



Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de La Plata  
Universidad Nacional de La Plata

Tesis para obtener el grado académico de la Licenciatura en  
Meteorología y Ciencias de la Atmósfera

**“Identificación, análisis y simulación de la brisa de  
mar en el Río de La Plata”**

**Autor:** Juan Martín Queirel

**Director:** Guillermo Jorge Berri

**La Plata Julio de 2023**



# Agradecimientos

A mis padres, Claudia y Fernando, por todo lo que me han dado, enseñado y por apoyarme siempre para que pueda dedicarme a estudiar.

A mis hermanas y hermanos, por bancarme siempre y más que nada a lo largo de toda la carrera cuando los exámenes se acercaban y los nervios aumentaban.

A los amigos que me dio el Obser, Mora, Lorenzo, Seba y Vero, por los incontables mates en la biblio, el CEGMA y el parque del obser, por estar ahí siempre, definitivamente no hubiese llegado hasta acá sin ustedes.

A mi director Guillermo, por confiar en mí, alimentar mis inquietudes por la meteorología y entender mis tiempos.

A mis amigos, los que me dio la vela, la escalada y la vida pero en particular los que me dio el Club, que estuvieron y estarán siempre cerca.

A Flor, por acompañarme, apoyarme y ayudarme en gran parte de este proceso.

A mis abuelos y abuelas, en particular a Tito por alimentar mi curiosidad desde chiquito con las revistas de ciencias y por enseñarme lo que es la paciencia. Me encantaría haber podido compartir mi pasión por la meteorología con vos y que vieras esta tesis.

# Resumen

En este trabajo se implementaron tres métodos de identificación de días de brisa en la estación de Aeroparque utilizando observaciones de viento, temperatura y presión en superficie, viento en altura y temperatura del río. El método de Borne et al. (1998) fue seleccionado para estudiar la brisa en cinco estaciones: Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio en Argentina; Colonia y Carrasco en Uruguay. De este modo se caracterizaron algunos aspectos de la brisa en estas estaciones para el período 2009-2017. Los resultados muestran una mayor ocurrencia en las estaciones uruguayas, un ciclo anual con máximo en verano y mínimo en invierno, y una rotación del viento en horas de la tarde al E y SE en las estaciones argentinas y uruguayas respectivamente. Se caracterizaron, a través de un análisis de componentes principales en modo-T, las condiciones regionales de presión a nivel del mar y temperatura en 2m asociadas a los eventos de brisa en Aeroparque en los meses de mayor ocurrencia, noviembre a marzo. El patrón más frecuentes de presión muestra el Anticiclón Semipermanente del Atlántico Sur que genera vientos del NE en la estación. El segundo patrón más frecuente muestra una alta presión ubicada sobre la zona de estudio, asociada generalmente a cielos despejados y vientos débiles que favorecen el desarrollo de la brisa. Por otro lado, el campo más frecuente de temperatura muestra un intenso gradiente térmico tierra-agua con mayores temperaturas sobre tierra. Se simularon dos eventos particulares de brisa con el modelo WRF: uno con brisa en las estaciones uruguayas y otro con brisa en las estaciones argentinas. El modelo logró simular el gradiente térmico tierra-agua, la rotación de los vientos, la circulación en el plano vertical asociados a la brisa y el frente de brisa. El avance de este último fue máximo en Punta Indio y Punta Rasa en Argentina y en Colonia y Carrasco en Uruguay. La nubosidad del modelo fue validada con imágenes del satélite GOES-12, mostrando resultados aceptables en ambas simulaciones.

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>5</b>
1.1. Objetivos . . . . .	10
<b>2. Métodos de identificación de brisa</b>	<b>11</b>
2.1. Datos . . . . .	11
2.2. Métodos . . . . .	12
2.3. Resultados . . . . .	15
2.4. Conclusiones parciales . . . . .	21
<b>3. La brisa en la región</b>	<b>22</b>
3.1. Datos . . . . .	22
3.2. Resultados . . . . .	24
3.3. Conclusiones parciales . . . . .	33
<b>4. Eventos simultáneos de brisa</b>	<b>34</b>

---

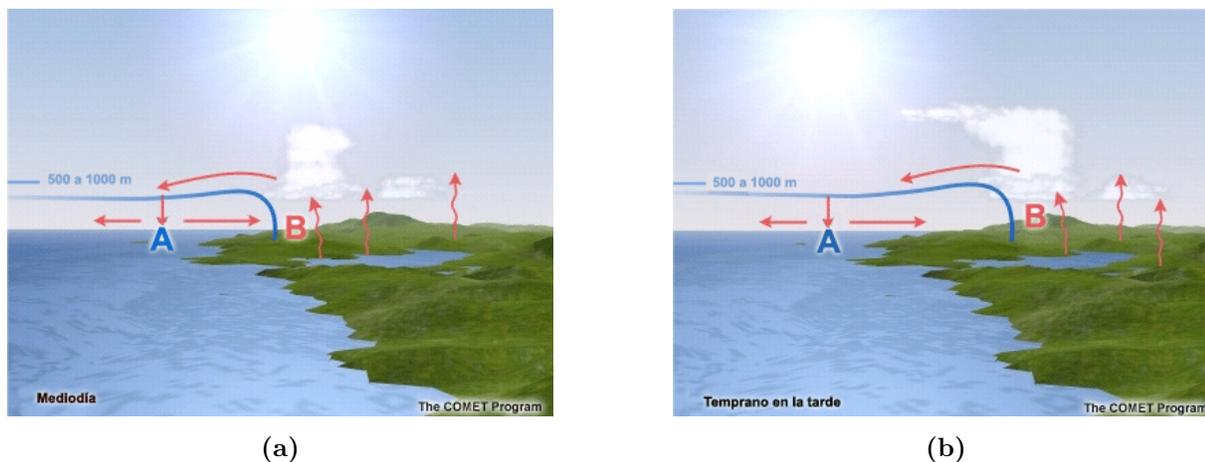
4.1. Conclusiones parciales . . . . .	36
<b>5. Condición sinóptica asociada a la brisa</b>	<b>38</b>
5.1. Datos y metodología . . . . .	38
5.2. Resultados . . . . .	39
5.3. Conclusiones Parciales . . . . .	42
<b>6. Simulación numérica de casos de estudio</b>	<b>43</b>
6.1. El modelo WRF y la simulación de la brisa . . . . .	43
6.2. Datos y Metodología . . . . .	44
6.2.1. Selección de los casos . . . . .	45
6.2.2. Simulación con WRF . . . . .	49
6.2.3. Posproceso de las salidas . . . . .	51
6.3. Resultados . . . . .	51
6.3.1. Caso de brisa en la costa argentina . . . . .	51
6.3.2. Caso de brisa en la costa uruguaya . . . . .	56
6.4. Conclusiones Parciales . . . . .	61
<b>7. Nubosidad</b>	<b>63</b>
7.1. Caso de brisa en la costa argentina . . . . .	63
7.2. Caso de brisa en la costa uruguaya . . . . .	66
7.3. Conclusiones parciales . . . . .	68



# Capítulo 1

## Introducción

La brisa de mar es una circulación de mesoescala observada generalmente en estaciones meteorológicas cercanas a la costa debido al ciclo diario del contraste de temperatura superficial entre la tierra y el agua. La diferencia en las capacidades caloríficas entre estas superficies da lugar a la formación de un gradiente de presión perpendicular a la costa. El aumento en la magnitud del gradiente de presión crea una componente del viento en superficie que sopla desde el agua hacia la tierra y prevalece hasta el final de la tarde (ver Figura 1.1). Por la noche, la componente del viento local se invierte y se desarrolla la brisa terrestre, aunque normalmente es más débil que la brisa marina (Simpson, 1994). El viento que sopla desde el agua hacia tierra en superficie, junto con los ascensos sobre tierra, los descensos sobre el mar y el flujo de retorno en niveles más altos, conforman la *circulación de brisa*. Entre la componente de brisa en superficie y los ascensos sobre tierra se ubica el “frente de brisa” (SBF, por sus siglas en inglés). Esta región es la que separa el aire más frío y húmedo proveniente del mar del aire más cálido ubicado sobre tierra. Está caracterizado por un marcado gradiente de temperatura y humedad, así como también por una convergencia horizontal del viento. En la Figura 1.1, el SBF se representa por la línea azul, el cual avanza tierra adentro por la tarde, generando ascensos y nubosidad (si las condiciones son favorables).



**Figura 1.1:** Esquemas de la brisa de mar obtenidos de COMET-Program (2016) para (a) el mediodía y (b) la tarde.

Este fenómeno ha sido estudiado por diversos autores a lo largo de los años (Rotunno, 1983; Simpson, 1994; Miller et al., 2003), quienes encontraron que afecta, por ejemplo a la contaminación y la calidad de aire (Borge et al., 2008; Clappier et al., 2000; Soler et al., 2011; Talbot et al., 2007; Wang et al., 2013), la generación de energía eólica (Archer et al., 2014; Steele et al., 2013), la formación de sistemas convectivos y tiempo severo (Azorin-Molina et al., 2014; Comin et al., 2015) y el pronóstico de temperaturas máximas en lugares cercanos a la costa durante olas de calor (Meir et al., 2013).

La brisa esta condicionada por distintos factores que determinan su desarrollo. La condición sinóptica regional es uno de ellos. Srinivas et al. (2006) obtuvo resultados distintos en las simulaciones de 3 eventos de brisa con condiciones sinópticas diferentes. Estoque (1962) utilizó un modelo de brisa para estudiar el efecto del viento regional en las particularidades de la brisa. Este último concluye que el viento regional *offshore* (hacia el mar) da origen a una circulación de brisa más intensa que el viento regional *onshore* (hacia tierra).

Para poder estudiar cualquier fenómeno, el primer paso es poder identificarlo. Dicho esto, es necesario diseñar un método que logre determinar la ocurrencia diaria de la brisa, por ejemplo mediante observaciones de estaciones de superficie, radiosondeos, etc. Varios autores han abordado esta tarea (Furberg et al., 2002; Borne et al., 1998; Azorin-Molina et al., 2011; Biggs & Graves, 1962). Todos ellos utilizan ciertas características del fenómeno para su identificación: el cambio en la dirección e intensidad del viento en superficie, la persistencia del viento regional

y la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) entre tierra y agua. Sin embargo, las características de la brisa pueden variar según la región, exigiendo distintos criterios para su detección.

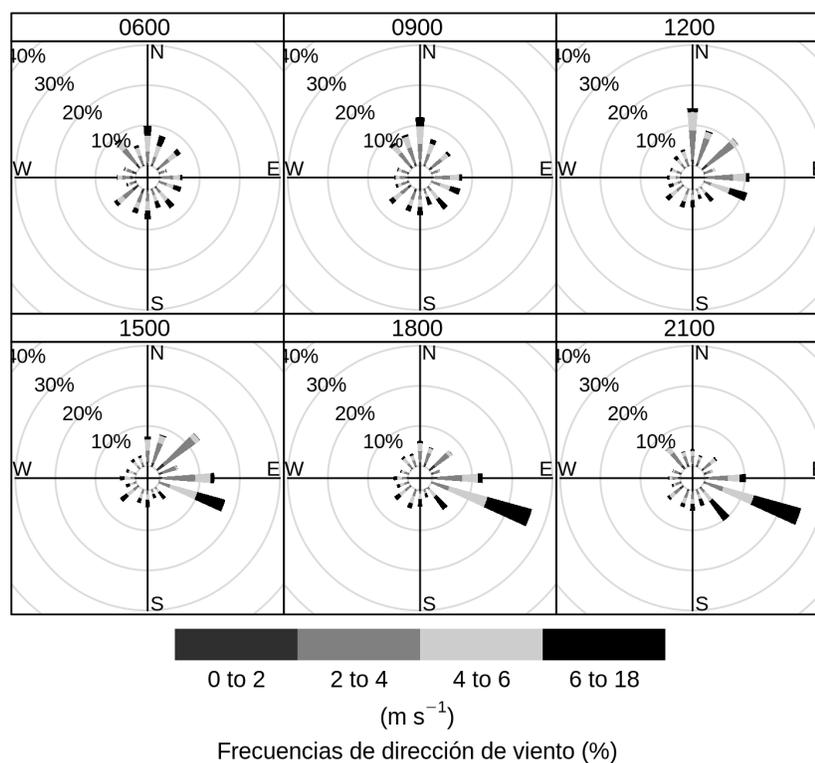
Dado que gran parte de la población mundial vive en grandes ciudades costeras, es importante estudiar los fenómenos que afectan dichas regiones. Tal es el caso de la brisa de mar, la cual alivia eventos de calor agobiante, actúa como forzante para la convección y afecta a la calidad de aire en superficie (Barbato, 1976; Kozo, 1982; Simpson, 1994; Camberlin & Planchon, 1997). Según Simpson (1994), la circulación de brisa puede producir el confinamiento de la polución en capas bajas. De modo que, la persistencia de este fenómeno podría generar eventos de contaminación prolongados. Por estos motivos, el pronóstico de la brisa es también de gran importancia ya que ayudaría a prever los eventos de contaminación y su severidad. A su vez, muchas actividades acuáticas recreativas tales como el kitesurf, windsurf y la navegación a vela en general se aprovechan (tanto de manera recreativa como profesional) de los vientos producidos por la brisa de mar en horas de la tarde de los meses estivales.

Al originarse por la diferencia entre las capacidades caloríficas de la tierra y el agua, la brisa puede observarse en las costas de cualquier espejo de agua de dimensiones considerables. Es decir, que permitan generar un contraste de temperatura suficiente, tal es el caso de un lago (Moroz, 1967) o un río (Silva Dias et al., 2004). Particularmente, dada la geografía del Río de La Plata (Figura 1.2), resulta interesante estudiar el fenómeno mencionado a lo largo de sus costas, tanto la argentina como la uruguaya. Al estar ambas costas enfrentadas, el contraste térmico que se genera entre el continente y el río durante el día, tiene sentido opuesto en ambos casos. Esto agrega un aspecto interesante a estudiar ya que una misma dirección del viento regional estaría generando efectos opuestos para el desarrollo de la brisa en ambas costas.



**Figura 1.2:** Zona de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas.

Al observar las rosas de los vientos para distintas horas del día en Aeroparque (Figura 1.3), se aprecia una rotación del viento del sector N-NO por la mañana, al E por la tarde y finalmente al ESE hacia la noche. Este comportamiento da indicios de la presencia de la brisa en la región y motiva el presente estudio.



**Figura 1.3:** Rosas de los vientos de la estación de Aeroparque para las 0600, 0900, 1200, 1500, 1800 y 2100 HL (hora local), promedio del período 2009-2017. Datos brindados por el Servicio Meteorológico Nacional.

En la región se han realizado algunos estudios sobre el fenómeno. Por ejemplo, Berri et al. (2010) utilizó un modelo de capa límite seco, hidrostático e incomprensible para simular la climatología del viento en capas bajas. Tanto los resultados de la simulación como las observaciones permiten apreciar los cambios en la frecuencia de dirección del viento en diferentes horas y su relación con un marcado ciclo diario del gradiente de temperatura tierra-agua.

Berri & Dezzutti (2020) simularon dos eventos de brisa en la región utilizando un modelo de capa límite seco, hidrostático e incomprensible. Ambos eventos se caracterizan por un viento regional dirigido desde tierra hacia el río el cual beneficia el desarrollo de la brisa al intensificar la convergencia horizontal. El estudio analiza el avance del frente de brisa utilizando imágenes de satélite y las salidas del modelo y determina que el desplazamiento del frente es más rápido en las cercanías de la boca del río.

Manta et al. (2020) estudió la climatología de la brisa en 8 estaciones de la costa uruguaya y

encuentra que la misma es más frecuente en verano cuando el contraste térmico entre la tierra y el río es máximo. A su vez, encuentra que si bien el fenómeno tiende a ocurrir a lo largo de toda la costa uruguaya, hay diferencias en su desarrollo entre la región del estuario del río y la región oceánica debido a cambios en la temperatura del agua y la orientación de la costa.

En Queirel & Berri (2020) se realizan pruebas con 3 métodos de identificación de la brisa en la estación meteorológica de Aeroparque. Los métodos utilizan datos de viento, presión y temperatura en superficie, temperatura del río y viento en altura obtenidos a partir del radiosondeo de Ezeiza.

Los estudios mencionados han abordado aspectos particulares de la brisa en la región y ninguno ha realizado pruebas con distintos métodos de identificación. Dicho esto y considerando que no son muchos los trabajos de brisa en esta zona, el presente estudio no se focaliza en un aspecto particular de la brisa sino que intenta abarcar varias características del fenómeno en la región del Río de La Plata.

## 1.1. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estudiar la brisa de mar en las costas del Río de La Plata. Para tal fin, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar el método más apropiado de identificación de la brisa empleando los datos disponibles de las estaciones meteorológicas ubicadas en inmediaciones de las costas argentina y uruguaya del Río de La Plata.
2. Aplicar el método para identificar los días con desarrollo de brisa en ambas costas y realizar un análisis climatológico de la brisa en cada estación meteorológica empleada.
3. Seleccionar dos días con ocurrencia de la brisa, uno en cada costa argentina y uruguaya, respectivamente, y simularlos empleando el modelo WRF para estudiar la dinámica del fenómeno en la región.

## Capítulo 2

# Métodos de identificación de brisa

En este Capítulo se analizan 3 métodos de identificación de la brisa aplicados en la estación meteorológica de Aeroparque (ver Figura 1.2) con el objetivo de definir el método más apropiado a utilizar en el resto de las estaciones meteorológicas de la región.

### 2.1. Datos

Para poder identificar los días con desarrollo de la brisa se emplean los datos de viento, temperatura y presión correspondientes a la estación meteorológica de Aeroparque para el período comprendido entre enero 2009 y julio 2017. Estos datos fueron facilitados por el Servicio Meteorológico Nacional y consisten en observaciones horarias para todo el día. Se realizó un exhaustivo análisis de calidad de datos para identificar valores dudosos, datos faltantes y demás inconsistencias. Para la temperatura del río se utilizan los datos diarios de temperatura de superficie del mar (*SST*, por sus siglas en inglés) de la base de datos NOAA OI SST V2 con resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (Reynolds et al., 2007). Como indicador de la condición sinóptica regional se utiliza el viento en el nivel de 850hPa obtenido del radiosondeo de Ezeiza de las 12 UTC (09 hora local), el cual se considera representativo de toda la zona de estudio (por ser el único radiosondeo disponible en el área). También se utilizan datos de hora de amanecer y atardecer obtenidos a partir del paquete *suncalc* del software de código libre *R* (Team et al., 2013). Para el análisis de los campos de presión a escala regional se emplean los datos diarios de presión a nivel del

mar (*SLP*, por sus siglas en inglés) del NCEP/NCAR Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) con resolución de  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ .

## 2.2. Métodos

Luego de realizar una búsqueda bibliográfica de los diferentes métodos que se utilizan para identificar la brisa, se seleccionaron tres de ellos que se consideraron apropiados para el estudio. El criterio utilizado para la selección se basó en tres premisas: i) que los datos necesarios estén disponibles en la región de interés; ii) que el método esté descrito detalladamente para poder implementarlo en forma apropiada, y iii) que haya sido implementado en latitudes similares a las de nuestra región. El último criterio se debe a las diferencias en el desarrollo de la brisa según la latitud, descritas por Rotunno (1983). A continuación se describen los 3 métodos seleccionados.

El método de Borne et al. (1998) propone las siguientes condiciones que se deben cumplir para identificar un día con desarrollo de brisa:

1. El cambio en la dirección del viento en 700 hPa debe ser  $< 90^{\circ}$  entre las 13HL (hora local) del día anterior y las 13HL del día actual.
2. El cambio en la intensidad del viento en 700 hPa debe ser  $< 6 \text{ m/s}$  entre 1HL y 13HL.
3. La velocidad del viento en 700 hPa debe ser  $< 11 \text{ m/s}$  a las 13HL.
4. La diferencia entre la temperatura máxima en tierra y la temperatura del río debe ser  $> 3^{\circ}\text{C}$ .
5. El cambio de la dirección del viento en superficie debe ser  $> 30^{\circ}$  en alguna de las horas comprendidas entre 1 hora después del amanecer y 5 horas antes del atardecer.
6. El cociente entre el cambio máximo en la dirección del viento en las horas de la Condición 5 y el promedio de los cambios en la dirección del viento en las 5 horas siguientes (a la hora del máximo) debe ser  $> 6$ .

El viento en el nivel de 700hPa es utilizado por el autor como indicador de la condición sinóptica regional. Sin embargo, dada la disponibilidad de una base de datos de viento en 850hPa

correspondiente al radiosondeo de Ezeiza, en este trabajo se utilizó dicho nivel como indicador de la condición sinóptica. Por otro lado, dado que sólo se disponen de radiosondeos para dicha estación a las 12 UTC (09HL), todos los filtros que requieren información de altura (Condiciones 1,2 y 3) fueron aplicados a las 09HL y los cambios en 12hs (Condición 2) se consideraron en 24hs (entre 09HL del día anterior y las 09HL del día actual). A su vez, si bien Borne et al. (1998) utiliza 3°C para la desigualdad de la Condición 4, en este trabajo utilizamos el valor de 0°C para homogeneizar esta Condición en los 3 métodos implementados y también porque varios autores afirman que no son necesarias grandes diferencias de temperatura para que se desarrolle la brisa (Laird et al., 2001; Segal & Pielke, 1985; Arritt, 1987; Simpson, 1994).

Por otro lado, el método de Furberg et al. (2002) exige que:

1. Más de la mitad de las observaciones horarias del viento en la estación deben ser *offshore* (de tierra hacia el mar), o en calma, en el período comprendido entre 6 horas antes del amanecer y 2 horas después del amanecer.
2. El viento debe ser *onshore* (del mar hacia la tierra), al menos por dos horas consecutivas en el período entre 2 horas después del amanecer y 2 horas después del atardecer.
3. Más de la mitad de las observaciones horarias en la estación deben ser *offshore*, o en calma, en el período entre 2 horas después del atardecer y 8 horas después del atardecer.

Este autor considera que el viento es *offshore* cuando la dirección se encuentra en un rango de 90° centrado en una recta perpendicular a la costa y dirigido hacia el río. Para la estación de Aeroparque esto significa que la dirección del viento debe estar comprendida entre 160° y 260°. Mientras que el viento se considera *onshore* cuando su dirección se encuentra en un rango de 90° centrado en la perpendicular a la costa pero proveniente del río. En Aeroparque esto significa viento cuya dirección esté entre 340° y 80°.

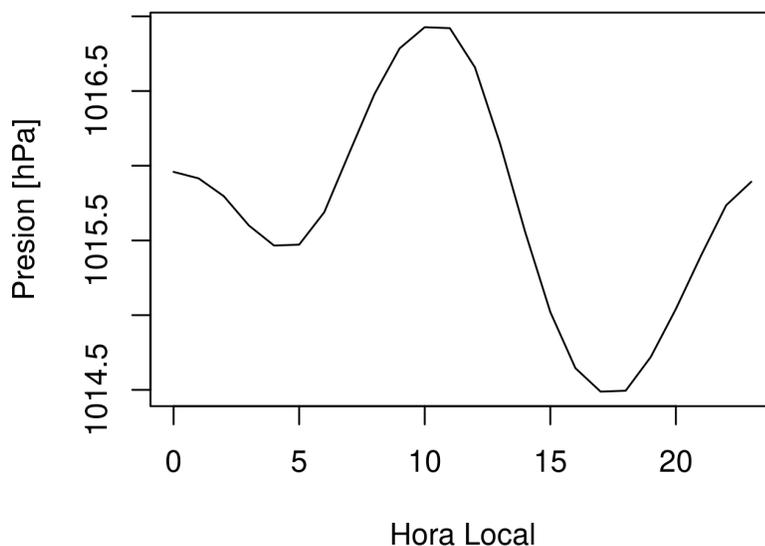
El método de Azorin-Molina et al. (2011) propone las siguientes condiciones:

1. Entre 1 hora después del amanecer y 7.5 horas después del amanecer debe iniciarse el fenómeno con viento *onshore* y velocidad  $> 1.5 \text{ m/s}$ .
2. En la hora previa a la de inicio, el viento debe ser *offshore* o su velocidad  $< 1.5 \text{ m/s}$ .

3. El fenómeno debe finalizar entre 1 hora antes del atardecer y 5 horas después del atardecer, con viento *offshore* o su velocidad  $< 1.5 \text{ m/s}$ .
4. La velocidad del viento debe ser  $< 13.9 \text{ m/s}$  desde el inicio hasta el fin de la brisa.
5.  $C_{pres} - Min_{pres} \geq 1hPa$ , donde  $C_{pres}$  es la presión atmosférica al finalizar la brisa y  $Min_{pres}$  es la presión mínima entre el inicio y el fin de la brisa.
6.  $Atide_{daily} - Atide_{general} \geq -0.5$ , donde  $Atide_{daily}$  y  $Atide_{general}$  representan las ondas de presión semidiurnas para el día en cuestión y para el período completo de estudio respectivamente. Cada término se calcula de la siguiente forma:  $Atide = (P10 + P22) - (P04 - P16)$ , donde P10, P22, P04 y P16 son las presiones en las horas del día correspondientes, las cuales representan los valores máximos y mínimos de la onda de presión atmosférica promedio semidiurna.
7.  $AirT_{10m} - SST \geq 0$ , donde  $AirT_{10m}$  es la temperatura máxima diaria en la estación y SST es la temperatura de la superficie del mar.

Para definir el viento *onshore* y *offshore* del mismo modo que lo hace el autor de este método, se trazó una línea paralela a la costa en las cercanías de Aeroparque con dirección  $120^{\circ}$ - $300^{\circ}$ . De forma tal que el viento es *onshore* cuando su dirección está entre  $300^{\circ}$  y  $120^{\circ}$ , mientras que es *offshore* cuando está entre  $120^{\circ}$  y  $300^{\circ}$ .

Los horarios utilizados en la Condición 6, dependen del ciclo diario de presión en el sitio en el cual se aplica el método. Estos se corresponden con los horarios de máximos y mínimos del ciclo diario de presión. Para la estación de Aeroparque, dicho ciclo anual se muestra en la Figura 2.1. De modo que los horarios a utilizar son 00, 06, 11 y 17 HL. Por lo tanto P10, P22, P04 y P16 (en el método de Azorin-Molina et al. (2011)) son reemplazados aquí por P11, P00, P06 y P17 respectivamente.



**Figura 2.1:** Ciclo diario de presión en la estación de Aeroparque para el período comprendido entre enero de 2009 y julio de 2017.

Los datos de NOAA OI SST V2 con resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (Reynolds et al., 2007) fueron promediados en los 6 puntos de grilla sobre el río más cercanos a Aeroparque. El valor obtenido fue utilizado como *SST* en la Condición 7. Mientras que la temperatura observada en la estación a 1.5m de altura fue utilizada como  $AirT_{10m}$ .

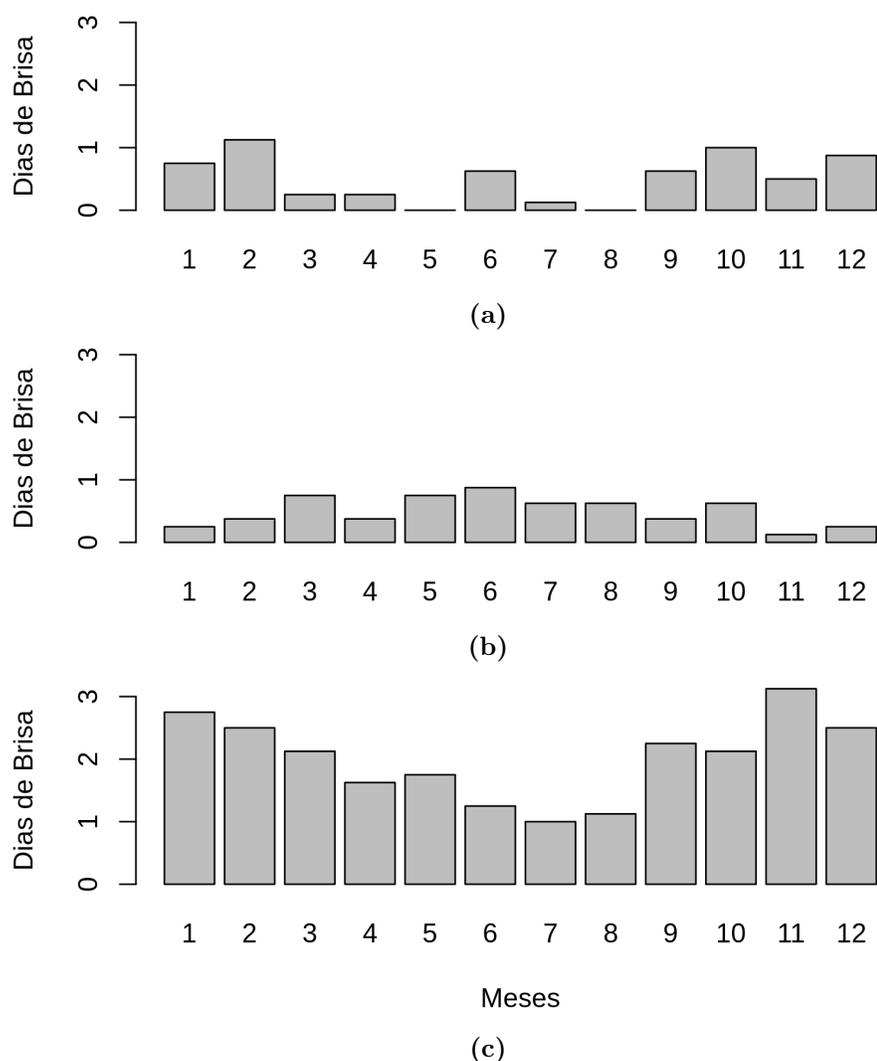
Tanto el manejo de datos de estaciones, de SLP y de SST, como la aplicación de los 3 métodos arriba descriptos, fueron realizados utilizando el software de código libre *R* (Team et al., 2013).

## 2.3. Resultados

El método de Azorin-Molina et al. (2011) identificó 55 días de brisa de un total de 3100 días con datos disponibles (3134 es el total de días en el período), es decir un 1.77% de ocurrencia. Dada la escasa cantidad de casos identificados con este método y la naturaleza de los filtros que impone, que exigen considerar un periodo de 18 horas del día (para el cual no se disponen de observaciones en algunas de las estaciones), se considera que el mismo es demasiado restrictivo y por lo tanto inapropiado para la región.

El método de Furberg et al. (2002) identificó 53 casos de brisa de un total de 3116 días

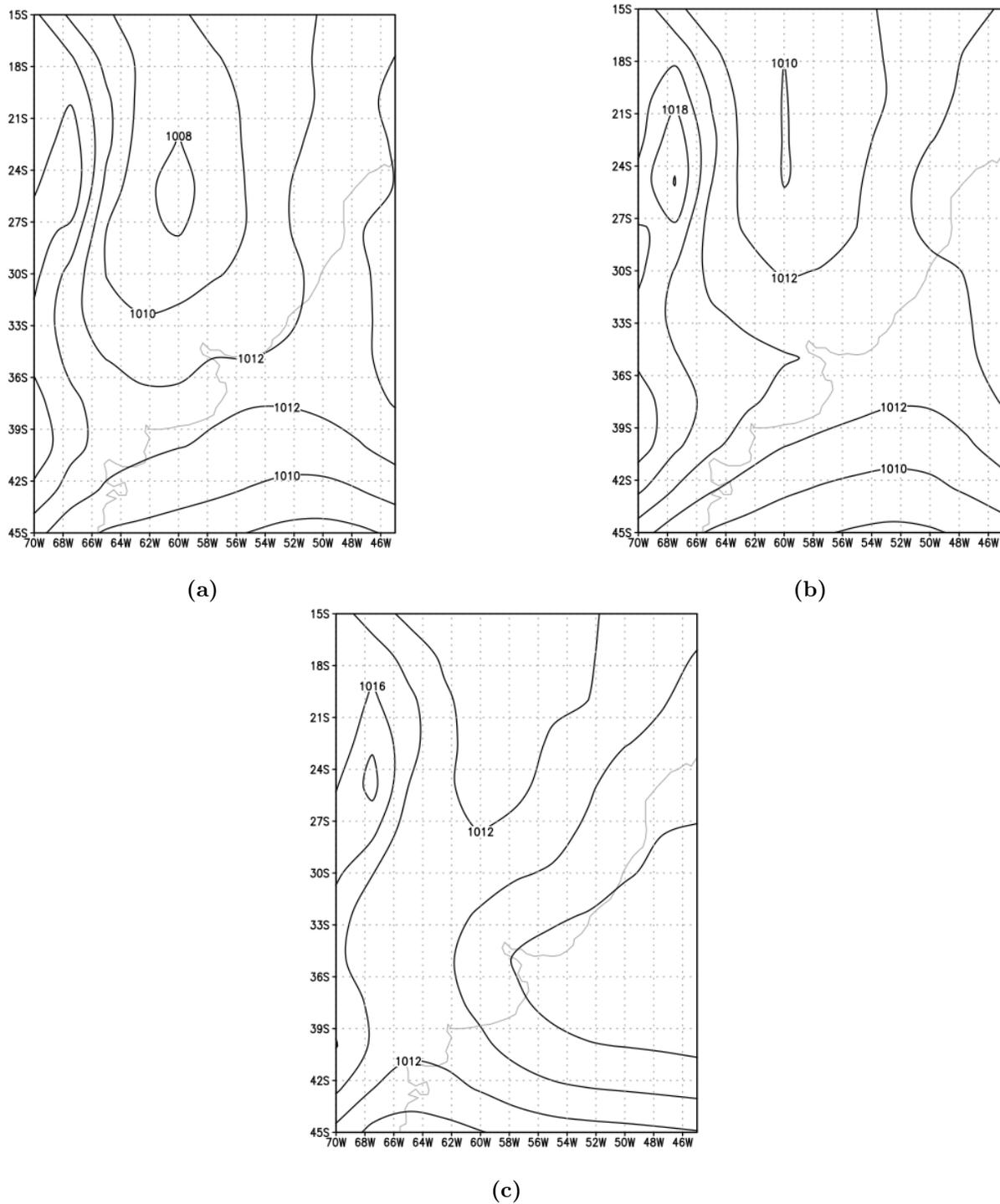
con datos, un 1,70% de ocurrencia. Este método también se descartó por el reducido número de casos identificados y por los motivos que se detallan a continuación. El máximo número de casos de brisa ocurre en invierno, como se puede apreciar en la Figura 2.2b, en contraste con la bibliografía que indica que el verano es la estación del año con mayor número de eventos de la brisa. Por otro lado, el campo medio de SLP correspondiente a los días de brisa identificados por el método de Furberg et al. (2002) (Figura 2.3b) muestra una situación sinóptica típica post-frontal. Dado que este método exige la existencia de viento *offshore* previo a la aparición de viento *onshore* como consecuencia del desarrollo de la brisa, podría estar identificando en particular los días posteriores al pasaje de un frente frío en la región, situaciones que son más frecuentes en invierno.



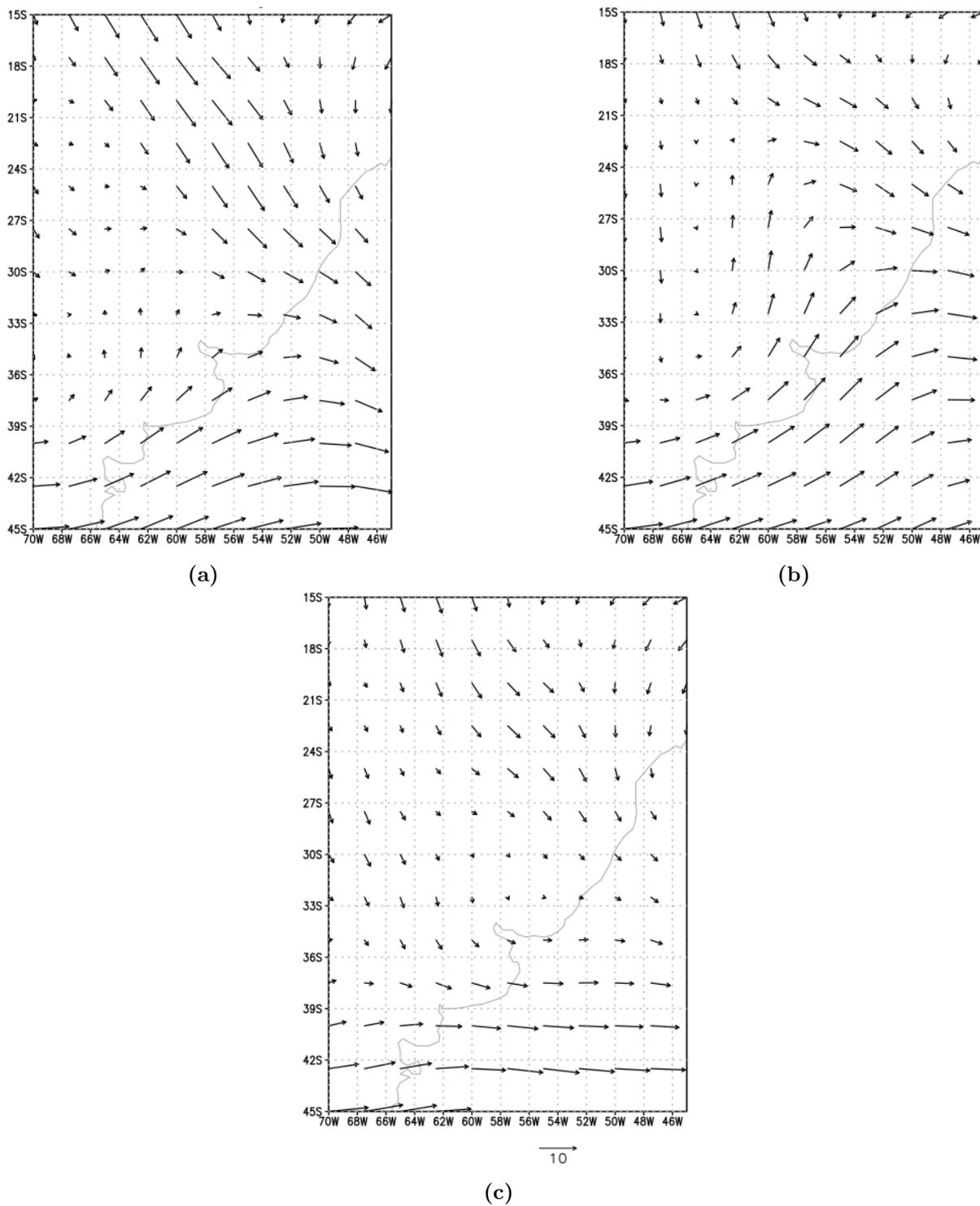
**Figura 2.2:** Histograma de promedio de cantidad de casos de brisa por mes obtenidos en Aeroparque, según el criterio de (a) Azorin-Molina et al. (2011), (b) Furberg et al. (2002) y (c) Borne et al. (1998) durante el período comprendido entre enero de 2009 y diciembre de 2016.

Por último, el método de Borne et al. (1998) logró identificar 206 casos de brisa en Aeroparque, de un total de 2972 días con datos, es decir un 6.9% de ocurrencia. En este caso el total de días con datos es menor que para los métodos anteriores debido a la necesidad de utilizar datos de radiosondeo, los cuales no están siempre disponibles. La distribución del número de días de brisa por mes (Figura 2.2c) es consistente con lo descrito en la bibliografía ya que el máximo ocurre en verano y el mínimo en invierno. Por otra parte, el mapa medio de presión a nivel de mar (Figura 2.3c) y el de viento en 850hPa (Figura 2.4c), muestran condiciones anticiclónicas y vientos débiles

*offshore* en 850hPa, lo cual beneficia el desarrollo del sistema de brisa ya que advecta aire cálido hacia el río, intensificando el gradiente térmico entre el agua y la tierra (Estoque, 1962). Además, el viento regional *offshore* genera un aporte al flujo de retorno en altura, el cual es necesario para cerrar la circulación de brisa en el plano vertical.



**Figura 2.3:** Campos medios de presión a nivel del mar (SLP) para el conjunto de días de brisa en Aeroparque identificados durante el período 2009-2017 según el criterio de selección (a) Azorin-Molina et al. (2011), (b) Furberg et al. (2002) y (c) Borne et al. (1998).



**Figura 2.4:** Campos medios de viento en el nivel de 850hPa para el conjunto de días de brisa en Aeroparque identificados durante el período 2009-2017 según el criterio de selección de (a) Azorin-Molina et al. (2011), (b) Furberg et al. (2002) y (c) Borne et al. (1998).

## 2.4. Conclusiones parciales

Los resultados obtenidos hasta el momento permiten establecer las siguientes conclusiones:

- la cantidad y estacionalidad de los eventos encontrados son muy dependientes del método de identificación empleado
- se decidió adoptar el método de Borne et al. (1998) como el más apropiado para la región y se lo empleó en las restantes estaciones meteorológicas.
- el método desarrollado por Furberg et al. (2002) se descarta por la escasa cantidad de eventos encontrados y el ciclo anual opuesto a lo que describe la bibliografía. Este método podría estar confundiendo la rotación de los vientos debida al pasaje de un frente frío con la originada por un evento de brisa
- el método de Azorin-Molina et al. (2011) se descarta por la escasa cantidad de eventos identificados y por la poca estacionalidad que se observa en el ciclo anual de ocurrencia del fenómeno. Dado que se trata de un fenómeno que se origina principalmente por la diferencia térmica tierra-agua, la bibliografía indica que su ciclo anual es muy similar al de dicha diferencia, con un máximo en verano y mínimo en invierno.

## Capítulo 3

# Análisis de la ocurrencia de brisa en la región

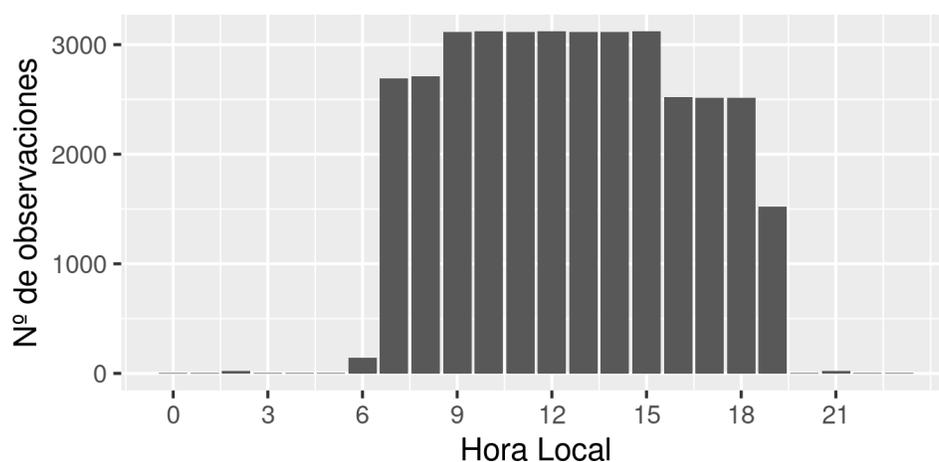
A partir de los resultados del Capítulo 2, se implementa el método de Borne et al. (1998) en todas las estaciones meteorológicas mostradas en la Figura 1.2: Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio en Argentina; Colonia y Carrasco en Uruguay. El período utilizado es el mismo que el correspondiente al análisis del Capítulo 2 (enero 2009 a julio 2017).

### 3.1. Datos

Para la aplicación del método de Borne et al. (1998) en el período mencionado, se emplean los datos horarios de 5 estaciones meteorológicas de la región (ver Figura 1.2): Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio en Argentina; Colonia y Carrasco en Uruguay. Los datos de las estaciones argentinas fueron facilitados por el Servicio Meteorológico Nacional y los correspondientes a estaciones uruguayas por el Instituto Uruguayo de Meteorología. Para todas las estaciones se realizó un exhaustivo análisis de calidad de datos con el objetivo de identificar valores dudosos, datos faltantes y demás inconsistencias. Para la estación de Aeroparque se disponen de observaciones horarias durante las 24 horas del día. La Plata Aero presenta observaciones horarias entre las 7 y 21HL, mientras que para las horas nocturnas solo se disponen de observaciones en algunos períodos. Punta Indio cuenta con observaciones horarias entre las 9 (o a veces 6) y

21HL, mientras que por la noche los datos son tri-horarios. A su vez, entre el 01/12/2014 y el 31/10/2015 no se dispone de datos en esta estación. Con respecto a las estaciones uruguayas, Carrasco cuenta con datos horarios durante las 24hs del día. Se resolvieron algunos errores en los datos, como la codificación de la dirección del viento en las calmas, o algunas direcciones que no coinciden con la forma en que debe informarse esta variable. Para Colonia en cambio, si bien las observaciones son horarias, durante el período nocturno hay muy pocas observaciones. En la Figura 3.1 se observa la cantidad de observaciones por hora en dicha estación. Cabe mencionar que salvo un pequeño porcentaje de días, en todas las estaciones se puede aplicar el método de Borne et al. (1998) correctamente.

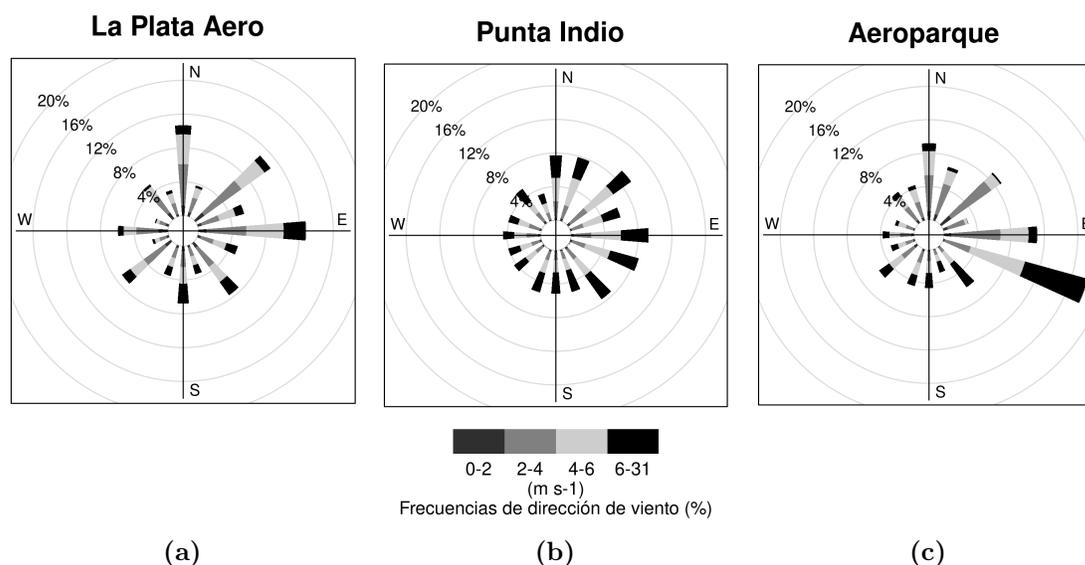
Para la temperatura del río se utilizan los datos diarios de *SST* de la base de datos NOAA OI SST V2 con resolución de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (Reynolds et al., 2007). Se realiza un promedio de los 6 puntos de grilla mas cercanos a cada estación (ubicados sobre el río) y el resultado es utilizado para calcular el  $\Delta T$  entre tierra y agua en el método de Borne et al. (1998). Como indicador del viento regional se utiliza el viento en el nivel de 850hPa del radiosondeo de Ezeiza de las 12UTC (09 HL). Dado que es el único radiosondeo disponible en la región, éste se utiliza para aplicar el método de Borne et al. (1998) en las 5 estaciones. También se utilizan datos de hora de amanecer y atardecer obtenidos mediante el paquete *suncalc* del software de código libre *R* (Team et al., 2013). Para el análisis de la presión en superficie a escala regional se emplean los datos diarios de presión a nivel del mar (SLP, por sus siglas en inglés) del NCEP/NCAR Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) con resolución de  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ .



**Figura 3.1:** Histograma del número de observaciones para cada hora del día en la estación de Colonia.

### 3.2. Resultados

En primer lugar, en la Figura 3.2 se muestran las rosas de los vientos para las 3 estaciones meteorológicas argentinas utilizando el período completo de datos entre las 9 y 21HL (horarios en que las 3 estaciones tienen datos). Para la estación de La Plata Aero (Figura 3.2a) se observa la típica forma de diente de serrucho, de dudosa representatividad de la realidad física, y probablemente consecuencia de un sesgo en la observación que tiende a informar el viento en las 8 direcciones principales (en vez de 16 direcciones). Esta característica no se observa (al menos no es tan notoria) en las otras dos estaciones. En La Plata Aero se observa una mayor frecuencia de los vientos del N, NE y E (cuadrante del río). Las rosas por estaciones del año (no mostradas) también muestran una mayor frecuencia de los vientos del río en los meses de verano.



**Figura 3.2:** Rosas de los vientos para el periodo comprendido entre enero de 2009 y julio de 2017 en las 3 estaciones meteorológicas argentinas. Sólo se incluyen las observaciones entre las 9HL y las 21HL (período en que todas las estaciones tienen datos).

En Punta Indio (Figura 3.2b), si bien las direcciones están mucho más distribuidas que en Aeroparque, hay una mayor frecuencia de los cuadrantes NE y SE (los cuadrantes del río). Este efecto es aún más marcado en la rosa de los vientos para los meses de verano (no mostrada). Por ultimo, en Aeroparque (Figura 3.2c) la máxima frecuencia está asociada a vientos del ESE, seguido por vientos del E, NE y N.

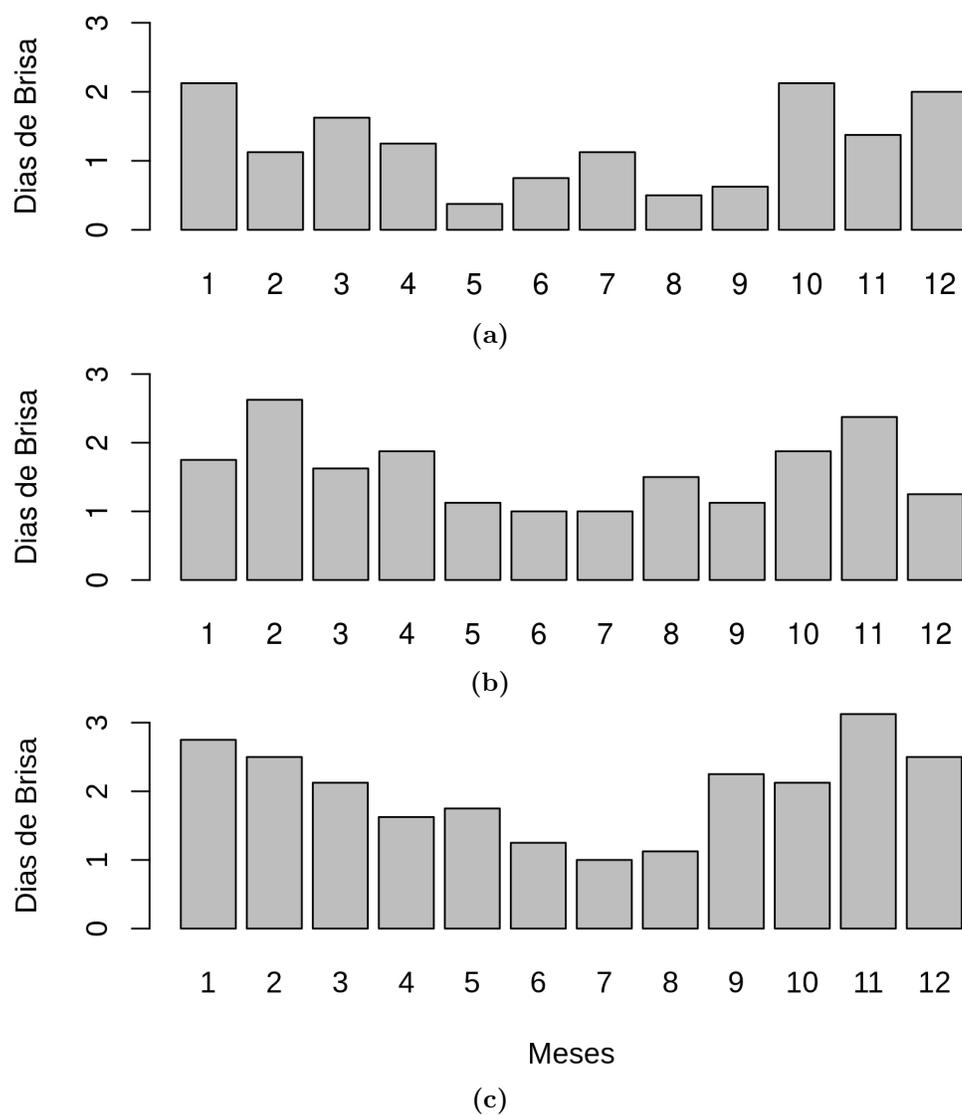


Estación	Días de brisa	Días utilizados por el método	Porcentaje de ocurrencia
Aeroparque	206	2972	6.93 %
La Plata Aero	157	2803	5.60 %
Punta Indio	124	2442	5.07 %
Colonia	173	2151	8.04 %
Carrasco	206	2826	7.29 %

**Tabla 3.1:** Resultados de la aplicación del método Borne et al. (1998) en las 5 estaciones meteorológicas: cantidad de días de brisa identificados en el período enero 2009 a julio 2017; cantidad de días con datos suficientes para aplicar el método; porcentaje de ocurrencia respecto al número de días con datos.

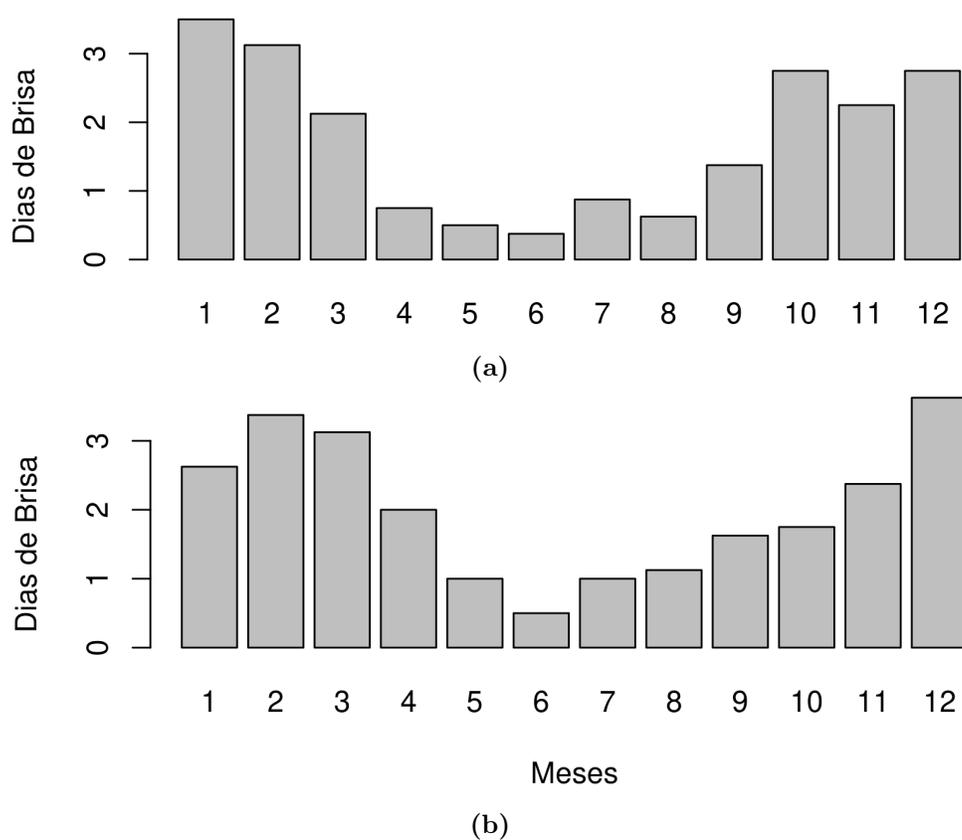
observa un ciclo anual muy similar al de la Figura 2.2c, con mayor ocurrencia en los meses de verano respecto a los meses de invierno.

En la Figura 3.4 se muestra el ciclo anual para cada una de las estaciones argentinas (la Figura 3.4c se corresponde con la Figura 2.2c, incluida aquí para comparación). Si bien en las 3 estaciones, en términos generales el fenómeno es más frecuente en verano que en invierno, caben resaltar algunos aspectos particulares. El mes de mayor ocurrencia es Noviembre en Aeroparque, Febrero en La Plata Aero y Enero/Octubre en Punta Indio. Estas diferencias, podrían deberse a la ubicación de cada estación respecto al río. Por ejemplo, Manta et al. (2020) encontró diferencias en el desarrollo de la brisa entre la región del estuario y la región oceánica. En este caso, la estación de Punta Indio se encuentra mucho más cerca de la boca del río que las otras dos estaciones.



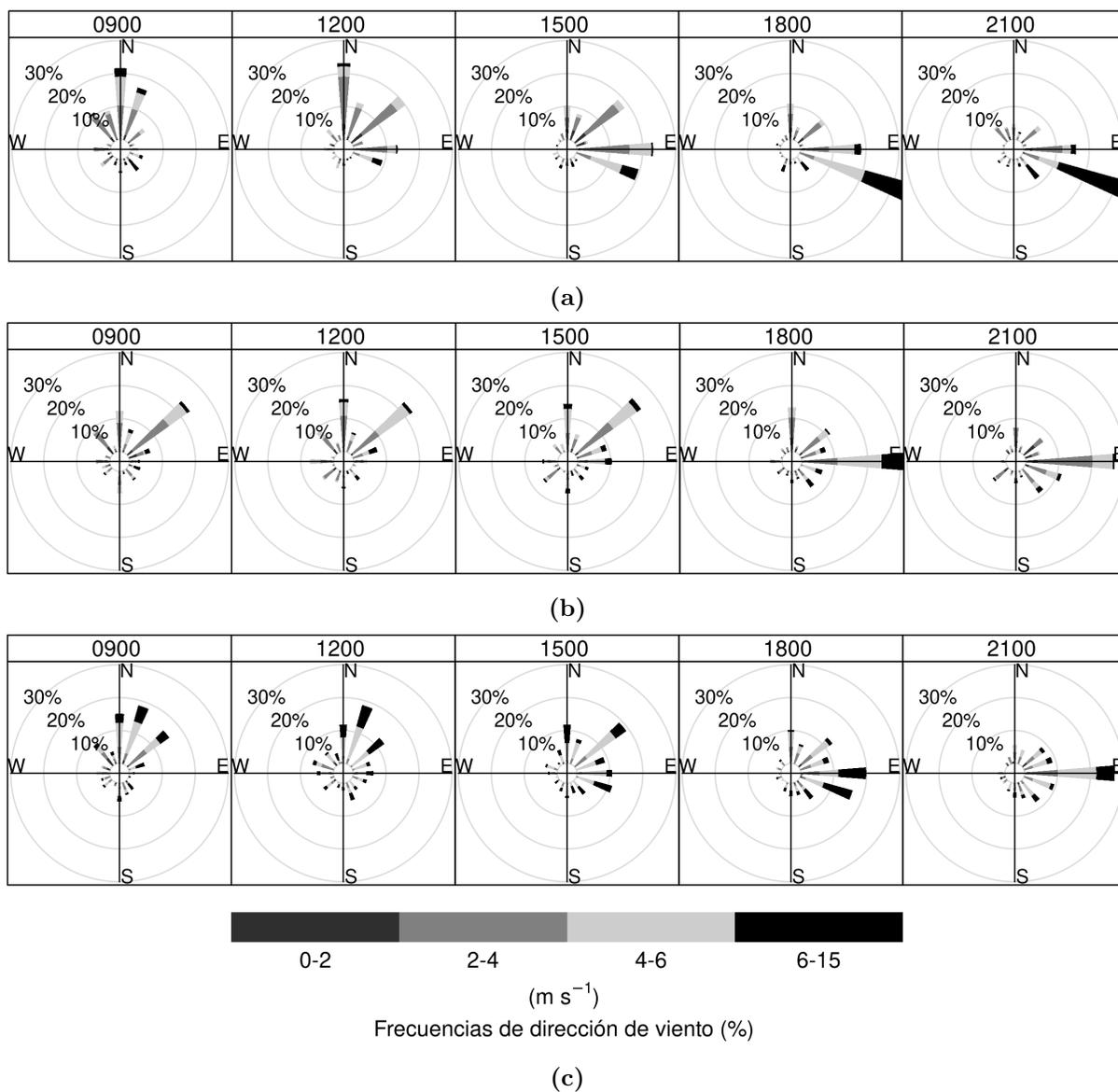
**Figura 3.4:** Histograma de promedio de cantidad de casos de brisa por mes obtenidos para las estaciones de (a) Punta Indio, (b) La Plata Aero y (c) Aeroparque durante el período comprendido entre enero de 2009 y diciembre de 2016 utilizando el método de Borne et al. (1998).

En la Figura 3.5 se muestra el ciclo anual de las estaciones uruguayas. En ellas, la diferencia entre verano e invierno es más notoria que en las estaciones argentinas. A su vez, como puede verse en la Tabla 3.1, la cantidad de eventos es mayor que en las estaciones argentinas. El mes de mayor frecuencia es diciembre en Carrasco y enero en Colonia.



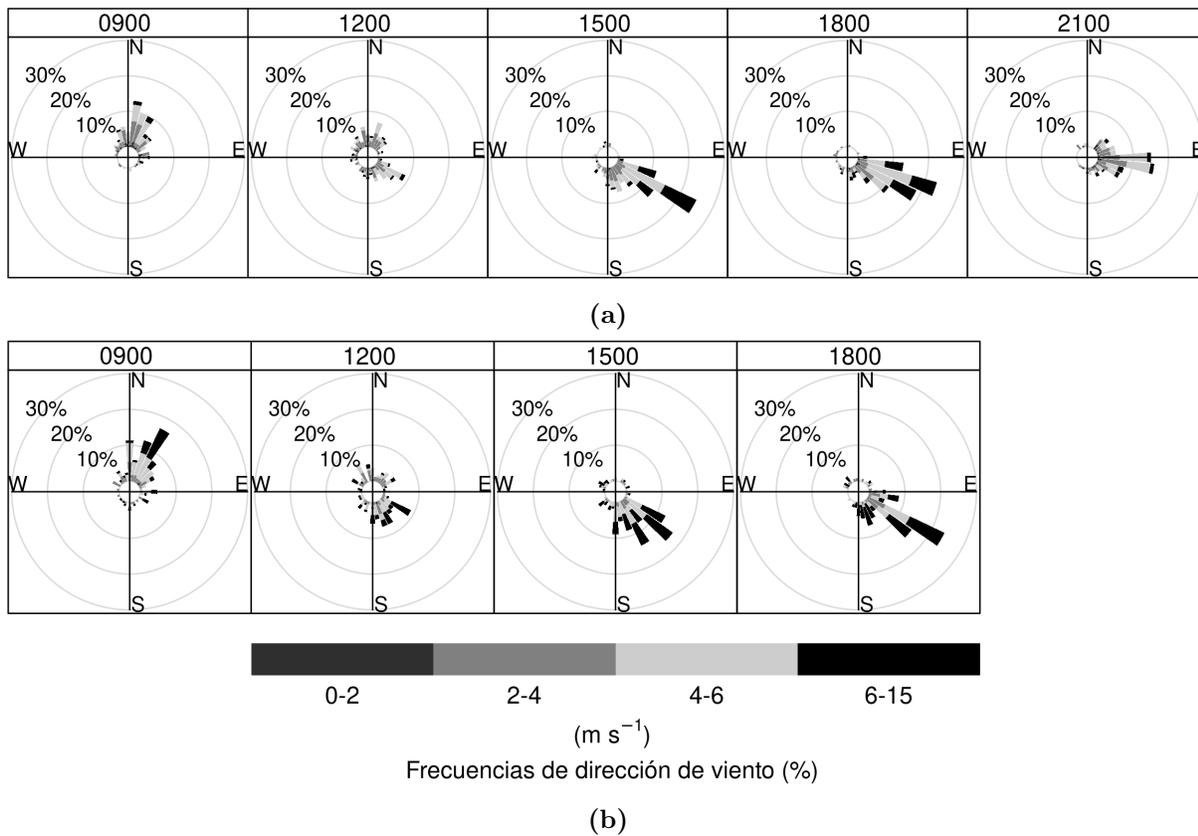
**Figura 3.5:** *Histograma de promedio de cantidad de casos de brisa por mes obtenidos para las estaciones de (a) Colonia, (b) Carrasco durante el período comprendido entre enero de 2009 y diciembre de 2016 utilizando el método de Borne et al. (1998).*

La Figura 3.6 muestra el comportamiento del viento en los días de brisa en las estaciones argentinas. En los tres casos el viento es predominantemente del sector N por la mañana, con rotación al E por la tarde (sector del río) y finalmente hacia el ESE alrededor de las 21HL.



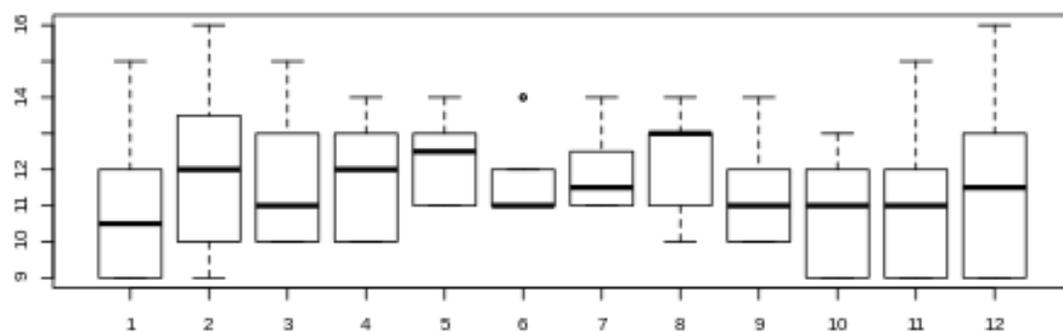
**Figura 3.6:** Rosas de vientos cada 3 horas, promedio de los días de brisa seleccionados en el período 2009-2017 por el método de Borne et al. (1998) en (a) Aeroparque, (b) La Plata Aero y (c) Punta Indio.

En la Figura 3.7, similar a la Figura 3.6 pero para el caso de las estaciones uruguayas, el viento es principalmente del NE por la mañana (dirección del viento regional predominante), al mediodía muestra direcciones variables y por la tarde se establece la brisa con viento del SE proveniente del río.

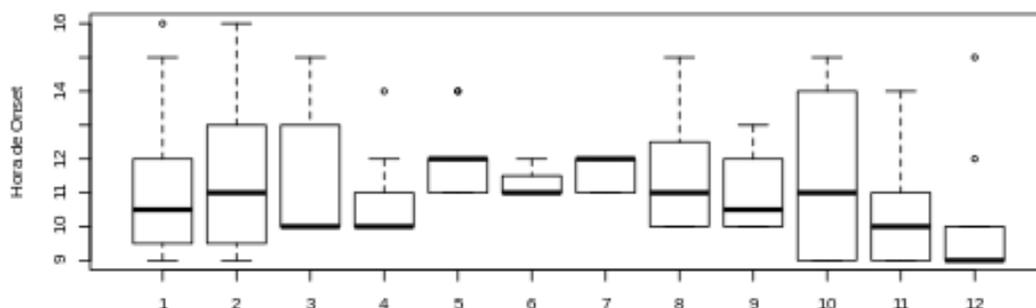


**Figura 3.7:** Rosas de vientos cada 3 horas, promedio de los días de brisa seleccionados en el período 2009-2017 por el método de Borne et al. (1998) en (a) Carrasco y (b) Colonia.

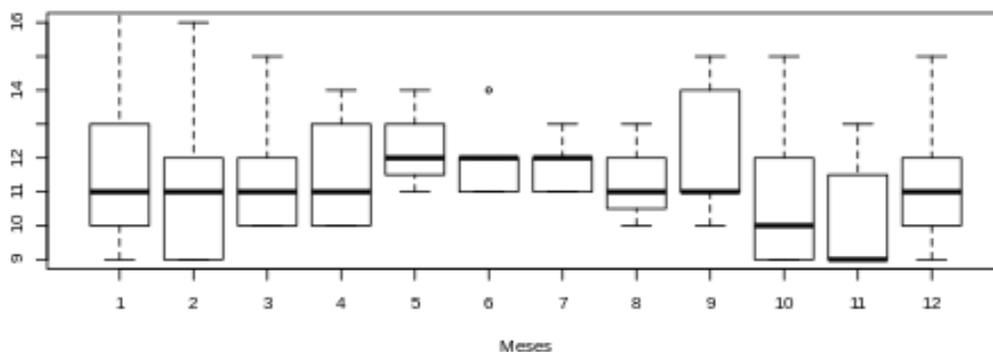
Dado que el método de identificación utilizado permite obtener el horario en el cual se inicia la brisa, en la Figura 3.8 se presentan los boxplot mensuales de dicho horario para las estaciones argentinas. Si bien la variación durante el año es pequeña, la mediana muestra un inicio más tardío en los meses de invierno, ya que debido a la menor insolación, se demora la generación de un  $\Delta T$  suficiente entre la tierra y el río para dar inicio a la brisa. También puede observarse una menor variabilidad en los meses de invierno debido a la menor cantidad de eventos en dichos meses.



(a)



(b)

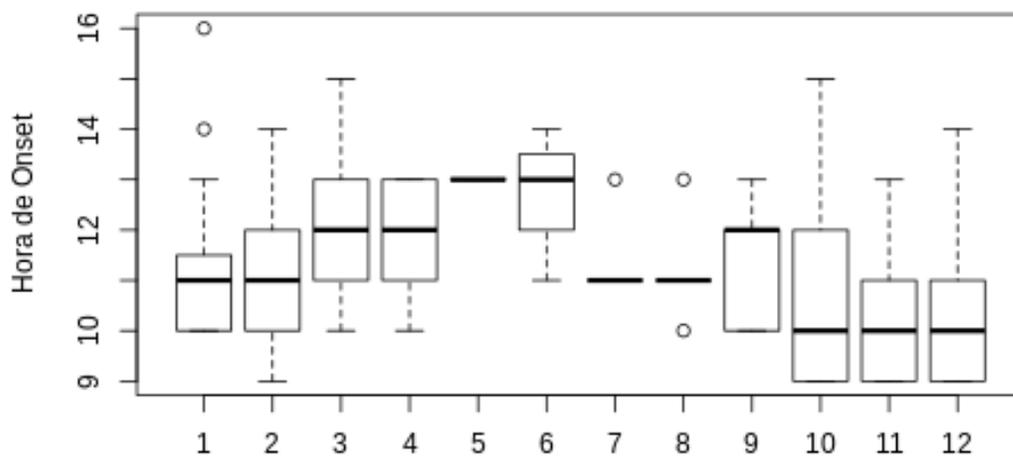


(c)

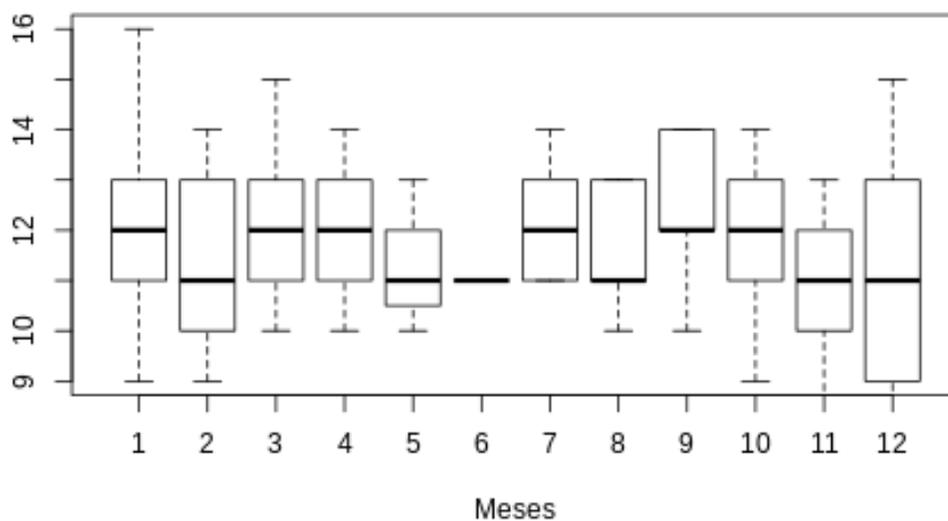
**Figura 3.8:** *Boxplot mensuales de la hora de inicio de la brisa en (a) Aeroparque, (b) La Plata Aero y (c) Punta Indio.*

La hora de inicio del fenómeno en las estaciones uruguayas se presenta en la Figura 3.9. En Colonia se observa un inicio más tardío en los meses de invierno, ya que en caso de generarse un gradiente térmico suficiente para que se desarrolle la brisa, este se alcanzará en horas cercanas a la de máximas temperaturas sobre tierra, mientras que en los meses de verano, el fenómeno da inicio en horas previas al mediodía debido a la mayor insolación. En Carrasco no se observa un

ciclo anual tan claro como en el resto de las estaciones. Sin embargo, en términos generales, el fenómeno comienza más tarde que en Colonia.



(a)



(b)

**Figura 3.9:** *Boxplot mensuales de la hora de inicio de la brisa en (a) Colonia y (b) Carrasco.*

Las composiciones de presión al nivel del mar para los días de brisa en las dos estaciones uruguayas es muy similar a la de días de brisa para las estaciones de la costa argentina (Figura 2.3c). Resulta interesante remarcar que la dirección del viento sinóptico en estos campos (NE), coincide con los vientos observados por la mañana en las rosas de los vientos para estos días (Figuras 3.7a y 3.7b). Es decir que por la mañana el viento es del NE (de tierra, dirección que

promueve el desarrollo de la brisa) y está forzado por el campo de presión a escala regional, mientras que por la tarde, debido al calentamiento sobre tierra, la brisa se establece con viento del SE, de modo que predomina el efecto local por sobre el viento regional.

### 3.3. Conclusiones parciales

- la ocurrencia del fenómeno es mayor en la costa uruguaya, posiblemente debido a los vientos predominantes del NE en la región, que según Estoque (1962) favorecen el desarrollo de la brisa ya que intensifican el gradiente térmico tierra-agua y aportan a la rama de retorno en altura de la circulación de brisa. También es más marcada la diferencia en el número de casos entre verano e invierno en las estaciones uruguayas respecto a las argentinas. Estos dos aspectos sugieren una presencia más notoria de la brisa en la costa uruguaya.
- la dirección predominante del viento durante la mayoría de los días de brisa es del cuadrante SE en ambas costas, con predominio del E en las estaciones argentinas y del SE en las uruguayas.
- el campo medio de presión a nivel del mar (SLP) para los días de brisa en todas las estaciones es muy similar al de la Figura 2.3c, el cual, a su vez es muy similar al campo medio climatológico en la región. Este resultado motiva el análisis del Capítulo 5 referido a las condiciones meteorológicas regionales asociadas con la brisa. El objetivo del mismo es identificar los distintos patrones de SLP que se asocian al desarrollo de la brisa (en lugar de restringir el análisis solamente a un campo medio).
- el horario de inicio de la brisa varía según los distintos meses del año. El fenómeno se inicia más temprano en los meses de verano y más tarde en los meses de invierno. Esto podría deberse a que dada la menor insolación durante los meses de invierno, se demora más tiempo en generar un  $\Delta T$  entre la tierra y el río suficiente para dar inicio a la brisa.

## Capítulo 4

# Eventos simultáneos de brisa

En este Capítulo se realiza un análisis exploratorio de los días simultáneos de brisa en las distintas estaciones analizadas previamente. De este modo se forman 3 conjuntos de días para los cuales se muestra a continuación la cantidad de eventos encontrados:

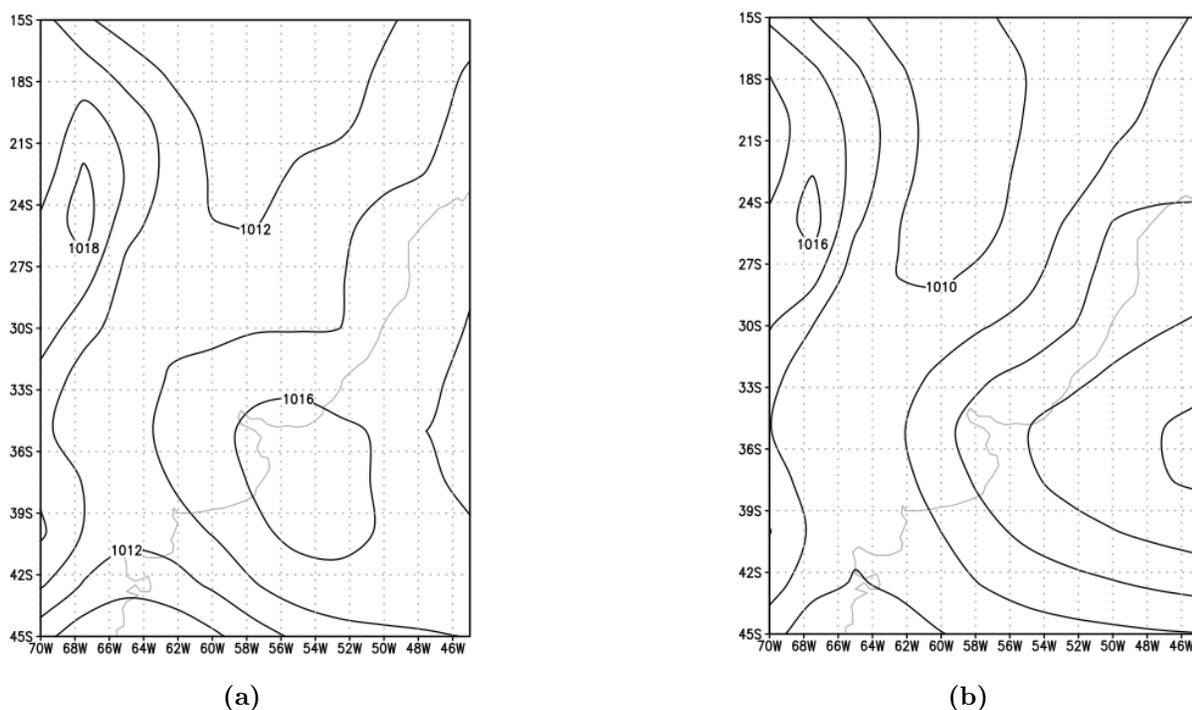
1. Brisa en **todas** las estaciones : 1 día
2. Brisa en las estaciones **argentinas**: 11 días
3. Brisa en las estaciones **uruguayas**: 58 días

Los conjuntos se componen de los días en los cuales el método identificó la brisa en: (1) las 5 estaciones, (2) las 3 estaciones argentinas (Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio) y (3) las 2 estaciones uruguayas (Colonia y Carrasco). Este análisis permitirá identificar los eventos de brisa en la costa argentina (2), en la costa uruguaya (3) y en ambas costas (1).

En cuanto a la situación sinóptica del Conjunto 2, el campo medio de SLP (Figura 4.1a) realizado a partir de los datos del NCEP/NCAR Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002) muestra el centro de un anticiclón muy cerca de las 3 estaciones y un gradiente de presión muy débil. Esta situación esta generalmente asociada con vientos regionales débiles y cielos despejados, situación que según Estoque (1962) promueve el desarrollo de la brisa. Por otro lado, para los días de brisa en la costa uruguaya (Conjunto 3), el campo medio de SLP (Figura 4.1b) es muy similar al de la Figura 2.3c, es decir, un viento regional del NE, *offshore* en las dos estaciones de la

costa uruguaya. Esta condición del viento regional (siempre y cuando no sea demasiado intenso) promueve el desarrollo de la brisa (Estoque, 1962), ya que favorece el flujo de retorno en altura e intensifica el gradiente térmico entre la tierra y el agua.

Es importante tener en cuenta que en toda la región del Río de La Plata la dirección de los vientos predominantes es el NE (Berri et al., 2010). Esta dirección es la que promueve la formación de la brisa en la costa uruguaya, pero la inhibe en la costa argentina (según lo discutido por Estoque (1962)). Por lo tanto, las situaciones que podrían beneficiar la brisa del lado argentino, serían viento del SO o viento en calma. El primer caso suele darse principalmente luego del pasaje de frentes fríos, aunque tal situación no favorecería el desarrollo de la brisa ya que la incursión de aire frío reduce la temperatura máxima sobre tierra y por lo tanto también el  $\Delta T$  entre tierra y agua. Por lo tanto, la única situación sinóptica que podría favorecer el desarrollo de la brisa en la costa argentina serían condiciones anticiclónicas y viento regional en calma (como la situación de la Figura 4.1a).

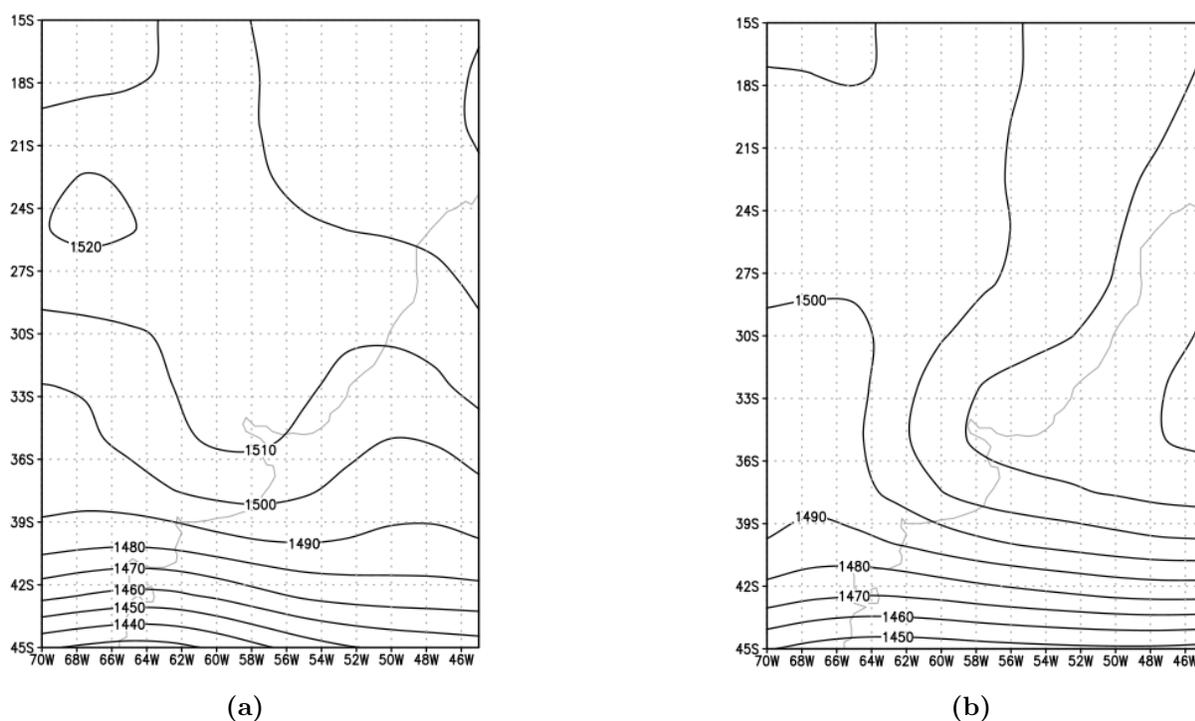


**Figura 4.1:** Composiciones de SLP para los días de brisa simultáneos en a) todas las estaciones argentinas (2) y b) todas las estaciones uruguayas (3).

En la Figura 4.2 se muestran los campos medios de altura geopotencial del nivel de 850hPa para los días de los conjuntos (2) y (3). En ambos casos, el viento en dicho nivel es *offshore*.

Particularmente para los días de brisa en la costa argentina, el viento en 850hPa es del O, mientras que para los días de brisa en la costa uruguaya, es del N-NE, lo cual estaría en concordancia con Estoque (1962), el cual afirma que la condición de viento sinóptico más favorable para el desarrollo de la brisa de mar es el viento *offshore*.

Por otro lado, al comparar las Figuras 4.1 y 4.2, se puede notar que para los días de brisa en la costa argentina, la atmósfera muestra una configuración baroclínica, mientras que para los días de brisa en Uruguay, la situación es típicamente barotrópica equivalente (los campos de presión en superficie y en 850hPa son similares).



**Figura 4.2:** Composiciones de Altura Geopotencial del nivel de 850hPa para a) los días de brisa en todas las estaciones argentinas y b) en todas las estaciones uruguayas.

#### 4.1. Conclusiones parciales

- Según Manta et al. (2020), la brisa en la costa uruguaya, cuando se desarrolla, suele hacerlo a lo largo de toda la costa. Lo cual es consistente con los resultados obtenidos en este Capítulo, ya que el número de días de brisa simultáneos en las estaciones uruguayas (58)

es mayor que en las estaciones argentinas (11).

- Por otro lado, el haber encontrado solamente un día en el cual el método de Borne et al. (1998) identificó brisa en todas las estaciones (argentinas y uruguayas), se debe posiblemente a que una dada situación regional tiene efectos opuestos en ambas costas. Por ejemplo, un viento *offshore* en la costa argentina favorecería el desarrollo de la brisa en esta costa pero la inhibiría en la costa uruguaya (y viceversa).

## Capítulo 5

# La situación sinóptica asociada a la brisa en Aeroparque

A partir del análisis de los campos medios de presión para los días de brisa en las distintas estaciones del Capítulo 3, surge la motivación de realizar un estudio más detallado de las distintas condiciones regionales que están asociadas a los eventos de brisa en la región. Es decir, en lugar de analizar un solo campo medio de presión para los eventos de brisa, se intenta encontrar los distintos patrones de presión que se asocian con el desarrollo de la brisa. Este análisis se realiza para el conjunto de días de brisa en la estación de Aeroparque.

### 5.1. Datos y metodología

Para identificar los patrones sinópticos asociados a un fenómeno meteorológico, es ampliamente utilizado el método de Análisis de Componentes Principales (ACP). Por ejemplo, en Gassmann & Gardiol (2007) se estudian las condiciones regionales propicias para la recirculación del polen mediante el uso de ACP. Este método tiene como objetivo reducir la cantidad de variables en un conjunto de datos mediante la construcción de nuevas variables que son combinación lineal de las originales. Los coeficientes de dicha combinación lineal son elegidos de modo que representen la mayor fracción de varianza posible contenida en el conjunto original de datos y que a su vez sean ortogonales entre sí. Las nuevas variables son denominadas Componentes Principales (PC, por

sus siglas en inglés) y sus valores, obtenidos como combinación lineal de las variables originales, *PC scores*.

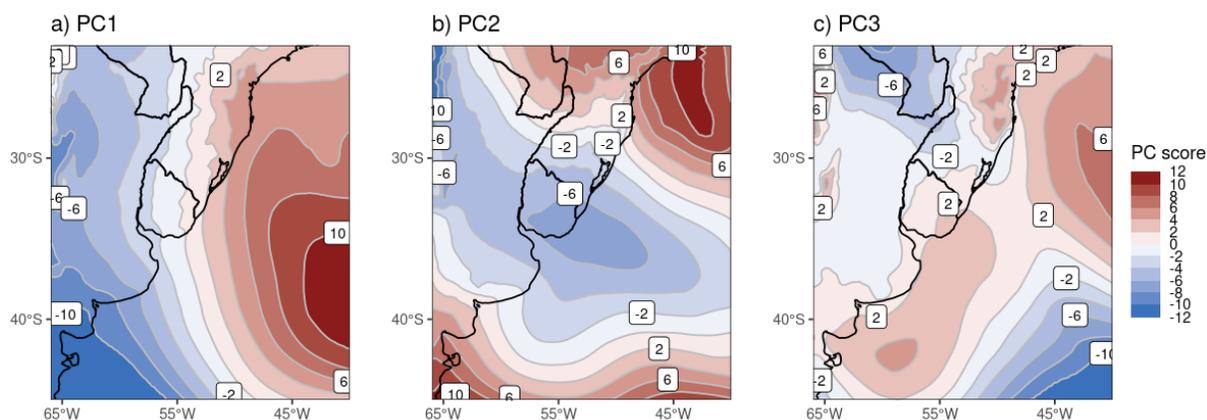
En este trabajo se realiza un análisis temporal de ACP conocido como “modo-T” (según, Preisendorfer & Mobley, 1988), en el cual los campos diarios son las columnas en la matriz de datos. La correlación entre una PC y los campos diarios se denomina *factor loading* y consiste en una serie temporal de correlaciones. Los valores de cada PC, obtenidos como combinación lineal de las variables originales son llamados *PC scores* y consisten en un campo espacial. Se realiza el análisis con los campos diarios de MSLP y T2M para los eventos de brisa identificados en Aeroparque mediante el método de Borne et al. (1998) correspondientes a los meses de mayor ocurrencia del fenómeno (noviembre a marzo). En ambos casos, la matriz de similitud está formada por la correlación entre campos diarios. Los datos de MSLP y T2M corresponden al Reanalysis ERA5-Land (Muñoz-Sabater, 2021) con resolución horizontal de 9km.

## 5.2. Resultados

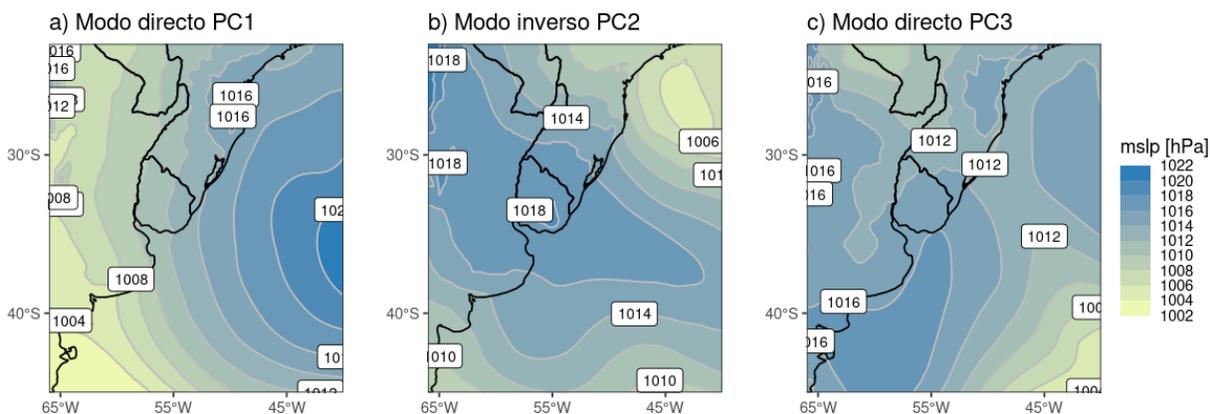
El método de ACP en modo-T fue aplicado, por un lado, sobre los campos diarios de MSLP y por otro lado sobre los campos diarios de T2M. Los días utilizados corresponden a los 92 eventos de brisa detectados durante los meses de mayor ocurrencia, noviembre a marzo (ver Figura 2.2c). Para definir la cantidad de PCs a utilizar, se define un valor crítico de varianza explicada. Las primeras PCs que expliquen dicho porcentaje de varianza son retenidas. Utilizando un valor crítico de 80%, sólo las primeras 3 PCs son retenidas en ambos análisis. Para el caso de MSLP, éstas explican el 84,68% de la varianza total de los datos, mientras que para T2M explican el 89,67%. Los campos de *PC scores* se muestran en las Figuras 5.1 (MSLP) y 5.3 (T2M). Para analizar las condiciones sinópticas asociadas a cada PC se realizó un promedio de los campos diarios con *factor loading* (correlación entre los campos diarios y los *PC scores*) mayor que 0.7 por un lado, y menor que -0.7 por otro. Estos se definen modo directo (MD) y modo inverso (MI), respectivamente. En la Tabla 5.1 se muestra la cantidad de eventos de brisa que conforman cada campo medio de días de brisa, y las Figuras 5.2 (MSLP) y 5.4 (T2M) muestran los respectivos campos medios. Con el objetivo de analizar campos reales, la discusión sinóptica se realizará sobre los campos medios de las Figuras 5.2 y 5.4.

**Tabla 5.1:** Número de casos con correlación  $> 0.7$  (MD) y  $< -0.7$  (MI) con cada componente principal. Para el análisis de presión al nivel medio del mar (MSLP) y temperatura en 2m (T2M)

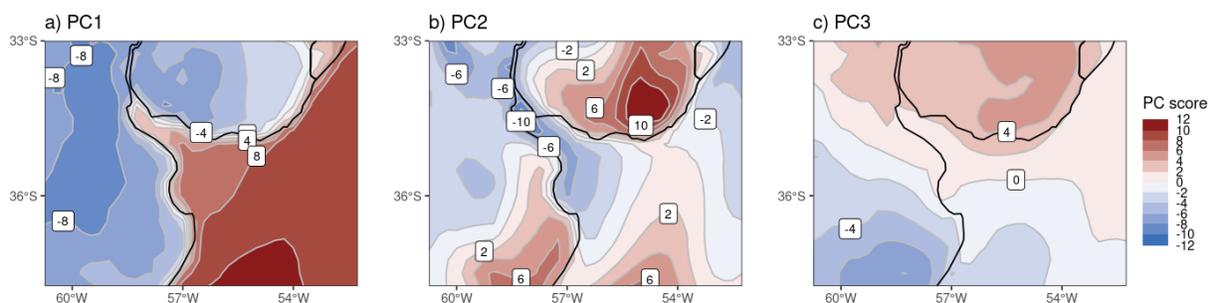
	<i>MSLP</i>		<i>T2M</i>	
	MD	MI	MD	MI
PC1	37	0	13	49
PC2	0	25	0	13
PC3	15	0	1	1



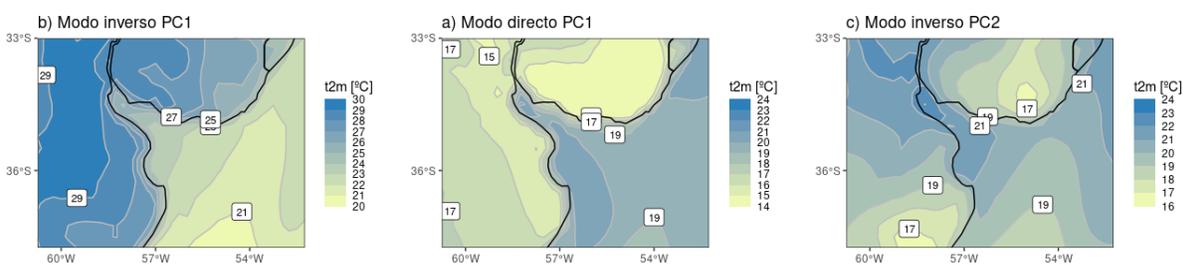
**Figura 5.1:** PC scores correspondientes al análisis de ACP utilizando los campos de MSLP para los días de brisa en la estación de Aeroparque.



**Figura 5.2:** Campos medios de MSLP para los días con factor loading  $> 0.7$  (MD) y  $< -0.7$  (MI) para PC1, PC2 y PC3.



**Figura 5.3:** PC scores correspondientes al análisis de ACP utilizando los campos de  $T2m$  para los días de brisa en la estación de Aeroparque.



**Figura 5.4:** Campos medios de  $T2M$  para los días con factor loading  $> 0.7$  (MD) y  $< -0.7$  (MI) para PC1 y PC2.

Para el caso de MSLP, las PC1 y PC3 están mayormente representadas por el MD, mientras que la PC2 por el MI (Tabla 5.1). El MD asociado a la PC1 de la Figura 5.2.a es muy similar al campo medio climatológico de MSLP en la región y al campo de la Figura 2.3c, con presencia del Anticiclón Semipermanente del Atlántico Sur. Este campo explica los vientos predominantes del sector N por la mañana en los días de brisa (Figura 3.6a). El MI de la PC2 (Figura 5.2.b) muestra la presencia de un centro de alta presión ubicado sobre la zona de estudio, y un gradiente de presión más débil que en el MD de la PC1. Este patrón de MSLP está generalmente asociado a cielos despejados y vientos regionales débiles, lo cual favorece el desarrollo de la brisa (Simpson, 1994), ya que la mayor insolación produce un aumento de la temperatura máxima sobre tierra y por lo tanto un mayor gradiente térmico tierra-agua. Finalmente, el MD de la PC3 (Figura 5.2.c) muestra lo que parece ser una alta presión post frontal ubicada sobre la zona de estudio, asociada generalmente a condiciones de estabilidad.

Para el caso de  $T2M$ , la PC1 está asociada tanto al MD como al MI, aunque con más casos del MI; la PC2 se asocia al MI y la PC3 está igualmente representada por ambos modos, aunque

con un solo caso en cada uno. Los PC score para la PC1 (Figura 5.3.a) muestran un marcado contraste de temperatura entre la tierra y el río. Es esperable que este campo sea el que explica el mayor porcentaje de varianza (60 %) ya que dicho gradiente de temperatura es el que da origen a la brisa. El MI asociado a la PC1 es el que más casos representa según la Tabla 5.1 y por lo tanto el que mayor varianza explica. Este muestra temperaturas mayores sobre tierra y menores sobre el río (Figura 5.4.a). Dicho gradiente de temperatura da origen a la rotación de los vientos en horas de la tarde (Figura 3.6a). Por otro lado, el MD asociado a la PC1 (Figura 5.4.b) es un caso anómalo ya que muestra mayor temperatura sobre el río que sobre tierra y presenta un menor número de casos. Esto es quizás consecuencia de que los campos utilizados para este análisis corresponden a la media diaria de temperatura. Dado que el criterio de Borne et al. (1998) exige que  $T_{tierra} > T_{agua}$  al menos para una observación por la tarde, el  $\Delta T$  de la Figura 5.4.b debe invertirse en algún momento de la tarde ya que, de lo contrario, los días incluidos en el MD-PC1 no serían clasificados como días de brisa. Es decir que, en promedio, la temperatura sobre el río es mayor que sobre tierra, pero en horas de la tarde el calentamiento sobre tierra es tal que logra invertir este gradiente térmico. Finalmente el MI de la PC2 presenta, en las cercanías de Aeroparque, una diferencia de temperatura tierra-agua con el mismo signo que el MD-PC1 pero con menor intensidad que en este último.

### 5.3. Conclusiones Parciales

En este Capítulo se realizaron análisis ACP en modo-T, de campos medios diarios de MSLP y T2M, para los 92 días de brisa en la estación de Aeroparque correspondientes a los meses de mayor ocurrencia, noviembre a marzo. Para MSLP, los patrones encontrados fueron un campo con la presencia del Anticiclón Semipermanente del Atlántico Sur (MD-PC1), el cual es muy similar al campo medio climatológico y explica el viento del sector N por la mañana de los días de brisa. El segundo patrón muestra una alta presión ubicada sobre la zona de estudio (MI-PC2), lo cual suele estar asociado a cielos despejados y vientos regionales débiles, favoreciendo al desarrollo de la brisa (Simpson, 1994). Finalmente, el patrón menos frecuente (MD-PC3) sugiere la presencia de una alta presión post-frontal sobre el Río de La Plata. El campo predominante (PC1) del análisis realizado con los campos diarios de T2M muestra un intenso gradiente térmico entre la tierra y el río, con mayores temperaturas sobre tierra (MD-PC1) la mayoría de los días.

## Capítulo 6

# Simulación numérica de casos de estudio

En el presente Capítulo se realizan simulaciones de 2 casos de estudio de brisa en la región utilizando el modelo WRF. Dichas simulaciones se realizan con los siguientes objetivos: obtener una visualización espacial del fenómeno de estudio, identificar diferencias en el desarrollo de la brisa en ambas costas y a lo largo de cada una de ellas y por último, identificar y caracterizar el frente de brisa y su avance. En las siguientes secciones se describe: el modelo WRF, el método utilizado para seleccionar los casos de estudio, los datos y las configuraciones elegidas para realizar las simulaciones con el modelo WRF y finalmente los resultados obtenidos.

### 6.1. El modelo WRF y la simulación de la brisa

WRF es un modelo de mesoescala, no-hidrostático y compresible. Cuenta con dos núcleos dinámicos: Advanced Research WRF (ARW) y Non-Hydrostatic Mesoscale Model (NMM), el primero de ellos es utilizado en este trabajo. El modelo utiliza niveles verticales siguiendo el terreno (Eta), una retícula de cálculo Arakawa tipo C, integración en el tiempo utilizando el método Runge-Kutta de orden 3, esquemas de advección horizontal y vertical de orden 2 a 6, anidado en 1 o 2 vías, física completa para resolver procesos de radiación, capa límite, capa de superficie, nubosidad y precipitación. El modelo WRF ha sido utilizado para estudiar la influencia

de la brisa de mar en varias regiones (por ejemplo, Papanastasiou et al. (2010) en la costa este de Grecia central; Salvador et al. (2016) en la costa norte de Francia). Empleando este modelo, Hu et al. (2010) y Arnold et al. (2012) enfatizaron la importancia de utilizar alta resolución horizontal y vertical para captar los procesos de capa límite planetaria (CLP), tal como las corrientes de densidad. El comportamiento de la brisa de mar como una corriente de densidad y su penetración tierra adentro han sido investigadas usando el modelo WRF en diversos estudios, por ejemplo Chemel & Sokhi (2012) simulan la brisa como respuesta al calentamiento urbano en Londres; Robinson et al. (2013) modelan la propagación de frentes de brisa idealizados; Peace et al. (2015) estudian el efecto de un frente de brisa sobre un incendio en Australia; y Udina et al. (2013) y Soler et al. (2014) utilizaron observaciones y simulaciones con WRF para investigar varios aspectos de las corrientes de densidad sobre el norte de España en zonas montañosas. Estos estudios muestran, tanto en las observaciones como en las simulaciones, que la llegada de la corriente de densidad está caracterizada por un abrupto cambio en la temperatura, la dirección y velocidad del viento y la humedad específica.

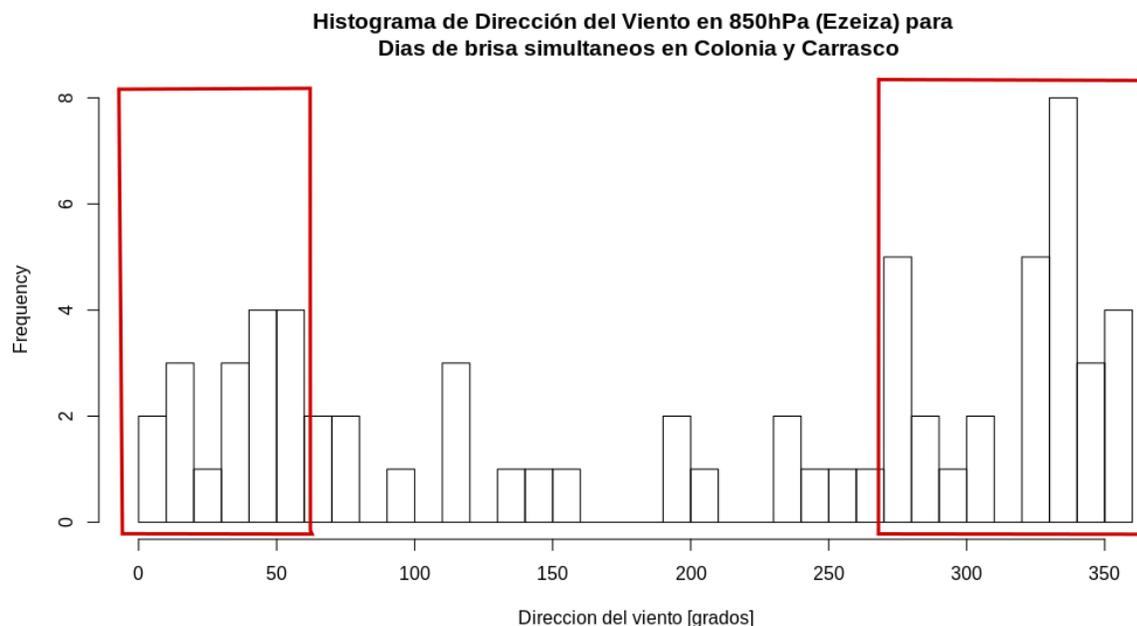
## 6.2. Datos y Metodología

A partir de la serie de días de brisa obtenidos en el Capítulo 3 se llevan a cabo los siguientes pasos para definir los eventos a simular:

1. En primer lugar se generan dos conjuntos de días: uno con los días en los cuales la brisa fue detectada en todas las estaciones uruguayas, y otro con los días de brisa en todas las estaciones argentinas.
2. Luego se realizan histogramas de la dirección del viento en el nivel de 850 hPa (utilizado como indicador de la condición regional), se definen los rangos de direcciones más frecuentes y se seleccionan sólo los eventos que presentan dicha dirección de viento en 850hPa.
3. Por último, observando las hodógrafas y campos de altura geopotencial del nivel de 850hPa para cada uno de los días, se selecciona 1 día de cada conjunto.

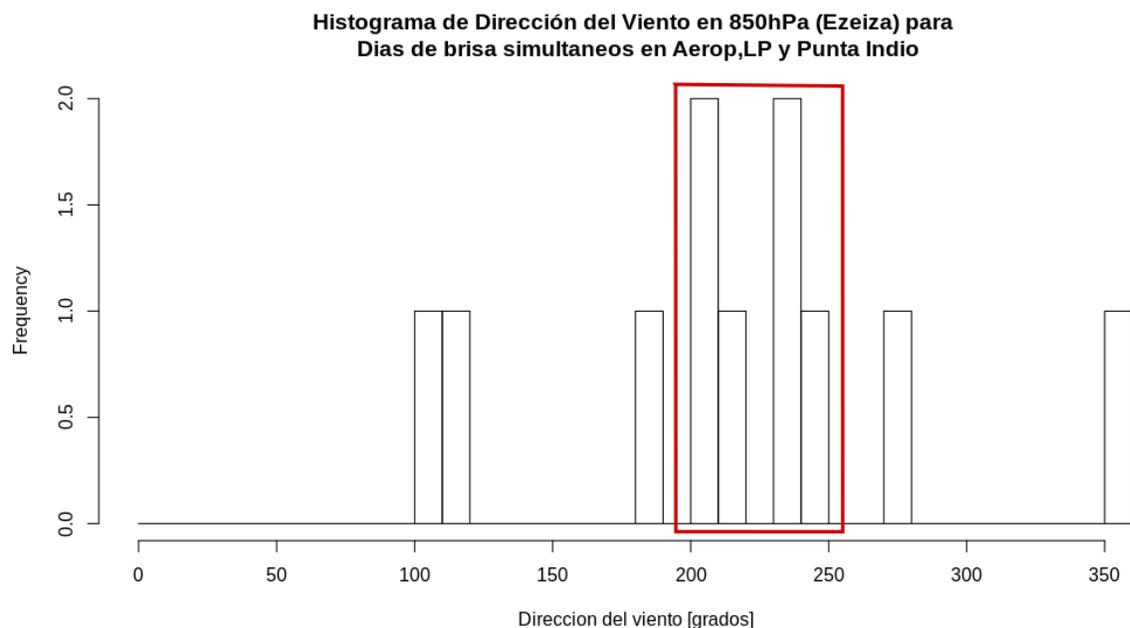
### 6.2.1. Selección de los casos

En el histograma de la Figura 6.1 se observa que la condición sinóptica predominante para los días de brisa en la costa uruguaya consiste en viento en 850hPa entre  $280^\circ$  y  $60^\circ$  (viento *offshore* en dicha costa).



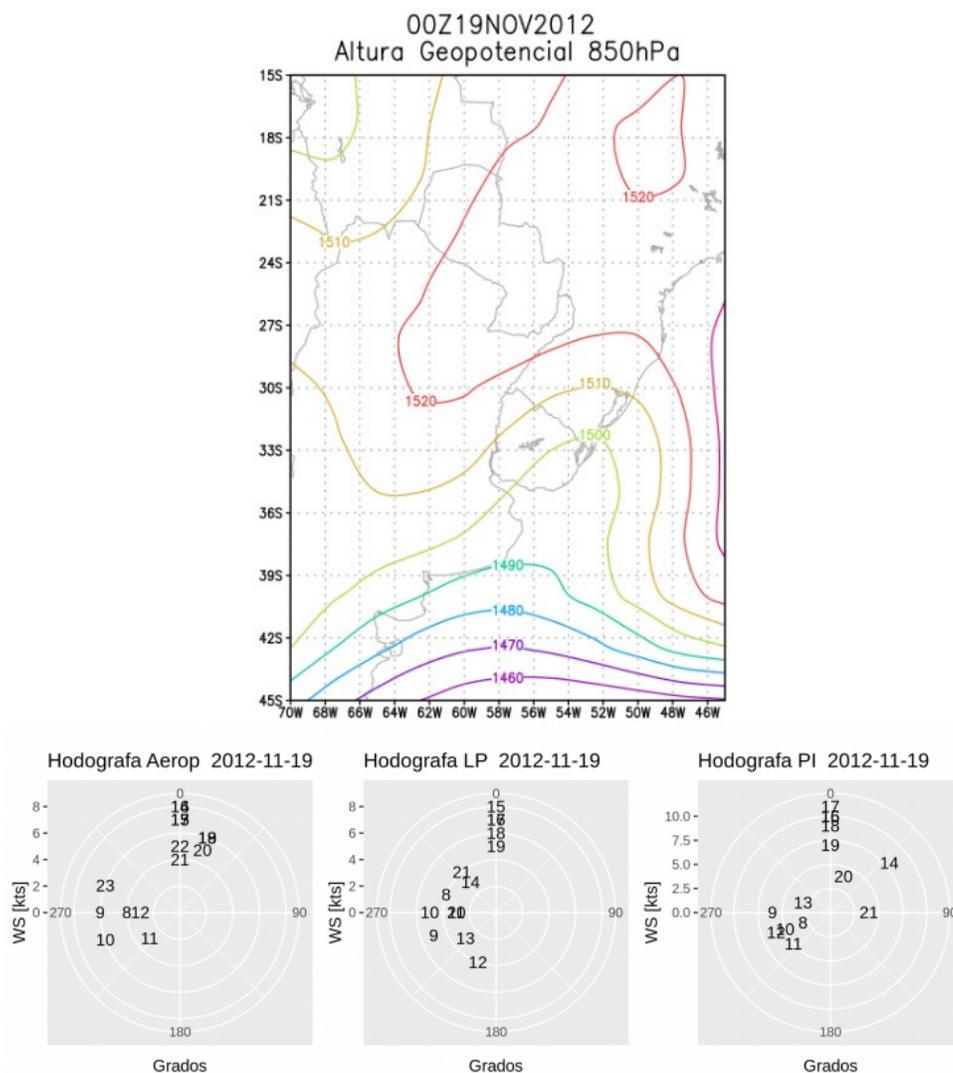
**Figura 6.1:** Histograma de dirección del viento en 850hPa (Ezeiza) para días de brisa simultáneos en Colonia y Carrasco. Los rectángulos rojos muestran las direcciones más frecuentes.

De la Figura 6.2 se deduce que para los días de brisa en la costa argentina, la dirección del viento predominante en el nivel de 850hPa se encuentra entre  $190^\circ$  y  $250^\circ$  (viento *offshore* en dicha costa). De esta forma, ambos conjuntos de días fueron reducidos, conservando solamente los que presentan viento en 850hPa procedente de los sectores marcados en rojo en las Figuras 6.1 y 6.2.



**Figura 6.2:** *Histograma de dirección del viento en 850hPa (Ezeiza) para días de brisa simultáneos en Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio. Los rectángulos rojos muestran las direcciones más frecuentes.*

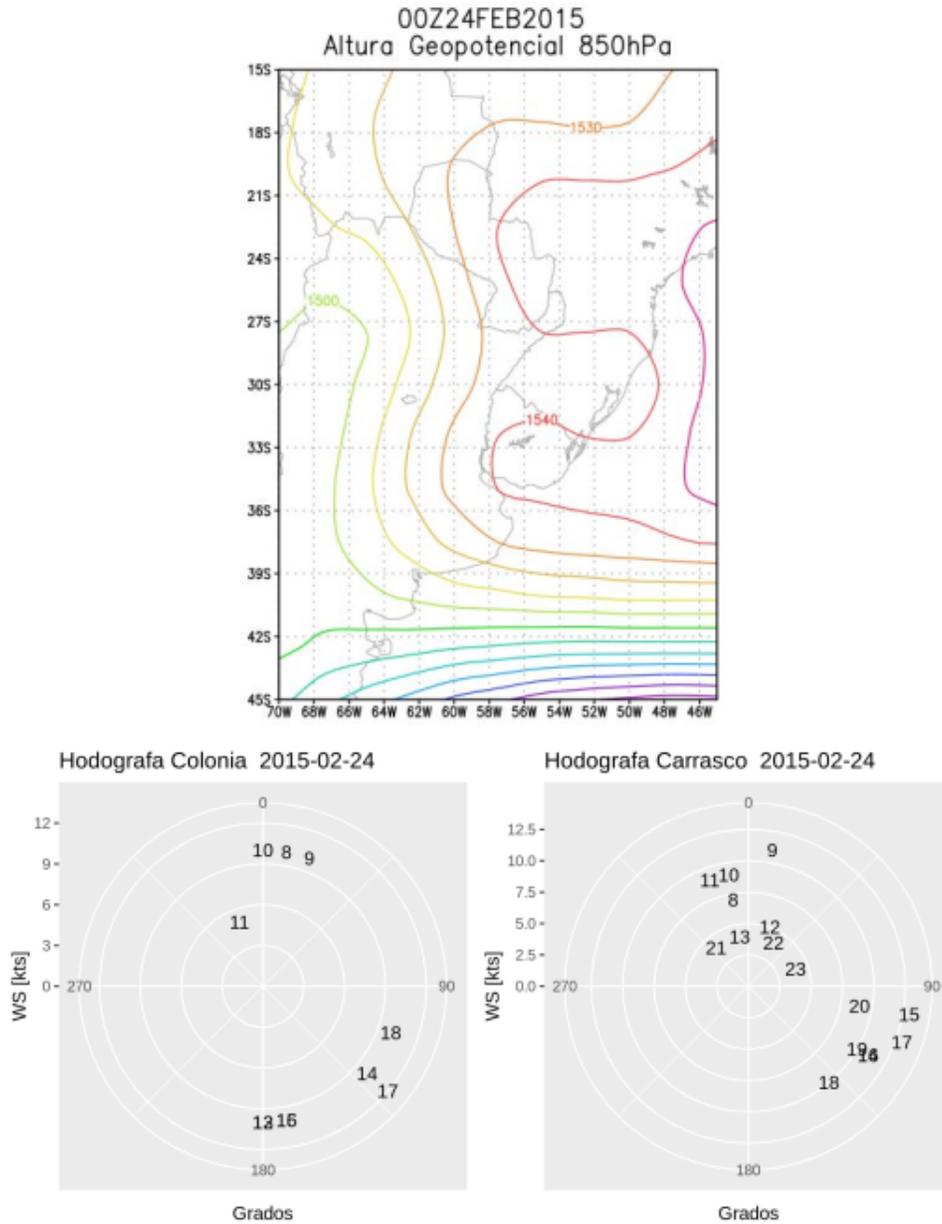
Para los días obtenidos, se realizaron hodógrafas del viento en las estaciones meteorológicas correspondientes y campos de altura geopotencial del nivel de 850hPa para luego seleccionar manualmente un día de cada conjunto. Para dicha selección se utilizaron los siguientes criterios: que en las hodógrafas se observe una rotación de los vientos al sector del río en las horas de máximo calentamiento y que las situaciones sinópticas de ambos casos sean diferentes. Finalmente, los casos elegidos fueron el 19/11/2012 como día de brisa en la costa argentina y el 24/02/2015 como día de brisa en la costa uruguaya. Para el caso de brisa en la costa argentina (Figura 6.3) el campo de altura geopotencial en el nivel de 850hPa muestra el pasaje de una vaguada por la zona de estudio, con un viento regional del SO (*offshore* en la costa argentina). Las hodógrafas del viento en las 3 estaciones argentinas muestran un viento del O/OSO por la mañana, asociado posiblemente a la situación sinóptica, y luego, a partir del mediodía una rotación del viento al sector N y finalmente al NE en Aeroparque y al E en Punta Indio. Esta rotación de los vientos es la registrada por el método de identificación de brisa y la razón por la cual se simula este evento.



**Figura 6.3:** Arriba, campo de altura geopotencial del nivel de 850hPa para el evento de brisa en la costa argentina seleccionado. Abajo, hodógrafas de viento en las estaciones argentinas para el día de brisa en la costa argentina seleccionado. En estas últimas, los números indican la hora local, su posición en el diagrama polar indica la dirección del viento y la distancia al centro indica la velocidad del viento.

Por otro lado, para el caso de brisa en la costa uruguaya (Figura 6.4), el campo de altura geopotencial muestra un viento regional del sector N, el cual explica el viento de la misma dirección que se observa por la mañana en las hodógrafas de las dos estaciones uruguayas. Sin embargo, a partir de las 12 HL en Colonia y las 14 HL en Carrasco, el viento en ambas estaciones rota al sector del río (más específicamente al S y luego al SE en Colonia y directamente al SE en

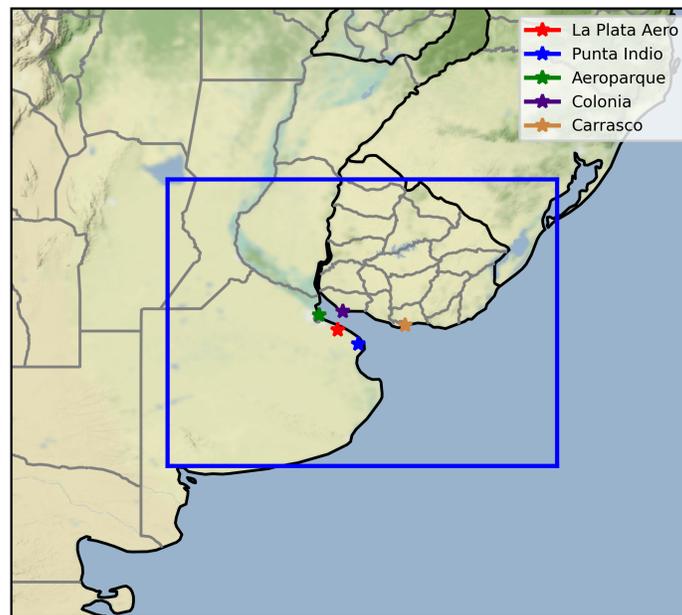
Carrasco). Nuevamente, dicha rotación del viento es una de las razones por las cuales este día fué detectado por el método de identificación de brisa.



**Figura 6.4:** Arriba: campo de altura geopotencial del nivel de 850hPa para el evento de brisa en la costa uruguaya seleccionado. Abajo: hodógrafas de viento en las estaciones uruguayas para el día de brisa en la costa uruguaya seleccionado. En estas últimas, los números indican la hora local, su posición en el diagrama polar indica la dirección del viento y la distancia al centro indica la velocidad del viento.

### 6.2.2. Simulación con WRF

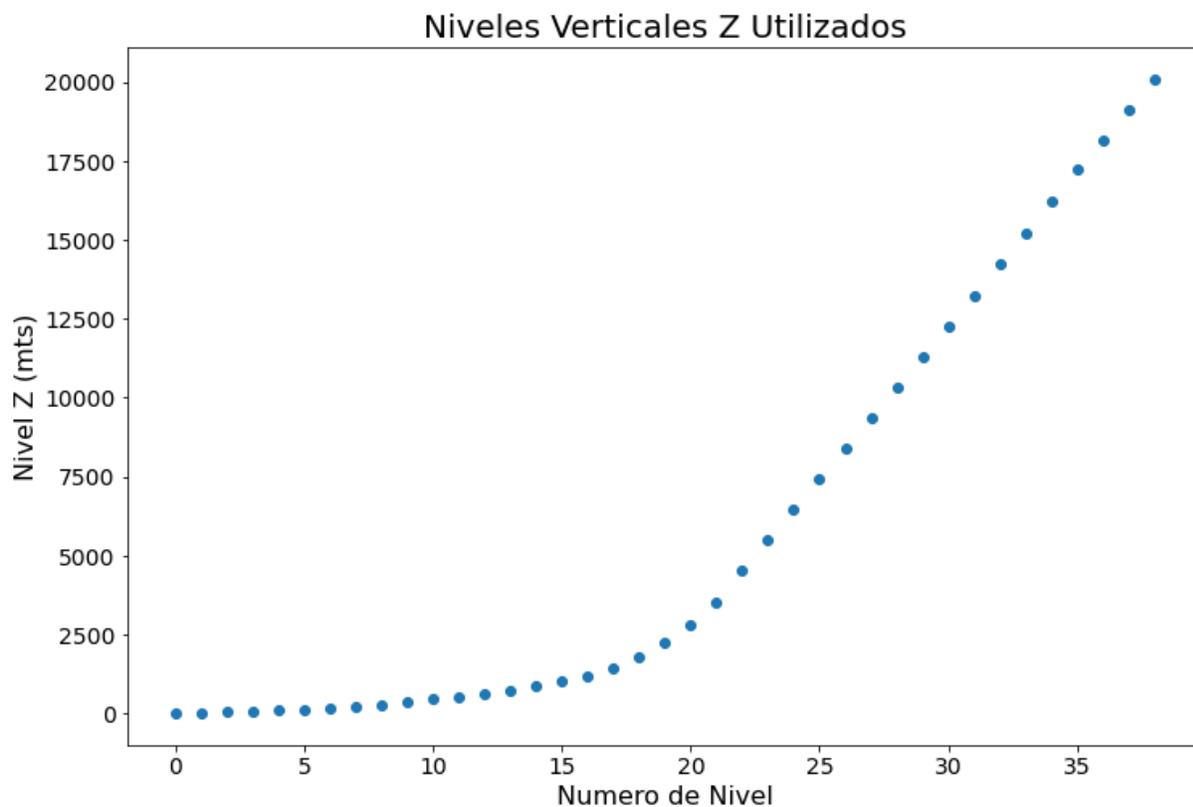
Si bien los eventos de brisa a simular son 19 de Noviembre de 2012 y 24 de Febrero de 2015, en ambos casos, la simulación comenzó 24 horas antes para garantizar un apropiado *spin-up* del modelo, y finalizó 24 horas después. Se utilizaron las salidas de análisis del modelo GFS con resolución espacial de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  y a intervalos de 6hs como condiciones iniciales y de borde. El dominio elegido para ambas simulaciones (Figura 6.5) está centrado en el Río de La Plata, consta de 200 puntos de grilla en la dirección E-O y 180 en la dirección N-S. La resolución horizontal utilizada es de 5km. Se emplea un paso de tiempo de tipo adaptativo, el cual varía entre 15 y 40 segundos. Se obtienen salidas del modelo cada 30 minutos. Se utilizó la coordenada vertical Eta siguiendo el terreno, con 40 niveles verticales hasta los 50hPa.



**Figura 6.5:** Dominio (recuadro azul) del modelo WRF y estaciones meteorológicas utilizadas.

Para definir los niveles verticales a utilizar y configurar las distintas parametrizaciones, se realizó una búsqueda bibliográfica de trabajos previos que hayan modelado la brisa de mar con

WRF. De esta forma se seleccionaron los trabajos de Kunin et al. (2019), Papanastasiou et al. (2010) y Arrillaga et al. (2016). En Kunin et al. (2019) se realiza un análisis de sensibilidad respecto a los niveles verticales del modelo, concluyendo que la mejor configuración es utilizar 40 niveles verticales hasta los 50hPa con los primeros 20 niveles por debajo de 1.5km. Es así que se decidió definir los niveles verticales Eta a mano respetando estas características. En la Figura 6.6 se presentan los niveles Z elegidos (en mts). Se puede apreciar la mayor resolución vertical en los primeros 1500 m de altura con el fin de obtener una mejor representación de la capa límite y los fenómenos que allí se producen, como es el caso de la brisa de mar.



**Figura 6.6:** Niveles Z utilizados en las simulaciones.

En cuanto a la denominada “física del modelo”, en este trabajo se emplean las parametrizaciones utilizadas en Arrillaga et al. (2016) por tratarse de un caso muy similar al del presente trabajo. Los esquemas empleados para parametrizar los distintos procesos se muestran en la Tabla 6.1.

Proceso	Esquema utilizado	Referencia
Procesos de superficie	Eta Similarity Scheme (Monin-Obukhov)	Monin y Obukov (1954)
Procesos de Microfísica	Ferrier (New Eta) Scheme	Rogers et al. (2001)
Radiación de Onda Larga	RRTM	Mlawer et al. (1997)
Radiación de Onda Corta	Dudhia	Dudhia (1989)
Modelo de Suelo	5-Layer Thermal Diffusion Scheme	Dudhia (1996)
Procesos de Capa Límite	Mellor-Yamada-Janjic TKE Scheme (MYJ)	Janjic (1994)
Parametrización de Cúmulus	Kain Fritch Scheme	Kain (2004)

**Tabla 6.1:** Esquemas utilizados para las parametrizaciones de WRF.

### 6.2.3. Posproceso de las salidas

Para el manejo de los archivos de salida de las simulaciones y la confección de los distintos campos mostrados en la siguiente sección se utilizó el software de código libre *python* y algunas librerías como por ejemplo: *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *netCDF4* y *wrf-python*.

## 6.3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones realizadas a partir de gráficos que describen diferentes aspectos de la brisa en la región.

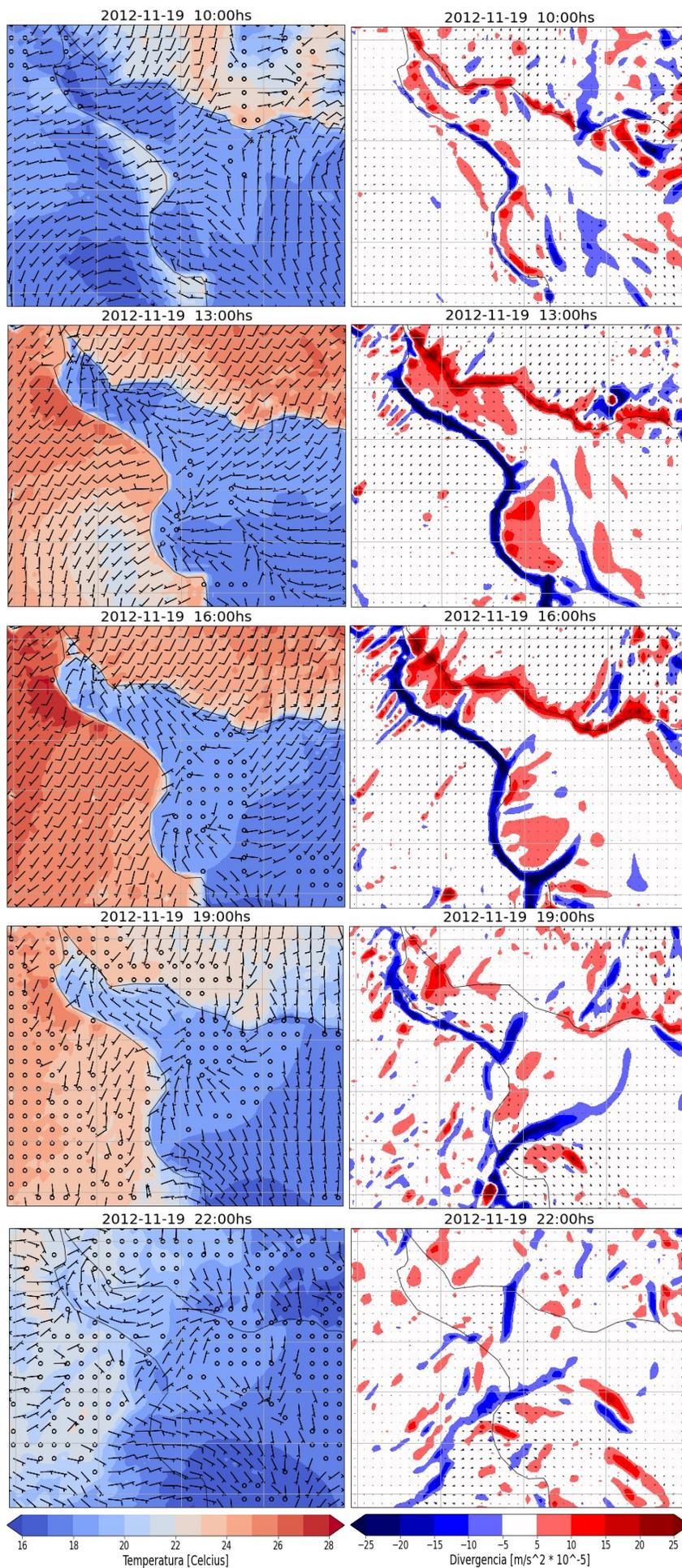
### 6.3.1. Caso de brisa en la costa argentina

En la Figura 6.8 se muestran secuencias cada 3 horas, entre las 10HL y las 22HL, de diferentes campos horizontales para el caso de brisa en la costa argentina: temperatura en 2m y viento en 10m (izquierda); y divergencia horizontal en 10m y viento en 10m (derecha). Dado que el forzante inicial de la brisa de mar es el  $\Delta T$  entre la tierra y el agua, en primer lugar se describe la Figura 6.8 izquierda. En ella se observa el contraste térmico mencionado y el aumento de la temperatura sobre tierra a lo largo del día, siendo máxima a las 16HL en la Ciudad de Buenos Aires y sus alrededores. La zona de intenso gradiente de temperatura ubicada inicialmente a lo largo de la

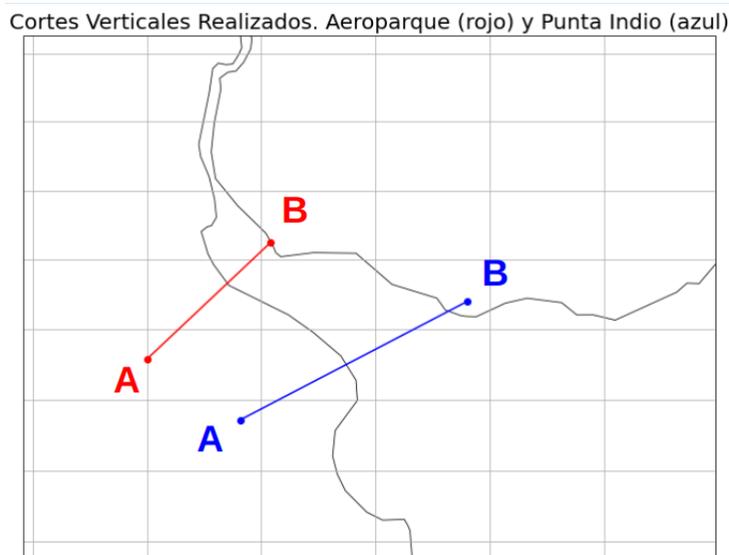
costa argentina, se desplaza tierra adentro a partir de las 16HL debido a la advección de aire más frío proveniente del río. Esta advección es producto de la rotación de los vientos al sector del río por la tarde debido al desarrollo de la brisa. El avance es máximo en los alrededores de Punta Indio y Punta Rasa, regiones donde el viento regional del SO es casi paralelo a la costa. A partir del campo de temperatura, es posible identificar el frente de brisa (SBF, por sus siglas en inglés) y su avance, el cual se ubica en la zona de intenso gradiente de temperatura separando el aire cálido ubicado sobre tierra y el aire más frío y húmedo ubicado inicialmente sobre el río.

Otro aspecto a remarcar es el viento regional del SO que abarca casi todo el dominio a las 10HL. Luego, debido al calentamiento diurno sobre tierra, el viento sobre el río comienza a rotar pero el viento sobre tierra sigue siendo del sector SO. Esto indica que la rotación del viento sobre el río se debe a un efecto local y no a un cambio en el viento regional.

El frente de brisa puede identificarse también a partir de los campos de divergencia horizontal del viento, representado como una zona de convergencia entre el viento regional y la componente de brisa en superficie proveniente del río. En la Figura 6.8 (derecha) se muestran los campos mencionados en los cuales se observa una franja de convergencia (azul) a lo largo de toda la costa argentina, indicando el desarrollo de la brisa de ese lado del río. Por otra parte, la zona de divergencia (rojo) ubicada en la naciente del río y en la costa uruguaya, podría deberse a la rama descendente de la circulación de brisa, que por continuidad genera divergencia en la horizontal. A su vez, estos descensos (que se observan en los cortes verticales de la Figura 6.9) podrían estar inhibiendo el desarrollo de la brisa en la costa uruguaya. Resulta interesante notar que a lo largo del día, la zona de convergencia avanza tierra adentro mostrando el avance del SBF principalmente en Punta Indio y Punta Rasa, como así también en los alrededores de la Ciudad de Buenos Aires, aunque en menor medida que en las regiones mencionadas.



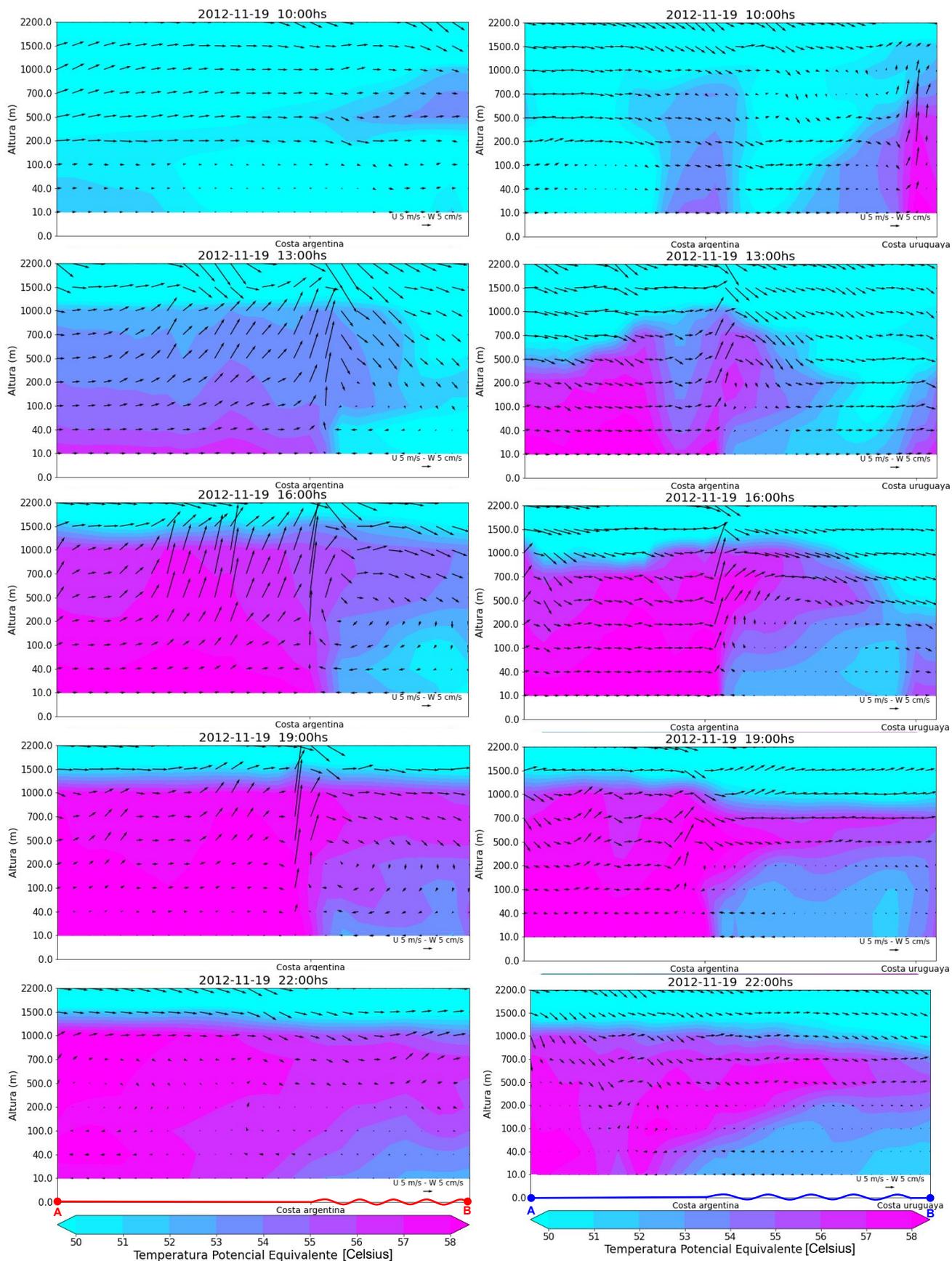
**Figura 6.8:** Campos de temperatura en 2m y viento en 10m (izquierda); divergencia horizontal en 10m y viento en 10m (derecha). Todas corresponden al caso de brisa en la costa argentina (19/11/2012).



**Figura 6.7:** Segmentos sobre los cuales se realizan los cortes verticales de la Figura 6.9. Ambos segmentos son localmente perpendiculares a la costa y pasan por la estación de Aeroparque (rojo) y Punta Indio (azul).

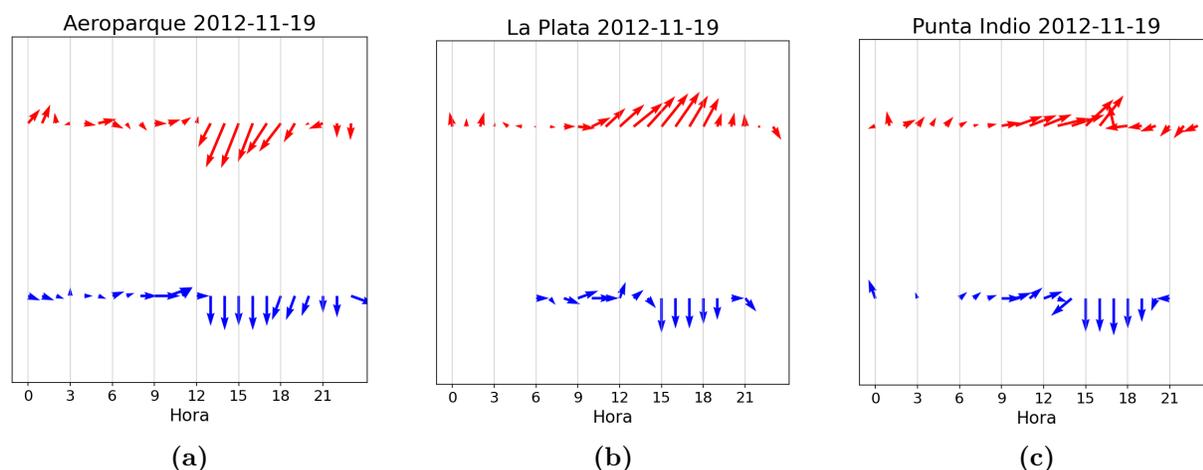
En el corte vertical que pasa por la estación de Aeroparque (Figura 6.9 izquierda) se puede observar claramente el SBF evidenciado por la zona de máximo gradiente horizontal de  $\theta_e$  y su desplazamiento tierra adentro (principalmente hacia el fin de tarde). Sobre el río se observa una capa estable y sobre tierra una capa inestable. También está presente la circulación completa de brisa compuesta por: ascensos en la costa, un flujo de retorno en altura, descensos sobre el río y un viento que se dirige desde el río hacia la costa argentina en niveles bajos. Otra característica que se observa es la SBH (*Sea breeze head*), que se trata de un “lóbulo” de  $\theta_e$  elevada que se extiende en altura hacia el río.

Por otro lado, en el corte vertical que pasa por Punta Indio (Figura 6.9 derecha) se observa con más claridad el SBF y su avance tierra adentro es mayor que en Aeroparque. A su vez, la presencia del SBF puede observarse más temprano que en el corte vertical correspondiente a Aeroparque. La SBH también está presente aquí, y otro aspecto a remarcar es lo que parecieran ser ondas de gravedad ubicadas sobre tierra a unos 700m de altura, evidenciadas por zonas alternadas de ascensos y descensos. A las 19HL, esas alternancias de ascensos y descensos se observan con mayor claridad, y podría tratarse de ondas de gravedad prefrontales (Miller et al., 2003; Sha et al., 1993).



**Figura 6.9:** Cortes verticales a lo largo del segmento rojo que pasa por Aeroparque (izquierda) y azul que pasa por Punta Indio (derecha) mostrados en la Figura 6.7. Los vectores indican el viento en sus componentes vertical y horizontal paralela a la dirección del corte. En sombreado se muestra la temperatura potencial equivalente.

En la Figura 6.10 se presenta una serie temporal de viento en 10m simulados por el modelo WRF (rojo) y observados (azul) en las 3 estaciones meteorológicas argentinas. En los 3 casos las observaciones muestran una rotación del viento del sector O al sector N alrededor de las 13HL. El modelo simula de manera aceptable la rotación del viento en Aeroparque y Punta Indio, aunque en esta última la rotación simulada es al ENE y no al N como muestran las observaciones. En La Plata Aero el modelo no muestra la rotación asociada a la brisa que sí está presente en las observaciones. Sin embargo, en el punto de grilla contiguo ubicado sobre el río, el viento simulado sí es del N (ver Figura 6.8 izquierda, 13HL), y por lo tanto el modelo subestima el avance del SBF en esa zona.



**Figura 6.10:** Series temporales de viento modelado (rojo) y observado (azul) en la estación de (a) Aeroparque, (b) La Plata Aero y (c) Punta Indio.

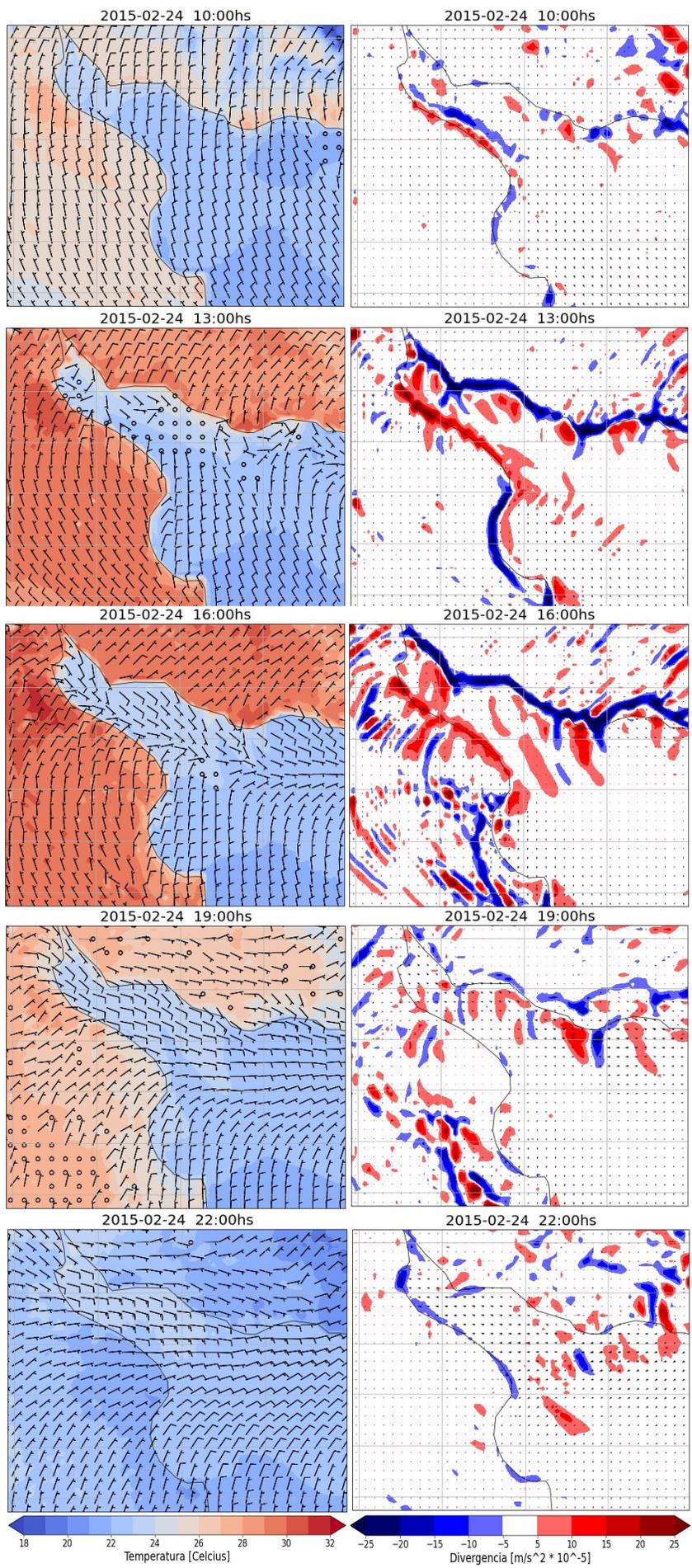
### 6.3.2. Caso de brisa en la costa uruguaya

En la Figura 6.12 se muestran secuencias cada 3 horas, entre las 10 y las 22HL, de diferentes campos horizontales para el caso de brisa en la costa uruguaya: temperatura en 2m y viento en 10m (izquierda); y divergencia horizontal en 10m y viento en 10m (derecha). El máximo de temperatura sobre tierra en Uruguay tiene lugar a las 13HL, momento en el cual ya se observa sobre el río la rotación del viento. En Colonia y Montevideo, donde la costa tiene forma de punta o cabo, se ve claramente como la componente de brisa (que es perpendicular a la costa) se dirige radialmente hacia la punta, aumentando la convergencia en esas zonas. A las 16HL la brisa ya está establecida del SE en toda la costa uruguaya. Al este de Colonia y de Montevideo el máximo

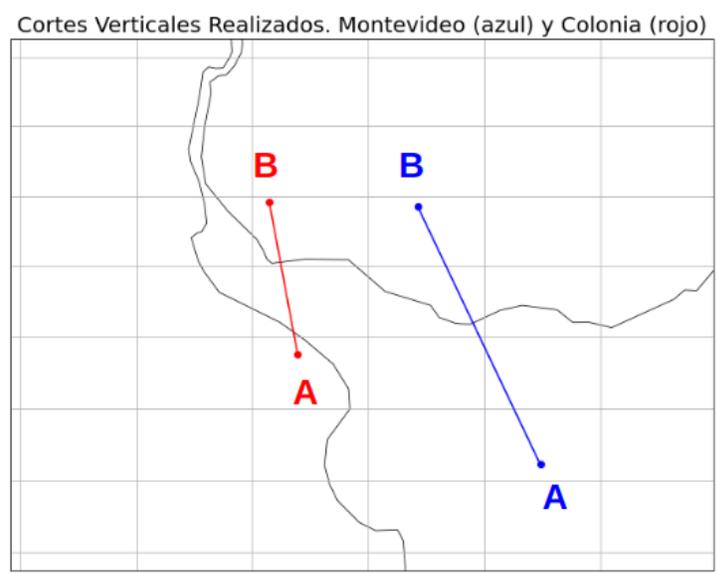
de temperatura sobre tierra es desplazado hacia el interior del continente debido a la advección de aire más frío y húmedo proveniente del río. Esto evidencia el avance del SBF, que es máximo en esas zonas, ya que al igual que en el caso de brisa en la costa argentina, el viento regional es casi paralelo a la costa y por lo tanto ejerce menor resistencia al avance del SBF. A partir de las 19HL, es interesante notar como el viento del SE en superficie originado por la brisa se extiende prácticamente sobre todo el río, incluso alcanzando la costa argentina.

En la Figura 6.12 (derecha) se observa convergencia sobre la costa uruguaya a partir de las 13HL, con vientos del SE sobre el río y el viento que todavía es del sector N sobre tierra. Dicha convergencia es máxima en las zonas de cabos o puntas (tal como se describe en COMET-Program (2016)), como es el caso de Colonia y Montevideo. A su vez se observa una zona de divergencia que se ubica sobre parte del río y la costa argentina, inhibiendo allí el desarrollo de la brisa por subsidencia.

En los cortes verticales que pasan por la estación de Colonia (Figura 6.13 izquierda) se observa una capa inestable sobre tierra pero también sobre el río (a diferencia del caso argentino, Figura 6.9). Es por ello que ambas masas de aire no se diferencian bien. Igualmente, se observa en superficie una zona de intenso gradiente de temperatura potencial equivalente ubicada en la costa uruguaya a las 16HL que se desplaza tierra adentro. En este caso la magnitud de los ascensos y descensos debido a las ondas de gravedad es mucho mayor que en el caso argentino.



**Figura 6.12:** Campos de temperatura en 2m y viento en 10m (izquierda); divergencia horizontal en 10m y viento en 10m (derecha). Todas corresponden al caso de brisa en la costa uruguaya (24/02/2015).

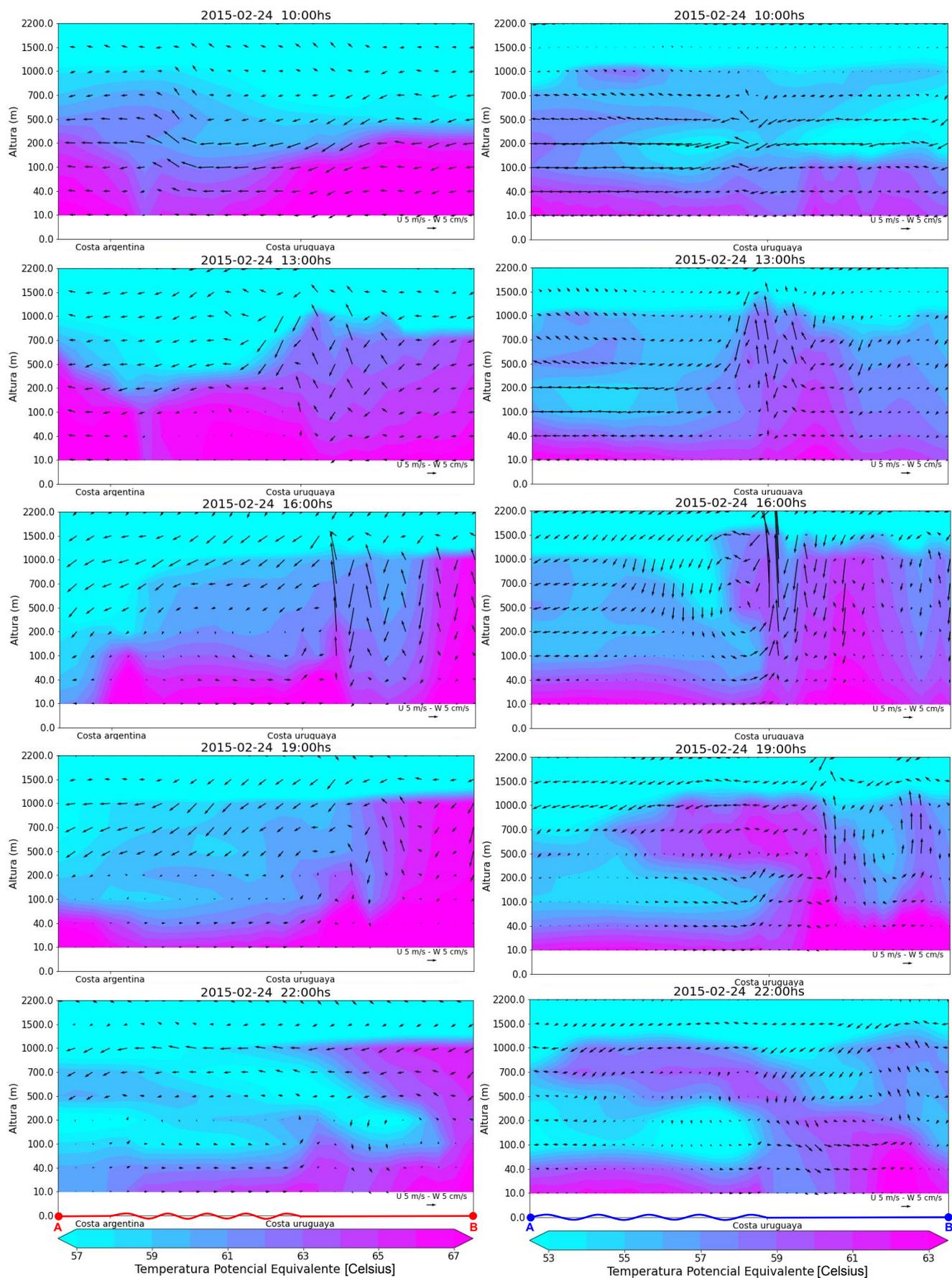


**Figura 6.11:** Segmentos sobre los cuales se realizan los cortes verticales de la Figura 6.13. Ambos segmentos son localmente perpendiculares a la costa y pasan por la estación de Colonia (rojo) y Carrasco (azul).

Respecto al viento, a las 10HL se observa un viento *offshore* (del sector N) en todos los niveles. A las 13HL comienza la convergencia en superficie sobre la costa uruguaya y los ascensos por encima. A las 16HL se intensifican los ascensos y la componente de brisa en superficie. El SBF comienza su avance tierra adentro y ya se pueden apreciar todas las ramas de la circulación de brisa: ascensos sobre la costa, el flujo de retorno en niveles altos, los descensos sobre el río y la costa argentina (inhibiendo allí el desarrollo de la brisa), y la componente de brisa en superficie que se dirige desde el río hacia la costa uruguaya.

En los cortes verticales que pasan por la estación de Carrasco (Figura 6.13 derecha) se puede observar que a las 13HL comienza la convergencia sobre la costa uruguaya y los ascensos por encima. Inicialmente, la componente de brisa en superficie abarca una distancia horizontal pequeña. A las 16HL, esta componente se extiende hacia el río y tierra adentro, también se puede observar la circulación de brisa con todas sus ramas.

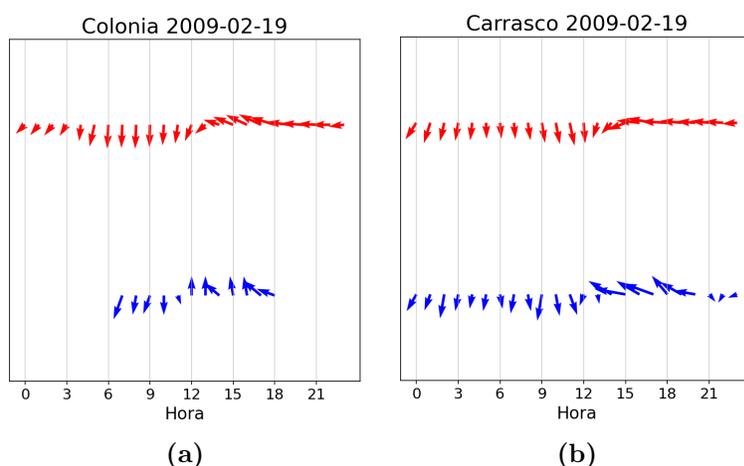
En este corte vertical, el SBF está más definido que en Colonia, asociado a un intenso gradiente de  $\theta_e$  en niveles bajos (16HL) y se evidencian zonas alternadas de ascensos y descensos entre 200 y 1000m de altura corriente arriba de la región de ascensos asociados al SBF. Estos movimientos verticales podrían deberse, como se verá en el Capítulo 7, a los movimientos compensatorios a



**Figura 6.13:** Cortes verticales a lo largo del segmento rojo que pasa por Colonia (izquierda) y azul que pasa por Carrasco (derecha) mostrados en la Figura 6.11. Los vectores indican el viento en sus componentes vertical y horizontal paralela a la dirección del corte. En sombreado se muestra la temperatura potencial equivalente.

los lados de la nubosidad observada por satélite o también a la presencia de ondas de gravedad prefrontales (Miller et al., 2003).

La Figura 6.14 presenta la validación de vientos para la simulación correspondiente al caso de brisa en la costa uruguaya. En ella se muestran en rojo los vientos simulados por el modelo WRF y en azul los observados en las estaciones de Colonia (Figura 6.14a) y Carrasco (Figura 6.14b). En ambas estaciones, el viento por la mañana es del sector N, es decir, *offshore*. En Colonia el modelo simula una rotación del N al ESE a partir de las 14HL, mientras que las observaciones muestran viento del S desde las 12HL. Sin embargo en los campos de la Figura 6.8 (izquierda) se observa viento del S en los puntos de grilla ubicados sobre el río frente a Colonia desde las 13HL. Por lo tanto, al igual que en la validación de la Figura 6.10b, el modelo pareciera subestimar el avance del SBF en las cercanías de Colonia. En Carrasco la validación presenta mejores resultados ya que al igual que en las observaciones, el modelo simula la rotación del sector N al sector E, aunque el viento observado rota incluso al ESE.



**Figura 6.14:** Series temporales de viento modelado (rojo) y observado (azul) en la estación de (a) Colonia y (b) Carrasco.

## 6.4. Conclusiones Parciales

- El modelo logra representar el gradiente térmico entre tierra y agua, la rotación de los vientos y la circulación en el plano vertical asociadas a la brisa.
- En las zonas donde la costa tiene una punta o cabo, el modelo muestra una intensificación

de la convergencia y un máximo avance del SBF en dichas regiones. Tal es el caso de Punta Indio y Punta Rasa en Argentina y Colonia y Carrasco en Uruguay. Esto podría deberse a que en las regiones mencionadas, el viento regional sobre tierra es casi perpendicular a la componente de brisa, por lo tanto el primero no ejerce una resistencia al avance del SBF, como sí lo hace en las zonas donde ambos vientos tienen la misma dirección pero sentidos opuestos.

- Las validaciones del viento modelado resultan aceptables, dado que en La Plata y Colonia, donde se presentan algunas diferencias entre las observaciones y la simulación, el viento modelado en el punto de grilla contiguo al de la estación, en dirección hacia el río, se corresponde con las observaciones.
- En ambos casos, al desarrollarse la brisa en una costa bajo condición de viento offshore, la rama descendente de la circulación de brisa se ubica por encima de la costa opuesta, inhibiendo el desarrollo de la brisa en esta última.
- El máximo avance del frente de brisa se da en Punta Indio (caso argentino) y en Carrasco (caso uruguayo). Es interesante notar que estas estaciones son las más cercanas a la boca del río, donde las temperaturas del agua suelen ser menores que en la naciente y por lo tanto mayor el  $\Delta T$  tierra-agua.
- En las figuras se logran identificar las siguientes características de la brisa de mar: la circulación completa en el plano vertical, el SBF y la SBH.
- En el caso de brisa en la costa uruguaya, alrededor de las 19HL, el viento del SE en superficie producido por la brisa se va extendiendo desde la costa uruguaya hasta ocupar prácticamente todo el río, incluso la costa argentina. Esta situación es muy típica en los meses de verano y también muy conocida y esperada por los navegantes del Río de La Plata. Este viento recurrente en las tardes de verano suele denominarse, en el ambiente náutico, como “virazón”, “térmico” o simplemente “sudeste”. Su aparición es muy deseada por los que practican deportes náuticos como el windsurf o kitesurf ya que suele alcanzar los 18-20 kts de intensidad por la tarde, condiciones perfectas para dichos deportes.

## Capítulo 7

# Validación de la nubosidad simulada con imágenes satelitales

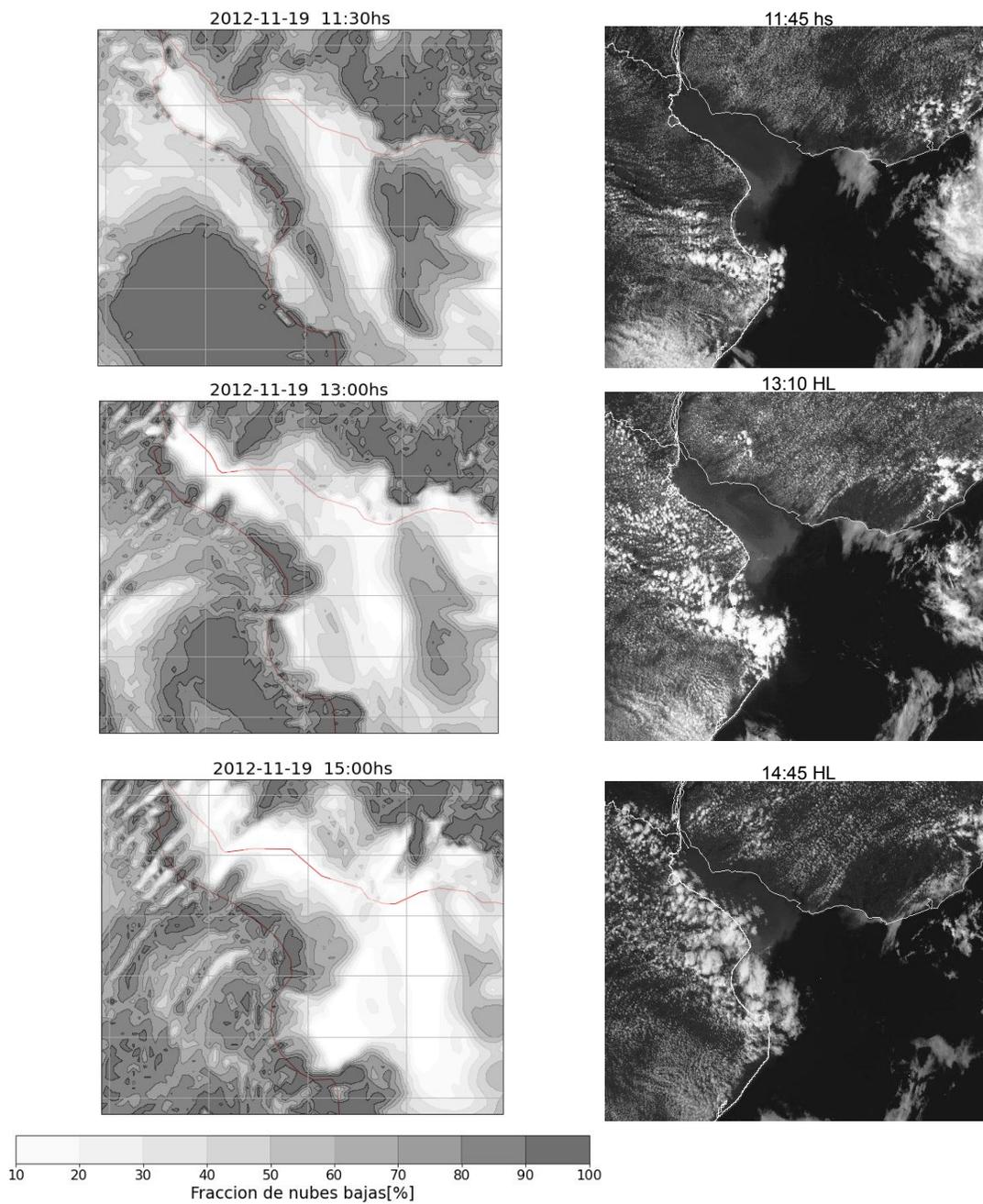
Se realiza en esta sección una validación de la nubosidad simulada por el modelo. Para ello, se comparan las simulaciones con imágenes del satélite GOES-12 en el canal visible para los horarios más cercanos a las salidas del modelo. Dado que la altura del sistema de brisa oscila entre los 500 y 1000m aproximadamente, y considerando que aquí se desea estudiar la nubosidad producida por el SBF, la variable de salida del modelo que se utiliza para dicha validación es la fracción de nubes bajas, que es el porcentaje de cielo cubierto por nubes cuya base se encuentra entre 300 y 2000m.

### 7.1. Caso de brisa en la costa argentina

En la Figura 7.1 se presentan los campos de fracción de nubes bajas (izquierda) simulados por el modelo para el caso de brisa en la costa argentina y las imágenes del canal visible del satélite GOES-12 (derecha). Los horarios fueron elegidos de modo que ambas figuras estén lo mas cercanas posible temporalmente, teniendo en cuenta que el modelo guarda salidas cada 30 minutos. Las imágenes de satélite muestran nubosidad de tipo cumuliforme con poco desarrollo vertical sobre tierra por la mañana. Pasado el mediodía se observan topes que alcanzan mayor altura y que por lo tanto son advectados hacia el río por el viento regional del SO, este último

puede observarse tanto en el campo de altura geopotencial de la Figura 6.3 como en los cortes verticales de la Figura 6.9. Dicha nubosidad no permite observar con claridad si hay presencia de una línea de nubes asociada al SBF, a excepción de la región al sur de Punta Rasa donde la franja de nubes avanza hacia el NO tierra adentro por la tarde (15:45 HL). Al comparar las observaciones mencionadas con la salida del modelo, se puede afirmar que:

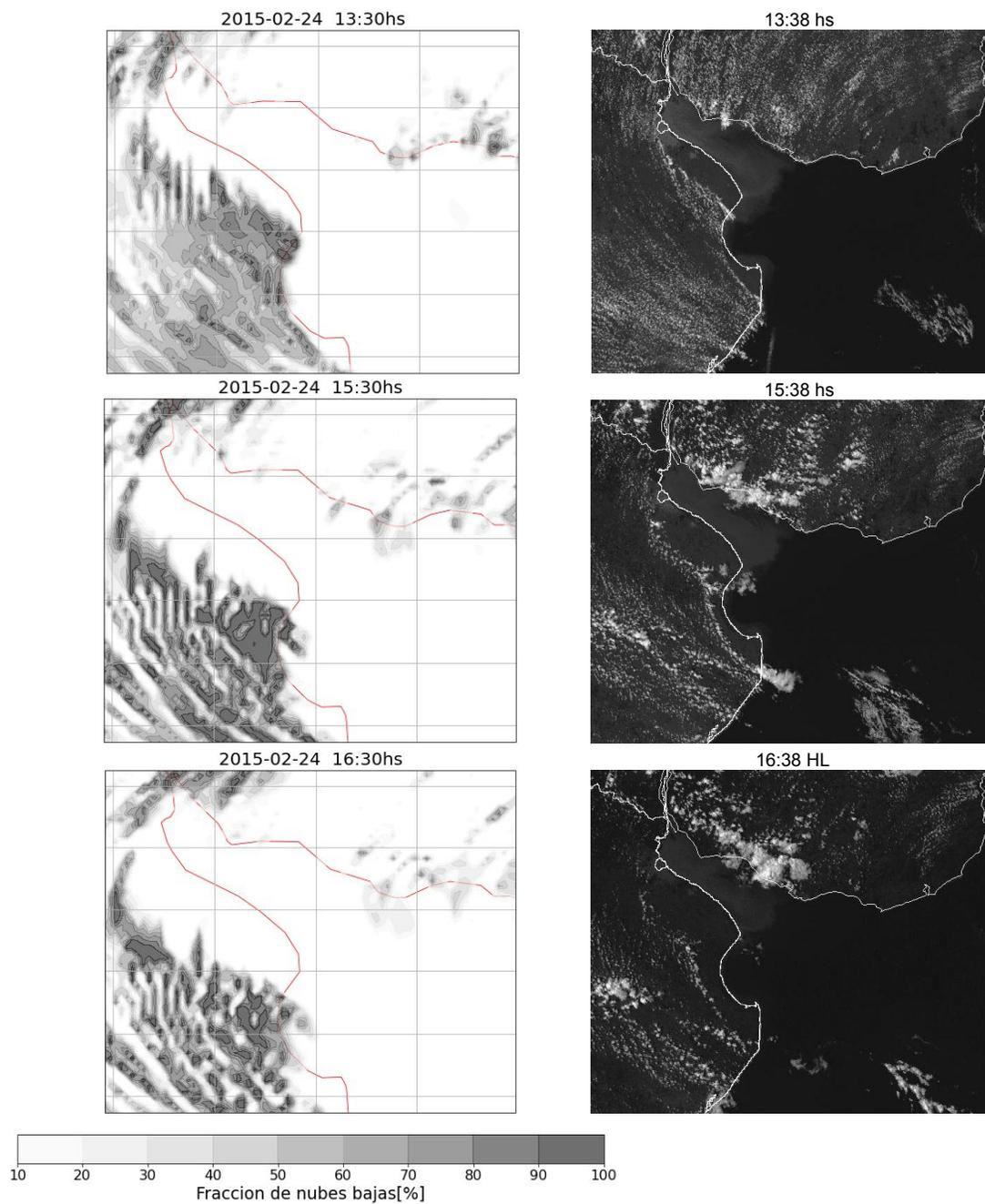
- La nubosidad que se observa en las imágenes satelitales al oeste de Samborombón esta correctamente representada (11:45HL) y también su extensión sobre el río al este de Punta Rasa (13:10 HL).
- El desplazamiento hacia el río de la nubosidad con mayor desarrollo vertical pasado el mediodía también puede observarse en las simulaciones.
- Sobre la costa uruguaya, la ubicación de la nubosidad observada en las imágenes satelitales esta correctamente representada por la simulación.



**Figura 7.1:** Campos de fracción de nubes bajas (con base entre los 300 y 2000m de altura) simuladas por el modelo (izquierda) e imágenes del Satélite GOES-12 correspondientes al espectro visible para el caso de brisa en la costa argentina (19/11/2012).

## 7.2. Caso de brisa en la costa uruguaya

Para el caso de brisa en la costa uruguaya se presentan en la Figura 7.2 los campos de fracción de nubes bajas simulados por el modelo y las imágenes del satélite GOES-12 correspondientes al espectro visible. En ellas se puede observar que el modelo muestra algo de nubosidad sobre la costa uruguaya pero definitivamente la subestima (13:38 HL). Sobre la costa argentina se observa el SBF en las cercanías de Samborombón y su avance tierra adentro (tanto en el modelo como en las observaciones). Este SBF y su avance también se observan en los campos de viento en 10m y temperatura de la Figura 6.12 izquierda como una línea de convergencia que avanza tierra adentro. Sobre Uruguay se observa una intensificación de la convección en la zona del SBF y también un avance tierra adentro de esta línea de nubosidad con mayor desarrollo vertical. Dicho avance del SBF también se observa en los campos de viento, temperatura y convergencia de las Figuras 6.12 izquierda y centro. Cabe mencionar que, observando las imágenes satelitales, el avance de la nubosidad en la costa uruguaya es menor que el de la línea de nubosidad en la bahía de Samborombón.



**Figura 7.2:** Campos de fracción de nubes bajas (con base entre los 300 y 2000m de altura) simuladas por el modelo (izquierda) e imágenes del Satélite GOES-12 correspondientes al espectro visible para el caso de brisa en la costa uruguaya (24/02/2015).

### 7.3. Conclusiones parciales

En las imágenes satelitales correspondientes al evento de brisa en la costa argentina se observa nubosidad cumuliforme de poco desarrollo vertical sobre la tierra y cielos despejados sobre el río previo al mediodía. El avance de esta nubosidad tierra adentro, esperable dado el avance del SBF ya observado en secciones anteriores, no puede identificarse debido al avance sobre el área de interés de una banda de nubosidad con mayor desarrollo vertical que es advectada hacia el NE por el viento del SO en niveles medios. Sin embargo, la representación de la nubosidad por parte del modelo es aceptable ya que logra captar gran parte de la nubosidad observada por el satélite así como también su desplazamiento.

Para el caso de brisa en la costa uruguaya el modelo subestima la nubosidad sobre el territorio uruguayo, aunque logra simular la intensificación de la convección por la tarde, posiblemente por la presencia del frente de brisa, así como también el avance tierra adentro de dicha nubosidad. Para este mismo evento pero del lado argentino se observa tanto en las imágenes satelitales como en la simulación una franja de nubosidad en la Bahía de Samborombón que se desplaza tierra adentro (al SO) y podría estar asociada al frente de brisa que también se observa en los campos de viento y temperatura de la Figura 6.12.

Por otro lado, en las imágenes satelitales de ambos eventos se puede observar la diferencia en la temperatura del agua entre la naciente del río (NO) y la desembocadura (SE). Si bien en este trabajo se utilizaron estaciones más cercanas al Río de La Plata interior (NO), esta diferencia en la temperatura del agua podría afectar significativamente al desarrollo de la brisa en estaciones más cercanas a la desembocadura o incluso en la costa atlántica. Con temperaturas del agua más bajas sería esperable una mayor frecuencia del fenómeno dado el incremento del gradiente de temperatura en la dirección perpendicular a la costa.

## Capítulo 8

# Conclusiones

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo estudiar la brisa de mar en las costas del Río de La Plata. Para ello se plantearon tres objetivos específicos que fueron llevados a cabo a lo largo del trabajo.

En primer lugar se intentó determinar el método más apropiado para identificar eventos de brisa en la región de estudio. Este es un aspecto novedoso ya que ningún autor ha aplicado más de un método en el Río de La Plata para analizar sus diferencias. En este trabajo se aplicaron tres de ellos (Borne et al., 1998; Azorin-Molina et al., 2011; Furberg et al., 2002) en la estación de Aeroparque. Los métodos utilizaron datos de temperatura y viento en superficie, temperatura del río y viento en altura. Los resultados muestran que la cantidad y estacionalidad de los eventos es muy dependiente del método utilizado. El desarrollado por Furberg et al. (2002) fue descartado por la escasa cantidad de eventos encontrados y un ciclo anual opuesto al descrito en la bibliografía. Es posible que dicho método esté confundiendo la rotación de vientos de la brisa con la generada por el pasaje de un frente frío. El método de Azorin-Molina et al. (2011) también fue descartado por la escasa cantidad de casos y la poca estacionalidad observada en el ciclo anual. Finalmente, el método seleccionado para estudiar la brisa en el resto de las estaciones fue el de Borne et al. (1998), habiendo identificado 206 eventos en la estación de Aeroparque con mayor ocurrencia en verano y menor en invierno, tal como se describe en la bibliografía.

A continuación, el método de Borne et al. (1998) fue aplicado en todas las estaciones: Aeroparque, La Plata Aero y Punta Indio en Argentina; Colonia y Carrasco en Uruguay. Los resultados

muestran un mayor número de casos en las estaciones uruguayas, debido posiblemente a los vientos predominantes del NE en la región que, por ser *offshore* en dicha costa, favorecen el desarrollo de la brisa (Estoque, 1962). A su vez la diferencia en el número de casos entre verano e invierno es más marcada en las estaciones uruguayas, sugiriendo una presencia más notoria de la brisa en esta costa. En todas las estaciones (argentinas y uruguayas) el fenómeno se inicia más temprano en los meses de verano y más tarde en los meses de invierno, esto podría deberse a que dada la menor insolación en invierno, se demora más tiempo en producir un  $\Delta T$  entre la tierra y el río suficiente para dar inicio a la brisa. Una vez establecida, la brisa genera principalmente vientos del E en estaciones argentinas y del SE en estaciones uruguayas. Respecto a las condiciones regionales asociadas a los eventos de brisa, el campo medio de SLP para los días de brisa, en todas las estaciones es muy similar al campo medio climatológico. Por esto último se realizó un ACP de los campos de MSLP para los días de brisa en la estación de Aeroparque.

De este modo se realizaron dos ACP en modo-T, uno con los campos medios diarios de MSLP y otro con los campos medios diarios de T2M, en ambos casos utilizando los 92 días de brisa en Aeroparque correspondientes a los meses de mayor ocurrencia, noviembre a marzo. Para MSLP el primer patrón encontrado es muy similar al campo medio climatológico con la presencia de la alta semipermanente del Atlántico sur que genera un viento del N, este se observa por la mañana de los días de brisa. El segundo patrón más frecuente muestra una alta presión sobre la zona de estudio la cual suele estar asociada con cielos despejados y vientos regionales débiles, condiciones que favorecen también el desarrollo de la brisa según Simpson (1994). Finalmente el patrón menos frecuente de los analizados muestra la presencia de una alta post-frontal sobre la región. Respecto al análisis de T2M, el campo predominante muestra un intenso gradiente térmico tierra-agua con mayores temperaturas sobre tierra.

También se estudiaron los eventos simultáneos de brisa formando 3 conjuntos: (1) días de brisa en todas las estaciones, (2) en las estaciones argentinas y (3) en las estaciones uruguayas. Según Manta et al. (2020) la brisa en Uruguay, si se produce, suele hacerlo en todas las estaciones simultáneamente. Según los resultados aquí obtenidos, si bien el número de casos del conjunto (3) es significativamente menor que el de días de brisa en Colonia (173) y Carrasco (206), es mayor que el número de casos del conjunto (2). Por lo tanto, pareciera ser que la brisa se desarrolla más conjuntamente en la costa uruguaya que en la costa argentina. Para el conjunto (1) se identificó solamente un caso, posiblemente ya que una misma situación regional tiene efectos opuestos en ambas costas: el viento *offshore* en una costa favorece a la brisa allí pero la inhibe en la costa

opuesta.

El último de los objetivos específicos consistió en simular dos eventos de brisa (uno en cada costa) con el modelo WRF y estudiar su dinámica. En el Capítulo 6 se describió el método de selección de los casos a simular, las características del modelo WRF y las configuraciones utilizadas para las simulaciones. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo puede simular el gradiente térmico tierra-agua, la rotación de los vientos y la circulación en el plano vertical asociados a la brisa, así como también se pueden identificar algunas características del sistema de brisa como el SBF y la SBH. En las puntas o cabos que presenta la costa se intensifica la convergencia y el avance del SBF es máximo, tal es el caso de Punta Indio y Punta Rasa en Argentina y Colonia y Carrasco en Uruguay. Al este de estas ciudades, dada la orientación de la costa, el viento regional y la componente de brisa son casi perpendiculares, por lo tanto el viento regional no ejerce resistencia al avance del SBF. Esta podría ser otra de las razones por las cuales el avance del SBF es máximo en estas regiones. También resulta interesante notar (a partir de los cortes verticales de las Figuras 6.9 y 6.13) que al desarrollarse la brisa en una costa, la rama descendente de la circulación vertical de brisa se ubica sobre la costa opuesta, inhibiendo allí el desarrollo de la brisa.

En la simulación del caso de brisa en la costa uruguaya se observa una rotación del viento del NE al SE que se inicia en dicha costa y se va extendiendo hacia la costa argentina hasta abarcar prácticamente todo el río. En esta situación, una estación argentina mostraría viento *onshore* en todo momento (NE y luego SE) por lo tanto los métodos del Capítulo 2 no lo identificarían, a excepción del método de Borne et al. (1998), que sólo exige una rotación de 30°. Esto explica la mayor cantidad de casos identificados por dicho método en Aeroparque y la menor cantidad de eventos en la costa argentina respecto a la uruguaya. Sin embargo, esta situación podría considerarse como día de brisa en todo el Río de La Plata y entonces deberían adaptarse los métodos para identificar estos eventos en estaciones argentinas.

Con el objetivo de validar la nubosidad simulada por el modelo, esta fue comparada con las imágenes del satélite GOES-12. Para el caso argentino, la simulación de la nubosidad por parte del modelo es aceptable ya que logra captar los patrones principales y también su desplazamiento. Sin embargo, debido a la presencia de una banda de nubosidad de gran desarrollo vertical que se desplaza desde el interior de la provincia de Buenos Aires hacia el río, no es posible distinguir si existe una banda de nubosidad asociada al SBF que avanza tierra adentro. Por otro lado,

para el caso de brisa en la costa uruguaya el modelo subestima la nubosidad sobre Uruguay. Sin embargo, logra simular tanto la intensificación de la convección por la tarde debida posiblemente al SBF como también el avance tierra adentro de dicha nubosidad. Tanto en la simulación como en las imágenes satelitales se observa en la Bahía de Samborombón una franja de nubosidad que se desplaza hacia el SO y podría estar asociada al avance de un SBF. Otro aspecto interesante que se observa en las imágenes satelitales es la diferencia térmica entre la naciente del río (NO) y la desembocadura (SE). En este trabajo, las estaciones utilizadas se encuentran más cerca del Río de La Plata interior (NO), sin embargo, para estaciones más cerca de la desembocadura o incluso en el Mar Argentino, donde la temperatura del agua es menor, la brisa podría tener una señal más clara debido a la mayor diferencia térmica tierra-agua. Este aspecto podría tratarse en futuros trabajos tomando estaciones en la costa atlántica argentina por ejemplo, y luego comparar las características de la brisa con las estaciones aquí utilizadas.

# Bibliografía

- Archer, C. L., Delle Monache, L., & Rife, D. L. (2014). Airborne wind energy: Optimal locations and variability. *Renewable Energy*, 64, 180–186.
- Arnold, D., Morton, D., Schicker, I., Seibert, P., Rotach, M., Horvath, K., Dudhia, J., Satomura, T., Müller, M., Zängl, G., et al. (2012). *High resolution modelling in complex terrain: report on the HiRCoT 2012 Workshop, Vienna, 21-23 February 2012*. Institut für Meteorologie, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Univ. f . . . .
- Arrillaga, J. A., Yagüe, C., Sastre, M., & Román-Cascón, C. (2016). A characterisation of sea-breeze events in the eastern cantabrian coast (spain) from observational data and wrf simulations. *Atmospheric Research*, 181, 265–280.
- Arritt, R. W. (1987). The effect of water surface temperature on lake breezes and thermal internal boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, 40(1-2), 101–125.
- Azorin-Molina, C., Tijm, S., & Chen, D. (2011). Development of selection algorithms and databases for sea breeze studies. *Theoretical and applied climatology*, 106(3), 531–546.
- Azorin-Molina, C., Tijm, S., Ebert, E. E., Vicente-Serrano, S. M., & Estrela, M. J. (2014). Sea breeze thunderstorms in the eastern iberian peninsula. neighborhood verification of hirlam and harmonie precipitation forecasts. *Atmospheric research*, 139, 101–115.
- Barbato, J. P. (1976). The sea breeze of the boston area and its effect on the urban atmosphere. *PhD dissertation, Boston University, Boston*.
- Berri, G. J. & Dezzutti, M. (2020). A sea-breeze case study in the la plata river region using local observations, satellite images, and model simulations. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(1), 123–147.

- Berri, G. J., Sraibman, L., Tanco, R. A., & Bertossa, G. (2010). Low-level wind field climatology over the la plata river region obtained with a mesoscale atmospheric boundary layer model forced with local weather observations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(6), 1293–1305.
- Biggs, W. G. & Graves, M. E. (1962). A lake breeze index. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, (pp. 474–480).
- Borge, R., Alexandrov, V., Del Vas, J. J., Lumbreras, J., & Rodríguez, E. (2008). A comprehensive sensitivity analysis of the wrf model for air quality applications over the iberian peninsula. *Atmospheric Environment*, 42(37), 8560–8574.
- Borne, K., Chen, D., & Nunez, M. (1998). A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the swedish west coast. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18(8), 901–914.
- Camberlin, P. & Planchon, O. (1997). Coastal precipitation regimes in kenya. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 79(1-2), 109–119.
- Chemel, C. & Sokhi, R. S. (2012). Response of london’s urban heat island to a marine air intrusion in an easterly wind regime. *Boundary-layer meteorology*, 144, 65–81.
- Clappier, A., Martilli, A., Grossi, P., Thunis, P., Pasi, F., Krueger, B. C., Calpini, B., Graziani, G., & van den Bergh, H. (2000). Effect of sea breeze on air pollution in the greater athens area. part i: numerical simulations and field observations. *Journal of Applied Meteorology*, 39(4), 546–562.
- COMET-Program (2016). Forzamiento térmico de la circulación 1: Brisas marinas. [http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/seabreez\\_es/index.htm](http://www.meted.ucar.edu/mesoprim/seabreez_es/index.htm). Accedido: 25 de Marzo de 2023.
- Comin, A. N., Miglietta, M. M., Rizza, U., Acevedo, O. C., & Degrazia, G. A. (2015). Investigation of sea-breeze convergence in salento peninsula (southeastern italy). *Atmospheric Research*, 160, 68–79.
- Estoque, M. A. (1962). The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *Journal of Atmospheric Sciences*, 19(3), 244–250.
- Furberg, M., Steyn, D., & Baldi, M. (2002). The climatology of sea breezes on sardinia. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(8), 917–932.

- Gassmann, M. I. & Gardiol, J. M. (2007). Weather conditions associated with the potential for pollen recirculation in a coastal area. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 14(1), 39–48.
- Hu, X.-M., Nielsen-Gammon, J. W., & Zhang, F. (2010). Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the wrf model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(9), 1831–1844.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.-K., Hnilo, J., Fiorino, M., & Potter, G. (2002). Ncep–doe amip-ii reanalysis (r-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), 1631–1644.
- Kozo, T. L. (1982). An observational study of sea breezes along the alaskan beaufort sea coast: Part i. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 21(7), 891–905.
- Kunin, P., Alpert, P., & Rostkier-Edelstein, D. (2019). Investigation of sea-breeze/foehn in the dead sea valley employing high resolution wrf and observations. *Atmospheric Research*, 229, 240–254.
- Laird, N. F., Kristovich, D. A., Liang, X.-Z., Arritt, R. W., & Labas, K. (2001). Lake michigan lake breezes: Climatology, local forcing, and synoptic environment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 40(3), 409–424.
- Manta, G., Barreiro, M., & Renom, M. (2020). Climatología de la brisa marina en uruguay. *Meteorológica*.
- Meir, T., Orton, P. M., Pullen, J., Holt, T., Thompson, W. T., & Arend, M. F. (2013). Forecasting the new york city urban heat island and sea breeze during extreme heat events. *Weather and Forecasting*, 28(6), 1460–1477.
- Miller, S., Keim, B., Talbot, R., & Mao, H. (2003). Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, 41(3).
- Moroz, W. J. (1967). A lake breeze on the eastern shore of lake michigan: Observations and model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24(4), 337–355.
- Muñoz-Sabater, J. (2021). Era5-land hourly data from 1950 to 1980. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.

- Papanastasiou, D., Melas, D., & Lissaridis, I. (2010). Study of wind field under sea breeze conditions; an application of wrf model. *Atmospheric Research*, 98(1), 102–117.
- Peace, M., McCaw, L. W., Kepert, J. D., Mills, G. A., & Mattner, T. (2015). Wrf and sfire simulations of the layman fuel reduction burn. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 65(4), 302–317.
- Preisendorfer, R. W. & Mobley, C. D. (1988). Principal component analysis in meteorology and oceanography. *Developments in atmospheric science*, 17.
- Queirel, J. M. & Berri, G. J. (2020). Identificación y análisis de la brisa de mar y tierra en el río de la plata. *Decimoquinto Encuentro del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra*.
- Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., & Schlax, M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of climate*, 20(22), 5473–5496.
- Robinson, F., Patterson, M. D., & Sherwood, S. (2013). A numerical modeling study of the propagation of idealized sea-breeze density currents. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(2), 653–668.
- Rotunno, R. (1983). On the linear theory of the land and sea breeze. *Journal of atmospheric sciences*, 40(8), 1999–2009.
- Salvador, N., Reis, N. C., Santos, J. M., Albuquerque, T. T. d. A., Loriato, A. G., Delbarre, H., Augustin, P., Sokolov, A., & Moreira, D. M. (2016). Evaluation of weather research and forecasting model parameterizations under sea-breeze conditions in a north sea coastal environment. *Journal of Meteorological Research*, 30, 998–1018.
- Segal, M. & Pielke, R. (1985). The effect of water temperature and synoptic winds on the development of surface flows over narrow, elongated water bodies. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C3), 4907–4910.
- Sha, W., Kawamura, T., & Ueda, H. (1993). A numerical study of nocturnal sea breezes: Pre-frontal gravity waves in the compensating flow and inland penetration of the sea-breeze cutoff vortex. *Journal of Atmospheric Sciences*, 50(8), 1076–1088.

- Silva Dias, M., Silva Dias, P., Longo, M., Fitzjarrald, D. R., & Denning, A. S. (2004). River breeze circulation in eastern amazonia: observations and modelling results. *Theoretical and applied climatology*, 78(1), 111–121.
- Simpson, J. E. (1994). *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press.
- Soler, M., Arasa, R., Merino, M., Olid, M., & Ortega, S. (2011). Modelling local sea-breeze flow and associated dispersion patterns over a coastal area in north-east spain: a case study. *Boundary-layer meteorology*, 140, 37–56.
- Soler, M., Udina, M., & Ferreres, E. (2014). Observational and numerical simulation study of a sequence of eight atmospheric density currents in northern spain. *Boundary-layer meteorology*, 153, 195–216.
- Srinivas, C., Venkatesan, R., Somayaji, K., & Singh, A. B. (2006). A numerical study of sea breeze circulation observed at a tropical site kalpakkam on the east coast of india, under different synoptic flow situations. *Journal of earth system science*, 115(5), 557–574.
- Steele, C., Dorling, S., Von Glasow, R., & Bacon, J. (2013). Idealized wrf model sensitivity simulations of sea breeze types and their effects on offshore windfields. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(1), 443–461.
- Talbot, C., Augustin, P., Leroy, C., Willart, V., Delbarre, H., & Khomenko, G. (2007). Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the north sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 125, 133–154.
- Team, R. C. et al. (2013). R: A language and environment for statistical computing.
- Udina, M., Soler, M., Viana, S., & Yagüe, C. (2013). Model simulation of gravity waves triggered by a density current. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(672), 701–714.
- Wang, J., Ge, C., Yang, Z., Hyer, E. J., Reid, J. S., Chew, B.-N., Mahmud, M., Zhang, Y., & Zhang, M. (2013). Mesoscale modeling of smoke transport over the southeast asian maritime continent: Interplay of sea breeze, trade wind, typhoon, and topography. *Atmospheric Research*, 122, 486–503.