



**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**Estudio de la capa límite planetaria y su influencia en la  
contaminación atmosférica**

***Autora: Cristina Caballero Bravo***

***Tutor/es: Isidro A. Pérez Bartolomé y M<sup>ra</sup> Ángeles García Pérez***

## Índice

<b>RESUMEN .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>4</b>
1.1    DEFINICIÓN.....	4
1.2    INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD DEL VIENTO .....	6
1.3    RELACIÓN CON LA CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	7
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
3.1    MODELO METEX .....	15
3.2    DATOS METEOROLÓGICOS.....	17
3.3    DATOS DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS .....	17
3.4    ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	18
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>21</b>
4.1    EVOLUCIÓN DIARIA .....	21
4.2    EVOLUCIÓN MENSUAL .....	23
4.3    EVOLUCIÓN ESTACIONAL .....	25
4.4    RELACIÓN CON LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y LA TEMPERATURA.....	27
4.5    RELACIÓN DE LA PBLH CON LA CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....	32
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>36</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>38</b>
<b>GLOSARIO DE FIGURAS .....</b>	<b>43</b>

## **Resumen**

El objetivo de este informe es profundizar en el ámbito de la capa de límite planetaria (PBL). Se va a usar el modelo METEX (METeorological data EXplorer) para calcular la altura cada hora en una parcela de aire de la atmósfera sobre Valladolid durante el periodo que abarca los años 2017-2020.

Posteriormente, se analizan las evoluciones horaria y mensual de la PBL, en la que se comprueba su comportamiento con ayuda de la bibliografía. La altura de la capa límite planetaria (PBLH) tiene un ciclo diario muy marcado, por lo que también se estudian las diferencias entre el día y la noche.

Por último, se trata de establecer relaciones entre la altura de la capa límite con la temperatura, la velocidad del viento y los contaminantes atmosféricos en la misma ciudad.

## **Abstract**

The aim of this study is to understand the planetary boundary layer. The METEX (METeorological data EXplorer) model has been used to get an approximation of the height of the air parcel located above Valladolid over the period 2017-2020.

Later, the hourly and seasonal evolutions are studied and the results are compared and analysed with the help of the bibliography. The planetary boundary layer height (PBLH) has a very clear daily cycle, so the differences between day and night are also investigated.

Last but not least, the purpose is looking for relationships between the planetary boundary layer and meteorological parameters, such as temperature and wind speed and also with pollutant concentrations, measured in the same city.

## 1. Introducción

### 1.1 Definición

La capa límite se puede definir desde distintos puntos de vista, los cuales se abordan en este trabajo.

Tradicionalmente, la capa límite planetaria se define como “la zona de la troposfera directamente influenciada por la superficie terrestre que responde a las fuerzas de la misma con una escala temporal de máximo una hora” (Stull, 1988, p. 3). La altura de la capa límite planetaria es un parámetro fundamental para caracterizar su estructura y da información sobre la amplitud vertical de los procesos de dispersión vertical y el transporte convectivo, además de ser imprescindible para muchos campos de estudio, como por ejemplo, la calidad del aire, la meteorología o la dispersión de contaminantes (de Arruda et al., 2020; Su et al., 2020).

Si se describe desde el punto de vista de los movimientos de las masas de aire, la capa límite atmosférica es el estrato de aire de la troposfera que se ve afectado por los procesos de convección debidos al intercambio diario de calor, humedad y momento entre la superficie terrestre y la troposfera libre (Dang et al., 2016; Su et al., 2020; Krishnamurthy et al., 2021).

La estructura de la misma tiene un papel fundamental en los procesos físicos y químicos de interacción radiativa de las nubes, mezcla vertical y arrastre o dispersión vertical de contaminantes en la atmósfera, por convección o turbulencia (COST, 1998; Salvador et al., 2020; Zhang et al., 2021), sin embargo, es un parámetro del que no es sencillo encontrar información. El problema que aparece al medir la capa de mezcla es que tiene una gran dependencia espacio-temporal pudiendo variar desde unos pocos cientos de metros hasta los kilómetros en función de la localización, de la estación del año e incluso de la hora del día (Sicard et al., 2006).

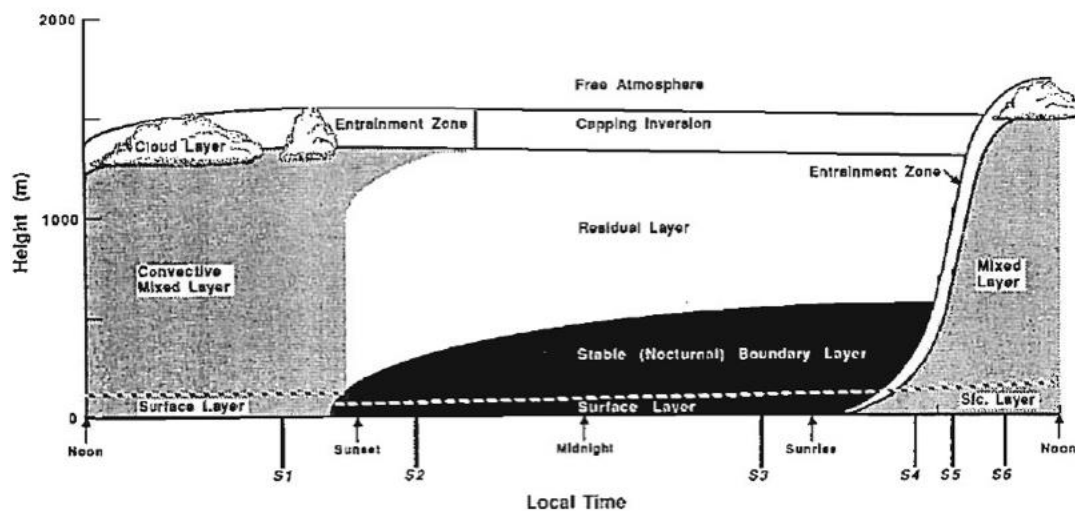
También se puede definir como el estrato de aire en el que la turbulencia atmosférica originada por desequilibrios térmicos o mecánicos, genera una intensificación de los movimientos caóticos del aire, beneficiando el fenómeno de difusión y transporte de energía y materia hasta un nivel restringido normalmente por la figura de una discontinuidad térmica, a partir de la cual, el comportamiento de la atmósfera no está sujeto a dichos intercambios turbulentos (Núñez, 2004).

La naturaleza de la capa límite presenta una enorme complejidad. En ella, el régimen turbulento domina los movimientos del aire y la radiación solar es un factor determinante que regula el ciclo diario de su evolución. Los cambios de sus grados de estabilidad, su capacidad

dispersiva y su estructura vertical son algunas de las características que definen y diferencian este estrato de aire de la atmósfera libre. La altura se puede estimar con la medida de perfiles verticales de turbulencia mecánica, temperatura o la concentración de los constituyentes de la capa límite planetaria (Collaud et al., 2014; Dang et al., 2016).

En los últimos años, se ha pretendido establecer protocolos en el ámbito medioambiental con el fin de unificar las definiciones y métodos de actuación para el cálculo y desarrollo de parámetros relacionados con la calidad del aire, incluyendo la altura de la capa límite. Actualmente se destaca la importancia de parametrizaciones en modelos meteorológicos como herramientas para poder combatir la falta de mediciones rutinarias de procesos turbulentos (Núñez, 2004).

La estructura de la capa límite está muy definida en su evolución diaria, en la que hay tres componentes fundamentales, la capa de mezcla (ML) (o capa límite convectiva, CBL), la capa residual (RL) y la capa límite estable (SBL), también denominada capa límite nocturna (NBL). A mayores, en los días nublados, la capa de mezcla se divide en una capa nubosa y otra subnubosa (Stull, 1988). En la siguiente figura se representa un esquema de la estructura de la capa límite:



*Fig. 1: La capa límite en zonas de altas presiones sobre la tierra se compone de tres partes: una capa de mezcla muy turbulenta, una capa residual menos turbulenta y una capa límite estable nocturna con turbulencia esporádica; la capa de mezcla se puede subdividir en una capa nubosa y otra por debajo de las nubes. (Stull, 1988).*

La bibliografía de este tema normalmente maneja indistintamente términos como capa límite planetaria (PBL), capa de mezcla (ML), capa límite atmosférica (ABL) y capa convectiva (CBL). De hecho, los términos capa de mezcla y capa convectiva se utilizan a menudo para estudiar la estructura y el crecimiento de esta última en condiciones inestables o diurnas. Por otro lado, si se estudia la formación en condiciones neutras o estables, tiende a denominarse capa límite, por lo

que en este informe se utilizan los términos PBL o ABL (Núñez, 2004). La variedad de nomenclaturas es una consecuencia directa de la complejidad a la hora de determinarla, como ya se ha explicado antes.

## **1.2 Influencia de la temperatura y la velocidad del viento**

La medida del crecimiento de la altura de la capa límite planetaria (PBL) es crucial para entender la transferencia turbulenta de la masa de aire, que a su vez influye fuertemente en los vientos, la temperatura y la humedad en la misma (Krishnamurthy et al., 2021). La evolución de la capa de mezcla en el periodo diurno establece una fuerte correlación positiva con la temperatura, en la mayoría de las estaciones, el crecimiento diurno de la altura está relacionado con la disminución de la humedad relativa del aire y el aumento de la temperatura en la superficie (Zhang et al., 2013).

Desde la revolución industrial y sobre todo en los últimos años, el calentamiento global es un problema generalizado a nivel mundial que influye tanto en el desarrollo de las actividades como en la toma de decisiones, este proceso lleva consigo un aumento de la temperatura mundial de forma gradual, por lo que es razonable preguntarse si a lo largo de los años, la altura de la capa límite planetaria ha aumentado también. El estudio del calentamiento global se lleva a cabo por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, que, en uno de sus informes, declara las bases físicas existentes que justifican el cambio climático (Solomon et al., 2007).

La capa límite planetaria experimenta un marcado ciclo diario que depende de las condiciones climáticas sinópticas y locales. De forma que, en un día despejado, durante el día, la estructura es una capa límite convectiva (también llamada capa de mezcla), mientras que, de noche, es una capa límite estable cubierta por una capa residual (RL) (Stull, 1988; Collaud et al., 2014).

En cambio, en días cubiertos y en condiciones meteorológicas advectivas, la convección ya no solo está dada por el calentamiento del sol, sino por la inercia térmica del suelo, advecciones de aire frío o la convección mecánica forzada. Bajo circunstancias meteorológicas adversas, la capa límite convectiva (capa de mezcla) es más débil que en días con cielos despejados, con un crecimiento más lento y una altura menor (Collaud et al., 2014).

El viento es un factor dispersivo fundamental para definir la dirección de propagación de los contaminantes emitidos desde distintos focos, lo cual lleva a los diversos niveles de contaminación del aire. Para la mayoría de los contaminantes, mayor velocidad del viento implica

menores concentraciones, ya que se intensifica la dilución de estas, aunque, por otro lado, altas velocidades del viento pueden desplazar los contaminantes desde otros focos aumentando así la concentración de ciertos componentes en el lugar de medida (Oleniacz et al., 2016).

En distintas ciudades alrededor del mundo, y sobre todo en la estación invernal, se ha observado que determinadas condiciones meteorológicas favorecen los episodios de gran contaminación. Estas condiciones son: la capa límite baja y una gran estabilidad en la atmósfera, dado que así se limitan los movimientos verticales de las masas de aire (Oleniacz et al., 2016).

### **1.3 Relación con la concentración de contaminantes atmosféricos**

La presencia en el aire de elementos que puedan suponer daño, riesgo o molestia grave a los seres humanos, a la fauna y flora o a los bienes de cualquier naturaleza constituye la contaminación atmosférica. Se considera que la contaminación atmosférica en sentido estricto aparece con el descubrimiento del fuego por el ser humano, agravándose sobre todo con la revolución industrial (Aránguez et al., 1999).

La altura de la capa límite representa el volumen en el que se lleva a cabo la dispersión de los contaminantes, por ello es uno de los parámetros principales en muchos modelos dispersivos (García et al., 2007; Collaud et al., 2014; Su et al., 2020). Por lo tanto, incrementar los recursos para la medición de la capa límite de forma continuada es conveniente para mejorar la predicción del tiempo y la calidad del aire (Baars et al., 2008). La altura de la PBL es una herramienta a la que se recurre en muchos estudios sobre el clima y la calidad del aire para caracterizar los procesos convectivos, el arrastre de nubes y parcelas de aire y la dispersión de los contaminantes (Zhang et al., 2013).

Primero se hace una breve introducción sobre los contaminantes que se van a analizar en este trabajo, y se explican brevemente sus principales focos de formación y sus efectos en la salud:

- El dióxido de Azufre SO<sub>2</sub>: el origen de este contaminante es principalmente antropogénico, a pesar de que existen fuentes de emisión naturales importantes como las erupciones volcánicas. Es un gas producido fundamentalmente durante la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre (petróleo, combustibles sólidos), llevada a cabo sobre todo en los procesos industriales de alta temperatura y de generación eléctrica (MITECO, 2019).

En la actualidad, gracias al “Plan de Reducción de Emisiones de Grandes Instalaciones de Combustión” (BOE, 2008) y otras medidas, la emisión de este

contaminante por combustión en la industria de generación de energía se ha reducido significativamente. El acuerdo mencionado tenía como objetivo cumplir los compromisos establecidos en la Unión Europea de reducir las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas procedentes de grandes instalaciones de combustión, lo que obligó a introducir tecnologías de desulfuración.

Incluso si está lejos de la fuente emisora, el dióxido de azufre puede causar efectos nocivos en la salud, como por ejemplo la irritación e inflamación del sistema respiratorio, cambios en el metabolismo de proteínas, dolores de cabeza o hasta ansiedad (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021). También tiene un impacto negativo en la biodiversidad, el suelo y los ecosistemas e incluso en las edificaciones porque es un gas corrosivo que conforma la lluvia ácida.

El método de análisis utilizado para este contaminante es la fluorescencia pulsante en el ultravioleta. Esta técnica se basa en la absorción de radiación ultravioleta de las moléculas del contaminante, lo que hace que se exciten de tal forma que emiten un pulso de luz fluorescente para volver a su estado fundamental. La luz se mide con un detector que produce una señal eléctrica proporcional a la concentración de dióxido de azufre (Gallego et al., 2012; Bonilla, 2016). Está regulado por la regla UNE EN 14212:2013 (Ayuntamiento de Valladolid, 2011).

- El material particulado PM10/PM2,5 puede ser de origen primario, aquellos casos en los que las partículas son emitidas directamente a la atmósfera, bien de manera natural (como puede ser el polvo o el polen), o bien como consecuencia de la actividad humana (por ejemplo, tráfico rodado, procesos industriales de combustión o calefacción en viviendas) siendo la combustión de carbón la principal fuente, aunque en algunas épocas del año el factor natural gana importancia como consecuencia de la resuspensión en actividades agrícolas o las tormentas de arena del Sahara (AEMA, 2013). La emisión también puede ser de origen secundario, donde las partículas son producidas por reacciones químicas en la atmósfera a partir de gases precursores. Generalmente, la fracción de partículas originadas por reacciones en la atmósfera constituye entre un 40 y un 70 % de la masa del material particulado (MITECO, 2021).



El material particulado (PM) está constituido por una mezcla heterogénea de componentes de diferente tamaño y composición química, se clasifica en fracciones relacionadas con el tamaño de las partículas que lo constituyen (UNECE, 2016; World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021). Este grupo de contaminantes son los más trascendentales en cuanto al riesgo que implica en la salud de las personas. Las PM10 son las partículas con tamaño igual o inferior a 10 micras y pueden ser inhaladas y acceder al sistema respiratorio. Las PM2,5 son partículas de menor tamaño, inferior a 2,5 micras, que se pueden relacionar con el incremento de la mortalidad y morbilidad debido a infecciones respiratorias o cardiovasculares o incluso cáncer de pulmón si la exposición es muy prolongada en el tiempo, ya que pueden alcanzar los alvéolos pulmonares (AEMA, 2013; MITECO, 2019; World Health Organization, 2021). Se estima que en Europa la esperanza de vida se ve reducida en al menos 9 meses debido a la contaminación del material particulado (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021).

La técnica empleada por las estaciones de Red de Control de Contaminantes del Ayuntamiento de Valladolid (RCCAVA) para medir este contaminante es el método de medición gravimétrico normalizado para la determinación de la concentración másica PM10 o PM2,5 de la materia particulada en suspensión. Consiste en la determinación de su masa pesando un filtro con ayuda de una balanza de precisión antes y después del muestreo, controlando tanto la temperatura como la humedad relativa (Gallego et al., 2012). La norma reguladora que la establece es la UNE EN 12341:2015 (Ayuntamiento de Valladolid, 2011). También se utiliza la atenuación de la absorción  $\beta$ , la medición se basa en la atenuación que se produce de forma gradual al hacer pasar los rayos  $\beta$  por un filtro en el que se deposita el material particulado al fluir el aire por él. Los rayos  $\beta$  se atenúan siguiendo una función exponencial aproximada de la masa de las partículas depositadas (Gallego et al., 2012).

- Los Óxidos de Nitrógeno  $\text{NO}_x$  son gases emitidos en procesos de combustión que se dan especialmente en los motores diésel de automóviles, aunque están estrechamente relacionados con el tráfico rodado y con el transporte en general, así como en instalaciones industriales de alta temperatura y de generación eléctrica, por lo que se infiere que son contaminantes con un origen principalmente antrópico.

Los focos de emisión expulsan NO/NO<sub>2</sub> de forma directa a la atmósfera (primarios), con el transcurso del tiempo el NO se oxida en dióxido de nitrógeno (proceso secundario) (OMS, 2005; MITECO, 2021).

En general, más del 75 % del NO<sub>2</sub> en el aire de los núcleos urbanos proviene del tráfico rodado, los niveles más elevados se alcanzan en las zonas de tráfico más denso o en grandes aglomeraciones urbanas. Estos gases actúan como precursores de la formación del ozono y de otros contaminantes fotoquímicos (MITECO, 2019).

El dióxido de nitrógeno tiene efectos más graves en la salud destacando la afección de órganos, como el hígado o el bazo, o de sistemas, como el circulatorio o el inmunitario, que pueden desembocar infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias. La exposición a corto plazo a este contaminante, se ha relacionado con emergencias respiratorias de pacientes con problemas como el asma. Es difícil estudiar los efectos del NO<sub>2</sub> ya que en esas investigaciones, los problemas de salud se relacionan con la mezcla de contaminantes emitidos por el tráfico y no solo con el dióxido de nitrógeno (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021; World Health Organization, 2021; MITECO, 2021). Además, contribuyen a la acidificación de ecosistemas, estos procesos también pueden afectar a las edificaciones, o la limitación del crecimiento vegetal.

El método de medida utilizado en las estaciones de la red de control de la contaminación atmosférica es la quimioluminiscencia. El fundamento de esta técnica se basa en la emisión de luz por las moléculas cuando vuelven a su estado fundamental tras ser excitadas. Para el caso de los óxidos de nitrógeno se apoya en la reacción del NO con el O<sub>3</sub> para formar un estado excitado del NO<sub>2</sub> (Gallego et al., 2012). Sigue la norma UNE EN 14211:2013 (Ayuntamiento de Valladolid, 2011).

- El Monóxido de Carbono CO generalmente se forma en la quema de cualquier combustible que contenga carbono, pero que no tenga suficiente oxígeno para formar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Las principales fuentes de emisión son procesos de combustión en sectores no industriales, actividades del sector agropecuario y procesos industriales sin combustión. El uso de conversores catalíticos ha hecho posible que desde el año 2001 las emisiones producidas por el transporte en

carretera se hayan reducido de forma drástica (MITECO, 2019). Un convertor catalítico es un componente del motor de combustión interna que sirve para el control y reducción de los gases nocivos expulsados por el motor.

El monóxido de carbono se introduce en el organismo a través de los pulmones, puede acarrear una limitación en la facultad del transporte de oxígeno en sangre y como consecuencia disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso, dolor de cabeza, mareos o fatiga, estos efectos son aplicables tanto a los humanos como a la fauna silvestre. Este contaminante favorece la formación de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> o el O<sub>3</sub> por lo que también afecta al clima (MITECO, 2019).

La técnica analítica empleada en las muestras es la espectrometría infrarroja no dispersiva. Se basa en la capacidad de las moléculas para absorber radiación infrarroja a determinadas longitudes de onda (entre 450 y 490 nm). El analizador se compone de una celda de referencia, que contiene un gas inerte que deja pasar toda la radiación infrarroja, y otra para la muestra (CO). “La diferencia en la intensidad de las dos señales de absorción, dividida por la intensidad de la fuente de radiación infrarroja, proporciona la medida de la concentración de CO en la muestra” (Gallego et al., 2012, pág. 196) Está regulada por la norma UNE EN 14626:2013 (Ayuntamiento de Valladolid, 2011).

- El Ozono O<sub>3</sub> es un contaminante que constituye un problema generalizado ya que es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global. El O<sub>3</sub> se forma principalmente de manera secundaria en la troposfera a partir de reacciones químicas en las que participan otros gases contaminantes (sobre todo óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, COV), las emisiones primarias en este caso, no son tan preocupantes ( UNECE, 2016; Tang et al., 2021).

En el sur de Europa los niveles de ozono son superiores a los niveles de la zona norte, y sobre todo en primavera y verano, lo que se debe principalmente a que tanto la velocidad como el grado de formación de este contaminante se agravan de forma notable con el aumento de la radiación solar o las emisiones de sus precursores (Tang et al., 2021). Hay que destacar que en áreas urbanas normalmente las concentraciones no son muy altas, ya que el óxido nítrico (NO),

emitido por los vehículos, destruye el ozono para formar oxígeno ( $O_2$ ) y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ). Es por esto que los niveles de  $O_3$  son mucho mayores en zonas rurales o periféricas con poco tráfico que reciben el ozono de zonas más contaminadas y donde no hay apenas óxido nítrico para su transformación en dióxido de nitrógeno (OMS, 2005; Tang et al., 2021).

En la estratosfera (a una altitud de unos 10-15 km desde la superficie terrestre) el ozono tiene un papel fundamental para el desarrollo de la vida humana, debido a que protege a la Tierra de la radiación ultravioleta. En cambio, en la troposfera pasa a ser un contaminante con un agresivo poder de oxidación (AEMA, 2013).

La exposición a altas concentraciones puede traer consigo problemas de salud, sobre todo respiratorios o incluso aumentar el riesgo de mortalidad prematura, cuando la exposición a este contaminante es prolongada, estando relacionada con mortalidad por problemas respiratorios o cardiorespiratorios (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021; World Health Organization, 2021). Además, también afecta a la vegetación, puede limitar la absorción de  $CO_2$  por las plantas, alterar la estructura de los ecosistemas y reducir la biodiversidad (UNECE, 2016).

La técnica analítica empleada para su estudio es la fotometría UV. Este método toma un flujo de aire a analizar, en el que se incide con luz ultravioleta (longitud de onda entre los 100-400 nm). La absorción característica del ozono es máxima para longitudes de onda de aproximadamente 250 nm y finalmente se mide la absorción del ozono con la diferencia entre la señal de referencia y la de medida. La concentración del ozono se obtiene con la Ley de Lambert-Beer:

$$I = I_0 e^{-\alpha LC}$$

La norma que la regula es la UNE EN 14625:2013 (Ayuntamiento de Valladolid, 2011).

Uno de los mayores problemas en la actualidad a nivel mundial es la aparición de episodios locales de intensa contaminación del aire en zonas densamente pobladas y con gran afluencia de vehículos (Geiß et al., 2017). Se ha estudiado que ciertas condiciones meteorológicas son las que favorecen el aumento drástico de los niveles de concentración de los contaminantes. Por lo tanto, es interesante buscar la correlación con la capa límite atmosférica, que, como se ha explicado, es

un parámetro de gran interés por su aplicación al ámbito meteorológico (Salvador et al., 2020). La contaminación del aire es una mezcla compleja de muchos componentes, por ello, los expertos están de acuerdo en que los efectos nocivos que producen cada uno de ellos pueden estar influenciados por la toxicidad de la mezcla de todos estos contaminantes (World Health Organization. Regional Office for Europe, 2021).

En los últimos años, ha habido una clara mejora de la calidad del aire en Europa pero, aún así, los baremos actuales están lejos de los que se recogen en las legislaciones que tratan de regular este problema mundial. El material particulado y el ozono son los dos contaminantes que suponen un mayor riesgo para la salud humana y para el medio ambiente, debido a que, aunque las emisiones han disminuido de manera significativa en los últimos años, la exposición no lo hace de manera equivalente (AEMA, 2013).

Durante el año 2020, como consecuencia de la pandemia, se declaró el estado de alarma, lo que incluía limitaciones en la movilidad y el transporte de mercancías, todo ello resultó en una mejora sin precedentes de la calidad del aire a nivel mundial, especialmente durante marzo y abril (UNECE, 2016; MITECO, 2021), aunque se prolonga en el tiempo durante el resto del año (Castaño et al., 2020). Se estima que en España, la caída de estos niveles han evitado unas 150 muertes prematuras durante los 100 días de primer confinamiento y desconfinamiento (MITECO, 2020). En Valladolid, se redujeron casi un 25 % los niveles de contaminación respecto a los años 2010-2019 (Castaño et al., 2020).

En cuanto al impacto de la calidad del aire en la salud, hay que mencionar que recientemente la OMS ha modificado los baremos que se consideraban seguros y que estaban fijados desde el año 2005. Hace 15 años, no había tantas evidencias sobre la cantidad de muertes que provocaba la contaminación, a día de hoy se estima que millones de personas pierden la vida cada año (Galán, 2013). La mayor reducción se ha aplicado al dióxido de nitrógeno reduciéndolo hasta una cuarta parte de su anterior valor, seguida de las PM<sub>2,5</sub> reduciendo a la mitad la exposición máxima anual recomendada (World Health Organization, 2021).

## 2. Objetivos

Los objetivos que se persiguen en este trabajo son:

- Caracterizar el modelo METEX (**ME**Teorological data **EX**plorer), dando información sobre su fundamento, el procedimiento y los parámetros que proporciona.
  - Cálculo de la altura de la capa límite con ayuda del modelo METEX desde el año 2017 hasta el 2020.
  - Análisis de la evolución horaria, estacional y anual de la altura de la capa límite.
  - Estudio de la evolución de la altura de la capa límite en cada estación del año (primavera, verano, otoño e invierno) por horas.
- Estudio de la relación de la altura de la capa límite con la velocidad del viento y la temperatura. Se analiza por un lado el periodo diurno (8:00-19:00) y por otro el nocturno (20:00-7:00).
- Se indaga en la relación existente entre la altura de la capa límite y la concentración de los contaminantes presentes en la atmósfera de la ciudad de Valladolid.
  - Razonamiento del comportamiento de los distintos contaminantes.

### 3. Materiales y métodos

#### 3.1 Modelo METEX

La altura de la capa límite planetaria es un parámetro del cual no es fácil obtener información, debido a las razones mencionadas anteriormente, a pesar de ello, hay diferentes métodos para obtener una estimación.

La teledetección activa mediante sodar, sistema de sondeo radiacústico o lidar de los parámetros meteorológicos, los gases traza y los aerosoles hasta ahora ha resultado ser la técnica más adecuada para una detección continua de la cima de la capa límite. Estas herramientas de medida tienen sus limitaciones ya sea por las condiciones meteorológicas, la precisión, la resolución espacio-temporal o el rango de medición (Baars et al., 2008).

El LiDAR (**L**ight **d**etection **a**nd **R**anging o **L**aser **I**maging **D**etection **a**nd **R**anging) es un dispositivo con el que se puede determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto utilizando un haz de luz pulsado. Con ello, se puede seguir la evolución de la PBLH usando la retrotrayectoria de los aerosoles como indicadores, asumiendo que, en general, conforman una mezcla homogénea en la capa límite planetaria, aunque la validez de esta afirmación depende de la estabilidad de la atmósfera (Krishnamurthy et al., 2020).

La aproximación más común para derivar la PBLH es a partir de medidas de radiosondas de la temperatura, humedad y/o perfiles del viento como función de la presión. A pesar de ser el método más común, es muy limitado en cuanto a la cobertura tanto en tiempo como en espacio debido a que los lanzamientos se realizan rutinariamente dos veces al día (generalmente a las 0 h y a las 12 h) en unas estaciones concretas por lo que no puede captar de forma precisa la evolución diaria o espacial de la PBLH (Sicard et al., 2006; Tang et al., 2016; Su et al., 2020;).

Un modelo existente es el HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), el cual tiene múltiples aplicaciones como estimar la estabilidad de la atmósfera, calcular la variación vertical de velocidad con una parametrización de la turbulencia, determinar la capa límite o simular el movimiento turbulento de las partículas (Loughner et al., 2021).

En este caso, para el cálculo de la altura de la capa límite se ha manejado el modelo METEX (*METEorological data EXplorer*) (<https://db.cger.nies.go.jp/metex/trajectory.html>). Este modelo destaca por su flexibilidad y sencillez a la hora de aplicarlo, simplemente hay que

especificar periodo de tiempo, lugar y el tipo de datos meteorológicos. Además, proporciona una imagen del recorrido de la parcela de aire de estudio, por ejemplo, si se estudia la retrotrayectoria de una parcela de aire sobre Valladolid durante la primera quincena de enero de 2020 tomando medidas cada 12 horas y con una retrotrayectoria de 3 días, se obtiene el gráfico de la Fig. 2.

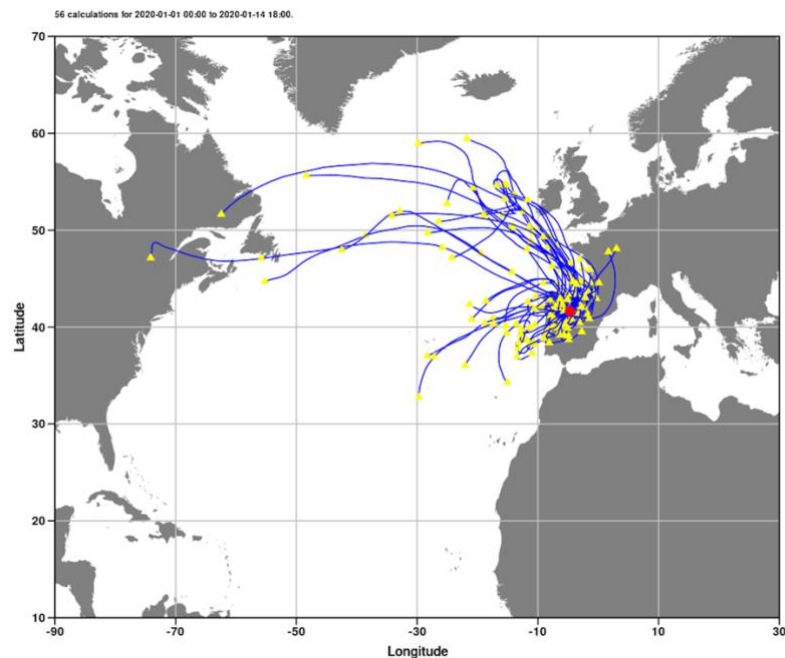


Fig. 2: Tres días de retrotrayectoria desde Valladolid ( $41,65^{\circ}\text{N}$  y  $-4,72^{\circ}\text{W}$ ) a 500 m de altitud. Durante 15 días desde el 1 de enero del 2020 (00:00 h). METEX. <https://db.cger.nies.go.jp/metex/web-metex.html>

Para el trabajo se han tomado valores horarios de la altura de la capa límite planetaria para los años 2017, 2018, 2019 y 2020. El modelo METEX calcula la retrotrayectoria para inferir el camino que han llevado las masas de aire que alcanzan la estación seleccionada durante el periodo estudiado. Con ello se consigue la trayectoria de las parcelas de aire a 500 m de altitud sobre la superficie en Valladolid ( $41,65^{\circ}\text{N}$  y  $-4,72^{\circ}\text{W}$ ) (Zeng et al., 2010).

Valladolid es una provincia de Castilla y León con una población de aproximadamente 500000 habitantes, de las que alrededor de 300000 residen en el municipio de Valladolid, lo que la define como una urbe de tamaño mediano, y una superficie de algo menos de  $200\text{ km}^2$ , localizada en la Meseta Norte en la cuenca del Duero. La altitud media de la ciudad es de casi 700 m s. n. m., pero si se tiene en cuenta la provincia, la altitud máxima (Castrillo de Duero) está alrededor de los 900 m s. n. m. y la mínima aproximadamente 600 m s. n. m. (Villafranca de Duero). El desnivel máximo en la provincia es de unos 300 m por lo que se considera que es bastante homogénea en cuanto a términos geográficos (Manzanera-Benito y Capellán-Pérez, 2021).



### 3.2 Datos meteorológicos

Los datos de temperatura y velocidad del viento correspondientes a los años durante los que transcurre el estudio (2017-2020) se han tomado de la página web Meteomanz (<http://www.meteomanz.com/>). Esta es una plataforma que proporciona dos tipos de datos meteorológicos: los datos observados de lugares de todo el mundo obtenidos de los mensajes alfanuméricos, SYNOP (*observaciones de superficie*), y de los datos binarios, BUFR (*formato binario universal para la presentación de datos meteorológicos*), emitidos por estaciones meteorológicas oficiales, así como datos meteorológicos previstos basados en los modelos de predicción globales GFS (*Sistema Global de Predicción*), de la NOAA (*Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica*), hay que mencionar que este servidor es la principal fuente de datos de Meteomanz debido a que ofrece de manera pública y gratuita los mensajes SYNOP y BUFR, y el del ECMWF (*Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio*).

Para este estudio solo se ha trabajado con datos observados de años pasados, además esta plataforma ofrece una inmensa cantidad de información pero en este trabajo solo son necesarias las variables principales, los datos están ordenados desde las 0 hasta las 23 h. En la página de Meteomanz se selecciona la estación meteorológica de la que se quiere obtener los datos, cada una de ellas está identificada por un número de 5 cifras recogido por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Para este trabajo se toman los datos de la estación con indicador OMM 08141 localizada en Valladolid, con coordenadas 41,38°N, 04,45°W y 735 m s. n. m. (<http://meteomanz-info>).

### 3.3 Datos de contaminantes atmosféricos

Por último, los datos de las concentraciones de los contaminantes, se han obtenido de la página del Ayuntamiento de Valladolid RCCAVA (*Red de Control de la Contaminación Atmosférica del Ayuntamiento de Valladolid*) (<https://www.valladolid.es/es/rccava/datos-red/datos-historicos>) que tiene como objetivo medir la calidad del aire. Las medidas de los contaminantes se hacen de manera automática y continua. Los instrumentos de medida localizados en las estaciones están unidos a un SAD (sistema de adquisición de datos) que tiene como objetivo guardar las medidas realizadas e incorporarlas a su base de datos. Posteriormente, cada 15 minutos obtiene la media de las medidas capturadas y además de almacenarlas en su base de datos, las transmite al centro de proceso de datos que recibe la información de todas las estaciones (<https://www.valladolid.es/es/rccava/rccava>).

Además de las 7 estaciones fijas que componen la red RCCAVA, en los últimos años se ha incorporado la estación LDR (Laboratorio de Despliegue Rápido) que tiene la particular capacidad de poder desplazarse a cualquier localización que se requiera ya sea por campañas temporales o en situaciones de emergencia que pudieran resultar de catástrofes medioambientales. Esta red es necesaria ya que todo tipo de emisión lleva consigo un riesgo para la salud de las personas y es imprescindible para conseguir que la calidad del aire se mantenga en niveles por debajo de los límites establecidos por la OMS.

Los datos de los contaminantes se recogieron de 7 estaciones: Arco Ladrillo II, la Rubia II, Vega Sicilia, Puente del Poniente- M<sup>a</sup> Luisa Sánchez, Michelin 1, Michelin 2 y Valladolid Sur.

En la Fig. 3 están representadas las estaciones de la red RCCAVA al completo en las que se recogen los datos que se analizan en este trabajo.

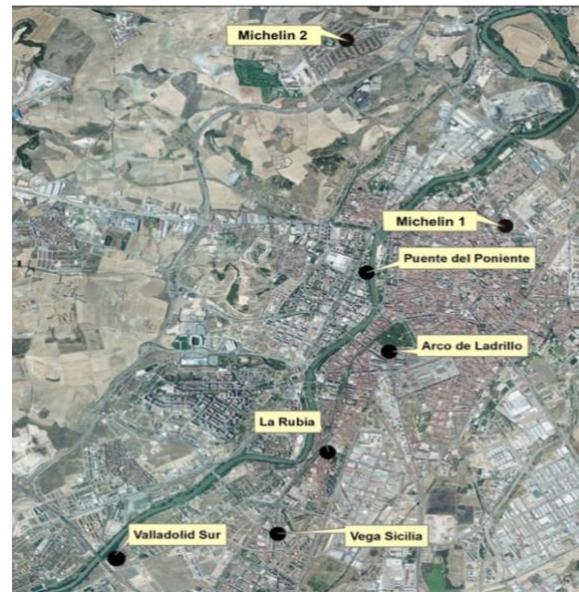


Fig. 3: Despliegue de las estaciones de RCCAVA. Tomada de la página web del Ayuntamiento de Valladolid y modificada.

### 3.4 Análisis estadístico

Las herramientas que se han usado para el análisis son:

- Estadísticos principales: en el estudio, se utilizan distintos parámetros de interés a la hora de establecer conclusiones o resultados. Dos propiedades muy importantes de los estadísticos son la robustez y la resistencia. Una medida es resistente cuando no se ve significativamente afectada por los datos anómalos, la robustez de una medida indica que esta no se ve afectada por el entorno a la hora de obtener el resultado (Wilks, 2019). A continuación, se detalla cada uno de ellos y se indica la fórmula correspondiente cuando procede.

- La **media aritmética** o promedio es el valor que resulta de sumar todos los datos y dividirlos entre el número de valores. Se calcula como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Los cuantiles representan una fracción de todos los datos previamente ordenados. Otra manera de entenderlo es que el cuantil  $q_p$ , es el valor que se espera que sea superado por un dato escogido al azar del conjunto de medidas con probabilidad  $p$  ( $0 \leq p \leq 1$ ) (Wilks, 2019).
- Los más representativos son los **cuartiles**, que corresponden a  $q_{0,25}$  que recibe el nombre de cuartil inferior (Q1),  $q_{0,5}$  (Q2) y  $q_{0,75}$  que se denomina cuartil superior (Q3). Los cuartiles dividen la distribución en 4 partes, por debajo del primer cuartil están localizados el 25 % de los datos, por debajo del segundo, el 50 % y por debajo del tercero, el 75 % de los datos. El rango intercuartílico (RIC) es la diferencia entre el cuartil superior e inferior, si es muy grande indica que la dispersión de los datos es muy importante (Salazar y del Castillo, 2017).
- El caso del segundo cuartil (Q2) es especial ya que coincide con la **mediana**, es el valor que está justo en el medio de la distribución de datos y, generalmente, difiere de la media (Wilks, 2019). La forma de calcularla depende de si hay un número  $n$  par o impar de datos:

$$q_{0,5} = \begin{cases} x_{([n+1]/2)} & , n \text{ par} \\ \frac{x_{(n/2)} + x_{([n+1]/2)}}{2} & , n \text{ impar} \end{cases}$$

- Diagramas de caja y bigotes: este tipo de gráfico es muy útil cuando se manejan grandes bases de datos, debido a que son muy ilustrativos y aportan mucha información. El diagrama (Fig. 4) consiste en un cuadro que va desde el cuartil inferior (Q1) hasta el cuartil superior (Q3), por lo que cada caja tiene la altura del RIC, este intervalo cubre el 50 % de los datos, ordenados previamente de mayor a menor. La línea horizontal representada en el interior de la caja corresponde a la mediana, y el punto representado con un aspa es el valor de la media aritmética (Palladino, 2011).

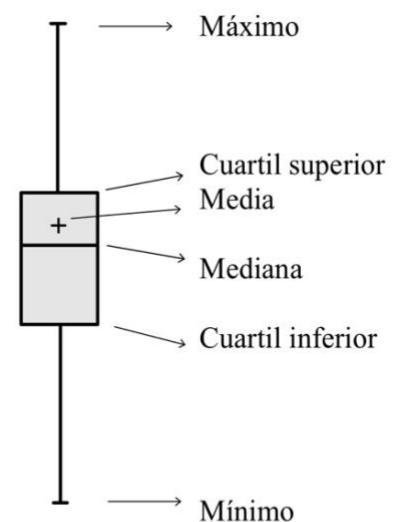


Fig. 4: Diagrama de caja y bigotes.

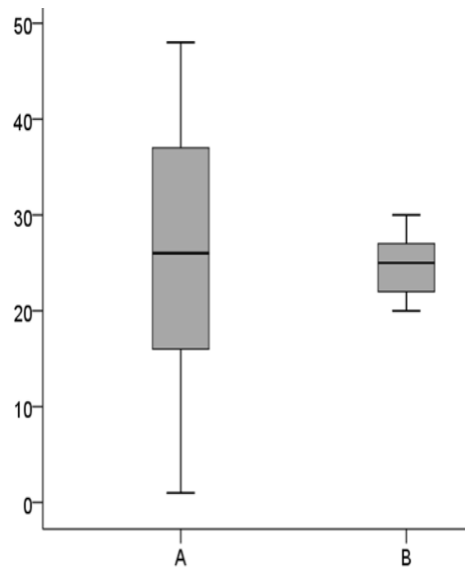


Fig. 5: *Dispersión de los datos. Obtenido de <https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes>*

Los valores exteriores son aquellos que están a mayor distancia que 1,5 el RIC, se consideran valores atípicos y se representan como puntos individuales. Finalmente, los puntos exteriores alejados, están a más de 3 veces el RIC y se distinguen de los anteriores porque en el interior del punto se dibuja un signo más (+) (Palladino, 2011).

Si los bigotes del diagrama son simétricos, la distribución se denomina insesgada (o normal) como en la Fig. 6, es decir, tiene una repartición equitativa de los datos, mientras que, si uno de los bigotes es mayor, la distribución está sesgada, como se ve en las Fig. 7 y Fig. 8 (Palladino, 2011).

Los diagramas de caja y bigotes se han representado con ayuda del programa de análisis estadístico StatGraphics (<https://www.statgraphics.com/centurion-overview>), diseñado para hacer posible el estudio de datos científicos sin necesidad de aprender comandos difíciles o un lenguaje de programación. Además, tiene incorporado una herramienta llamada “StatAdvisor” cuya función es explicar los resultados estadísticos de forma clara y concisa.

Si la caja es más alta, hay una mayor dispersión de los datos, este caso se corresponde con el gráfico A de la Fig. 5, mientras que en el (B) el 50 % de los datos están contenidos en un rango menor, es decir, menor dispersión.

Los bigotes se dibujan hasta los valores mínimo y máximo que se encuentren a una distancia menor que el 1,5 el RIC, los puntos de este intervalo se denominan casos extremos leves.

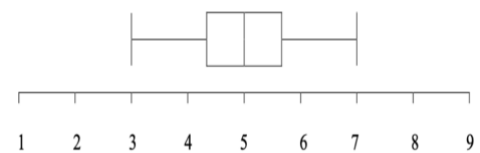


Fig. 6: *Distribución normal o insesgada.*

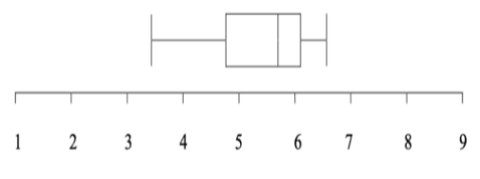


Fig. 7: *Distribución sesgada negativa.*

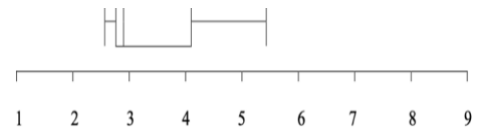


Fig. 8: *Distribución sesgada positiva. Imagen obtenida de [https://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GR\\_ÁFICO\\_DE\\_CAJA.pdf](https://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GR_ÁFICO_DE_CAJA.pdf)*

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Evolución diaria

En este apartado se procede a discutir los resultados obtenidos en el trabajo. Para empezar en la Fig. 9, se ha representado el total de los valores obtenidos de la altura de la capa límite atmosférica con ayuda del modelo METEX para los cuatro años de estudio en función de las horas del día. De este modo se puede visualizar claramente la evolución de la PBLH que, como se hizo referencia en la introducción, tiene un ciclo muy marcado y se puede distinguir con facilidad un claro periodo nocturno y otro diurno.

En días despejados, la capa límite planetaria tiene una estructura bien definida. Durante el día se desarrolla la capa de mezcla (ML), mientras que por la noche destaca la aparición de una capa límite estable (SBL) con la capa residual (RL) por encima. En cambio, bajo condiciones meteorológicas advectivas, como pueden ser las nubes o la lluvia, la capa convectiva (también llamada capa de mezcla) experimenta un desarrollo más débil, con un crecimiento más lento y un máximo más bajo. Los días nublados (sin lluvia) la capa límite recibe el nombre de cloudy-convective boundary layer (cloudy-CBL) (Collaud et al., 2014).

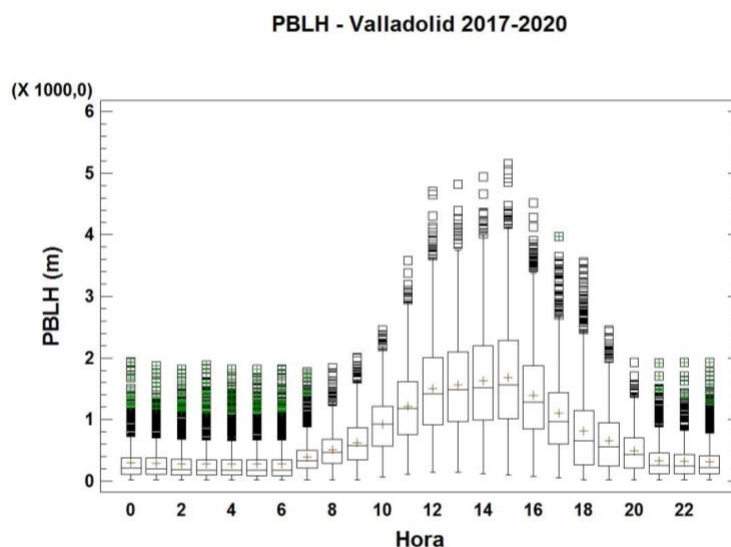


Fig. 9: Evolución diaria de la PBLH en Valladolid en los años 2017-2020.

Durante el periodo nocturno la dispersión de los datos es relativamente pequeña, y en este tramo horario, las alturas medias de la capa límite promedio no superan los 700-800 m. La conclusión que se obtiene es que la SBL es poco profunda y está muy próxima al suelo (Tang et al., 2021).

A partir de las 8 h aproximadamente la capa límite comienza a crecer debido al fuerte calentamiento solar de la superficie terrestre, hasta alcanzar su valor máximo en las horas centrales del día, alrededor de las 15 h (Su et al., 2020). El valor máximo promedio está cerca de los 2000 m, pero como se ve en la Fig. 9, hay días puntuales en los que la PBL alcanza una altura de hasta 5000 m. A continuación, se pasa a analizar la evolución diaria media de cada año por separado.

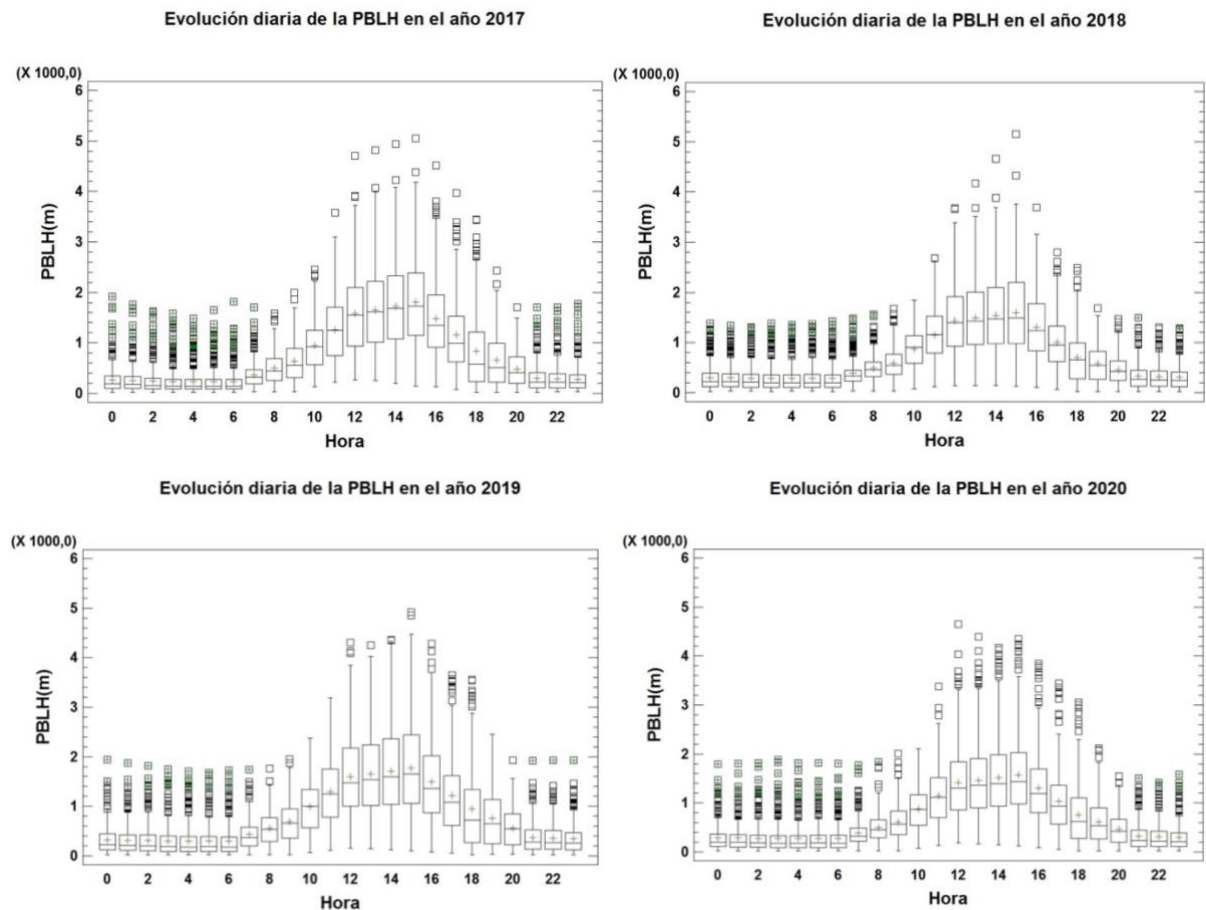


Fig. 10: Evolución diaria de la PBLH en cada uno de los años de estudio.

Al igual que en la Fig. 9, para cada año por separado (Fig. 10), la altura de la capa límite sigue el mismo ciclo. Como se avanzó en la introducción, debido a la agravación de la contaminación del aire desde el periodo industrial, el cambio climático está relacionado con un aumento paulatino de la temperatura. Para los años 2017 y 2018 o incluso 2019, hay pocos días del año en los que en las horas centrales se superen los 4000 m. En cambio, en el 2020, hay un mayor número de valores atípicos que superan esta cifra, lo que se puede justificar con la fuerte correlación positiva de la PBLH y la temperatura (Zhang et al., 2013). Este año está considerado como el más cálido en España en los últimos 60 años, en el que los días extremadamente cálidos fueron 11 veces más frecuentes que los fríos (AEMET, 2021).

Por el contrario, la altura máxima media en el 2020, aproximadamente 1600 m, es inferior a las del 2017 y 2019, cerca de 1700 y 1800 m respectivamente. Que la altura máxima media sea algo menor, puede estar relacionada con los episodios de lluvias torrenciales como fue la borrasca Gloria (AEMET, 2021). Lo cual no contradice lo anterior, ya que el cambio climático se traduce en escenarios y climas extremos, y en un aumento promedio anual de la temperatura de la atmósfera (IPCC, 2013).

## 4.2 Evolución mensual

En este apartado se realiza un análisis mensual de la altura de la capa límite. Primero se muestra un diagrama de cajas con la evolución de cada año por separado.

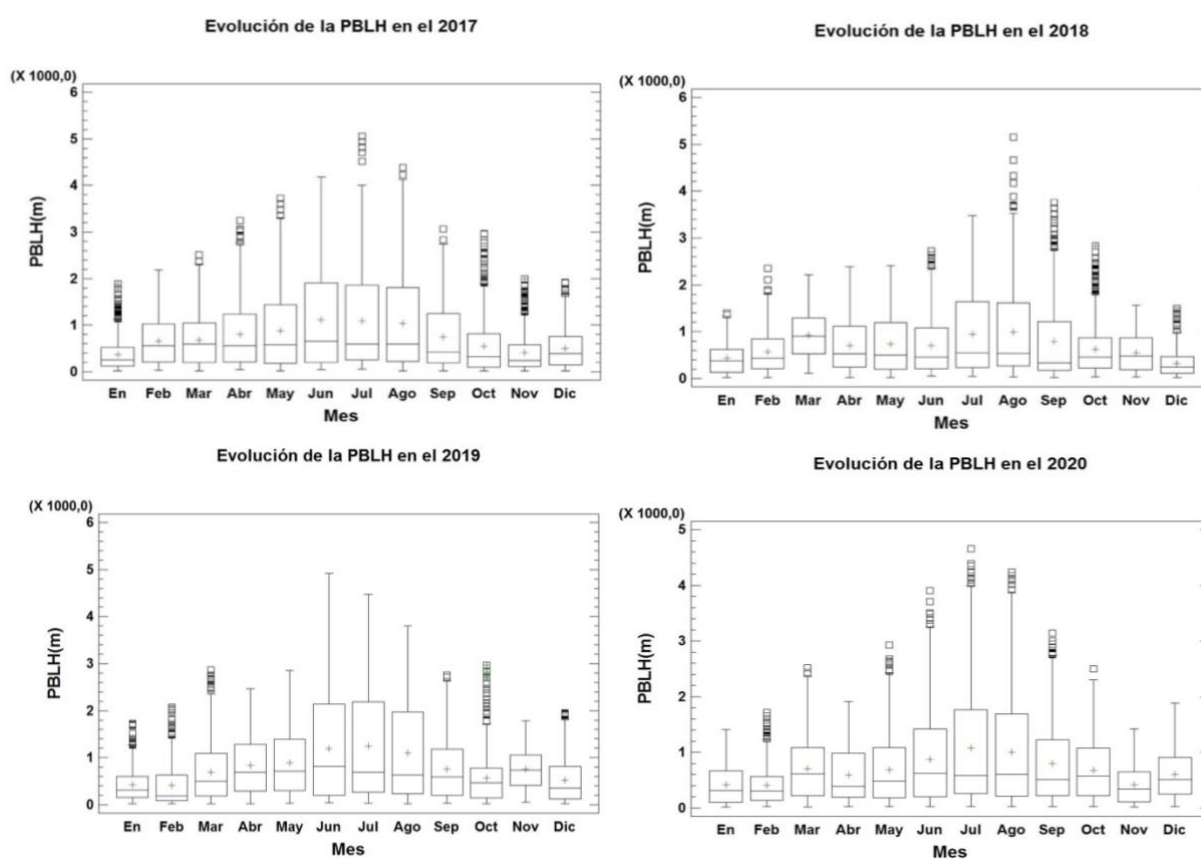


Fig. 11: Evolución mensual de la PBLH para los años 2017, 2018, 2019 y 2020.

De la Fig. 11, se puede concluir que, en general, la altura promedio y máxima de la capa de mezcla experimenta un ligero aumento en los meses de primavera (mar-abr-may) hasta alcanzar los valores máximos en el verano (jun-jul-ago) donde el valor medio supera el km. Los valores mínimos son iguales para todos los meses (y años) porque están determinados por la capa estable nocturna. En los meses de invierno, la altura de la capa de mezcla promedio está en torno a los 500

m, es un resultado razonable debido a las bajas temperaturas en Valladolid y la poca irradiación solar en ese periodo del año. Más adelante se hace un análisis estacional más detallado.

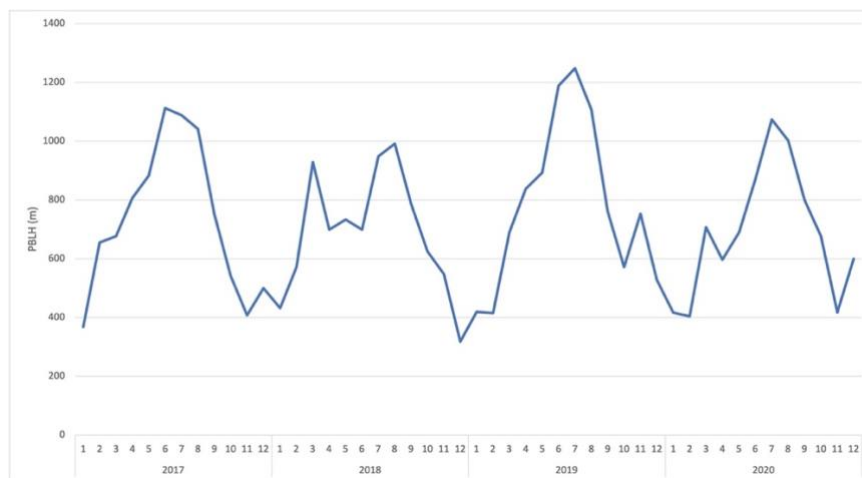


Fig. 12: Evolución de los valores medios mensuales de la PBLH en los años de estudio.

En la Fig. 12 se representa un gráfico con las alturas promedio mensuales de la capa límite durante los 4 años estudiados. Se puede ver que el 2018 sigue un ciclo anual diferente al resto, sobre todo llama la atención el mes de marzo en el que el promedio de la altura de la capa límite está en torno a los 1000 m, por lo que es superior al valor esperado. Además, en los meses de primavera y verano, no se recoge un crecimiento de la PBLH tan desarrollado como en los otros años. Este año se caracterizó por unos meses de abril y mayo especialmente fríos y húmedos, características estrechamente relacionadas con el escaso desarrollo de la PBLH (AEMET, 2019).

El verano del 2018 en Valladolid fue alrededor de  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  más cálido que la temperatura del periodo de referencia que toma la Agencia Estatal de Meteorología (1981-2010) que para esa estación son  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, fue casi un 75 % más húmedo que los valores normales. La precipitación mensual acumulada según el periodo de referencia en Valladolid es de 29, 13 y 16 mm en junio, julio y agosto respectivamente (AEMET, 2018). La PBLH sigue una fuerte correlación positiva con la temperatura y negativa con la humedad (Zhang et al., 2013), lo que puede explicar que no alcanzase valores muy altos durante ese tiempo.



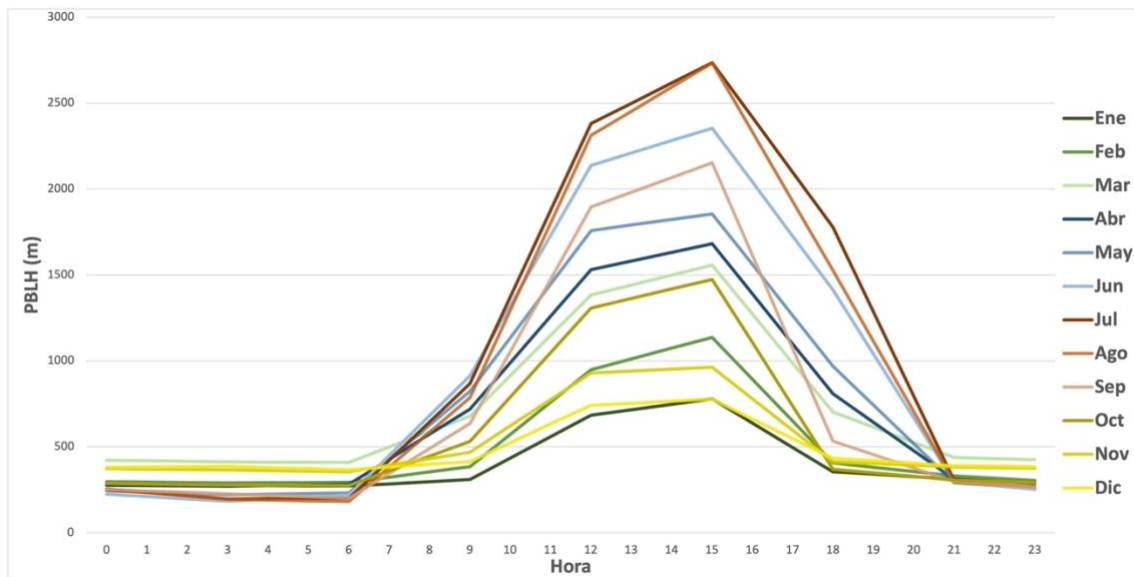


Fig. 13: Ciclo diario de los valores mensuales de la capa límite atmosférica para los años 2017, 2018, 2019 y 2020 en Valladolid.

En la Fig. 13 se muestra la evolución horaria de la PBLH mensual para el periodo 2017-2020. En todos los meses, los valores máximos promedio se obtienen entre las 12 y las 15 h, aunque en los meses de invierno, no son valores tan extremos como los que se llegan a alcanzar en verano. Prestando atención a la capa límite nocturna, a pesar de no superar los 500 m en ningún caso, se observan diferencias entre los meses fríos y cálidos, en estos últimos, a partir de las 6 h la capa límite comienza a crecer de manera notable y no es hasta las 21 h que se vuelve a establecer la capa nocturna, lo que se debe a la posición de la Tierra en la órbita alrededor del sol y que se traduce en un amanecer más temprano y atardecer más tardío (Wang et al., 2020). Por el contrario, durante el invierno en Valladolid, hasta las 9 h no comienza a desarrollarse la capa convectiva y anochece mucho antes, aproximadamente a las 18 h.

### 4.3 Evolución estacional

Del mismo modo que la PBLH tiene un ciclo diario y anual, se puede estudiar la evolución estacional en mayor detalle para analizar el comportamiento diario dependiendo de la época del año. Para las estaciones se ha tomado invierno desde el 22 de diciembre al 20 de marzo, primavera del 21 de marzo al 21 de junio, verano del 22 de junio hasta el 22 de septiembre y otoño desde el 23 de septiembre al 21 de diciembre.

Como ya se ha comentado antes, en todas las estaciones la PBLH presenta un ciclo diario claramente marcado para el periodo estudiado como se ve en Fig. 14. Bajo condiciones estables (SBL) en el periodo nocturno hay poca variabilidad en los valores, y el 75 % de las alturas de la

capa límite obtenidas están por debajo de los 500 m. En cambio, en el periodo diurno, las diferencias estacionales se hacen más evidentes (de Arruda et al., 2020). Invierno y verano son los casos más extremos, ya que la altura máxima promedio alcanzada durante el día en invierno apenas llega al kilómetro, mientras que en verano casi son 3 km. Además, los valores de la altura exteriores (a mayor distancia de 1,5 RIC), en invierno apenas alcanzan algún día los 2,5 km, mientras que, en verano, se superan los 4 km, o incluso los 5 km, en varias ocasiones en torno a las horas centrales del día. Los casos de primavera y otoño son similares, aunque el máximo promedio en primavera es ligeramente superior y se alcanzan valores extremos mayores en primavera (Stull, 1988; de Arruda et al., 2020).

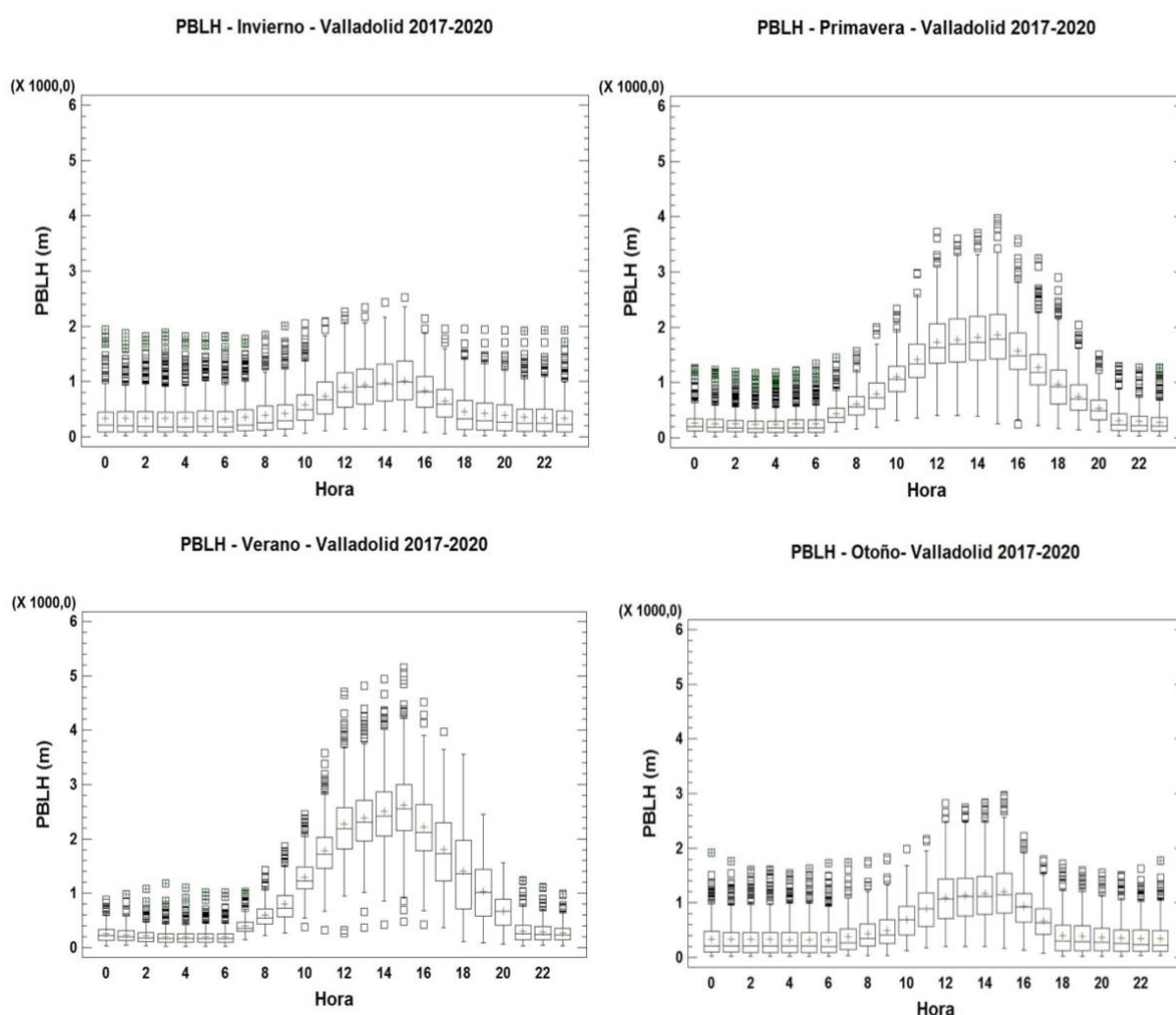


Fig. 14: Evolución diaria de la PBLH para cada estación del año en Valladolid del 2017 al 2020.

En la Fig. 15 se representa en promedio la altura de la capa de mezcla para cada hora del día según las estaciones del año, en este gráfico se confirma lo explicado en el anterior párrafo. En invierno hay poca variación de la PBLH a lo largo del día debido a la poca irradiación solar y las

bajas temperaturas. Primavera y otoño son los estados intermedios, desarrollándose más durante primavera y finalmente el mayor crecimiento diario de la PBLH se observa en verano con un ciclo alto con forma de campana (Wang et al., 2020), ya que es el periodo con mayor radiación solar, que favorece el calentamiento de la superficie.

En el periodo de 2017-2020, la diferencia entre los máximos de verano e invierno es de aproximadamente 1600 m, y la que hay entre primavera y otoño de unos 600 m.

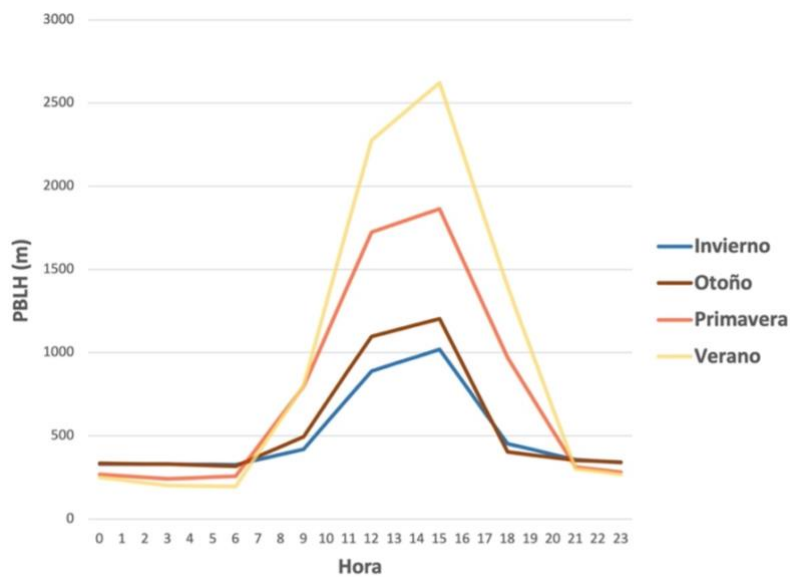


Fig. 15: Evolución diaria para cada estación del año de la capa límite planetaria.

La gran diferencia entre invierno y verano es consecuencia directa de que en verano amanece antes y anochece más tarde, permitiendo que la capa convectiva (ML/CBL) se desarrolle durante un periodo de tiempo mayor, un patrón similar se observa en Granada en el trabajo de de Arruda et al. (2020). Por último, que en verano la altura promedio supere los 2500 m puede estar relacionado con el clima seco de Valladolid, especialmente en los meses más calurosos, lo que se ha visto que favorece el desarrollo de la capa límite.

#### 4.4 Relación con la velocidad del viento y la temperatura

En esta sección se analiza la relación existente entre la altura de la capa límite y el viento, distinguiendo entre el periodo diurno y nocturno, ya que la capa límite se comporta de manera distinta en cada uno de ellos.

Se ha observado que las condiciones atmosféricas propicias para mayores alturas de la capa límite son temperaturas elevadas y las fuertes velocidades del viento (Chan et al., 2006). La altura

de la capa límite planetaria y la velocidad del viento siguen una correlación positiva, es decir, cuando aumenta la velocidad del viento, también lo hace la PBLH (Roy et al., 2012).

Atendiendo al periodo diurno (Fig. 16), las velocidades de hasta 1 m/s, se corresponden con alturas muy bajas, que podrían darse a primera hora de la mañana (8 h) cuando comienza a desarrollarse la capa convectiva, o a última hora, cuando la capa de mezcla pasa a ser la capa estable nocturna. El rango de velocidades intermedio (1,5 - 3,5 m/s) tiene una mayor dispersión de los datos de altura, ya que al estar incluidos los 12 meses, como ya se ha explicado, hay una gran variabilidad de los datos de la altura dependiendo de las estaciones del año. Finalmente, los valores más extremos (4 - 5 m/s) se corresponden a un número menos representativo de casos, son situaciones esporádicas, por lo que la dispersión de los datos depende del año como se ve en los diagramas de cajas de la Fig. 16. El valor promedio de la altura de la capa de mezcla para las velocidades más altas ronda los 1500 o incluso los 2000 m (en el año 2019).

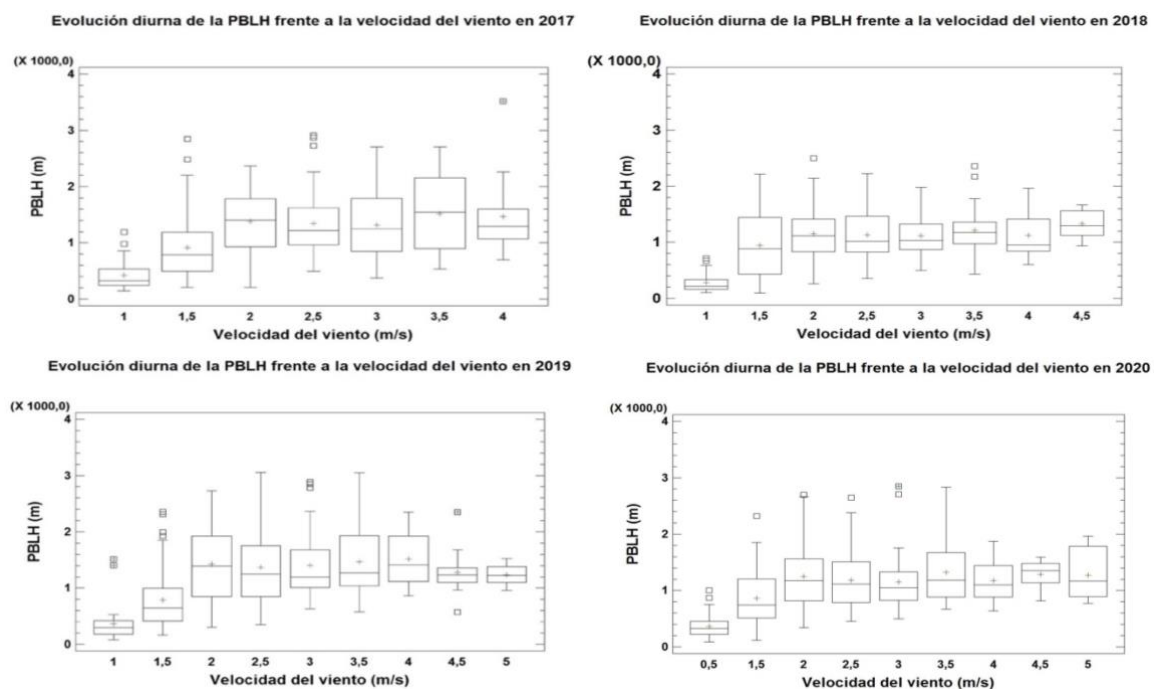


Fig. 16: Evolución diurna (8:00-19:00) de la PBLH frente a la velocidad del viento desde 2017 a 2020.

Prestando atención a las horas nocturnas (Fig. 17), la correlación entre ambas variables sigue siendo positiva, pero comparándola con el caso anterior, se observa que la dispersión de los datos es menor y la altura de la capa de mezcla promedio no supera los 800 m en ningún caso. Para la velocidad de 3,5 m/s se observa una mayor variabilidad de los datos, debido a que hay un menor número de casos en los que se alcanza y por ello es menos representativa que las velocidades intermedias.

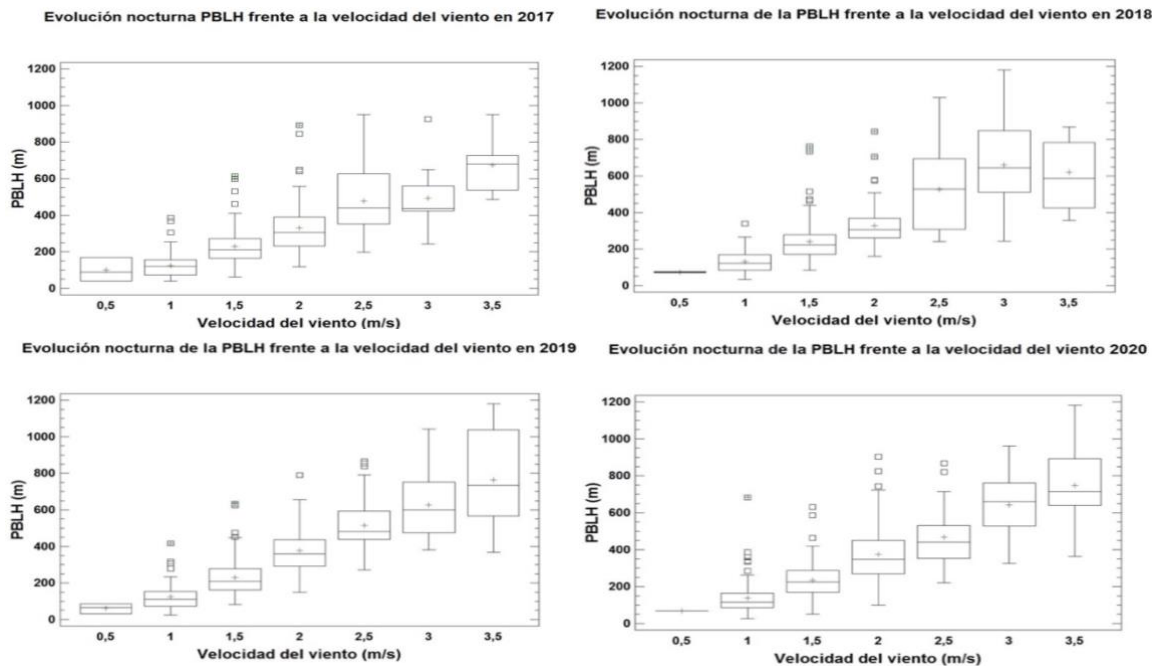


Fig. 17: Evolución nocturna (0:00-7:00 y 20:00-23:00) de la PBLH frente a la velocidad del viento en Valladolid en los años desde 2017 a 2020.

La velocidad mínima experimenta un comportamiento similar en el periodo diurno. Salta a la vista que tanto en la Fig. 16 como en la Fig. 17, hay muy pocos datos exteriores, y los bigotes (distancia 1,5 veces el RIC) son cortos, sobre todo en el periodo nocturno, lo que indica que la variabilidad de los datos es pequeña.

En varias referencias (Roy et al., 2012; Zhang et al., 2013; Dang et al., 2016; Huo et al., 2021) se establece que la PBLH sigue una fuerte correlación positiva con la temperatura, como se ve en la Fig. 18, durante el periodo diurno (8:00 - 19:00) la altura de la capa límite aumenta con la temperatura, siguiendo una tendencia significativamente lineal. Se puede llegar a la conclusión de que una de las razones del drástico decaimiento de la altura de la capa convectiva por la tarde es una consecuencia directa de la caída de la temperatura (Chou et al., 2006).

La temperatura mínima, y por consiguiente la altura de la capa de mezcla medida en ese mismo momento, puede coincidir con el inicio del desarrollo de la capa de mezcla, donde aún no hay una intensa radiación solar en la ciudad y perduran las bajas temperaturas de la noche. O a últimas horas de la tarde en las que, por ejemplo, durante el invierno ya ha anochecido y se desploman las temperaturas. Por el contrario, la temperatura máxima suele alcanzarse sobre las 15 - 16 h, que coincide con el máximo de la PBLH como se ha visto en otro apartado.

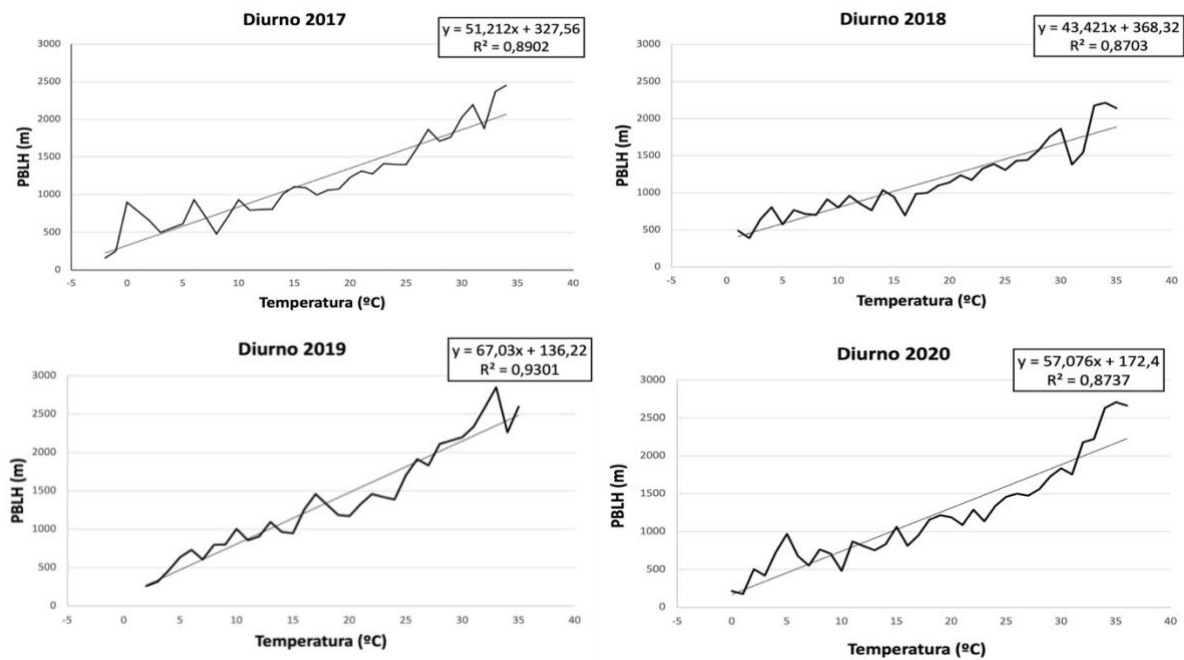


Fig. 18: Evolución de la PBLH frente a la temperatura en el periodo diurno en Valladolid.

Mientras que, durante el día, la temperatura y la PBLH siguen una fuerte correlación positiva, con un coeficiente de correlación  $R > 0,93$  en todos los casos ( $R^2 > 0,87$ ), por la noche, no sigue el mismo comportamiento. Como se ve en la Fig. 19, aunque aumente la temperatura, la altura de la capa límite se mantiene dentro de los valores esperados del periodo nocturno, generalmente por debajo de los 500 m, a pesar de que en algún caso se alcanzan los 700 m.

La capa límite durante la noche pasa de tener un carácter convectivo a uno estable, lo que hace que la altura permanezca prácticamente constante durante esas horas del día. Si se comparan las gráficas obtenidas en ambos casos (Fig. 18 y Fig. 19), se observa que en el periodo nocturno las temperaturas máximas están cerca de 10 °C por debajo de las medidas por el día. Atendiendo a la altura, como ya se ha comentado, por la noche rara vez se superan los 500 m de altura y el mínimo está en torno a los 100 m. Por el contrario, en horario diurno, la altura mínima aproximadamente son 250 m, para las temperaturas más frías, y el máximo supera los 2000 m los 4 años, y el 2019 y 2020 alcanza alturas mayores que 2500 m.

Durante el día hay una gran variabilidad de los datos, en el caso de la PBLH de hasta 2000 m de diferencia y en la temperatura 35 °C, la razón de esto es que los inviernos en Valladolid son muy fríos, mientras que el verano es muy caluroso y seco, dando lugar a un desarrollo muy pronunciado de la capa convectiva.

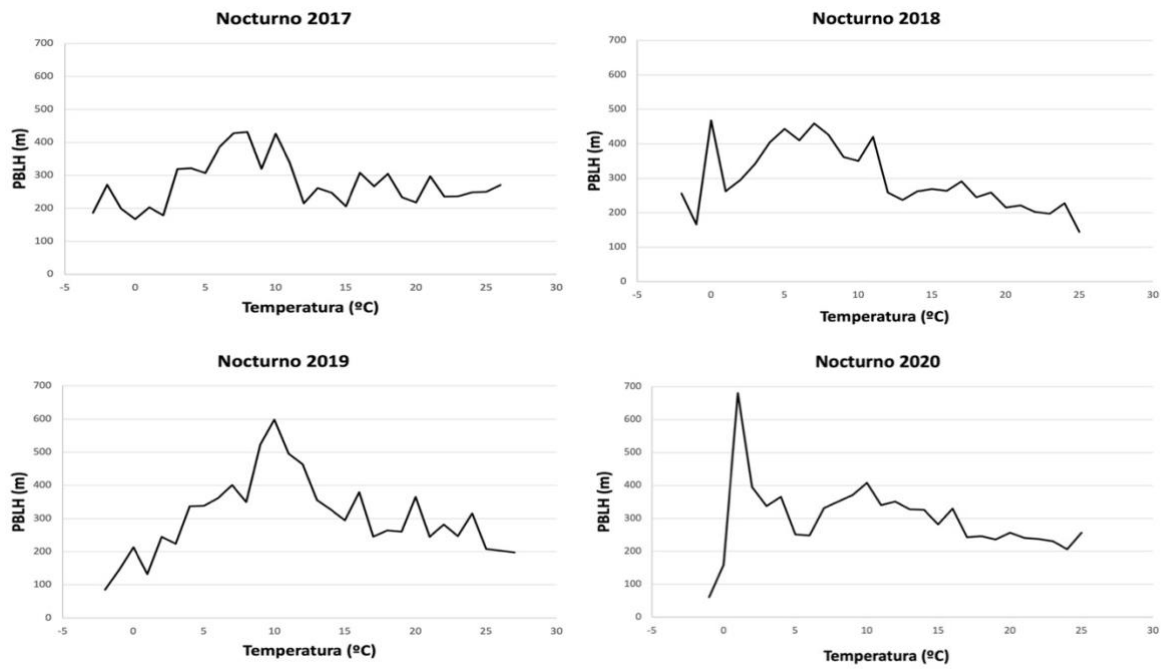


Fig. 19: Evolución de la PBLH frente a la temperatura durante el periodo nocturno.

En la gráfica de la Fig. 20, se ve que el desarrollo de la altura de la capa límite sigue el mismo ciclo diario que la velocidad del viento y la temperatura. En el momento en el que la temperatura comienza a disminuir, la PBLH sufre una caída brusca. Además, se puede inferir que, a mayor temperatura o velocidad del viento, mayor es la altura alcanzada. Un comportamiento similar se obtuvo en el trabajo de Chan et al. (2006).

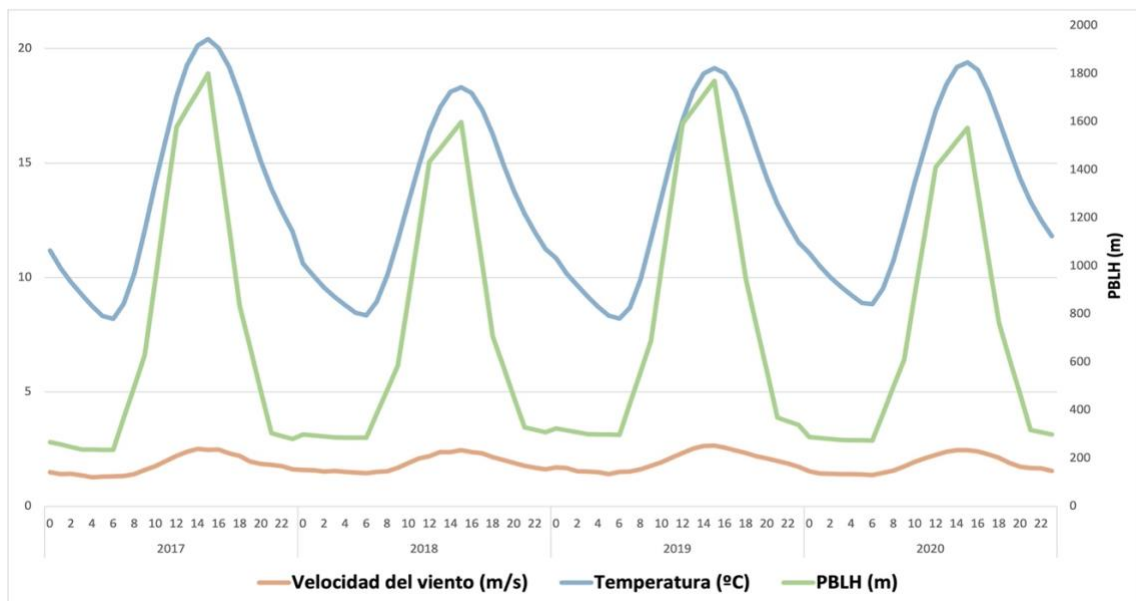


Fig. 20: Evolución diaria de la PBLH, la temperatura y la velocidad del viento en los años de estudio.

#### 4.5 Relación de la PBLH con la concentración de los contaminantes

Cada vez son más frecuentes los estudios que tratan de relacionar los perfiles de concentración de partículas con la altura de la capa de mezcla, ya que la concentración de partículas es significativamente mayor en la capa límite que en la troposfera libre (Chan et al., 2006). En ellos se asume que cuando la capa de mezcla comienza a desarrollarse, aumentando su altura, la concentración del material particulado tiende a disminuir (Geiß et al., 2017).

Como se puede ver en la Fig. 21, en las PM<sub>2,5</sub> (gráfico superior derecha) se corrobora que cuando la PBLH, representada en el eje y secundario (a la derecha), crece, la concentración de partículas generalmente decrece. Además, cabe destacar la tendencia de los 4 años, ya que la concentración va disminuyendo paulatinamente en el periodo de estudio. En cambio, en las PM<sub>10</sub> (gráfico en la esquina superior izquierda), durante los años 2018 y 2020, la concentración de material particulado aumenta con la PBLH. La razón es que la evolución de la concentración está directamente influenciada por el transporte, las fuentes de emisión o eliminación de partículas y las condiciones meteorológicas, y por ello la concentración de este contaminante puede presentar picos esporádicos (Geiß et al., 2017).

En el caso del ozono (último gráfico de la Fig. 21), en todas las estaciones se observa un ciclo anual muy marcado, que además, sigue el mismo desarrollo que la capa límite, alcanza sus valores máximos en los meses calurosos y los mínimos en invierno (Geiß et al., 2017). Es decir, el ozono y la PBLH tienen una fuerte correlación positiva. La diferencia entre las distintas estaciones es imperceptible lo que concuerda con que el ozono principalmente es de origen secundario y se forma en la atmósfera, por lo que no es tan dependiente de la localización espacial de la estación. La contaminación por ozono se agrava bajo condiciones de fuerte convección, por lo que, en el ciclo diurno alcanza los niveles de concentración máximos en las horas centrales del día (Tang et al., 2021) y además, es en ese periodo en el que prevalecen las reacciones fotoquímicas que forman el ozono (Chou et al., 2006).

Analizando la Fig. 21, se observa que para los NO<sub>x</sub> (ambos gráficos en la segunda fila) la relación es inversa y la concentración es máxima cuando la capa límite alcanza las alturas mínimas debido a que la dispersión de los contaminantes disminuye (Chou et al., 2006). Además se observa un descenso gradual a lo largo de los años, más prununciado para el NO<sub>2</sub>. Cabía esperar que debido a la pandemia, en el año 2020 hubiera un decaimiento de los niveles de contaminación, debido a la interrupción de muchas actividades no esenciales y del transporte. Durante este año, en toda España se observó un claro descenso de la concentración del dióxido de nitrógeno desde la semana 12,



inicio del confinamiento (MITECO, 2021). A partir de los meses de verano, en los que se redujeron las restricciones debido al final del primer estado de alarma, se observa un incremento de los niveles de  $\text{NO}_2$ , obteniendo sus valores máximos en octubre y noviembre, pero sin superar en ningún momento los  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto supone una reducción de hasta un 50 % comparándolo con el año 2017. Esta disminución ocurre también, en menor medida, en los años 2018 y 2019. En el caso de las  $\text{PM}_{2,5}$  no se puede asignar la disminución de los niveles únicamente al estado de alarma ya que como se ha indicado antes, depende de muchos otros factores (MITECO, 2021).

La disminución paulatina a lo largo de los años de los niveles de los contaminantes es el resultado de las medidas tomadas en la ciudad de Valladolid para enfrentar este problema global.

La capa límite planetaria y el  $\text{SO}_2$  siguen el mismo ciclo anual, como se ve en el gráfico de la Fig. 21 (tercera fila a la izquierda), salvo el año 2018 que se sale un poco del patrón que siguen los demás. Comparándolo con los otros contaminantes, se observa que los niveles son inferiores, lo que se debe al cierre de centrales térmicas y a medidas como el plan nacional de reducción de las emisiones de las grandes instalaciones de combustión existentes (BOE, 2008). La recomendación de la OMS es que no se superen los niveles de exposición a corto plazo (24 h) de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el promedio mensual en Valladolid queda lejos de esas cifras (World Health Organization, 2021).

El último contaminante que se estudia es el monóxido de carbono, CO (gráfico en la tercera línea a la derecha de la Fig. 21). No se puede establecer una relación significativa con la altura de la capa de mezcla, debido a que sus emisiones en el periodo 2017 - 2020 en la ciudad de Valladolid experimentan una sucesión de picos esporádicos. Del mismo modo, en la evolución diaria no se observa un comportamiento cíclico en este contaminante (Fig. 22 y Fig. 23, gráficos de la derecha).

En este caso, como todas las estaciones de medida son urbanas, como se ve en la Fig. 3 la estación más alejada es Michelin 2, no presentan grandes diferencias entre las concentraciones medidas unas y otras. Como se ve en la Fig. 21, no todas las estaciones recogen datos de todos los contaminantes analizados. El hecho de que algunos contaminantes como los  $\text{NO}_x$  o el material particulado sigan una anticorrelación con la altura de la capa límite se debe a que las condiciones convectivas que se dan durante el periodo diurno, dan paso a una capa límite estable por la noche, que en vez de favorecer la dispersión de los contaminantes provoca su acumulación, haciendo que los niveles de concentración aumenten en el periodo nocturno, como se ve en las Fig. 22 y Fig. 23 (gráficos de la izquierda) (Chou et al., 2006). Para el  $\text{SO}_2$  en la Fig. 23, al hacer el promedio de los

4 años, si se aprecia que, aunque las concentraciones son muy bajas, sigue un comportamiento similar al material particulado o los óxidos de nitrógeno.

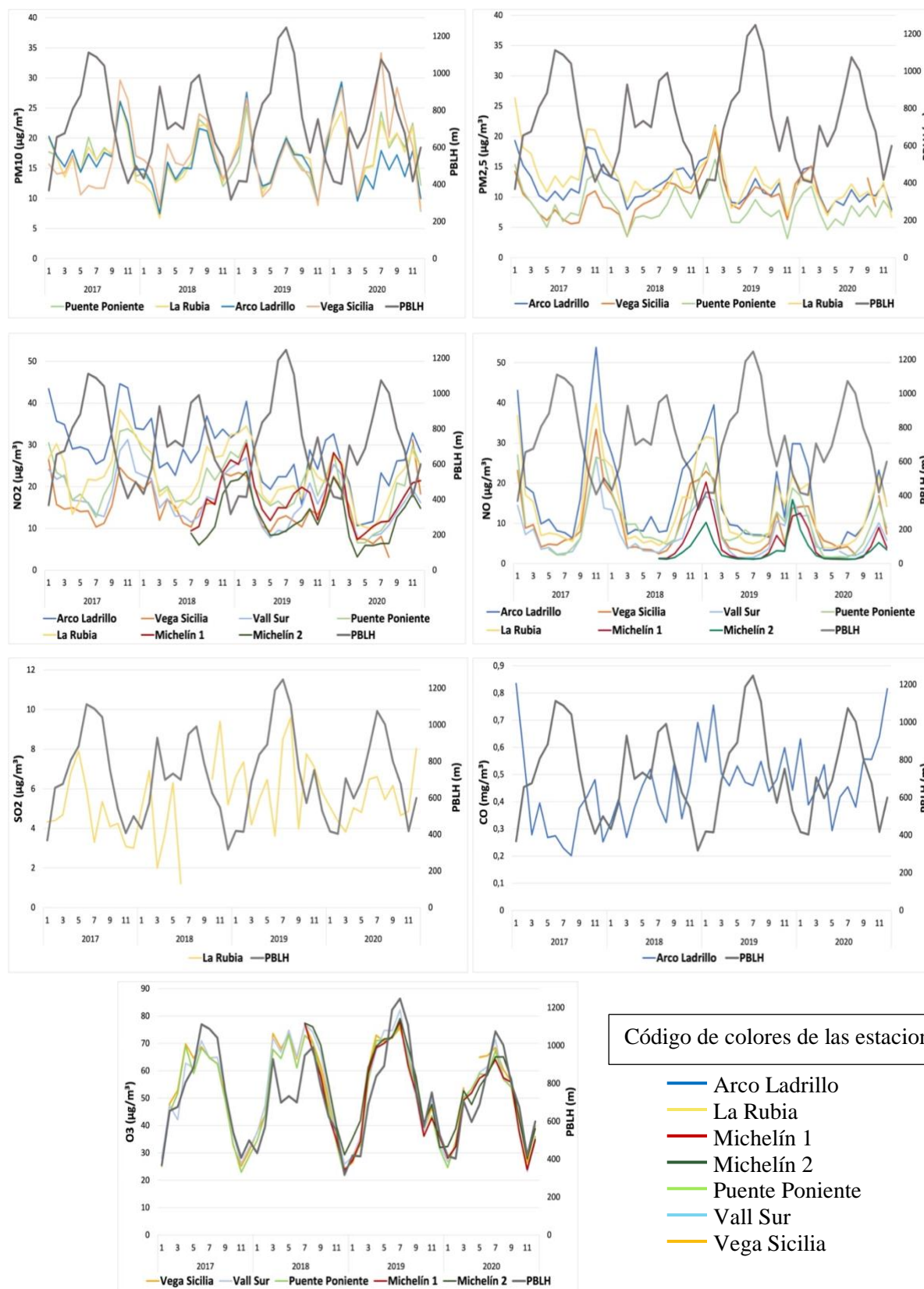


Fig. 21: Evolución de cada contaminante por estaciones de medida en el periodo de estudio.

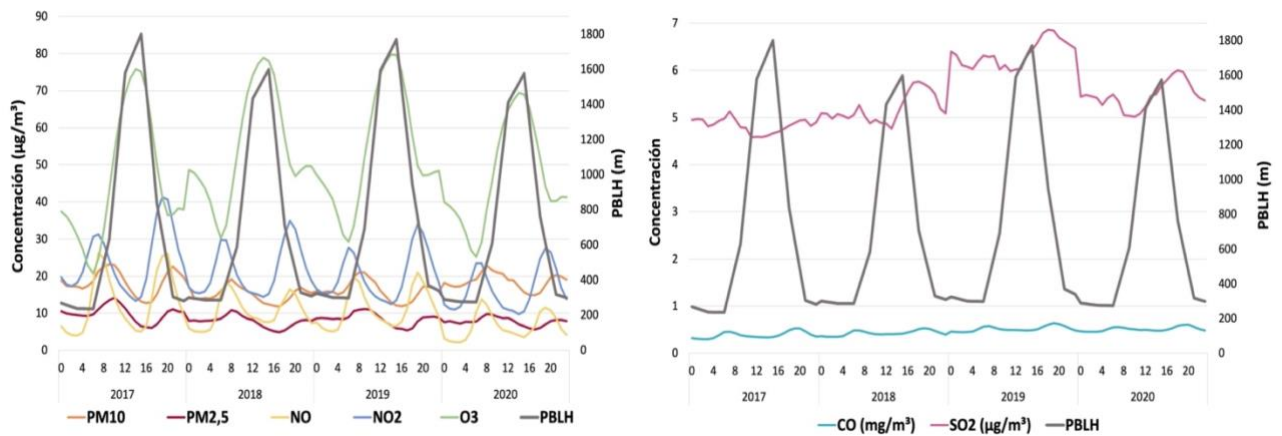


Fig. 22: Evolución horaria de los contaminantes, PM10, PM2,5, NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> medidos en la estación de Puente de Poniente, SO<sub>2</sub> en La Rubia y CO en Arco Ladrillo, a lo largo de los 4 años de estudio.

Tanto en la Fig. 22, como la Fig. 23, se observa claramente que el ciclo del ozono es bastante parecido al de la altura de la capa límite, aunque al caer la tarde disminuye de manera más suave que la PBLH, alcanzando su mínimo unas horas antes de que la capa límite comience a desarrollarse.

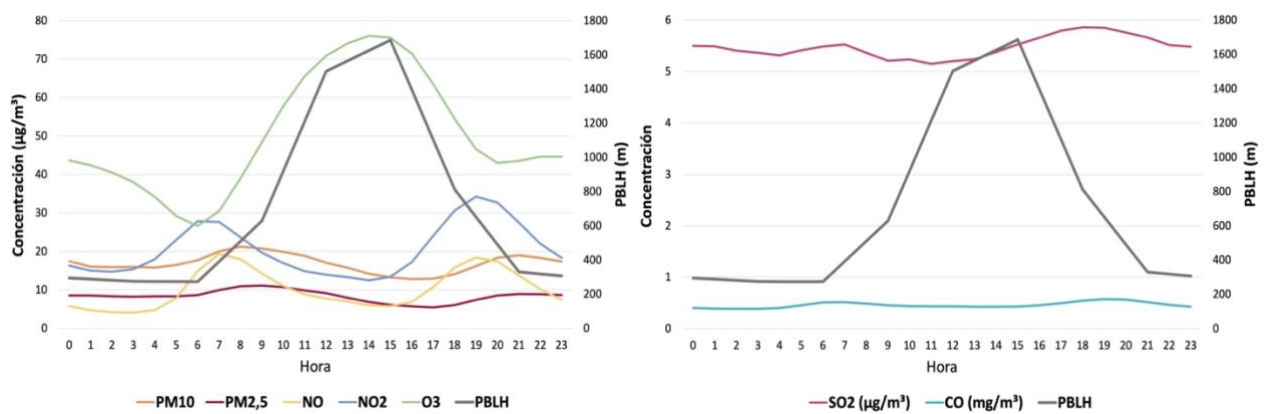


Fig. 23: Evolución horaria promedio de los contaminantes, PM10, PM2,5, NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> medidos en la estación de Puente de Poniente, SO<sub>2</sub> en La Rubia y CO en Arco Ladrillo durante el periodo de estudio.

## 5. Conclusiones

El propósito del trabajo ha sido profundizar en el ámbito de la capa de mezcla, estudiándola desde distintos puntos de vista para entender su importancia en la atmósfera, ya que en ella ocurren procesos que afectan al desarrollo de los seres vivos, como por ejemplo la difusión de contaminantes.

- Se ha analizado la evolución temporal de la capa límite. El ciclo diario muestra que durante la noche se forma una capa estable que mantiene una altura prácticamente constante, donde las alturas medias no exceden los 500 m. Mientras que durante el día se desarrolla una capa convectiva también llamada capa de mezcla, que alcanza sus valores máximos promedios sobre las 15 h, superando los 1500 m y en algunos casos alcanzando hasta los 2000 m. El ciclo anual muestra que en los meses de julio y agosto hay una mayor variabilidad de los datos y se alcanzan los valores máximos para la PBLH, en torno a los 2700 m de altura promedio a las 15 h. Por el contrario, en noviembre, diciembre y enero, las alturas máximas no superan el km a esa misma hora. El último ciclo que se analiza es el estacional, atendiendo especialmente a las diferencias y similitudes que presentan las 4 estaciones del año. Se observa una diferencia de más de 1500 m entre las alturas máximas promedio de verano e invierno. Menos de 1 km de diferencia hay entre los máximos medidos en primavera y otoño, son estaciones intermedias y más suaves que las otras dos.
- Se ha estudiado la relación de la altura de la capa límite con dos variables meteorológicas. Respecto a la velocidad del viento, se obtuvo una correlación positiva tanto de día como de noche. Por otro lado, respecto a la temperatura, la altura de la capa límite sigue una fuerte correlación positiva durante el día ( $R > 0,93$ ), pero por la noche el comportamiento es distinto, la PBLH presenta picos esporádicos entre los 100 y los 800 m independientemente del aumento de la temperatura. Las tres variables siguen el mismo desarrollo diario, crecen desde las 8 h hasta las 15 – 16 h, momento en el que alcanzan su máximo diario, y a partir de ahí comienzan a disminuir hasta las 20 h aproximadamente y permanecen constantes hasta el ciclo siguiente.
- La PBLH se ha relacionado con la concentración de los contaminantes principales en la ciudad de Valladolid, los cuales suponen un problema tanto en esta ciudad como a nivel mundial, y en cierta medida un problema para la salud, como ya se ha hecho referencia. Contaminantes como PM10, PM2,5, NO o NO<sub>2</sub>, siguen una anticorrelación con la PBLH, de tal forma que bajo condiciones no convectivas (durante la capa estable nocturna) se acumulan en la atmósfera

debido a la menor difusión desencadenando el incremento de los niveles de concentración durante ese periodo. En estos contaminantes se observa que alcanzan valores máximos, cuando la PBLH es mínima. Las concentraciones máximas promedio de  $\text{NO}_2$  superan los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en todos los casos, además, el pico de la tarde (20 h) es mayor. Los niveles de  $\text{NO}$  se han visto reducidos considerablemente desde el 2017, sobre todo se hace notable por la tarde o en los meses de invierno (si se tiene en cuenta la evolución mensual). El material particulado sigue un comportamiento diario similar al de los óxidos de nitrógeno, pero sin picos tan marcados.

El  $\text{SO}_2$  sigue un desarrollo parecido al de la capa límite, aunque sus emisiones han sido drásticamente reducidas en los últimos años. En este caso, la evolución diaria sugiere dos picos de concentración cuando la capa límite es mínima, pero son cambios muy suaves.

En el caso del  $\text{O}_3$  se ve que sigue estrictamente el mismo desarrollo que la PBLH, ya que su principal fuente son las emisiones secundarias y se produce por reacciones fotoquímicas en la atmósfera, favorecidas por la radiación solar. La evolución diaria (tanto de los años por separado, como del promedio de los años del estudio) muestra un máximo en torno a las horas centrales del día, igual que ocurría con la capa límite, alcanzando concentraciones de hasta  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y siendo el valor promedio unos  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lo mismo se observa en el ciclo mensual, los máximos se obtienen en los meses calurosos ( $70 - 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y en invierno los mínimos ( $25 - 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), es el mismo ciclo que se observa para la altura de la capa límite.

Para el  $\text{CO}$  no se ha podido establecer una relación significativa debido a la irregularidad de sus emisiones.

## Bibliografía

- AEMA. (2013). *Cada vez que respiramos. Mejorar la calidad del aire en Europa: Señales 2013*. Agencia Europea del Medio Ambiente.
- AEMET. (2018). *Agencia Estatal de Meteorología*. Obtenido de Resumen climático del verano 2018: <http://www.aemet.es/documentos/es/noticias/2018/Climaverano18.pdf>
- AEMET. (2019). *Informe anual 2018*. Agencia Estatal de Meteorología. Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado.
- AEMET. (mayo de 2021). *Agencia Estatal de Meteorología*. Obtenido de El informe sobre el estado del clima en 2020 en España muestra que fue el año más cálido y se dispararon los récords de calor: [http://www.aemet.es/es/noticias/2021/05/informe\\_estado\\_clima\\_2020#enlaces\\_asociados](http://www.aemet.es/es/noticias/2021/05/informe_estado_clima_2020#enlaces_asociados)
- AnálisisEstadísticos.com. (Abril de 2019). *¿Cómo se interpreta un Diagrama de Cajas y Bigotes?* Obtenido de Análisis de Datos: <https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes>
- Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 123-132.
- Ayuntamiento de Valladolid. (2011). *¿Qué es la RCCAVA?* Recuperado el 2021, de RCCVAVA: <https://www.valladolid.es/es/rccava/rccava>
- Baars, H., Ansmann, A., Engelmann, R., & Althausen, D. (2008). Continuous monitoring of the boundary-layer top with lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 8(23), 7281-7296.
- Baklanov, A., & Kuchin, A. (2004). The mixing height in urban areas: comparative study for Copenhagen. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 4(3), 2839-2866.
- BOE. (2008). *Plan Nacional de Reducción de Emisiones de las Grandes Instalaciones de Combustión Existentes*. BOE-A-2008-1467, Boletín Oficial del Estado.
- Bonilla, J. S. (2016). *Evaluación sitios de instalación para una estación de monitoreo de la calidad del aire*. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería.
- Castaño, A., Segura, P., Gutiérrez, E., Chassot, F., Gracia, J. C., Ramos, P., Orihuel, M., Cuenca, L., Cámara, E., Castaño, A., Ceballos, M. A., García, M., Prima, H., Veiras, X., Bárcena, J., Belmonte, P., Luengo, P. & Navascués, E. (2020). *Efectos de la crisis de la COVID-19 sobre la calidad del aire urbano en España*. Ecologistas en Acción.
- Chan, R., Lee, O., & Cheng, A. (2006). Diurnal variation of mixing height in Hong Kong. *Reviewed and revised papers presented at the 23rd International Laser Radar Conference*, 737-740.

- Chou, C. C., Lee, C. T., Chen, W. N., Chang, S. Y., Chen, T. K., Lin, C. Y., & Chen, J. P. (2006). Correlation between mixing height and concentrations of air pollutants in the Taipei Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(1), 1-13.
- Collaud, M., Praz, C., Haeferle, A., Ruffieux, D., Kaufmann, P., & Calpini, B. (2014). Determination and climatology of the planetary boundary layer height above the Swiss plateau by in situ and remote sensing measurements as well as by the COSMO-2 model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13205-13221.
- COST. (1998). *Action 710- Final report "Harmonisation of the pre-processing of meteorological data for atmospheric dispersion models"*. Office for Official Publications of the European Communities.
- Dang, R., Li, H., Liu, Z., & Yang, Y. (2016). Statistical analysis of relationship between daytime lidar-derived planetary boundary layer height and relevant atmospheric variables in the semiarid region in northwest China. *Advances in Meteorology*, 2016, 1-13.
- Datos históricos de contaminantes*. (s.f.). Recuperado el octubre de 2021, de Ayuntamiento de Valladolid: <https://www.valladolid.es/es/rccava/datos-red/datos-historicos>
- de Arruda, G., Guerrero-Rascado, J. L., Bravo-Aranda, J. A., Foyo-Moreno, I., Cazorla, A., Alados, I., Lyamani, H., Landulfo, E., Alados-Arboledas, L. (2020). Study of the planetary boundary layer height in an urban environment using a combination of microwave radiometer and ceilometer. *Atmospheric Research*, 240, 104932.
- Galán, D. (2013). Química medioambiental. Metodología pasiva empleada para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos. *Avances en Química*, 8(2), 111-119.
- Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R. M., Bravo, J. C., Pradana, J. A., García, M. A., & Senén, J. (2012). *Contaminación Atmosférica*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- García, M. A., Sánchez, M. L., De Torre, B., & Pérez, I. A. (Noviembre de 2007). Characterisation of the mixing height temporal evolution by means of a laser dial system in an urban area—intercomparison results with a model application. *Annales Geophysicae*, 25(10), 2119-2124.
- Geiß, A., Wiegner, M., Bonn, B., Schäfer, K., Forkel, R., Schneidmesser, E. V., Munkel, C., Chan, K. L., & Nothard, R. (2017). Mixing layer height as an indicator for urban air quality? *Atmospheric Measurement Techniques*, 10 (8), 2969-2988.
- Huo, Y., Wang, Y., Paasonen, P., Liu, Q., Tang, G., Ma, Y., Petaja, P., Kerminen, V., & Kulmala, M. (2021). Trends of Planetary Boundary Layer Height Over Urban Cities of China From 1980–2018. *Frontiers in Environmental Science*, 399.
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

- Krishnamurthy, R., Newson, R. K., Berg, L. K., Xiao, H., & Turner, D. D. (junio de 2021). On the estimation of boundary layer heights: a machine learning approach. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(6), 4403–4424.
- Loughner, C. P., Fasoli, B., Stein, S. F., & Lin, J. C. (5 de abril de 2021). Incorporating Features from the Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) Model into the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) Model: A Unified Dispersion Model for Time-Forward and Time-Reversed Applications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(6), 799-810.
- Manzanera-Benito, G., & Capellán-Pérez, I. (2021). Mapping the Energy Flows and GHG Emissions of a Medium-Size City: The Case of Valladolid (Spain). *Sustainability*, 13(23), 13181.
- MITECO. (2019). *Efectos en la salud y ecosistemas*. Recuperado el 2021, de Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/>
- MITECO. (2020). Evaluación de la calidad del aire en España. 257.
- MITECO. (2021). *Informe de indicadores de calidad del aire en relación con las medidas adoptadas por la COVID-19. Año 2020*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.
- Núñez, S. (2004). *Altura de la capa de mezcla: caracterización experimental y aplicación de un modelo meteorológico para el estudio de su evolución diurna*. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- Oleniacz, R., Bogacki, M., Szulecka, A., Rzeszutek, M., & Mazur, M. (2016). Assessing the impact of wind speed and mixing-layer height on air quality in Krakow (Poland) in the years 2014–2015. *Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 63, 315-342.
- OMS. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Resumen de evaluación de los riesgos*. Organización Mundial de la Salud.
- Palladino, A. C. (2011). *Atención primaria de salud, epidemiología e informática II*. Obtenido de Facultad de Medicina de la UNNE (Universidad Nacional del Noroeste): <https://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GRÁFICO%20DE%20CAJA.pdf>
- Roy, S., Gupta, P., & Nath, T. (2012). Studies on Meteorological Parameters and Mixing Height in Gold Mining Area. *Resources and Environment*, 2(5), 228-239.
- Salazar, C., & del Castillo, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Estadística (1.a ed.)*. Quito: Sin editorial.



- Salvador, P., Pandolfi, M., Tobías, A., Gómez-Moreno, F. J., Molero, F., Barreiro, M., Pérez, N., Revuelta, M. A., Marco, I. M., Querol, X., & Artíñano, B. (2020). Impact of mixing layer height variations on air pollutant concentrations and health in a European urban area: Madrid (Spain), a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(33), 41702-41716.
- Sicard, M., Pérez, C., Rocadenbosch, F., Baldasano, J. M., & García-Vizcaino, D. (2006). Mixed-layer depth determination in the Barcelona coastal area from regular lidar measurements: methods, results and limitations. *Boundary-Layer Meteorology*, 119(1), 135-157.
- Solomon, S., Manning, M., Marquis, M., Qin, D., Chen, Z., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H. L. (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (Vol. 4)*. Cambridge university press.
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. (Vol. 13). Springer Publishing & Business Media.
- Su, T., Li, Z., & Kahn, R. (2020). A new method to retrieve the diurnal variability of planetary boundary layer height from lidar under different thermodynamic stability conditions. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111519.
- Tang, G., Liu, Y., Huang, X., Wang, Y., Hu, B., Zhang, Y., Song, T., Li, X., Wu, S., Li, Q., Kang, Y., Zhu, Z., Wang, M., Wang, Y., Li, T., Li, X., & Wang, Y. (Septiembre de 2021). Aggravated ozone pollution in the strong free convection boundary layer. *Science of The Total Environment*, 788, 147740.
- Tang, G., Zhang, J., Zhu, X., Song, T., Münkel, C., Hu, B., Schäfer, K., Liu, Z., Zhang, J., Wang, L., Xin, J., Suppan, P., & Wang, Y. (2016). Mixing layer height and its implications for air pollution over Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*(4), 2459-2475.
- UNECE. (2016). *Towards Cleaner Air. Scientific Assessment Report 2016*. United Nations Economic Commission for Europe.
- Wang, D., Stachlewska, I. S., Song, X., Heese, B., & Nemuc, A. (2020). Variability of the Boundary Layer over an urban continental site based on 10 years of active remote sensing observations in Warsaw. *Remote Sensing*, 12(2), 340.
- Wilks, D. S. (2019). Empirical distributions and exploratory data analysis. [Chapter 3]. En *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences (Fourth Edition)*. Elsevier, 23-75.
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*.

- World Health Organization. Regional Office for Europe. (2021). *Review of evidence on health aspects of air pollution- REVIHAAP Project: Technical Report*. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Zeng, J., Matsunaga, T., & Mukai, H. (2010). METEX—a flexible tool for air trajectory calculation. *Environmental Modelling & Software*, 25(4), 607-608.
- Zhang, L., Xin, J., Yin, Y., Chang, W., Xue, M., Jia, D., & Ma, Y. (2021). Understanding the Major Impact of Planetary Boundary Layer Schemes on Simulation of Vertical Wind Structure. *Atmosphere*, 12(6), 777.
- Zhang, Y., Seidel, D. J., & Zhang, S. (2013). Trends in planetary boundary layer height over Europe. *Journal of climate*, 26(24), 10071-10076.

## Glosario de figuras

Fig. 1: La capa límite en zonas de altas presiones sobre la tierra se compone de tres partes: una capa de mezcla muy turbulenta, una capa residual menos turbulenta y una capa límite estable nocturna con turbulencia esporádica; la capa de mezcla se puede subdividir en una capa nubosa y otra por debajo de las nubes. (Stull, 1988). .....	5
Fig. 2: Tres días de retrotrayectoria desde Valladolid (41,65°N y -4,72°W) a 500 m de altitud. Durante 15 días desde el 1 de enero del 2020 (00:00 h). METEX. <a href="https://db.cger.nies.go.jp/metex/web-metex.html">https://db.cger.nies.go.jp/metex/web-metex.html</a> .....	16
Fig. 3: Despliegue de las estaciones de RCCAVA. Tomada de la página web del Ayuntamiento de Valladolid y modificada. ....	18
Fig. 4: Diagrama de caja y bigotes. ....	19
Fig. 5: Dispersión de los datos. Obtenido de <a href="https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes">https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes</a> .....	20
Fig. 6: Distribución normal o insesgada. ....	20
Fig. 7: Distribución sesgada negativa.....	20
Fig. 8: Distribución sesgada positiva. Imagen obtenida de <a href="https://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GRÁFICO_DE_CAJA.pdf">https://med.unne.edu.ar/sitio/multimedia/imagenes/ckfinder/files/files/aps/GRÁFICO DE CAJA.pdf</a> .....	20
Fig. 9: Evolución diaria de la PBLH en Valladolid en los años 2017-2020.....	21
Fig. 10: Evolución diaria de la PBLH en cada uno de los años de estudio. ....	22
Fig. 11: Evolución mensual de la PBLH para los años 2017, 2018, 2019 y 2020. ....	23
Fig. 12: Evolución de los valores medios mensuales de la PBLH en los años de estudio. ....	24
Fig. 13: Ciclo diario de los valores mensuales de la capa límite atmosférica para los años 2017, 2018, 2019 y 2020 en Valladolid. ....	25
Fig. 14: Evolución diaria de la PBLH para cada estación del año en Valladolid del 2017 al 2020. ....	26
Fig. 15: Evolución diaria para cada estación del año de la capa límite planetaria. ....	27
Fig. 16: Evolución diurna (8:00-19:00) de la PBLH frente a la velocidad del viento desde 2017 a 2020.....	28
Fig. 17: Evolución nocturna (0:00-7:00 y 20:00-23:00) de la PBLH frente a la velocidad del viento en Valladolid en los años desde 2017 a 2020. ....	29
Fig. 18: Evolución de la PBLH frente a la temperatura en el periodo diurno en Valladolid.....	30
Fig. 19: Evolución de la PBLH frente a la temperatura durante el periodo nocturno. ....	31

Fig. 20: Evolución diaria de la PBLH, la temperatura y la velocidad del viento en los años de estudio. .....	31
Fig. 21: Evolución de cada contaminante por estaciones de medida en el periodo de estudio.....	34
Fig. 22: Evolución horaria de los contaminantes, PM10, PM2,5, NO, NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> medidos en la estación de Puente de Poniente, SO <sub>2</sub> en La Rubia y CO en Arco Ladrillo, a lo largo de los 4 años de estudio.....	35
Fig. 23: Evolución horaria promedio de los contaminantes, PM10, PM2,5, NO, NO <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> medidos en la estación de Puente de Poniente, SO <sub>2</sub> en La Rubia y CO en Arco Ladrillo durante el periodo de estudio.....	35