
    TCC=vertcat(a{:},10);

```

```

CBHDay=vertcat(a{:},11);
CBHDay1=vertcat(a{:},12);
CBHDay2=vertcat(a{:},13);
CBHDay3=vertcat(a{:},14);
CBHNight=vertcat(a{:},15);
CBHNight1=vertcat(a{:},16);
CBHNight2=vertcat(a{:},17);
CBHNight3=vertcat(a{:},18);
avgCBH=mean(CBH);
avgCBH1=mean(CBH1);
avgCBH2=mean(CBH2);
avgCBH3=mean(CBH3);
avgCDP=mean(CDP);
avgCDP1=mean(CDP1);
avgCDP2=mean(CDP2);
avgCDP3=mean(CDP3);
avgTCC=mean(TCC);
avgCBHDay=mean(CBHDay);
avgCBHDay1=mean(CBHDay1);
avgCBHDay2=mean(CBHDay2);
avgCBHDay3=mean(CBHDay3);
avgCBHNight=mean(CBHNight);
avgCBHNight1=mean(CBHNight1);
avgCBHNight2=mean(CBHNight2);
avgCBHNight3=mean(CBHNight3);
MonthlyCBH{i,3}=avgCBH;
MonthlyCBH{i,4}=avgCBH1;
MonthlyCBH{i,5}=avgCBH2;
MonthlyCBH{i,6}=avgCBH3;
MonthlyCBH{i,7}=avgCDP;
MonthlyCBH{i,8}=avgCDP1;
MonthlyCBH{i,9}=avgCDP2;
MonthlyCBH{i,10}=avgCDP3;
MonthlyCBH{i,11}=avgTCC;
MonthlyCBH{i,12}=avgCBHDay;
MonthlyCBH{i,13}=avgCBHDay1;
MonthlyCBH{i,14}=avgCBHDay2;
MonthlyCBH{i,15}=avgCBHDay3;
MonthlyCBH{i,16}=avgCBHNight;
MonthlyCBH{i,17}=avgCBHNight1;
MonthlyCBH{i,18}=avgCBHNight2;
MonthlyCBH{i,19}=avgCBHNight3;
end
MonthlyCBHtable=cell2table(MonthlyCBH,'VariableNames',{'month','year','AvgCBH',
'AvgCBH_Layer1','AvgCBH_Layer2','AvgCBH_Layer3','AvgCDP','AvgCDP1','AvgCDP2',
'AvgCDP3','AvgTCC','AvgCBHDay','AvgCBHDay_Layer1','AvgCBHDay_Layer2','AvgCBHDay_Layer3',
'AvgCBHNight','AvgCBHNight_Layer1','AvgCBHNight_Layer2','AvgCBHNight_Layer3'});

clear start final a i avgCBH avgCBH1 avgCBH2 avgCBH3 CBH CBH1 CBH2 CBH3
avgTCC avgCDP avgCDP1 avgCDP2 avgCDP3 TCC CDP CDP1 CDP2 CDP3 cellaux3
avgCBHDay avgCBHDay1 avgCBHDay2 avgCBHDay3 avgCBHNight avgCBHNight1
avgCBHNight2 avgCBHNight3 CBHDay CBHDay1 CBHDay2 CBHDay3 CBHNight CBHNight1
CBHNight2 CBHNight3 CBHdia CBHnoche emptycells errir
MonthlyResults=join(MonthlyCBHtable,AvgCloudOc);
%writetable(MonthlyResults,'MonthlyResults.xlsx');

%% Creación de tablas de valores diarios
DailyResults=cell(length(filenamees),4);
for i=1:length(filenamees)
DailyResults{i,1}=layers{i,1}; %Copia fechas
DailyResults{i,2}=layers{i,19}; %Valores medios diarios de CBH

```

```
DailyResults{i,3}=layers{i,20}; %Valores medios diarios CBH capa 1
DailyResults{i,4}=layers{i,21}; %Valores medios diarios CBH capa 2
DailyResults{i,5}=layers{i,22}; %Valores medios diarios CBH capa 3
DailyResults{i,6}=layers{i,32}; %Valores medios diarios CDP
DailyResults{i,7}=layers{i,33}; %Valores medios diarios CDP capa 1
DailyResults{i,8}=layers{i,34}; %Valores medios diarios CDP capa 2
DailyResults{i,9}=layers{i,35}; %Valores medios diarios CDP capa 3
DailyResults{i,10}=mean(CloudData{i,4}); %TCC
```

```
end
```