

Estudio estadístico del viento en Alemania y análisis de sus implicaciones en el clima local

Álvaro Abad Santiago

Abstract

A database with meteorological variables of high temporal and spatial resolution has been collected in the territory of Germany. Of these variables, those of greatest interest for the production of wind energy have been selected: wind speed and direction, in addition to temperature due to their collateral interest. By means of programming in python, the database has been processed and mean values of the variables have been obtained to characterize, in general, their behavior in the place. Three zones have been defined in which the variables behave similarly. The behaviors of the variables have also been related to possible meteorological phenomena in the area. It has been possible to satisfactorily relate the statistical results obtained with some of the local weather phenomena, such as the *föhn*, as well as characterize each one of the zones with a better defining of the winds that are in them, thus having a base point from which to plan wind energy farms in the future.

Keywords: wind speed, wind direction, meteorology, statistics, wind power, Germany, database

1 Introducción

Uno de los puntos de avance más notable en la ciencia hoy en día se enmarca dentro de los modelos de predicción, siendo una de las ramas más importantes la relativa al clima y la meteorología (Bauer et al., 2015). El auge de la tecnología ha permitido que estos modelos sean cada día más sofisticados, permitiendo obtener más y mejores resultados, pero a cambio exigen un alto coste en recursos. Las ecuaciones que rigen los procesos que tienen lugar en la atmósfera son de naturaleza caótica (Coiffier, 2011), por lo que existen limitaciones a la hora de realizar las simulaciones: no se pueden obtener resultados con una alta resolución espacial para periodos largos de tiempo. Los modelos numéricos que realizan las operaciones necesarias se ven obligados a usar simplificaciones y aproximaciones durante el proceso de computación (Jacobson, 2005). Este es el motivo por el cual las predicciones ofrecidas por los modelos son precisas a intervalos cortos de tiempo, del orden de 5 o 6 días, y en resoluciones espaciales relativamente pequeñas, del orden de varias centenas de kilómetros cuadrados. Aumentar esta resolución espacial implica un alto coste computacional o un alto porcentaje de error (Navarro-Racines et al., 2020). Las aproximaciones que toman estos modelos son válidas en condiciones generales, y aumentar la resolución espacial implica que estas aproximaciones dejan de tener validez, pues deben adecuarse a condiciones específicas de cada territorio.

Sin embargo esto tiene dos soluciones cuyo futuro parece prometedor: la mejora de los sistemas de computación, de la mano de la computación cuántica (Kjaergaard et al., 2020) o modificar las aproximaciones que se usan para hacer fun-

cionar los modelos (Dueben et al., 2020). Éste segundo caso puede tener una solución a la vuelta de la esquina: re-análisis y machine learnig.

Los modelos climáticos y meteorológicos parten de unas condiciones iniciales (presión, temperatura, humedad, etcétera) y, con unas condiciones de contorno (si se imponen) calculan, para determinados incrementos en el tiempo, cómo han cambiado esas mismas variables. Esto es útil para la predicción: sabiendo qué ocurre hoy podremos saber qué pasará mañana; pero también se puede usar para obtener información del pasado, si sabemos que ocurrió hace un día en concreto hace 1 año, y conocemos los valores de las variables cada 6 horas, podremos obtener los valores de las variables pasadas cada hora, por ejemplo, usando los datos conocidos como condiciones iniciales y de contorno. A este proceso se le conoce como re-análisis (Parker, 20169. Este proceso sirve no sólo para aumentar la resolución temporal, sino también la espacial, partiendo de un número notablemente inferior de información, algo tremendamente útil. En el mundo de los modelos climáticos y meteorológicos el re-análisis se usa con frecuencia: primero se obtienen resultados para zonas muy amplias (por ejemplo Europa) y después se usan técnicas de re-análisis para aumentar la resolución y obtener datos, por ejemplo, para cada uno de los países (Adachi et al., 2020). Gracias a estas técnicas están surgiendo numerosas bases de datos con infinidad de información que están disponibles para su uso, pero generalmente tienen un gran problema: su tamaño. No sólo almacenar grandes cantidades de información es costoso a nivel de recursos (espacio de almacenamiento en ordenadores), sino que también lo es en cuestión de trabajar con ella. Cuando se crea una base

de datos de este estilo suele estar formada por archivos con números, única y exclusivamente. Cantidades de datos del orden de 10^9 valores es mucha información, pero de por sí no sirve para nada, es necesario obtener nueva información de todo ello.



Foto 1: Faro de Sassnitz, Rügen, invierno de 2018, *

Estas bases de datos son muy útiles, precisamente, para la obtención de esas aproximaciones locales necesarias a la hora de ampliar la resolución de modelos predictivos. Utilizando la gran cantidad de datos y procesos de machine learning, es decir, procesos de evaluación de la influencia de cada variable en el resultado final a base de prueba y error (Chatzimparmpas et al., 2020), se pueden lograr avances en este ámbito.

* Foto realizada por Axel Schuldt, portal de viajes <https://www.ruegenmagic.de>, sobre turismo en la isla de Rügen.

Libre uso siempre que se cite al autor y la página web.

Además, estas bases de datos de re-análisis pueden tener otros muchos usos. Por ejemplo una base de datos sobre días con cobertura nubosa en un determinado lugar puede dar mucha información, tanto a alguien que quiere entrar en el mundo de la energía fotovoltaica como a un turista que quiere tomar el Sol. Sin embargo aquí aparece un nuevo problema: las bases de datos, por sí solas, no proporcionan información. Es necesario no sólo que existan las bases de datos, sino que se extraiga la información de ellas y se use. A muy poca gente le sirven billones de números en unos archivos, sin embargo a mucha gente le sirve un resumen acerca del significado de esos números. En este trabajo eso haremos: coger una base de datos y transformar la infinidad de números en información útil, divulgativa y entendible.

En este caso, la base de datos la proporciona el gobierno alemán, a través de su agencia estatal de meteorología, y nosotros transformaremos los números en información relativa a los vientos más característicos del país germano analizándolos desde un punto de vista estadístico. Finalmente, utilizaremos la información obtenida para relacionar estos vientos con la temperatura y algunos fenómenos meteorológicos característicos de ciertas regiones de Alemania.

Para este estudio se han seleccionado las variables de dirección y velocidad del viento, debido a su alto interés en la actualidad en diversos ámbitos:

1. Producción de energía mediante aerogeneradores: Una de las formas de hacer frente al cambio climático es mediante la transición del uso de energías fósiles a energías renovables. Una de las más importantes es la energía eólica (Yusta et al., 2020). En Alemania los días de Sol son relativamente escasos, del orden del 20% anual (DWD, 2012), por lo que en este país la energía eólica cobra un papel principal.
2. Control del desgaste en aerogeneradores: Al igual que el resto de elementos de la naturaleza, los molinos eólicos están sometidos a las fuerzas de fricción del viento, que poco a poco los va desgastando. Para su control, es imprescindible conocer a qué condiciones se someterán los molinos antes de instalarlos (Jang et al., 2020).
3. Eficiencia energética en viviendas y edificios: La tendencia en la construcción es hacia edificios que sean más eficientes energéticamente, y esto implica que éstos deben construirse en función de las condiciones ambientales, como el viento, para favorecer la ventilación y el control de temperatura (Al Dakheel et al., 2020).
4. Transporte de aerosoles y microorganismos: Sabiendo de antemano hacia donde es más probable que se dirija el viento se pueden tomar medidas, por ejemplo, a la hora de construir fábricas o evacuar en caso de humaredas intensas por incendios (Samad et al., 2020), así como en modelos de transporte de virus o bacterias (Coccia, 2020).

Además, la temperatura en principio no es un factor importante para la generación de energía eólica, sin embargo en el caso de Alemania sí puede ser un factor a tener en cuenta. La zona más norte del país es especialmente fría, lo suficiente como para que las aguas de algunos de sus puertos se hielen en invierno o tengan lugar fenómenos como el del faro de Sassnitz (*Foto 1*).

2 Descripción experimental

2.1 Base de datos

La base de datos utilizada es una creada y proporcionada por la DWD (“*Deutscher Wetterdienst*”, o la agencia estatal alemana de meteorología) (*Krähenmann et al., 2016*). En ella se dispone de varias variables de uso común en meteorología: temperatura a 2 metros de altura, punto de rocío a 2 metros de altura, humedad relativa a 2 metros de altura, presión de vapor a 2 metros de altura, presión a nivel del mar, velocidad del viento a 10 metros de altura, cobertura nubosa, dirección del viento a 10 metros de altura, radiación directa y global y radiación de onda larga que llega y que es emitida o reflejada.

Los datos están dispuestos en forma de rejilla bidimensional en resolución espacial de 1 kilómetro, tanto en eje horizontal como vertical. Las resoluciones temporales disponibles son: horaria, diaria y mensual; durante un periodo total que abarca desde enero de 1995 hasta diciembre de 2012, ambos inclusive.

2.2 Tratamiento de la base de datos

En nuestro caso hemos tomado todos los archivos que nos proporciona la base de datos en resolución temporal horaria, durante todo el intervalo temporal disponible (1995 - 2012) para las variables de velocidad y dirección del viento. También se han cogido los archivos de temperatura, a intervalos horarios, para todos los meses de enero y julio del rango temporal total.

Los archivos originales están en formato NetCDF4, cada variable (velocidad, dirección y temperatura) está en un archivo independiente del resto de variables. Cada uno de ellos contiene toda la información relativa a un mes entero, independientemente de la resolución temporal elegida. El archivo, a su vez, se compone por una serie de matrices de dimensión $720 * 938$ datos, que son los valores de longitud en kilómetros del eje x e y, respectivamente, de la malla 2D a resolución 1km que compone el conjunto de datos. Cada una de estas redes contiene la información para una unidad de tiempo concreta, teniendo el archivo un total de N mallas, dependiendo de la resolución temporal elegida. Así, un archivo en resolución temporal mensual tiene una única malla; un archivo en resolución temporal diaria tiene entre

28 y 31 mallas, en función del mes elegido; y un archivo en resolución diaria tiene alrededor de 700 mallas.

Para este trabajo se han escogido los archivos de resolución temporal horaria, con el fin de poder contar con toda la cantidad de información posible. Estos archivos pesan, cada uno, 1GB, haciendo un total de más de 500GB de información. Mediante programación en python se ha tratado toda esta información, obteniendo de ella las gráficas y resultados que se muestran en este trabajo.

2.3 Terreno de estudio

La geografía de Alemania presenta 3 zonas principales: una “zona costera” que linda con los mares Báltico y del Norte, una “zona norte” con amplias llanuras y una “zona sur”, formada por zonas montañosas y multitud de accidentes geográficos. Esta orografía hace que cuanto más en el interior estemos más fuerzas de rozamiento sufran las corrientes de aire que se mueven por el terreno. Además, la cercanía de la cordillera de los Alpes, así como los Montes Metálicos (la frontera natural entre Alemania y la República Checa) hace que, en determinados puntos, haya rachas muy fuertes de viento que se amortiguan rápidamente. También cabe destacar la cuenca del Río Rin, una gran zona de valle donde, a diferencia de sus alrededores, el viento sopla sin tanto rozamiento.

Estas diferencias geográficas también implican cambios en función de las estaciones. Las zonas costeras presentarán menor amplitud térmica que las de interior, y las zonas de montaña serán notablemente más frías que las de llanuras. Así, veremos los cambios que tenemos al estudiar a nivel general en todo el territorio y por zonas. En ambos casos veremos las diferencias existentes al estudiar mes a mes o al aglutinar los datos por estaciones.

Esta distinción geográfica hace que, a la hora de obtener los resultados, se haya decidido tratar el conjunto de datos de dos formas diferentes:

1. Conjunto general (Figura 1): Aquí se ha estudiado todo el territorio indistintamente de la geografía.
2. Por zonas (Figura 2): Debido a las claras diferencias geográficas, se ha decidido estudiar cada una de ellas por separado para ver las diferencias entre ellas:
 - (a) Zona costera: Se ha definido como zona costera aquella que comienza en la línea de costa y acaba 30 km en dirección opuesta al mar, a excepción de la península de Jutlandia que se ha considerado ella entera como zona costera. Esta es la zona donde las influencias de la tierra firme son pocas y los vientos tienen un comportamiento “original”, es decir, sin rozamientos terrestres.
 - (b) Zona norte: Se ha definido como la franja de terreno entre el fin de la zona costera y la mitad del país. Esta distinción se ha realizado dado

que es en ese punto donde termina la zona de llanuras alemanas para dar comienzo a una zona más montañosa, boscosa y escarpada. Las ciudades que más o menos hacen frontera, por estar colocadas en lo que podría llamarse una frontera natural, son: Köln, Dortmund, Hannover, Leipzig y Dresden; de la forma que se indica en la (Figura 2).

- (c) Zona sur: Se ha definido como la zona que se extiende desde el fin de la zona norte hasta las fronteras de Alemania en los Alpes. Es un territorio que se caracteriza por ser extremadamente irregular. Presenta zonas muy escarpadas y montañosas, algunas de ellas con exuberantes bosques. También presenta la cuenca del Río Rin, que crea un valle gigantesco, comenzando en la provincia de Alsace-Lorraine (Alsacia-Lorena) pasando por la ciudad de Strasbourg (Estrasburgo) y continuando por la frontera entre los estados federales de Baden-Württemberg (Badén-Wurtemberg) y Rheinland-Pfalz (Renania-Palatinado). Además, en la parte más meridional del país germano, se encuentra parte de la cordillera de los Alpes, de las más altas de Europa. Aunque las zonas más elevadas de la cordillera están ya bien entradas en los países vecinos de Austria y Suiza, la influencia del macizo montañoso es elevada en el terreno. También en esta zona tenemos otros dos sistemas montañosos importantes como los Montes Metálicos en la frontera con la República Checa o el Harz en el corazón de Alemania, que crean puntos de vientos veloces y zonas con un alto rozamiento.

Para cada una de las zonas descritas anteriormente se ha hecho la media de cada mes, utilizando todos los valores horarios originales. Una vez obtenidos los resultados mensuales se ha hecho la media de los meses con igual nombre, con el fin de obtener una visión global de cuál es el comportamiento general de los vientos en cada mes. Así evitamos en la medida de lo posible la influencia en los resultados de eventos aislados como consecuencia de eventos meteorológicos concretos, como, por ejemplo, las tormentas, para centrarnos en la tónica general y útil para la generación de electricidad. Después, se han realizado ajustes de los valores de la velocidad a distribuciones de Weibull. Posteriormente, se han estudiado en conjunto los valores de velocidad y dirección del viento para ver sus efectos sobre la región y relacionarlos, junto con un estudio de los datos de temperatura de la base de datos, con algunos de los eventos meteorológicos de la región.



FIGURA 1: Mapa del territorio de Alemania, *

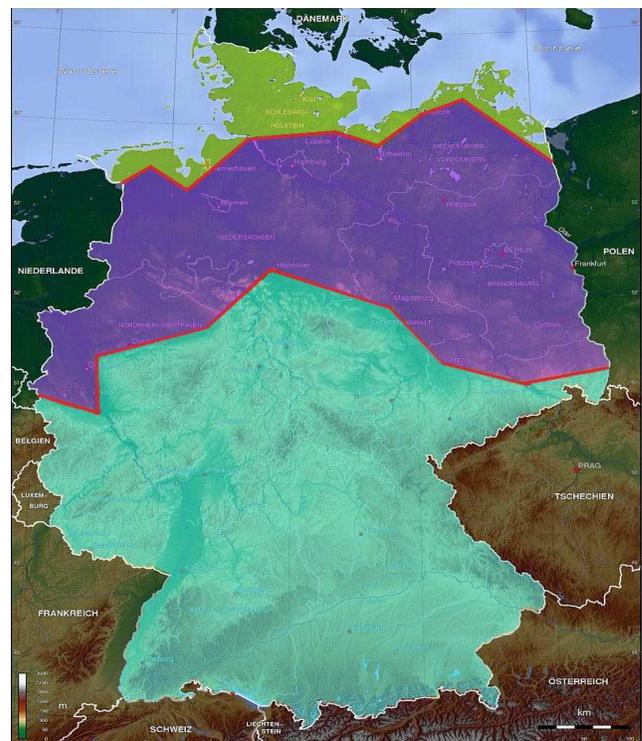


FIGURA 2: Mapa del territorio de Alemania dividido por zonas. En verde claro la zona costera, en morado la zona norte y en azul la zona sur.

* Botaurus-stellaris / CC BY-SA

TABLA 1: Tabla de clasificación en función de las velocidades de viento.

Clase de la energía eólica	Potencial del recurso energético	Densidad media anual de energía eólica a 10m (W/m^2)	Velocidad media anual del viento a 10m (m/s)
1	Muy pobre	0-200	0.0-4.0
2	Pobre	200-300	4.0-5.0
3-4	Bueno	300-500	5.0-6.0
5-6	Muy bueno	500-800	6.0-7.0
7	Excelente	>800	>7.0

2.4 Clasificación de viento

El rendimiento en la producción energética con aerogeneradores está directamente relacionado con la velocidad del viento. Así, en función de esta variable se puede describir la potencia del viento como la variable de interés a la hora de estudiar dónde colocar centrales eólicas. Una clasificación de potencias muy utilizada es la que proporciona la NREL (“National Renewable Energy Laboratory”, Colorado, EEUU) (Bailey et al., 1997). Esta clasificación es muy útil y pragmática a la hora de estudiar, al detalle, un terreno de interés. Sin embargo, dada la generalidad de nuestro trabajo, usaremos una versión adaptada de la clasificación (Tabla 1) donde se generaliza en términos de la utilidad de un viento en función de su velocidad (Heimiller et al., 2009).

Lo ideal, pues, es construir centrales eólicas en lugares que presenten velocidades medias anuales superiores a los 5 m/s. Velocidades inferiores, aunque pueden ser utilizadas para la producción de electricidad, su rendimiento es muy bajo. Mediante la ley de potencia de perfil de viento (ecuación 2) se puede extrapolar las velocidades a 10 m de altura, conociendo así la velocidad del viento en niveles superiores, pudiendo utilizar esta misma tabla y sus valores de densidad de energía para conocer el rendimiento en diferentes alturas.

3 Fundamento teórico

Debido a la naturaleza de este trabajo las ecuaciones utilizadas son aquellas de uso común en estadística (Sachs, 1978).

3.1 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2) es un valor estadístico que indica la medida de relación existente entre una variable

dependiente y las variables independientes. Toma valores entre -1 y 1 , siendo cualquiera de ellos muestra de la buena relación entre las variables; y siendo el valor 0 la medida de la total independencia entre las variables comparadas. En el caso de una regresión lineal, un valor de R^2 negativo implica proporcionalidad inversa entre las variables, mientras que un valor positivo implica proporcionalidad directa entre las variables.

Se calcula elevando al cuadrado el coeficiente de correlación de Pearson ($r_{x,y}$):

$$(r_{x,y})^2 = \left(\frac{n \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \right)^2 \quad (1)$$

Con x_i, y_i los valores de las variables y n el número total de variables.

3.2 Ley de potencia de perfil de viento

Esta ley relaciona las diferentes velocidades que presenta el viento en función de su altura, para un punto concreto del espacio.

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

Donde v es la velocidad del viento a la altura z , v_r y z_r son los valores de velocidad y altura referencia y α es una constante que en condiciones de estabilidad neutra toma el valor $1/7$.

3.3 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull (llamada así por el científico sueco Waloddi Weibull) es una función matemática dependiente de dos parámetros con la siguiente expresión:

$$f(x, k, c) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{x}{c} \right)^{k-1} e^{-(x/c)^k} \quad (3)$$

Para valores de x mayores o iguales a 0 . Si x es menor, la función toma el valor 0 . El parámetro k , que siempre cumple $k > 0$, es considerado como el parámetro de forma. Esto significa que de su valor depende la forma de la distribución. En cambio c , que cumple también que $c > 0$ siempre, es el parámetro de escala, dependiendo de su valor cómo de estrecha o recogida es la representación de la función. En nuestro contexto, el parámetro k nos indica cómo son, en conjunto, los vientos. Valores de $k > 3$ indican valores de viento moderados y regulares.

Para la obtención de los parámetros utilizaremos el método de probabilidad acumulativa (Pérez et al., 2004). Éste consiste en representar una transformación logarítmica de la distribución:

$$\ln[-\ln(1 - F(v))] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (4)$$

Con:

$$F(v) = \frac{1}{N + 1} \tag{5}$$

Donde v es la velocidad, N es el número total de datos e i es la posición de cada valor de la velocidad cuando todos ellos se ordenan de menor a mayor, siendo $i = 1$ el más pequeño de todos ellos e $i = N$ el mayor.

Representando $\ln(v)$ en el eje de abscisas y $\ln[-\ln(1 - F(v))]$ en el de ordenadas, se obtienen los parámetros k (de la pendiente) y c despejando, una vez obtenido k , la ordenada en el origen.

4 Resultados

En primer lugar, como ya se ha hablado en la descripción experimental, los datos obtenidos originalmente están distribuidos en forma de rejilla 2D con un valor numérico para cada una de las variables por kilómetro cuadrado y por hora. Así, en primer lugar, se han obtenido valores medios mensuales para hacer más abarcable el estudio de los datos. Dadas las diferencias que hay entre las variables, primero vamos a hacer una descripción general de cada una de ellas.

4.1 Análisis de la velocidad del viento

En el apéndice A1 se muestra, con un código de colores, los resultados obtenidos en las medias mensuales para la velocidad del viento de todo el intervalo temporal de estudio en cada punto de la red. Así, podemos hacernos una idea visual de cómo va a ser nuestro estudio. En ellas se ve, de forma más clara, la diferencia entre las zonas geográficas de las que hablamos anteriormente. Además, podemos ver los meses más y menos activos en viento.

Así, podemos distribuir de varias formas el conjunto de datos para obtener algo más que una vista general:

1. Por un lado se observa una dependencia geográfica. Las zonas costeras presentan velocidades de viento superiores a las del resto del territorio. La zona centro del país presenta vientos más livianos y en la parte sur del país, la más montañosa, presenta lugares de velocidades altas, que coinciden con los puntos geográficos más elevados. Además, es posible diferenciar, en la zona centro del país, una zona “norte” con vientos más veloces y una zona “sur” con vientos más lentos.
2. Por otro lado también se observa una dependencia temporal. Las estaciones de otoño e invierno presentan velocidades mucho más elevadas que la primavera y el verano.

4.1.1 Análisis para todo el territorio

Al analizar los resultados obtenidos para todo el territorio en todo el intervalo temporal (Cowlin et al., 2009) (Tabla 2) en conjunto nos encontramos con una variedad de resultados muy grande. Los valores medios de viento varían entre los 3 y los 4 m/s, pero con desviaciones estándar muy altas, cercanas al 25% del valor medio. Como vemos, los valores de viento son muy dispersos, más aún en la franja enero-marzo y en la franja octubre-diciembre. Por el contrario, los meses de la franja abril-septiembre presentan una notable menor dispersión (Figura 3). En el interior de las cajas de color azul se encuentra la mitad de los valores, es decir, la frontera inferior de la caja es el primer cuartil y la frontera superior el tercer cuartil. También está indicado el segundo cuartil, o mediana, como una línea en torno al centro de la caja y su valor numérico se muestra en la parte superior del diagrama. Los bigotes se extienden hasta el percentil 90 y el percentil 10, en la parte superior e inferior respectivamente.

TABLA 2: Velocidades medias mensuales para el análisis en todo el territorio, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Enero	4.0	1.0
Febrero	4.0	1.0
Marzo	3.9	0.9
Abril	3.4	0.7
Mayo	3.2	0.7
Junio	3.0	0.7
Julio	3.1	0.7
Agosto	2.9	0.7
Septiembre	3.0	0.8
Octubre	3.3	0.9
Noviembre	3.5	0.9
Diciembre	3.9	0.9
Anual	4.1	0.8

1. Análisis de todo el territorio por estaciones

En este caso (Tabla 3 y Figura 4) vemos que la dispersión en los valores de la velocidad es notablemente mayor en los meses de invierno y otoño, mientras que en primavera

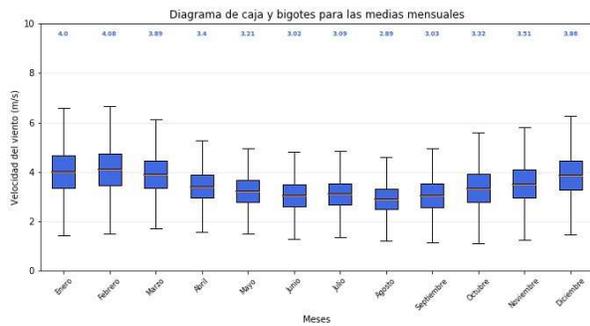


FIGURA 3: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias por meses para todo el intervalo temporal.

TABLA 3: Velocidades medias mensuales agrupadas por estaciones para el análisis en todo el territorio, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Invierno	4.0	1.0
Primavera	3.2	0.7
Verano	3.0	0.7
Otoño	3.6	0.9
Anual	4.1	0.8

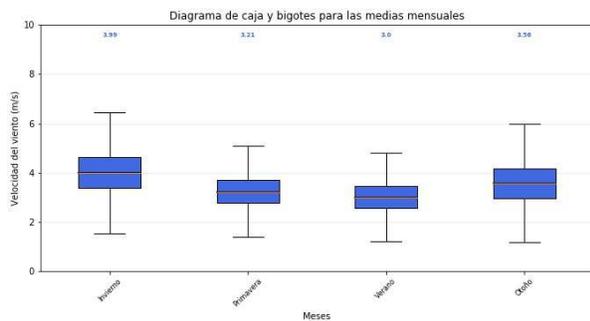


FIGURA 4: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias por estaciones para todo el intervalo temporal en todo el territorio.

y verano los valores están mejor definidos. Esto coincide con la experiencia común, dado que las grandes borrascas e inestabilidad son predominantes en los meses fríos (Rockel et al., 2007).

2. Ajuste a una distribución de Weibull

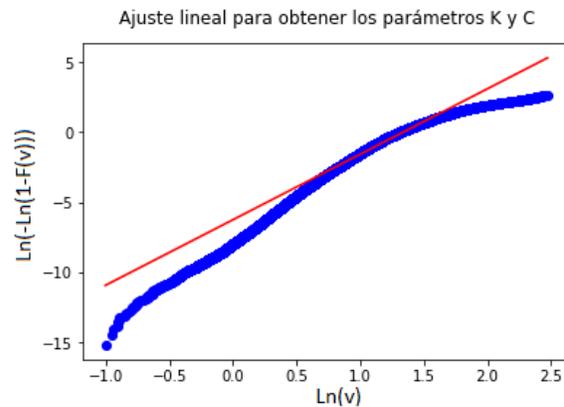


FIGURA 5: Gráfica con los valores ajustados a la ecuación 6 y la recta de ajuste para todo el territorio.

TABLA 4: Parámetros de la distribución de Weibull obtenidos con el ajuste a la ecuación 6 (Figura 5) para el territorio completo.

Intervalo temporal	Parámetro k	Parámetro c (m/s)	R ²
Enero	4.90	0.23	0.99
Febrero	5.06	0.22	0.99
Marzo	5.54	0.23	0.98
Abril	5.70	0.27	0.98
Mayo	5.59	0.28	0.98
Junio	5.22	0.30	0.97
Julio	5.40	0.30	0.98
Agosto	5.29	0.31	0.98
Septiembre	5.01	0.30	0.98
Octubre	4.76	0.27	0.98
Noviembre	4.80	0.26	0.98
Diciembre	4.98	0.24	0.99
Anual	4.68	0.26	0.97

De los resultados obtenidos con el ajuste para obtener los parámetros de Weibull (Tabla 4 y Figura 15) se observa que, en conjunto, los valores de k y c no dependen del mes a analizar, sino que se comportan de manera parecida. Aunque el valor del parámetro c es muy similar si se ajusta mes a mes o en conjunto, vemos que no ocurre lo mismo con el

parámetro k . Éste es notablemente más pequeño al hacer el ajuste global. El parámetro de k nos indica la forma de la curva de distribución. Cuanto mayor es el valor de k más pronunciado es el pico, lo que significa que más regulares son nuestros vientos. Al juntar todos los valores, el número de valores anómalos, es decir, alejados de la media, aumenta, haciendo que, en conjunto, la curva sea menos pronunciada en los extremos (Figura 6). El valor c es una medida de cómo de veloces son los vientos. La regresión lineal realizada (Figura 5) demuestran una linealidad en los valores representados mediante el coeficiente de determinación cercano a 1 en todos los rangos. Sin embargo, al analizar el conjunto completo este valor disminuye, comparado con el análisis mes a mes. Esto corrobora que cada mes se comporta de una manera y, al juntar todos los datos, la linealidad se ve afectada. A pesar de la aparente no linealidad de la figura 5, la gran mayoría de los datos experimentales se encuentran en la zona común de las representaciones.

Así, es lógico que, en conjunto, los valores de c sean parecidos, dado que los valores medios de velocidad son similares, pero unos meses presentan más anomalías (meses de inestabilidad) y otros menos. Al sumar todos los valores, la curva se hace más suave, al aislar ciertos meses ésta es más brusca.

Diagrama de barras de velocidades con la distribución de Weibull

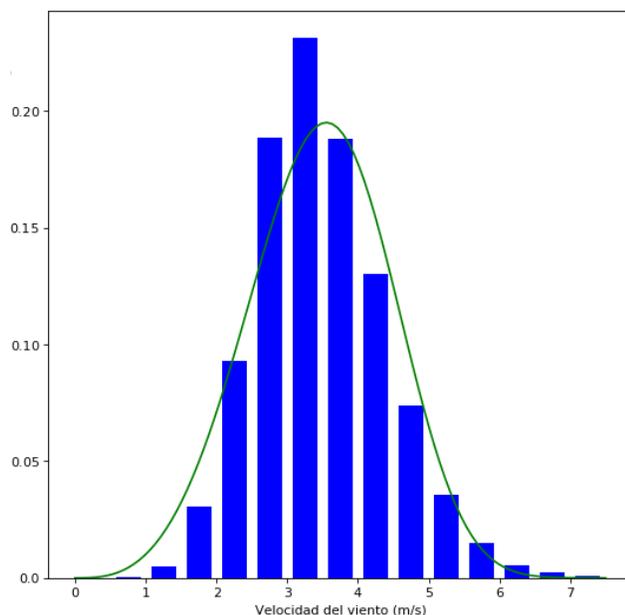


FIGURA 6: Representación de un diagrama de barras con las velocidades y la curva de distribución para todo el intervalo temporal en el territorio completo.

4.1.2 Análisis para la zona costera

Al analizar únicamente la zona costera se aprecian diferencias notables al estudio de todo el territorio (Tabla 5). En primer lugar la media es ligeramente superior a la media total, pero más destacable es que en todos los meses el valor medio en la velocidad costera es superior al del territorio en general. Esto significa que, efectivamente, la zona costera presenta velocidades de viento superiores a la del resto del territorio en conjunto (Della-Marta et al., 2008). En lo referente a la desviación estándar media, ésta es una décima menor que en el caso global. También es mucho más homogénea en cuanto a los valores que toma. Esto significa que, dentro de los rangos lógicos en los que sopla el viento, en esta zona la dispersión es más constante: no hay grandes diferencias entre los vientos, es decir, zonas en las que el viento sople significativamente más que en otras, o menos. En esta región el viento sopla de una manera más o menos homogénea. También se observa un patrón de dependencia de la velocidad del viento en función del tiempo, en los intervalos de estaciones, aunque menos acusado que en el caso anterior (Figura 7).

TABLA 5: Velocidades medias mensuales para el análisis en la zona costera, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Enero	4.9	0.9
Febrero	5.2	0.8
Marzo	4.9	0.8
Abril	4.3	0.7
Mayo	4.0	0.7
Junio	4.0	0.7
Julio	3.9	0.7
Agosto	3.7	0.7
Septiembre	3.9	0.7
Octubre	4.2	0.8
Noviembre	4.4	0.8
Diciembre	4.6	0.8
Anual	4.4	0.7

1. Análisis de la zona costera por estaciones

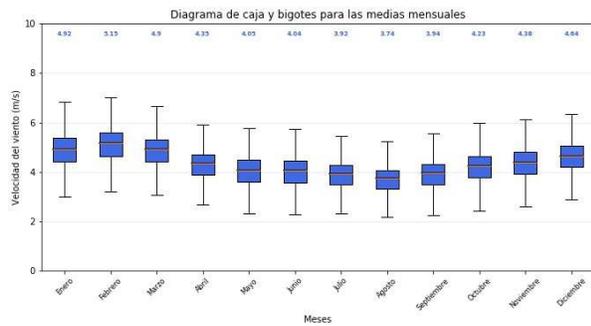


FIGURA 7: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias mensuales para todo el intervalo temporal en la zona de costa.

TABLA 6: Velocidades medias mensuales para el análisis en la zona costera, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Invierno	5.0	0.8
Primavera	4.1	0.7
Verano	3.9	0.7
Otoño	4.4	0.8
Anual	4.4	0.7

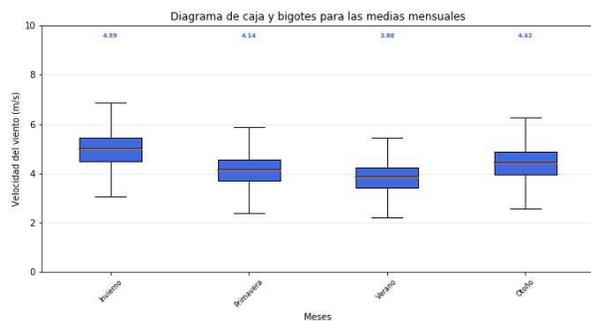


FIGURA 8: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias mensuales para todo el intervalo temporal en la zona de costa.

En este caso observamos un patrón en la velocidad dependiente del tiempo (Figura 8 y Tabla 6). Como en el caso anterior, los meses abril-septiembre presentan vientos más livianos que el resto del año, pero en este caso, a diferen-

cia del análisis total, vemos que las dispersiones son más homogéneas. También hay diferencia entre las estaciones, dando mayor dispersión las épocas frías debido a la inestabilidad atmosférica, pero los valores de la misma entre los meses de verano y de invierno no es tan distante como lo era en el caso global.

El hecho de aislar esta zona para su análisis ha resultado en algo positivo, pues los valores más constantes de dispersión demuestran que estas zonas se comportan de una manera similar en lo que a rangos de velocidad se refiere.

2. Ajuste a una distribución de Weibull

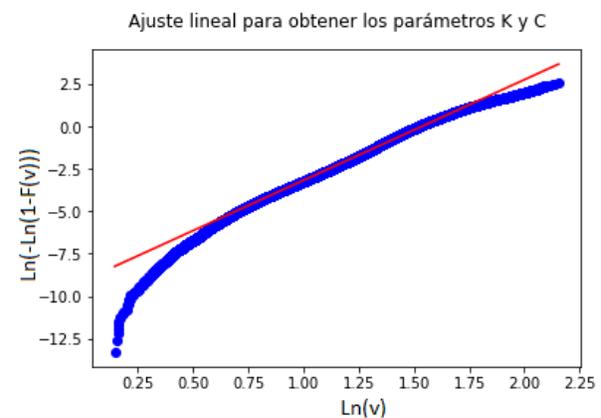


FIGURA 9: Gráfica con los valores ajustados a la ecuación 6 y la recta de ajuste para los valores costeros.

Al igual que en el caso anterior, el parámetro de forma k toma un valor notablemente inferior a los que toma en el caso de ajustar mes a mes, mientras que el parámetro c se mantiene más o menos constante. Sin embargo, se nota una diferencia en los valores que toma el coeficiente de determinación. En este caso es, en todos los análisis, igual o superior al del territorio completo (Tabla 7, Figuras 9 y 10). En este caso, nuevamente, se puede ver cómo el separar la zona costera y analizarla por separado han mejorado los resultados obtenidos.

4.1.3 Análisis para la zona norte

El análisis de los datos de la zona norte nos muestra, al igual que para el análisis costero, las particularidades de esta zona que en el análisis global no se podían percibir (Tabla 8 y Figura 11). La velocidad media del viento en este sector es notablemente inferior a la global y a la costera, al igual que la desviación estándar.

La velocidad media inferior se debe a que en esta zona el rozamiento que sufre el aire al desplazarse por el territorio le va restando energía y, por tanto, su velocidad disminuye. Estos valores, mes a mes, son inferiores a los valores costeros. La desviación estándar, también mes a mes, es menor

Tabla 7: Parámetros de la distribución de Weibull obtenidos con el ajuste de a la ecuación 6 (Figura 9) para la zona costera.

Intervalo temporal	Parámetro k	Parámetro c (m/s)	R ²
Enero	6.645	0.191	0.990
Febrero	7.102	0.184	0.991
Marzo	7.341	0.194	0.992
Abril	7.442	0.220	0.994
Mayo	6.654	0.231	0.994
Junio	6.556	0.233	0.993
Julio	6.750	0.241	0.992
Agosto	6.565	0.253	0.992
Septiembre	6.264	0.239	0.992
Octubre	6.201	0.222	0.990
Noviembre	6.338	0.214	0.988
Diciembre	6.690	0.203	0.987
Anual	5.927	0.215	0.993

Diagrama de barras de velocidades con la distribución de Weibull

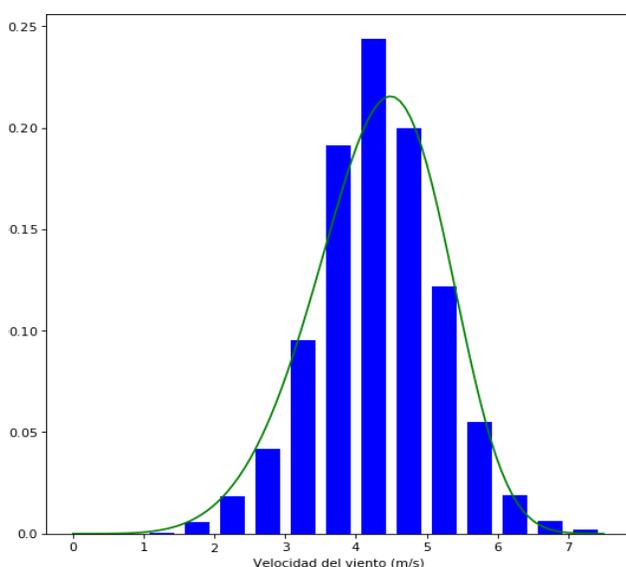


Figura 10: Representación de un diagrama de barras con las velocidades y la curva de distribución para todo el intervalo temporal en la zona de costa.

que en el caso anterior. Esto nos muestra que las zonas de interior no sólo tienen vientos más suaves, sino que, en conjunto, son mucho más constantes que en la costa. En las llanuras los movimientos de aire se deben principalmente a las grandes corrientes circulatorias, por lo que tienen patrones más definidos que en la zona costera, donde las brisas marinas o la temperatura relativa entre el océano y la tierra puede generar corrientes locales de aire.

Nuevamente el análisis de esta zona en particular nos muestra resultados más concisos que analizando el territorio en general y, como en los casos anteriores, se pueden ver ciertas diferencias por estaciones, aunque en este caso es más sutil. Los meses de invierno y otoño presentan mayores velocidades medias y mayores desviaciones estándar que los meses de primavera y verano y, al igual que en los casos anteriores, se debe a la inestabilidad propia de estos meses.

Tabla 8: Velocidades medias mensuales para el análisis en la zona norte, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Enero	4.1	0.7
Febrero	4.2	0.7
Marzo	4.0	0.7
Abril	3.4	0.6
Mayo	3.2	0.6
Junio	3.1	0.6
Julio	3.1	0.6
Agosto	2.9	0.5
Septiembre	3.1	0.5
Octubre	3.4	0.7
Noviembre	3.6	0.7
Diciembre	3.9	0.7
Anual	3.5	0.6

1. Análisis de la zona norte por estaciones

Del análisis por estaciones (Tabla 9) podemos ver que, junto a una media de velocidad baja, también hay una desviación estándar baja y más homogénea que en los casos anteriores. Esto se debe a la fricción del terreno llano, que provoca que aunque pueda haber rachas de viento más fuertes, la tendencia es a que el rozamiento implique vientos

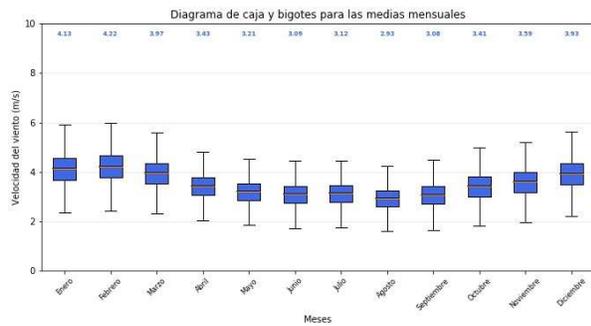


FIGURA 11: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias mensuales para todo el intervalo temporal en la zona norte.

TABLA 9: Velocidades medias por estaciones para el análisis en la zona norte, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Invierno	4.1	0.7
Primavera	3.2	0.6
Verano	3.0	0.6
Otoño	3.6	0.7
Anual	3.5	0.6

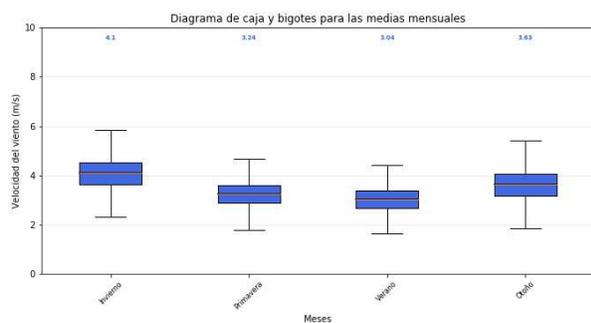


FIGURA 12: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias por estaciones para todo el intervalo temporal en la zona norte.

suaves durante la mayor parte del año. Además, la regularidad del terreno favorece que el viento siempre se mueva en un mismo arco de velocidades (Figura 12).

También se aprecia la diferencia entre las velocidades me-

dias en cada estación, aunque nuevamente esta diferencia es mucho más sutil que en los casos anteriores.

2. Ajuste a una distribución de Weibull

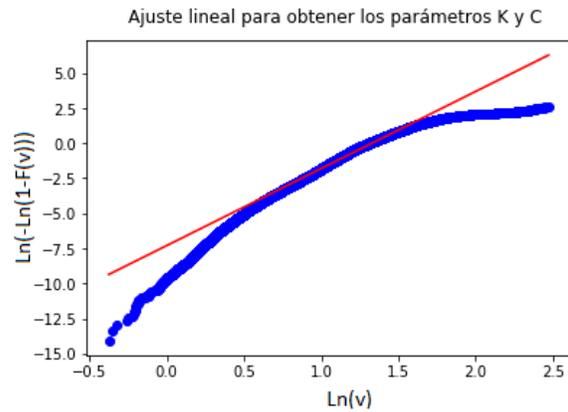


FIGURA 13: Gráfica con los valores ajustados a la ecuación 6 y la recta de ajuste para los valores de la zona norte

TABLA 10: Parámetros de la distribución de Weibull obtenidos con el ajuste de a la ecuación 6 (Figura 13) para la zona costera.

Intervalo temporal	Parámetro k	Parámetro c (m/s)	R ²
Enero	6.336	0.227	0.990
Febrero	6.683	0.223	0.990
Marzo	6.976	0.238	0.990
Abril	7.015	0.274	0.990
Mayo	6.698	0.292	0.989
Junio	6.488	0.303	0.990
Julio	6.540	0.301	0.991
Agosto	6.507	0.320	0.990
Septiembre	6.266	0.304	0.991
Octubre	6.071	0.274	0.990
Noviembre	6.022	0.260	0.989
Diciembre	6.242	0.239	0.989
Anual	5.496	0.265	0.982

Al igual que en los casos anteriores, el factor de forma k es menor en el ajuste con todos los valores del sector que en los ajustes por meses, y el parámetro c es muy parecido en

todos los casos. Nuevamente un alto valor del coeficiente de determinación nos indica que los valores de viento de esta zona se ajustan bien a una distribución de este tipo (Tabla 10 y Figura 14).

Diagrama de barras de velocidades con la distribución de Weibull

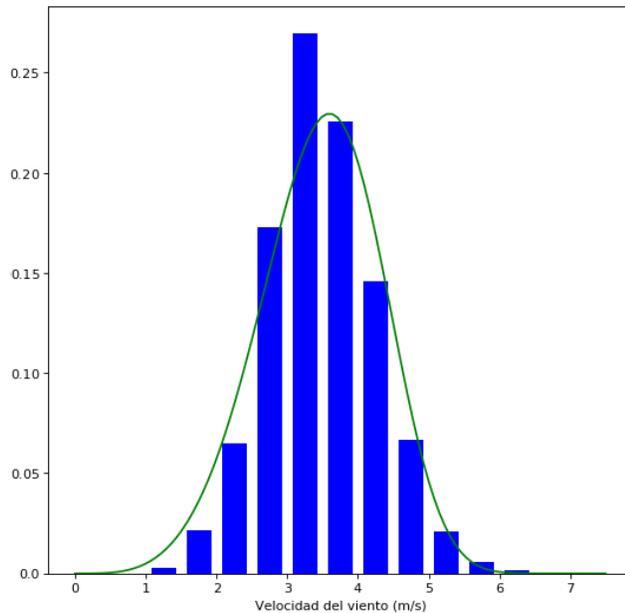


FIGURA 14: Representación de un diagrama de barras con las velocidades y la curva de distribución para todo el intervalo temporal en la zona norte.

ésta es muy alta, mientras que en primavera y verano es más baja.

TABLA 11: Velocidades medias mensuales para el análisis en la zona sur, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Enero	4.0	1.0
Febrero	4.0	1.0
Marzo	3.6	0.8
Abril	3.2	0.7
Mayo	3.0	0.6
Junio	2.8	0.6
Julio	2.9	0.7
Agosto	2.7	0.6
Septiembre	2.8	0.7
Octubre	3.0	0.8
Noviembre	3.2	0.9
Diciembre	4.0	1.0
Anual	3.2	0.8

4.1.4 Análisis para la zona sur

Debido a la irregularidad del terreno, tanto zonas de picos montañosos como zonas de alto rozamiento, tenemos una desviación estándar elevada y muy variable. No tanto en la media de la misma, pero mes a mes es fácil comprobar que en algunos puntos ésta es aproximadamente igual al 33% del valor de la velocidad media (Tabla 11) y (Figura 15).

El valor medio de la velocidad es especialmente bajo, el más bajo de todos los sectores. Esto se debe a la gran irregularidad del terreno, como ya hemos mencionado lleno de bosques y zonas irregulares. La gran desviación también nos indica que, a pesar de la baja media, hay valores muy dispares que no están cerca de la media. Como se puede ver en el diagrama de caja y bigotes, estos valores extremos son tanto muy altos como muy bajos, especialmente dispersos a comienzos y a finales de año.

Nuevamente se diferencian claramente las diferentes velocidades de viento a lo largo de las diferentes estaciones. En este caso es particularmente llamativa la diferencia entre las desviaciones estándar. En los meses de otoño e invierno

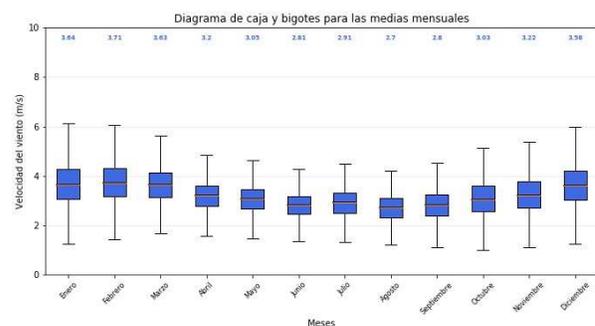


FIGURA 15: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias mensuales para todo el intervalo temporal en la zona sur.

1. Análisis de la zona sur por estaciones

Por estaciones se refleja aún más las diferencias en las velocidades entre las estaciones (Tabla 12 y Figura 16). La

TABLA 12: Velocidades medias por estaciones para el análisis en la zona norte, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (m/s)	Desviación estándar (m/s)
Invierno	3.7	0.9
Primavera	3.0	0.7
Verano	2.8	0.7
Otoño	3.3	0.9
Anual	3.2	0.8

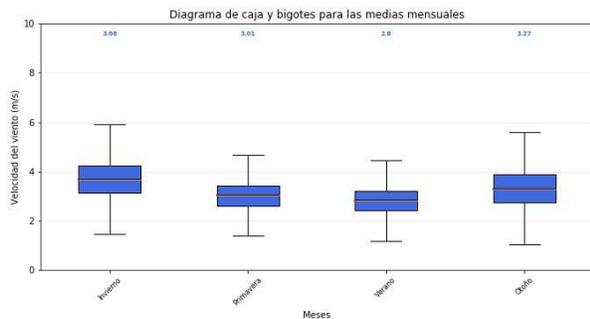


FIGURA 16: Diagrama de caja y bigotes con las velocidades medias por estaciones para todo el intervalo temporal en la zona sur.

desviación estándar media es alta, pero debido a que ésta es, en los meses de otoño e invierno, extremadamente alta, cercana al 30% del valor de la media para esas estaciones (Hofherr et al., 2010).

La media sigue siendo la más baja de todos los sectores y la desviación estándar la más alta. Esto se debe, como ya se ha dicho, al terreno altamente irregular, que favorece las velocidades bajas por rozamiento así como a las zonas de picos montañosos que presentan velocidades elevadas de viento.

2. Ajuste a una distribución de Weibull

Al igual que en los casos anteriores, el parámetro k es menor en el cómputo total que en el ajuste mes a mes, pero en este caso la diferencia no es tan grande. Debido a la gran irregularidad del terreno, cosa que en los casos anteriores se pudo evitar, en todos los casos los ajustes involucran medidas bastante dispares, por lo que al juntarlas el resultado tiene una forma parecida. En cuanto al parámetro c , no varía mucho de los casos particulares al general (Tabla 13 y Figuras 17 y 18).

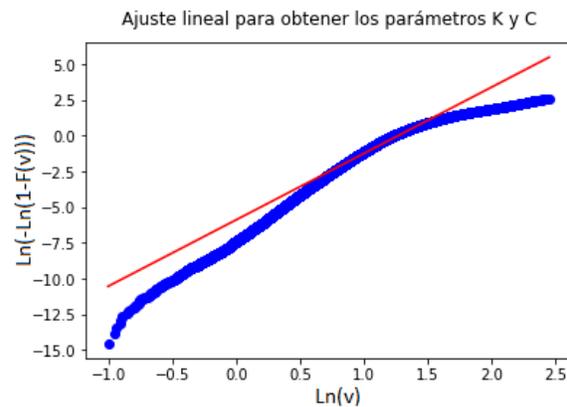


FIGURA 17: Gráfica con los valores ajustados a la ecuación 6 y la recta de ajuste para los valores de la zona sur

TABLA 13: Parámetros de la distribución de Weibull obtenidos con el ajuste de a la ecuación 6 (Figura 17) para la zona sur.

Intervalo temporal	Parámetro k	Parámetro c (m/s)	R ²
Enero	4.639	0.245	0.974
Febrero	4.898	0.242	0.973
Marzo	5.516	0.251	0.971
Abril	5.857	0.288	0.973
Mayo	5.804	0.302	0.975
Junio	5.688	0.327	0.974
Julio	5.507	0.316	0.978
Agosto	5.467	0.339	0.975
Septiembre	5.085	0.322	0.973
Octubre	4.613	0.293	0.969
Noviembre	4.591	0.277	0.968
Diciembre	4.608	0.250	0.973
Anual	4.646	0.282	0.961

Sin embargo, cabe destacar los valores del coeficiente de determinación, pues son significativamente menores que en los casos anteriores. Esto se debe nuevamente a lo irregular del terreno y la mayor diferencia entre velocidades de viento del conjunto. Aún así, en términos generales, esta zona también se puede ajustar a una distribución de Weibull.

Diagrama de barras de velocidades con la distribución de Weibull

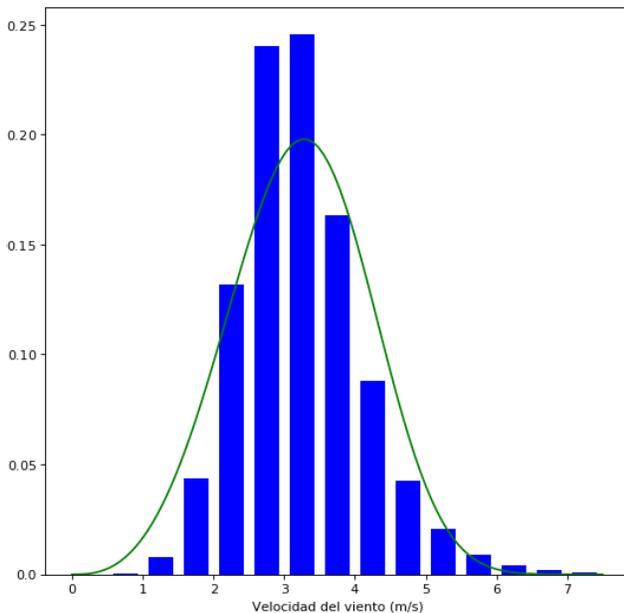


FIGURA 18: Representación de un diagrama de barras con las velocidades y la curva de distribución para todo el intervalo temporal en la zona sur.

4.1.5 Comparación de las velocidades del viento en las tres zonas

Como pequeño resumen del apartado de velocidades antes de pasar a analizar las direcciones, diremos que la separación por zonas ayuda a entender mejor cómo se comporta la velocidad del viento en cada una de las zonas que se han delimitado. Además, como medida para diferenciar zonas de comportamiento parecido, estas tres zonas funcionan de manera adecuada.

En la zona costera el viento es veloz y sostenido, con diferencias estacionales, pero con una media estable aunque una desviación estándar algo alta, lo que nos indica que puede haber rachas más elevadas debido a brisas marinas, por ejemplo, o periodos de velocidades bajas.

En la zona norte, zona de llanuras principalmente, la velocidad media del viento es menor, pero con una desviación estándar baja. Los vientos en esta zona tienden a ser lentos debido al rozamiento con el suelo, pero constantes en cuanto a la velocidad. La zona sur es la más caótica de todas y difícil de dividir. Llena de bosques, el valle del Rin, zonas escarpadas y la presencia de varios entornos montañosos hace que los vientos sean erráticos, con velocidades muy altas en las zonas de la cordillera de los Alpes o en el Harz, pero que se ven rápidamente amortiguadas por las zonas escarpadas o boscosas. Una velocidad media baja pero con una gran desviación crean una zona de grandes diferencias

en la velocidad.

4.2 Análisis de la dirección del viento

Una vez analizadas las velocidades pasamos a ver en qué dirección sopla el viento. En primer lugar, al igual que antes, veremos el territorio alemán como un único ente para luego hacer una separación por zonas. Dado que la separación en las zonas: costa, norte y sur; funcionó correctamente en el análisis de las velocidades, para este apartado mantendremos la misma separación.

4.2.1 Análisis para todo el territorio

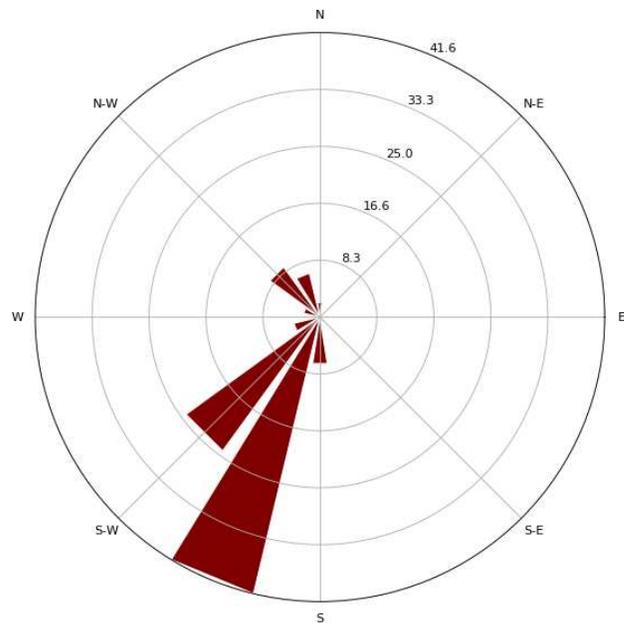


FIGURA 19: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para todo el territorio.

TABLA 14: Velocidades medias por estaciones para el análisis en todo el territorio, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (°)	Desviación estándar (°)
Anual	213.0	30.0

Al analizar los resultados obtenidos para el conjunto total de datos la conclusión principal es clara (Tabla 14 y Figura 19) el viento tiende a soplar desde la dirección sur-suroeste. El valor medio de dirección de viento es 212°, y la mayor parte del viento soplando en torno a esa dirección. Teniendo en cuenta la posición geográfica de Alemania, estos vientos

proviene de la frontera sur-este, es decir, desde Francia y los Alpes. Esto concuerda con las corrientes generales de aire que recorren la atmósfera. Alemania está situada en la célula de Ferrel, la célula de latitud media del hemisferio norte. Ésta está caracterizada por vientos que la recorren desde el oeste hacia el este y desde el sur hacia el norte en la zona europea (Fairbridge et al., 1987).

Cabe destacar que hay muy poca presencia de viento que sople en dirección este. Esto significa que, en condiciones generales, las condiciones de circulación de la célula se imponen respecto del resto de condiciones, como tormentas, posibles corrientes locales y otros fenómenos (Kasperski, 2002).

4.2.2 Análisis para la zona costera

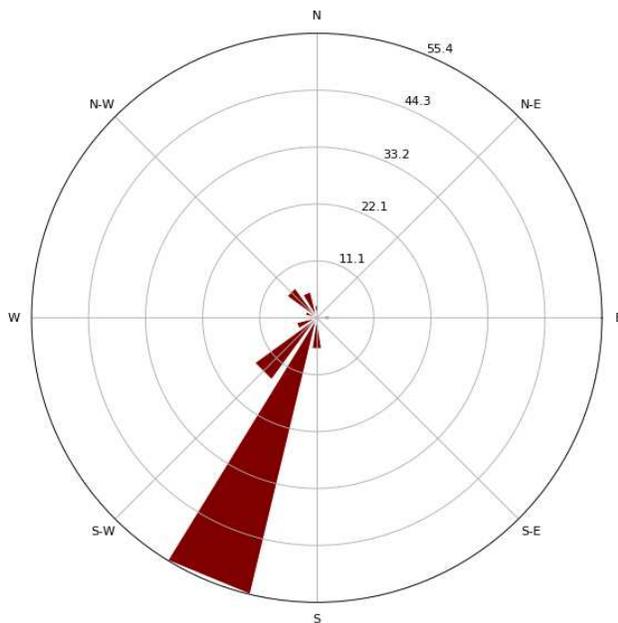


FIGURA 20: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para la zona costera.

TABLA 15: Velocidades medias por estaciones para el análisis en la zona norte, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (°)	Desviación estándar (°)
Anual	207.3	12.7

Al analizar qué ocurre con los vientos en la zona de costa (Tabla 15 y Figura 20) vemos que el porcentaje de viento con procedencia sur-sureste es mayor que en el caso general. Hay pequeñas influencias de vientos provenientes de otras direcciones, pero éstas son muy pequeñas.

Ésta región es, de las 3 de estudio, la situada más al norte y la menos extensa en territorio. Ésto la hace, en parte, más regular a la hora del estudio frente a las demás, debido al gran parecido del terreno estudiado.

4.2.3 Análisis para la zona norte

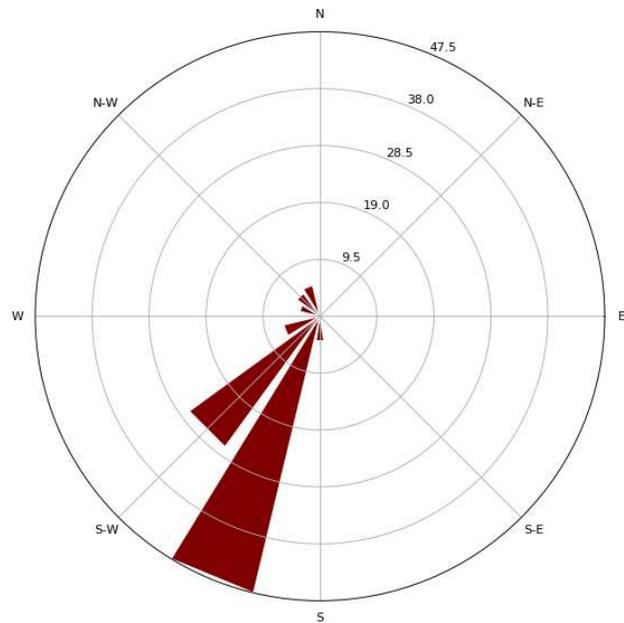


FIGURA 21: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para la zona norte.

TABLA 16: Velocidades medias por estaciones para el análisis en la zona norte, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (°)	Desviación estándar (°)
Anual	212.4	25.2

Al igual que en los casos anteriores hay una clara predominancia de las direcciones en el tercer cuadrante, pero en este caso algo más repartido que en los casos anteriores y con una desviación estándar menor (Tabla 16 y Figura 21).

Esta zona, más extensa que la zona norte, presenta algo más de dispersión. Esto se debe a dos factores principalmente. En primer lugar la extensión de terreno que se estudia en esta zona es mayor, por lo que el número de corrientes locales es mayor; en segundo lugar porque esta zona de estudio está más al sur. La influencia de los vientos con más componente este se acentúa conforme disminuye en latitud.

4.2.4 Análisis para la zona sur

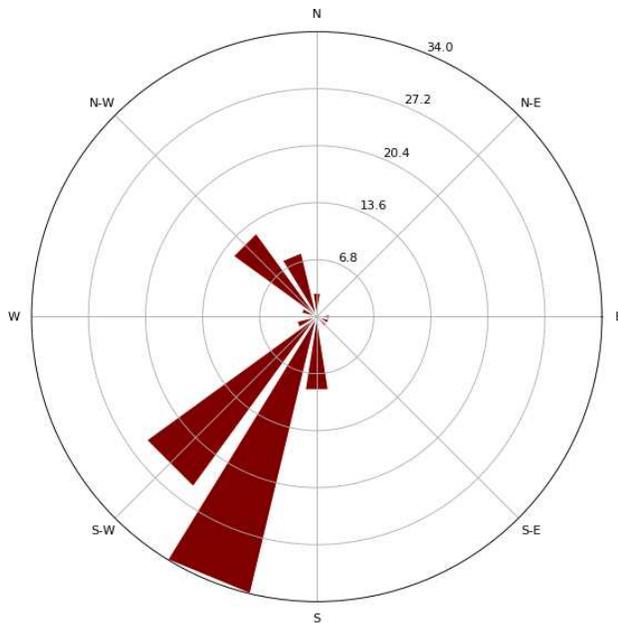


FIGURA 22: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para la zona sur.

TABLA 17: Velocidades medias por estaciones para el análisis en la zona sur, cada una con su desviación estándar calculada.

Intervalo temporal	Media (°)	Desviación estándar (°)
Anual	215.1	50.3

En este caso vemos que, aunque se mantiene la dominancia de vientos en el 3° cuadrante, ahora están más repartidos con mayor presencia en las demás direcciones, excepto las provenientes del este (Tabla 17 y Figura 22). Acorde a lo visto en el apartado de velocidades, la zona sur, desde un punto de vista geográfico es muy irregular, por lo que en las direcciones era de esperar también irregularidad. Además, esta zona está a menor latitud, por lo que la componente este es más fuerte y añadiendo los territorios montañosos y el valle del río Rin (Schmid et al., 2020) se crean lugares donde las corrientes locales empiezan a ser más significativas que en las zonas anteriores.

Destaca que, por primera vez, las direcciones con componente norte cobran un papel notable, y todas ellas con componente oeste. También cabe destacar una significativa parte del viento con componente puramente sur.

4.2.5 Análisis por meses

Es claro que la componente sur-suroeste predomina en todo el territorio, sin embargo esto no es cierto durante todo el año. Se ha visto, con las figuras anteriores, cómo en términos anuales es así, pero al estudiar mes a mes vemos diferencias notables. Además, estas diferencias se pueden analizar estudiando mes a mes el comportamiento en todo el territorio, pues, por zonas, varía sólo el porcentaje relativo entre componentes. La distribución de vientos es más homogénea en la zona costera, disminuyendo la componente sur para aumentar la oeste conforme se baja en latitud, pero la forma en conjunto de las rosas de vientos mes a mes es muy parecida con independencia de la zona.

Pese a esta dominancia de la componente sur-suroeste al hacer el cómputo total de los datos tanto por zonas como en todo el territorio, si se hacen rosas para cada mes vemos que, aunque la tónica general es esa, hay excepciones, y que éstas se pueden agrupar, nuevamente, en función de las estaciones del año.

Durante el primer trimestre del año se puede ver una evolución en los vientos (Figura 23). Éstos pasan de tener una marcada componente sur para pasar a ser la componente principal la de suroeste. Una característica importante de este periodo es la fuerte predominancia de los vientos en una dirección clara. Los eventos anómalos o excepcionales, como tormentas o vendavales son fenómenos que no tienen una gran influencia durante este periodo de tiempo.

Durante el segundo trimestre del año podemos ver cómo la dirección predominante deja de ser la que era (Figura 24). Abril trae consigo, en Alemania, un fenómeno que allí conocen como "föhn" (que significa secador de pelo, y da nombre al electrodoméstico que todos conocemos) y que se conoce generalmente como viento foehn. Éstos son vientos cálidos procedentes del sur, desde los Alpes y la vaguada de Baviera. Este viento tiene una marcada presencia en el mes de abril, con porcentajes de presencia de en torno al 20%, es el causante del deshielo en gran parte del país, especialmente en la zona sur. Este viento cálido, sumado a las corrientes más frías provenientes del norte, también muy presentes en este mes, son causantes de una época de alta variabilidad térmica que causa grandes y fuertes tormentas vespertinas, sobre todo en las zonas alejadas del mar (Feldmann et al., 2008). Esta alternancia de corrientes predominantes junto con las frecuentes tormentas crea esa distribución más errática de direcciones de viento, que se ve reflejada en la repartición, casi de forma equivalente, en vientos procedentes del norte y del sur en este mes. Los dos meses siguientes, mayo y junio, siguen en parte esta tendencia de vientos alternos de componente norte y sur, pero conforme avanza el tiempo la componente oeste se va imponiendo, aunque el clima nublado e inestable con frecuentes lluvias sigue siendo la tónica general.

En el tercer trimestre del año podemos ver cómo, poco

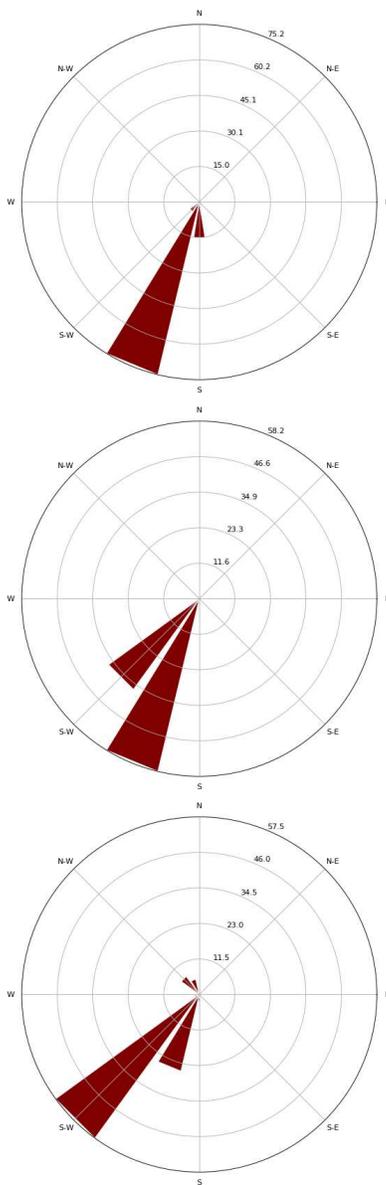


FIGURA 23: Rosas de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para enero, febrero y marzo, respectivamente.

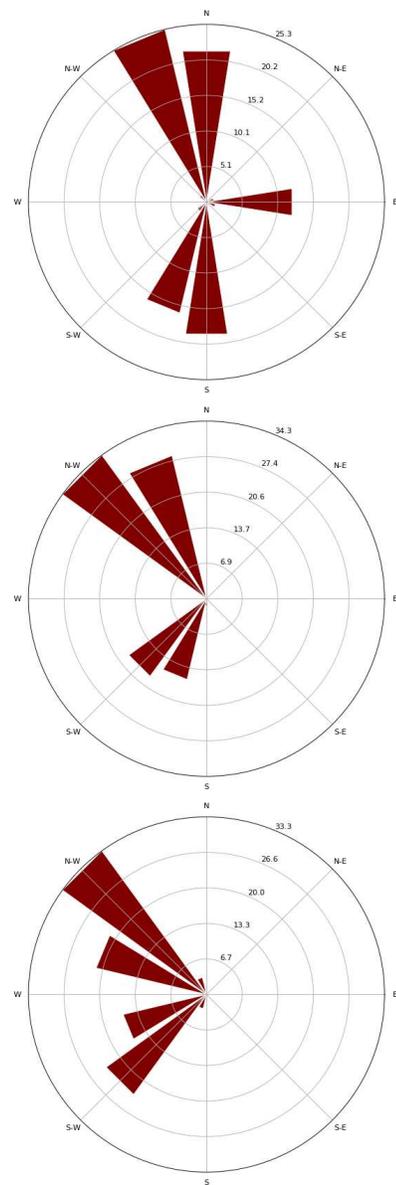


FIGURA 24: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para abril, mayo y junio, respectivamente.

a poco, se va recuperando la primacía de la dirección sur-sureste (Figura 25). En el mes de junio se puede observar una componente norte algo marcada, pero ésta se va desvaneciendo conforme pasa el tiempo, para devolver a la componente sureste el protagonismo. De ahí en adelante, hasta fin de año (Figura 26) la componente que predomina es la vista en el análisis general.

Como cómputo general, podemos decir que los vientos en Alemania, pese a tener como predominante componentes del 3° cuadrante, ésto se debe a que en 9 de los meses del año es así. Sin embargo, los meses de primavera presentan

una alta inestabilidad atmosférica fruto de la confluencia de dos vientos de componentes principales opuestas y de diferentes temperaturas. Además, en estos meses frecuentan las tormentas. El resto del año, a pesar de que el clima nublado predomina, el viento tiene una dirección clara y predominante frente al resto.

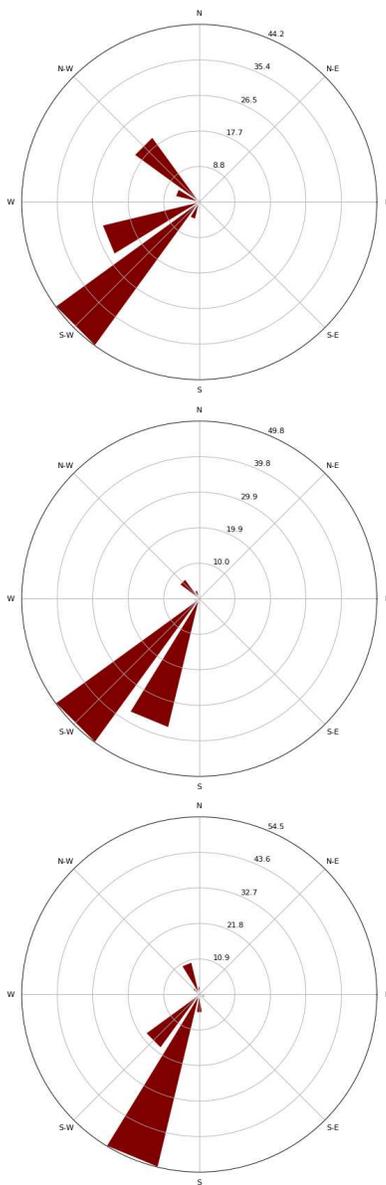


FIGURA 25: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para julio, agosto y septiembre, respectivamente.

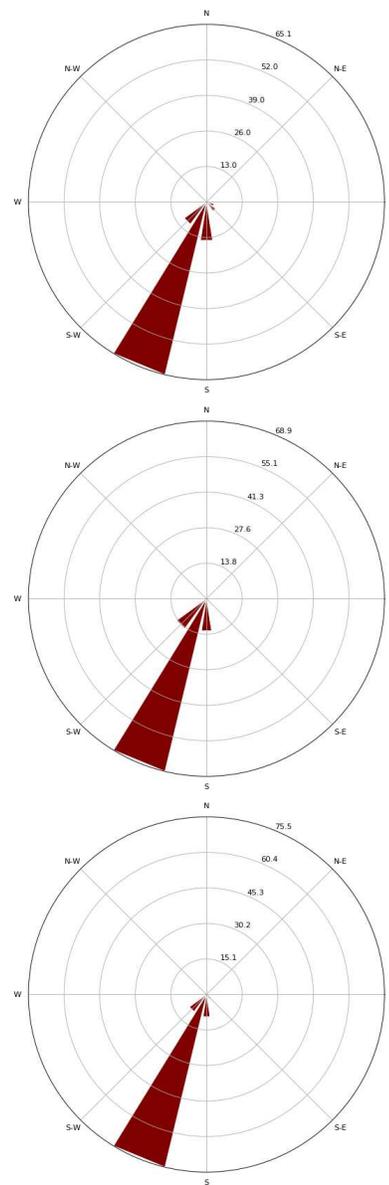


FIGURA 26: Rosa de vientos con las direcciones y los porcentajes de las mismas para octubre, noviembre y diciembre, respectivamente.

4.3 Distribución de las velocidades en función de la dirección

Analizando los valores que toma la velocidad del viento y distribuyéndolos en función de la dirección en la que sopla dicho viento (*Tablas 18 y 19*) obtenemos unos resultados que concuerdan al analizar las variables por separado. El mayor porcentaje de velocidades se encuentra en aquellas que son menores a 5m/s, acorde a los estudios de medias realizados. Además, al distribuir esas velocidades en función de las direcciones en que sopla el viento, vemos que la mayor parte de las mismas, independientemente de su velocidad,

se encuentra en las direcciones más probables ya vistas al analizar la dirección por separado.

El siguiente paso, al igual que en los casos anteriores, será ver si estos valores cambian en función del sector en el que trabajamos: zona costera, zona norte y zona sur.

TABLA 18: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica para todo el territorio (Tabla 1)

Rango de velocidades (m/s)	v <4	4<v <5	5<v <6	6<v <7	7 <v
Porcentaje	73.7%	20.3%	5.0%	0.8%	0.2%

TABLA 19: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica y en función de su dirección para todo el territorio.

Dirección (°)	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
Velocidad (m/s)								
v <4	0.0%	0.7%	2.0%	0.4%	60.9%	13.4%	7.7%	14.4%
4<v <5	0.0%	0.7%	2.4%	0.3%	74.2%	8.4%	3.9%	10.1%
5<v <6	0.0%	0.4%	2.3%	0.4%	77.2%	7.0%	2.7%	9.9%
6<v <7	0.0%	0.1%	2.7%	1.0%	78.9%	9.0%	1.8%	6.4%
7 <v	0.0%	0.1%	1.7%	1.1%	85.2%	8.3%	0.3%	3.2%

TABLA 20: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica en la zona costera (Tabla 1)

Rango de velocidades (m/s)	v <4	4<v <5	5<v <6	6<v <7	7 <v
Porcentaje	35.2%	44.4%	17.7%	2.5%	0.2%

TABLA 21: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica y en función de su dirección en la zona costera.

Dirección (°)	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
Velocidad (m/s)								
v <4	0.0%	0.6%	1.1%	0.0%	62.2%	15.5%	7.5%	13.1%
4<v <5	0.0%	1.2%	2.6%	0.0%	69.5%	8.3%	5.8%	12.7%
5<v <6	0.0%	0.3%	1.2%	0.0%	88.2%	1.5%	3.1%	5.5%
6<v <7	0.0%	0.1%	0.4%	0.0%	96.0%	0.3%	1.4%	1.8%
7 <v	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%

TABLA 22: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica en la zona norte (Tabla 1)

Rango de velocidades (m/s)	v <4	4<v <5	5<v <6	6<v <7	7 <v
Porcentaje	75.7%	21.3%	2.7%	0.2%	0.0%

TABLA 23: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica y en función de su dirección en la zona norte.

Dirección (°)	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
Velocidad (m/s)								
v <4	0.0%	0.1%	0.5%	0.2%	63.6%	18.1%	6.7%	10.7%
4<v <5	0.0%	0.1%	0.4%	0.1%	85.5%	8.1%	1.8%	4.1%
5<v <6	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	89.9%	8.2%	0.7%	1.1%
6<v <7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	86.6%	12.7%	0.3%	0.3%
7 <v	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	50.1%	46.1%	2.3%	1.3%

TABLA 24: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica en la zona sur (Tabla 1)

Rango de velocidades (m/s)	v <4	4<v <5	5<v <6	6<v <7	7 <v
Porcentaje	83.2%	13.0%	3.0%	0.6%	0.2%

TABLA 25: Velocidades en función de su clasificación de utilidad para energía eólica y en función de su dirección en la zona sur.

Dirección (°)	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
Velocidad (m/s)								
v <4	0.0%	1.1%	3.6%	0.7	57.1%	9.9%	8.5%	19.1%
4<v <5	0.0%	0.5%	1.5%	0.4%	75.2%	11.2%	2.7%	8.5%
5<v <6	0.0%	0.3%	0.9%	0.3%	74.5%	14.3%	3.7%	6.0%
6<v <7	0.0%	0.4%	1.1%	0.3%	62.4%	21.6%	5.9%	8.3%
7 <v	0.0%	0.1%	1.4%	0.4%	49.8%	38.1%	4.5%	5.7%

4.3.1 Análisis para la zona costera

En este caso se puede observar (*Tablas 20 y 21*) cómo los resultados anteriores vuelven a casar. Es una zona con vientos medios más elevados, lo cual se refleja en unos porcentajes más repartidos entre velocidades medias. A pesar del mayor reparto en las velocidades, la mayor parte del viento sigue soplando siempre desde el sureste.

4.3.2 Análisis para la zona norte

En este caso podemos ver (*Tablas 22 y 23*) la menor velocidad del viento, así como la dominancia de los vientos hacia el sureste, aunque en este caso está algo más repartido. Especialmente llaman la atención los vientos superiores a 7m/s, que se reparten casi a partes iguales entre la zona (180-225°) y la zona (225-270°), algo que no ocurre con el resto de velocidades.

4.3.3 Análisis para la zona sur

En este sector vuelve a aumentar el porcentaje de vientos bajos, pero en las direcciones predominantes en cada velocidad se puede ver una clara influencia de la orografía irregular (*Tablas 24 y 25*). Sigue siendo predominante la dirección sur-sureste, pero se puede notar, sobre todo para vientos veloces, una distribución significativamente más repartida entre las diferentes direcciones.

En el apéndice A.2 se puede ver, de forma gráfica mediante rosas de vientos con un código de colores en función de la velocidad, estas distribuciones.

4.4 Análisis de la temperatura

Para esta variable se han elegido los dos meses con las temperaturas medias más bajas y altas respectivamente (*Tabla 26*). Como ya hemos visto en la sección anterior, el viento procede en la mayoría de los casos del sector sureste. En los meses de invierno, estos vientos son muy fríos y la cercanía de los mares del Norte y Báltico hace que el ambiente sea especialmente húmedo. Estos factores, unidos a las bajas temperaturas presentes en el continente, crean las condiciones perfectas para la formación de carámbanos en las estructuras. Un ejemplo de ello es uno de los faros de la Isla de Rügen (*Foto 1*), la isla alemana más grande y que está situada en el Mar Báltico. Las bajas temperaturas y humedad junto con el viento que la puede transportar generan carámbanos en ángulo, es decir, la humedad presente en viento se congela según pasa por el faro. Además, en Alemania son relativamente frecuentes las heladas en los puertos, donde las bajas temperaturas junto a la calma que proporcionan los malecones en el agua del puerto favorecen la formación de capas superficiales de hielo en el mar.

Un fenómeno similar al que ocurre con el faro puede ocurrir con los aerogeneradores que se sitúen en las zonas

TABLA 26: Temperaturas medias en Alemania para los meses de enero y julio.

Intervalo temporal	Temperatura media (°C)	Desviación estándar (°C)
Enero	0.0	1.0
Julio	18.0	1.0

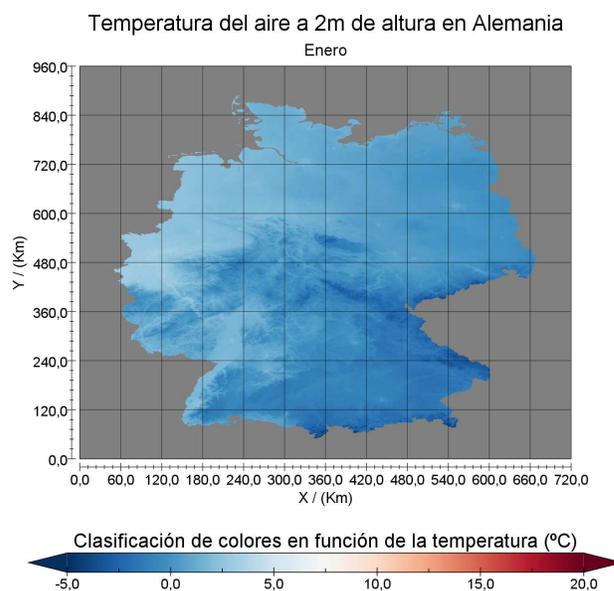


FIGURA 27: Mapa con código de colores que representa la temperatura media en Alemania en enero.

donde los vientos tengan humedad suficiente durante los meses más fríos, en particular el mes de enero, dado que es el más frío de todos.

Las temperaturas son muy frías en invierno y templadas en verano (*Figuras 27 y 28*), sirviendo las estaciones de primavera y otoño como transiciones que, en general, se pueden considerar tirando a frías. Alemania no es un país donde abunde el sol, pues la mayor parte del año está cubierto por nubes, que bloquean parte de la radiación solar, y las lluvias son frecuentes. Así, la zona más probable de sufrir este fenómeno es la costa, y particularmente la báltica.

4.4.1 Análisis de la temperatura por zonas

Si analizamos, al igual que en los casos anteriores, las diferencias según las zonas ya definidas (*Tablas 27 y 28*), observamos que los resultados son los esperados. La zona costera presenta una menor amplitud térmica que la zona norte y la zona sur. De estas dos últimas, la zona sur, más escarpada y con mayores diferencias en la altura del terreno, presenta

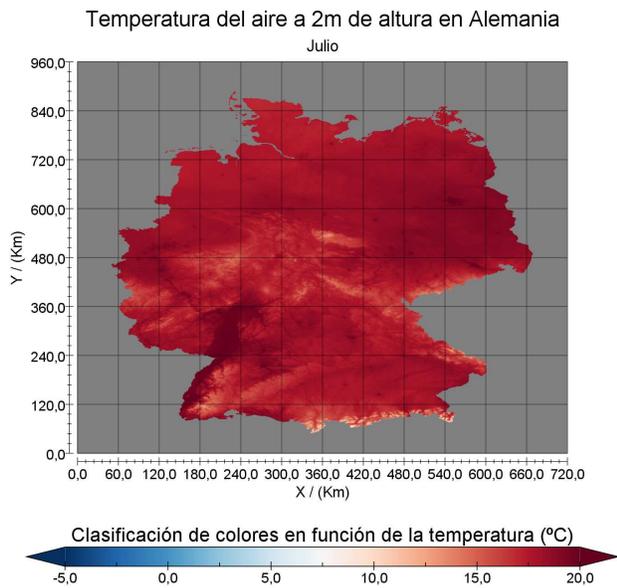


FIGURA 28: Mapa con código de colores que representa la temperatura media en Alemania en julio.

TABLA 27: Temperaturas medias en Alemania para los meses de enero.

Zona	Temperatura media en enero (°C)	Desviación estándar (°C)
Costera	1.0	0.7
Norte	1.0	1.0
Sur	0.0	1.0
General	0.0	1.0

mayor amplitud térmica. Las temperaturas medias en enero son más suaves en la costa que según entramos en el interior, sin embargo en enero no hay tanta diferencia.

La baja desviación estándar y una temperatura media de 1°C implican que en las horas más frías del día las temperaturas pueden ser inferiores a los 0°C y durante el día no muy superiores a los 2°C, pero con un entorno nublado. Esto hace que la formación y mantenimiento de capas de hielo sea propicia. Además, una desviación estándar implica que aproximadamente el 70% de los valores se encuentra en torno a la media. Esto deja, por encima o por debajo, un 30% de los valores, lo cual significa la posibilidad de temperaturas aún más bajas, aún con nubes ocultando la radiación solar y haciendo más desfavorable el deshielo.

TABLA 28: Temperaturas medias en Alemania para los meses de julio.

Zona	Temperatura media en enero (°C)	Desviación estándar (°C)
Costera	17.7	0.4
Norte	18.4	0.7
Sur	18.0	1.0
General	18.0	1.0

4.5 Conclusiones

El viento tiende a soplar en una única dirección por encima de las demás, con velocidades predominantes entre los 3 y 5 m/s.

La zona costera presenta vientos más veloces y sostenidos a lo largo del tiempo, con una dirección privilegiada. Las bajas temperaturas en invierno, sumado a la humedad del ambiente hacen que los fenómenos de heladas y la formación de carámbanos sean constantes por toda la costa, pero especialmente en la costa báltica dado que presenta menores temperaturas, pudiendo incluso congelarse la capa superior del mar en los puertos, donde el nivel de oleaje es menor debido a los malecones y el agua tiene menor movimiento facilitando la congelación.

La zona norte tiene una prevalencia clara de vientos que soplan desde el sur-sureste, aunque la presencia del föhn o viento cálido del sur se hace notar en las zonas más meridionales. Las grandes llanuras presentes en esta zona hacen que el viento poco a poco se vaya ralentizando. Así, a pocos kilómetros de la costa el peligro de la formación de carámbanos es menor. También, al ser una zona donde se confrontan el föhn y las corrientes del norte, y una zona cuya frontera sur es muy montañosa, es muy propensa a la formación de tormentas, sobre todo en los meses de primavera. La zona sur es una zona altamente irregular, donde se juntan altos picos montañosos, grandes cordilleras y macizos con el gran valle del río Rin y exuberantes bosques. Así, esta zona presenta una gran variedad de velocidades de viento y de direcciones, aunque en esta última variable predomina la componente sureste. También es la zona con mayor amplitud térmica, debido al mayor cambio de temperaturas debido a la radiación solar incidente en las laderas de las montañas, así como por la gran altitud del terreno que lo hace más frío. El föhn se nota especialmente en esta zona, alcanzando corrientes de aire que presentan temperaturas superiores a los 30°C.

Se ha demostrado que la separación por zonas funciona, pudiendo caracterizar cada una de ellas en función del viento que circula por ellas. Así, este trabajo puede servir como

base para futuros estudios más en detalle, conociendo de antemano el terreno pudiendo escoger la zona más propicia en función de lo que se quiera hacer. Por ejemplo, si se desea construir una central de energía eólica, se saben las zonas, velocidades y direcciones, y con una base de datos tan extensa como ésta, ayudándonos de la ley de potencia de perfiles de viento, se pueden hacer análisis sin la necesidad de estudiar el terreno in situ.

4.6 Referencias

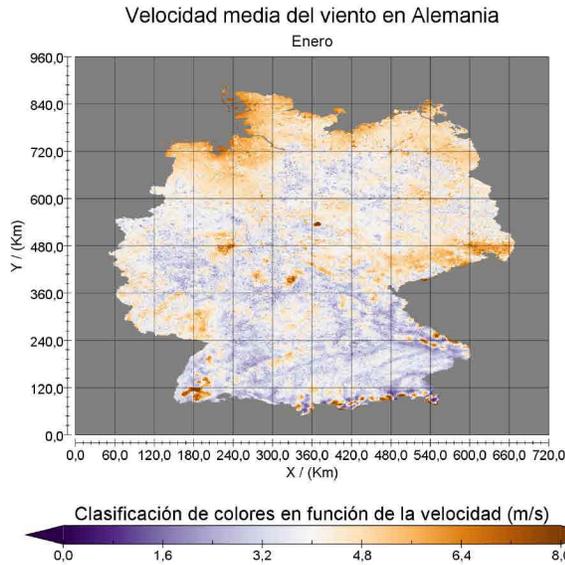
- Adachi, S. A. y Tomita, H. (2020), *Methodology of the constraint condition in dynamical down-scaling for regional climate evaluation: A review*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2019JD032166. <https://doi.org/10.1029/2019JD032166>
- Al Dakheel, J., Del Pero, C., Aste, N. y Leonforte, F. (2020), *Smart buildings features and key performance indicators: A review*, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102328
- Bailey, B.H., McDonald, S.L., Bernadett, D.W., Markus, M.J. y Elsholz, K.V., *Wind resource assessment handbook: Fundamentals for conducting a successful monitoring program*. United States: N. p., 1997. Web. DOI:10.2172/486127
- Bauer, P., Thorpe, A., y Brunet, G., (2015), *The quiet revolution of numerical weather prediction*, DOI:10.1038/nature14956
- Chatzimparmpas, A., Martins, R.M., Jusufi, I. y Kerren, A. (2020), *A survey of surveys on the use of visualization for interpreting machine learning models*, DOI: 0.1177/1473871620904671journals.sagepub.com/home/ivi
- Coccia, M., *Factors determining the diffusion of COVID-19 and suggested strategy to prevent future accelerated viral infectivity similar to COVID*, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138474
- Coiffier, J. (2011), *Fundamentals of Numerical Weather Prediction*, Cambridge University Press
- Cowlin, S., y Heimiller, D., (2009), *Potential for Development of Solar and Wind Resource in Bhutan*, NREL/TP-6A2-46547
- Della-Marta, P.M., Mathis, H., Frei, C., Liniger, M.A. y Appenzeller, J.K.C., *The return period of wind storms over Europe*, <https://doi.org/10.1002/joc.1794>
- Dueben, P.D^a, Wedi, N^a, Saarinen, S^a. y Zeman, C. (2020), *Global simulations of the atmosphere at 1.45 km grid-spacing with the integrated forecasting system*, DOI: 10.2151/jmsj.2020-016
- Fairbridge R.W. y Oliver J.E. (1987) *Ferrel cell*. In: *Climatology. Encyclopedia of Earth Science*. Springer, Boston, MA, DOI: <https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4>
- Feldmann, H., Früh, B., Schädler, G., Panitz, H-J., Keuler, K., Jacob, D. y Lorenz, P., *Evaluation of the precipitation for South-western Germany from high resolution simulations with regional climate models*, DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0295
- Heimiller, D., Gilman, P. y Cowlin, S., *Potential for Development of Solar and Wind Resource in Bhutan*. United States: N. p., 2009. Web. DOI:10.2172/964607
- Hofherr, T. y Kunz, M., *Extreme wind climatology of winter storms in Germany*, DOI: 10.3354/cr00844
- Jacobson, M.Z. (2005), *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press
- Jang, Y.-J., Jin, J.-W., Lee, J.-H., Lee, S.-I. y Kang, K.-W. (2020), *Long-term durability of offshore wind turbine composite blades based on nonlinear load behavior due to pitch movement*, DOI: 10.1007/s12206-020-0511-y
- Kasperski, M., *A new wind zone map of Germany*, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00257-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00257-X)
- Kjaergaard, M., Schwartz, M.E., Braumüller, J., Krantz, P., Wang, J. I-J., Gustavsson, S., y Oliver, W.D., (2020), *Superconducting Qubits: Current State of Play*, arXiv:1905.13641v3
- Krähenmann, S., Walter, A., Brien, S., Imbery, F. y Matzarakis, A., (2016), *High-resolution grids of hourly meteorological variables for Germany*, DOI 10.1007/s00704-016-2003-7
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A. y Ramirez-Villegas, J. (2020), *High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments*, DOI: 10.1038/s41597-019-0343-8
- Parker, W.S., (2016), *Reanalyses and Observations: What's the Difference?*, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>
- Pérez, I.A., García, M.A., Sánchez, M.L. y de Torre, B. *Analysis of height variations of sodar-derived wind speeds in Northern Spain*, DOI:10.1016/j.jweia.2004.05.002
- Rockel, B. y Woth, K., *Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations*, Clim Change 81: 267–280
- Sachs, L. (1978), *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*, Springer-Verlag, New York Heidelberg Berlin
- Samad, A., Vogt, U., Panta, A. y Uprety, D. (2020), *Vertical distribution of particulate matter, black carbon*

and ultra-fine particles in Stuttgart, Germany, DOI: 10.1016/j.apr.2020.05.017

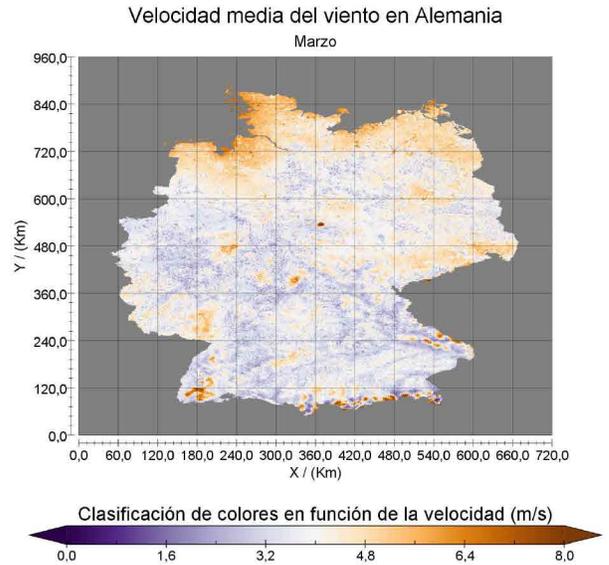
- Schmid, F., Schmidli, J., Hervo, M. y Hae-fele, A. (2020), *Diurnal Valley Winds in a Deep Alpine Valley: Observations*, *Atmosphere*2020,11,54; DOI:10.3390/atmos11010054
- Yusta, J.M. y Lacal-Aránegui, R. (2020), *Measuring the internationalization of the wind energy industry*, 593-604

Apéndices

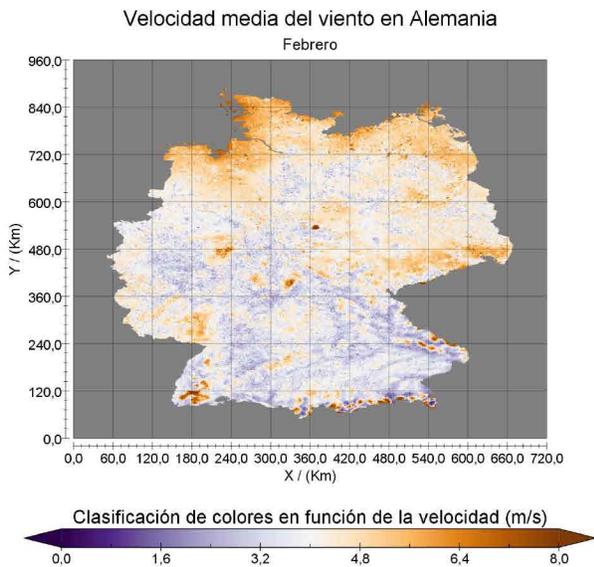
A.1: Mapas de velocidad de viento sobre el territorio alemán



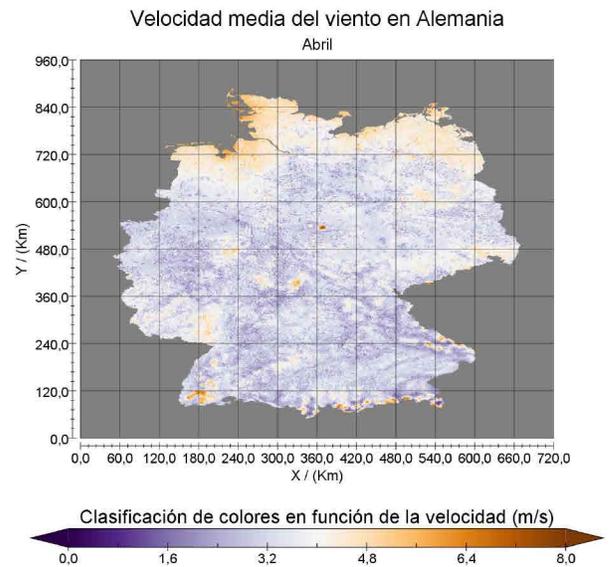
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para enero



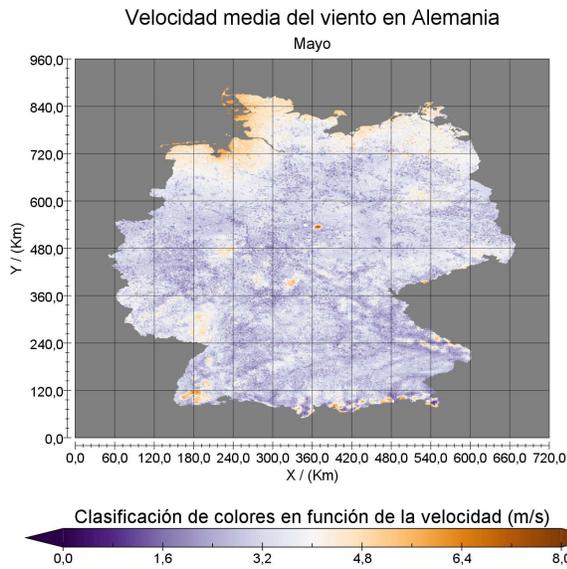
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para marzo



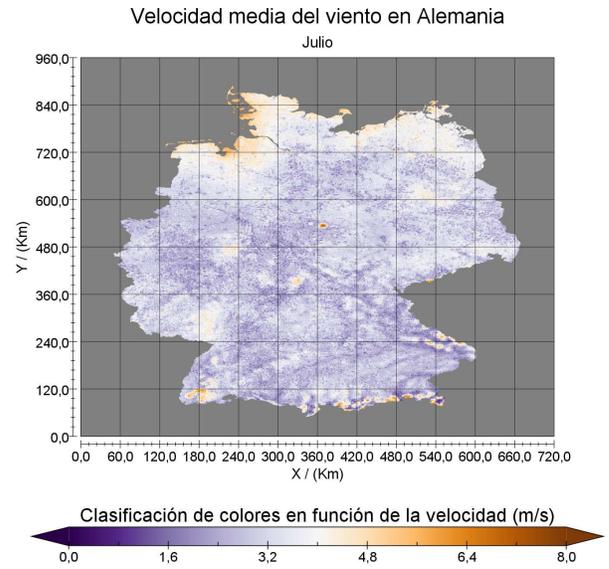
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para febrero



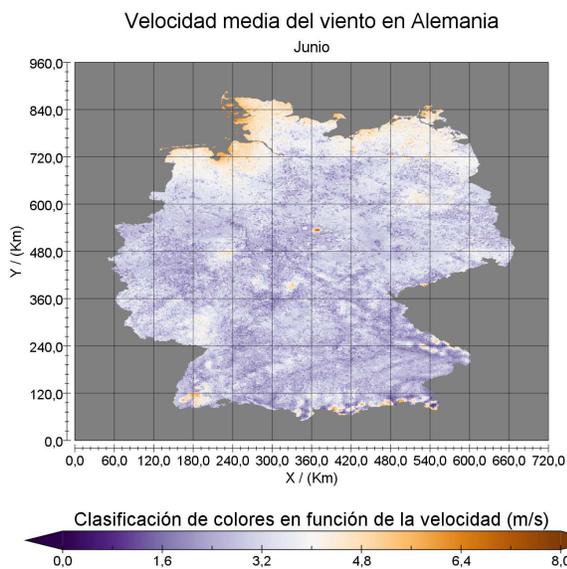
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para abril



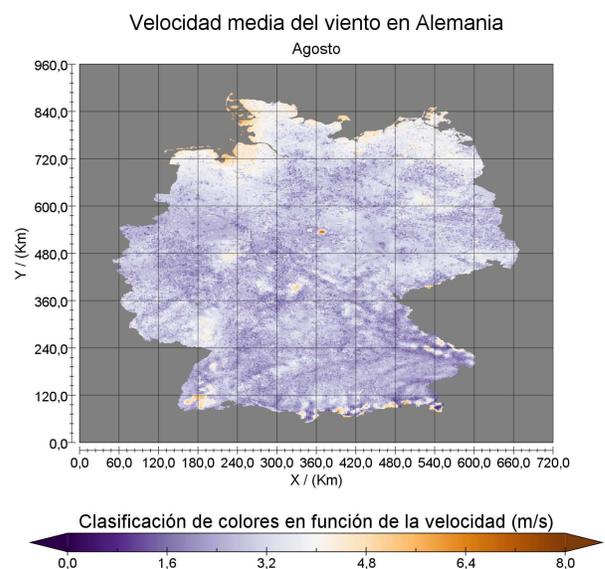
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para mayo



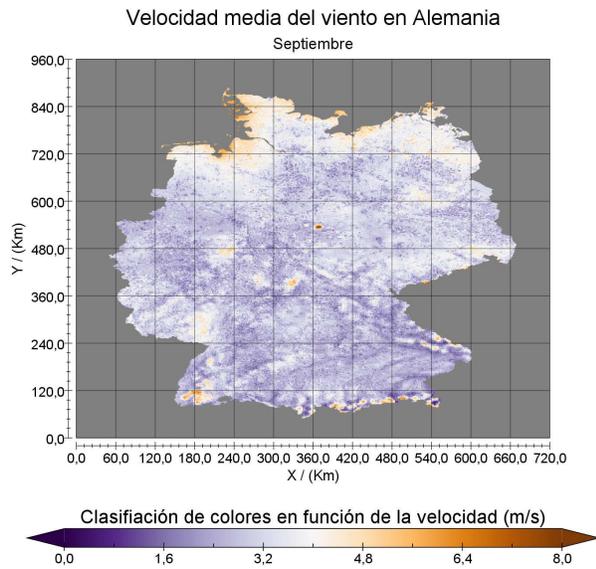
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para julio



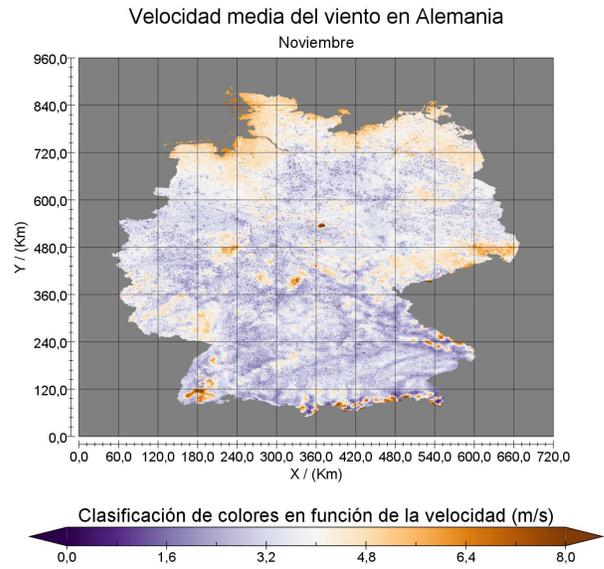
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para junio



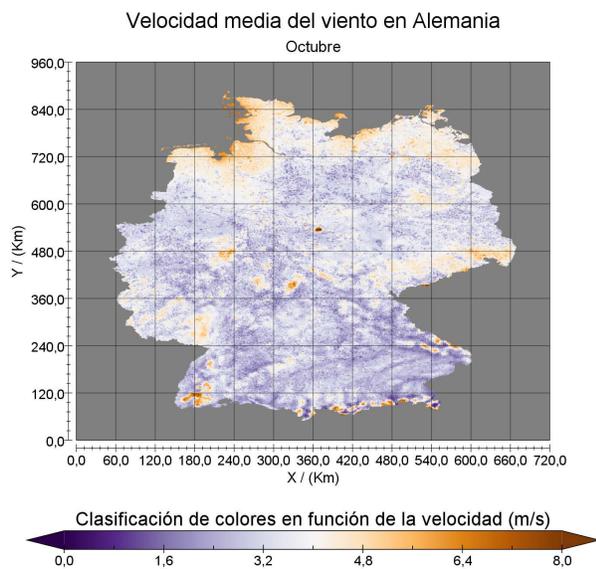
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para agosto



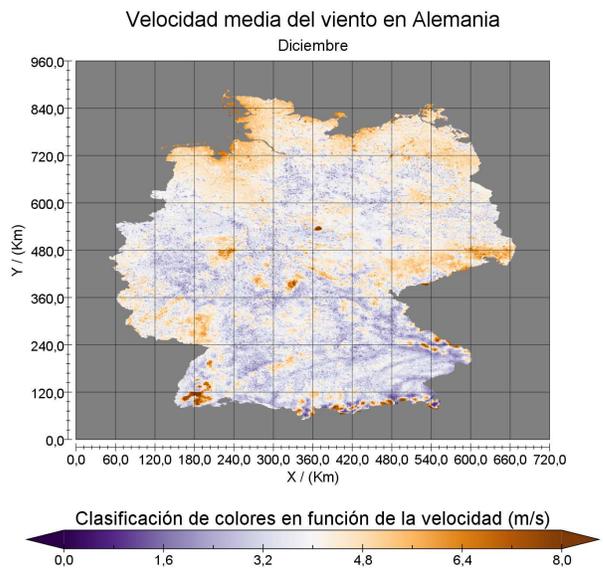
Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para septiembre



Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para noviembre



Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para octubre



Mapa del territorio de Alemania con la media de velocidades para diciembre

A.2: Rosas de vientos de dirección y velocidad

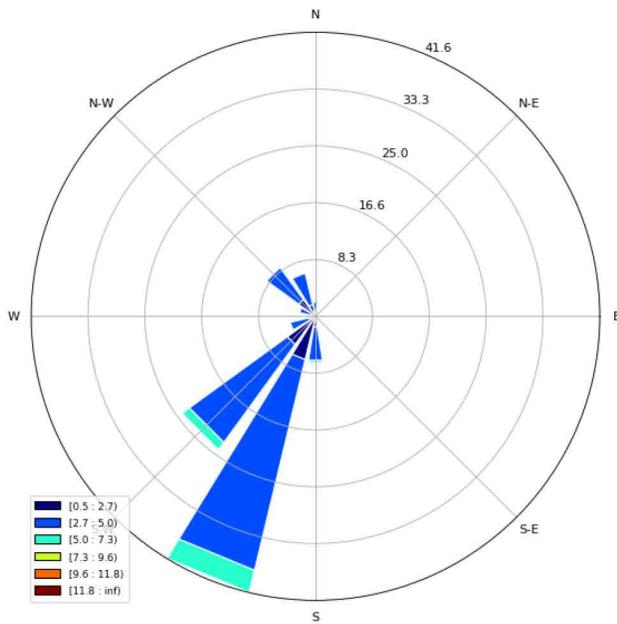


FIGURA 29: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para todo el territorio.

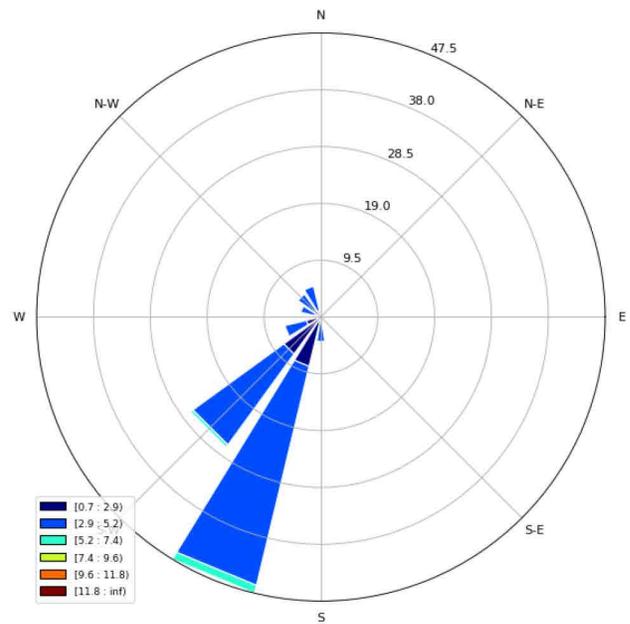


FIGURA 31: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para la zona norte.

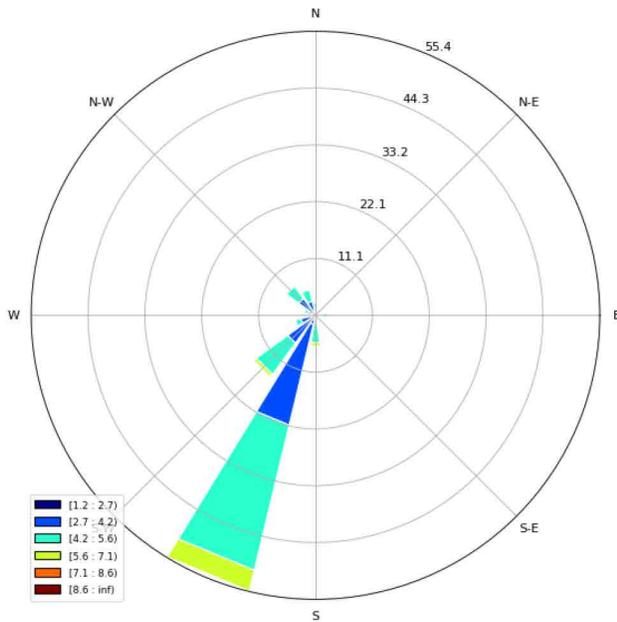


FIGURA 30: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para la zona costera.

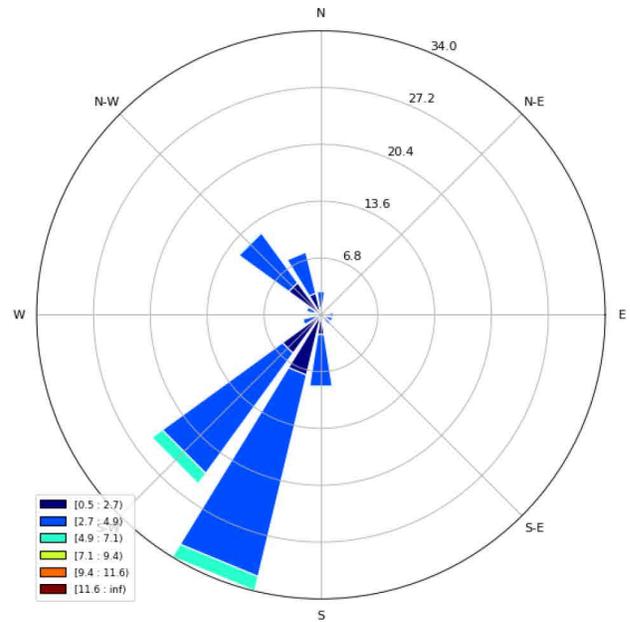


FIGURA 32: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para la zona sur.

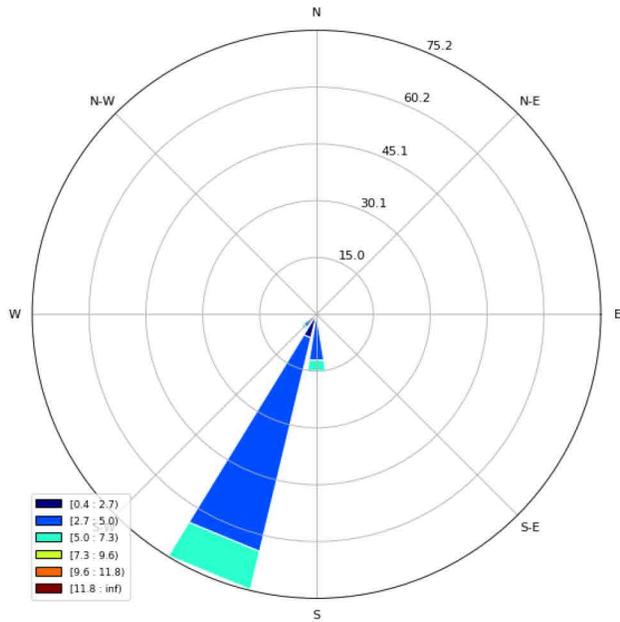


FIGURA 33: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para enero.

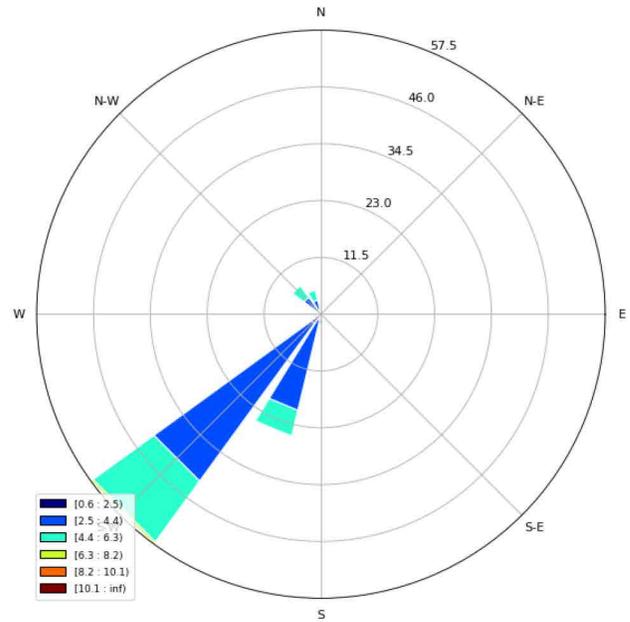


FIGURA 35: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para marzo.

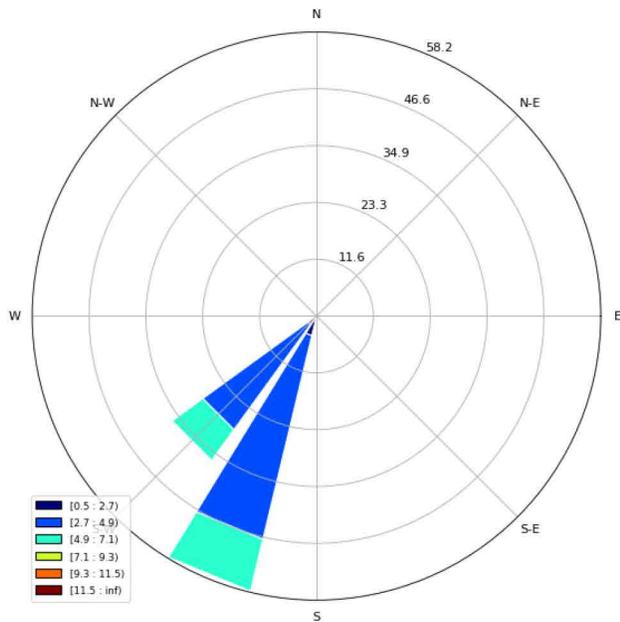


FIGURA 34: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para febrero.

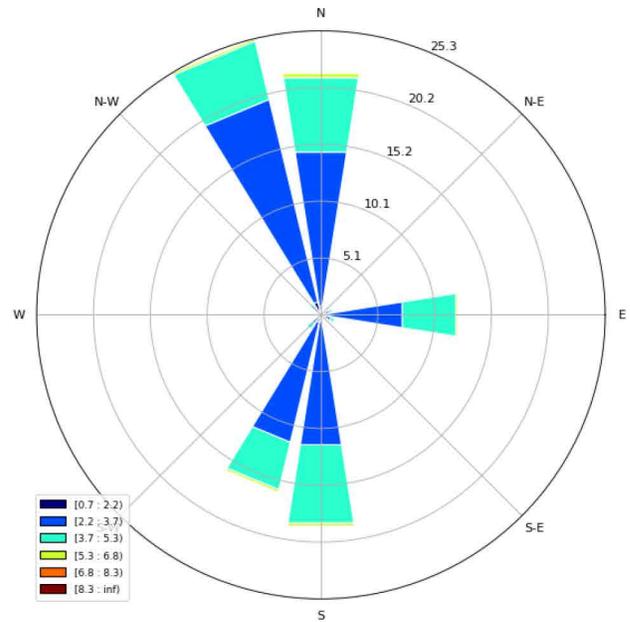


FIGURA 36: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para abril.

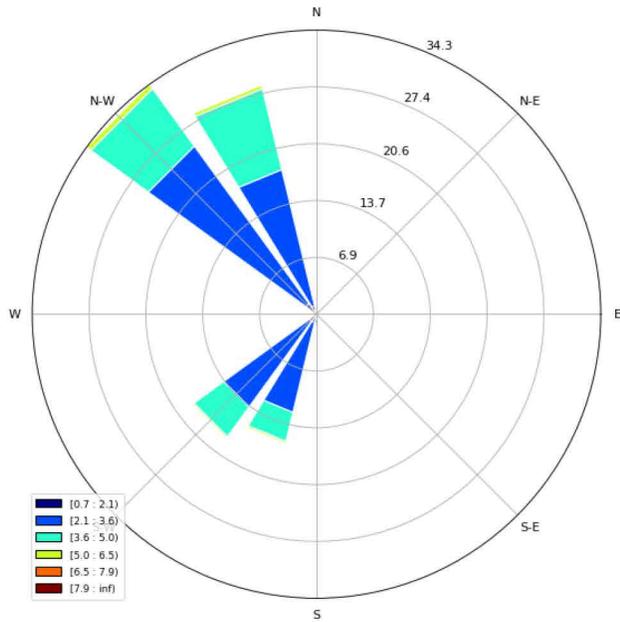


FIGURA 37: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para mayo.

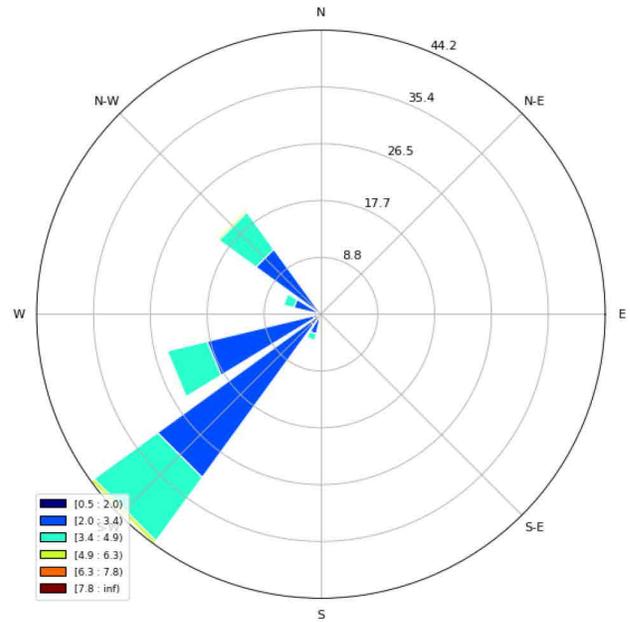


FIGURA 39: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para julio.

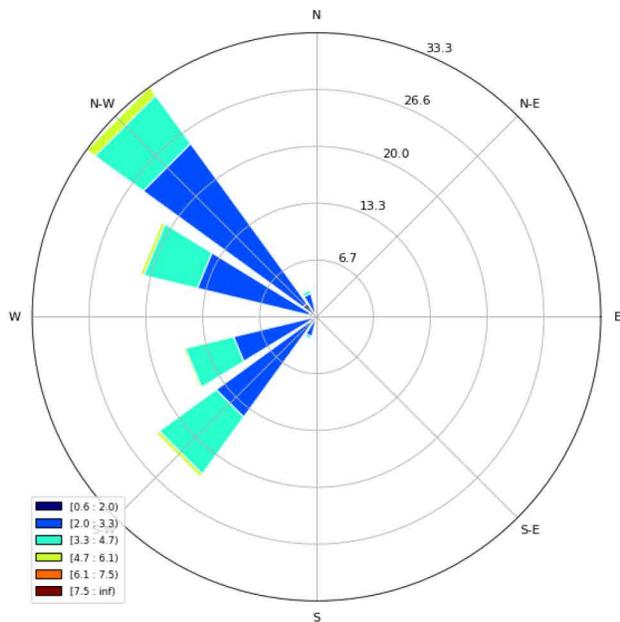


FIGURA 38: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para junio.

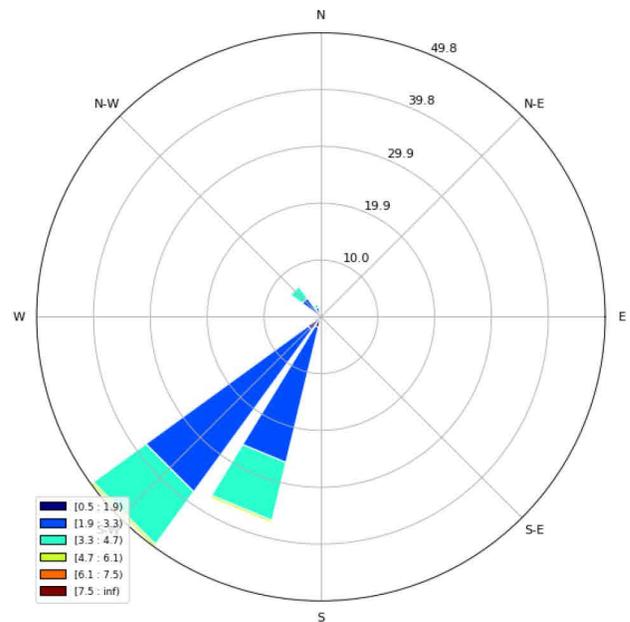


FIGURA 40: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para agosto.

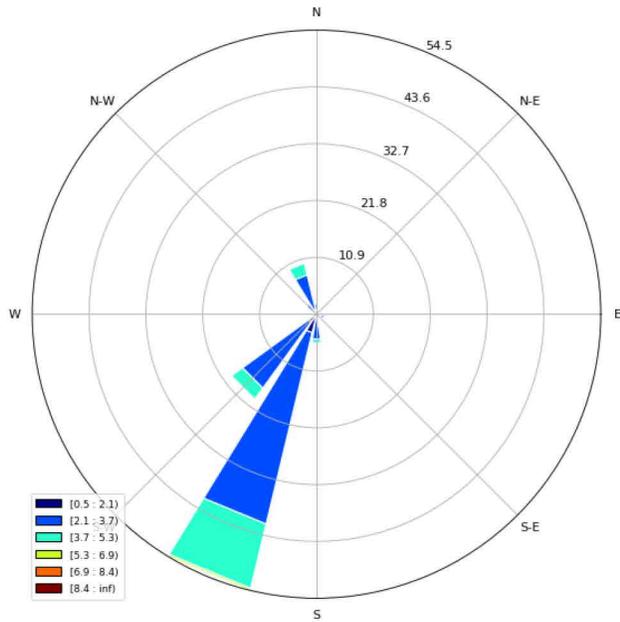


FIGURA 41: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para septiembre.

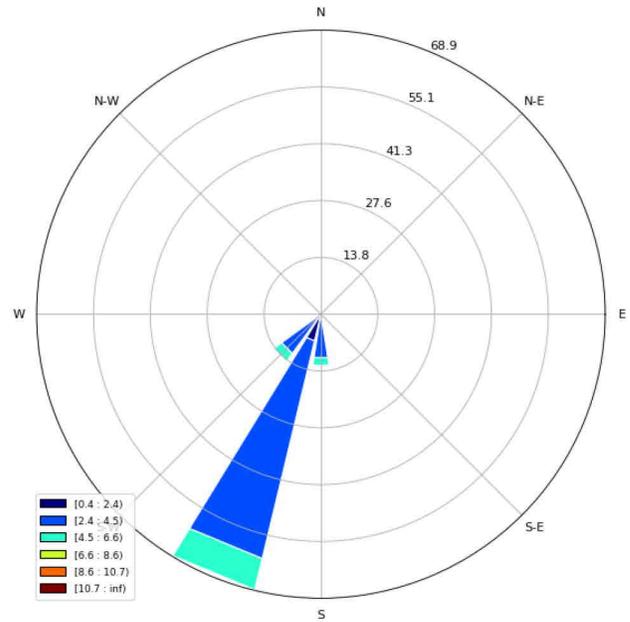


FIGURA 43: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para noviembre.

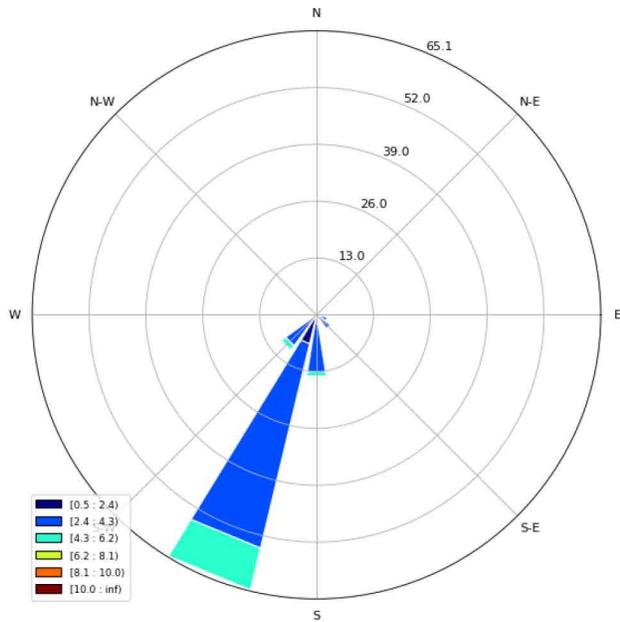


FIGURA 42: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para octubre.

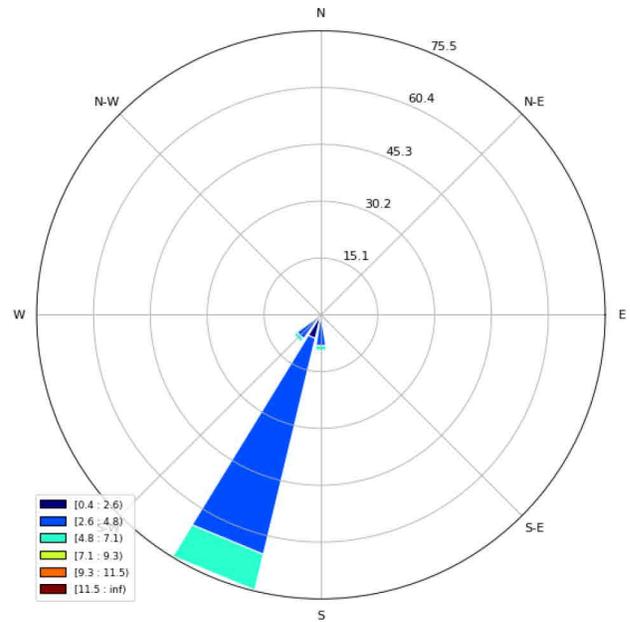


FIGURA 44: Rosa de vientos con las direcciones y las velocidades para diciembre.