



ANÁLISIS DE LA CAPA LÍMITE EN HUELVA

Trabajo Fin de Máster

Escrito por: Pilar Ponce Pérez

Tutor: Raúl Arasa Agudo

Septiembre, 2024

RESUMEN	3
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Definición de la capa límite planetaria o atmosférica (PBL).....	4
1.2. Características y variabilidad de la PBL.....	4
1.3. Altura de la PBL	5
1.3.5. Relevancia de la altura de la PBL.....	6
1.4. Estabilidad atmosférica	6
2. ZONA DE ESTUDIO.....	7
2.1. Principales contaminantes	7
3. OBJETIVOS	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
4.1. Radiosondeos	10
4.2. Número de Richardson	11
5. SELECCIÓN DE EPISODIOS PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA CAPA LÍMITE PLANETARIA (PBL).....	13
5.1. Estaciones de Calidad del Aire	14
5.2. Recopilación de datos.....	15
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
5.3.1. Representación de datos diarios 2021	18
5.3.2. Representación de datos diarios 2022	24
5.3.3. Representación de datos horarios 2021	32
5.3.4. Representación de datos horarios 2022.....	36
7. CONCLUSIONES.....	39
8. BIBLIOGRAFÍA	40

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo estudiar la variabilidad de la altura de la capa límite planetaria (PBL) en la provincia de Huelva a partir de radiosondeos.

Se han analizado los datos obtenidos a partir de la aplicación METEOCIEL y los publicados en el Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico para visualizar el comportamiento de la PBL los días concretos durante los años 2021 y 2022.

Se ha estudiado también la diferencia de comportamiento de la PBL entre el día y la noche.

En conclusión, se trata de relacionar como varía la capa límite planetaria (PBL) durante el día y durante la noche con la temperatura, la velocidad del viento y los contaminantes atmosféricos presentes en la ciudad de Huelva donde el Polo Químico existente en esta ciudad juega un papel importante

ABSTRACT

The objective of this Master's Thesis is to study the variability of the height of the planetary boundary layer (PBL) in the province of Huelva based on radiosondes.

The data obtained from the METEOCIEL application and those published in the Ministry of Ecological Transition and Demographic Challenge have been analyzed to visualize the behavior of the PBL on specific days during the years 2021 and 2022.

The difference in PBL behavior between day and night has also been studied.

In conclusion, it is about relating how the planetary boundary layer (PBL) varies during the day and during the night with the temperature, wind speed and atmospheric pollutants present in the city of Huelva where the Chemical Pole existing in this city plays an important role.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la preocupación por la contaminación atmosférica urbana está cada vez más presente en la población por los efectos maliciosos de los humanos y ecosistemas. Debido al gran porcentaje de enfermedades que derivan de la inhalación de aire con una alta contaminación, la calidad del aire lleva siendo objeto de estudio muchos años.

La mayoría de los fenómenos climatológicos y meteorológicos ocurren en la parte más baja de la atmósfera sobre la superficie de la tierra, a esta capa se le denomina troposfera. Estas dos secciones son la capa límite planetaria o atmosférica (PBL) y la troposfera libre.

1.1. Definición de la capa límite planetaria o atmosférica (PBL)

La capa límite planetaria o atmosférica (PBL) se define como “esa parte de la troposfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie de la tierra, y responde a los forzamientos de la superficie con una escala de tiempo de aproximadamente una hora o menos” (Stull, 1988).

1.2. Características y variabilidad de la PBL

La altura de la capa límite planetaria o atmosférica (PBL) suele ser del orden de 1 ~ 2 km, pero varía significativamente durante un ciclo diurno en respuesta a los cambios en la estratificación térmica (Zhang et al., 2014). La capa límite planetaria (PBL) varía dependiendo del día y de la hora, es la primera capa cercana al suelo que se ve afectada directamente por los elementos presentes en la superficie, depende principalmente de la longitud de rugosidad. La rugosidad de la superficie de la tierra continuamente sirve de sumidero de la cantidad de movimiento para el flujo atmosférico. A grandes escalas, la rugosidad superficial influye en el desarrollo de las tormentas y de la circulación atmosférica global. A pequeña escala, cuanto más rugosa es la superficie, mayor es la mezcla turbulenta. El ritmo de la mezcla turbulenta no depende de la velocidad del viento sino del gradiente vertical de la velocidad del viento (Marrero Santana, 2011).

Estos forzamientos incluyen la resistencia por fricción, la evaporación y la transpiración, la transferencia de calor, la emisión de contaminantes y la modificación del flujo inducida por el terreno (Stull, 1988).

La capa límite planetaria (PBL) tiene un ciclo diurno bien estructurado que se ve influenciada por condiciones climáticas y geográficas. Si se considera un ambiente urbano o si durante el día este está despejado, se forma una capa límite convectiva en su interior favoreciendo movimientos verticales y extendiéndose desde la capa superficial hasta la zona de entrainment (fina capa atmosférica donde interacciona la capa límite con el resto de la troposfera) mientras que, de noche, se

produce una capa límite estable donde se forma una capa residual y donde los movimientos verticales están inhibidos (Arasa Agudo, 2024).

En cambio, si se considera terrenos irregulares o montañosos los movimientos no son convectivos complicando la estructura de la capa límite debido a que participan también movimientos de advección por los fluidos asociados con la topografía (Marrero Santana, 2011).

La variabilidad de la capa límite planetaria (PBL) se determina por ciclos diarios donde ésta se ve influenciada por cambios en las variables meteorológicas que participan y que son de vital importancia como la temperatura de la superficie del aire, la humedad relativa, el flujo radiativo o la estabilidad atmosférica.

1.3. Altura de la PBL

La altura de la PBL es uno de los parámetros más importantes por su subjetividad, ya que a menudo su altura se estima manualmente según la temperatura y humedad. La altura de la capa límite depende de la latitud, la época del año y la hora del día donde se mide, el grosor de la PBL puede variar de cientos de metros a varios kilómetros. La estructura de la capa límite se encuentra clasificada en tres subcapas diferenciadas: la capa de mezcla (ML) o capa límite convectiva (CBL), la capa residual (RBL) y la capa límite estable (SBL) o capa límite nocturna (NBL) (Caballero Bravo, n.d.).

1.3.1. Capa de Mezcla (ML) o capa límite convectiva (CBL): justo después del amanecer, la capa de mezcla (ML) convectiva comienza a crecer y generalmente alcanza su altura máxima alrededor del mediodía durante el periodo de máxima radiación solar (Banks, 2016). Este aire caliente y menos denso experimenta una fuerza de empuje que inicia la actividad convectiva (Burgos Cuevas, 2021). Se define la capa de mezcla como la zona de donde los contaminantes se mezclan y se dispersan verticalmente por convección o turbulencias en periodos de una hora como máximo. Inversamente, la desintegración de la capa de mezcla (ML) ocurre generalmente al atardecer, cuando se forma una capa estable cerca de la superficie debido al enfriamiento radiativo (Banks, 2016).

1.3.2. Capa Residual Nocturna (RL): momentáneamente antes del atardecer y debido al enfriamiento radiativo, producido por la ausencia de radiación solar, la intensidad turbulenta decae, aunque la concentración de los contaminantes sigue siendo la misma que en la capa de mezcla. La disminución de mecanismos de mezcla da lugar a la aparición de una capa estable que se denomina capa residual nocturna (RBL) (Caballero Bravo, n.d.).

1.3.3. Capa Límite Estable (SBL): durante la noche, cuando la superficie del suelo está más fría que el aire, se da lugar a la llamada capa límite estable (SBL) cuya capa es estable y las turbulencias desaparecen por completo. En esta capa, aunque amo tiene un tope bien definido, la dispersión de contaminantes es nula (Caballero Bravo, n.d.).

1.3.4. Estructura de la PBL: 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).

En la *Figura 1* se muestra la estructura de las distintas secciones de la capa límite planetaria en un terreno plano y en condiciones diurnas:

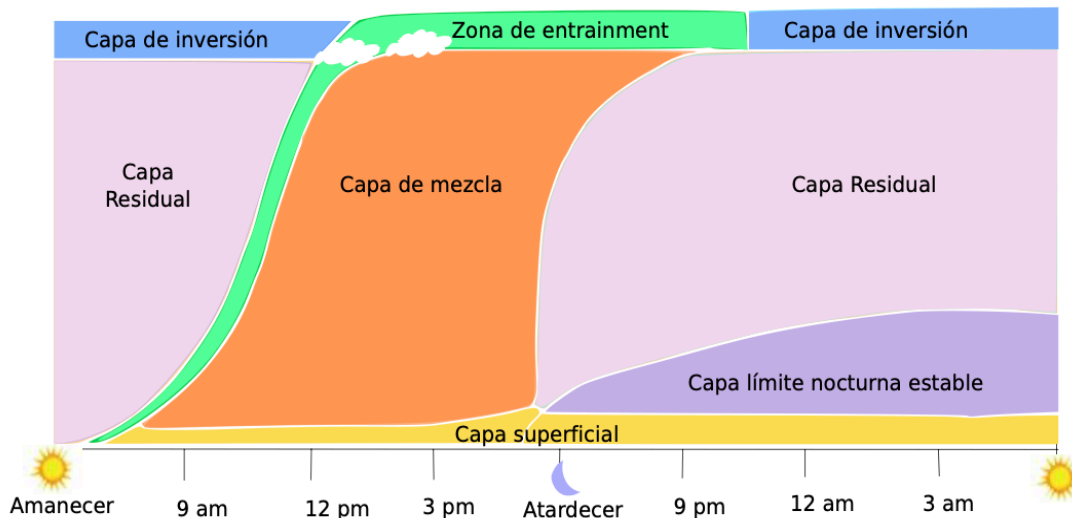


Figura 1. Estructura de las distintas secciones de la capa límite planetaria en un terreno plano y en condiciones diurnas (Burgos Cuevas, 2021).

1.3.5. Relevancia de la altura de la PBL

La altura de la capa límite planetaria es fundamental para dar información sobre los procesos de dispersión vertical y convectivos convirtiéndose en un parámetro de gran importancia de estudio para poder determinar la calidad del aire en una zona o la difusión de contaminantes (Caballero Bravo, n.d.).

La presencia de contaminantes en el aire puede conllevar riesgos o daños importantes para los seres humanos, para los animales y también para el medioambiente. La altura de la capa límite hace alusión a la capacidad de dispersión de los contaminantes. Debido a la variabilidad de la composición de la PBL hace necesario el uso de sistemas de medida en continuo con una alta resolución para poder llevar a cabo un monitoreo diario de esta. Uno de los métodos más usados mundialmente, y el empleado en este trabajo para determinar la altura de la capa límite atmosférica (PBL) en la ciudad de Huelva en los días seleccionados, son los radiosondeos.

1.4. Estabilidad atmosférica

En general, en la troposfera la temperatura decrece con la altura, a excepción de cuando se produce una inversión térmica, que se invierte este comportamiento y da lugar a una capa de gran estabilidad y donde se inhiben los movimientos verticales evitando que los contaminantes y los trazadores se dispersen más allá de la capa de mezcla. Esta inversión térmica se define como áreas donde la variación de la temperatura con la altura es positiva,

$$\frac{\partial T}{\partial z} > 0 \quad ,$$

donde T es la temperatura y z es la altura de la capa. Estas capas de gran estabilidad se consideran como parcelas de aire que ascienden en la atmósfera. Cuando hay una inversión térmica, el ascenso de estas parcelas será muy limitado ya que a media que asciende será más fría y densa con respecto al medio. Podemos decir que la inhibición o no de los movimientos verticales depende de la tasa de cambio de temperatura en la altura de la atmósfera (Burgos Cuevas, 2021).

2. ZONA DE ESTUDIO

En este trabajo se van a estudiar los distintos contaminantes producidos en la ciudad de Huelva enfocando la zona industrial como principal foco contaminante. La ciudad de Huelva está situada al suroeste de España y es la capital de la provincia de Huelva perteneciente a la comunidad autónoma de Andalucía.

Huelva es una ciudad industrial cuyo desarrollo se produce a partir de la segunda mitad del siglo XIX, ligado a la fuerte actividad minera en la provincia y a su puerto de mar (Daponte Codina et al., 1999). Desde los años 60, Huelva cuenta con una fuerte presencia industrial enfocado en la industria química, esta potente actividad ha generado importantes impactos ambientales en la ciudad (Daponte Codina et al., 1999), y que como consecuencia del acelerado desarrollo industrial, comenzó a funcionar en la Ría de Huelva tres polígonos industriales que se denominó Polo de Desarrollo, y fueron: Punta del Sebo (Huelva), Nuevo Puerto (Palos de la Frontera) y Tartessos (San Juan del Puerto).

Esta intensa actividad quedó finalmente estructurada en la década de los 70, donde se puso en marcha el funcionamiento de la red de vigilancia de contaminación atmosférica gestionada primeramente por la Agencia de Medio Ambiente, y posteriormente por la Consejería de Medio Ambiente para intentar solventar los problemas de contaminación atmosférica que se estaban ocasionando en la ciudad (Unión Europea Fondo Europeo de Desarrollo Regional., 2010)

2.1. Principales contaminantes

En este trabajo se estudiará la capa limite planetaria (PBL) a partir de días seleccionados con alta concentración de contaminantes de PM₁₀, PM_{2,5}, SO₂, Pb y As en Huelva. Aunque no han sido objeto de estudio, en esta sección se va a definir los focos de generación de otros contaminantes como los NO_x.

A continuación, se va a explicar los principales focos de generación de contaminantes y sus efectos.

- Material particulado PM₁₀, partículas cuyo diámetro es igual o inferior a 10 micras que pueden ser inhaladas y penetrar en el sistema respiratorio. Las partículas PM₁₀ están relacionadas con el estrés oxidativo y enfermedades pulmonares como el cáncer de pulmón. Las partículas PM₁₀ son una mezcla compleja de varios tipos de partículas y es posible que varios de los

componentes de la PM₁₀ estén involucrados en la inducción del estrés oxidativo (Donaldson et al., 2003).

- Material particulado PM_{2,5}, partículas cuyo diámetro no supera las 2,5 micras, es el más peligroso para los seres humanos ya que penetra en mayor profundidad en el organismo pudiendo llegar hasta nuestra sangre, igual que el oxígeno (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013). Este tipo de partículas pueden ser originadas de manera natural (polvo sahariano, incendios) o debido a la actividad humana (tráfico rodado o actividad industrial).

El polvo africano del desierto del Sahara es una de las principales fuentes naturales de proliferación de partículas PM₁₀ que se encuentran en suspensión en la atmósfera (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013). En menor medida, también contribuye en la presencia de PM_{2,5} en la atmósfera ya que este tipo de partículas tiene su principal fuente de producción antropogénica. Las partículas pueden permanecer durante semanas o incluso meses en altas altitudes de 4 a 5 kilómetros donde se pueden esparcir por toda Europa (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013).

En la *Figura 2* se muestra la clasificación de material particulado que se puede encontrar en la atmósfera urbana.

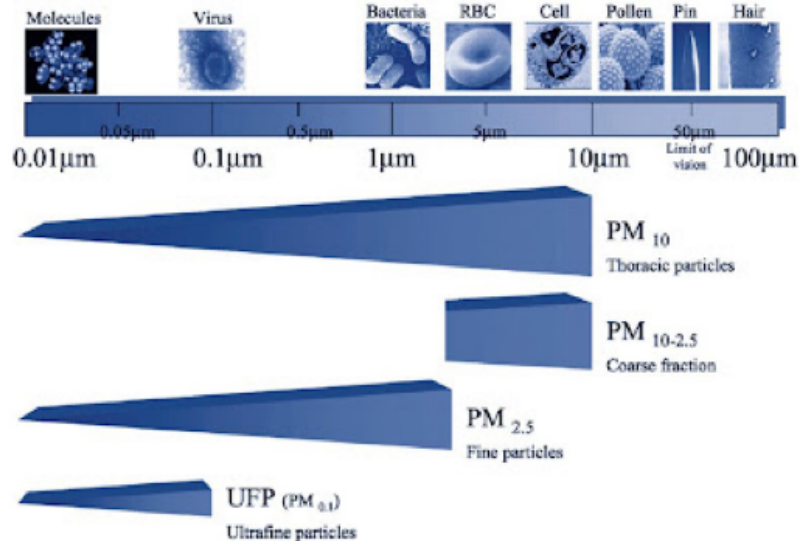


Figura 2. Clasificación del material particulado en la atmósfera urbana (Ecologistas en Acción, 2008).

De manera antropogénica, estas partículas en suspensión pueden estar formadas por una variedad de componentes químicos pudiendo contener metales pesados como arsénico, cadmio, mercurio o níquel. Según su

composición química pueden afectar calentando o enfriando el planeta, por ejemplo, debido a la combustión incompleta de combustibles se obtiene el hollín, cuyo tamaño es menor de 2,5 micras y siendo su inhalación muy peligrosa para los seres humanos y animales (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013).

Las partículas en suspensión PM_{2,5} están vinculadas con muertes relacionadas con problemas cardiovasculares y respiratorios, la exposición de manera prolongada de estas partículas puede provocar enfermedades como aterosclerosis, efectos secundarios en los partos y enfermedades respiratorias en la infancia (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013).

- Dióxido de Azufre (SO₂), es emitido por el consumo de combustibles que contienen azufre en sistemas calefacción, en procesos de generación de energía y en el transporte. También los volcanes emiten SO₂ a la atmósfera (Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), 2013). Este contaminante puede producir, incluso a grandes distancias del foco emisor, efectos adversos sobre la salud (tales como irritación e inflamación del sistema respiratorio, afecciones e insuficiencias pulmonares, dolor de cabeza o ansiedad), sobre la biodiversidad, los suelos y los ecosistemas acuáticos y forestales, además de ser el precursor de la formación de sulfato amónico que incrementa los niveles de PM₁₀ Y PM_{2,5} (Análisis de la Calidad del Aire en España: Evolución 2001-2012).
- Los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) son gases que se emiten de forma antropogénica como consecuencia de la combustión incompleta que se producen en los motores de los automóviles. Se relaciona con el tráfico rodado y especialmente con el urbano (Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico, s.f.). En los focos de emisores emiten de manera directa a la atmósfera NO/NO₂, el NO es un contaminante primario que con el tiempo se oxida a NO₂, dióxido de nitrógeno, que es un contaminante secundario y que actúa como precedente de la formación de ozono y otros contaminantes fotoquímicos. Aproximadamente más del 75% del NO₂ presente en el aire de zonas urbanas proviene del tráfico rodado masivo presente en las ciudades (Análisis de la Calidad del Aire en España: Evolución 2001-2012).
- El Plomo (Pb) es una sustancia tóxica que se acumula en el organismo de manera progresiva con el paso del tiempo (Organización Mundial de la Salud, 2022). Afecta a todos los órganos y sistemas del cuerpo, y en especial al sistema nervioso, originando retraso mental, nacimientos prematuros y retrasos en el crecimiento. Sobre el medio ambiente, puede producir malformaciones y cambios en el comportamiento de los organismos (Análisis de la Calidad del Aire en España: Evolución 2001-2012).
- El Arsénico (As) es una sustancia inorgánica carcinogénica para el ser humano. Produce irritación en las vías respiratorias y puede producir daños

sanguíneos, cardíacos, hepáticos y renales, además de poder producir alteraciones en el sistema nervioso. Igualmente, es altamente tóxico para el medioambiente y la fauna debido a que concentraciones altas de este contaminante empobrece los ecosistemas (Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico, s.f.).

3. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo ha sido el de realizar un análisis de la capa límite atmosférica a partir de radiosondeos que se realizaron en la ciudad de Huelva durante los años 2021 y 2022. Se caracterizó la capa límite para diferentes épocas del año cuyo cálculo de su altura se realizó posteriormente y se relacionó con episodios ambientales producidos en Huelva.

Se ha considerado este estudio de gran interés e importancia debido a que no existe ningún otro estudio registrado de la Capa Límite Planetaria (PBL) en la provincia de Huelva.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Radiosondeos

Este trabajo se ha centrado en la recopilación de datos a partir de registros proporcionados por radiosondeos distribuidos por la ciudad de Huelva.

El radiosondeo se utiliza alrededor de todo el mundo con el objetivo de recopilar datos atmosféricos en tiempo real (Muriel Sicre, 2023).

La programación de observación del radiosondeo se realiza cada doce horas y consiste en el lanzamiento diario de globos-sonda de helio con capacidad meteorológica, los cuales contienen sensores meteorológicos y GPS, que permite la realización de dos sondeos termodinámicos diarios (a las 00h y 12h UTC) (AEMET, 2018).

En España, la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) dispone de un total de nueve estaciones de radiosondeos distribuidas por todo el país. Estas estaciones lanzan radiosondeos dos veces al día con la finalidad de aumentar el conocimiento de las condiciones de las capas altas de la atmósfera (Lugardo, 2019). La estación de radiosondeo ubicada en Huelva facilita datos desde 2018.

En la *Figura 3*, se muestra el total de estaciones de radiosondeos en España.



Figura 3. Estaciones de radiosondeos en España (Muriel Sicre, 2023).

Antes de calcular la altura de la PBL, los datos de la radiosonda pasan por un control de calidad. Si alguna de las siguientes comprobaciones de control de calidad (QC) falla, entonces el valor obtenido por la radiosonda se etiqueta como malo y no se produce estimaciones de altura de la PBL a partir de esa sonda (Sivaraman et al., 2013). Tras la detección inicial, los valores proporcionados por las sondas se comprueban para asegurarse que cumplen con los máximos y mínimos establecidos, siendo los valores fallidos denominados faltantes.

Es importante recalcar que la radiosonda realiza las mediciones de presión, temperatura y temperatura de punto de rocío mediante sensores específicos para ello; mientras que los datos de viento (dirección y velocidad) los obtiene analizando la posición de la radiosonda mediante un sensor de GPS integrado (Muriel Sicre, 2023).

Este trabajo está centrado en los radiosondeos de la ciudad de Huelva y la elección de dicha ciudad como base de la estación de medida no es casualidad, ya que el posicionamiento de la ciudad de Huelva es un punto clave “en la entrada en la península de relevantes sistemas meteorológicos que frecuentemente van asociados a fenómenos de cierta significancia e impacto” (Lugardo, 2019).

4.2. Número de Richardson

En este trabajo se ha utilizado el número de Richardson para calcular la altura de la capa límite atmosférica (PBL).

El número de Richardson (Ri) es un importante parámetro para el estudio de la estabilidad atmosférica y de las condiciones locales de turbulencia, factores determinantes en el transporte y dispersión de contaminantes tanto a escala local como regional (Viloria, 2012). Es un número adimensional en el que intervienen tanto fuerzas convectivas como mecánicas presentes en movimientos atmosféricos

donde se generan flujos turbulentos, y donde su valor y signo, permite cuantificar la importancia relativa de ambas fuerzas (Viloria, 2012).

El número de Richardson (Ri) es el parámetro más usado para calcular la estabilidad de mezclas turbulentas en fluidos multicapa (Pacheco, 2016). El número de Richardson (Ri) puede evaluarse por distintos métodos como el Richardson Flux (Rf) y Richardson Bulk (Rib), este último, se utiliza se para estudiar Ri en distancias finitas entre capas, como es el caso de este trabajo. El método del número de Richardson Bulk (Rib) se utiliza a menudo para modelos numéricos climatológicos debido a su fiabilidad en variabilidad de condiciones atmosféricas. El método de número de Richardson Bulk (Rib) asume que la altura de la capa límite atmosférica (PBLH) alcanza un valor umbral a una cierta altura. El número de Richardson Bulk (Rib) a una cierta altura z se calcula con la temperatura potencial y la velocidad del viento a este nivel y las que están en el límite inferior de la PBL (generalmente la superficie) (Zhang et al., 2014).

El número de Richardson (Ri) se expresa con la siguiente ecuación:

$$Ri = \frac{g}{\theta_v} \cdot \frac{\partial\theta_v/\partial z}{(\partial u/\partial z)^2}$$

Donde, g es la aceleración debida a la gravedad (9,81 m/s²); θ_v es la temperatura virtual; $\partial\theta_v/\partial z$ es el gradiente vertical de la temperatura virtual y $\partial u/\partial z$ es el gradiente vertical de la velocidad horizontal del viento.

Primeramente, antes de calcular el número de Richardson debemos calcular algunas variables necesarias como son:

La temperatura virtual (θ_v) se calcula a partir de la ecuación:

$$\theta_v = T (1 + 0.61 \cdot q)$$

Donde, T es la temperatura del aire en Kelvin y q es la mezcla de vapor de agua (la proporción de la masa de vapor de agua respecto a la masa de aire seco).

Para calcular la mezcla de vapor de agua (q) se utiliza la siguiente ecuación donde se necesita los valores de presión de vapor (e) y la presión atmosférica (P):

$$q = \frac{0.622 \cdot e}{p - e}$$

Donde, e es la presión de vapor y P es la presión atmosférica total. Entonces, para calcular la presión de vapor (e) se usa la ecuación:

$$e = (RH/100.) * e_s$$

Donde RH es la humedad relativa (en porcentaje) y e_s es la presión de vapor de saturación a la temperatura del aire.

Para calcular la presión de vapor de saturación (e_s) a la temperatura del aire se usa la fórmula:

$$e_s = 6.112 \exp \left(\frac{17.67T}{T + 243.5} \right)$$

Donde, T es la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) y es se obtiene en unidades de hPa.

El número Richardson se expresa como la capacidad de un fluido para mantener la estructura frente a una perturbación, para ello se identifican diferentes valores del número de Richardson que pueden definir la altura de la capa límite.

A continuación, en la *Figura 4*, se muestra una tabla con los valores clasificatorios de la capa límite y sus interpretaciones tras el cálculo del número de Richardson.

$Ri < 0$	Flujo estáticamente inestable
$Ri = 0$	Régimen Neutro
$Ri > 0$	Estabilidad térmica. Flujo estáticamente estable
$Ri < 1$	Disipación < Producción La estabilidad estática no es lo suficientemente importante para compensar la producción mecánica de turbulencia (viento turbulento).
$Ri > 1$	Disipación > Producción La estabilidad estática es más importante que la producción mecánica de turbulencia (viento laminar)
$Ri < Ric = 0,25$	Inestabilidad importante. Viento turbulento $Ri = 0,25$ indica el inicio de la turbulencia
$0,25 < Ric < 1$	Inestabilidad latente.
$Ri > 1$	Viento Laminar. $Ri = 1$ Indica el fin de la turbulencia

Figura 4. Tabla de valores para la clasificación de la altura de la capa límite planetaria (Stull, 1988).

Como se representa en la *Figura 4*, $Ri > 0.25$ indica condiciones estables, estos valores están relacionados con episodios nocturnos donde la atmósfera está estratificada térmicamente, inhibiendo los movimientos verticales. El valor $Ri \approx 0.25$ es considerado el límite crítico entre la estabilidad y la inestabilidad de la capa límite planetaria (PBL).

El valor de $Ri < 0.25$ es crítico ya que indica el límite entre una atmósfera con condiciones inestables y estables, estos valores están relacionados con episodios diurnos donde se produce movimientos verticales a causa de la presencia del gradiente de velocidad del viento el cual da lugar a una mezcla turbulenta vertical.

5. SELECCIÓN DE EPISODIOS PARA EL CÁLCULO DE LA ALTURA DE LA CAPA LÍMITE PLANETARIA (PBL)

En este trabajo se ha utilizado el número de Richardson para calcular la altura de la capa límite atmosférica (PBL).

Esta altura se ha calculado para días específicos. Los días seleccionados para el cálculo del número de Richardson de la altura de la capa límite atmosférica (PBL) han sido elegidos específicamente como aquellos que superan los valores límites máximos de contaminantes publicados por El Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO), a excepción del contaminante de Dióxido de Azufre (SO₂), que al no haber excedido ningún día el valor límite legislado se ha supuesto un hipotético valor máximo considerable para poder llevar a cabo el estudio.

Los contaminantes elegidos para el estudio de este trabajo han sido aquellos que han presentado superaciones de los valores límites de contaminación en la ciudad de Huelva en los últimos años, como son PM_{2.5}, Pb y As.

En este trabajo no se han considerado para el estudio las partículas PM₁₀ debido a que su concentración tiene una importante contribución natural como por ejemplo el polvo sahariano. Sin embargo, en el caso de las partículas PM_{2.5}, sí han sido elegidas para su estudio ya que su origen es principalmente antropogénico y más perjudicial para el ser humano debido a su poder de penetración en el organismo (Sección 2.1). Igualmente, para la selección de los días en los que se ha podido exceder el nivel máximo permitido de PM_{2.5} se han excluidos los días registrados con intrusión sahariana.

5.1. Estaciones de Calidad del Aire

Los datos que se presentan más adelante han sido recogidos por las estaciones de calidad del aire ubicadas en los municipios de Moguer (código estación: ES1258A), Matalascañas (código estación: ES1878A), La Rábida (código estación: ES0892A), Pozo Dulce (código estación: ES1340A) y El Campus de Carmen (código estación: ES1658A).

Los datos proporcionados por el Ministerio de Transición y Reto Demográfico (MITECO) de las estaciones de calidad del aire nombradas anteriormente, son datos diarios para los contaminantes de Arsénico (As), Plomo (Pb) y partículas en suspensión PM_{2,5} y horario para el contaminante de Dióxido de Azufre (SO₂).

En el caso del Dióxido de Azufre (SO₂) no se ha superado el valor límite horario ningún día durante los años de 2021 y 2022, sin embargo, para el estudio de este contaminante en el presente trabajo se ha planteado estudiar los días en los que se ha superado los 100 µg/m³ por hora ya que es una concentración considerable de este contaminante.

En la Figura 5 se muestra la ubicación de las estaciones de calidad del aire las cuales han recogido los datos de contaminantes estudiados en el presente trabajo.

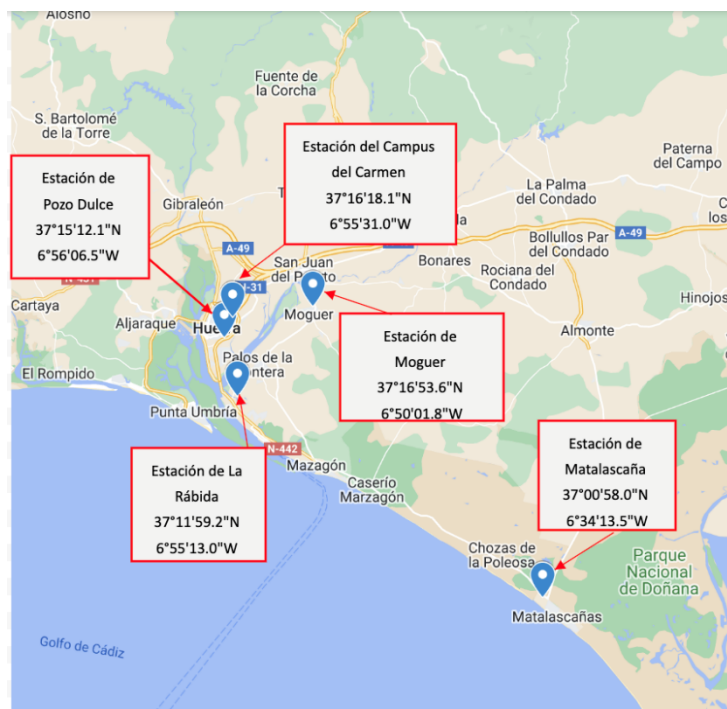


Figura 5. Ubicación de las estaciones de calidad del aire donde se han proporcionado los datos de contaminación estudiados en la provincia de Huelva. (MITECO, s.f.)

5.2. Recopilación de datos

La Ley 34/2007 regula la calidad del aire y la protección del medio ambiente (Calles et al., s.f.). La legislación española en vigor para la calidad del aire viene recogida por el Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Este Real Decreto tiene como finalidad evitar, prevenir y reducir los efectos nocivos de las sustancias mencionadas sobre la salud humana, el medio ambiente en su conjunto y demás bienes de cualquier naturaleza (R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, BOE núm. 25, del 29 de enero). Los datos oficiales de Calidad del Aire para 2021 y 2022 para el estudio de los días que han superado el máximo diario (o el máximo horario en el caso de SO₂) han sido descargados a través de la plataforma del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) y posteriormente cribado según los valores límites recogidos en el R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire.

En la Tabla 1 se muestran los días que han superado el máximo diario permitido por legislación (R.D. 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, BOE núm. 25, del 29 de enero de 2011) para las partículas en suspensión PM_{2,5} (máximo 25 µg/m³) y que se han corroborado que no son por intrusión sahariana:

Año	Código de Estación de calidad de Aire	Días	Concentración de PM2,5 registradas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2021	ES1878A	20/01/2021	27
	ES1878A	20/04/2021	24
2022	ES1340A	01/01/2022	41
	ES0892A	03/01/2022	28
	ES0892A	02/02/2022	28
	ES0892A	06/05/2022	47

Tabla 1. Días que superan el máximo permitido de partículas PM_{2,5}.

En la *Tabla 2* se muestran los días en los que se ha superado el valor límite horario de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de Dióxido de Azufre (SO₂) en la ciudad de Huelva. He de recordar que el valor límite horario legislado es 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, no se ha superado dicho límite en los años estudiados:

Año	Código de Estación de calidad de Aire	Días	Concentración de SO2 registradas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
2021	ES0892A	03/01/2021	126
	ES0892A	20/02/2021	182
	ES0892A	19/03/2021	113
	ES0892A	29/04/2021	134
	ES0892A	18/07/2021	107
	ES0892A	03/11/2021	106
2022	ES1340A	09/07/2022	129
	ES1340A	22/07/2022	201
	ES0892A	21/08/2022	110
	ES0892A	19/11/2022	198

Tabla 2. Días que superan el máximo horario planteado de Dióxido de Azufre (SO₂).

En el caso de contaminación atmosférica por Arsénico (As) se muestra en la *Tabla 3* los días que ha superado el máximo diario permitido por legislación (máximo 6 ng/m^3):

Año	Código de Estación de calidad de Aire	Días	Concentración de As registradas (ng/m ³)
2021	ES1658A	08/03/2021	88,0
	ES1658A	15/07/2021	25,0
	ES0892A	05/10/2021	27,0
	ES1878A	27/12/2021	82,0
2022	ES1658A	31/03/2022	94,0
	ES1878A	23/04/2022	76,0
	ES1658A	30/05/2022	84,0
	ES1658A	03/10/2022	75,0

Tabla 3. Días que superan el máximo permitido de Arsénico (As).

En el caso de contaminación atmosférica por Plomo (Pb) se muestra en la Tabla 4 los días que ha superado el máximo diario permitido por legislación (máximo 0,5 µg/m³):

Año	Código de Estación de calidad de Aire	Días	Concentración de Pb registradas en (µg/m ³)
2021	ES1658A	20/02/2021	24,0
	ES1658A	26/05/2021	17,0
	ES1258A	03/07/2021	62,0
	ES0892A	09/12/2021	66,0
2022	ES1878A	17/01/2022	13,0
	ES1658A	28/03/2022	36,0
	ES1658A	13/07/2022	32,0
	ES1658A	14/09/2022	49,0

Tabla 4. Días que superan el máximo permitido de Plomo (Pb).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez hecha la recopilación de los días donde se ha excedido el valor límite de la concentración de los contaminantes, se procede a la representación del perfil

vertical de la Temperatura Potencial Virtual (K) y a la representación del Número de Richardson frente a la altura (m) entre capas.

Los datos se han recopilado para cada día por la mañana (12H). Se han obviado los radiosondeos nocturnos ya que debido a las condiciones atmosféricas de estabilidad típicas de este periodo la altura de la capa límite es muy baja y el método del número de Richardson tiene más dificultades para ser calculado (referencia).

En el presente trabajo se va a representar las gráficas obtenidas durante el día en el año 2021 y 2022. Se ha calculado el número de Richardson para los días seleccionados a partir de la temperatura potencial Virtual (K) en episodios diurnos.

A continuación, se van a representar los días de 2021 y 2022 cuyos datos han sido determinados de manera diaria.

5.3.1. Representación de datos diarios 2021

20/01/2021 DIA

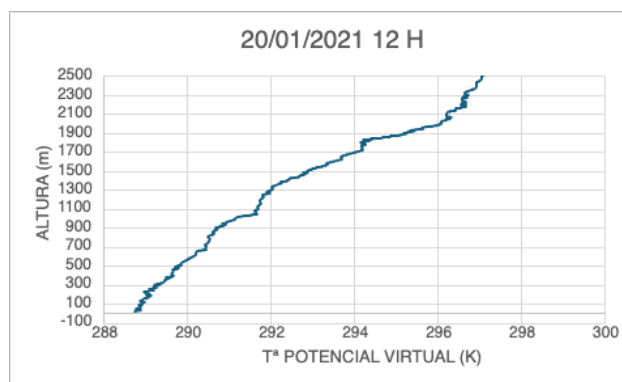


Figura 6. Perfil vertical de la Temperatura Potencial Virtual (K).

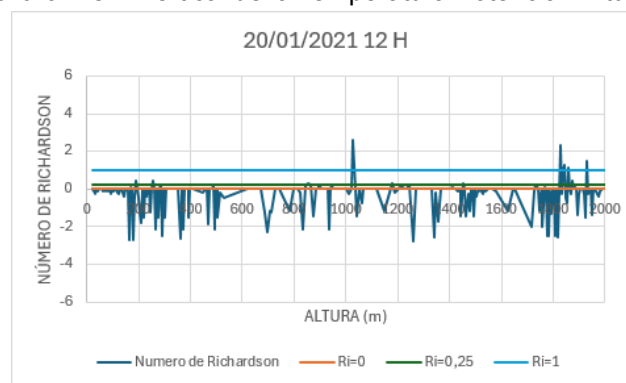


Figura 7. Representación del Número de Richardson frente a la altura(m).

20/02/2021 DIA

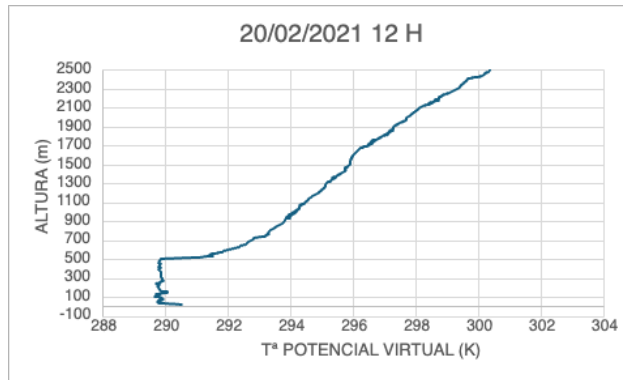


Figura 8. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

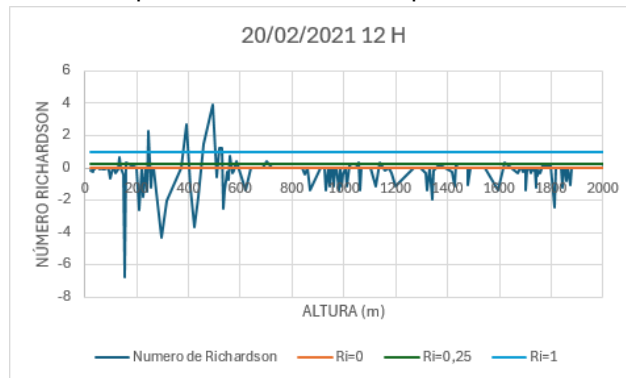


Figura 9. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

08/03/2021 DIA

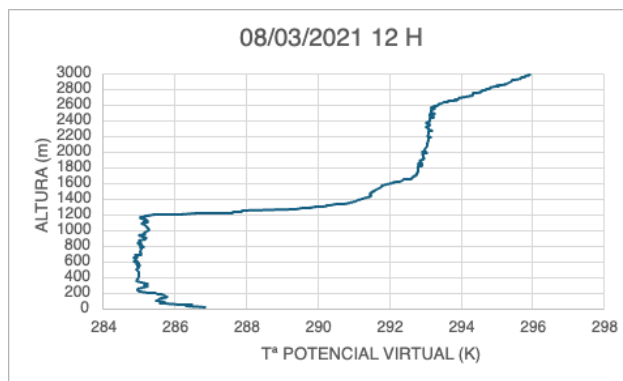


Figura 10. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

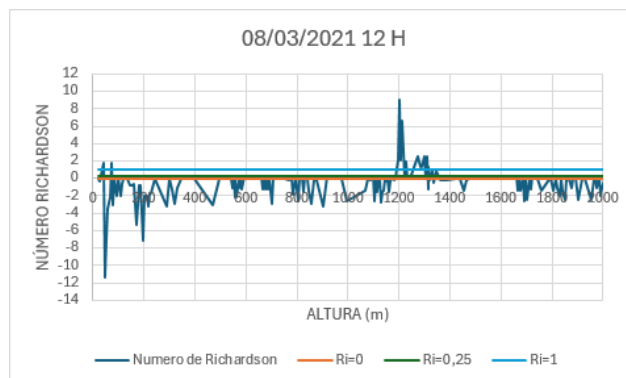


Figura 11. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

20/04/2021 DIA

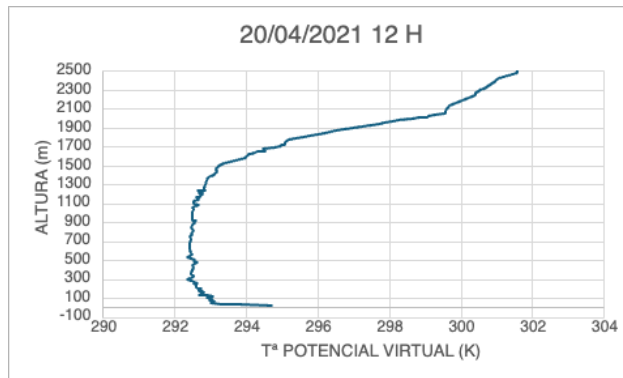


Figura 12. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K)

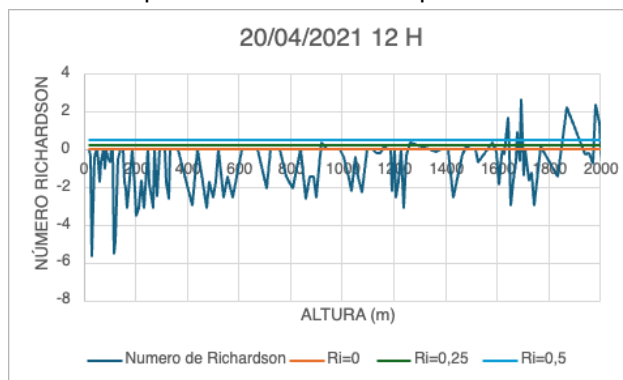


Figura 13. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

26/05/2021 DIA

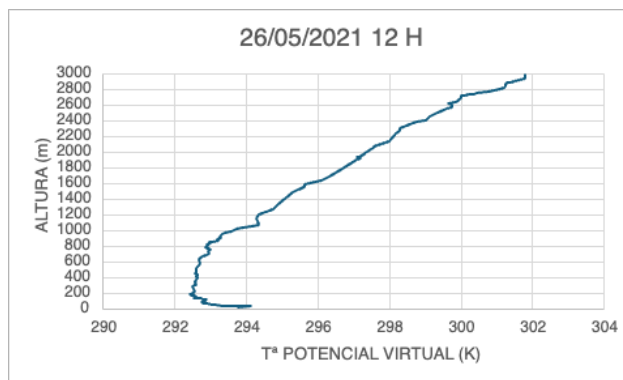


Figura 14. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

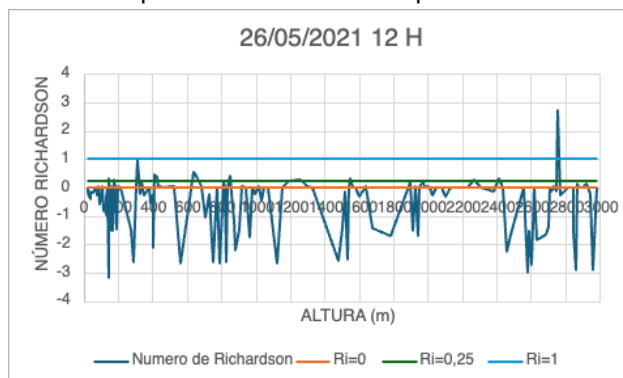


Figura 15. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

03/07/2021 DIA

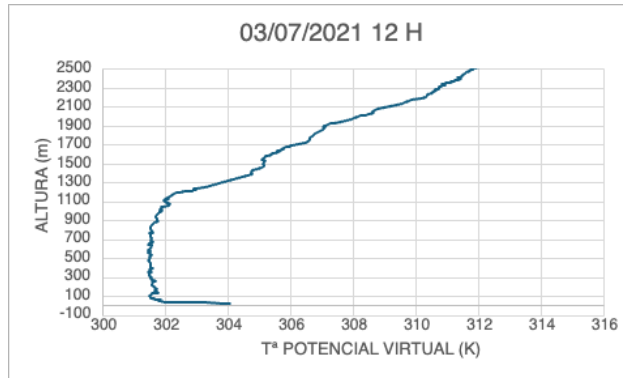


Figura 16. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

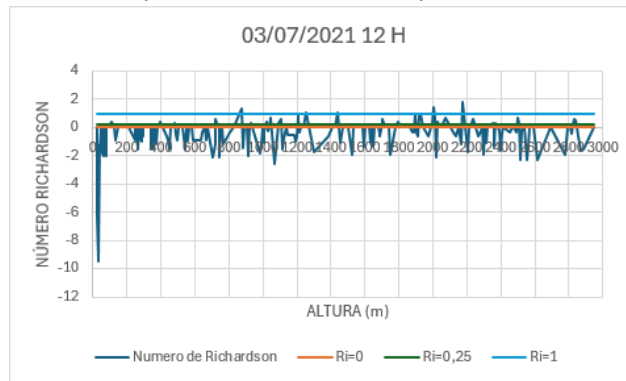


Figura 17. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

15/07/2021 DIA

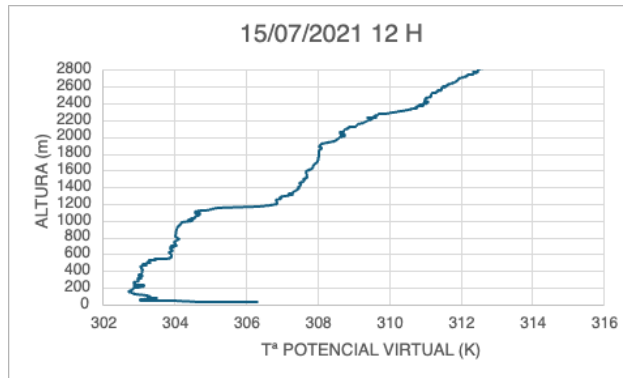


Figura 18. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

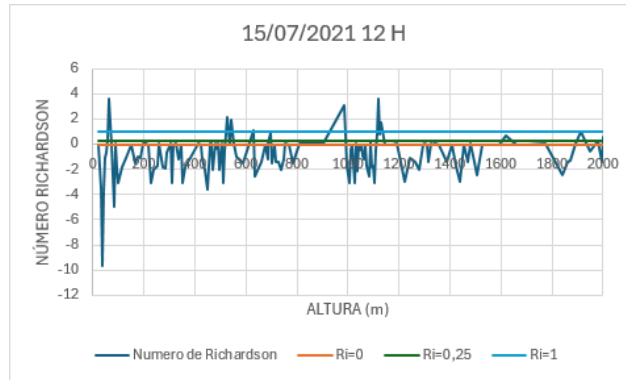


Figura 19. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

05/10/2021 DIA

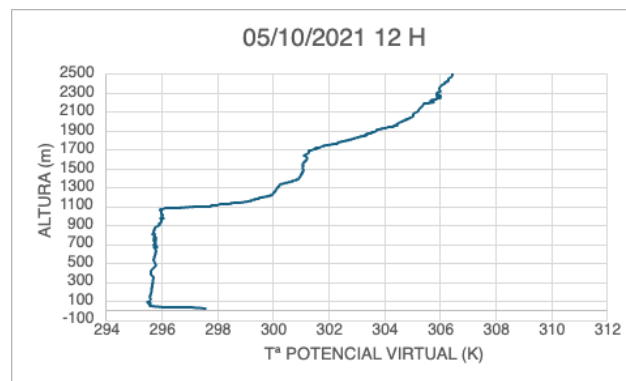


Figura 20. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

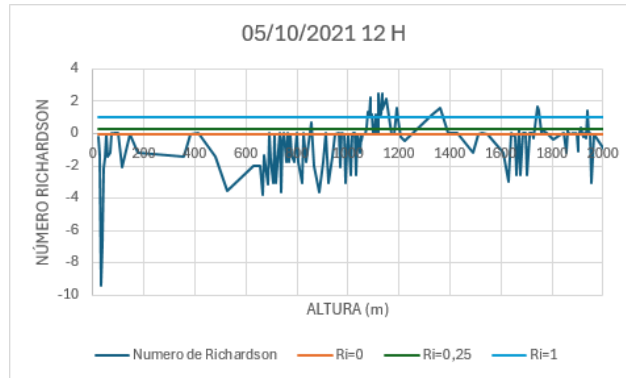


Figura 21. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

09/12/2021 DIA

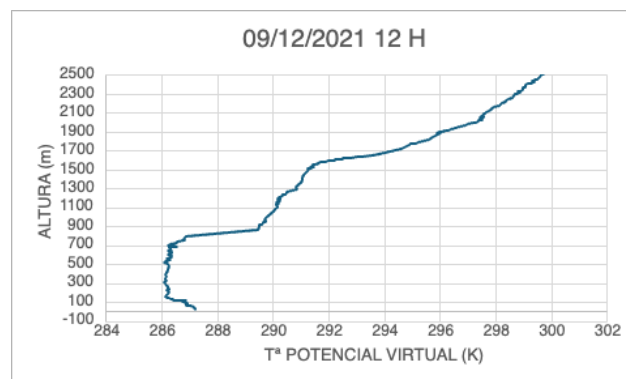


Figura 22. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

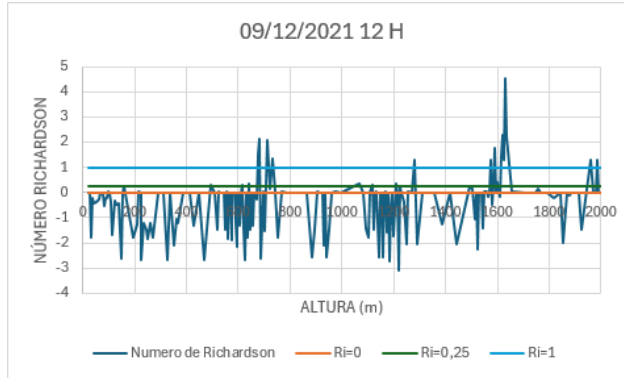


Figura 23. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

27/12/2021 DIA

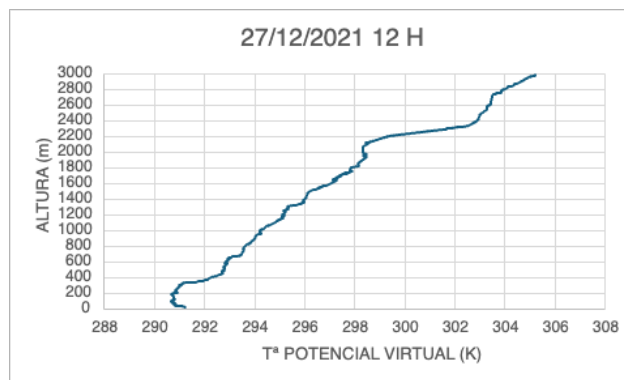


Figura 24. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

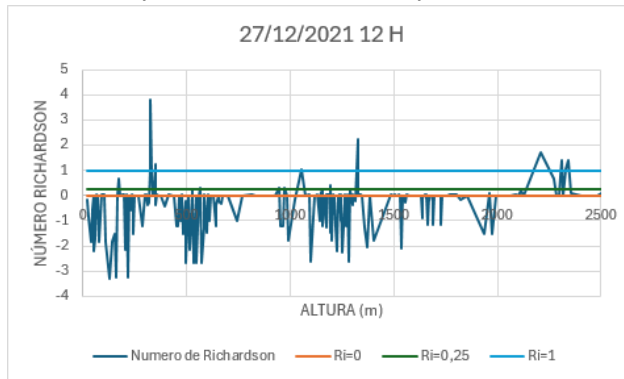


Figura 25. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

En primer lugar, se han representado las gráficas por orden cronológico. En general se observa que, durante el año 2021, hay una inestabilidad de la capa límite atmosférica (PBL). Esto es así, ya que, si se examina las gráficas de perfil de representación del Número de Richardson, dicho número tiene valores predominantemente negativos, lo que indicaría una capa atmosférica muy inestable cerca de la superficie los días registrados por sobrepasar los valores límites de contaminación.

Como ya se ha explicado con anterioridad, cuando valores del Número de Richardson son $Ri < 1$ significa una atmósfera inestable donde los movimientos

verticales están favorecidos y por tanto la dispersión de los contaminantes, reduciendo su concentración en la superficie.

Entre las parejas de figuras, por ejemplo, las Figuras 6 y 7 existe una relación que explica la altura de la PBL ya que cuando en la Figura 6 se produce un cambio de tendencia, es decir se produce una estabilidad, que significaría el fin de la PBL en esa altura. Esto coincide con el cambio de valor del Número de Richardson, en la Figura 7, ya que obtiene valores de $Ri > 1$ que indicarían una atmósfera estable y la omisión de la dispersión de los contaminantes.

Durante los meses de verano, Figuras 16 y 17 y Figuras 18 y 19, se observa una PBL inestable, pero con valores del Número de Richardson altos, estos valores alcanzan en numerosas ocasiones $Ri = 0,25$ cuyo valor es considerado crítico ya que por debajo la atmósfera tiende a ser inestable y por encima de este valor una atmósfera estable. Se puede concluir que, durante los meses de verano del 2021, la PBL fue moderadamente inestable, destacando una mayor dispersión de los contaminantes en los niveles más bajos de altura.

Durante los meses de invierno, por ejemplo, Figura 22 y 23 y Figura 24 y 25, se puede observar valores más pequeños del Número de Richardson que coinciden con valores altos de contaminación de As y Pb como se puede comprobar en las Tablas 3 y 4, sin embargo, el bajo valor del Número de Richardson para esta época del año puede coincidir con las condiciones meteorológicas propias de la estación que pueden favorecer la dispersión de estos contaminantes, con lo cual, aunque se ha registrado para esos días un valor de contaminación por encima del valor máximo legislado, existe una buena dispersión de estos.

Si se examina el día correspondiente a las Figuras 8 y 9, se puede observar una PBL más baja de lo habitual, es decir, presentaría una atmósfera más estable. Esto puede deberse a episodios de días nublados o de lluvia ya que la radiación solar es menor. Como consecuencia los niveles de contaminación en el día descrito serían mayores que los días anteriores o posteriores.

5.3.2. Representación de datos diarios 2022

01/01/2022 DIA

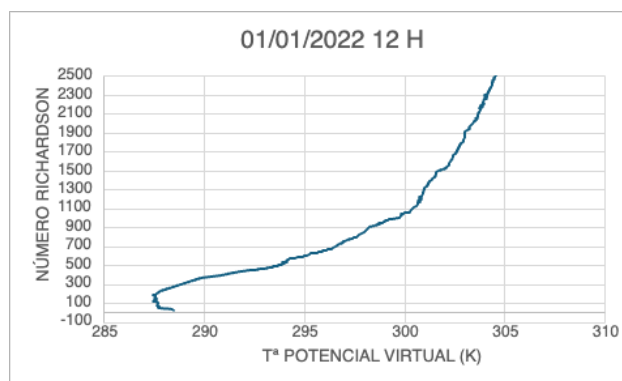


Figura 26. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

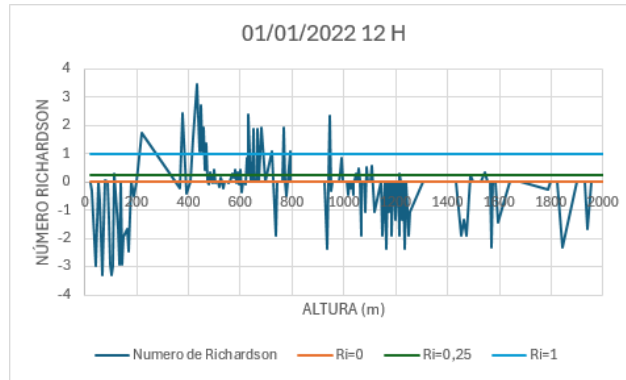


Figura 27. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

03/01/2022 DIA

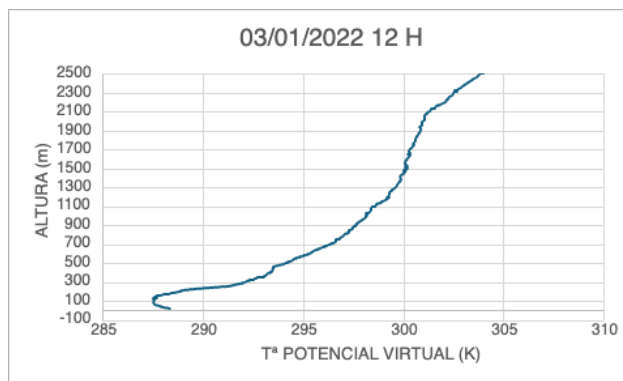


Figura 28. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

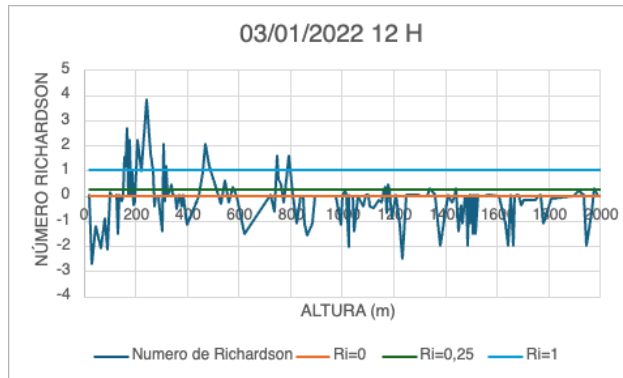


Figura 29. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

17/01/2022 DIA

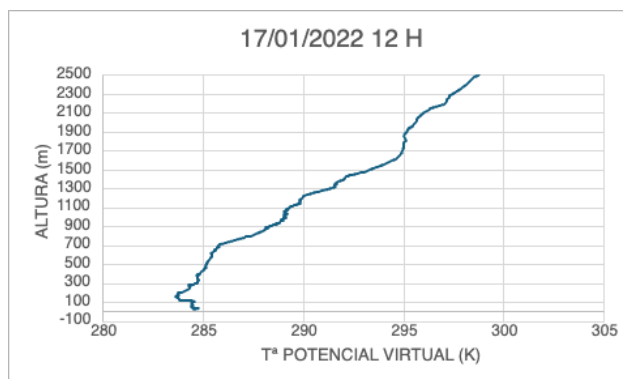


Figura 30. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

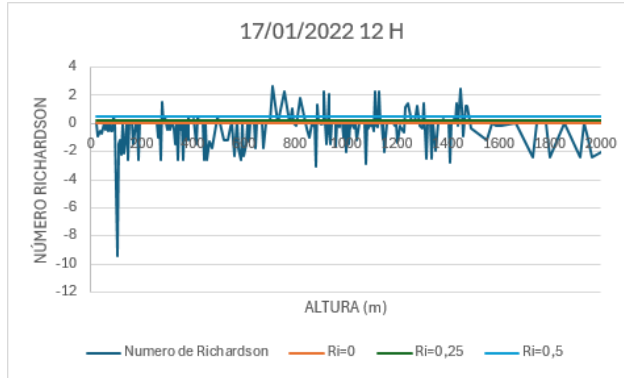


Figura 31. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

02/02/2022 DIA

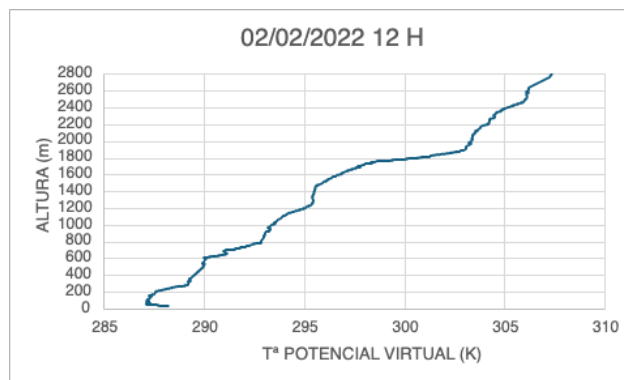


Figura 32. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

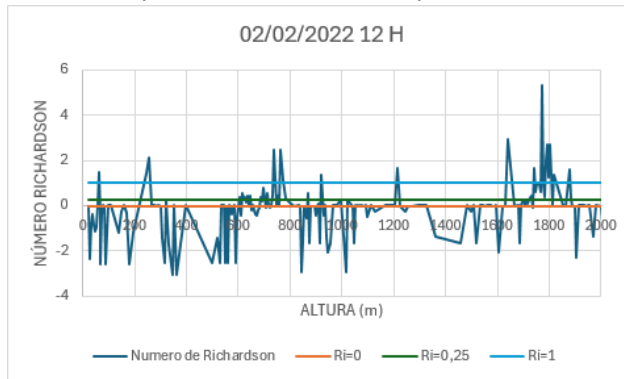


Figura 33. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

28/03/2022 DIA

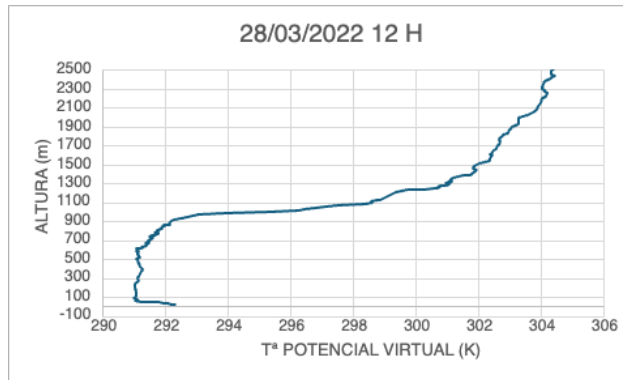


Figura 34. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

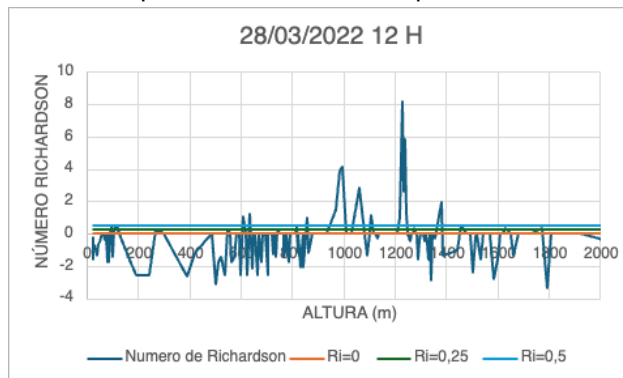


Figura 35. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

31/03/2022 DIA

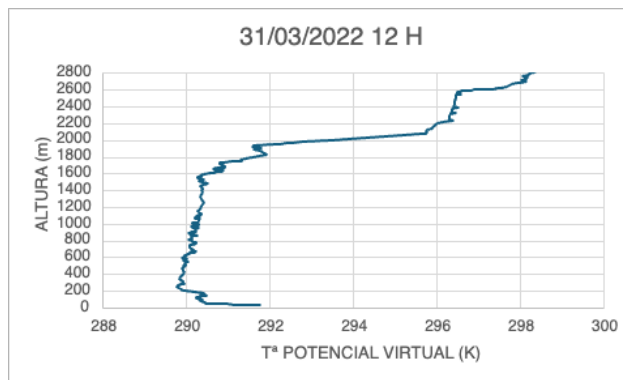


Figura 36. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

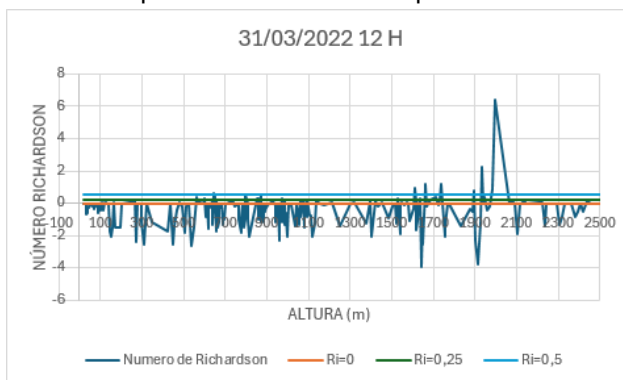


Figura 37. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.
23/04/2022 DIA

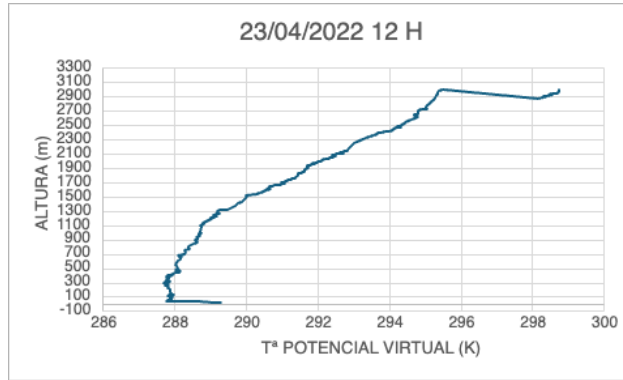


Figura 38. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

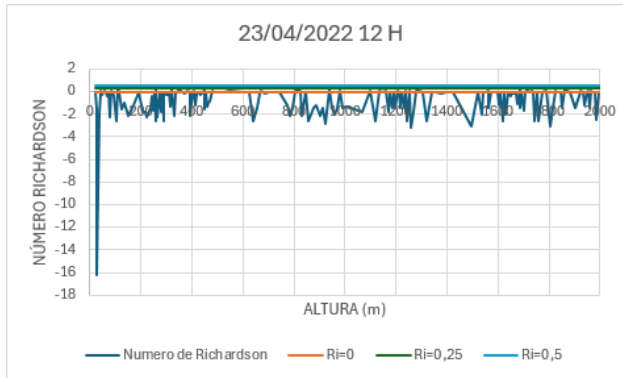


Figura 39. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

06/05/2022 DIA

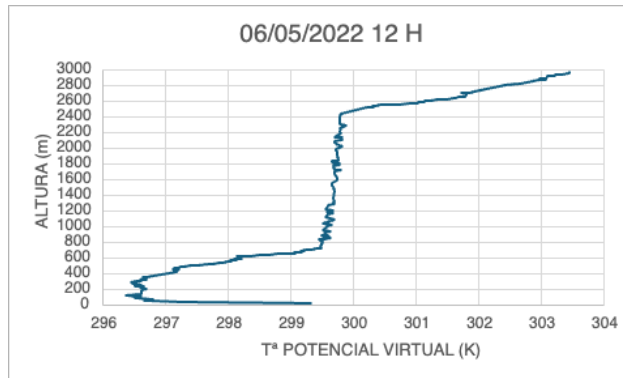


Figura 40. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

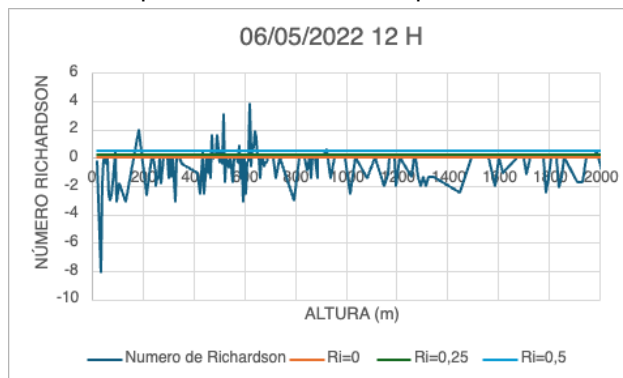


Figura 41. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.
30/05/2022 DIA

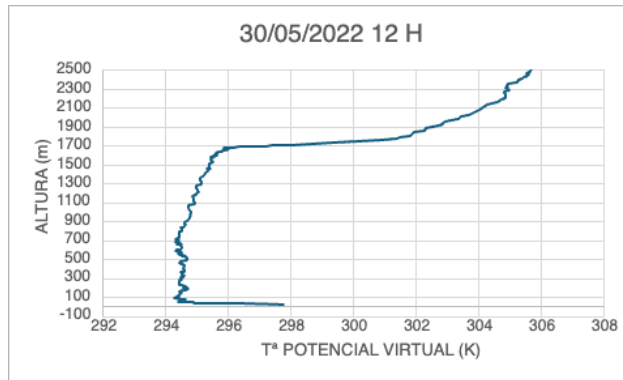


Figura 42. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

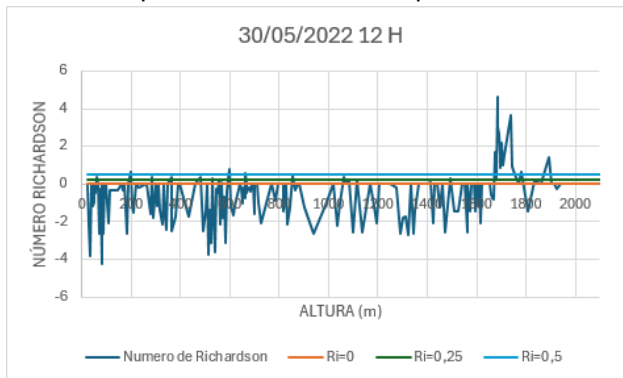


Figura 43. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

13/07/2022 DIA

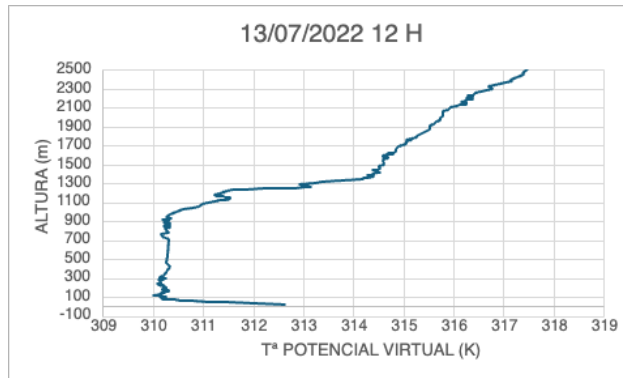


Figura 44. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

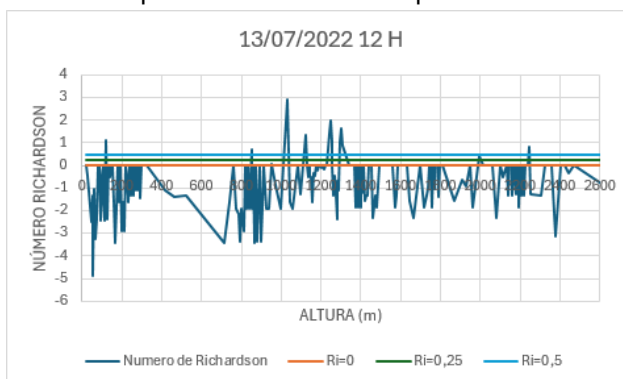


Figura 45. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

14/09/2022 DIA

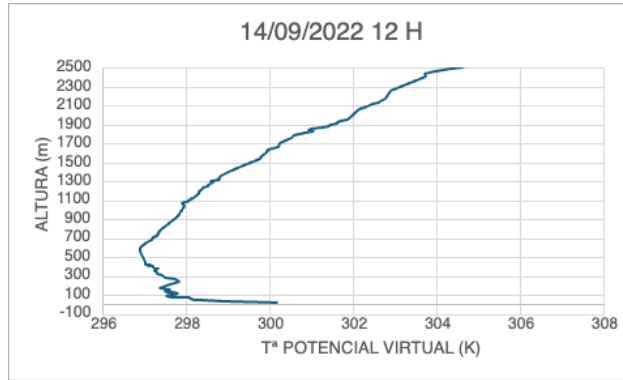


Figura 46. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

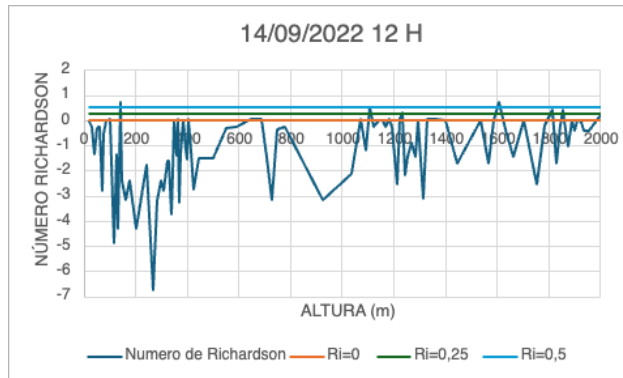


Figura 47. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

03/10/2022 DIA

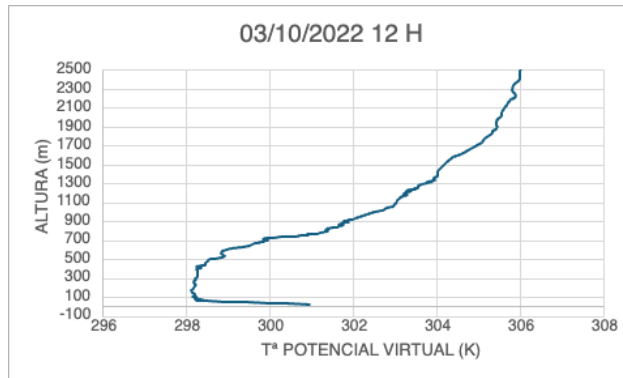


Figura 48. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

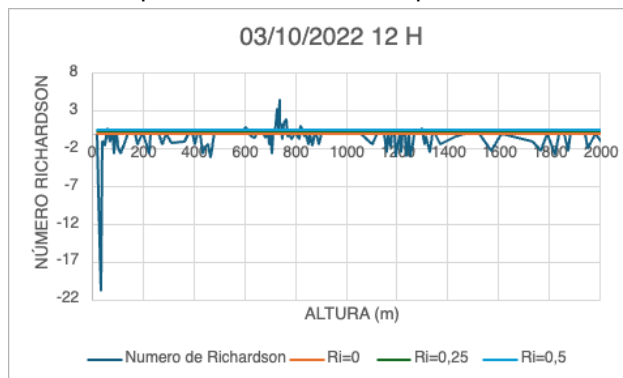


Figura 49. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

Igualmente, se han representado las gráficas por orden cronológico. En general se observa que, durante el año 2022, hay una inestabilidad de la capa límite atmosférica (PBL) los días registrados por sobrepasar los valores límites de contaminación.

Como ya se ha explicado con anterioridad, cuando valores del Número de Richardson son $Ri < 1$ significa una atmósfera inestable donde los movimientos verticales están favorecidos y por tanto la dispersión de los contaminantes, reduciendo su concentración en la superficie.

Entre las parejas de figuras, por ejemplo, Figuras 26 y 27 existe una relación que explica la altura de la PBL ya que cuando en la Figura 26 se produce un cambio de tendencia, es decir se produce una estabilidad, que significaría el fin de la PBL en esa altura. Esto coincide con el cambio de valor del Número de Richardson, en la Figura 27, ya que obtiene valores de $Ri > 1$ que indicarían una atmósfera estable y la omisión de la dispersión de los contaminantes.

Durante los meses de primavera y verano, por ejemplo, para el día correspondiente a las Figuras 42 y 43 se observa una PBL inestable, que acaba a la altura aproximada de 1700 metros con valores del Número de Richardson bajos de hasta $Ri = -4$, esto supone una situación atmosférica muy inestable y turbulenta donde los contaminantes se dispersan, con lo cual, no hay un índice de contaminación excesivo en la superficie durante el día. Igualmente, en ese día los valores del Número de Richardson alcanzan en numerosas ocasiones $Ri = 0,25$ cuyo valor es considerado crítico ya que por debajo la atmósfera tiende a ser inestable y por encima de este valor una atmósfera estable.

Por ejemplo, para el día correspondiente a las Figuras 46 y 47, se registró un valor superior al límite establecido para el Pb, se observa que la PBL acaba a la altura aproximada de 1200 metros y se registra valores del Número de Richardson bajos de hasta $Ri = -7$, lo que conllevaría a episodios muy turbulentos en la atmósfera y a la dispersión de los contaminantes en la superficie, con lo cual no habría un índice de contaminación excesivo aunque se haya superado el valor límite medido de este contaminante.

Durante los meses de invierno, por ejemplo, Figura 26 y 27 y Figura 28 y 29 se puede observar una inestabilidad de la PBL durante el cambio de altitud, sin embargo, el Número de Richardson se vuelve positivo ($Ri > 1$), que representaría episodios de estabilidad atmosférica y la omisión de la dispersión de los contaminantes que podría implicar que ese día hubiera un umbral de contaminación más alto con respecto a otros días.

Comparando los días correspondientes a las Figuras 26 y 27 y Figuras 28 y 29 donde se registró un valor superior al límite establecido en $PM_{2,5}$ con el día correspondiente a las Figuras 30-31 donde se registró un valor superior al límite establecido de Pb, se puede observar cómo en este último día la PBL acaba a la altura aproximada de 700 metros mientras que en días anteriores acaba a la altura aproximada de 300-500 metros, con lo cual, la dispersión de contaminantes diferiría junto con la altura de la PBL.

A continuación, se van a representar los días de 2021 y 2022 cuyos datos han sido determinados de manera horaria, cabe recordar que el único contaminante estudiado en el presente trabajo el cual tiene registros horarios es el Dióxido de Azufre (SO₂). Los días estudiados son los que en algún momento horario durante el día (12 H) han sobrepasado el valor hipotético de 100 µg/m³. Al lado del día estudiado se va a especificar entre paréntesis la fase horaria en la cual se sobrepasó dicho valor máximo.

5.3.3. Representación de datos horarios 2021

03/01/2021 DIA (22H)

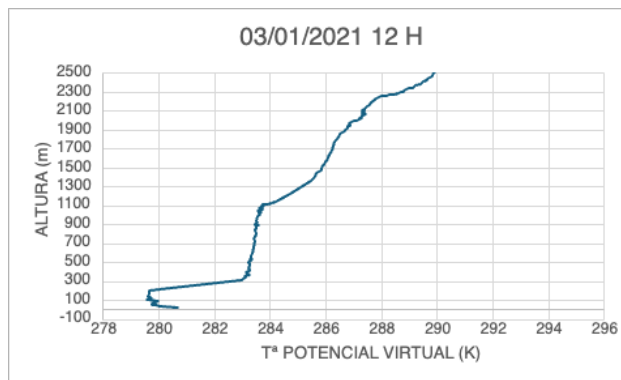


Figura 50. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

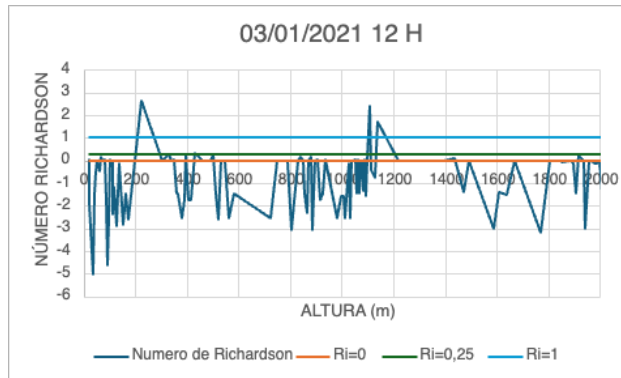


Figura 51. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

20/02/2021 DIA (21 H)

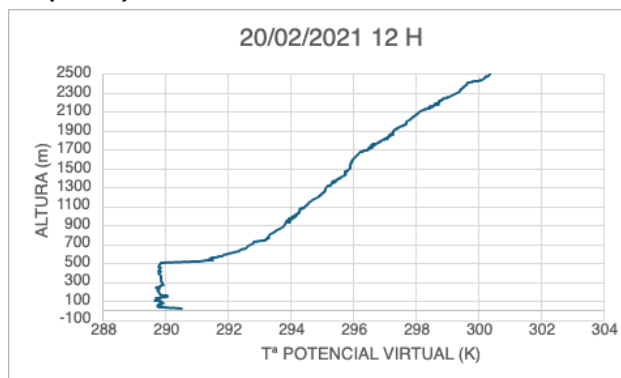


Figura 52. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

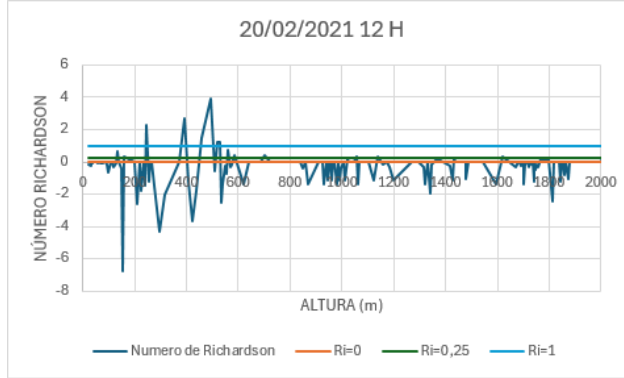


Figura 53. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

19/03/2021 DIA (18 H)

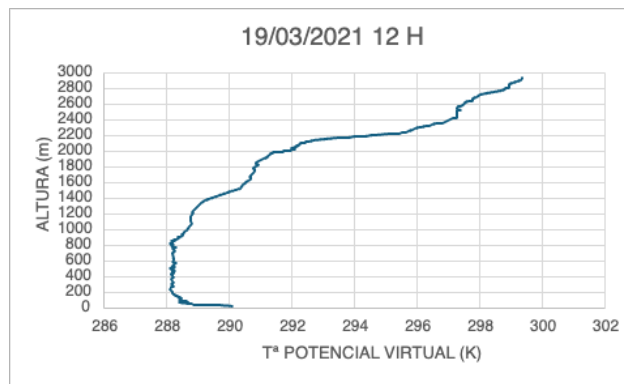


Figura 54. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

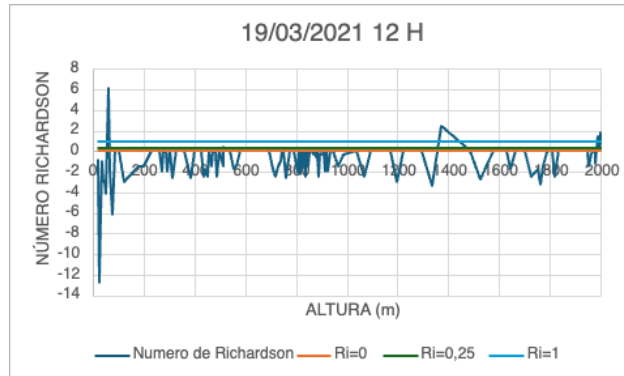


Figura 55. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

29/04/2021 DIA (24 H)

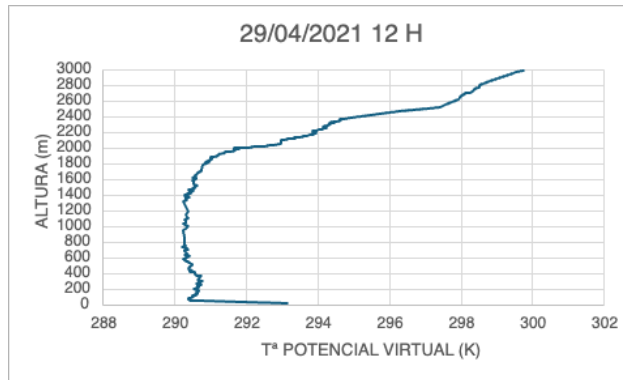


Figura 56. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

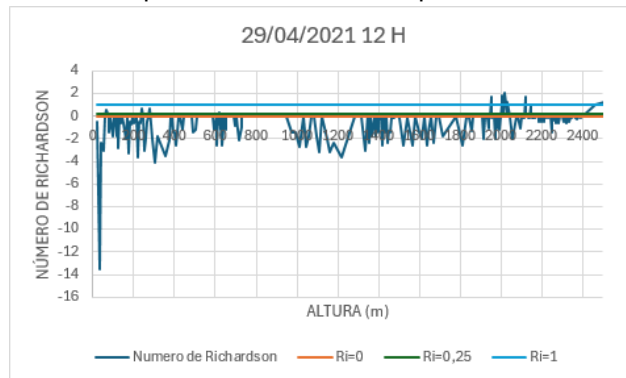


Figura 57. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

18/07/2021 DIA (23 H)

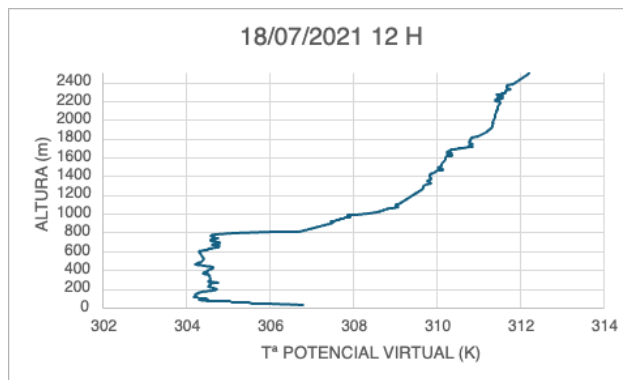


Figura 58. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

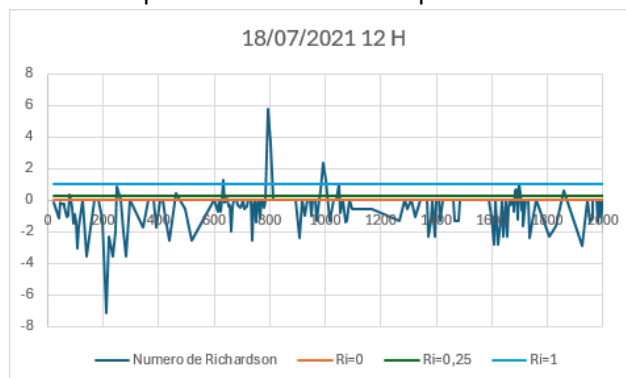


Figura 59. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

03/11/2021 DIA (19 H)

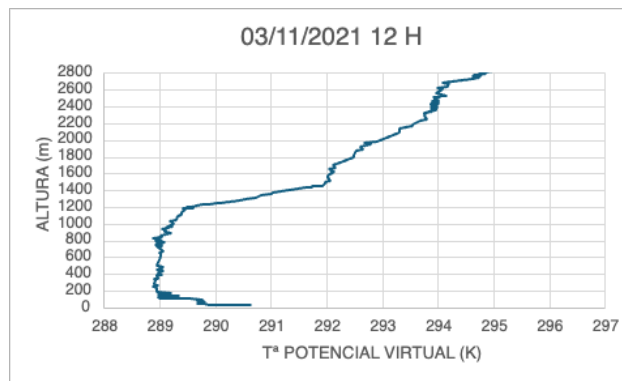


Figura 60. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

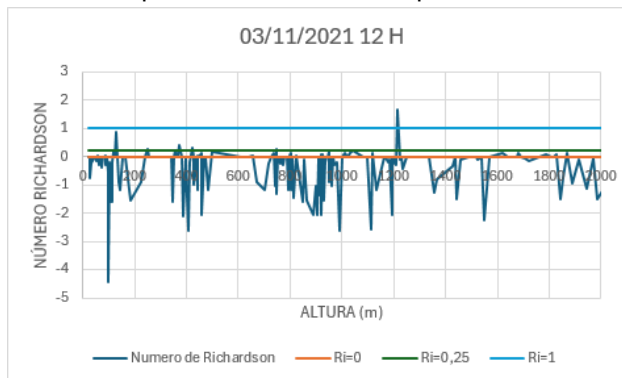


Figura 61. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

De la misma forma que anteriormente, se han representado las gráficas por orden cronológico. De manera general se observa que, durante el año 2021, hay una inestabilidad de la capa límite atmosférica (PBL) los días registrados por sobrepasar los valores límites de contaminación.

Como ya se ha explicado con anterioridad, cuando valores del Número de Richardson son $Ri < 1$ significa una atmósfera inestable donde los movimientos verticales están favorecidos y por tanto la dispersión de los contaminantes, reduciendo su concentración en la superficie.

Si se examina el día correspondiente a las parejas de figuras, por ejemplo, Figuras 50 y 51 y Figuras 52 y 53 se puede observar en la Figura 50, que la PBL acaba a una altura aproximada de 1100 metros ya que se produce un cambio de tendencia, es decir se produce una estabilidad, que significaría el fin de la PBL en esa altura. Esto coincide con el cambio de valor del Número de Richardson, en la Figura 51, debido a que en esa altura se obtienen valores de $Ri > 1$ que indicarían una atmósfera estable y la omisión de la dispersión de los contaminantes. Sin embargo, en la Figura 52 se observa que la PBL acaba a una altura aproximada de 500 metros, mucho más baja que en el día descrito anteriormente y el Número de Richardson en la Figura 53 tiene valores de $Ri < 1$. En ambos días se obtienen valores del Número de Richardson bajos lo que indicaría la presencia de turbulencias y la dispersión de contaminantes, pero si comparamos ambos días, la dispersión en el primer día sería mucho mayor que en el segundo.

Si se observa el día correspondiente a las Figuras 56 y 57 se puede apreciar una altura de la PBL muy alta de aproximadamente 2400 metros. En la Figura 57 se puede observar que el Número de Richardson tiene valores de $Ri < 0$, esto supone una situación atmosférica muy inestable y turbulenta donde los contaminantes se dispersan, con lo cual, no hay un índice de contaminación excesivo en la superficie durante el día.

Comparando los días estudiados se puede observar que en general existe una alta dispersión de contaminantes durante el día, lo cual indicaría niveles bajos de este.

5.3.4. Representación de datos horarios 2022

09/07/2022 DIA (18 H)

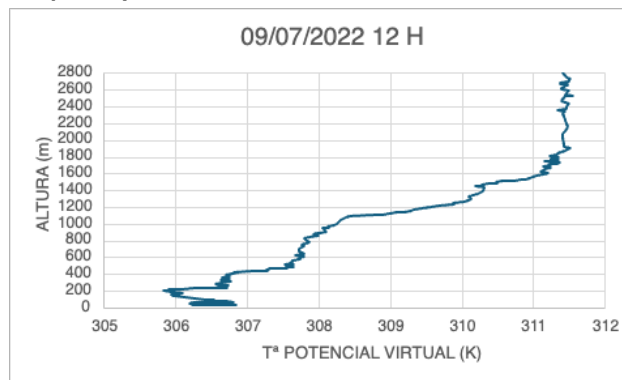


Figura 62. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

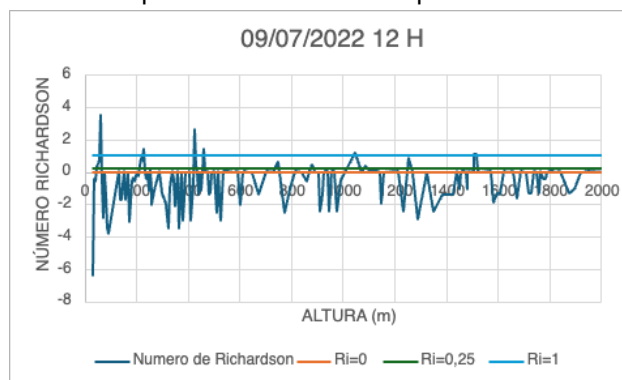


Figura 63. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

22/07/2022 DIA (13 H)

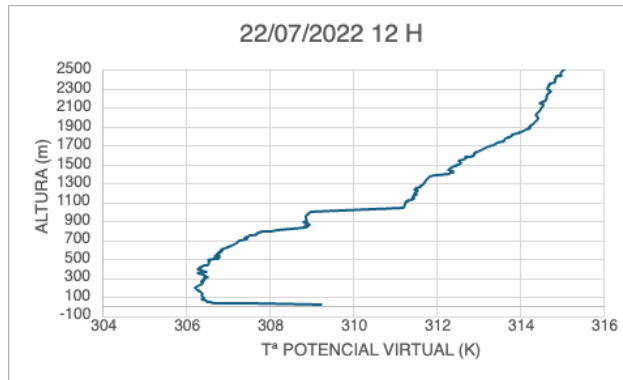


Figura 64. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

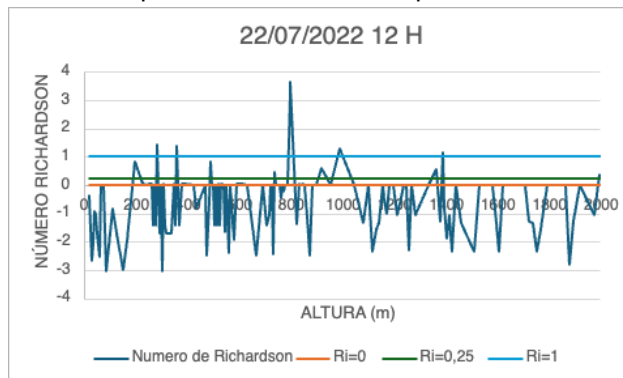


Figura 65. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

21/08/2022 DIA (22 H)

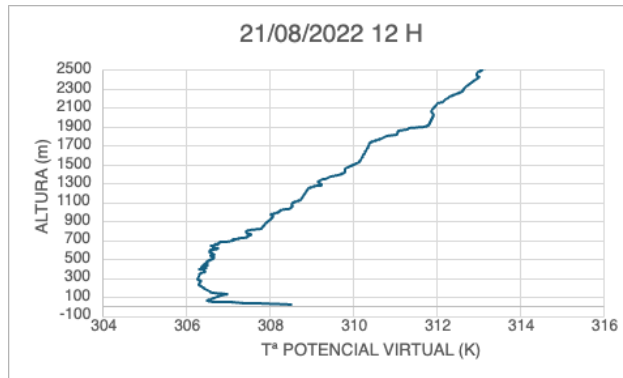


Figura 66. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

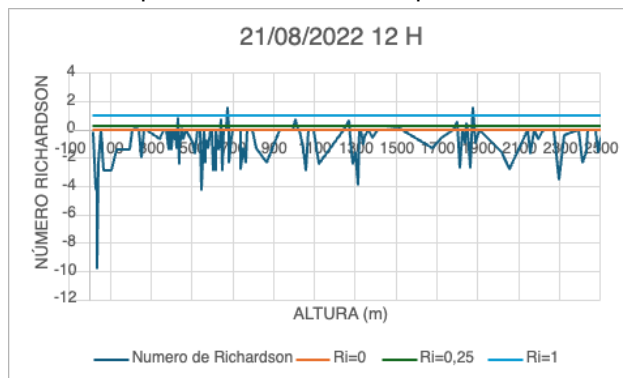


Figura 67. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

19/11/2022 DIA (03 H)

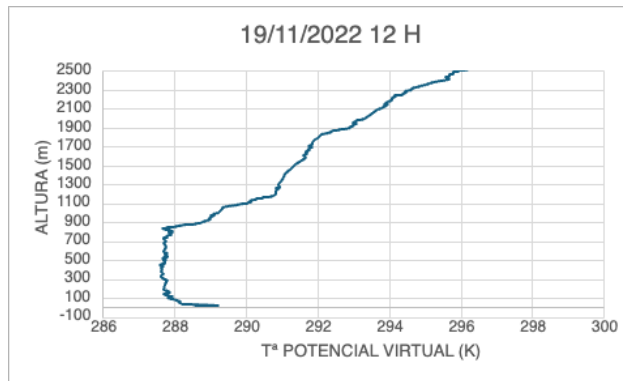


Figura 68. Perfil de representación de la Temperatura Potencial Virtual (K).

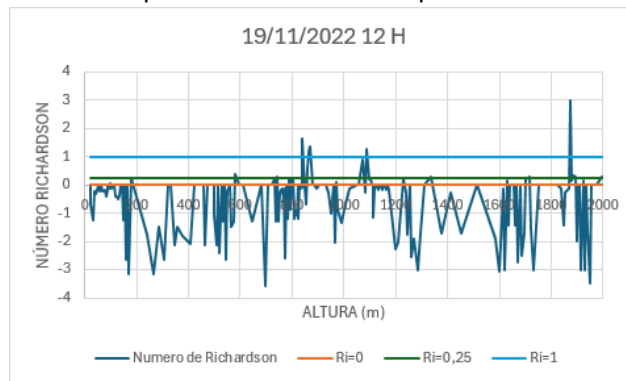


Figura 69. Perfil de representación del Número de Richardson frente a la altura.

De la misma forma que anteriormente, se han representado las gráficas por orden cronológico. De manera general se observa que, durante el año 2022, hay una inestabilidad de la capa límite atmosférica (PBL) los días registrados por sobrepasar los valores límites de contaminación.

Como ya se ha explicado con anterioridad, cuando valores del Número de Richardson son $Ri < 1$ significa una atmósfera inestable donde los movimientos verticales están favorecidos y por tanto la dispersión de los contaminantes, reduciendo su concentración en la superficie.

Comparando los días estudiados se puede observar que en general existe una alta dispersión de contaminantes durante el día, lo cual indicaría niveles bajos de contaminación de este contaminante en los días seleccionados.

Si se observa los días correspondientes a las Figuras 62 y 63 y Figuras 64 y 65, se observa un perfil similar durante los primeros metros de altitud, sin embargo, la altura de la PBL es más baja en el primer día descrito que en el segundo día, lo cual se puede interpretar que el segundo día ocurrieron episodios más turbulentos que en primer día.

En la siguiente *Tabla 5* se muestra la diferencia de la altura de la PBL de algunos de los días estudiados con respecto al día previo y posterior. Solo se han podido representar algunos días debido a que no existen datos oficiales registrados en MITECO de los días previos y posteriores a los seleccionados.

	Día Previo	Día Seleccionado	Día Posterior
	19/02/2021	20/02/2021	21/02/2021
Estación de Calidad del Aire	ES1658A		
Contaminante	Plomo (pb)		
Nivel diario de contaminante	0.03	24	0.0059
Altura aproximada de la PBL (m)	1000	600	1500
	29/05/2022	30/05/2022	31/05/2022
Estación de Calidad del Aire	ES1658A		
Contaminante	Arsénico (As)		
Nivel diario de contaminante	0.19	84	0.45
Altura aproximada de la PBL (m)	1400	1700	1200

Tabla 5. Comparación de los días seleccionados con los días previos y posteriores.

Se observa en el caso del día seleccionado de 20/02/2021 que la altura de la PBL es más baja con respecto al día previo y posterior. Esto puede ocurrir debido a las condiciones climatológicas de la estación, ya que al ser invierno posiblemente ocurriera un episodio nuboso o de lluvia que inhibiera los movimientos verticales dando lugar a una capa estable donde la concentración del contaminante es mayor. Sin embargo, en el día seleccionado del 30/05/2022, la altura de la PBL es mayor que para el día previo o posterior y como se observa, es una estación primaveral donde la radiación solar es mayor y por tanto se puede establecer una inestabilidad en la capa límite donde la dispersión de los contaminantes sea mayor.

7. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo del Trabajo de Fin de Máster, se puede concluir que los objetivos fijados para el desarrollo de este han sido culminados.

Primeramente, se analizaron los datos proporcionados por las Estaciones de Calidad de Aire ubicadas en la provincia de Huelva a partir de radiodondeos durante los años 2021 y 2022. Para hacer el estudio, se analizó los datos a las 12:00 H y a

las 0:00 H, sin embargo, posteriormente se descartaron los datos correspondientes a episodios nocturnos.

La caracterización de la PBL con los datos de radiosondeos se realizó a partir del Número de Richardson bulk, donde se ha estudiado la intensidad de las inversiones térmicas y la altura de la Capa Límite Atmosférica (PBL).

El análisis de la PBL determinó episodios de inestabilidad general durante los años estudiados, esto significaría que existe una buena dispersión de los contaminantes gracias a episodios climatológicos favorables que ocurren en provincia de Huelva. Sin embargo, se han estudiado días donde la PBL es más baja y estable, debido a que podrían haber ocurrido episodios de nubosidad o lluvias.

Se han comparado días previos y posteriores a días seleccionados con donde se observó que la altura de la PBL varía según las condiciones climatológicas debidas a las estaciones del año donde se realizó el radiosondeo.

8. BIBLIOGRAFÍA

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). (2018). Puesta en marcha de la estación automática de sondeos en Huelva. https://www.aemet.es/es/noticias/2018/12/sondeos_huelva

Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA). (2013). Cada vez que respiramos Mejorar la calidad del aire en Europa. [1831-2608] www.eea.europa.eu/es/senales

Análisis de la Calidad del Aire en España: Evolución 2001-2012. (s.f.).4. ANÁLISIS DE CONTAMINANTES PRINCIPALES.

Arasa Agudo, Raúl. (2024). *Meteorología, Dispersión de contaminantes y Modelización Atmosférica*. Medida, Análisis y Control de la Contaminación Atmosférica. Universidad de Huelva.

Arruda Moreira, G. (2018). *Studying the Planetary Boundary layer from remote sensing systems*. Tesis Doctoral. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.

Banks, R. F. (2016). *Assessment of planetary boundary-layer schemes with advanced remote sensing instruments and air quality modelling*. Doctoral Program in Environmental Engineering. Universitat Politècnica de Catalunya.

Burgos Cuevas, A. (2021). CARACTERIZACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA SOBRE LA CIUDAD DE MÉXICO. Posgrado en Ciencias de la Tierra. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Caballero Bravo, C. (n.d.). *Estudio de la capa límite planetaria y su influencia en la contaminación atmosférica*. Trabajo Fin de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad de Valladolid.

Calles, C., Fraile, R., Calvo, A.I. (s.f.). *Capa límite en león: Relación con los parámetros meteorológicos y con la concentración de contaminantes*. Departamento de Física. Universidad de León.

Daponte Codina, A., Gutiérrez-Cuadra, P., Ocaña Riola, R., Luis Gurucelain Raposo, J., Antonio Maldonado Pérez, J., Garrido de la Sierra, R., Serrano Aguilar, J., & María Mayoral Cortes, J. (1999). *EFFECTOS A CORTO PLAZO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LA MORTALIDAD: RESULTADOS DEL PROYECTO EMECAM EN LA CIUDAD DE HUELVA, 1993-96 **.

Ecologistas en Acción. (2008). ¿Qué son las PM2,5 y cómo afectan a nuestra salud? El Ecologista, nº 58. <https://www.ecologistasenaccion.org/17842/que-son-las-pm25-y-como-afectan-a-nuestra-salud/>

Lugardo, J. M. (2019). La Aemet coloca la única estación de radiosondeos de Andalucía en Huelva. Huelva Información. https://www.huelvainformacion.es/huelva/estacion-radiosondeos-aemet-huelva_0_1317768592.html

Marrero Santana, M. (2011). *Parámetros de rugosidad representativos de terrenos naturales*. Trabajo Fin de Máster. Departamento de Física Aplicada. Universidad de Granada.

Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. s.f. Metales. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/metales.html>

Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. S.f. Óxido de Nitrógeno. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.html>

Muriel Sicre, M. T. (2023). *ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE DIFERENTES MODELOS DE SIMULACIÓN METEOROLÓGICA PARA ESTIMAR EL RADIOSONDEO EN LA VERTICAL DEL CEUS EN MOGUER*. MÁSTER EN INGENIERÍA AERONÁUTICA. Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial. Universidad de León.

Navarro Diaz, G.P., Mayol, M.L., Saulo, A.C., & Otero, A.D. (2020). *SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE ESTELA A LA ESTABILIDAD DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA EN UN PARQUE EÓLICO ONSHORE DE LA PATAGONIA ARGENTINA*. Centro Argentino de Meteorólogos. ISSN 1850-468X. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe008>

Organización Mundial de la Salud. (2022). Intoxicación por plomo y salud. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

Rubino, S., (2014). *Numerical modeling of turbulence by Richardson number-based ans VMS models*. Programa Oficial de Doctorado Matemáticas. Universidad de Sevilla.

Sivaraman, C., Mcfarlane, S., & Chapman, E. (2013). *Planetary Boundary Layer (PBL) Height Value Added Product (VAP): Radiosonde Retrievals*. Climate Research Facility. [DOE/SC-ARM/TR-132]

Stull, R.B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Atmospheric Science Programme, Department of Geography. ISBN-13:978-90-277-2769-5

Unión Europea Fondo Europeo de Desarrollo Regional. (2010). *PLAN DE CALIDAD AMBIENTAL DE HUELVA Y SU ENTORNO*. Huelva. Progreso Ambiental.

Zhang, Y., Gao, Z., Li, D., Li, Y., Zhang, N., Zhao, X., & Chen, J. (2014). *On the computation of planetary boundary-layer height using the bulk Richardson number method*. Geoscientific Model Development, 7(6), 2599–2611. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2599-2014>

