



CONVENIO PNUD-UDELAR Proyecto URU/18/002 “Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”

Análisis de la variabilidad y tendencias observadas de los vientos en Uruguay

Marcelo Barreiro¹

Fernando Arizmendi^{1,2}, Nicolas Díaz¹, Romina Trinchin^{1,2}

¹Departamento de Ciencias de la Atmósfera
Instituto de Física, Facultad de Ciencias

²Instituto Uruguayo de Meteorología

Entregable 2

Agosto 2021

Vientos en Uruguay

1. Fenómenos meteorológicos asociados a vientos en Uruguay

El clima de vientos en Uruguay está determinado por los fenómenos meteorológicos regionales, que a su vez son los mismos que dan lugar a las condiciones medias y variaciones de la temperatura y la precipitación.

Si bien los procesos de capa límite son muy importantes y controlan el movimiento del fluido en pequeñas escalas, en esta revisión nos concentraremos en la escala sinóptica (500-1000 km de escala horizontal) y mesoescala (50-500 km). La dinámica de los vientos en microescala es turbulenta y es necesario un acercamiento muy diferente que no es considerado aquí ya que depende fuertemente de las condiciones locales, y que además requiere de observaciones específicas para poder resolverla.

Entonces, cuando hablamos de clima de vientos nos concentramos en estudiar los fenómenos de escala sinóptica y meso que dan lugar a variaciones en escalas horaria a diaria en los vientos sobre Uruguay. A continuación describimos los fenómenos meteorológicos más significativos en nuestro país que están asociados a la variabilidad en los vientos (además de lluvia y temperatura).

1.1 Frentes

Los frentes son zonas de transición entre masas de aire de diferentes características de temperatura y humedad. Se tiene un frente frío cuando una masa de aire frío avanza sobre una de aire cálido, y un frente cálido cuando el aire caliente avanza desplazando al frío (Figura 1.1). Además hay frentes estacionarios y ocluidos. Los frentes están caracterizados por un comportamiento turbulento que puede causar actividad convectiva, tormentas y vientos intensos.

En Uruguay hay pasaje de frentes fríos todo el año, con un promedio de 10 durante el verano y 12 durante el invierno (Cavalcanti 2009). La dirección de traslación del frente frío es usualmente de suroeste a noreste y están frecuentemente asociados a la existencia de una circulación ciclónica con centro en el océano Atlántico (Figura 1.1). Los frentes fríos pueden causar lluvias, tormentas y vientos de dos maneras: (i) actuando en la región, es decir cuando el frente llega sobre Uruguay, o (ii) cuando aún sin haber llegado, favorecen la formación de líneas de inestabilidad pre-frontales. Estas líneas de inestabilidad pre-frontales consisten en un conjunto de nubes *Cumulonimbus* (Cb) de diversos tamaños organizados en forma de línea o curva, trasladándose en forma conjunta durante unas horas a un día. En los casos

más intensos, llamadas *squall lines*, pueden estar asociadas a líneas de actividad convectiva profunda en el sector cálido, unos 300 km por delante del frente frío.

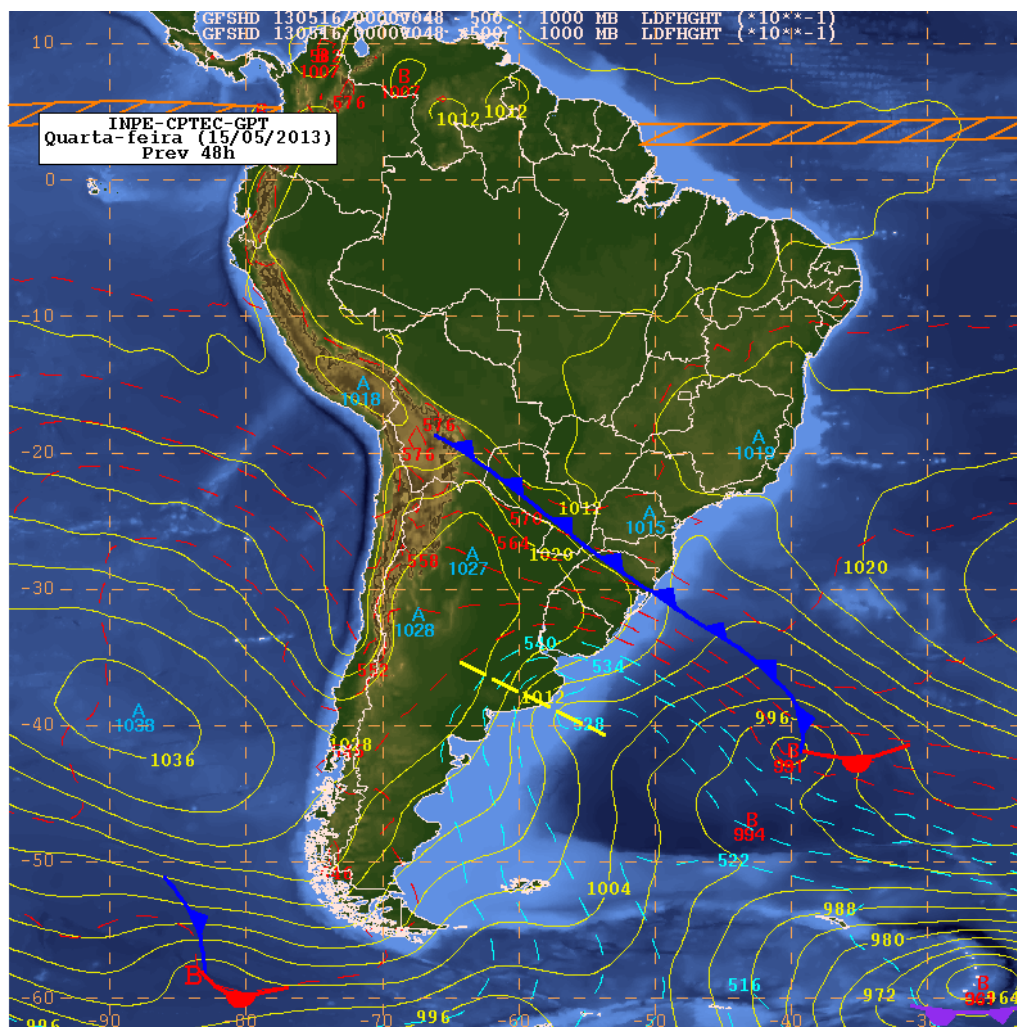


Figura 1.1 – Ejemplo de frente frío indicado por la línea azul con triángulos. Las líneas amarillas son isóbaras.

La entrada de un frente frío está acompañada por un centro de alta presión pos-frontal que en su desplazamiento puede situarse al suroeste del Río de la Plata. Esta configuración puede dar lugar a fuertes vientos del este-sudeste, que pueden generar inundaciones en las costas bajas debido a un aumento en el nivel del mar. Estos vientos son llamados comúnmente sudestadas y ocurren todo el año. El impacto de las sudestadas puede volverse cada vez mayor en un contexto de cambio climático debido a la suba del nivel medio del mar de largo plazo.

1.2 Ciclones

En Uruguay se encuentra una de las regiones más ciclogénicas de Sudamérica, es decir donde se desarrollan ciclones extratropicales en forma frecuente. Los ciclones son centros de baja presión muy pronunciados que traen aparejados lluvias y vientos (Figura 1.2). Los ciclones tienden a desarrollarse sobre Uruguay, moverse en dirección sureste e intensificarse sobre el océano Atlántico. Los vientos asociados al ciclón en superficie (10 m) pueden ser mayores a los 100 km/h y producen destrozos importantes en la zona costera del país. Un ejemplo arquetípico de ciclón extremo fue el ocurrido el 23 de agosto de 2005 que generó ráfagas de viento en la costa cercanas a los 180 km/h. Este evento causó pérdidas humanas además de pérdidas materiales estimadas en 40 millones de dólares.

Los ciclones se desarrollan en Uruguay pues en niveles altos de la atmósfera pasa una corriente en chorro con vientos superiores a los 45 m/s (87,5 nudos). Esta corriente en chorro presenta meandros que controlan el tiempo en superficie. En particular, se desarrollan ciclones sobre Uruguay cuando en niveles medios y altos de la atmósfera la corriente en chorro presenta una vaguada moviéndose desde el océano Pacífico al Atlántico y existe una zona frontal en superficie. Otros mecanismos en altura que favorecen la ciclogénesis sobre Uruguay son la vaguada estacionaria generada por la interacción de la corriente en chorro con los Andes (Gan y Rao 1991, 1994), y las bajas segregadas (Necco 1982).

Además, varios autores han mostrado que el flujo de humedad desde latitudes tropicales realizado por el *jet* de niveles bajos (LLJ, por su sigla en inglés) es importante para intensificar el desarrollo de los ciclones en superficie, lo cual a su vez favorece aun más el transporte de humedad desde el norte, estableciéndose una retroalimentación positiva entre el ciclón y el LLJ (Campetella y Vera 2002). Esta intensificación del ciclón se traduce en lluvias y vientos asociados más intensos.

Otro mecanismo que puede intensificar los ciclones es el contraste de temperatura en la confluencia entre las corrientes de Brasil (cálida) y Malvinas (fría) que ocurre cerca de 38°S al sureste de Uruguay sobre el océano Atlántico. En invierno este gradiente latitudinal de temperatura es mayor y algunos estudios sugieren que los ciclones se intensifican sobre el océano debido a la transferencia de calor latente desde el océano (Gozzo y Rocha 2013).

La traslación del ciclón en conjunto con la entrada de una alta presión sobre la Patagonia puede dar lugar a una configuración de sudestada muy intensa. De hecho, de acuerdo a Bischoff (2006) las ondas de tormenta asociadas en estos casos son las mayores de los eventos de sudestada. Esta configuración de

sudestada es más frecuente en invierno ya que los ciclones extratropicales son más comunes durante esta estación del año.

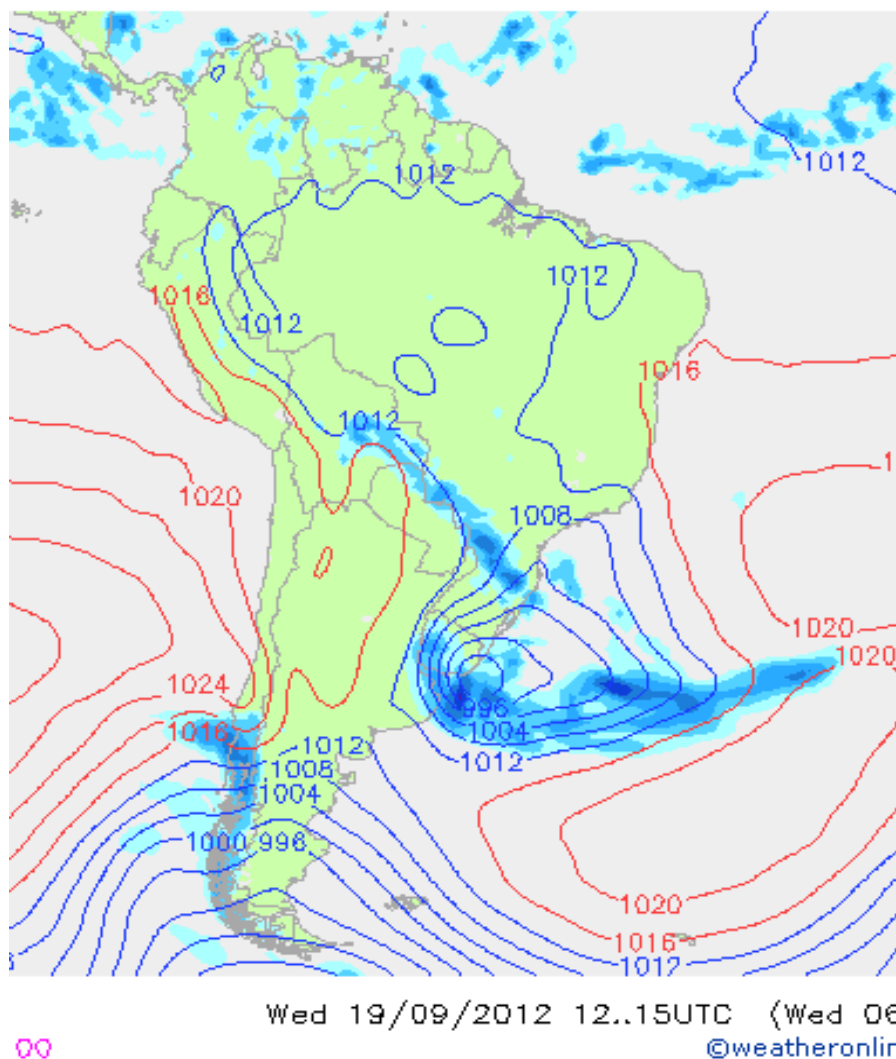


Figura 1.2 – Ciclón extratropical desarrollándose con centro en el este de Uruguay. Se muestran las isóbaras, en azul aquellas con valores menores a 1014 hPa, y en rojo aquellas con valores superiores a 1014 hPa. El sombreado indica regiones con precipitación.

1.3 Sistemas Convectivos de Mesoescala

Los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) son un grupo de tormentas que actúan como un sistema, que pueden perdurar más de 12 horas y atravesar el país. En estos sistemas la turbulencia es muy severa debido a las corrientes ascendentes y descendentes asociadas a las nubes convectivas dando lugar a fuertes ráfagas.

Hay varios tipos de SCM, entre ellos están los complejos convectivos de mesoescala (CCM), muy comunes en nuestra región. Los CCM son grupos de Cb evolucionando en forma conjunta, fácilmente identificables en las imágenes de satélite como sistemas de nubes con forma aproximadamente circular y con un crecimiento explosivo en un intervalo de 6 a 12 horas (Figura 1.3).

Las condiciones dinámicas que favorecen su formación son dos: (i) la presencia de un LLJ que trae aire cálido y húmedo desde el norte, y (ii) una corriente en chorro en niveles altos intensificada que genera divergencia al noroeste del máximo de esta corriente y por lo tanto ascenso de aire en esa región (Salio et al 2007).

En nuestro país los CCM son más frecuentes en la estación cálida (primavera-verano) al norte del río Negro ya que el LLJ trae aire más cálido y húmedo desde el sur de la Amazonia. Los CCM pueden dar lugar a inundaciones repentinas debido a sus intensas lluvias. Por su naturaleza convectiva, estos sistemas tienen fuertes vientos asociados (p.ej. corrientes descendentes y frentes de ráfaga), además de granizo y rayos. En algunos casos pueden dar lugar a tornados. Muchos de los CCM que afectan nuestro país se desarrollan en el litoral argentino y se trasladan hacia el este, o sea que tienen una dirección de traslación típica oeste-este; no obstante, también se pueden formar CCM sobre Uruguay.

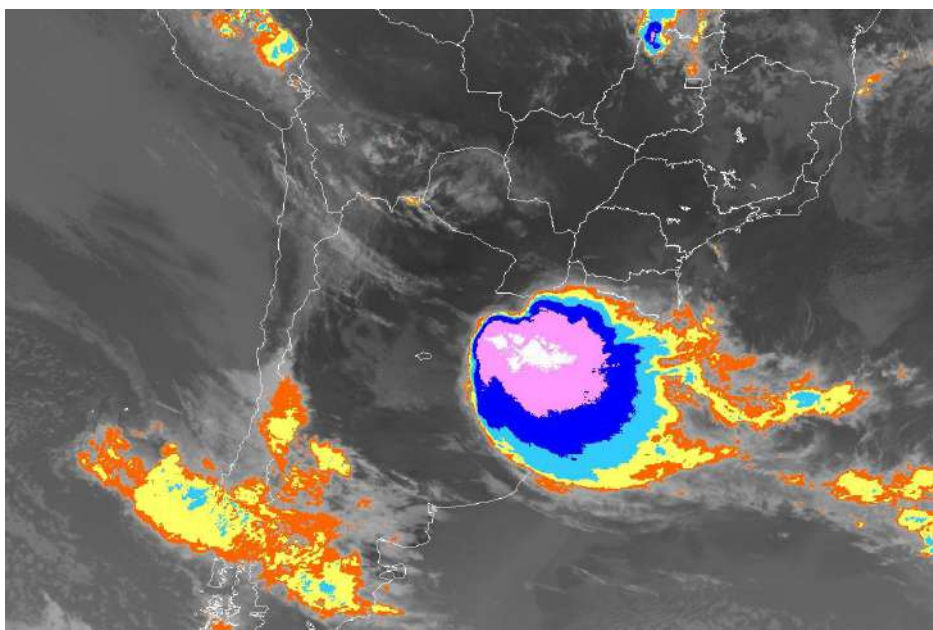


Figura 1.3 – Ejemplo de complejo convectivo de mesoescala. Imágen satelital tomada de CPTEC/INPE.

Otro tipo común de SCM que ocurre en nuestras latitudes es una línea de tormentas (*squall line*). Estas se forman a lo largo de los frentes fríos o por delante de ellos y dan lugar a lluvias extremas, granizo y vientos intensos rectos, y a veces se las identifica como línea de turbonadas.

1.4 Brisa

La brisa marina, o virazón, es un fenómeno común a lo largo de nuestras costas en verano. Se produce por el calentamiento diferencial entre el continente y el océano, genera una celda vertical con vientos perpendiculares a la costa desde el océano a la tierra, con una dimensión horizontal típica de 30 km y vertical de 1 km. Durante la noche, la diferencia de temperatura tierra-mar se invierte y se genera la brisa de tierra.

En superficie el frente de brisa penetra en forma de cuña hacia la tierra generando convergencia en superficie y la generación de nubes si existen las condiciones apropiadas. Así, la brisa se puede detectar en imágenes satelitales como una línea de nubes paralela a la costa, lo cual indica a su vez el límite de penetración de la brisa (Figura 1.4). Debido al ingreso de aire marino hacia la tierra se observa una disminución de la temperatura y aumento de la humedad en la costa.

La brisa marina se inicia cerca del mediodía y finaliza en la tardecita. La hora de inicio es más temprana en la costa Atlántica que en la región estuarina ya que las temperaturas oceánicas son menores. Los vientos típicos máximos asociados a la brisa marina son del orden de 15 km/h y ocurren durante la tarde cuando la capa límite está bien mezclada y hay transferencia de momento desde altura a superficie. Si bien puede ocurrir todo el año, la brisa es mucho más frecuente de diciembre a marzo (Manta et al 2020).

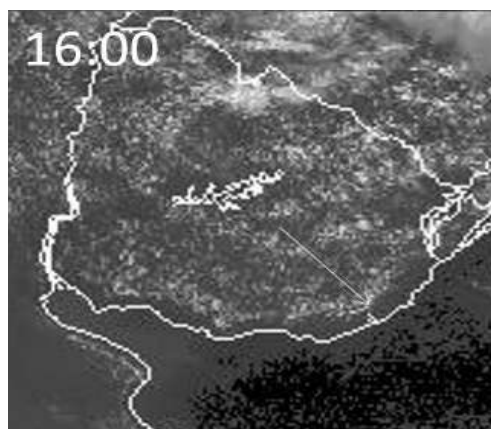


Figura 1.4 – Frente de brisa indicado por la flecha blanca. Imágen de archivo de satélite GOES 13 para el 22 de febrero de 2015. Tomado de Manta (2017).

1.5 Vientos intensos sostenidos y ráfagas

De la descripción anterior podemos concluir que los vientos intensos en nuestro país están asociados a los ciclones extratropicales y a los fenómenos de mesoescala, tales como complejos convectivos y líneas de turbonada.

En cuanto a los ciclones, la escala espacial de los vientos intensos asociados es del orden de cientos de kilómetros y pueden durar varias horas. La velocidad de los vientos sostenidos (promedio en 10 minutos) en superficie puede alcanzar los 100 km/h en casos extremos, con rachas de viento superiores en zonas costeras. Los ciclones son el principal agente causante de daños importantes en la infraestructura costera ya que sus fuertes vientos no solo impactan directamente sobre construcciones terrestres, sino que también generan oleaje y aumento del nivel del mar. Por ejemplo, durante invierno de 2016 un ciclón azotó Maldonado y Rocha generando daños en ramblas, rutas y casas en zonas extensas de balnearios costeros.

Por otro lado, los vientos fuertes en las tormentas severas se deben principalmente a las corrientes convectivas descendentes (CCD) asociadas y tienen escalas de decenas de metros a varios kilómetros y duran unos minutos. Las CCD pueden alcanzar velocidades superiores a los 200 km/h y pueden ser húmedas si están acompañadas por fuertes lluvias, o secas cuando la base de la nube es más alta y la precipitación se evapora antes de llegar al suelo (virga). Los vientos asociados al pasaje de tormentas severas pueden causar extensos daños también debido a la generación de tornados, como el ocurrido en la ciudad de Dolores en abril de 2016.

Durañona (2015) define como eventos de viento intenso a aquellos que presentan ráfagas que superan los 80 km/h (43,2 nudos), ya que se identificó esta velocidad como el umbral para el cual se comienzan a reportar daños, como voladura de techos livianos y caída de árboles. Tomando esta definición de vientos intensos aplicada a 45 m de altura, Durañona et al. (2016) encuentran que, considerando todo el país, la mayoría de estos eventos ocurre entre octubre y febrero con vientos predominantes son del sur-suroeste coincidiendo con la dirección típica de pasaje de frentes fríos. En particular, estos eventos son más frecuentes durante octubre-noviembre para el sur y este del país, y durante verano en el norte. El noroeste del país es la región que presenta mayor número de eventos. Además, concluyen que la mayoría de los eventos de viento intenso ocurren en situaciones de actividad convectiva intensa, es decir estarían asociados a complejos convectivos de mesoescala, líneas de turbonada o frentes fríos, y no serían de escala sinóptica.

Asimismo, Durañona y Cataldo (2008) concluyen que la mayoría de las fallas en las líneas de transmisión eléctrica Palmar-Montevideo coinciden con el pasaje de

tormentas severas. En un trabajo posterior Durañona et al. (2019) determinan que el 80% de las fallas en el sistema de distribución eléctrica en el noroeste del país es debido a eventos de actividad convectiva severa, mientras que el 20% restante es debido a vientos de escala sinóptica sobre todo asociado a ciclones extratropicales. Por el contrario, en la región sureste la mayoría de las fallas estuvo asociado al pasaje de ciclones intensos. En base a estos resultados Durañona et al. (2019) concluye la necesidad de actualizar la norma vigente de vientos extremos en Uruguay que regula los cálculos de construcción.

2. Datos

En este trabajo se usan datos de vientos de diferentes fuentes: (i) datos de estaciones meteorológicas convencionales y automáticas provistas por INUMET, (ii) dos reanálisis atmosféricos, a saber NCEP-CDAS1 (Kalnay et al. 1996) y ERA5 (Hersbach et al., 2020), (iii) salidas de modelos climáticos de CMIP6 (Programa Mundial para la Investigación en Clima). A continuación se describe cada uno de ellos.

2.1 Datos INUMET

Se utilizaron datos de dirección e intensidad de viento horario medidos a 10 m de altura en las estaciones meteorológicas convencionales de Prado, Carrasco, Paysandú, Rivera, Colonia y Rocha (Figura 2.1) durante el período 2000-2020. Estos valores de viento se calculan como el valor medio de los últimos 10 minutos de cada hora. Las estaciones muestran faltante de datos durante varios períodos y algunas estaciones solo miden durante el día. Carrasco es la estación con cobertura más completa de datos de los últimos 20 años. Colonia y Paysandú casi miden únicamente entre las 7:00 y las 19:00 hs, aunque presentan algunos datos durante la noche. Por otro lado, Prado midió durante las 24 hs de 2000 a 2003, luego sólo de 7:00 a 19:00 hs, y a partir de 2018 mide nuevamente durante las 24 hs. La figura 2.2 resume la disponibilidad de datos en cada estación.

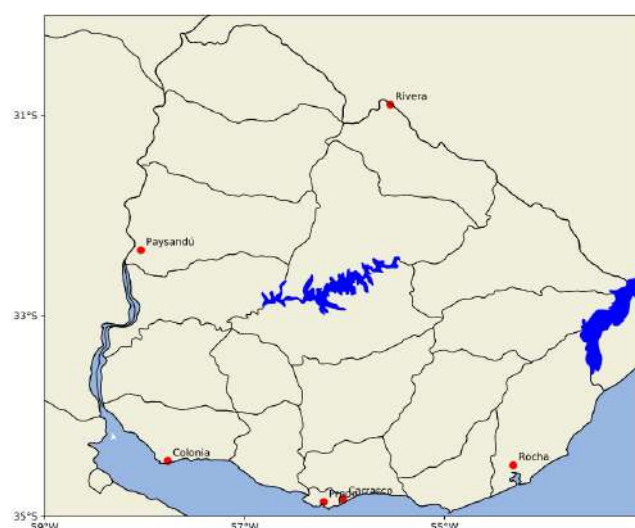


Figura 2.1 - Ubicación de las estaciones meteorológicas convencionales.

También se usaron estaciones meteorológicas automáticas en Colonia, Prado, Rivera, Paysandú y Rocha. Estas estaciones reportan datos medidos a 10 m de altura y cada 10 minutos de la dirección e intensidad promedio del viento en esos 10 minutos (U_{medio}), que es el viento sostenido. También se reporta la intensidad máxima y su dirección en ese intervalo. La intensidad máxima del viento (U_{max}) se calcula como la velocidad máxima promediada en 3 segundos durante esos 10 minutos. En este estudio consideramos una racha si el valor de U_{max} supera el percentil 99 (p_{99}) de su distribución.

Si bien la frecuencia de los datos en estaciones automáticas es mayor que la de las estaciones convencionales el período de cobertura es sustancialmente menor. La tabla 2.1 indica el período para cada estación automática. Los períodos no están completos, siendo Prado la estación más completa con solamente un 0.5% de datos faltantes en (2019-2020). Colonia tiene, por otro lado, un 18% de datos faltantes en dicho período.

Estación automática	Período
Prado	03/08/2018-31/12/2020
Colonia	19/08/2018-31/12/2020
Rivera	27/04/2020-31/12/2020
Paysandú	15/05/2020-31/12/2020
Rocha	05/11/2018-31/12/2020

Tabla 2.1 – Cobertura de datos de las estaciones automáticas.

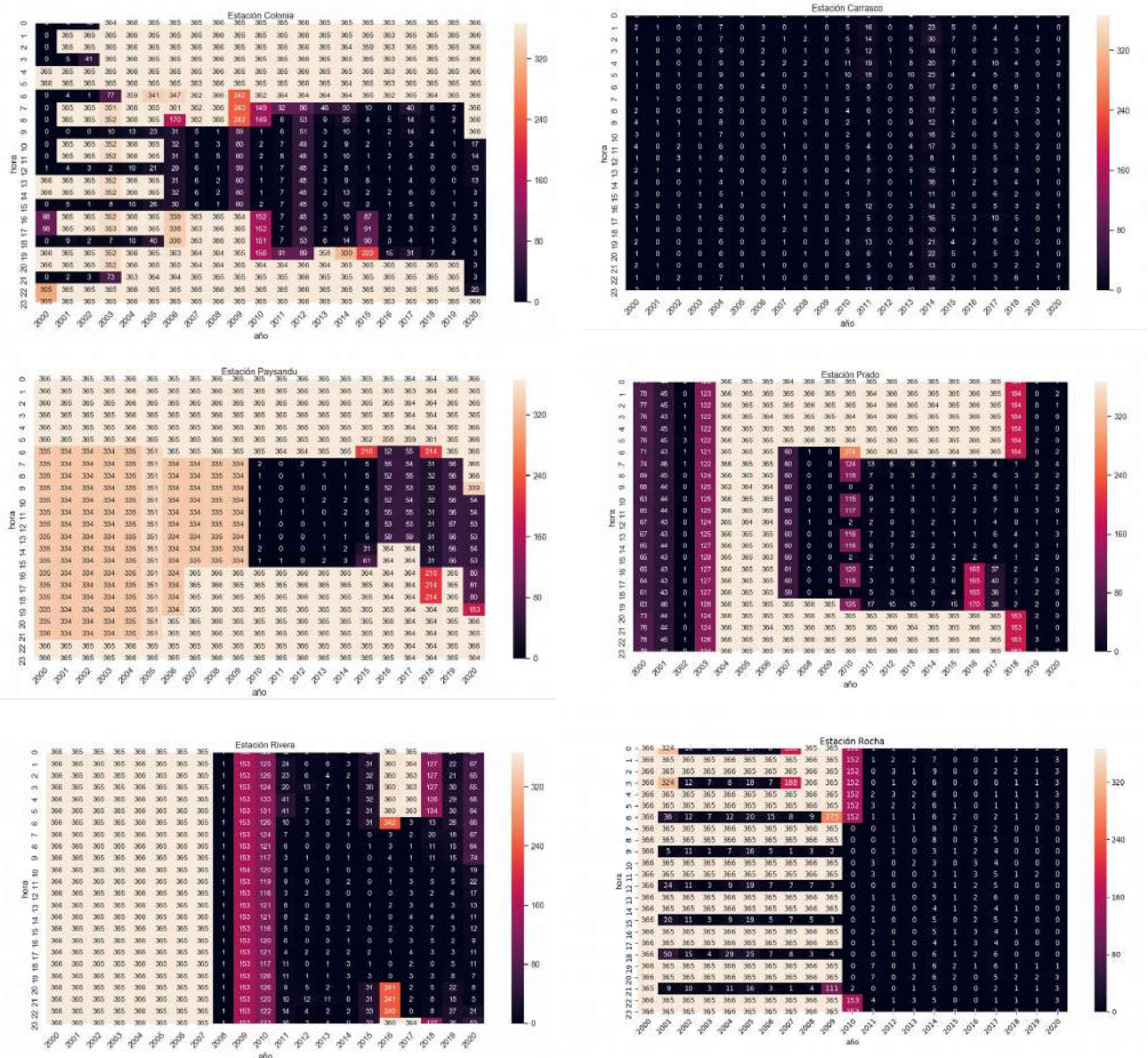


Figura 2.2 - Visualización de la distribución de datos faltantes por hora y por año en cada estación meteorológica considerada. La cantidad de datos faltantes se cuenta para la variable intensidad de viento. Los colores más claros indican mayor cantidad de datos faltantes. Los días bisieptos están considerados, por eso el máximo de datos faltantes en algunos años puede ser 366.

2.2 Reanálisis atmosféricos

Los reanálisis atmosféricos se construyen combinando la salida de un modelo de circulación general de la atmósfera con datos observados, y son la mejor estimación que se tiene del comportamiento atmosférico a nivel global. Los datos de reanálisis cubren horizontalmente todo el globo y verticalmente toda la tropósfera y parte de la estratósfera. Se utilizaron medias diarias de vientos en 1000 hPa y presión a nivel del mar del reanálisis NCEP-CDAS1 y datos horarios de presión y vientos en 10 m de ERA5.

El reanálisis NCEP-CDAS1 tiene una resolución horizontal de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ y se consideró el período 1948-2018.

El reanálisis ERA5 tiene una resolución horizontal de 31 km y se consideró el período 1979-2020.

2.3 Modelos climáticos de CMIP6

Las salidas de los modelos climáticos acoplados CMIP6 se utilizaron para realizar las proyecciones a futuro que se presentan en el Entregable 3. Se incluye la descripción aquí por completitud, para describir en un solo lugar todas las bases de datos utilizadas. Los modelos CMIP6 son los más modernos al día de hoy y combinan modelos de atmósfera, de océano, de hielos y de superficie para simular el clima presente y futuro. Los experimentos realizados con estos modelos climáticos están organizados en el Proyecto “Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP) desarrollado por el Programa Mundial para la Investigación en Clima (WCRP, por su sigla en inglés). Los informes del IPCC se basan fuertemente en las salidas de las corridas de CMIP. Por ejemplo, el IPCC AR5 se basó en CMIP3 y CMIP5, mientras que el informe del IPCC AR6 se basa en CMIP5 y CMIP6. En este trabajo utilizamos un subconjunto de modelos de CMIP6 que fuera validado para nuestro país en un Convenio anterior en el marco de NAP-Costas (tabla 2.2, Barreiro et al. 2019).

Se utilizaron 4 experimentos de CMIP6. Para las proyecciones se utilizaron los escenarios SSP245 y SSP585 que van desde 2015 hasta 2100. Asimismo, se consideraron la corrida pre-industrial (piControl) y la histórica de cada modelo. La corrida histórica de cada modelo se realiza desde 1850 hasta 2014 y permite validar los modelos contra el registro histórico ya que en estos casos los modelos son corridos con la evolución observada de los forzantes naturales y antropogénicos. En la corrida pre-industrial los modelos son forzados con condiciones (por ejemplo concentración de CO_2) representativas del período anterior a la industrialización, tomando 1850 como año de referencia, y permite estimar la variabilidad natural sin interferencia de la acción humana (se consideran 200 años de esta corrida). Se consideró una corrida de cada modelo para cada tipo de experimento.

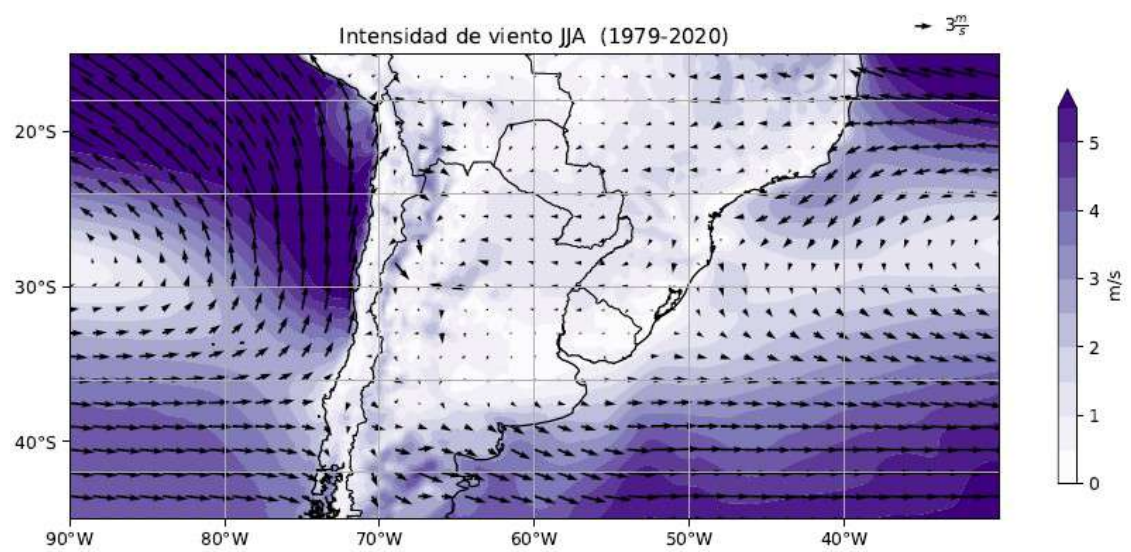
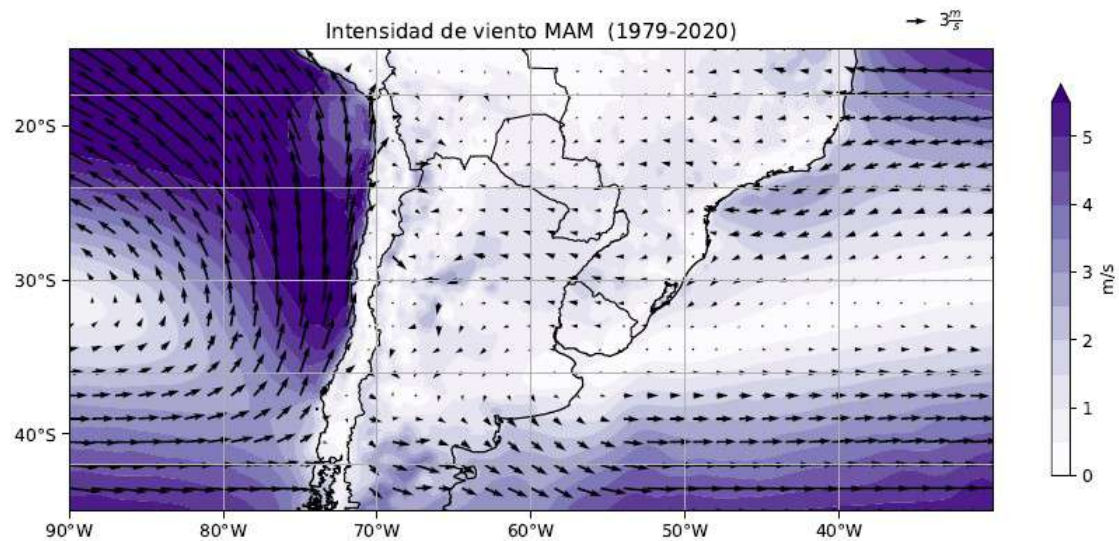
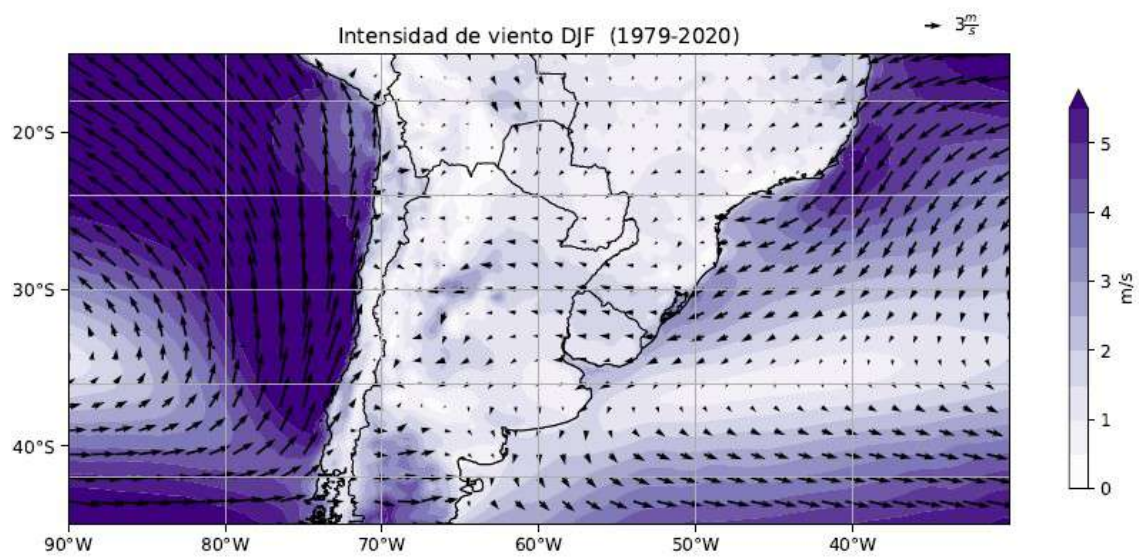
Modelo	Nombre/ Institución	Atmósfera Resolución horizontal	Atmósfera Resolución vertical
EC_Earth3	EC-Earth Consortium	TL255, 106 km	91 niveles
EC_Earth3-Veg	EC-Earth Consortium	TL255, 106 km	91 niveles
CESM2	National Centre for Atmospheric Research, EE.UU.	0.9x1.25°	32 niveles
CESM2-WACCM	National Centre for Atmospheric Research, EE.UU.	0.9x1.25°	70 niveles
CNRM-CM6-1	CNRM, CERFACS, Francia	TL127, 1.4°	91 niveles
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, NOAA, EE.UU.	1°	49 niveles
MRI-ESM2-O	Meteorological Research Institute, Japón	TL159, 170 km	80 niveles
UKESM1-0-LL	MetOffice, NERC, Reino Unido	N96, 1.8x1.25°	85 niveles

Tabla 2.2 – Modelos climáticos de CMIP6 utilizados .

3. Climatología y tendencias

3.1 Promedio trimestral

Uruguay está situado en la costa este de Sudamérica, entre 30° S y 35° S, lo cual hace que su clima esté influenciado por el anticiclón semipermanente del Atlántico Sur (Figura 3.1). Este anticiclón tiene su centro ubicado en promedio cerca de los 30°S, pero se desplaza hacia el sur en verano y hacia el norte en invierno. Asimismo, este anticiclón penetra más hacia el continente durante el invierno, mientras que en verano el desarrollo de una baja presión continental limita su extensión. Como consecuencia, los vientos sobre Uruguay varían con la temporada y son más intensos al norte del país teniendo una marcada componente este (Figura 3.2). En invierno el ingreso al continente del anticiclón del Atlántico sur genera vientos con componente este al norte y oeste al sur del país.



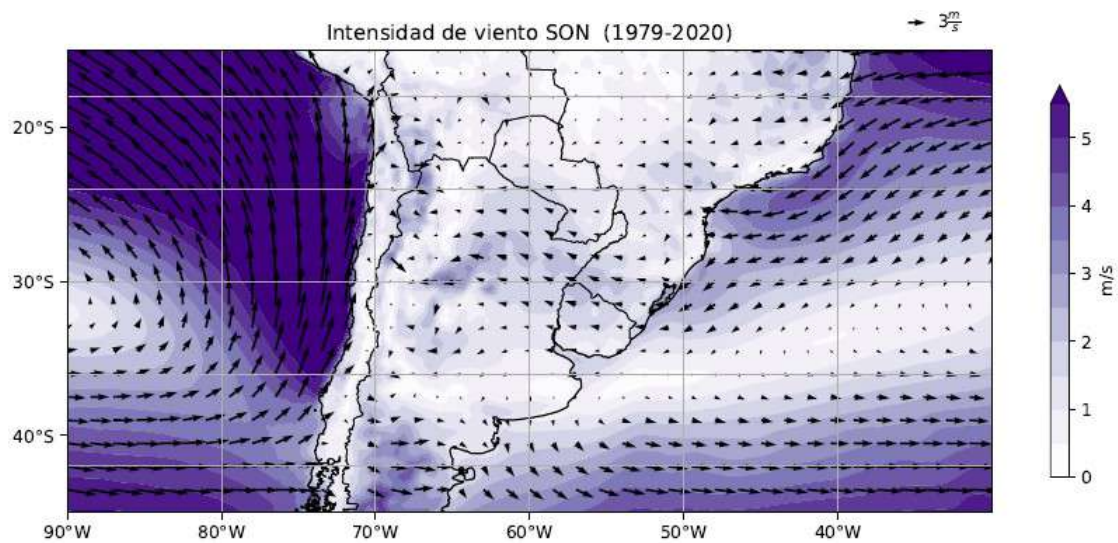


Figura 3.1 – Promedio de los vientos en superficie para las diferentes estaciones del año.

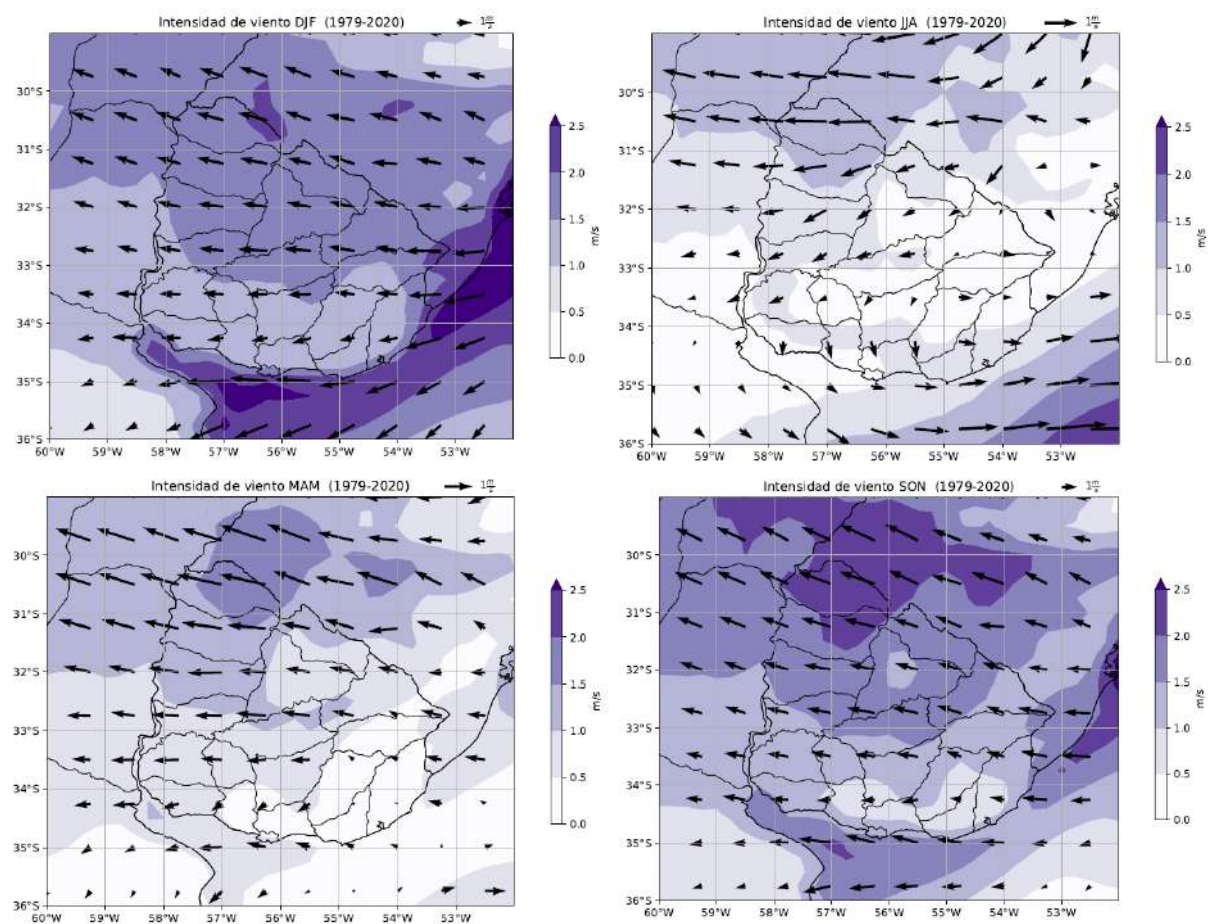


Figura 3.2 – Promedio de los vientos en superficie sobre Uruguay para las diferentes estaciones del año.

3.2 Variabilidad de los vientos en Uruguay

Los vientos medios trimestrales son relativamente débiles con intensidades cercanas a 4 nudos (7.2 km/h) pues son el promedio de los vientos horarios que tienen diferentes direcciones e intensidades. Para mostrar la variabilidad horaria se grafican las rosas de los vientos de las 6 estaciones meteorológicas a nivel anual (Figura 3.3), para verano (Figura 3.4) y para invierno (Figura 3.5).

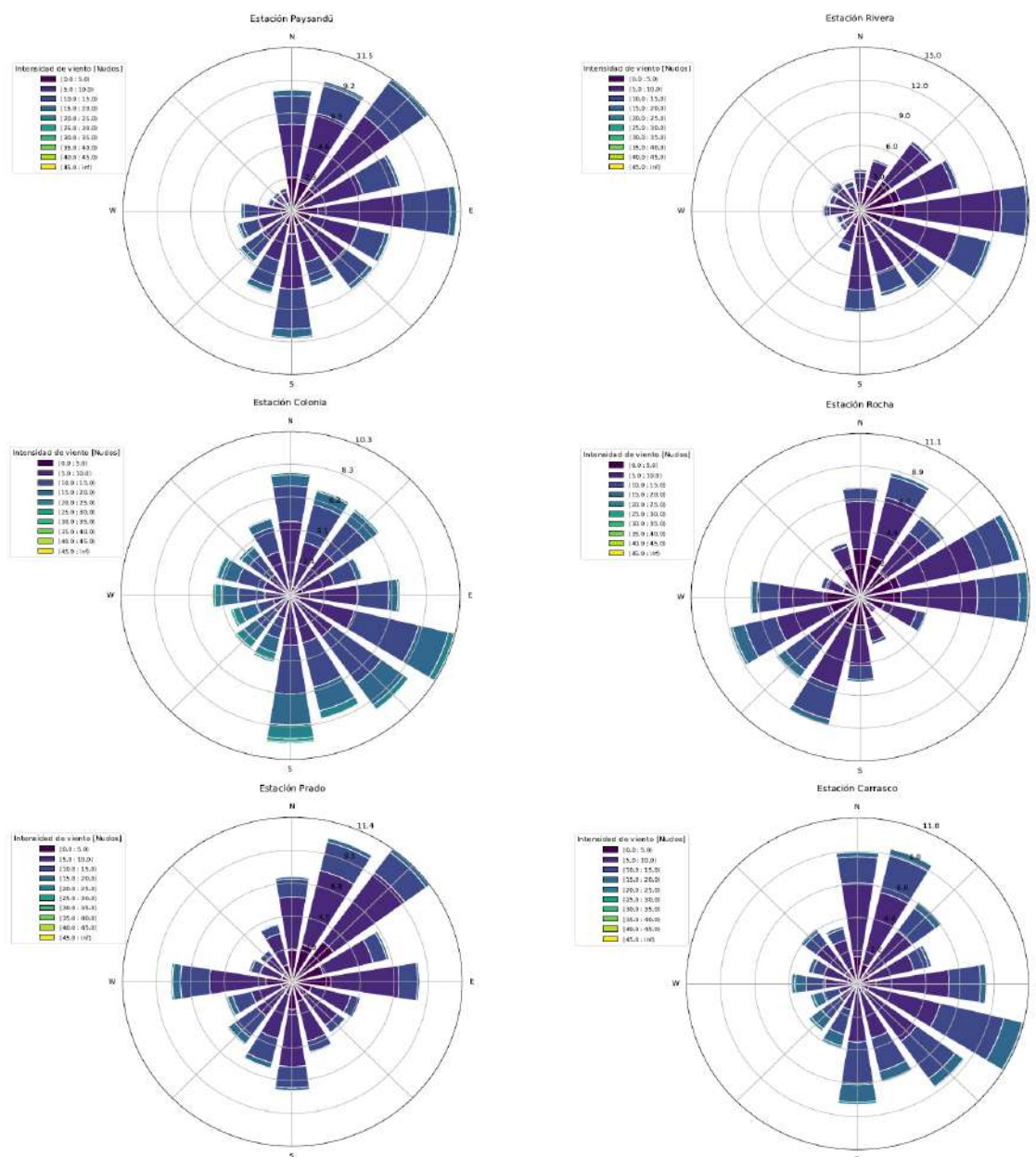


Figura 3.3 – Rosas de los vientos horarios para todo el año en las estaciones meteorológicas.



Figura 3.4 – Rosas de los vientos horarios en DEF para las estaciones meteorológicas.

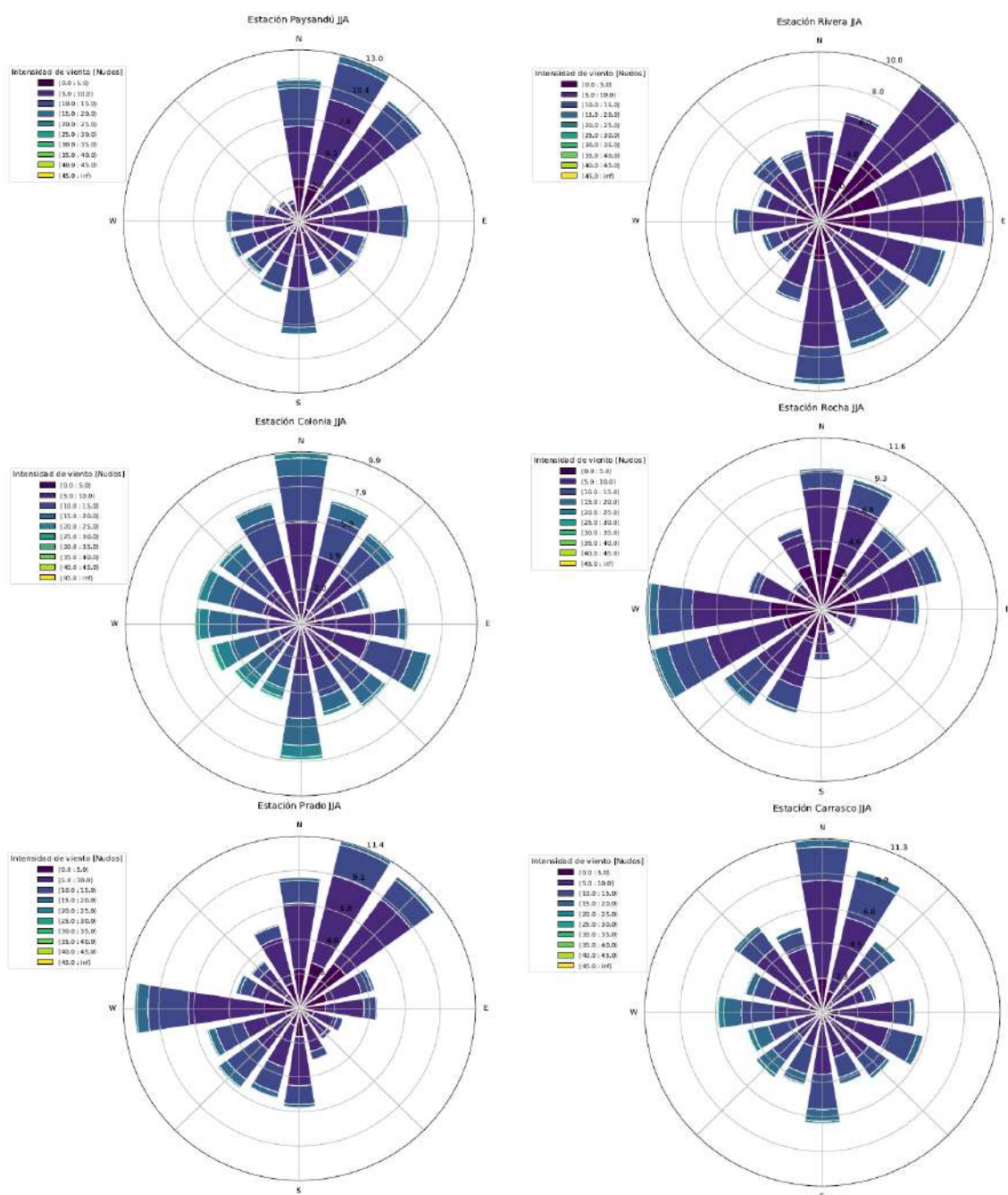


Figura 3.5 – Rosas de los vientos horarios en JJA para las estaciones meteorológicas.

Estas figuras muestran un claro dominio de la componente este durante el verano y un aumento de la componente oeste durante el invierno en todas las estaciones. Asimismo, se observa que los vientos más intensos son de componente sur en todo el país. Además, se constata que primavera es la temporada con intensidades de viento mayores, siendo Colonia la localidad que muestra vientos más fuertes (Figura 3.6).

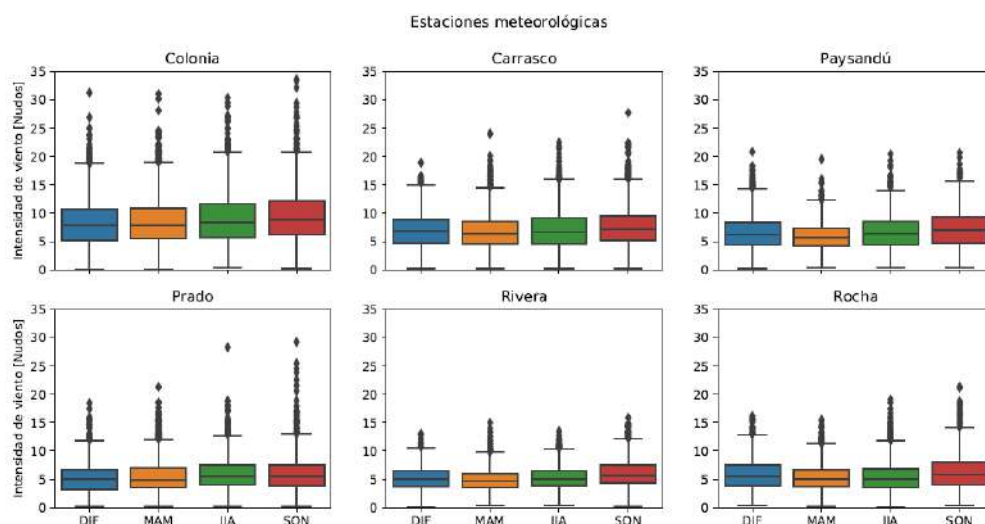


Figura 3.6 – Distribución de vientos medios diarios durante las diferentes estaciones del año para las 6 estaciones meteorológicas.

Para mayor detalle del ciclo estacional, las figuras 3.7 a 3.12 muestran las rosas de los vientos medios diarios para cada temporada en las 6 localidades consideradas.

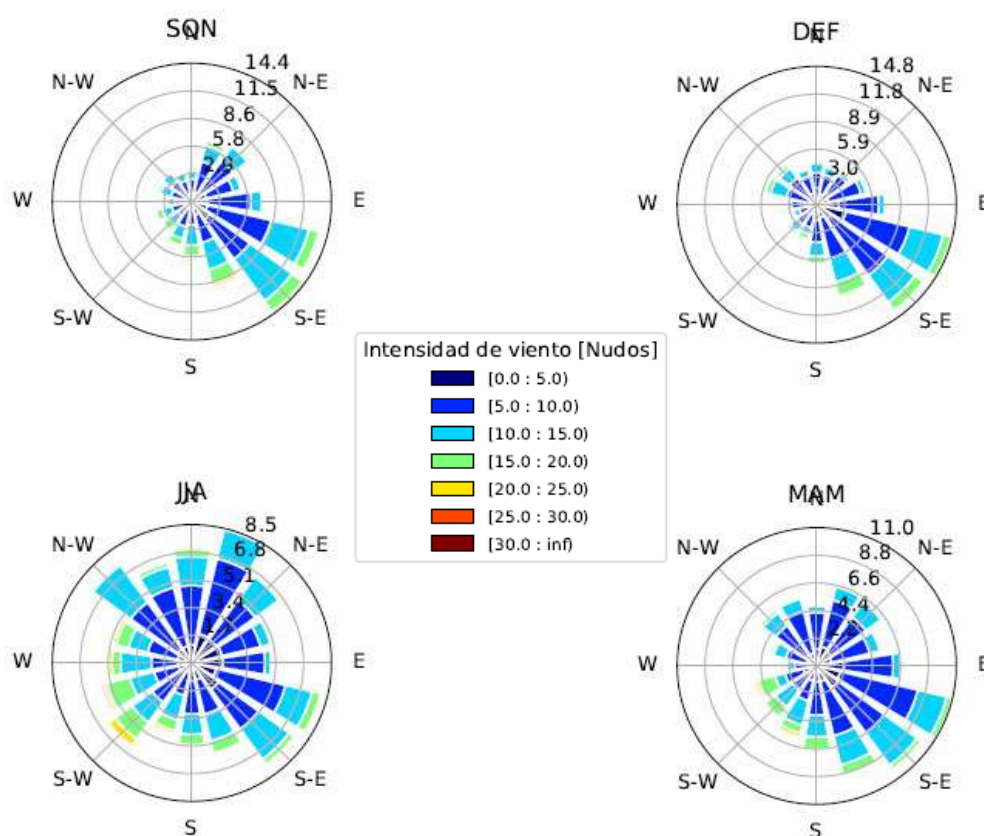


Figura 3.7 – Rosa de los vientos medios diarios para Colonia.

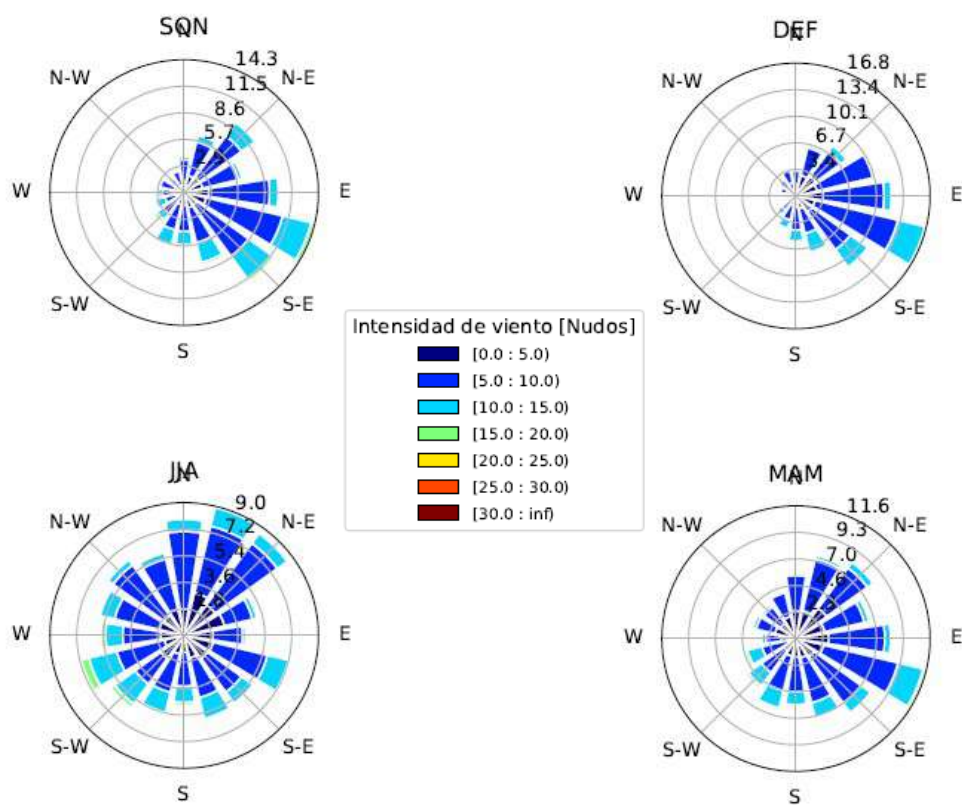


Figura 3.8 – Rosa de los vientos medios diarios en Carrasco.

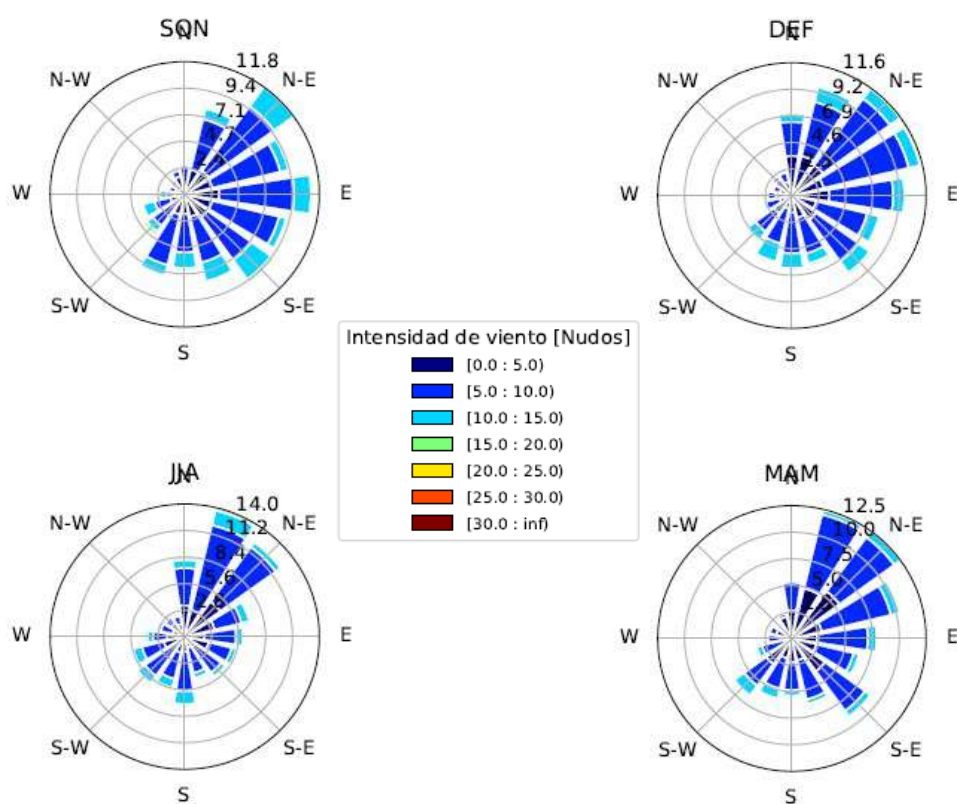


Figura 3.9 - Rosa de los vientos medios diarios en Paysandú.

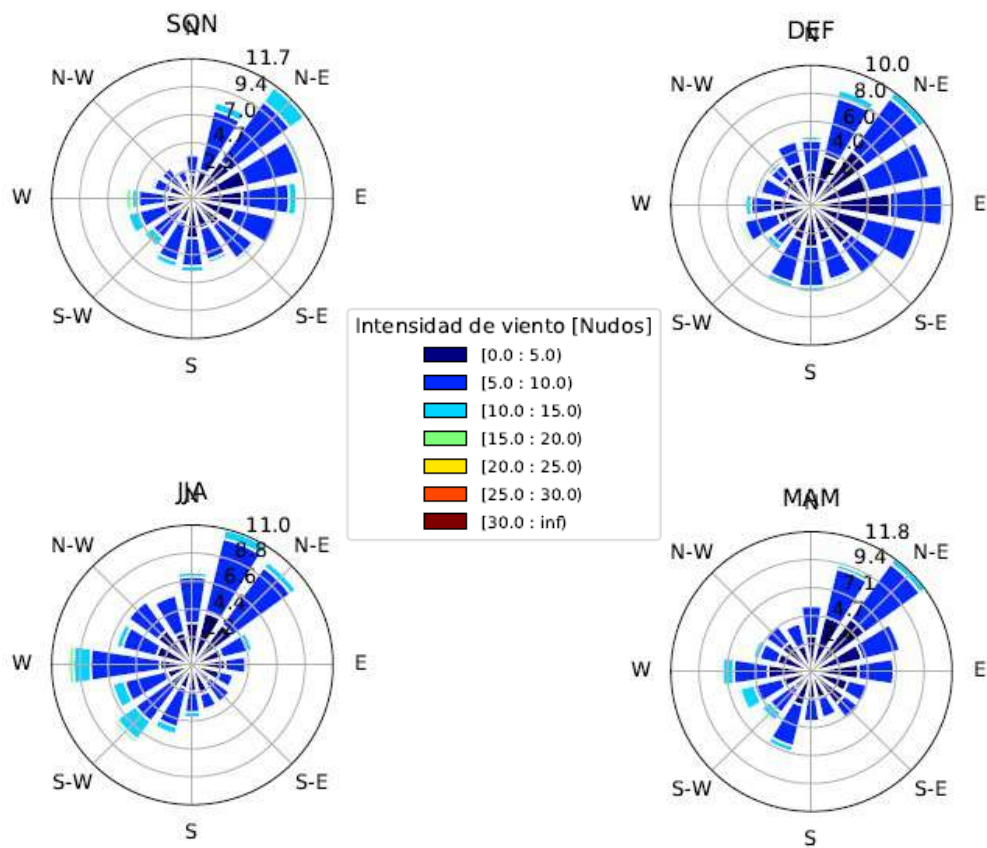


Figura 3.10 - Rosa de los vientos medios diarios en Prado

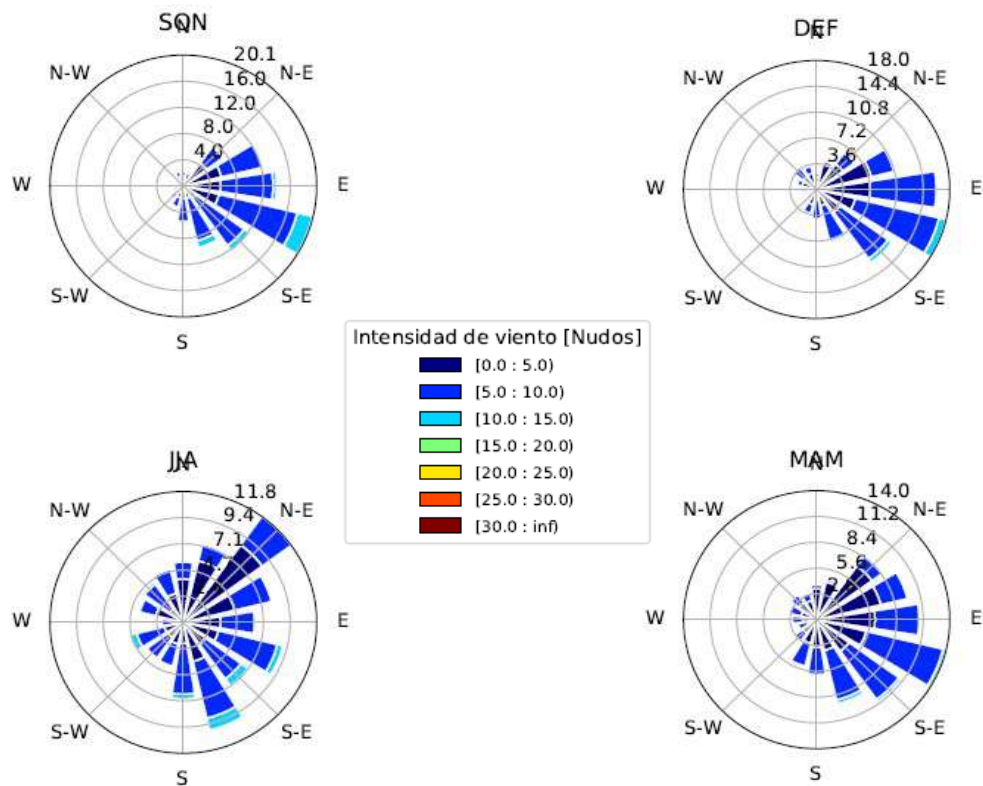


Figura 3.11 – Rosa de los vientos medios diarios en Rivera.

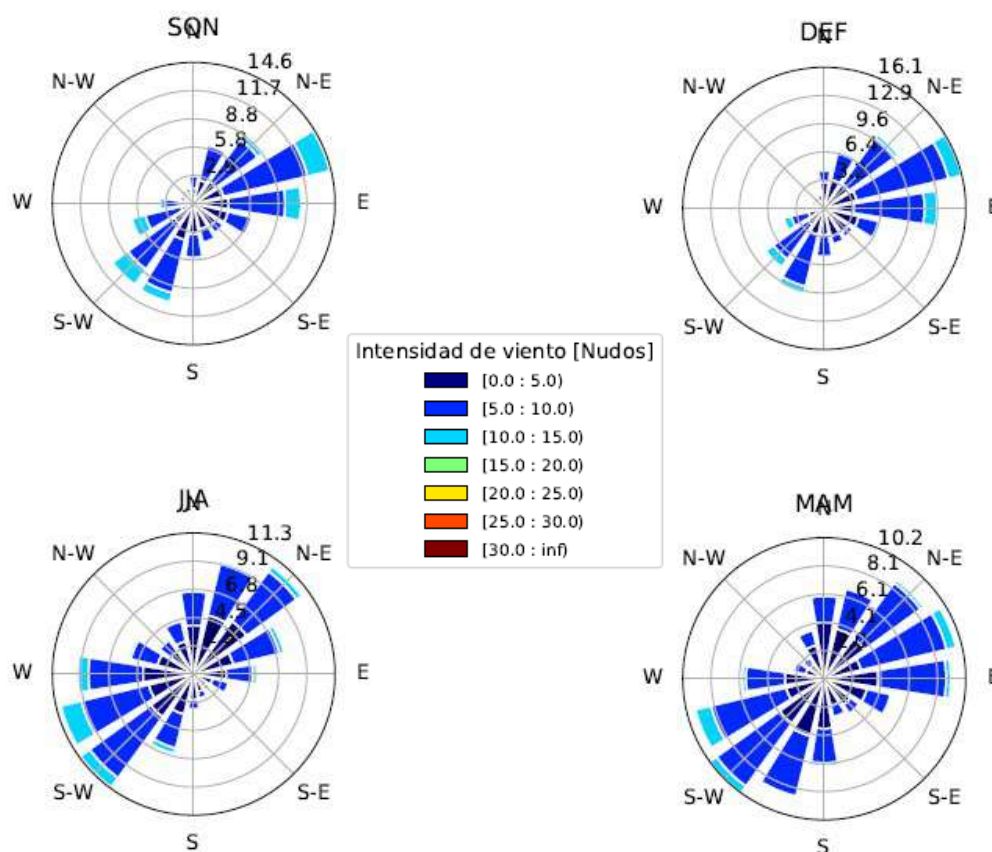


Figura 3.12 – Rosa de los vientos medios diarios en Rocha.

A partir de las figuras anteriores se puede concluir lo siguiente:

- Colonia y Carrasco: los vientos predominantes son del SE durante primavera, verano y otoño, mientras que en invierno no hay dirección predominante de los vientos, pero los más intensos son del SO con valores del orden de 20 nudos.
- Prado: predominancia de vientos de componente NE en todo el año, y durante el invierno la componente O se hace más frecuente.
- Paysandú tiene vientos predominantes del NE durante todo el año, si bien en primavera verano la componente E-SE toma mayor importancia.
- Rivera: vientos predominantes del SE en todas las temporadas, excepto en invierno cuando la componente NE se hace más frecuente. Vientos más intensos del SE.
- Rocha: vientos predominantes del E-NE y del SO en todas las temporadas del año, si bien la última es más frecuente en invierno y otoño, y la primera en primavera y verano.

Para comparar entre estaciones meteorológicas es importante tener en cuenta el período de medición de acuerdo a la figura 2.1. Al no medir todas las estaciones durante las 24 horas no es posible hacer una comparación directa en la mayoría de los casos.

Las diferencias en el período de medición se hacen evidentes en el ciclo diario de la intensidad del viento para cada estación meteorológica ya que en algunos casos no se llega a completar las 24 horas (Figuras 3.13 y 3.14). En todas las estaciones se observa una mayor intensidad del viento en las horas del día con respecto a las de la noche asociado a la mezcla turbulenta por una capa límite más desarrollada. Asimismo, durante verano en las estaciones costeras (en particular en Rocha, Carrasco y Prado) se detecta un mayor aumento de la intensidad del viento que dura hasta la tardecita asociado a la brisa marina.

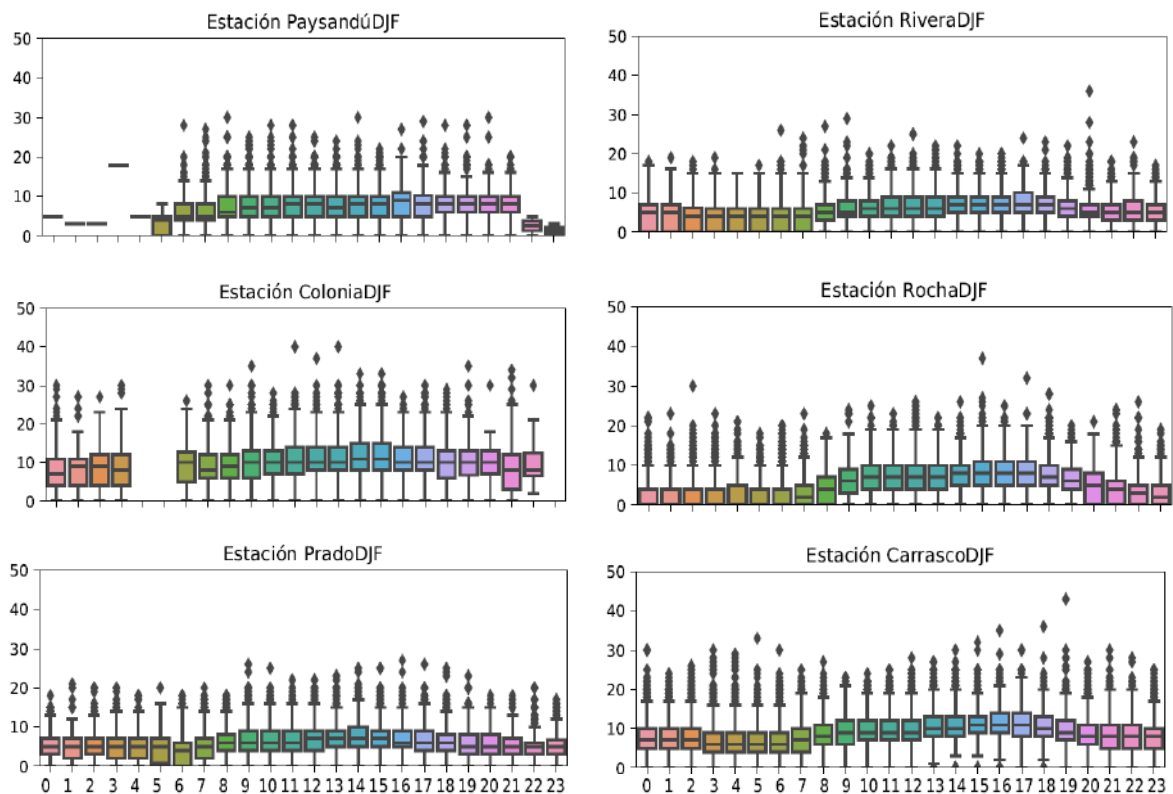


Figura 3.13 – Ciclo diario de intensidad del viento (nudos) en diferentes estaciones meteorológicas durante verano.

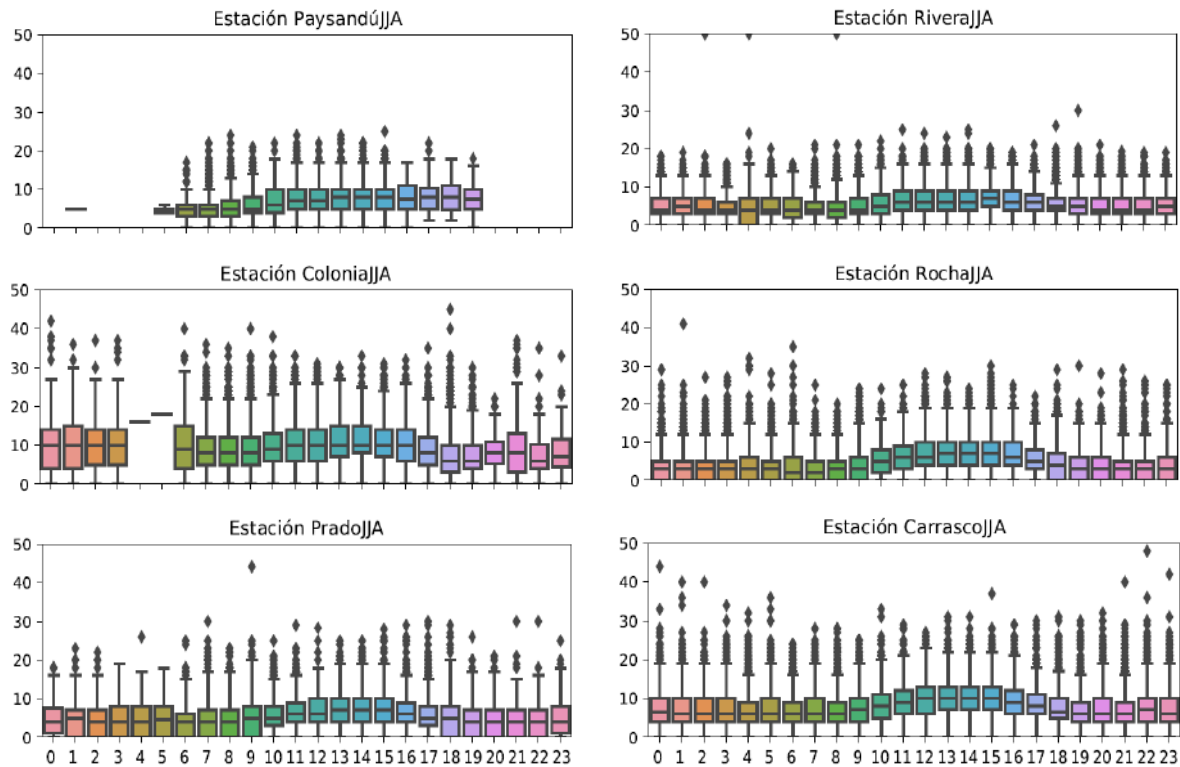


Figura 3.14 – Ciclo diario de intensidad del viento (nudos) en diferentes estaciones meteorológicas durante invierno.

3.3 Validación de ERA5

Como se mencionó más arriba e ilustró en la figura 2.1, las estaciones meteorológicas no tienen mediciones continuas durante las 24 horas en la mayoría de los casos. Además, son series temporales relativamente cortas, como máximo 20 años, lo cual impide estudiar las tendencias que podrían resultar del cambio climático. Para complementar estos datos observados *in-situ* se utilizan los datos del reanálisis atmosférico ERA5. Este reanálisis tiene una alta resolución espacial (31 km) y temporal (datos horarios), lo cual permite una comparación razonable con los datos observados. Este análisis permite, por un lado, validar los datos del reanálisis, y así utilizarlos para realizar un estudio de tendencias. Por otro lado, permite identificar posibles errores en los datos *in-situ* y complementarlos, como por ejemplo para estudiar los vientos durante la noche en localidades que no miden las 24 hs.

La figura 3.15 muestra la rosa de los vientos horarios para los puntos de grilla más cercanos a las 6 localidades estudiadas. Los nombres de cada panel indican la localidad con la cual deben compararse estas rosas con aquellas de la figura 3.3.

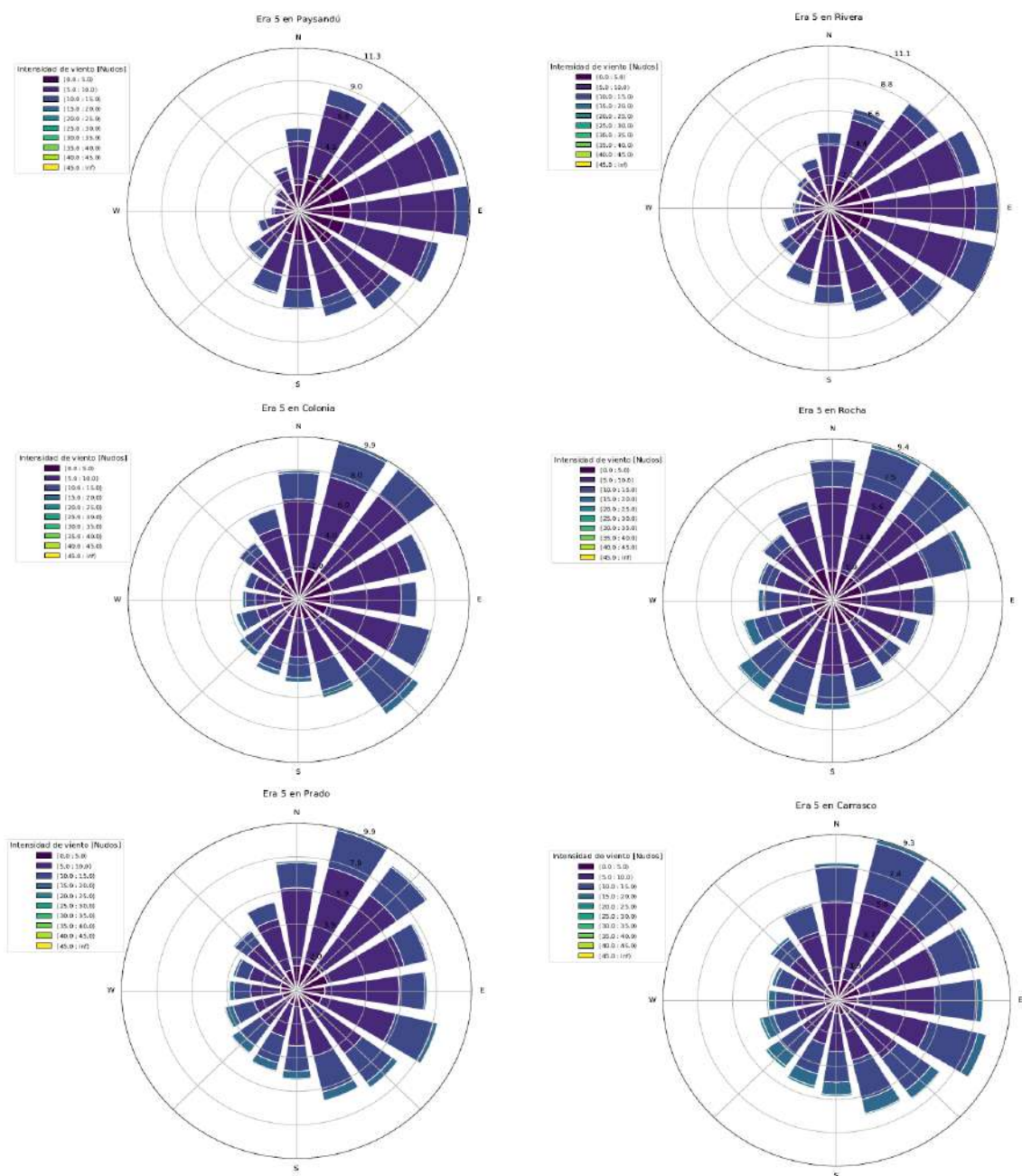


Figura 3.15 – Rosas de los vientos diarios para todo el año en los puntos de grilla más cercanos de ERA5 a las estaciones meteorológicas.

La comparación de las rosas de las Figura 3.3 y 3.15 sugiere que el reanálisis está representando adecuadamente las variaciones horarias en la intensidad y dirección del viento sobre Uruguay. Al mismo tiempo se observan algunas diferencias.

Por ejemplo, para Colonia tanto el reanálisis como las observaciones presentan vientos frecuentes del SE, pero mientras que en las observaciones estos son los más predominantes, en el reanálisis son los del NE. En Prado reanálisis y observaciones coinciden en la predominancia de los vientos del NE, aunque las observaciones muestran también vientos frecuentes de componente O. En Carrasco tanto reanálisis como observaciones muestran una predominancia de los vientos con componente E. La no existencia de vientos de componente O en Carrasco, ni en el reanálisis en Prado, pone en duda los vientos de componente O medidos en Prado. En Rocha las observaciones y el reanálisis muestran mayor frecuencia de vientos con componente NE y SO, aunque las observaciones sugieren predominancia de los vientos de componente E y O. En Paysandú y Rivera el reanálisis presenta vientos predominantes de componente E, similar a las observaciones, pero estas últimas tienen más marcada la frecuencia de vientos del E, particularmente en Rivera. En general se observa que las intensidades máximas se dan para las mismas direcciones en el reanálisis que en las observaciones.

A nivel estacional se observa en el reanálisis que durante verano los vientos predominantes son del sector E en todo el país, mientras que durante el invierno la componente O se vuelve más importante principalmente al sur del país (Figuras 3.16 y 3.17). Un comportamiento similar se encuentra en las observaciones (Figuras 3.4 y 3.5) y es consistente con la variación estacional del anticiclón semipermanente del Atlántico sur descrito en la sección 3.1.

Es bueno notar que las rosas de los vientos del reanálisis son más continuas en el sentido de que los vientos tienen una dirección predominante y la frecuencia de ocurrencia disminuye en forma suave hacia otros rumbos cercanos. En las observaciones esto no es así y, si bien exhiben direcciones privilegiadas, muchas veces existen “huecos” entre máximos de ocurrencia.

En esta comparación no se considera el hecho de que en algunas estaciones meteorológicas se mida únicamente durante 12 hs (de 7:00 a 19:00 hs), mientras que en el reanálisis se tienen valores horarios durante las 24 hs del día en todas las localidades. Por lo tanto, algunas de las diferencias encontradas podrían deberse a este hecho. A continuación se compara el reanálisis con las observaciones separando durante las horas del día (7:00 a 19:00 hs) y la noche (19:00 a 7:00 hs) para aquellas estaciones que tienen la mayor cobertura horaria y temporal. De acuerdo a la tabla 2.1 estas son Carrasco y Rivera.

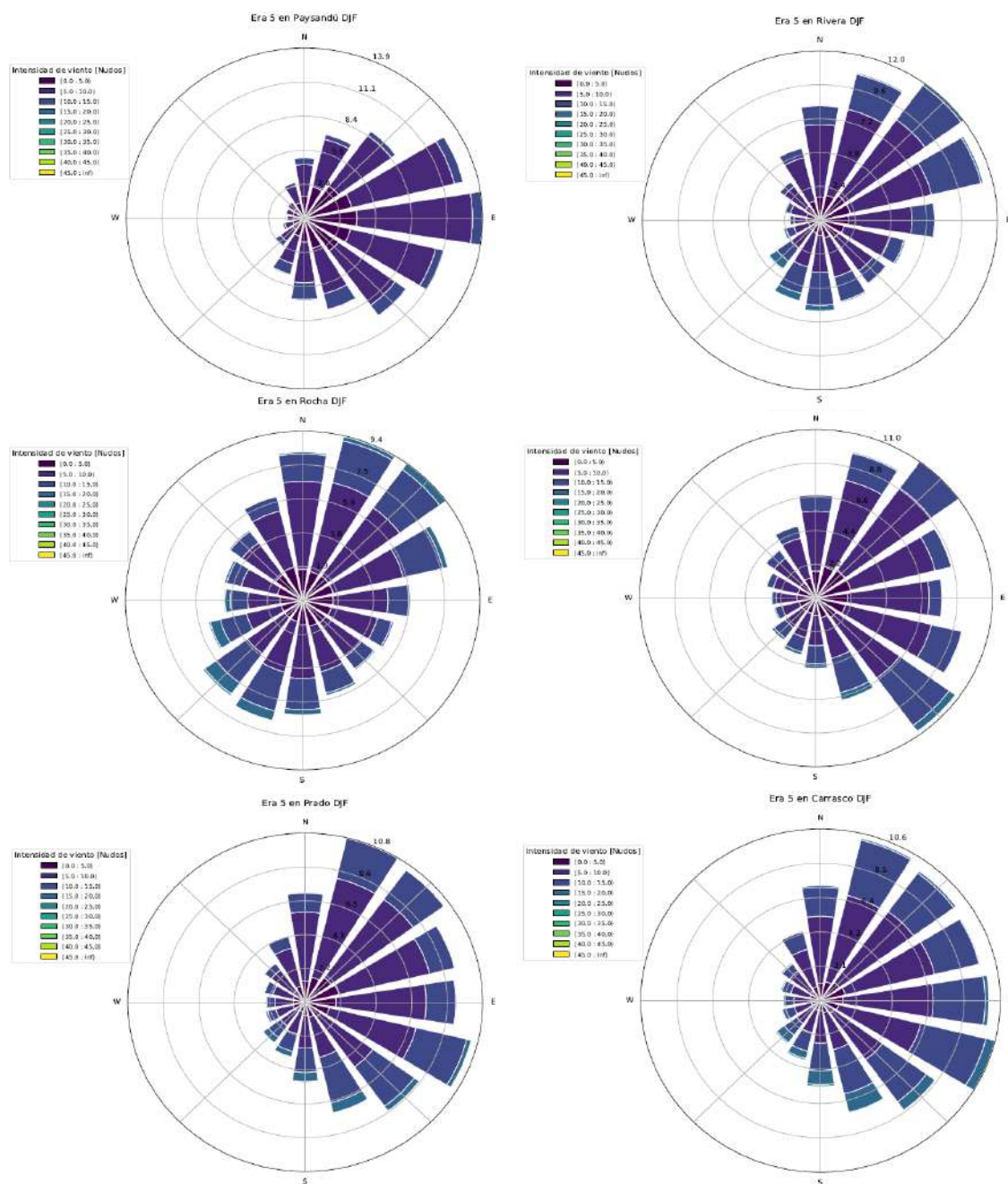


Figura 3.16 – Rosas de los vientos diarios para DEF en los puntos de grilla más cercanos de ERA5 a las estaciones meteorológicas.

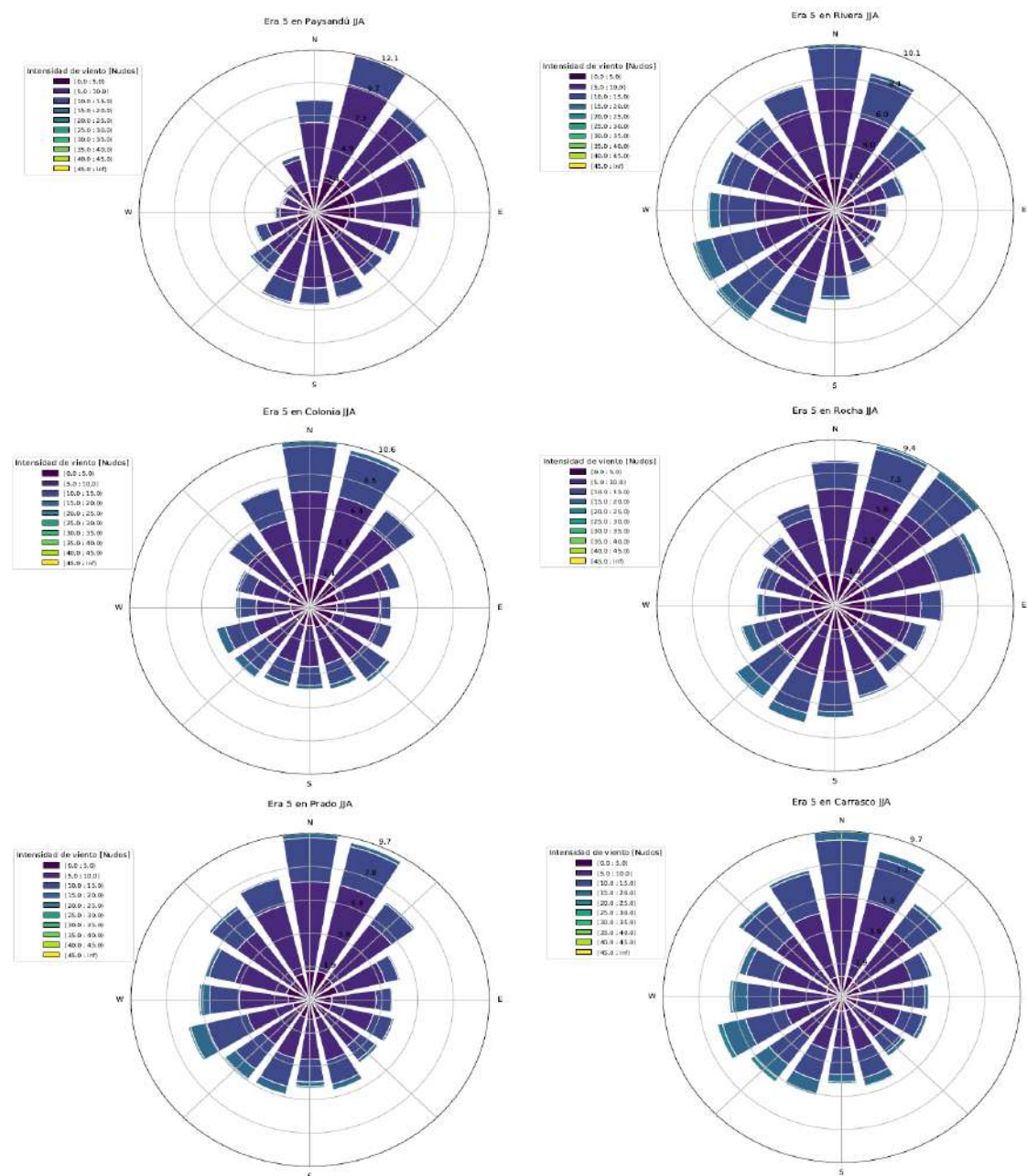


Figura 3.17 – Rosas de los vientos diarios para JJA en los puntos de grilla más cercanos de ERA5 a las estaciones meteorológicas.

La figura 3.18 muestra la comparación de las distribuciones de intensidad del viento horario en Carrasco durante verano para el día y la noche. Durante el día las distribuciones observada y simulada son muy parecidas, ambas del tipo Weibull, con valores máximos de hasta 30 nudos. Durante la noche, sin embargo, la mediana en las observaciones es menor que en el reanálisis y, además, se observa un número

significativamente alto de observaciones con valores nulos de viento que no se encuentran en el reanálisis.

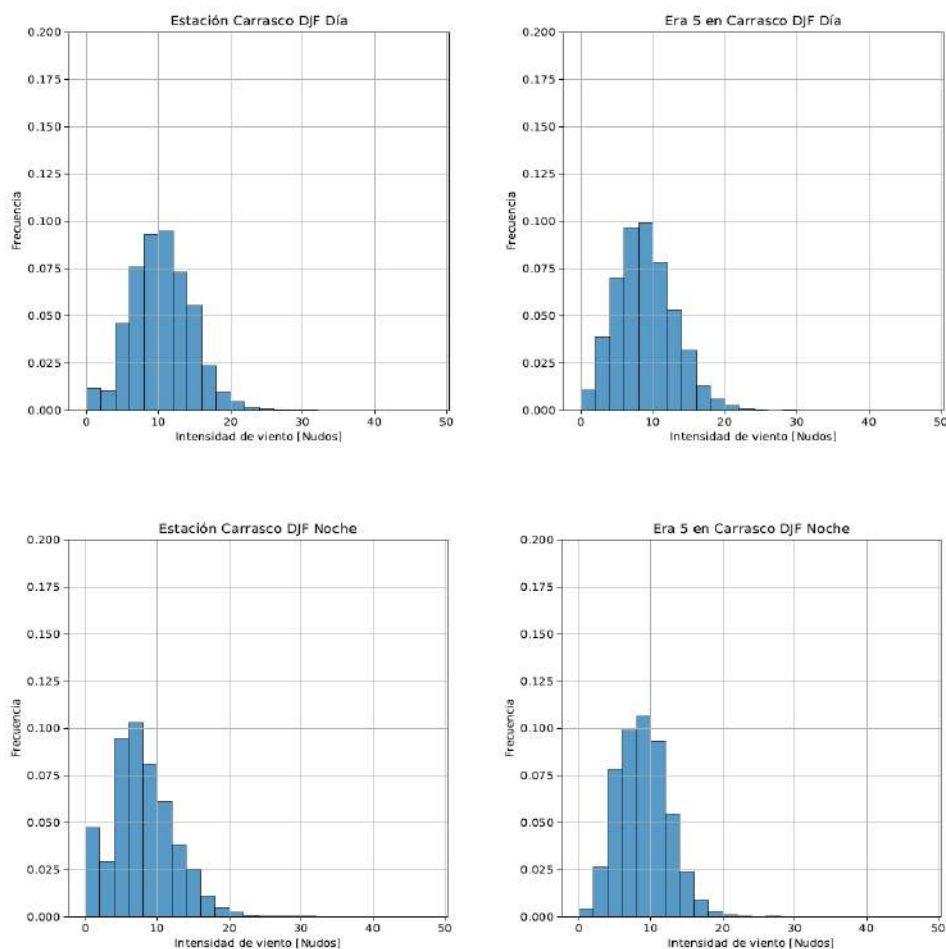


Figura 3.18 – Distribución de intensidad del viento en Carrasco durante DEF para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Carrasco se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

En cuanto a la dirección, tanto en las observaciones como en el reanálisis se observa un cambio en la predominancia de los vientos: durante el día la dirección más frecuente es del SE, mientras que durante la noche es del NE. Este cambio en la dirección del viento indica la presencia de la brisa en la región costera y es bien capturada por el reanálisis.

En Rivera durante verano las distribuciones de intensidad del viento observadas también presentan un número muy alto de valores nulos, en particular durante la noche, que no se encuentran en el reanálisis (Figura 3.20). Por otro lado, ambos conjuntos de datos muestran una disminución en la intensidad del viento durante la noche, lo cual es esperable ya que la capa límite está mucho más desarrollada

durante el día. En cuanto a la dirección, mientras que las observaciones muestran una marcada preponderancia de los vientos del E durante las 24 hs, en el reanálisis los vientos predominantes son del NE tanto durante el día como la noche (Figura 3.21).

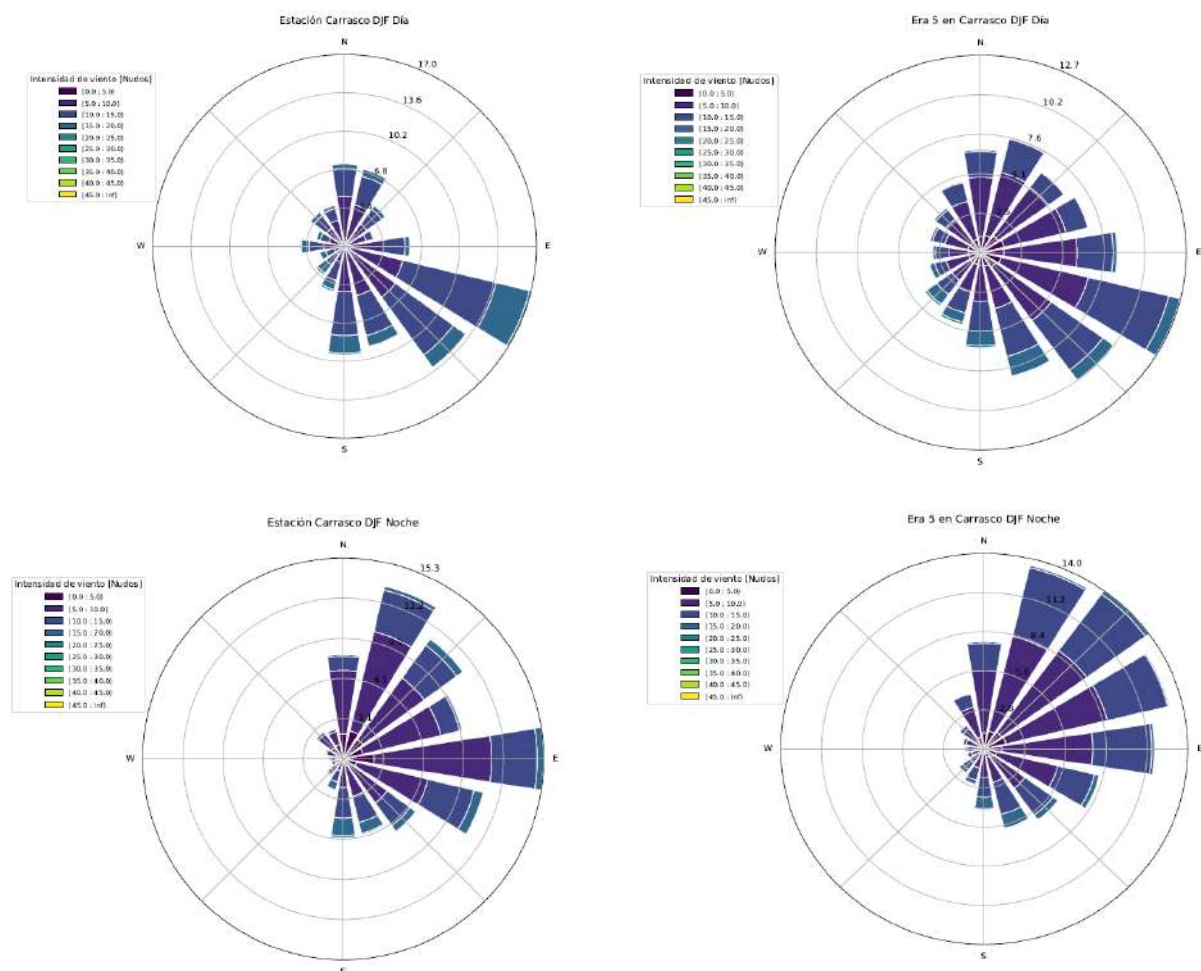


Figure 3.19 – Rosas de los vientos en Carrasco durante DEF para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Carrasco se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

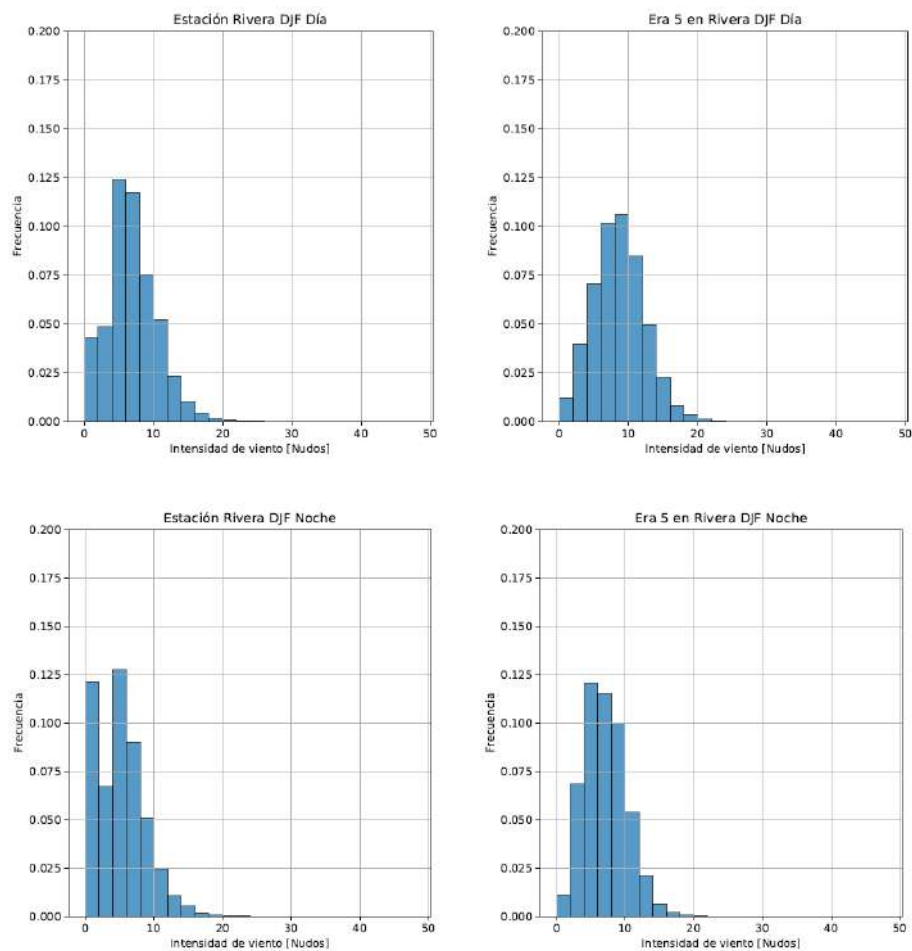


Figura 3.20 – Distribución de intensidad del viento en Rivera durante DEF para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Rivera se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

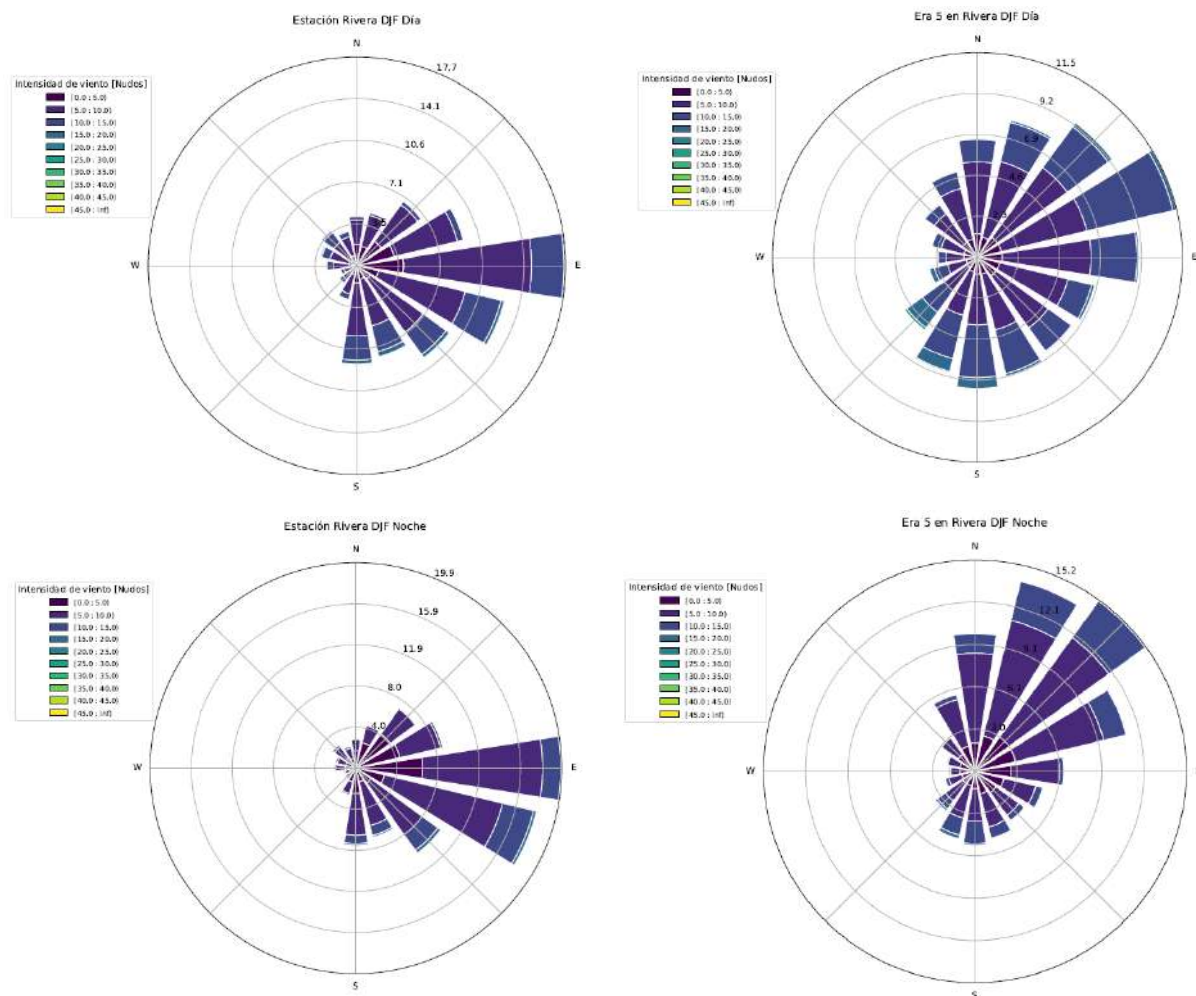


Figure 3.21 – Rosas de los vientos en Rivera durante DEF para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Rivera se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

Durante invierno también se observa el alto número de valores nulos en los datos observados durante el día y la noche en la estación de Carrasco (Figura 3.22). A excepción de esas diferencias, el resto de la distribución es muy parecida para los datos observados y reanálisis. Al igual que durante verano, se verifica una disminución de los vientos durante la noche que es reproducida en el reanálisis. A diferencia de verano, la dirección predominante durante invierno es siempre del NE durante el día y la noche, lo cual es consecuencia de la ausencia de la brisa y es reproducido adecuadamente por el reanálisis (Figura 3.23).

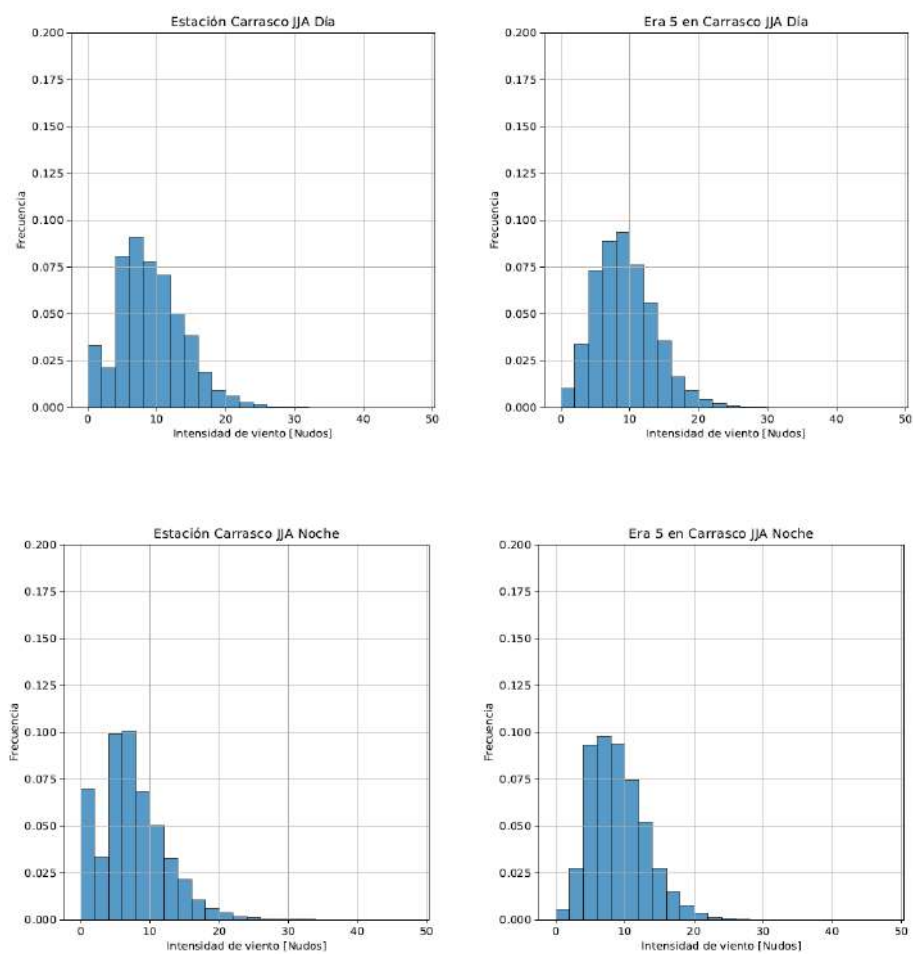


Figura 3.22 – Distribución de intensidad del viento en Carrasco durante JJA para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Carrasco se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

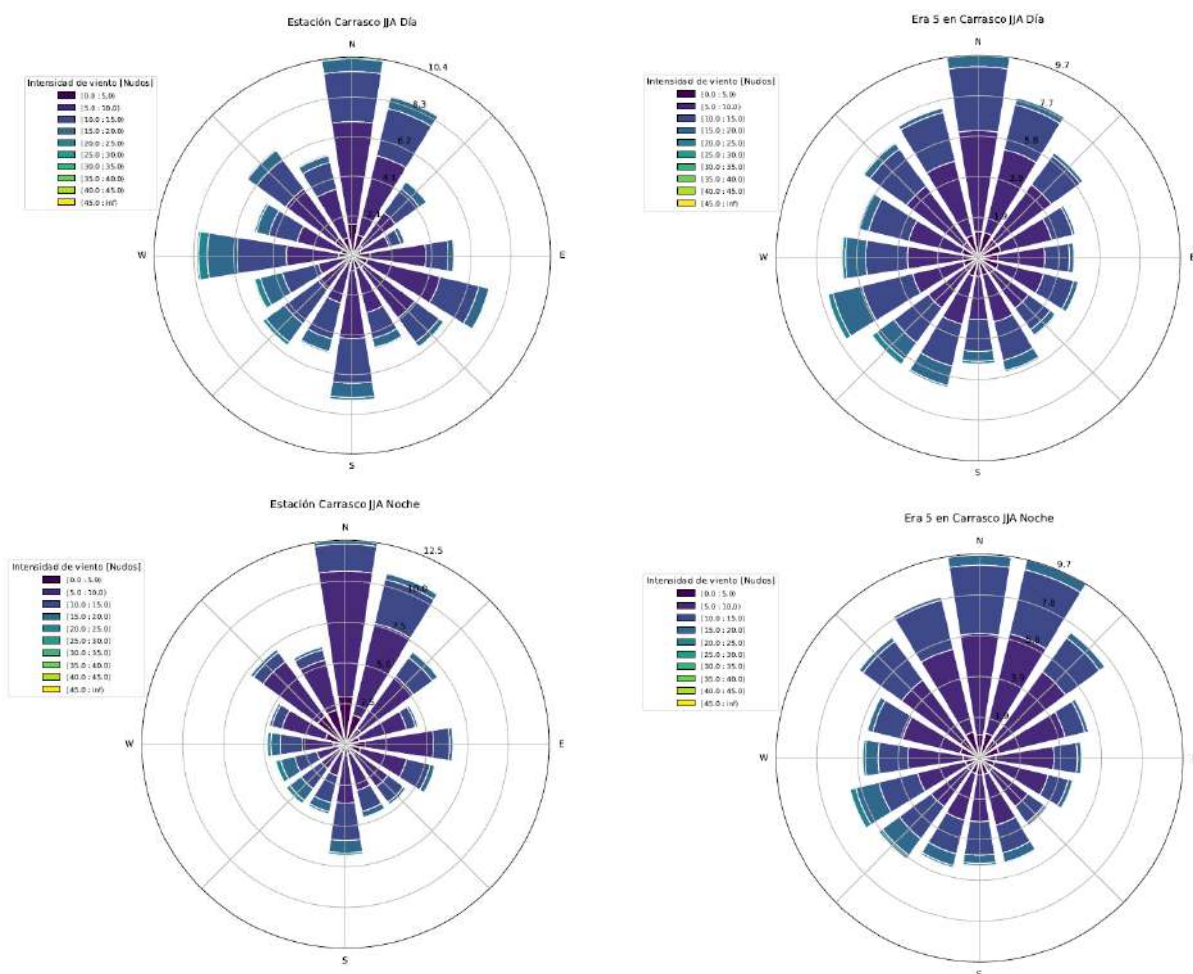


Figure 3.23 – Rosas de los vientos en Carrasco durante JJA para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Carrasco se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

En Rivera durante invierno se observan las mismas diferencias entre observaciones y reanálisis detectadas durante verano en cuanto a la presencia de datos nulos. El resto de la distribución es similar, inclusive el máximo en la frecuencia de ocurrencia de vientos con intensidad cercano a los 5 nudos durante la noche, aunque este máximo no se encuentra durante el día en el reanálisis. Por otro lado, la dirección de los vientos en el reanálisis parece ser incorrecta: mientras que en las observaciones los vientos más frecuentes tienen componente E, en el reanálisis los vientos predominantes son del sector O.

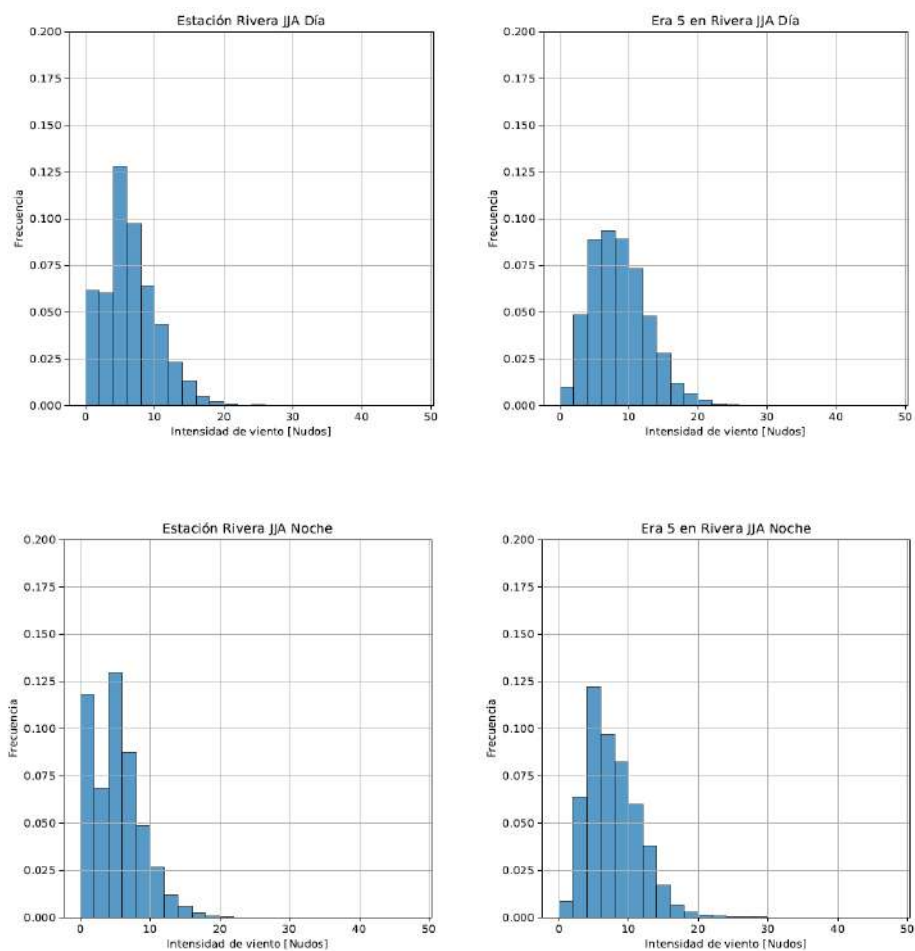


Figura 3.24 – Distribución de intensidad del viento en Rivera durante JJA para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Rivera se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

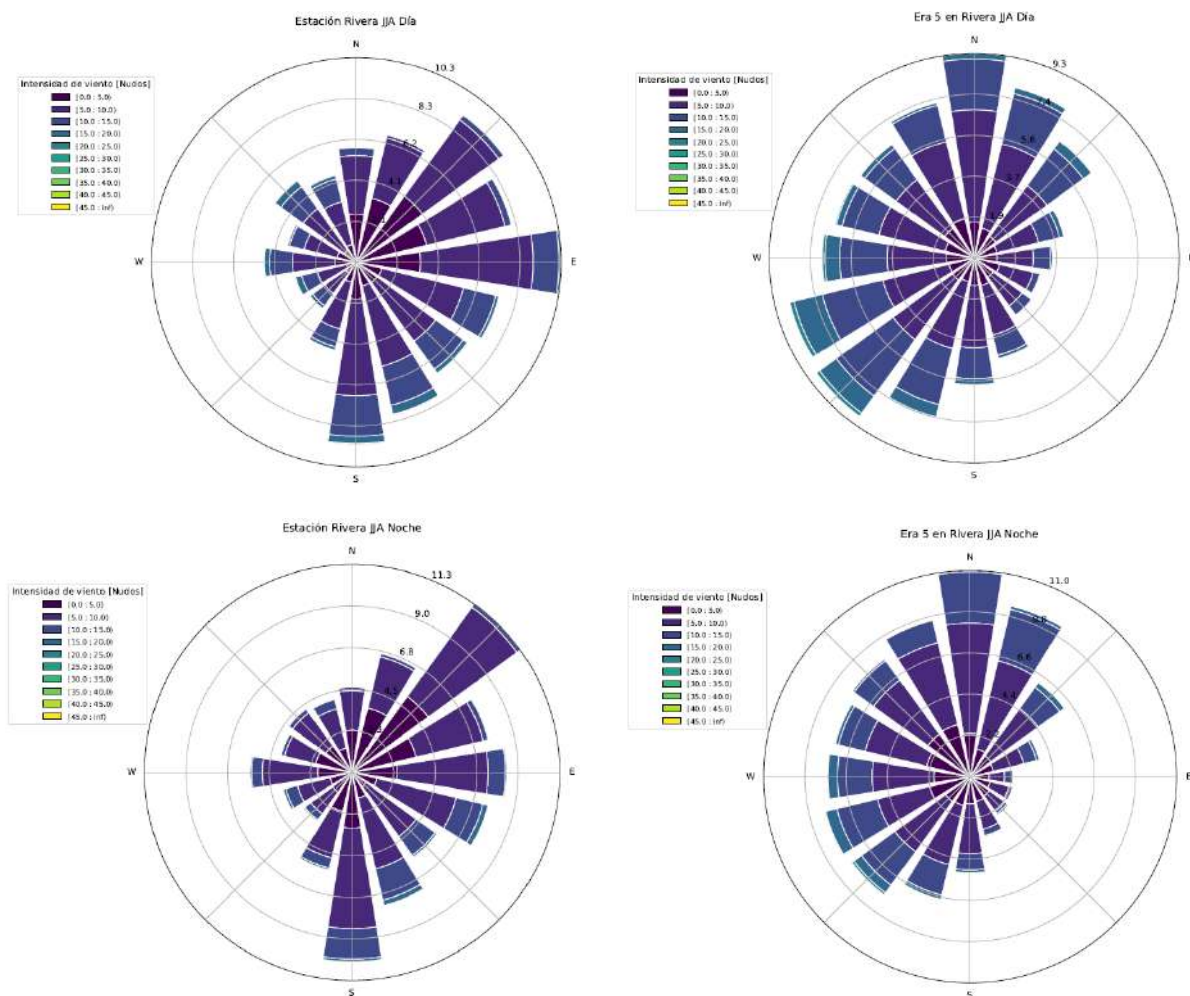


Figure 3.25 – Rosas de los vientos en Rivera durante JJA para el día (paneles superiores) y la noche (paneles inferiores). La estación Rivera se muestra en la columna de la izquierda y ERA5 en la de la derecha.

Para finalizar la validación del reanálisis las figuras 3.26 y 3.27 muestran los percentiles de las distribuciones para las diferentes localidades, para verano e invierno, respectivamente. Como consecuencia de la presencia de muchos valores nulos en las observaciones, el p10 de la distribución en todas las localidades es significativamente menor que en el reanálisis. Por otro lado, los valores del p50 son similares en observaciones y reanálisis, cumpliéndose que el valor de p50 es mayor durante el día que la noche. Por último, si bien en general los valores de p90 son similares, en observaciones el valor de p90 es sustancialmente mayor que en el reanálisis: mientras que en éste último el valor es cercano a los 12 nudos, en observaciones alcanza valores superiores a los 16 nudos. La comparación con las otras estaciones sugiere que las mediciones de la estación de Colonia se están realizando a alturas mayores a los 10 m.

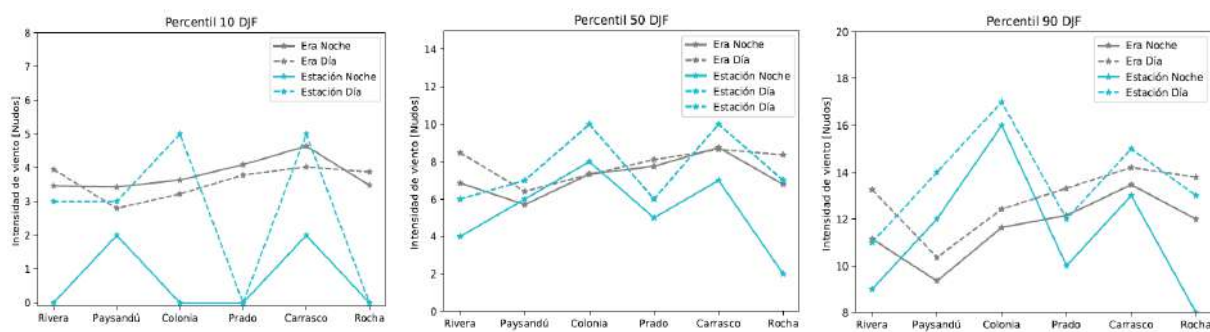


Figura 3.26 – Comparación de percentiles de las distribuciones observadas y del reanálisis durante verano.

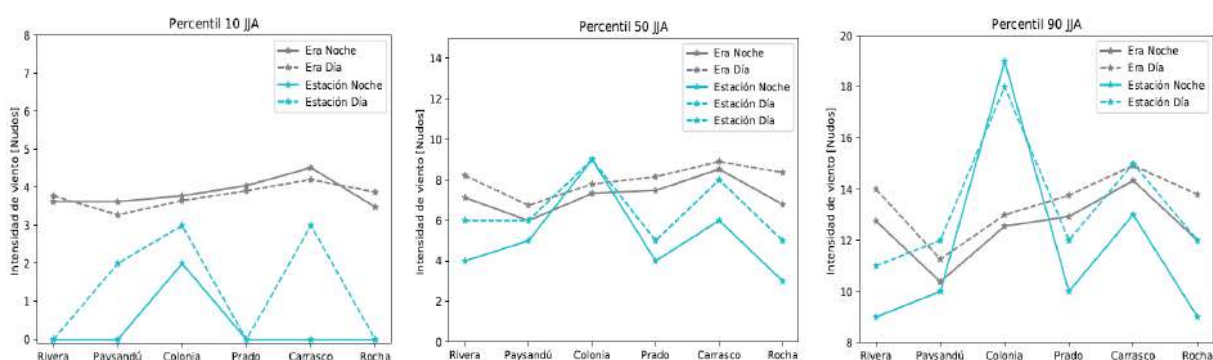
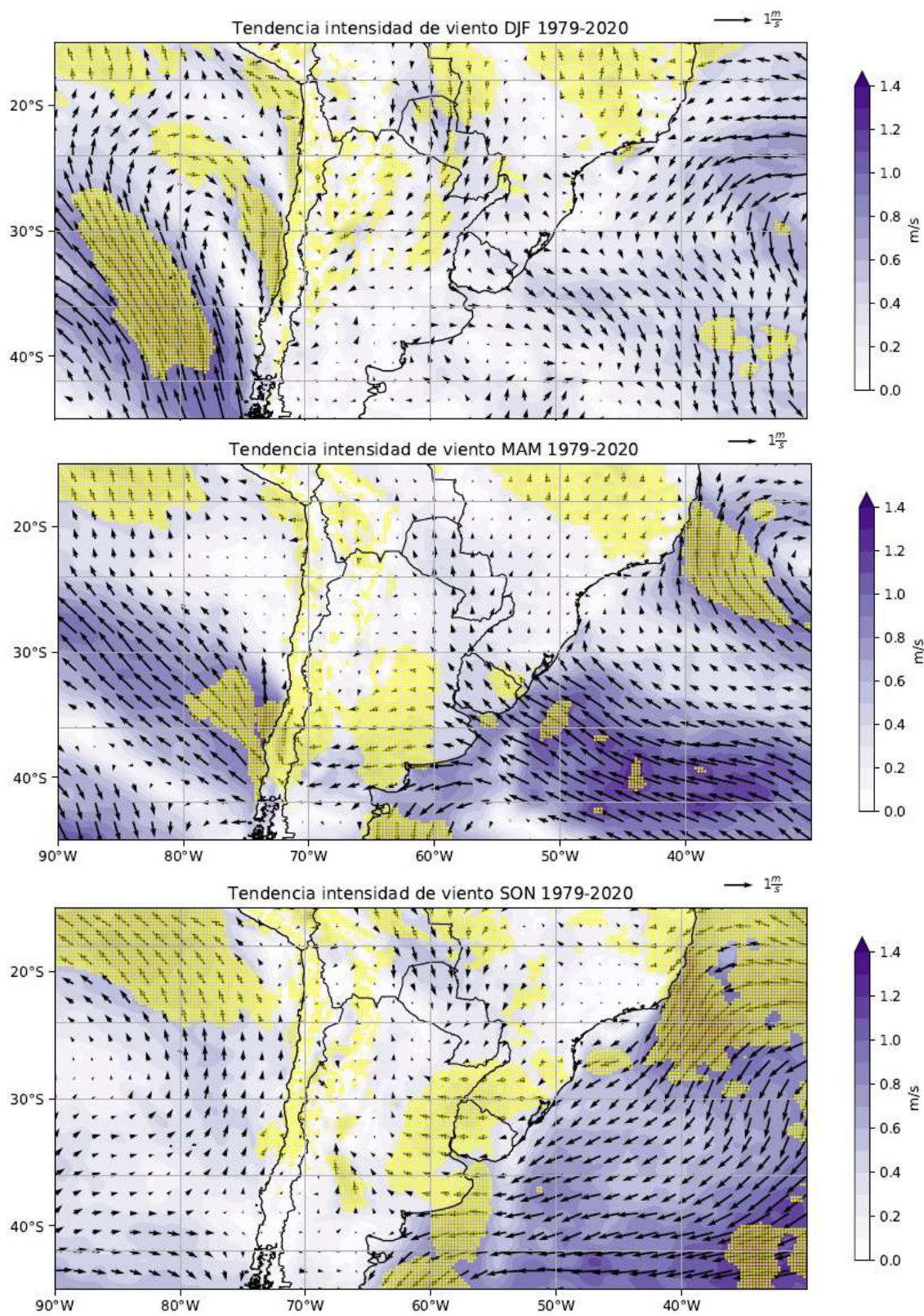


Figura 3.27 – Comparación de percentiles de las distribuciones observadas y del reanálisis durante invierno.

La validación realizada indica que ERA5 representa adecuadamente la variabilidad de los vientos horarios en el país. Si bien se encuentran diferencias en algunos casos con las observaciones, en general los vientos de ERA5 reproducen la dirección predominante y las intensidades características de los vientos sobre Uruguay, lo cual permite usar esta base de datos para estudiar variabilidad a más largo plazo, incluidas las tendencias.

3.4 Tendencias observadas en los últimos 40 años

La figura 3.28 muestra las tendencias lineales calculadas usando ERA5 durante el período 1979-2020 en toda la región. Las zonas amarillas indican las zonas donde la tendencia es significativa. Por ejemplo, durante verano se observa una intensificación de los vientos provenientes del norte que traen aire cálido y húmedo desde el sur de Brasil y Paraguay. En otoño (invierno y primavera) las tendencias indican un debilitamiento (intensificación) del anticiclón semipermanente del Atlántico sur.



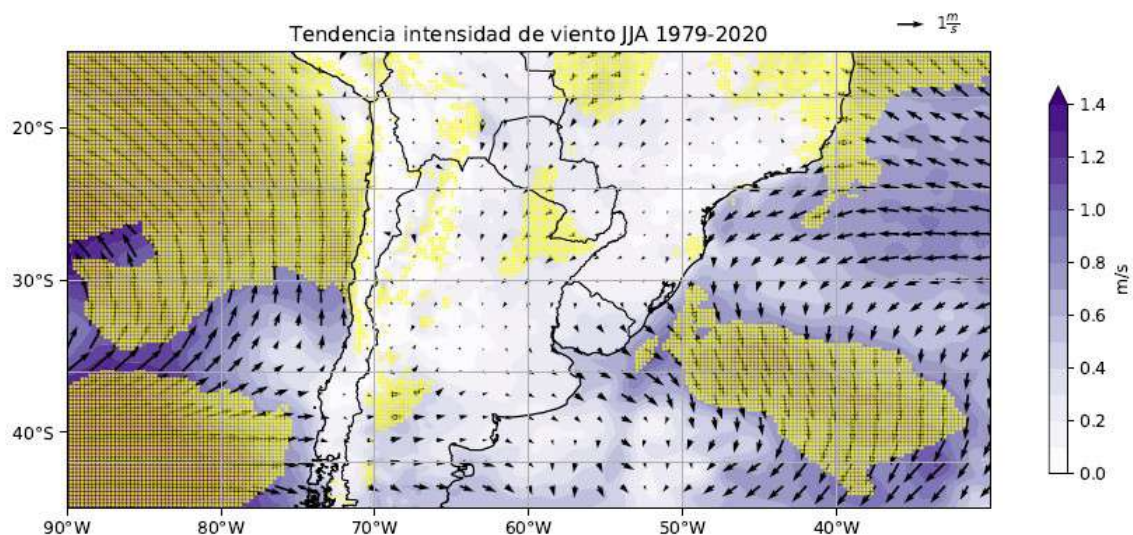


Figura 3.28 – Tendencia observada durante el período 1979-2020 en los vientos en superficie para las diferentes estaciones del año. Las zonas en amarillo indican aquellas con tendencia significativa al 5%.

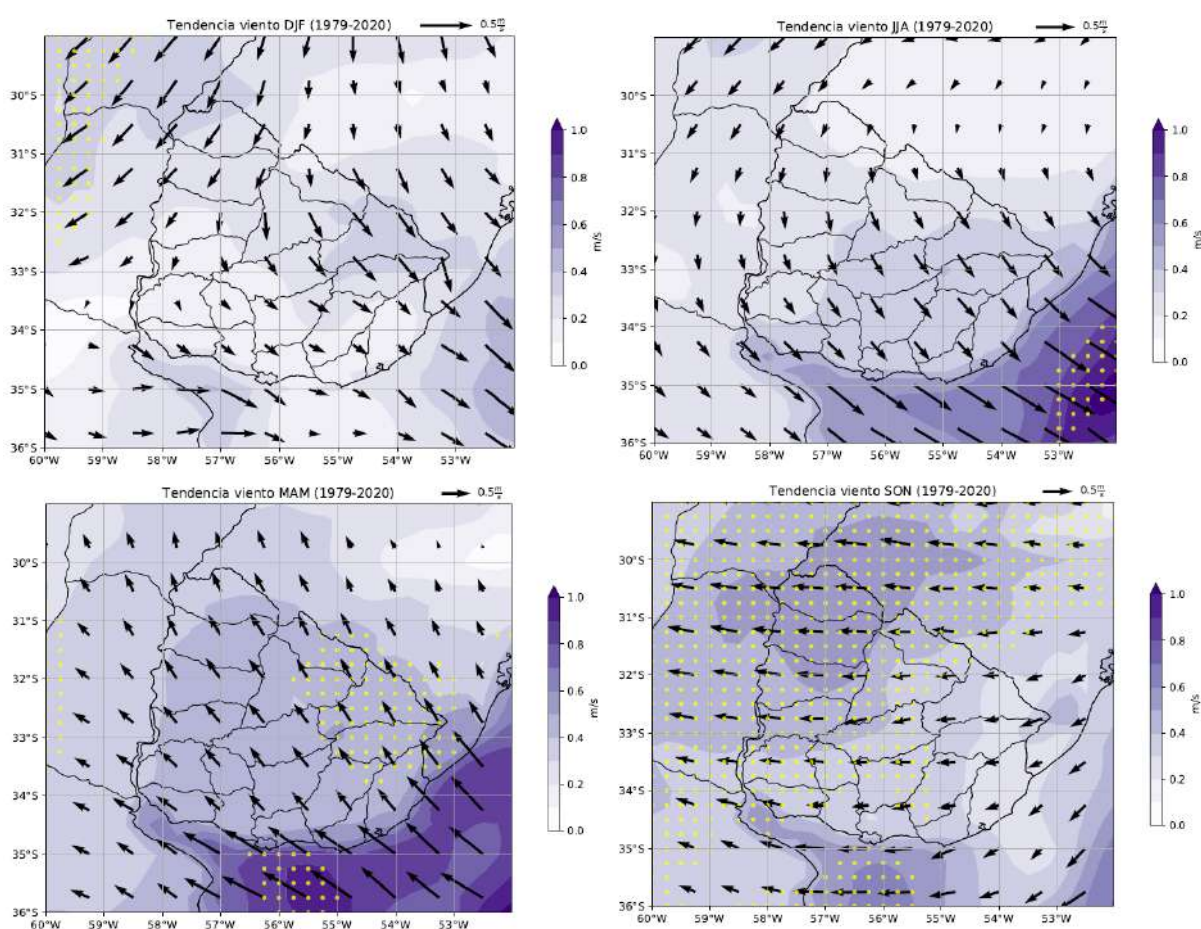


Figura 3.29 – Análoga a la Figura 3.28 ampliando sobre Uruguay.

Haciendo foco ahora en Uruguay, se observan cambios significativos en los vientos durante otoño y primavera (Figura 3.29). En otoño se detecta un aumento de los vientos con componente SE fundamentalmente en la región este del país, mientras que durante primavera aumenta la componente E representando un aumento de los vientos medios climatológicos (comparar con Figura 3.2).

4. Rachas

Como se mencionó en la sección 2.1 las estaciones automáticas reportan datos medidos a 10 m de altura y cada 10 minutos de la dirección e intensidad promedio del viento en esos 10 minutos (U_{medio}), así como de la intensidad máxima y su dirección en ese intervalo. La intensidad máxima del viento (U_{max}) se calcula como la velocidad máxima promediada en 3 segundos durante esos 10 minutos. En este estudio consideramos una racha si U_{max} supera el percentil 99 (p99) de su distribución y su comportamiento será estudiado en esta sección.

La figura 4.1 muestra la relación entre U_{medio} y U_{max} para cada una de las estaciones automáticas. Se observa que en todas existe una relación proporcional de tal forma que un U_{medio} alto está acompañado de un U_{max} también alto. No obstante, la relación varía. Rocha, Prado y Paysandú tienen comportamientos similares en cuanto a la pendiente y al valor de p99 que define las rachas cercano a los 30 nudos. Rivera tiene vientos promedio menores, un valor de p99 inferior a las otras estaciones y varios valores de U_{max} que se encuentran alejados de la distribución promedio. Por último, Colonia se destaca por tener valores de intensidades de viento promedio mayores que las otras estaciones.

Las rosas de los vientos para todos los datos en las estaciones automáticas son consistentes con las mostradas en la figura 3.2 para las estaciones convencionales y no son mostradas aquí. Para enfocar en los eventos de racha, se muestran a continuación las rosas de los vientos para los datos “diez-minutales” que cumplen con el criterio de rachas explicitado antes.

En el caso de Prado y Rocha se observa que las rachas son del cuadrante SO, con preferencia en Prado de la dirección SO y en Rocha de OSO, bajo vientos medios con el mismo rumbo (figura 4.2). Por otro lado, en Colonia se observa claramente la prevalencia de rachas del sector SE y un número reducido del cuadrante SO aunque esta última es la dirección que presenta las rachas más intensas. Por lo tanto, se observa un cambio en la dirección de los vientos asociados a la mayor frecuencia de rachas en la zona costera: mientras que en la región oeste los vientos del SE son los que generan las rachas, en la zona centro y este del país los vientos que generan las rachas son del SO. La intensidad de las rachas es mayor en Rocha y Colonia frente a las presentes en Prado.

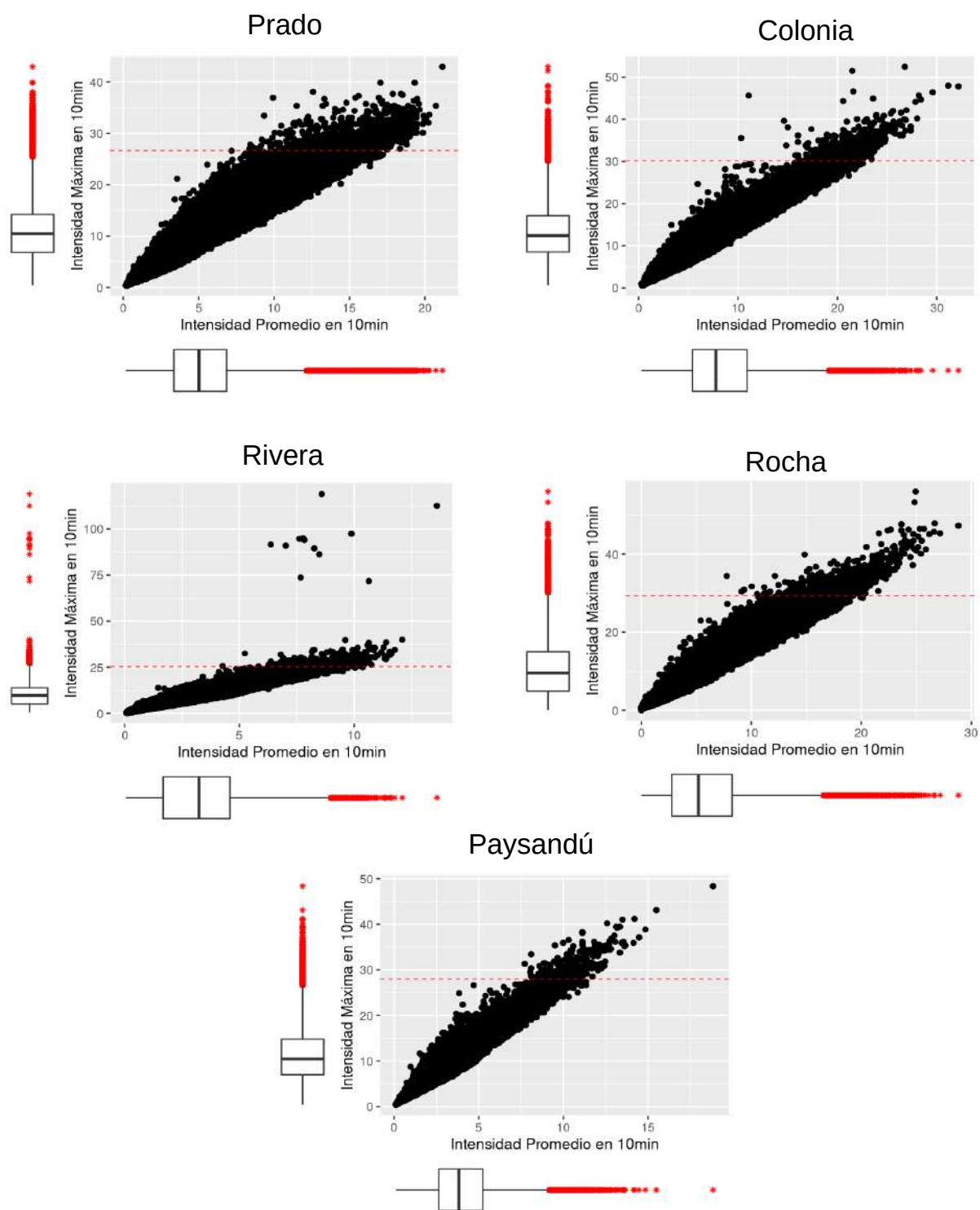
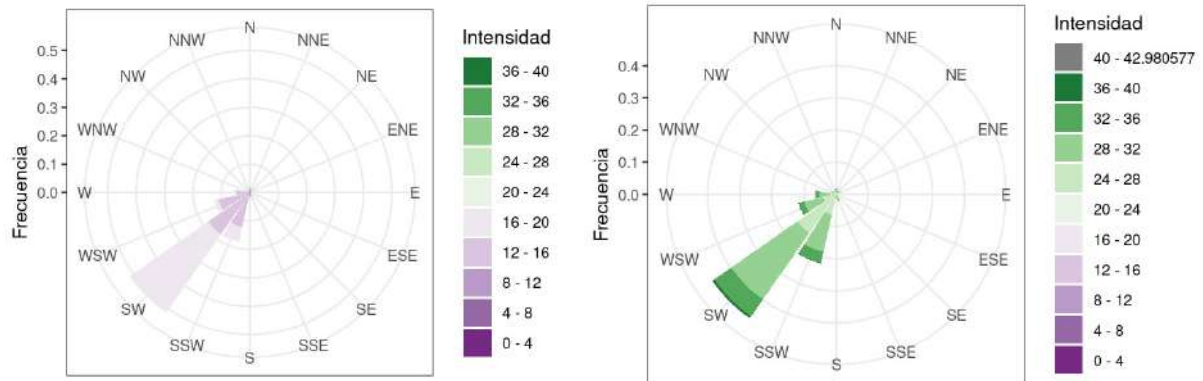
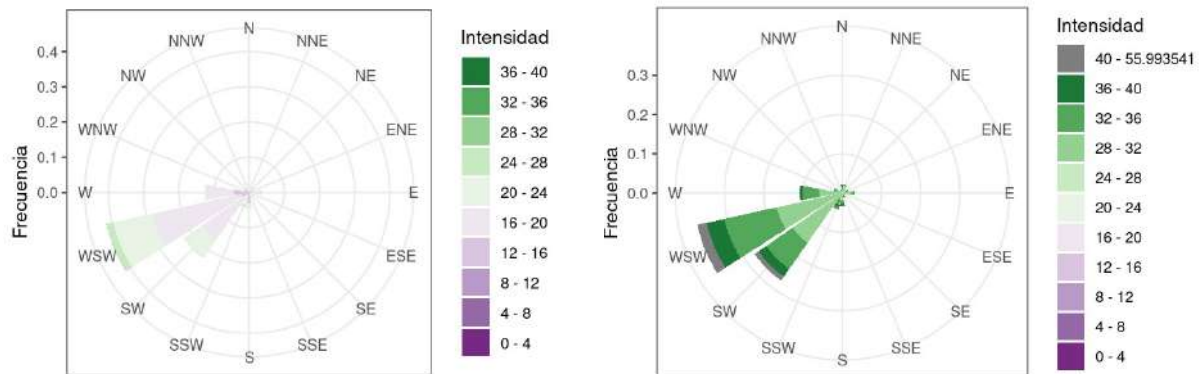


Figura 4.1 – Diagrama de dispersión de la intensidad promedio versus la intensidad máxima en 10 minutos para las diferentes estaciones automáticas (en nudos). La línea indica el p99 de U_{max} , valor que define las rachas.

Prado



Rocha



Colonia

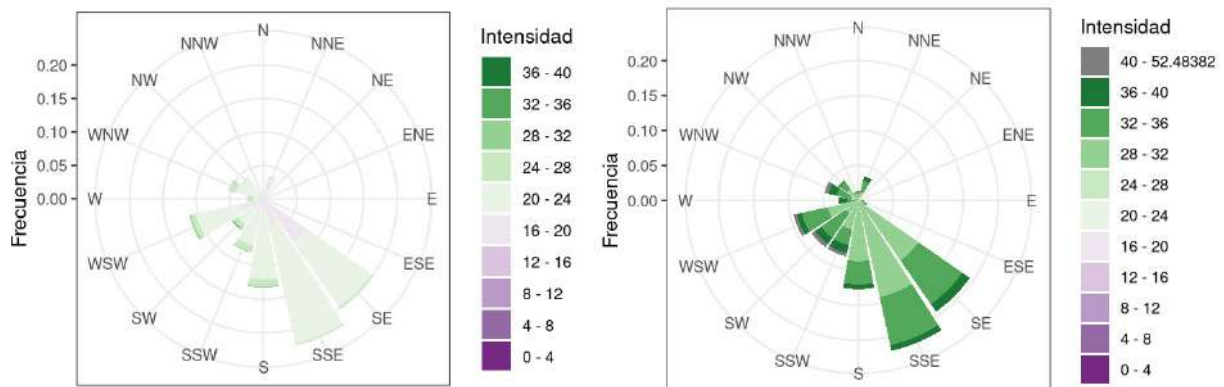


Figura 4.2 – Rosa de los vientos para los datos que cumplen con el criterio de rachas. La columna de la izquierda indica el U_{medio} y la de la derecha el U_{max} .

En la región norte (Rivera) las rachas están asociadas a vientos predominantes del SO, aunque se observan también rachas del sector SE y NO (figura 4.3). La intensidad de las rachas es máxima para la dirección O y SO con valores superiores

a los 40 nudos. En Paysandú las rachas provienen fundamentalmente del SE y en menor proporción del E, al igual que los vientos medios.

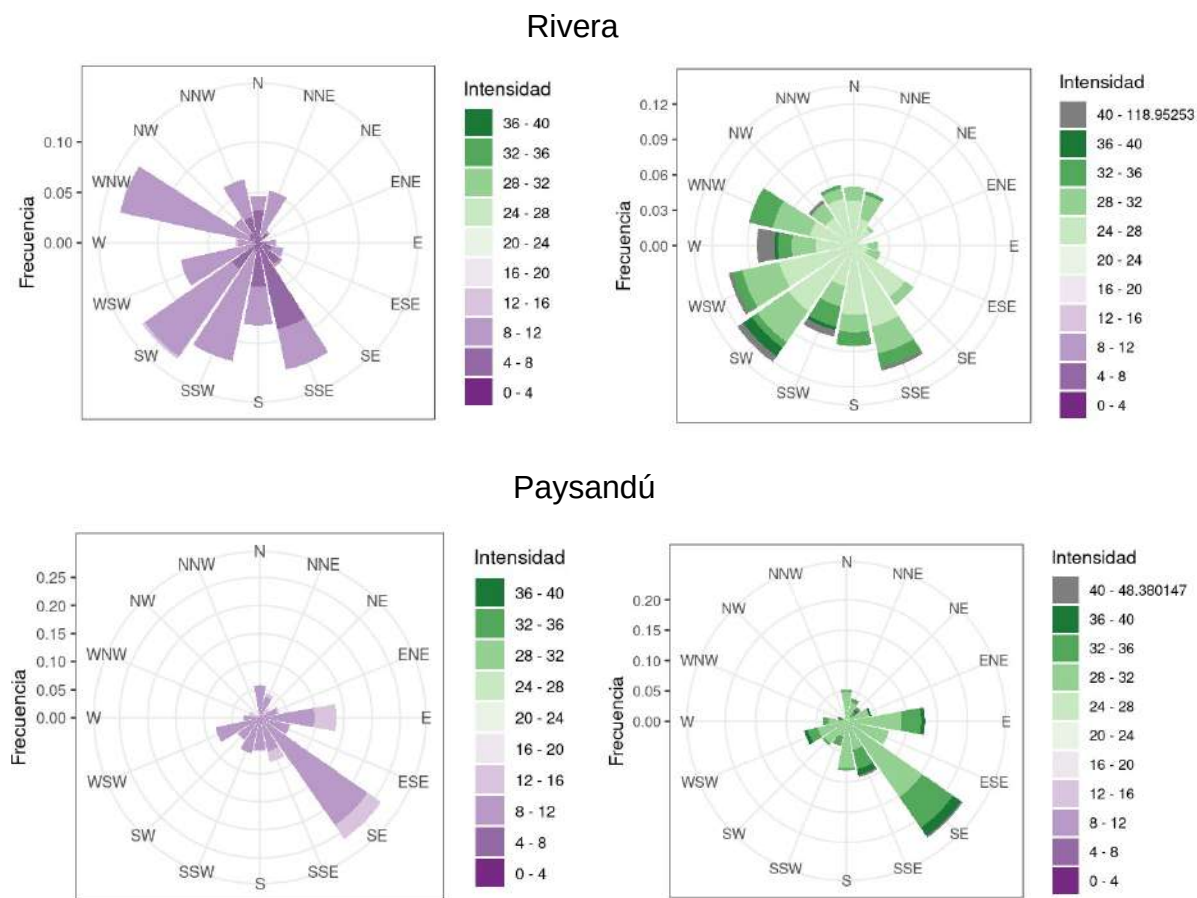


Figura 4.3 – Rosa de los vientos para los datos que cumplen con el criterio de rachas. La columna de la izquierda indica el U_{medio} y la de la derecha el U_{max} .

La relación entre el U_{max} y el U_{medio} se puede medir a través del “*gust factor*” $G = U_{\text{max}} / U_{\text{medio}}$, el cual provee una medida estadística de la intensidad de las ráfagas esperables dado un viento medio en una determinada región. Para las poblaciones de rachas definidas por el p99 se encontró que G es del orden de 2 para Prado y Rocha, del orden de 1.5 para Colonia, y cercano a 3 para Rivera y Paysandú.

Las rachas tienen una estacionalidad marcada, con máximos en otoño (abril-junio) en Prado y Rocha, siendo el abril por lejos el mes de mayor número de rachas. Diciembre es un mes con alto número de rachas también en estas estaciones. Por otro lado, en Colonia las rachas son más numerosas en primavera avanzada (octubre-diciembre), con octubre destacándose claramente. Se observa también en junio un número significativo de rachas en esta estación (figura 4.4).

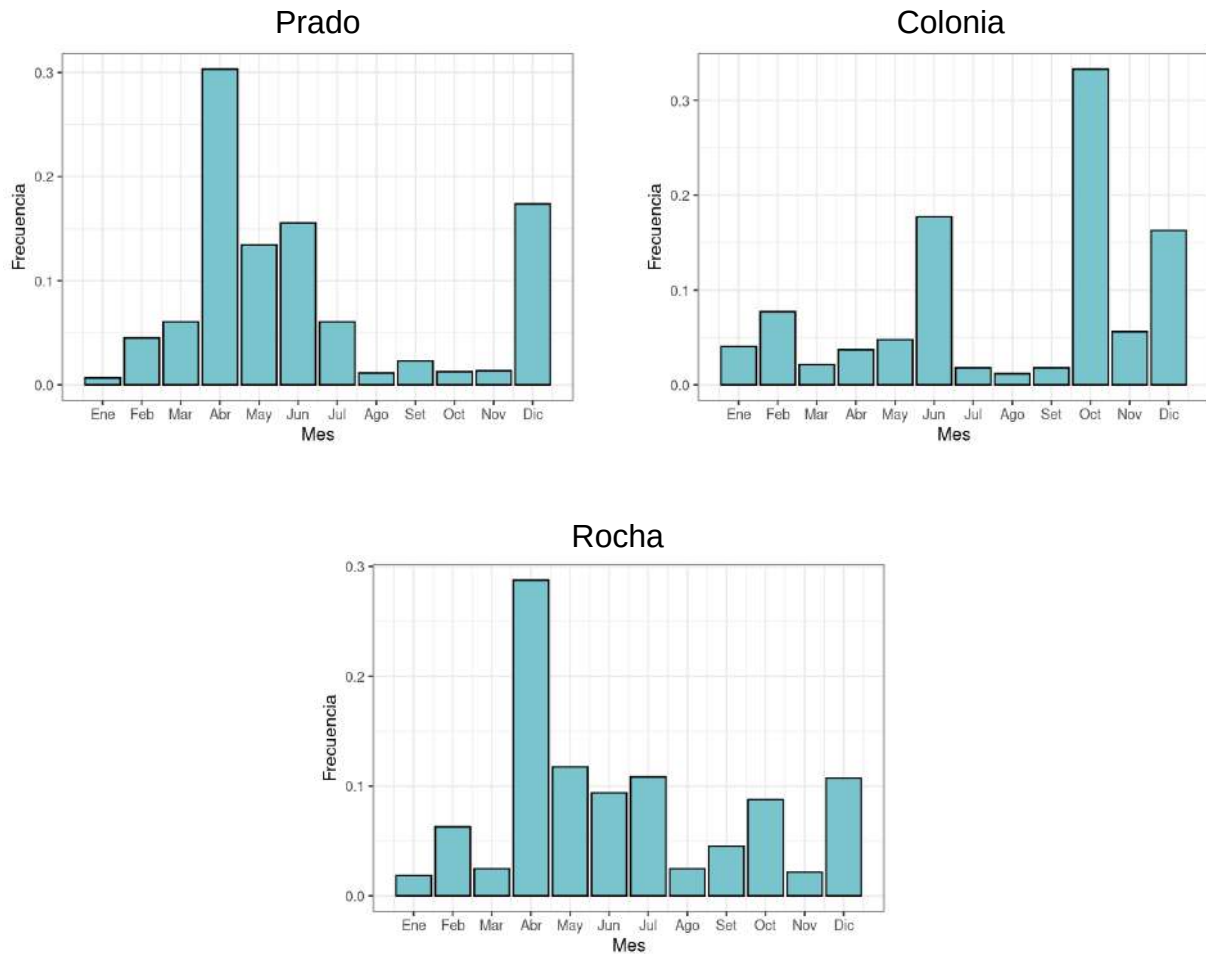


Figura 4.4 – Frecuencia de ocurrencia de rachas de acuerdo al mes del año en las tres estaciones automáticas que cubren más de un año de datos.

Las rachas también tienen un ciclo diario asociado en algunas de las estaciones consideradas (Figura 4.5). Este ciclo se observa claramente en Rocha, para la cual el mayor número de rachas, y las más intensas, ocurren entre las 12 y 16 horas local, probablemente asociado a un mayor desarrollo de la capa límite durante las horas más cálidas del día que propicia el transporte de momento desde altura a superficie. En la estación de Prado también existe un ciclo diario pero menos marcado, destacándose una disminución del número de rachas y de su intensidad durante la noche. Por otro lado, Colonia no parece tener un ciclo diario marcado, aunque se observan algunos horarios para los cuales el número de rachas desciende significativamente.

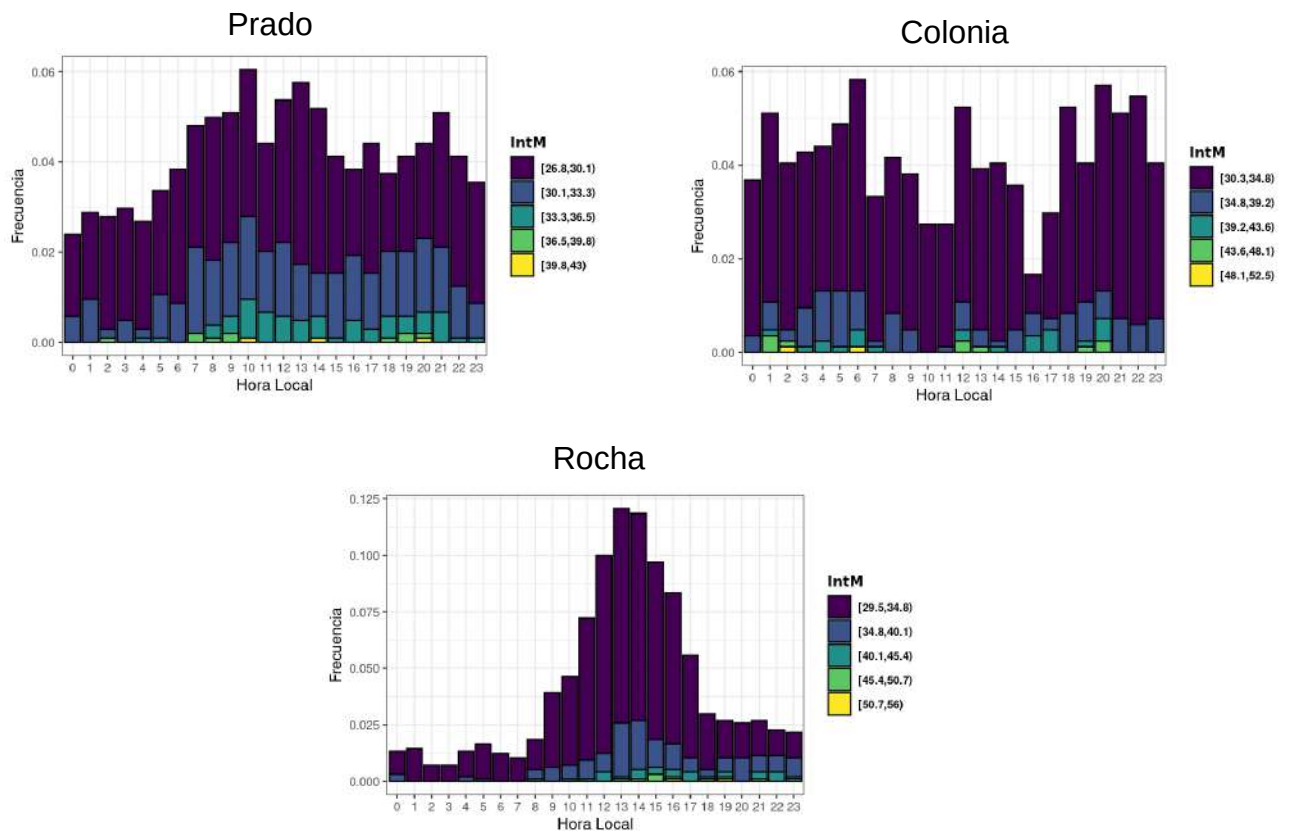


Figura 4.5 – Frecuencia de ocurrencia de rachas de acuerdo a la hora del día en las tres estaciones automáticas que cubren más de un año de datos.

Referencias

- Barreiro M, Arizmendi F, Trinchín R (2019): Proyecciones del clima sobre Uruguay. Producto realizado en el marco del Plan Nacional de Adaptación Costera y el Plan Nacional de Adaptación en Ciudades, Convenio MVOTMA – Facultad de Ciencias, 31 pp. Financiado por los proyectos PNUD-URU/16/G 34 y AECID-ARAUCLIMA 2016.
- Campetella, C.M., Vera, C.S. (2002): The influence of the Andes mountains on the South American low-level flow. *Geophysical Research Letters*. 29(17):7-1
- Bishoff S., (2006): Sudestadas, pp 53-68, en *Cambio climático en el Río de la Plata*, Eds. V. Barros, A. Menendez, G. Nagy.
- Durañona V. (2015): Tesis de Doctorado en Ingeniería “Extreme wind climate of Uruguay”, pp 421.

- Durañona V., A. Guggeri, S. Ortelí (2016): Avancos na caracterizacão dos eventos de vento forte no Uruguai. *Ciencia e Natura* 38, pp 129-136.
- Durañona V., E. Marchesoni, R. Salles (2019): A first characterization of high winds that affect the energy distribution system of Uruguay and their related effects. *J. Wind Eng. & Ind. Aerodyn.* 184, pp 128-138.
- Durañona V., J. Cataldo (2008): Análisis de tormentas severas en Uruguay y su impacto en líneas de transmisión eléctrica de alta tensión. Informe SNE.
- Gan, M. A.; V. B. Rao (1994): The Influence of the Andes Cordillera on Transient Disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, n. 6, p. 1141-1157.
- Gan, M.A. V. B. Rao (1991): Surface Cyclogenesis over South America. *Mon. Wea. Rev.*, v. 119, p. 1293-1302.
- Gozzo L.F., R da Rocha (2013): Air–sea interaction processes influencing the development of a Shapiro–Keyser type cyclone over the subtropical South Atlantic Ocean. *Pure and Applied Geophysics* 170 (5), 917-934.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020): The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne, and D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
- Manta G., M. Renom, M. Barreiro (2020): Climatología de la brisa marina en Uruguay. *Meteorologica*, 46, 12-25.
- Manta G, (2017): Caracterización de la brisa marina en Uruguay. Tesis de Maestría en Geociencias, PEDECIBA.
- Necco G. (1982) Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área Sudamericana durante el FGGE : Ciclogénesis. *Meteorologica* 13, 7-19.
- Salio, P., Nicolini, M., & Zipser, E. J. (2007): Mesoscale Convective Systems over Southeastern South America and Their Relationship with the South American Low-Level Jet, *Monthly Weather Review*, 135(4), 1290-1309.
- Tempo e Clima no Brasil (2009). Eds. Iracema Fonseca de Albuquerque Cavalcanti, Nelson Jesus Ferreira, Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva, Maria Assunção Faus da Silva Dias, Oficina de Textos, Brasil, pp 464.