



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN BRISA MAR -
TIERRA ENTRE EL MAR CARIBE Y EL MUNICIPIO
DE AYAPEL**

**VALERIA BEDOYA PINEDA
JUAN CARLOS CAMACHO MANCO**

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Antioquia (Escuela Ambiental)
Medellín, Colombia
2020



ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN BRISA MAR - TIERRA ENTRE EL MAR CARIBE Y EL
MUNICIPIO DE AYAPEL

VALERIA BEDOYA PINEDA
JUAN CARLOS CAMACHO MANCO

Informe de trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Asesor.

JOHN ALEJANDRO MARTÍNEZ, PhD.

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Antioquia, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2020.

Agradecimientos y dedicatoria

- Juan

Unos pocos renglones no se acercan a hacerle justicia al sentido de agradecimiento y la deuda que tengo con todas las personas que no solo tuvieron un rol invaluable en el desarrollo de este trabajo, si no también en todo el proceso y serie de eventos que tomaron lugar, para que esto siquiera pudiera suceder. Sin más aquí va un intento: Mi familia, mi hermano, sobrino, tíos, primos y especialmente mis padres, seres imprescindibles en mi formación, por ustedes tuve la oportunidad de una educación, un hogar, un libre albedrío en que lo quiero ser y pueda llegar a ser, ustedes tienen mi eterna deuda, agradecimiento y afecto incalculable. Mis maestros, quienes me transmitieron su pasión, curiosidad y conocimiento, tan vital en el desarrollo de este trabajo, para ustedes mi admiración siempre. Un especial gracias para los profesores Álvaro Wills y Mateo Duque quienes apoyaron desde su opinión y consejos, bases firmes para la continuación y eventual finalización del presente. Los profes Santiago Cárdenas y Paola Arias, quienes quizás sin darse cuenta, me introdujeron en solo un semestre, a la ciencia la cual despierta en mí más curiosidad y pasión. Sin lugar a dudas, es mi absoluto deber agradecer al maestro: John Alejandro Martínez Agudelo, desde la primera vez que tuve la fortuna de escucharlo, representó una fuente de conocimiento invaluable y con el tiempo, las materias y el desarrollo de este trabajo de grado, fue siempre un ejemplo de disciplina, dedicación, recursividad, además de ser un guía paciente y objetivo. A usted profe, le agradezco cada sesión, cada clase, cada charla, pues ahora que termina mi carrera universitaria, me llevo sus lecciones, consejos y enseñanzas, como uno de los más valiosos recuerdos de la universidad. Agradecimientos y una dedicatoria a la co-autora Valeria Bedoya Pineda , cuya presencia en mi vida fue y continúa representando una refrescante brisa de mar. Tus contribuciones a esta trabajo, a mi proceso formativo y personal son de las razones por cuales esto pudo suceder. A ti este trabajo, quien como tu, es una bella catarsis. A mis amigos por distraerme de la a veces agobiante rutina y estar ahí para escuchar. Gracias totales, este logro es tan suyo como mío.

- Valeria

Primero deseo agradecer a mi madre Olga Lucia y a mi padre Alberto que con entereza han sabido educarme. A mi mamá especialmente por su autoridad matriarcal, que con la cantidad precisa de templanza y amor hizo de mí la mujer que ahora soy. Y a mi padre cuya bondad e historia de vida, me hacen una persona sensible y humanista. A ambos por acompañarme, y tratar de comprender mis ideas opuestas. Siempre hubo de ellos una justa medida de libertad y amor. A ellos inconmensurables gracias.

A mi hermana Estefanía. Recuerdo que se puso más feliz que yo cuando pase a la UdeA. Ella sabía perfectamente el valor que tenía pasar a una universidad pública, un logro que las dos compartimos. Gracias por ser la guía que hizo más fácil mi camino.

Agradecer a mi familia, tías, primas, primos y abuela, por alimentarme en diferentes aspectos y acogerme con afecto a pesar de mi antagonismo para con sus formas de ver el mundo.

A mis primeros amigos de la Universidad: Ossa, Rubiela, Manso, Tania, Demo y Refa. Gracias por las conversaciones (han sido las más interesantes de mi vida), las polas, y esas tardes en el aereo que serán un tesoro en mi memoria. A ellos, a quienes debo la materia “Descubriendo la Universidad”. Mucho de lo que soy ahora es gracias ustedes.

A John, por existir, aunque reniegue de ello.

A mis colegas: Valentina y Samadhy por compartir conmigo la mística de ser mujeres. A Juan Jose, Juan Pablo, Juan Esteban, Nicolás y Camilo, a quienes conocí en una salida de campo a Capurganá, y luego nos hicimos amigos. Gracias totales por su amistad.

A todas las maestras y maestros que me han apasionado y me han hecho pensar que quiero ser como ustedes, no voy a mencionar sus nombres por miedo a que se me escape alguno. Infinita gratitud.

A Alejandro quien nos acompañó y aconsejó durante todo el proceso. Su incondicional presencia y su manera de compartir saberes.

Por último deseo agradecer a Juan. Mi compañero, su paciencia, su honesto consejo, por tratar de entender todo lo que digo, siempre dispuesto al diálogo. Este trabajo es algo de ambos y estoy orgullosa de ello.

Tabla de Contenido

Capítulo 1: Introducción	8
1.1. Objetivos	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos	10
1.2. Marco teórico	10
1.3. Metodología	12
2. Capítulo 2: Validación datos ERA5 con estaciones del IDEAM	14
2.1. Temperatura a 2 metros	15
2.1.1. Correlaciones, RMSE y bias	15
2.1.2. Ciclo diurno	18
2.1.3. Diagramas de dispersión	21
2.2. Magnitud del viento a 10 metros	25
2.2.1. Correlaciones, RMSE y bias	25
2.2.2. Ciclo diurno	27
2.2.3. Diagramas de dispersión	30
2.2.4. Hodógrafas	33
2.3. Conclusiones del capítulo	34
3. Capítulo 3: Climatología de vientos de bajo nivel y temperatura según ERA5	36
3.1. Temperatura a dos metros	36
3.1.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa	36
3.1.2. Ciclo diurno de la t2m en el mes de junio	37
3.1.3. Ciclo diurno de la t2m en el mes de enero	40
3.1.4. Ciclo diurno de la t2m en el mes de octubre	40
3.2. Viento a 10 metros de altura	45
3.2.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa	45
3.2.2. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de junio	46

3.2.2.1 Hodógrafa mes de junio para línea de costa y Ayapel	49
3.2.3. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de enero	50
3.2.3.1 Hodógrafa mes de enero para línea de costa y Ayapel	50
3.2.4. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de octubre	53
3.2.4.1 Hodógrafa mes de octubre para línea de costa y Ayapel	56
3.3. Viento a 925 hPa	57
3.3.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa	57
3.3.2. Ciclo diurno del viento a 925 hPa en el mes de junio	57
3.3.3. Ciclo diurno del viento a 925 hPa en el mes de enero	63
3.3.4. Ciclo diurno del viento a 925 hPa en el mes de octubre	63
3.4. Síntesis de la brisa en la región	66
3.4.1. Junio - brisa mar- tierra y tierra mar	66
3.4.2. Enero - brisa fuerte con circulación ciclónica	68
3.4.3. Octubre - gradiente débil	69
3.5. Conclusiones del capítulo	71
4. Capítulo 4 : Relación entre los vientos sobre Ayapel, con el CLLJ, la SST y entre la t2m y los campos de vientos a 10 metros y 925 hPa.	73
4.1. Climatología de la Región Caribe y Ayapel	74
4.2. Variabilidad estacional Chorro de bajo nivel del Caribe	75
4.2.1. Ciclo diurno y anual del viento zonal a 925 hPa sobre el mar Caribe	75
4.3. Correlaciones regionales y locales	76
4.3.1. Febrero - Chorro Fuerte	76
4.3.2. Julio - Chorro muy fuerte	78
4.3.3. Abril - Chorro débil	80
4.3.4. Octubre - Chorro muy débil	82
4.4. Correlaciones con el rango del ciclo diurno	85
4.5 Mapas de correlaciones entre la temperatura superficial del mar con vientos a 10 m y 925 hPa	87
4.6. Mapas de correlación entre la temperatura a dos metros y los vientos a 10 m y 925 hPa	93

4.7. Conclusiones del capítulo	98
5. Capítulo 5: Conclusiones y discusión	100

Resumen

El foco de la investigación es indagar la existencia de un patrón de circulación de brisa entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel, mediante el análisis de las variables: Temperatura a dos metros y vientos a tres diferentes alturas 10 m, 925 hPa y 850 hPa, que en altura corresponden aproximadamente a 750 msnm y 1500 msnm, respectivamente. La mayor parte de este estudio se basa en datos del reanálisis ERA5, del cual se usó información que abarca cada hora, de cada día entre los años 1989-2018 (30 años). Se halló que ERA5 logra reproducir una circulación de brisa marina entre el mar Caribe y el municipio Ayapel, donde los campos de vientos evolucionan en función de los gradientes de temperatura. Los vientos con dirección océano a continente alcanzan la región de Ayapel alrededor de las 5 pm. Se encontró que la circulación brisa mar-tierra está presente todos los meses del año, no obstante, la brisa presenta estacionalidad en el ciclo anual, es decir, se identificó que este fenómeno de mesoescala tiene características diferentes en las temporadas diciembre-enero-febrero-marzo-abril, mayo-junio-julio-agosto y por último septiembre-octubre-noviembre.

Se validaron las variables en superficie temperatura a dos metros (t2m) y vientos a 10 metros (10 m) del reanálisis ERA5, con datos de estaciones meteorológicas del IDEAM. Para este fin se calcularon correlaciones, bias (sesgos) y RMSE (Root mean squared error). También se comparan las series de tiempo del ciclo diurno de ambos conjuntos de información y la distribución de los datos apareados en diagramas de dispersión para las muestras originales y sus anomalías. Los resultados muestran que el reanálisis reproduce de forma semejante a la realidad la t2m, mientras que presenta grandes dificultades representando el viento a 10 m. Con el fin de comparar las componentes zonal y meridional del viento se realizaron hodógrafas. Como resultado se encontró que ERA5 reproduce de manera realista la componente meridional del viento (incluyendo cambios diurnos en la dirección), pero presenta sesgos representando la componente zonal. Siendo posible que estas diferencias sean la causa de errores en la magnitud del viento.

Se estudió la relación entre las brisas marinas con los vientos del Chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ por sus siglas en Inglés), mediante correlaciones entre un índice del CLLJ con los vientos a 10 m, 975 hPa y 925 hPa en las regiones Ayapel y Costa (definida como una franja en la línea de costa noroccidental de Colombia). Las correlaciones se calcularon para el ciclo diurno en los meses febrero, abril, julio y octubre, debido a la estacionalidad de la magnitud del CLLJ, la cual varía semianualmente con dos máximos en julio y febrero y dos mínimos en octubre y abril. Se logró identificar que los vientos en Ayapel interactúan en la escala diurna con el CLLJ en tres de los cuatro meses analizados. En el mes de febrero es dominante un acople local entre la línea de costa estudiada y Ayapel. El índice del CLLJ también se correlacionó con el rango del ciclo diurno de la magnitud del viento en Ayapel y Costa para las alturas mencionadas anteriormente. Estos resultados sugieren que las variaciones en el CLLJ afectan el ancho de las fluctuaciones del viento en Ayapel, en al menos 8 de los 12 meses del año (marzo, abril, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre). Además, se encontró que dichas alteraciones son mayores en el nivel más bajo, decreciendo con la altura.

Se realizaron ciclos anuales de mapas de correlación entre las anomalías sin tendencia de la temperatura superficial del mar (SST) y las series de tiempo de los vientos a 10 m y 925 hPa. El objetivo de este análisis fue identificar qué lugares del océano dentro del área de estudio se relacionan con las regiones de interés: Costa y Ayapel. Por último, se hicieron ciclos anuales de mapas de correlación entre las anomalías sin tendencia del campo de vientos a 10 m y 925 hPa y las series de tiempo de la temperatura superficial del aire en las zonas estudiadas. Con esto se buscó identificar qué regiones en los campos de vientos están más relacionados con la temperatura de las regiones de interés, además de estudiar su evolución espacio-temporal a lo largo del año. Se encontró que los vientos en escala “local” (i.e. incluyendo Costa y Ayapel) tienen una relación fuerte sobre la temperatura de ambas regiones durante los primeros meses del año. Posteriormente, alrededor de julio persiste dicha relación, junto con la influencia de vientos provenientes del mar Caribe. Finalmente en los meses de fin de año, se hallaron anticorrelaciones importantes de vientos provenientes del océano Pacífico, posiblemente conducidos por una intensificación del Chorro de bajo nivel del Chocó.

1. Capítulo 1: Introducción

La brisa marina (BM) es una circulación local, perteneciente al conjunto de circulaciones de mesoescala. Se presenta debido al gradiente horizontal de temperatura entre el agua (océano o mar) y el suelo. El calentamiento desigual entre las superficies contiguas genera en consecuencia un gradiente de presión, el cual direcciona el viento de zonas de altas presiones a zonas de bajas presiones (Simpson, 1994, 1995). La forma simplificada de describir dicha circulación es: Viento en superficie de mar a tierra durante el día y la corriente de retorno al instante arriba, mientras en el proceso durante la noche, el viento en superficie se dirige de la tierra hacia el mar con la corriente de retorno hacia la tierra.

Las brisas mar-tierra (BMT) poseen un ciclo diurno, el cual está condicionando directamente por varios factores, principalmente la radiación solar incidente, la estabilidad atmosférica y la turbulencia. Las variables físico-geográficas que intervienen en este fenómeno son: La existencia de dos superficies contiguas de tierra y agua, la latitud, temporada del año, orientación y forma de la costa, profundidad del agua, tipo de relieve, fuerza de Coriolis, las propiedades termoconductoras, y la cobertura vegetal. Algunos factores oceanológicos de importancia son: tipo de oleaje, corrientes marinas y temperatura del agua. Además de variables que hablan del estado de la atmósfera como el flujo de calor sensible (H), estabilidad atmosférica (N) y humedad específica (q). (Carnesoltas, 2002; Crosman, 2010).

Los estudios sobre estos fenómenos atmosféricos son limitados en la costa Caribe Colombiana. Pérez et al. (2018), estudiaron las BMT usando datos de estaciones locales en las ciudades de Barranquilla, Santa Marta y Riohacha. Estos autores lograron definir las magnitudes de vientos máximos y mínimos, los gradientes térmicos horizontales y las direcciones predominantes de los vientos, demostrando una intensificación del sistema durante la temporada seca (Diciembre-Marzo). Además, lograron identificar que cada región presenta su propio “microclima”, por lo tanto cada región tiene un patrón de brisas específico, sin importar la corta distancia que existe entre estas ciudades.

Otra región de interés que podría ser afectada por una BMT es el municipio de Ayapel, Córdoba. Esta región es de gran importancia debido a que se ubica en un sistema cenagoso donde coexisten humedales y zonas inundables de la depresión Momposina (Aguirre, 2005). La ciénaga de Ayapel participa en la regulación del régimen hídrico de los ríos San Jorge y Cauca además de varios cauces aledaños a la región. En la ciénaga se desarrollan gran variedad de especies de fauna y flora, algunas de las especies de aves y peces son migratorias (Aguilera, 2009). Desde el año 2018 la ciénaga pertenece a la lista de humedales de importancia internacional RAMSAR. Conforme a la definición de tipos de humedales dada por la convención RAMSAR y según el plan de manejo ambiental (CVS, 2007), el sistema cenagoso de Ayapel se clasifica como un humedal continental donde hay lagos, pantanos y esteros permanentes y estacionales de agua dulce con turberas no arboladas, con ríos y deltas en su interior.

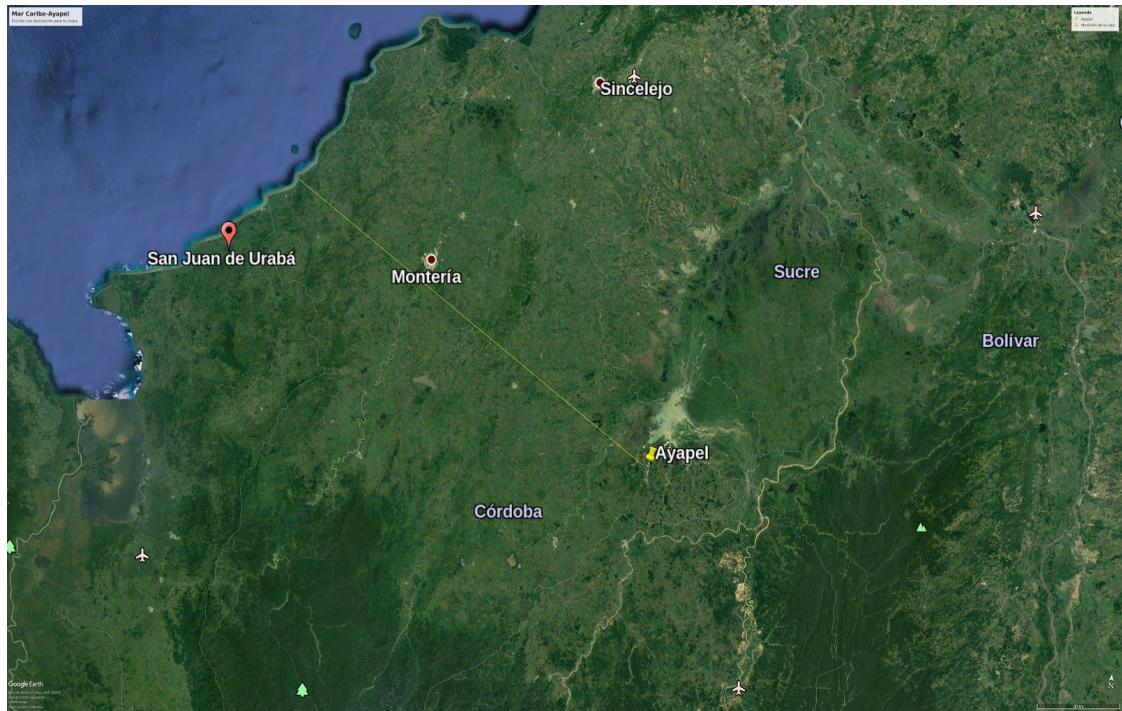


Figura 1.1 Mapa de la región Caribe. La línea amarilla muestra la distancia de la costa Caribe hasta Ayapel, la cual es 153 km aproximadamente. Adaptado de google earth pro.

En países tropicales la brisa marina alcanza fácilmente 50-60 km y en ocasiones hasta 124 - 145 km al interior del continente (Defant, 1951). Por lo general la circulación BMT se desarrolla por debajo de la capa límite (60m a 3 km). Existe una estrecha relación entre la circulación diurna de la brisa con la formación y desarrollo de nubes convectivas sobre la tierra, ya que en el borde de la celda de circulación (frente de brisa), se da una alta convergencia de vientos húmedos provenientes del mar y vientos continentales, facilitando los movimientos de masa y calor en la vertical. Por esta razón la BMT es un evidente mecanismo de transporte de energía y vapor de agua (Carnesoltas, 2002; Miller, 2003).

Las BMT son condicionadas por las características del terreno donde toman lugar; por tanto, cada BMT se moldea de acuerdo a su ubicación, y en consecuencia los patrones del ciclo diurno poseen cualidades singulares. Se ha comprobado en estudios anteriores que las BMT tienen efectos en el oleaje y las corrientes marinas, el transporte y la dispersión de contaminantes atmosféricos, el transporte de aire fresco y la influencia en el tiempo atmosférico de una región. (Maza, 2006; Pérez, 2018 ; Miller, 2003)

En este trabajo se realizó un estudio para identificar algunas de las características de la BMT, mediante el análisis de variables como temperatura y vientos a diferentes alturas entre el mar Caribe y el territorio ubicado en la costa caribeña hasta la ciénaga de Ayapel (Figura 1.1).

1.1. Objetivos

Objetivo general

Identificar si existe una circulación brisa mar-tierra entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel, analizando y describiendo el proceso, los factores que lo condicionan y sus características en la escala diaria y estacional.

Objetivos específicos

Estudio de información de estaciones meteorológicas en la región de interés y validación de ERA5.

Caracterizar el ciclo diurno y anual del viento y la temperatura en la región de interés según ERA5. Identificar estructuras tipo brisa mar-tierra.

Estudiar la posible relación entre las brisas marinas, con la temperatura superficial del mar y el chorro de bajo nivel del Caribe.

Estudiar las variaciones interanuales del viento y la temperatura en la región de interés y su posible relación con cambios en la brisa mar-tierra.

1.2. Marco teórico

La diversidad de factores que forman, sostienen en el tiempo y condicionan las brisas marinas, hacen de esta un sistema complejo. Entender esta circulación ha sido un reto de las ciencias atmosféricas y oceanográficas, desde hace aproximadamente 70 años (Crosman, 2010). Incluso historiadores mencionan que desde los años 480 A.C en la antigua Grecia, marinos registraban en sus diarios el comportamiento del viento cerca a las costas, debido a que ellos notaban que este presentaba un cambio en la dirección a lo largo del día. Uno de los primeros académicos en plasmar ideas acerca de BMT fue Aristóteles en su obra *Meteorologica*.

En la actualidad se tiene muy claro que esta circulación se forma debido a las diferentes propiedades térmicas que poseen el agua y el suelo, por lo tanto estos dos ambientes pueden recibir y almacenar entradas (salidas) de calor de maneras diferentes (Atkinson, 1981). Así, durante el ciclo diurno de radiación, el continente se calienta más que el mar generando un gradiente térmico horizontal. Esta diferencia entre la superficie caliente del suelo y la fría del mar incrementa durante el transcurso del día y una fuerza de gradiente de presión es producida en los bajos niveles de la atmósfera iniciando la brisa de mar cerca a la superficie de la tierra (Tomado de Miller, 2003 quien cita a Simpson, 1994). Ambos gradientes son lo suficientemente grandes para generar una circulación de mesoescala (10 - 200 km).

Por lo mencionado, el calentamiento radiativo tiene un ciclo diario y en consecuencia las brisas marinas también, autores como Simpson en 1994, Gustavsson en 1995 y Tijn en 1999, han definido y explicado el cambio de dirección del viento en cuatro momentos principales durante el día:

- I. En las horas del amanecer el viento se mueve paralelo a la línea de costa, al calentarse la tierra durante las primeras horas de la mañana, los vientos comienzan a tomar dirección hacia la costa, cruzando la línea de costa con una magnitud de velocidad débil.
- II. Al mediodía cuando la radiación incidente es más fuerte, el suelo alcanza su máxima temperatura, fortaleciendo el gradiente térmico horizontal; sin embargo, las brisas responden de manera retardada a esto y se intensifican una o dos horas después del mediodía, es decir, los vientos aumentan la velocidad de entrada a la costa, unas horas posterior al medio día.
- III. Comenzando el atardecer y durante un par de horas en la temprana noche, los vientos de entrada a la costa, se debilitan y rotan hasta volver a ser paralelos a la línea de costa, según la orientación de la línea de costa y hacia donde se encuentre el mar, dicha rotación puede ser en sentido horario o antihorario.
- IV. En la noche, la tierra entrega energía a la atmósfera, mediante flujos de onda larga (Steffan-Boltzmann) y no-radiativos (Calor sensible y latente), haciendo que esta superficie se enfríe. Aunque estos procesos también toman lugar sobre la superficie marina, la capacidad de almacenar calor del agua es superior a la de la tierra, por lo que aquella se enfría a una tasa mucho menor que la de la tierra (Shuttleworth, 2012 ; Wallace y Hobbs, 2006). En consecuencia, el gradiente térmico se invierte, ya que el agua está más cálida que el suelo, generando que el viento cruce la línea costera, pero en sentido opuesto, es decir, desde la tierra hacia el mar.

Las brisas marinas al igual que otras circulaciones, cumplen principios físicos básicos como las ecuaciones para la conservación de la masa, energía y momentum. De ahí, estas han sido base para la definición de teorías que posteriormente se usaron en modelos matemáticos y computacionales (Crosman, 2010). Por ejemplo el teorema de Bjerknes (ver Holton, 1992), logra establecer una ecuación para definir la velocidad y la aceleración media de la componente horizontal de la velocidad para las brisas marinas.

Simpson en 1994, postuló un índice para dar una idea de la probabilidad de que las BMT tengan lugar, y de su posible intensidad. Basándose en: Si la velocidad de vientos locales supera en gran medida la diferencia de temperatura entre la tierra y el mar, la brisa no se daría; por el contrario si la diferencia de temperatura prevalece sobre la velocidad, las brisas tienen mayor posibilidad de suceder. El índice es : $\frac{U^2}{\Delta T}$ y Simpson (1994) lo llamó SBI (*Sea breeze index*, SBI por sus siglas en inglés). Además, si sobre el área que abarca la celda de la brisa marina, pasa un evento fuerte de escala mayor por ejemplo a escala sinóptica, este se superpone a la brisa, para el autor sería el

viento geostrófico; matemáticamente lo define como $\frac{U_g^2}{\Delta T} < SBI$, donde U_g es la magnitud del viento geostrófico.

Las observaciones *in situ* también tienen un rol importante para explicar estos sistemas; Gustavsson en 1995, observó las brisas marinas en el oeste del archipiélago suizo a través de instrumentos (diferentes tipos de anemómetros), siguió la dirección del viento y noto cuando este sufría un cambio en la trayectoria, luego, adoptó como criterio que un cambio significativo en la dirección del viento sería de 180°. Pérez et al. (2018), para identificar la presencia de la brisa de mar en las ciudades de Barranquilla, Santa Marta Y Riohacha, modificaron la metodología planteada por Gustavsson et al., 1995 y Prohom 1998, y consideraron los siguientes criterios.

- I. El ciclo de la brisa de mar comienza cuando hay un cambio abrupto en la dirección del viento $\geq 100^\circ$ con circulaciones desde el mar a la tierra, y un incremento en la velocidad del viento no excediendo los 10 m/s, además de una reducción en la temperatura
- II. La brisa de mar termina cuando hay un cambio abrupto en la dirección del viento $\geq 100^\circ$, con la circulación de la tierra hacia el mar, y una reducción en la velocidad y temperatura.

Tijm (1999) también basado en observaciones, realizó un estudio de BMT en los países bajos. El autor utilizó promedios de vientos para dos momentos del día, en los periodos 06-10 UTC y 13-16 UTC. En el primero entre las 0600 - 1000 UTC, los vientos fueron registrados por estaciones con dirección hacia afuera de la costa (“*offshore*”); el segundo momento fue entre las 1300 - 1600 UTC, los vientos fueron registrados por otras estaciones con dirección hacia adentro de la costa (“*onshore*”). Con este método se logró definir la intensidad y la magnitud de la BMT. Tijm (1999) se concentró únicamente en los momentos donde las brisas cruzan la línea costera, bien sea entrando o saliendo de esta.

1.3. Metodología

El foco de la presente investigación es indagar la existencia de un patrón de circulación de brisa entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel, a partir de diferentes variables de estado atmosféricas que permiten analizar y explicar el proceso, y a su vez conocer sus características a escala diaria, estacional y anual. La zona de interés se encuentra aproximadamente a 150 km de la costa Caribe (Figura 1.2). Es de gran interés detallar la circulación de brisa mar-tierra a una escala como la de nuestro estudio, la cual, de acuerdo a Orlanski (1975) se clasifica como una circulación meso-beta (20-200km).

Los conjuntos de información para el desarrollo de este trabajo, fueron tomados principalmente del sistema de reanálisis ERA5 (link al website: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>) producido por European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF por sus siglas en inglés) dentro del proyecto Copernicus, y datos tomados de estaciones meteorológicas estratégicas disponibles. ERA5 incluye un modelo atmosférico con 137 niveles en la vertical, cubriendo desde la

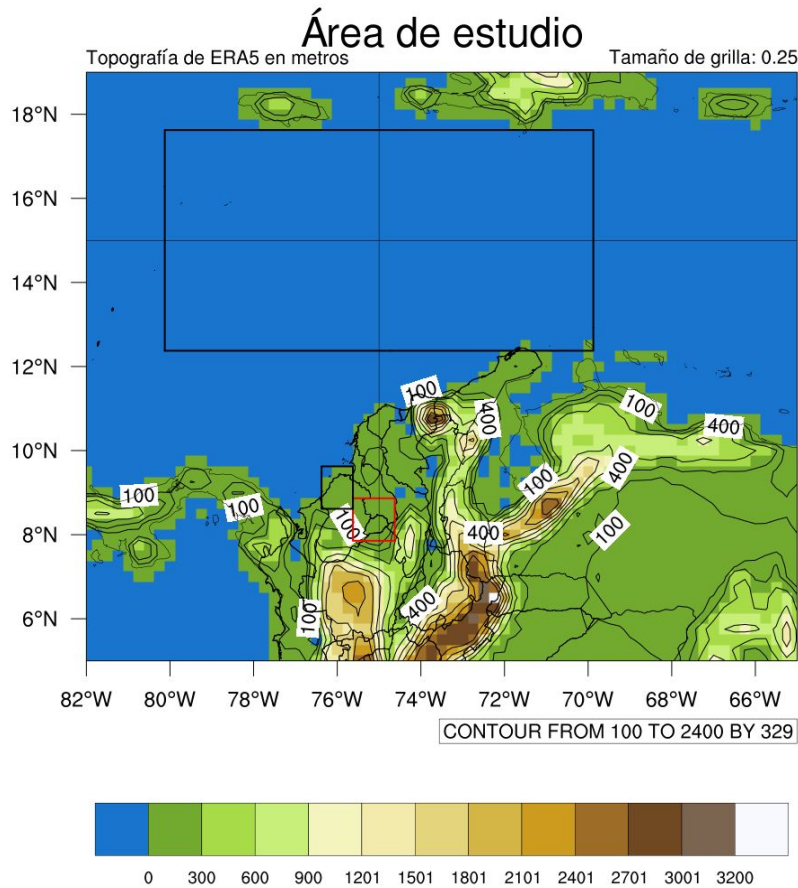


Figura 1.2. El área de estudio comprende parte del mar Caribe y el norte de Sudamérica, dentro de esta tres áreas divididas: Ayapel (8.74° N, 75.5° W, 7.98° N, 74.75° W), línea de costa (9.5° N, 76.25° W, 8.74° N, 75.75° W) y mar Caribe (17.5° N, 80° W, 12.5° N, 70° W).

superficie terrestre hasta aproximadamente 80 km de altura (aproximadamente 0.01 hPa), con una resolución de 31 km en la horizontal (0.28°). Sin embargo, el producto final del reanálisis está disponible para 40 niveles (de presión) en la atmósfera, a una resolución de 0.25° equivalente a 28 km. La información extraída de ERA5 para este estudio abarca cada hora, de cada día entre los años 1989-2018 (30 años).

En superficie, se utilizaron las variables de temperatura a 2m y viento a 10m de ERA5, además de información del IDEAM (<http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/pqrs>, <http://dhime.ideam.gov.co/webgis/home/>). Los datos provenientes de las estaciones del IDEAM se utilizaron con el propósito de: analizar los gráficos de series de tiempo y diagramas de dispersión de temperatura y vientos, para este último se analizaron hodógrafas. Posteriormente, mediante métodos estadísticos como correlaciones (R), RMSE y bias (B), se validaron los datos de superficie de ERA5, usando la información de estaciones meteorológicas como base de datos de referencia. Estos análisis son limitados a el estado y disponibilidad temporal de las estaciones del IDEAM.

Se estudió el comportamiento del viento a diferentes alturas (10 metros de altura, 925 y 850 hPa que en altura corresponden aproximadamente a 750 m y 1.500 m, respectivamente) y la temperatura a 2

metros sobre la superficie, a través de ciclos diarios de los cuales se extrajo información mediante mapas, de manera tal que estos muestren la evolución durante el transcurso del día (i.g las 24 horas del día). Luego, mediante análisis simples (inspección visual de mapas) se buscó estructuras tipo BMT. Este procedimiento se repitió para ciclos estacionales y ciclos anuales. Todos los mapas se hicieron a partir de la información de ERA5.

Respecto al ciclo anual del viento y la temperatura se calcularon anomalías, para estudiar las variaciones interanuales del viento y la temperatura e identificar cambios en la BMT (variabilidad) durante el periodo 1989-2018 en la región de interés. Con el propósito de explorar la relación entre el mar Caribe y la región de Ayapel, se estudió la temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) mediante mapas y series de tiempo. Se estudiaron además los resultados de los coeficientes de correlación entre la SST del Caribe, los campos de vientos a 10 metros, 975 y 925 hPa. Este análisis para los vientos a 925 hPa pueden arrojar luz sobre la posible influencia del jet de bajo nivel del Caribe en la circulación hacia Ayapel. La información necesaria para calcular los coeficientes y graficar las series de tiempo, se obtuvo mediante promedios espaciales sobre el mar Caribe, la región de Ayapel y la línea de costa (Figura 1.2); posteriormente se realizarán las pruebas de significancia estadística para los coeficientes de correlación en las series de tiempo.

Una vez adquiridos los datos fueron procesados usando los software de acceso libre: Python (link al website: <https://www.python.org/>), NCL (NCAR Command Language, link al website: <https://www.ncl.ucar.edu/>) y CDO (Climate Data Operators, link al website: <https://code.mpimet.mpg.de/>). Mediante estos se hicieron mapas, promedios espaciales y series de tiempo para nuestro estudio. Además de los cálculos estadísticos necesarios para los análisis.

2. Capítulo 2: Validación datos ERA5 con estaciones del IDEAM

En este capítulo se identificaron los sesgos de la temperatura a dos metros y la magnitud del viento de ERA5, utilizando datos horarios de estaciones meteorológicas del IDEAM, las estaciones se eligieron con el fin de contar con la representación del territorio ubicado en la costa caribeña hasta la ciénaga de Ayapel (Figura 1.1). Para la t2m se usaron datos de: Lorica, Montería y Ayapel; para la magnitud del viento se utilizaron los datos de las estaciones: Arboletes, *Montería*, Caucasia, *Cereté*, Majagual y *San Bernardo del Viento* (la estaciones en cursiva se usaron además para la dirección del viento). Es importante aclarar que los valores de ERA5 para las estaciones representan los promedios sobre la cuadrícula del modelo, mientras, los datos de las estaciones fueron los registrados en estas. Se calcularon las anomalías y los promedios diarios de cada conjunto de datos y a partir de estos se obtuvieron las correlaciones, RMSE (Root Mean Squared Error, por sus siglas en inglés y bias (B, error medio). Donde el RMSE representa la diferencia promedio cuadrática entre los pares del reanálisis y las observaciones, B es simplemente la distancia entre el promedio de ERA5 y el promedio de la observación, por lo tanto, ambos estadísticos expresan el sesgo del producto del reanálisis. Asimismo se hizo para los datos originales. Los resultados se anexan en las tablas 2.2 y 2.4. Por otro lado, los datos de observación del IDEAM no proporcionan una fuente sólida para la validación de ERA5 debido a la falta de datos, a los datos mal registrados y a las incipientes estaciones y años disponibles. Es por esto que resaltamos la necesidad de mejorar el sistema de registros de datos a nivel nacional para un verdadero apoyo técnico y científico a futuras investigaciones. RMSE y bias se calcularon de la forma:

$$B = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\bar{y}} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde

- x = ERA5
- y = Observaciones

Tabla 2.1: Estaciones con ubicación.

Estaciones	Código	Latitud	Longitud	Caja de ERA5
Arboletes	12045010	8.8469	-76.4319	8.75 , -76.50
Montería	13035501	8.8258	-75.8251	8.75 , -75.75
Caucasia	26255040	7.9833	-75.1166	8.00, -75.00
Cereté	13075030	8.8395	-75.8018	8.75, -75.75
Majagual	25025240	8.5426	-74.6273	8.50, -74.50
San Bern del Viento	13070010	9.3361	-75.9375	9.25, -76.00
Ayapel	25025030	8.2950	-75.1645	8.25, -76.25
Lorica	13085050	9.2527	-75.8444	9.25, -75.75



Figura 2.1: Mapa de ubicación de las estaciones. Adaptado de google earth pro.

Se presentan las series de tiempo del ciclo diario de los días/meses analizados en las tablas 2.2 y 2.4 con el propósito de identificar como reproduce ERA5 las variables t_{2m} y viento a 10 m en el transcurso del día. Además, para precisar cuáles horas del ciclo diario representa mejor y que horas del mismo subestima o sobrestima. Luego se presentan los diagramas de dispersión de los conjuntos de datos apareados (observaciones vs ERA5), para los datos originales y las anomalías de las variables t_{2m} y magnitud del viento a 10 m, con el fin de comparar de forma visual los datos de observaciones vs los datos del reanálisis. Se realizaron todas las series de tiempo y los diagramas de dispersión de la tabla 2.2 y 2.4 pero solo se muestran algunos.

Por último se presentan las hodrógrafas de los datos observados vs los datos del reanálisis, de tal manera que se evidencian las diferencias y similitudes en las componentes zonal (u) y meridional (v) del viento. Las hodógrafas nos ayudaron a identificar cuales son las posibles causas de los principales sesgos de ERA5 con la variable en superficie viento a 10 metros de altura.

2.1. Temperatura a 2 metros

2.1.1. Correlaciones, RMSE y bias

Las correlaciones (R) de las observaciones originales vs ERA5 (datos horarios) de la t_{2m} muestran los valores más interesantes de correlación en relación a los demás conjuntos analizados (anomalías y promedios diarios). Para las tres estaciones Lórica, Ayapel y Montería las correlaciones en la mayoría de los días/meses comparados son superiores a 0.8, a excepción de la estación Lórica donde los días correspondientes al mes de mayo presentan correlaciones de 0.20 (17- 31 de mayo

de 2009) y 0.46 (mayo de 2010), además, para los días 01-22 de junio de 2005, 01-15 de septiembre de 2006 y 01-20 de agosto de 2007 las correlaciones son un poco menores a 0.8 con valores respectivos de 0.79, 0.76 y 0.78. En Ayapel y Montería todas las correlaciones están por encima de 0.8. Lo anterior muestra que la variable t2m del modelo detrás del reanálisis ERA5 representa bien respecto a las observaciones a escala horaria ya que gran parte de las correlaciones son importantes y positivas ($R > 0.8$). Sin embargo, en la estación Lorica el reanálisis presenta un sesgo mayor comparado con las estaciones Montería y Ayapel sobretudo en el mes de mayo.

Las correlaciones pertenecientes a los promedios diarios (Observaciones vs ERA5, dato por día), muestran valores un poco más variados entre los días/meses analizados en relación a las correlaciones de los datos originales. En este conjunto de datos aparecen dos correlaciones negativas de -0.18 (enero de 2016, Montería) y -0.25 (17-31 de mayo de 2009, Lorica), el resto de correlaciones son positivas de las cuales la mayoría presentan números importantes ($0.4 < R < 0.93$), con excepción de las correlaciones negativas mencionadas anteriormente y las correlaciones: 0.35 (1-15 de septiembre de 2006, Lorica), 0.34 (mayo de 2010, Lorica) y 0.25 (enero de 2016, Ayapel). Al presentar correlaciones importantes positivas la mayoría de los días/meses analizados en el promedio diario, se concluye que ERA5 reproduce de manera semejante a la realidad. Las correlaciones para las anomalías respecto a los datos originales muestran los valores menos interesantes para esta variable. Sin embargo, nuevamente la mayoría muestran valores donde $0.4 < R < 0.73$, es decir, ERA5 presenta más problemas representando las anomalías en comparación a los conjuntos anteriormente analizados. Aunque, se resalta que la mayoría de valores de R se encuentran entre 0.4 y 0.73. observados y el reanálisis para las tres estaciones presentan valores en magnitud cercanos a cero subestimando o sobreestimando en algunas ocasiones (ver tabla 2.3 y Figuras 2.3 a Figura 2.6). El mayor sesgo para la temperatura a 2 metros de ERA5 corresponde a los días 17-31 de mayo de 2009, donde $B = -0.0826$ (8.26 %), este sesgo negativo también se evidencia en la gráfica de la serie de tiempo de dicha fecha en la estación Lorica donde ERA5 subestima todos los valores del ciclo diurno en un rango promedio entre -1.0 y -4.0 (no se muestra).

Tabla 2.2: Cálculos de correlaciones (R), RMSE y bias (B) para los datos originales, anomalías y promedios diarios.

		Temperatura a 2 metros						B
		Originales		Anomalías		Promedios diarios		
Estaciones	fechas	R	RMSE (°C)	R	RMSE (°C)	R	RMSE (°C)	
Lorica	2005 junio 01-22	0.79	1.81	0.33	0.95	0.70	0.81	-0.00499
	2005 julio 16-30	0.86	1.84	0.49	1.26	0.85	0.72	-0.01748
	2006 sep 1-15	0.76	2.04	0.18	1.19	0.35	0.92	-0.02291
	2007 ago 1-20	0.78	1.88	0.28	1.10	0.48	0.75	-0.01303
	2009 may 17-31	0.20	4.53	-0.15	2.56	-0.25	4.05	-0.08266
	2010 febrero	0.89	1.69	0.65	1.44	0.77	1.09	0.03577
	2010 marzo	0.86	1.49	0.60	1.09	0.81	0.67	0.01770

	2010 abril	0.85	1.62	0.54	0.95	0.84	0.52	0.00227
	2010 mayo	0.46	3.73	0.26	1.75	0.34	3.14	-0.04394
Ayapel	2015 ene 16-31	0.88	1.59	0.26	1.12	0.47	0.87	0.022267
	2015 abril	0.89	1.57	0.60	0.92	0.82	0.67	-0.00780
	2015 may 01-29	0.87	1.64	0.64	0.82	0.83	0.92	0.015005
	2015 junio	0.89	1.44	0.68	0.73	0.89	0.68	0.010798
	2015 julio	0.87	1.54	0.67	0.75	0.84	0.75	0.006690
	2015 agosto	0.88	1.45	0.58	0.82	0.83	0.55	0.001603
	2015 septiembre	0.85	1.69	0.49	0.76	0.69	0.82	0.005714
	2015 oct 01-16	0.83	1.77	0.46	0.84	0.72	0.98	0.016391
	2015 dic 01 - 20	0.84	1.57	0.33	0.86	0.52	0.71	0.005878
	2016 enero	0.89	1.98	0.24	1.62	0.25	1.37	0.04123
	2016 feb 15-29	0.93	2.13	0.39	1.93	0.78	1.69	0.05570
	2016 mar 01-28	0.93	2.08	0.39	1.78	0.45	1.54	0.04659
	2016 abril 01-19	0.90	1.61	0.38	0.91	0.60	0.69	0.00263
	2016 mayo	0.86	1.56	0.62	0.65	0.84	0.76	0.01175
	2016 junio	0.88	1.49	0.60	0.84	0.85	0.54	0.00315
	2016 julio 09-31	0.84	1.63	0.39	0.87	0.69	0.65	-0.00486
	2016 agosto	0.86	1.60	0.50	0.85	0.73	0.74	0.00576
	2016 septiembre	0.80	1.76	0.42	0.88	0.59	0.91	0.01014
2016 octubre	0.87	1.40	0.37	0.78	0.62	0.50	-0.00251	
Montería	2015 Junio	0.92	1.48	0.74	0.93	0.92	0.78	-0.01912
	2015 Julio	0.86	1.75	0.67	0.60	0.88	0.70	-0.00521
	2015 agosto	0.90	1.39	0.64	0.69	0.90	0.49	-0.00887
	2015 septiembre	0.85	1.59	0.58	0.45	0.78	0.81	-0.00698
	2015 octubre	0.88	1.39	0.57	0.52	0.79	0.66	-0.00963
	2015 noviembre	0.88	1.35	0.65	0.51	0.83	0.69	-0.01202
	2015 diciembre	0.93	1.28	0.69	0.85	0.82	0.59	-0.01510
	2016 enero	0.92	1.27	0.31	0.71	-0.18	0.77	0.01027
	2016 febrero	0.96	1.39	0.50	1.15	0.65	1.10	0.03601
	2016 marzo	0.96	1.38	0.63	1.16	0.76	1.12	0.03609
	2016 abril	0.90	1.37	0.57	0.60	0.74	0.65	-0.00355
	2016 mayo	0.88	1.43	0.74	0.46	0.92	0.65	-0.00598
2016 junio	0.91	1.32	0.68	0.70	0.89	0.68	-0.01622	

	2016 julio 01-23	0.89	1.47	0.57	0.80	0.84	0.74	-0.02022
	2017 enero	0.95	1.22	0.65	0.73	0.76	0.55	0.00590
	2017 febrero	0.96	1.59	0.54	1.30	0.83	1.22	0.04108
	2017 mar 01-16	0.91	1.48	0.58	0.69	0.77	0.83	0.01140
	2017 abril 05-19	0.90	1.42	0.65	0.68	0.74	0.81	0.01016
	2017 mayo	0.88	1.33	0.60	0.58	0.83	0.60	-0.01172
	2017 junio	0.90	1.26	0.65	0.58	0.78	0.64	-0.00762
	2017 julio	0.90	1.39	0.59	0.71	0.78	0.65	-0.00943
	2017 agosto	0.89	1.40	0.51	0.71	0.75	0.64	-0.01328
	2017 septiembre	0.83	1.57	0.51	0.58	0.66	0.87	-0.01610
	2017 nov 01-15	0.91	1.85	0.46	1.56	0.83	1.51	-0.05038

Tabla 2.3: Promedios de Cálculos de correlaciones (R), RMSE y bias (B) para los datos originales, anomalías y promedios diarios.

Promedios							
Estaciones	B	Originales		Anomalías		Promedios diarios	
		R	RMSE (°C)	R	RMSE (°C)	R	RMSE (°C)
Lorica	-0,01273	0,71	2,30	0,35	1,34	0,53	1,45
Ayapel	0,07727	0,83	2,37	0,46	1,68	0,66	1,60
Montería	-0,00336	0,91	1,44	0,60	0,77	0,77	0,79

2.1.2. Ciclo diurno

En febrero (Figura 2.2) ERA5 sobrestima la mayor parte de las horas del ciclo diurno en las estaciones Montería y Ayapel, en Lorica por el contrario el pico de temperaturas máximas (10:00:00 - 16:00:00, HL) se asemeja más a la realidad pero presenta mayor sesgo en las horas 00:00:00 - 07:00:00 y 18:00:00 - 23:00:00 HL, con respecto a las demás estaciones ya que sobrestima hasta alrededor de 2.0 ° C aproximadamente. Similar a febrero, pero para los días/meses de marzo (no se muestra) en las estaciones Ayapel (01-28 de marzo de 2016) y Montería (marzo de 2016) ERA5 también sobrestima los valores a lo largo del ciclo diurno de temperatura (excepto dos horas en la estación Ayapel donde subestima: 11:00:00 y 17:00:00, HL). Esta vez, para marzo en Lorica (marzo de 2010) ERA5 subestima en las horas de máxima temperatura (10:00:00 - 16:00:00, HL) y sobrestima en las horas de la t2m mínimas (00:00:00 - 07:00:00 y 18:00:00 - 23:00:00). Para la fecha 01-16 de marzo de 2017 en la estación Montería ERA5 representa el valor máximo del ciclo diurno a la hora 14:00:00 y al igual que el dato observado el valor reproducido por el reanálisis es de de 34.5 °C, las horas siguientes 15:00:00 - 17:00:00, HL ERA5 subestima los valores de la t2m y sobrestima las horas 00:00:00 - 07:00:00 y 19:00:00 - 23:00:00, HL.

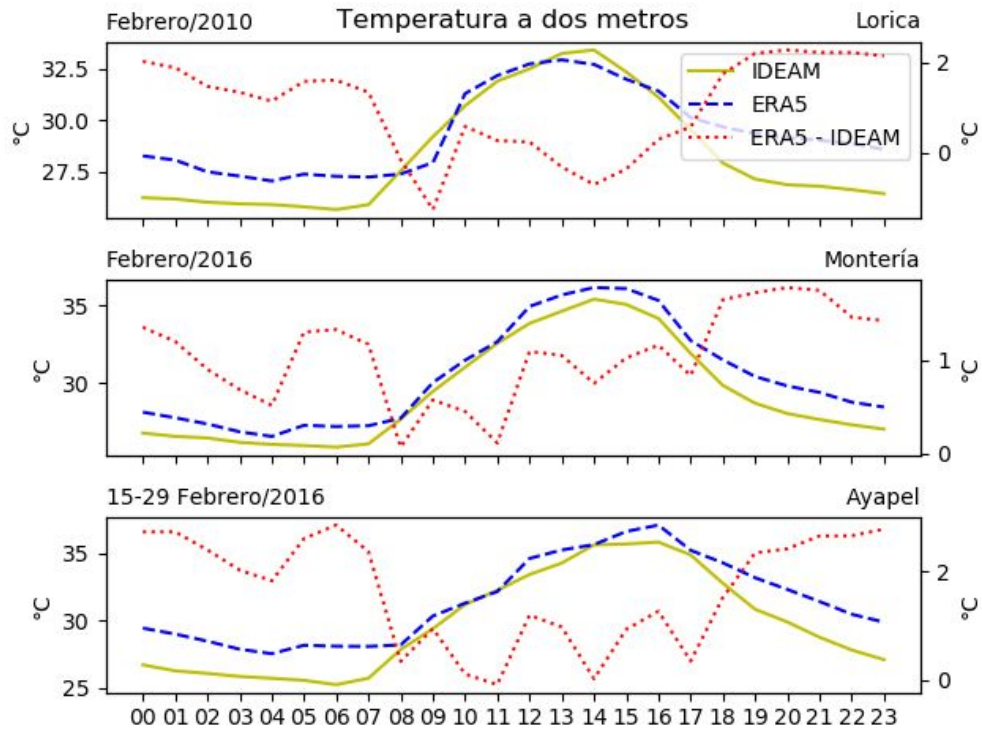


Figura 2.2: Series de tiempo del ciclo diurno de la temperatura a dos metros según observaciones y ERA5 para el mes de febrero en las estaciones Lorica, Montería y Ayapel.

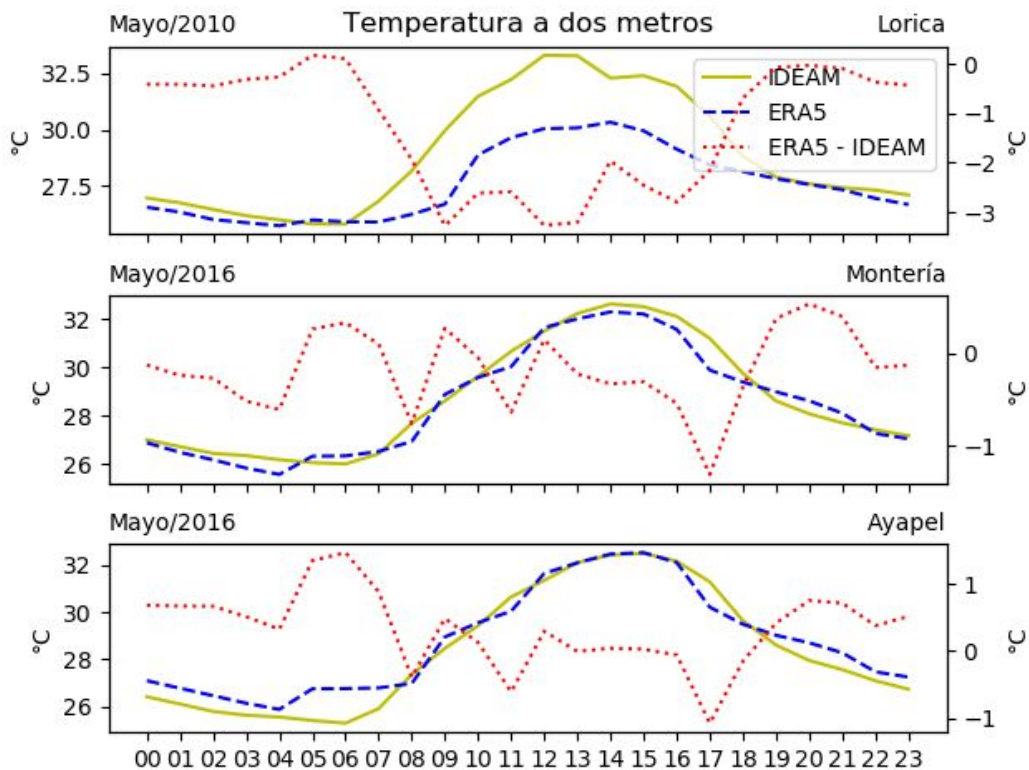


Figura 2.3: Series de tiempo del ciclo diurno de la temperatura a dos metros según observaciones y ERA5 para el mes de mayo en las estaciones Lorica, Montería y Ayapel.

En los días/meses analizados de mayo y julio (Figura 2.3 y Figura 2.4) para las estaciones Montería y Ayapel, ERA5 presenta sesgos en el ciclo diurno con un rango de diferencias de entre 1 y -1 para Ayapel y 0.5 y -1 para Montería, mientras que para la estación Lórica ERA5 subestima las horas máximas de temperatura (10:00:00 - 16:00:00, HL) con hasta -1.0 a -2.0 °C de diferencia. Por otro lado, para los días del 17-31 de mayo de 2009 de la estación Lórica (no se muestra) ERA5 subestima todas las horas del día con un rango de distancia promedio entre -1 y -4 °C, mayor en las temperaturas máximas (10:00:00 - 16:00:00, HL). Esta subestimación de ERA5 en las fechas correspondientes a mayo para Lórica es la causa de las bajas correlaciones y los sesgos mayores presentados en la Tabla 2.2.

En el mes de septiembre (Figura 2.5) ERA5 subestima el pico de temperaturas máximas (10:00:00 - 17:00:00, HL) en las tres estaciones comparadas. Sin embargo, la estación que más subestima dicho pico de valores máximos es Lórica con hasta -2.0° C de diferencia. Mientras tanto, reproduce con un menor sesgo las horas 00:00:00-07:00:00 y 19:00:00-23:00:00 HL en las estaciones Lórica y Montería y en cuanto a Ayapel sobrestima dichas horas en aproximadamente 0.5-1.0 °C. Es importante mencionar que el resto de los días/meses analizados que no se muestran pertenecientes a enero, abril, junio, julio, agosto, octubre, septiembre, noviembre y diciembre de las tres estaciones, ERA5 reproduce los valores de manera similar a septiembre de 2015 en Ayapel (Figura 2.5, Ayapel) donde los valores en el transcurso del ciclo diurno de temperatura subestiman las horas 10:00:00-17:00:00, HL y sobrestiman las 00:00:00-07:00:00 y 18:00:00-23:00:00, HL. Por último, En todas las series de tiempo realizadas, ERA5 reproduce de forma errónea el mínimo valor de temperatura debido a que lo presenta a las 04:00:00 HL, mientras todas las observaciones muestran dicho mínimo a las 6:00:00 HL.

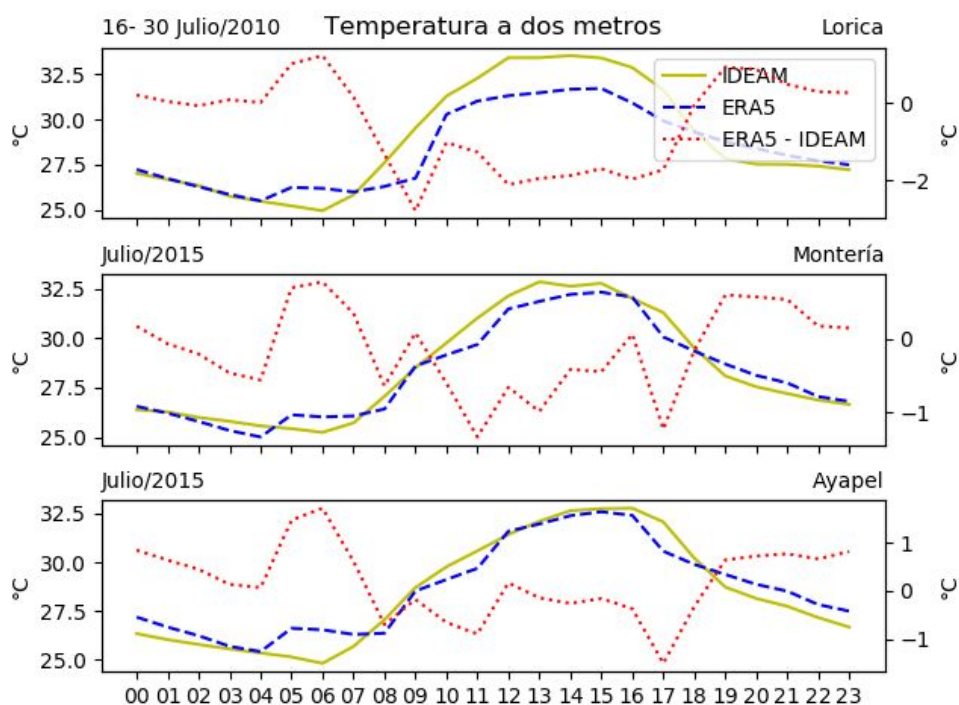


Figura 2.4: Series de tiempo del ciclo diurno de la temperatura a dos metros según observaciones y ERA5 para el mes de julio en las estaciones Lórica, Montería y Ayapel.

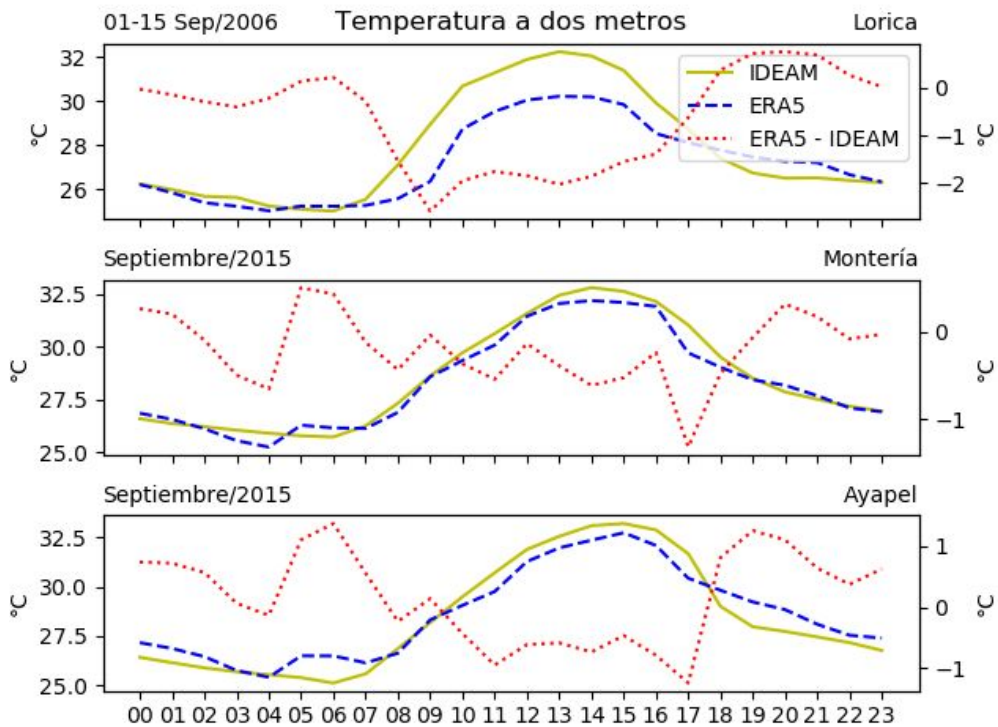


Figura 2.5: Series de tiempo del ciclo diario de la temperatura a dos metros según observaciones y ERA5 para el mes de septiembre en las estaciones Lorica, Montería y Ayapel.

2.1.3. Diagramas de dispersión

De la Figura 2.6 a la Figura 2.17 se muestran los diagramas de dispersión de los datos originales y las anomalías de la variable t_2m . De una manera general tanto para los gráficos a partir de los valores originales mostrados como para los que no se muestran; los datos apareados tienden a ubicarse en el cuadrante I y el cuadrante III, por lo tanto, se resalta la relación lineal de ambos conjuntos de información para la variable en cuestión. De ahí, las correlaciones positivas importantes. Respecto a los diagramas de dispersión para las anomalías, los datos apareados no se comportan de una forma tan homogénea en las diferentes estaciones como la descrita anteriormente, por lo tanto, en algunas figuras no se observa una relación lineal clara o hasta se evidencia una relación inversa en los conjuntos de datos (p.e ver Figura 2.8, Figura 2.9 y Figura 2.15, para anomalías, derecha).

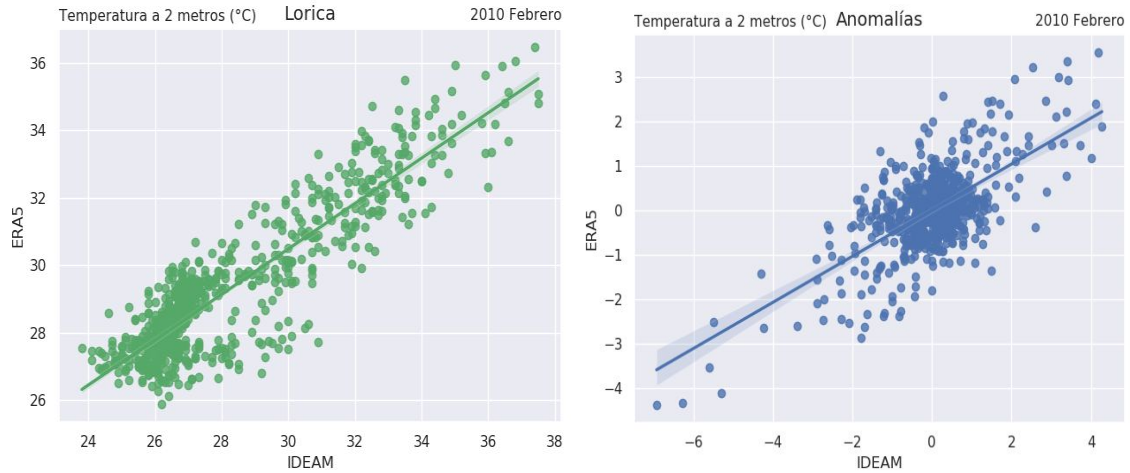


Figura 2.6: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Lorica febrero de 2010.

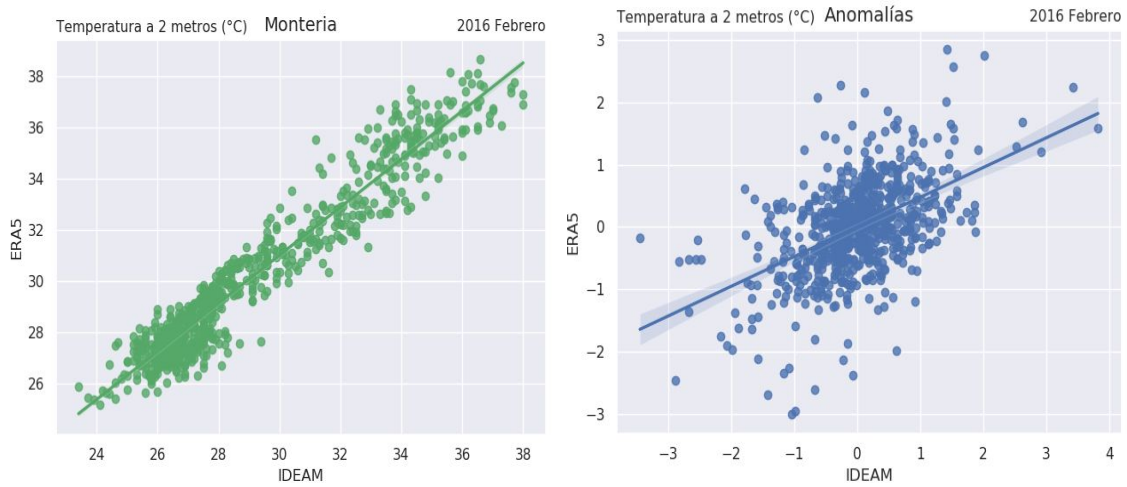


Figura 2.7: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Montería febrero de 2016.

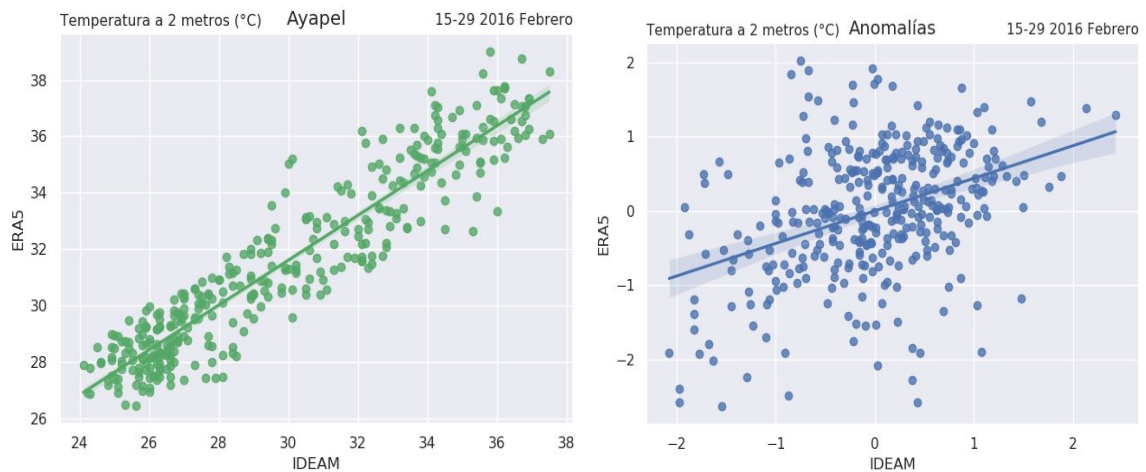


Figura 2.8: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Ayapel 15-29 de febrero de 2016.

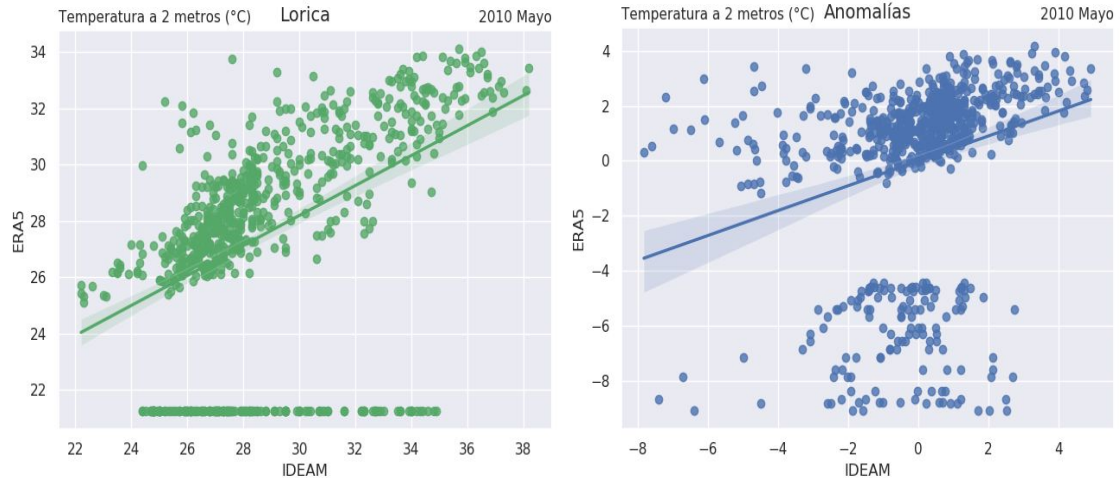


Figura 2.9: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Lorica mayo de 2010.

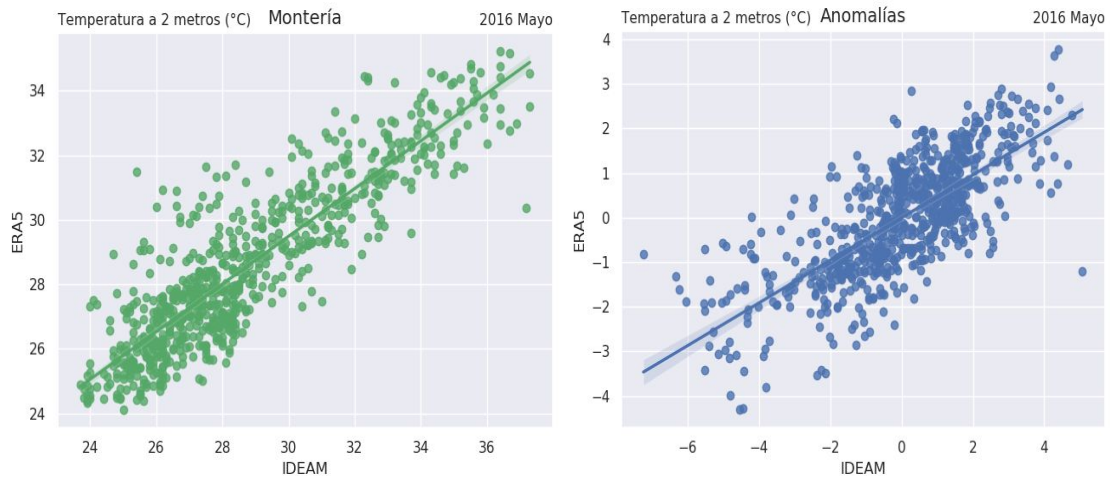


Figura 2.10: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Montería mayo de 2016.

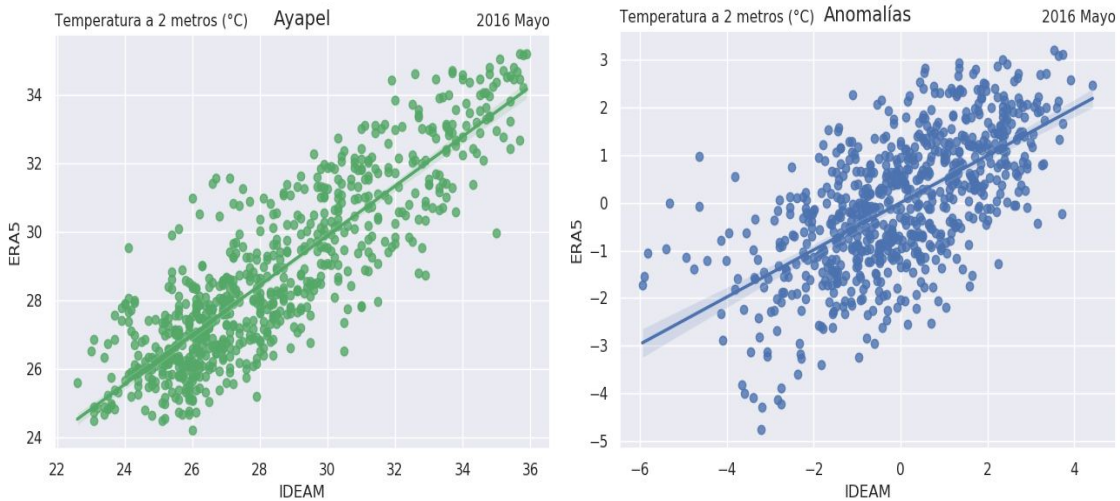


Figura 2.11: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Ayapel mayo de 2016.

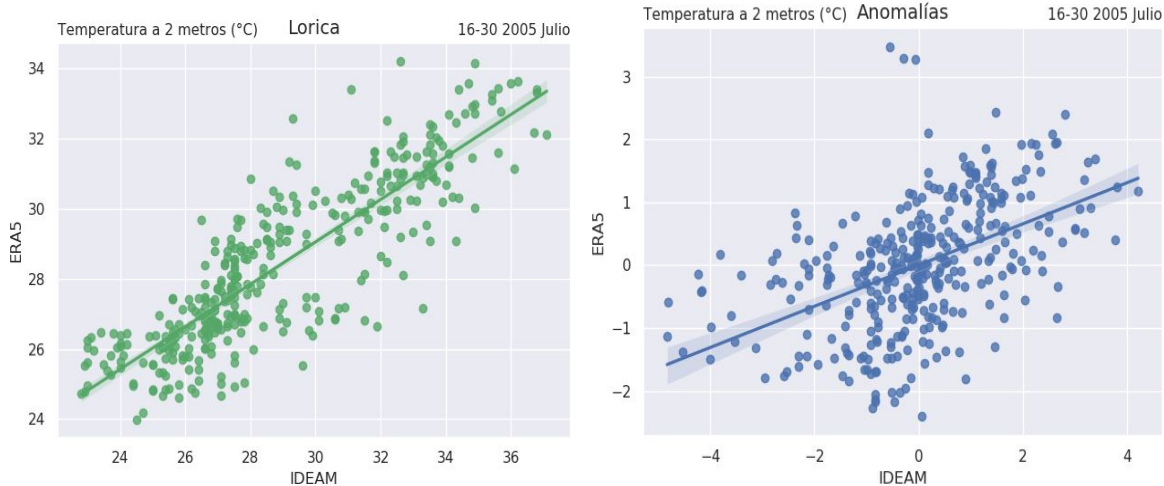


Figura 2.12: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Lorica 16-30 de julio de 2005.

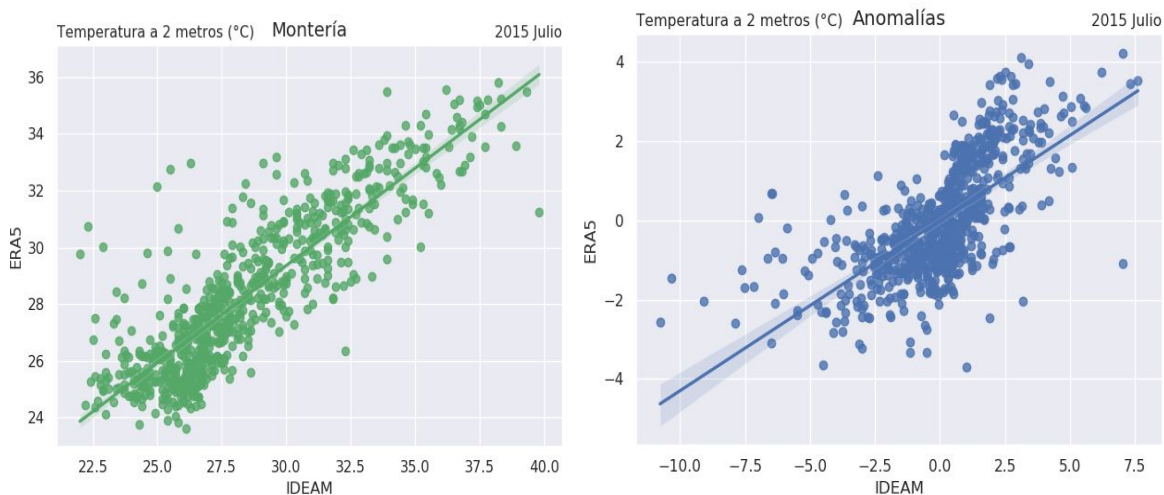


Figura 2.13: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Montería julio de 2015.

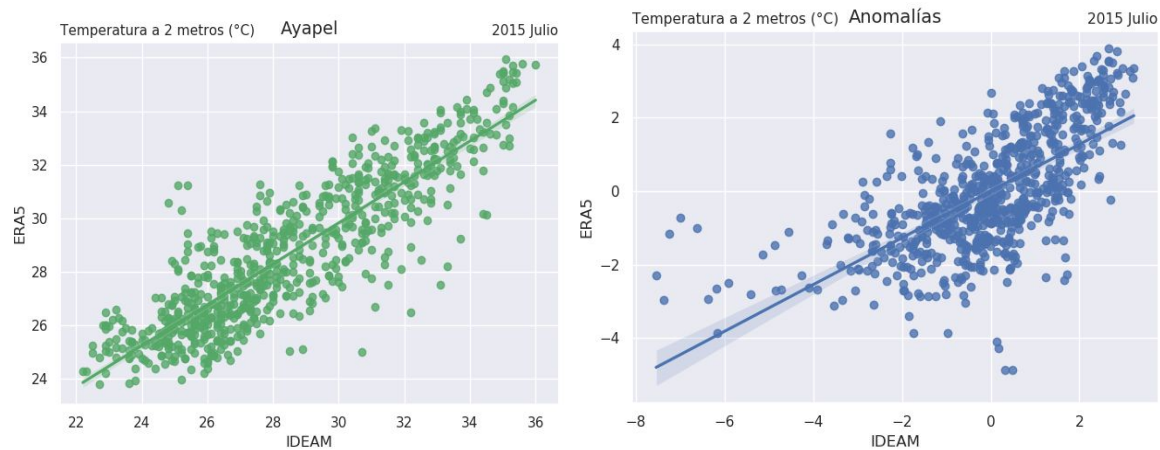


Figura 2.14: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Ayapel julio de 2015.

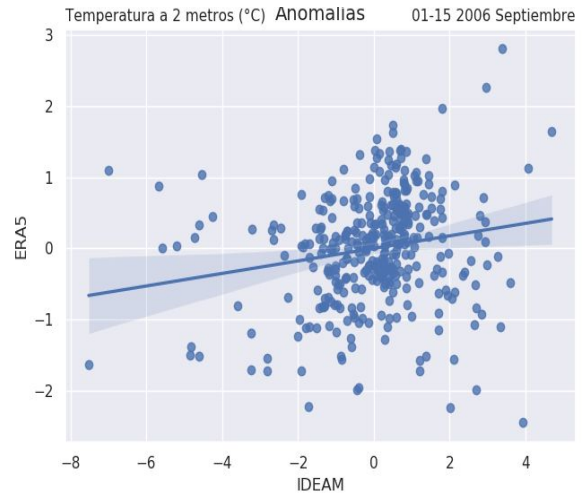
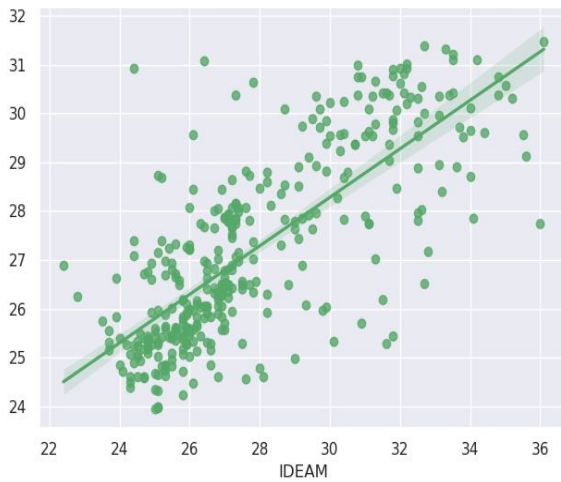


Figura 2.15: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Lorica septiembre de 2006.

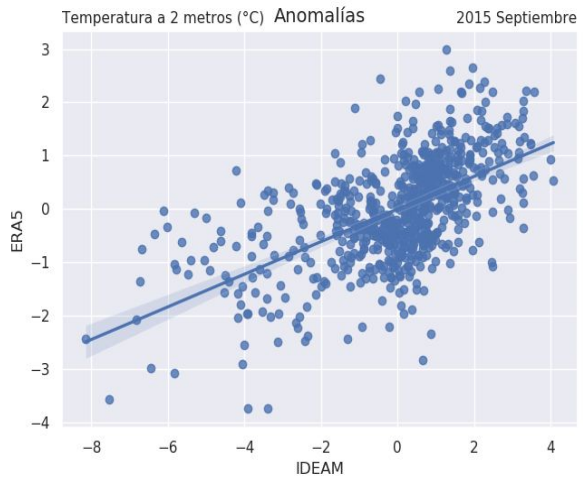


Figura 2.16: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Montería septiembre de 2015.

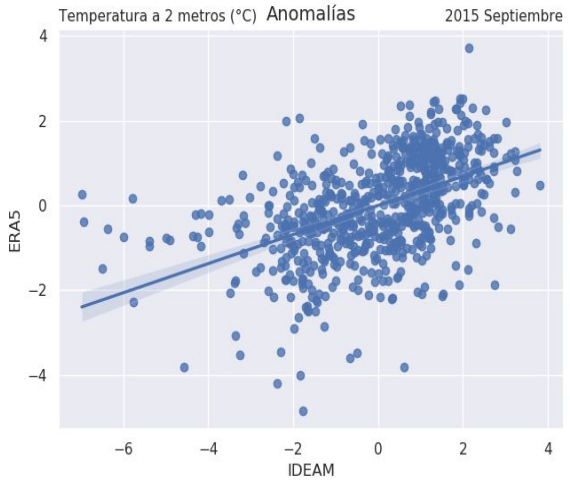
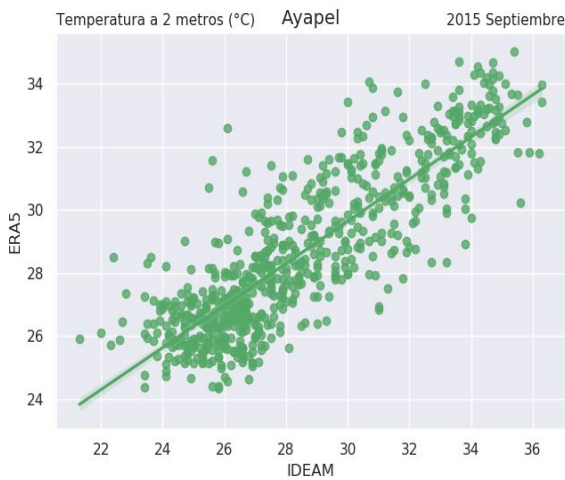


Figura 2.17: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Ayapel septiembre de 2015.

2.2. Magnitud del viento a 10 metros

2.2.1. Correlaciones, RMSE y bias

Los coeficientes de correlación (R) calculados entre las observaciones del IDEAM y ERA5 no fueron valores importantes para las diferentes distribuciones estudiadas (datos originales, anomalías, y promedios diarios), lo cual indica que las magnitudes del viento de ERA5 se distancian de las del IDEAM, al menos para los pixeles y fechas disponibles. Para los conjuntos analizados de datos originales y anomalías, las estaciones que mejor desempeño tuvieron apenas y alcanzaron valores como: 0.35, 0.32 y 0.29 para los periodos entre enero-abril, junio-septiembre 22 del 2010, y junio-julio de 2011, respectivamente para los datos originales. Mientras que el panorama para las anomalías es aún peor con valores de 0.24 y 0.20 en junio-julio de 2011 y junio-septiembre 22 del 2010. Todos los valores mencionados anteriormente fueron en la estación Montería. Se identificó que ERA5 reproduce mejores coeficientes de correlación entre los promedios diarios. Debido a que se obtuvo la correlación más interesante de 0.47, la cual correspondió a la estación Montería entre junio - julio de 2011; otra correlación importante se obtuvo para la misma estación entre el periodo junio - septiembre 22 de 2010 con un valor de 0.42. Estos dos valores junto con el obtenido en Cereté de 0.40 en el periodo noviembre-diciembre de 2011, fueron los únicos coeficientes que superaron 0.4 de todos los conjuntos analizados.

Los valores de correlaciones entre las distribuciones estudiadas no presentaron patrones identificables entre las correlaciones calculadas, ya que ERA5 puede tener más similitudes con las observaciones en los datos suavizados (diarios) pero tener un pobre desempeño en los datos horarios originales (i.e. horarios) y uno aún peor en las anomalías. Por ejemplo para el periodo del 03-27 abril de 2001 la estación Majagual en la escala diaria obtuvo un valor de 0.32, pero en anomalías y datos horarios los valores fueron cercanos al cero. Un comportamiento similar se identificó en la misma estación en los meses de noviembre y diciembre. Asimismo, para las observaciones pertenecientes a San Bernardo del Viento y a marzo del 2007 para Arboletes. También se identificaron casos donde la correlación de los datos horarios fue mayor y la de diarios fue menor. Por ejemplo para la estación Montería entre enero-abril de 2010, la correlación de los datos horarios fue de 0.35, pero las correlaciones entre anomalías y promedios diarios fueron cercanos a cero. También se presentaron valores cercanos a cero para las tres distribuciones escogidas (horarios, anomalías y promedios diarios).

Los bias (o sesgos) más bajos se obtuvieron en las estaciones de Arboletes, Montería y San Bernardo del Viento con valores cercanos a cero, a pesar de esto, los valores del RMSE para estas estaciones fueron altos, indicando que la magnitud de las diferencias entre IDEAM y ERA5 es grande. Por consiguiente los valores que se obtuvieron para los sesgos apuntaban a que hay tanto sobrestimaciones como subestimaciones que al ser promediadas dentro de la operación del bias dieron un resultado pequeño, pero el complemento, es decir, el RMSE muestra que en magnitud estas diferencias positivas y negativas son amplias. De otro modo, las estaciones de Caucasia y Majagual tuvieron sesgos menos marcados, el bias como el RMSE dieron resultados relativamente

pequeños, de ahí se entendería que la distancia promedio entre las observaciones y el reanálisis no son tan lejanas como lo fueron para Arboletes, Montería o San Bernardo del Viento. Sin embargo, la relación lineal entre los conjuntos no es buena, ya que los coeficientes de correlación dieron cercanos a cero, por tanto se concluye que para estas dos estaciones: los rangos de valores son similares, pero la evolución temporal es independiente en cada conjunto. Finalmente la estación Cereté obtuvo el bias más alto con un valor de 0.91 (ó 91%), al igual que los valores del RMSE para las diferentes distribuciones temporales. Por los resultados de estos estadísticos se infiere que ERA5 sobreestima en gran medida respecto a las observaciones.

Tabla 2.4: Cálculos de correlaciones (R), RMSE y bias (B) para los datos originales, anomalías y promedios diarios.

		Velocidad del viento						B
		Originales		Anomalías		Promedios diarios		
Estaciones	Fechas	R	RMSE (m/s)	R	RMSE (m/s)	R	RMSE (m/s)	
Arboletes	2003 abril	0.21	1.77	0.09	0.54	0.17	1.35	-0.15913
	2006 dic 02-30	0.06	1.34	0.08	0.51	0.19	0.69	-0.03676
	2007 mar 02-30	0.14	2.18	0.10	0.55	0.26	0.78	-0.07499
	2001 sep - oct	0.10	1.54	0.06	0.45	0.15	0.90	0.20710
Montería	2010 abril	0.22	1.29	0.14	0.89	0.19	0.74	-0.42103
	2011 sep	-0.05	1.14	-0.02	0.64	-0.12	0.60	-0.35992
	2010 Ene-Abr	0.35	1.28	0.05	0.32	0.02	0.72	-0.09141
	2011 Jun-Jul	0.29	1.04	0.24	0.31	0.47	0.47	0.27599
	2010 jun-sep 22	0.32	0.94	0.20	0.17	0.37	0.42	0.21149
	2013 diciembre	0.20	0.97	0.22	0.61	0.20	0.57	0.48616
Caucasia	1990 may 02-15	-0.05	0.51	-0.04	0.34	-0.11	0.17	0.17000
	1990 dic 14-31	-0.02	0.61	-0.02	0.45	0.10	0.30	0.357320
Cerete	2011 nov - dic	0.24	1.25	0.18	0.57	0.40	0.96	0.91242
Majagual	2001 feb 01-27	-0.03	0.88	0.005	0.47	0.15	0.32	-0.12170
	2001 oct 04-25	-0.04	1.13	-0.06	0.79	-0.13	0.74	-0.42224
	2001 abr 03-27	-0.02	1.06	0.06	0.75	0.32	0.66	-0.34644
	2001 dic 04 - 25	-0.09	0.92	-0.02	0.67	0.25	0.53	-0.33255
	2001 nov	-0.04	1.40	-0.01	0.63	0.24	0.67	-0.38388
S. B. Viento	2009 ene 05-20	-0.12	2.17	0.15	1.91	0.37	0.89	0.00076

Tabla 2.5: Promedios cálculos de correlaciones (R), RMSE y bias (B) para los datos originales, anomalías y promedios diarios.

Promedios							
Estaciones	B	Originales		Anomalías		Diarios	
		R	RMSE (m/s)	R	RMSE (m/s)	R	RMSE (m/s)
Arboletes	-0,015945	0,13	1,71	0,09	0,52	0,20	0,94
Montería	0,016881	0,23	1,12	0,14	0,49	0,19	0,59
Caucasia	0,263664	-0,04	0,56	-0,03	0,40	-0,01	0,24
Cerete	0,912424	0,24	1,26	0,18	0,57	0,41	0,96
Majagual	-0,321363	-0,05	1,08	-0,01	0,67	0,17	0,59
S. B.del Viento	0,000760	-0,12	2,17	0,15	1,91	0,38	0,90

2.2.2. Ciclo diario

En la Figura 2.18 se puede apreciar que ERA5 logró reproducir los picos máximos de magnitud del viento dentro del ciclo diario con un rango de error de aproximadamente 0.0 m/s, aunque para el resto de horas sobrestimó los valores. Asimismo, para el ciclo diario en la estación Arboletes en el periodo del 02-30 marzo del 2007 (no se muestra), ERA5 también logró representar el pico máximo a las 16:00:00 HL con una subestimación de - 0.5 m/s. El RMSE para los periodos y estaciones

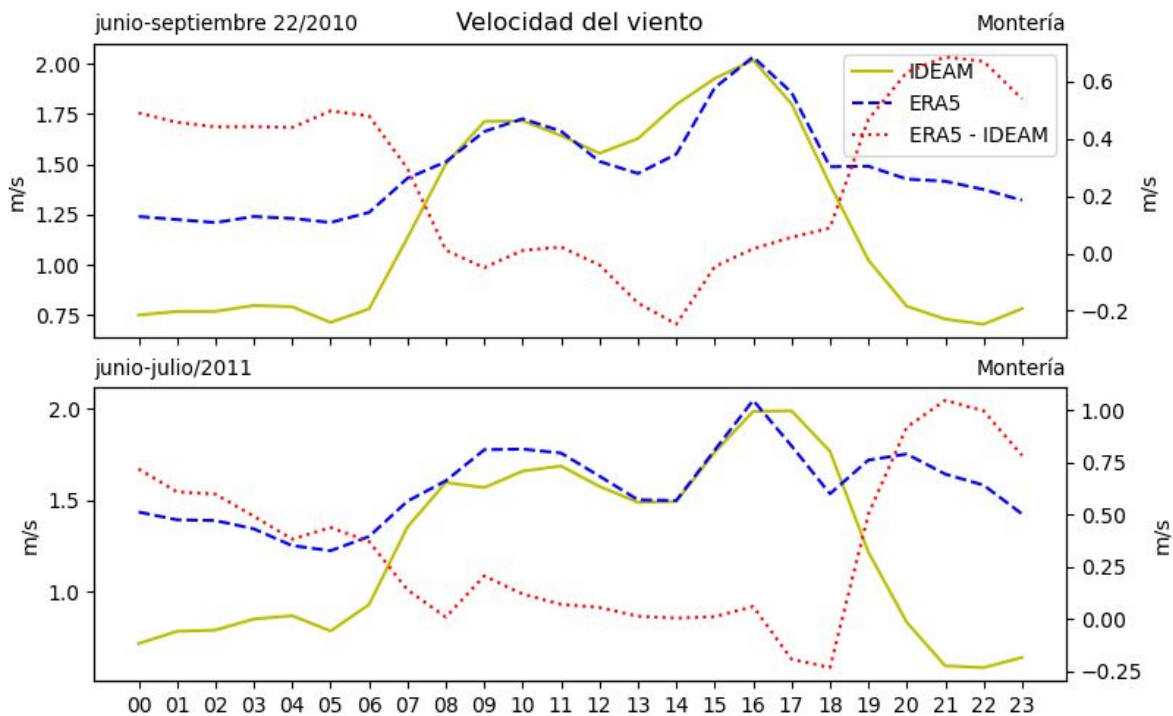


Figura 2.18: Series de tiempo del ciclo diario de la magnitud del viento según observaciones y ERA5 para el mes de septiembre (arriba) y junio-julio (abajo) en la estación Montería.

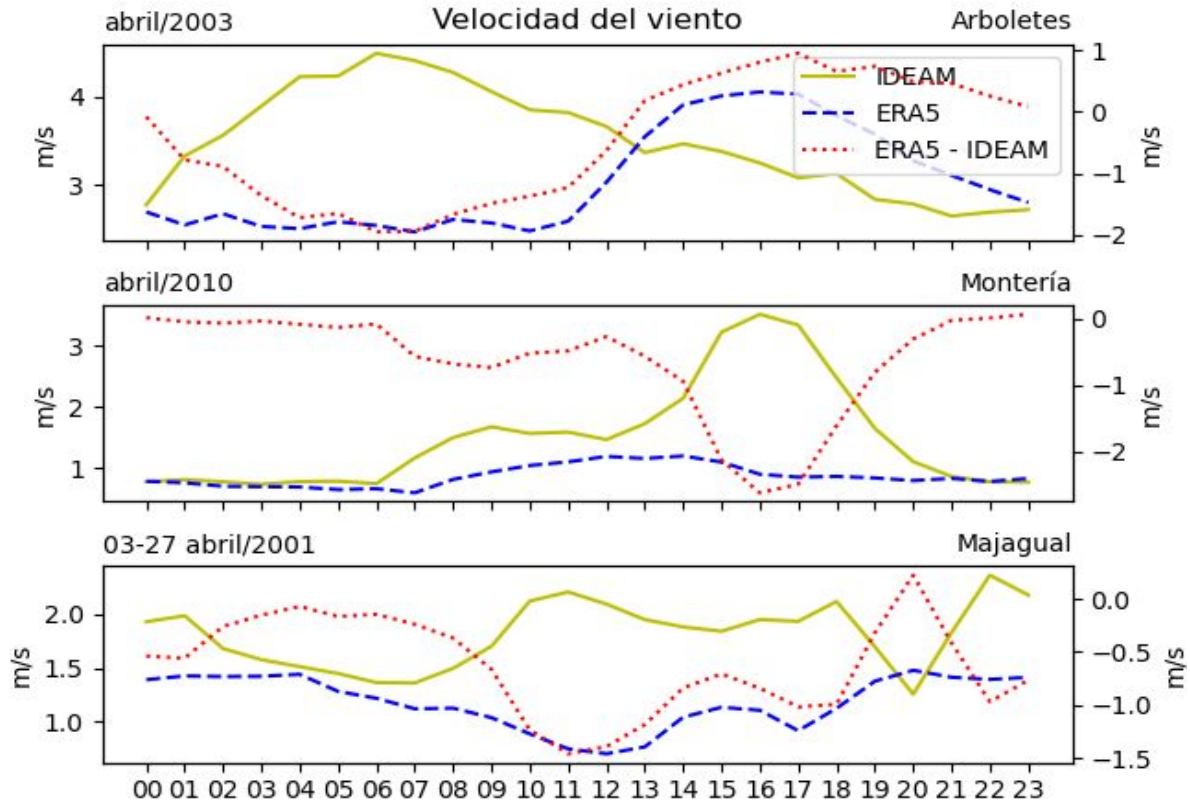


Figura 2.19: Series de tiempo del ciclo diario de la magnitud del viento según observaciones y ERA5 para el mes de abril en las estaciones Arboletes, Montería y Majagual.

mencionadas no supero los 1.2 m/s; el bias para las observaciones en Arboletes fue del -0.07, mientras que para Montería estuvo alrededor del 0.23, lo que indica que los valores de ERA5 son cercanos a las observaciones de IDEAM. Esto sugiere que el pixel apareado de ERA5 a la estación Montería tiene un mejor desempeño que el resto, especialmente para la temporada de mitad de año.

De la Figura 2.19 a 2.22 se muestran las series de tiempo correspondientes a las estaciones que representan la ruta del viento entre la línea de costa y Ayapel (ver Figura 1.1). Así, la estación de la primera gráfica se encuentra ubicada sobre línea de costa, la siguiente entre costa y Ayapel y la última se encuentra alrededor de Ayapel. Se escogió el mismo mes para las series de tiempo, sin embargo, dada la disponibilidad de datos estos no pertenecen al mismo año, y la discusión a continuación se encuentra sesgada por estas condiciones.

Para el mes de abril (Figura 2.19), los datos observados en Arboletes muestran un pico máximo alrededor de las 06:00:00 HL, a partir de las 12:00:00 HL los vientos sobre costa se debilitan y los vientos continente adentro se fortalecen. En efecto la estación Montería muestra valores altos entre las 15:00:00-18:00:00 HL y la estación Majagual entre las 10:00:00-18:00:00 HL. ERA5 ni siquiera se acerca a representar estos picos máximos, aunque tiene similitudes con las estaciones Montería y Majagual entre las 00:00:00 - 07:00:00 HL (periodo de magnitudes mínimas). En cuanto a la estación ubicada en la línea de costa ERA5 exhibe un ciclo diario opuesto.

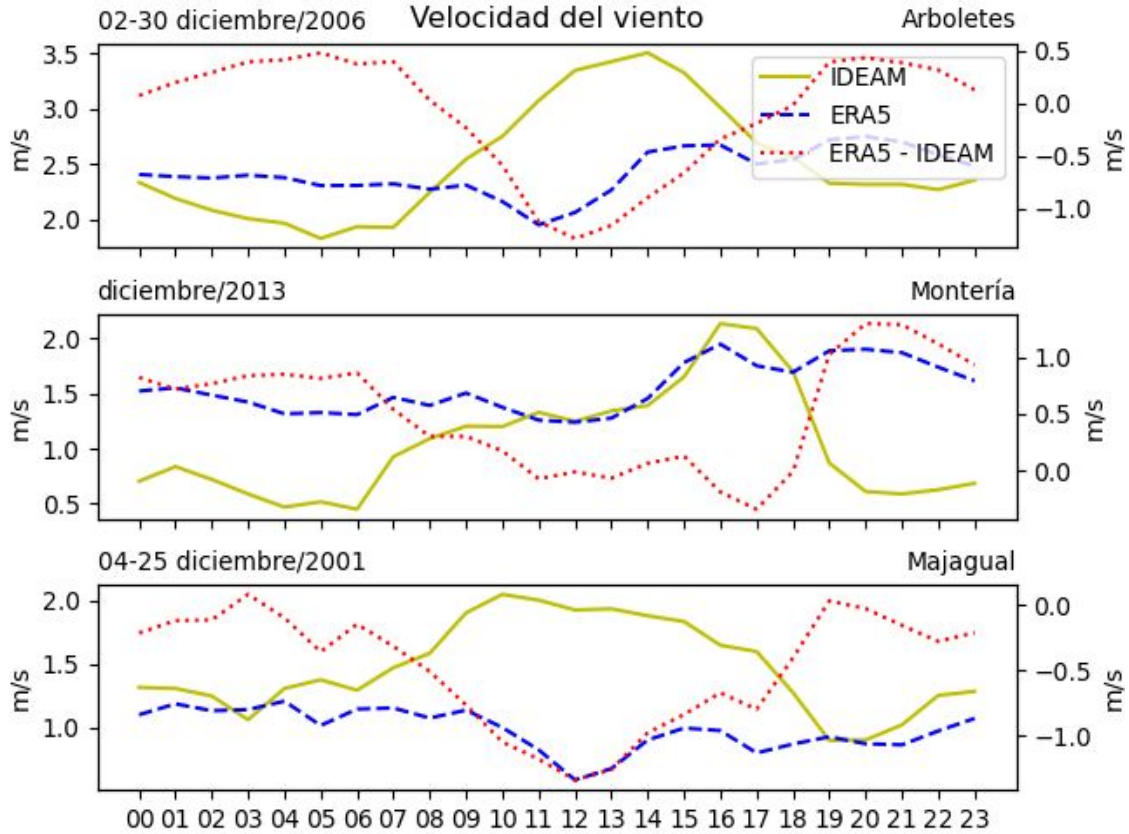


Figura 2.20: Series de tiempo del ciclo diario de la magnitud del viento según observaciones y ERA5 para el mes de diciembre en las estaciones Arboletes, Montería y Majagual.

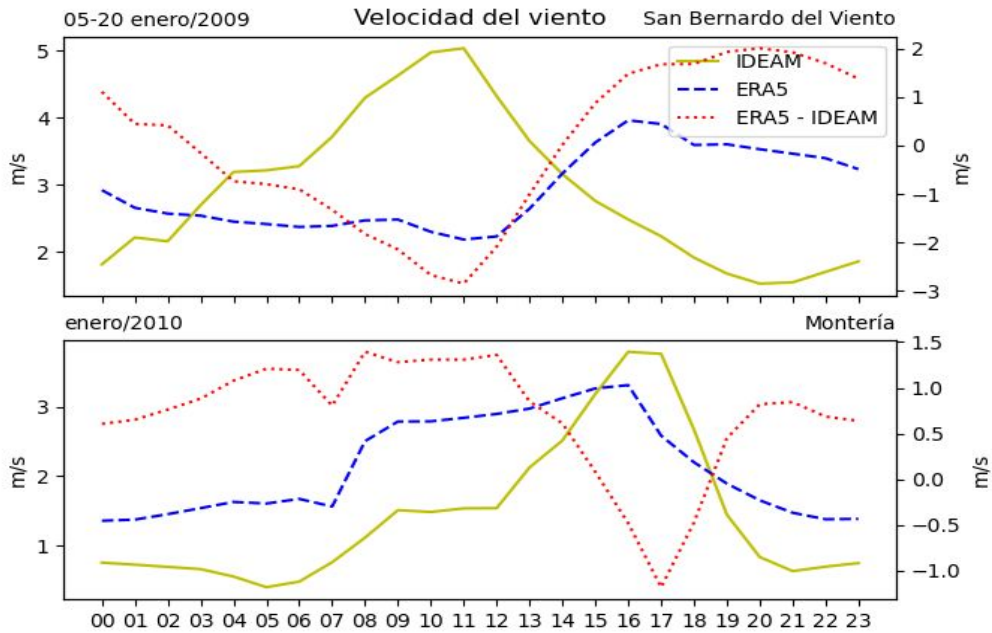


Figura 2.21. Series de tiempo del ciclo diario de la magnitud del viento según observaciones y ERA5 para el mes de enero en las estaciones San Bernardo del viento y Montería.

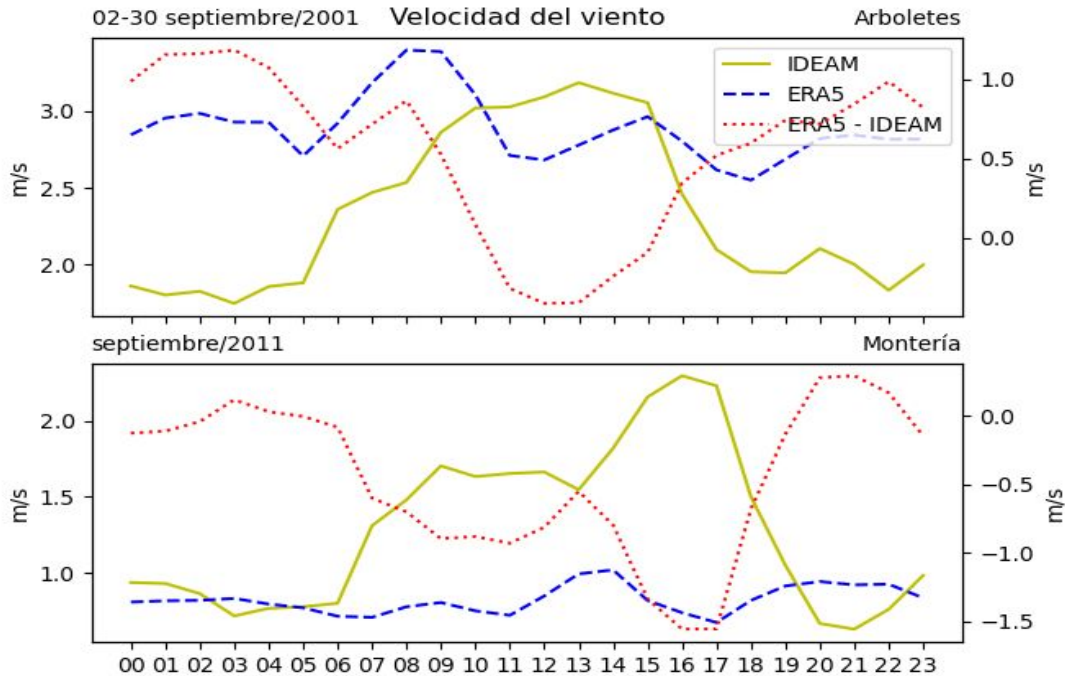


Figura 2.22. Series de tiempo del ciclo diario de la magnitud del viento según observaciones y ERA5 para el mes de septiembre en las estaciones Arboletes y Montería.

Un patrón similar se evidenció en la figura 2.20, donde las estaciones sobre Costa (Arboletes) y cerca a Ayapel (Majagual) del IDEAM mostraron valores altos para la magnitud del viento entre las 07:00:00-17:00:00 HL. No obstante, el ciclo diario de ERA5 para estas estaciones subestima en al menos - 1 m/s los valores proyectados por las observaciones y no identifica los aumentos en esta variable durante este periodo (07:00:00-17:00:00 HL). La estación Montería muestra un pico máximo alrededor de las 16:00:00 HL, pero ERA5 no lo reproduce al igual que para las otras estaciones en la Figura 2.19, es decir, ERA5 no tiene un ciclo diario acorde al IDEAM.

Las Figuras 2.21 y 2.22 solo contienen estaciones sobre la línea de costa y la región entre Costa y Ayapel. De igual manera, los ciclos diarios que proyectaron los datos de IDEAM se alejan de los de ERA5. El reanálisis es incapaz de representar los picos máximos, al igual que la evolución temporal de la magnitud del viento presentando constantes sobrestimaciones (subestimaciones) a lo largo del día.

2.2.3. Diagramas de dispersión

Los gráficos de dispersión (Figura 2.23 a Figura 2.28) muestran que los datos apareados, se distribuyen alrededor de todos los cuadrantes (I, II, III y IV), y no forman un patrón definido alrededor de la línea de regresión como se observó en los diagramas de temperatura (ver Figura 2.6 a Figura 2.17), este comportamiento entre los datos comparados del reanálisis y las observaciones sustenta los valores cercanos a cero obtenidos en las correlaciones. Es importante mencionar que los diagramas de dispersión correspondientes a las fechas no mostradas para la diferentes estaciones presentan un comportamiento similar (ver Tabla 2.4).

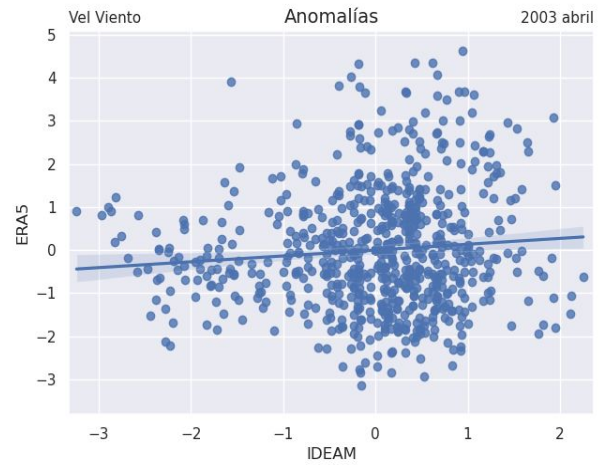
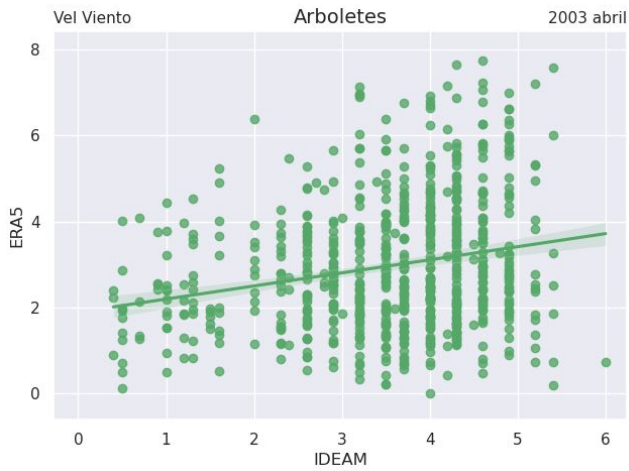


Figura 2.23: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Arboletes abril de 2003.

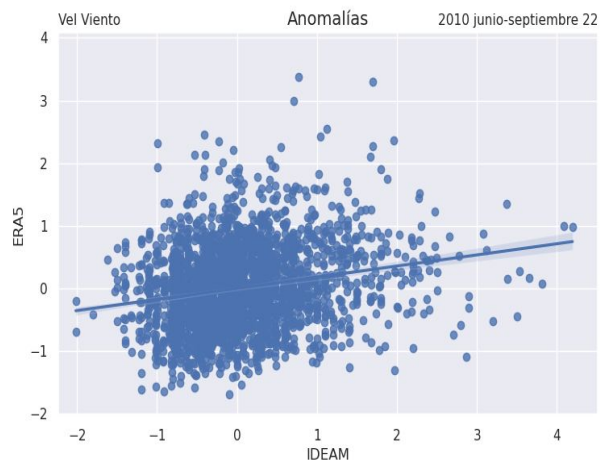
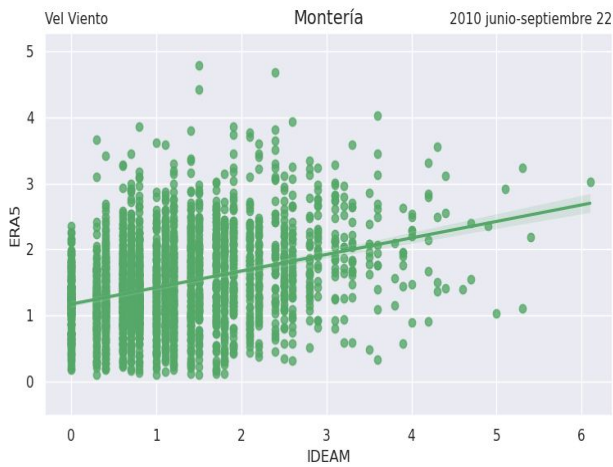


Figura 2.24: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Montería junio-septiembre 22 de 2010.

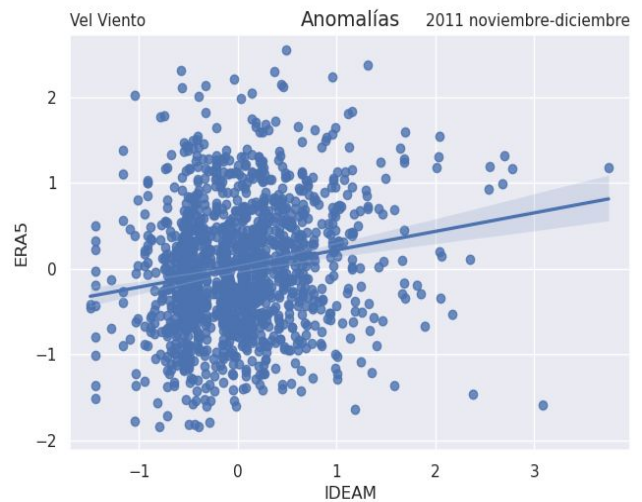
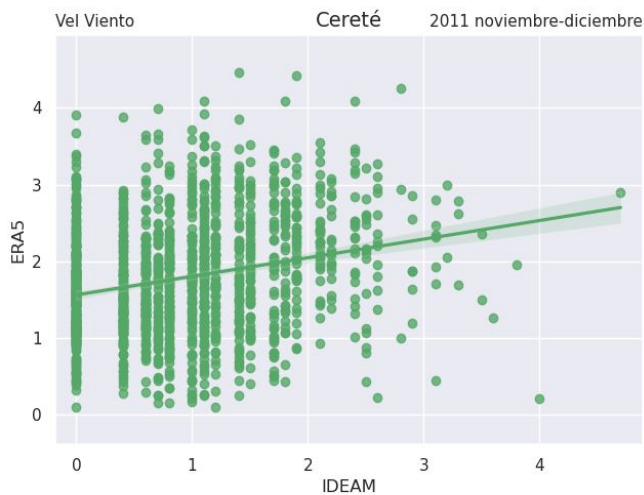


Figura 2.25: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Cereté noviembre-diciembre de 2011.

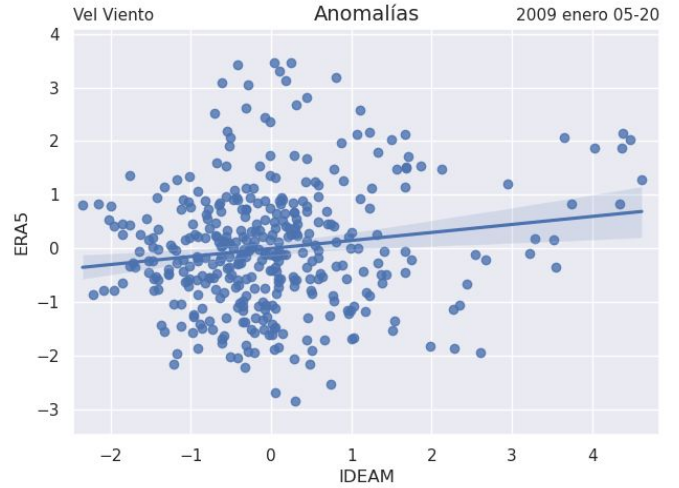
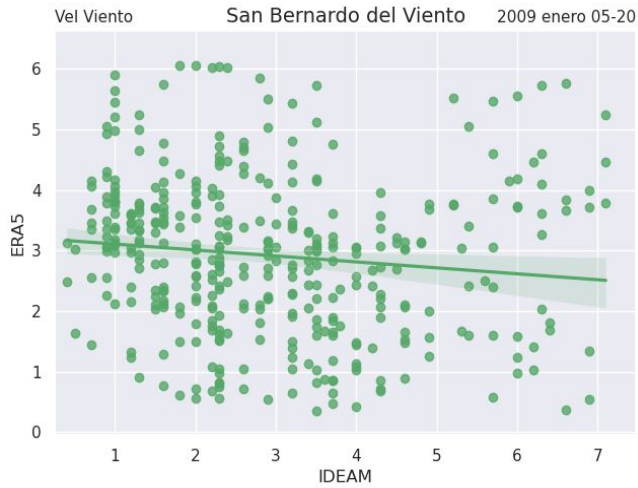


Figura 2.26: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación San Bernardo del Viento enero de 2009.

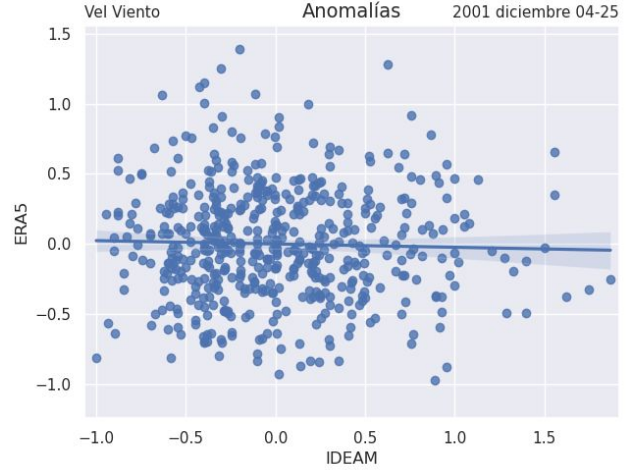
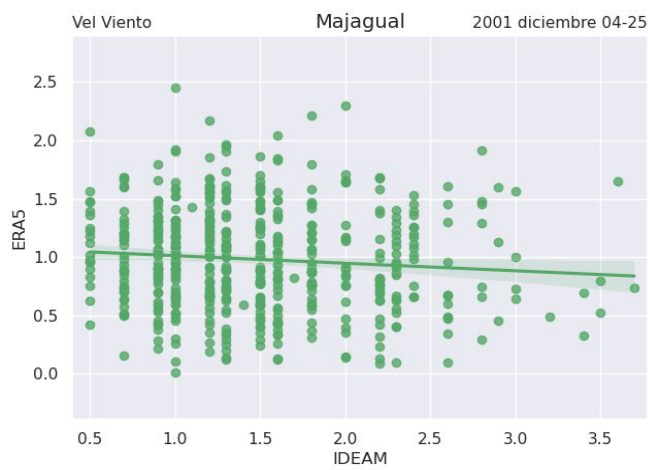


Figura 2.27: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Majagual diciembre de 2001.

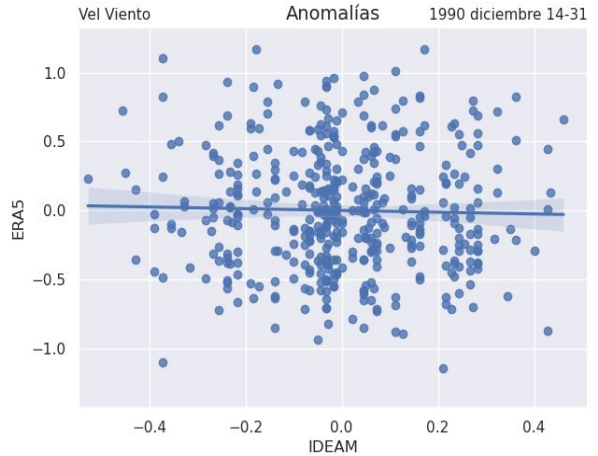
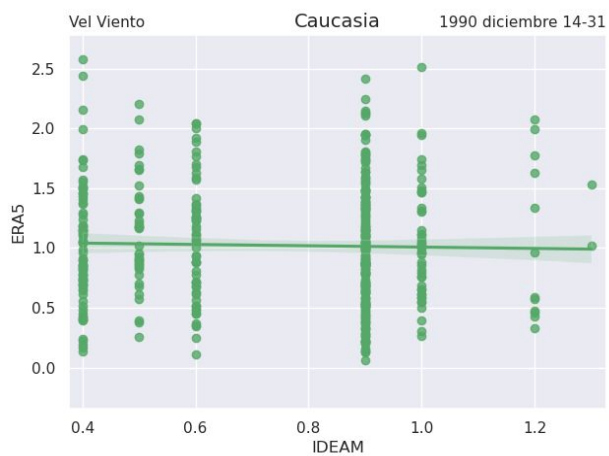


Figura 2.28: Diagramas de dispersión datos originales (izquierda), anomalías (derecha) para la estación Caucasia diciembre de 1990.

2.2.4. Hodógrafas

De la Figura 2.29 a la 2.31 se muestran las hodógrafas correspondientes a las estaciones San Bernardo del Viento, Montería y Cereté. Con estas se buscó identificar la evolución temporal de la dirección del viento, al ser esta una característica importante en el fenómeno de brisas marinas. En términos generales, las comparaciones entre el modelo y las observaciones muestran que: ERA5 logra representar la rotación del viento a lo largo del día especialmente los cambios en la componente meridional, la cual para la mayoría de los casos coincidió con los valores de las estaciones del IDEAM. Mientras que, para la componente zonal el modelo suele sobreestimar o subestimar en el transcurso del día. De ahí, puede radicar las principales diferencias entre los vientos medidos por el IDEAM y los proyectados por el modelo detrás de ERA5, si bien, el cálculo de la magnitud del viento depende de ambas componentes ($\sqrt{u^2 + v^2}$), por lo tanto, al tener problemas en representar la componente zonal las magnitudes son diferentes. Así, dependiendo de la distancia entre la componente zonal del IDEAM y la de ERA5, serán afectadas las rotaciones que represente el modelo. Por ejemplo, en la Figura 2.30 las diferencias entre componentes zonales están alrededor de 0.5 m/s, por consiguiente, las hodógrafas de ambos conjuntos de información coinciden en la mayoría de direcciones y magnitudes del viento a lo largo del ciclo diario. Por otro lado, en las Figuras 2.29 y 2.31, las diferencias en las componentes zonales son de hasta 2 m/s, en consecuencia las magnitudes del viento difieren y aunque los sentidos de rotación concuerden, se destacan diferencias notables como: entre las 04:00:00-15:00:00 HL para la estación San Bernardo del Viento, se pudo notar una subestimación en la componente zonal de parte del modelo. Mientras que, para la estación Cereté ERA5 sobrestima todas las magnitudes del viento a lo largo del día, consecuencia de la discrepancia entre componentes zonales de ambas fuentes de información.

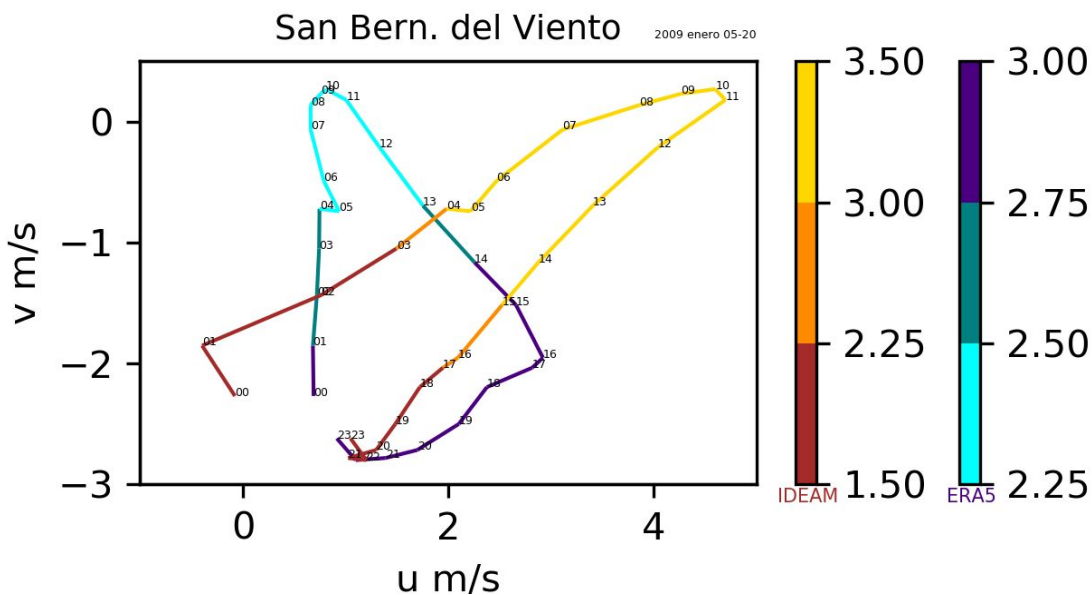


Figura 2.29. Hodógrafa del ciclo diario en la estación sobre San Bernardo del Viento para el periodo 05-20 de enero del 2009

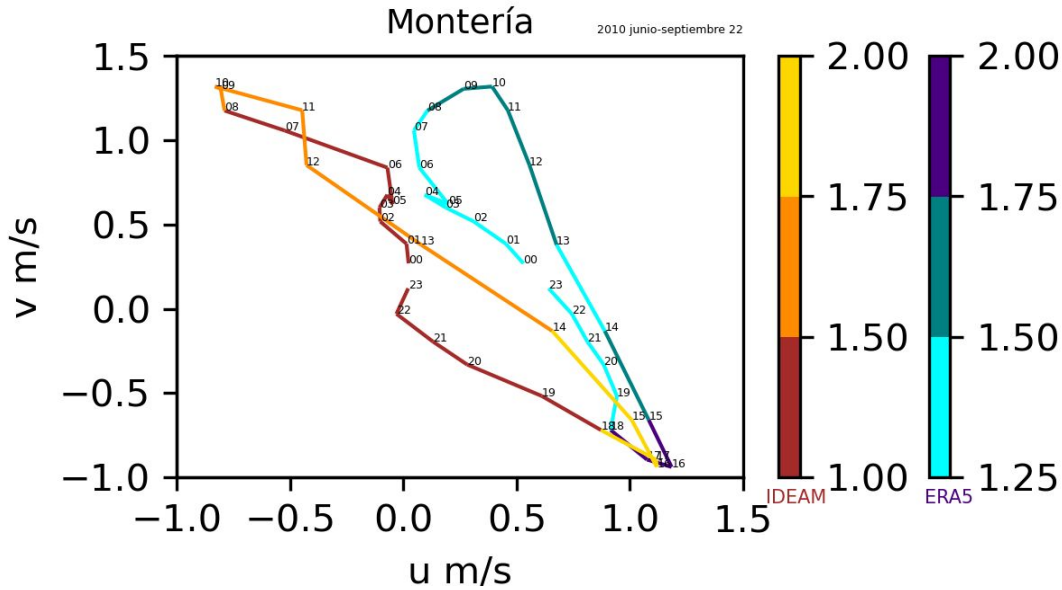


Figura 2.30 Hodógrafa del ciclo diario en la estación sobre Montería para el periodo desde junio al 22 de septiembre del 2010.

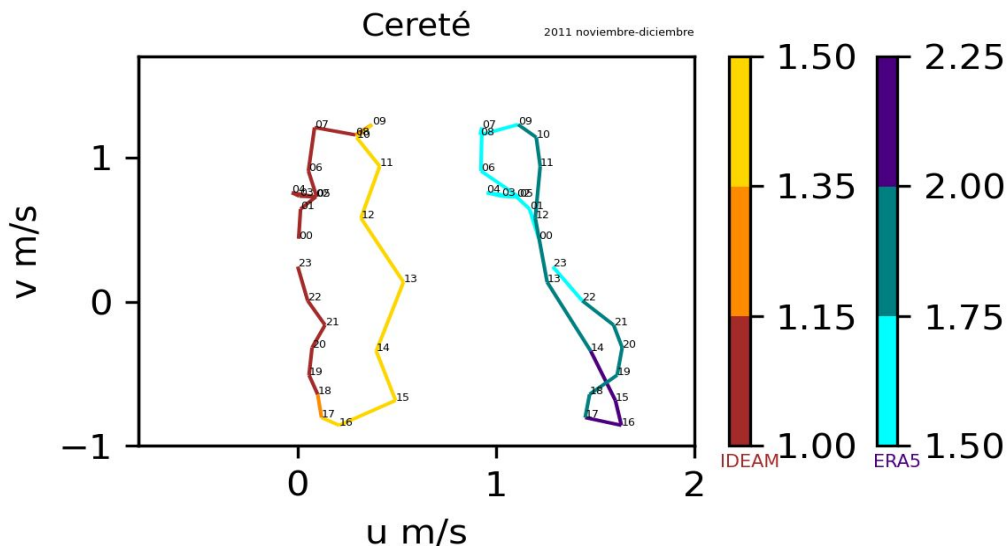


Figura 2.31. Hodógrafa del ciclo diario en la estación sobre Cereté para el periodo desde noviembre a diciembre del 2001.

El contraste de mar y continente dentro del área de estudio y su distribución espacial (mar en el norte y continente en el sur, ver figura 1.2), juega un rol de “control” dentro del comportamiento de ERA5, dado que, estas condiciones son más fácilmente simuladas. En consecuencia, el producto del reanálisis tuvo un mejor desempeño proyectando la componente meridional del viento. Mientras que, para la distribución horizontal hay una mayor variabilidad en topografía, tipos de cobertura vegetal, entre otros, lo cual dificulta la reproducción de la componente zonal del reanálisis. Se resalta que tanto ERA5 como las observaciones mostraron vientos fuertes con dirección hacia el sur, en las horas de la tarde/noche lo cual podría hipotetizar que efectivamente existe un mecanismo de brisas marinas que podría alcanzar la región de Ayapel.

2.3. Conclusiones del capítulo

En general ERA5 logra representar bien el patrón del ciclo diurno, mostrando las temperaturas máximas alrededor de las 10:00-17:00 HL y las mínimas alrededor de las 00:00-07:00 y 18:00-23:00 HL. Sin embargo, para la mayoría de conjuntos analizados el reanálisis subestima los valores máximos y sobrestima los mínimos. Es decir, el rango del ciclo diurno es menor en ERA5 que en los datos observados. Además, se observó que ERA5 reproduce de forma errónea el valor mínimo de temperatura en el ciclo diurno. Debido a que dicho mínimo de temperatura lo presenta a las 04:00 HL, mientras, los datos observados lo muestran a las 06:00 HL. Posiblemente al reanálisis se le dificulta representar el balance de energía en las noches, ya que reproduce mal la cantidad de nubes (vapor de agua) dejando pasar la energía en forma de onda larga.

Las correlaciones entre las observaciones y el reanálisis presentan una relación lineal para las fechas disponibles, dado que, los coeficientes de correlación en su mayoría superaron los 0.7, sugiriendo que ERA5 presenta fluctuaciones que tienden a estar en fase con las observaciones. ERA5 representa mejor las fluctuaciones de la temperatura superficial para la estación de Montería, con coeficientes de correlación que en promedio están alrededor de 0.91, 0.77 y 0.77 para los conjuntos de datos horarios, anomalías y promedios diarios, respectivamente. Por otro lado, la estación para la cual ERA5 ofrece una peor representación de las fluctuaciones de la t_2m es la de Lórica, con correlaciones alrededor de 0.71, 0.35 y 0.53 para los conjuntos de datos horarios, anomalías y promedios diarios, respectivamente (ver Tabla 2.3). Los datos apareados vistos en los diagramas de dispersión tienden a ubicarse el en cuadrante I y el cuadrante III, por lo tanto, se resalta la relación lineal positiva de ambos conjuntos de información para la variable en cuestión. De ahí, las correlaciones positivas importantes.

Para la variable viento a 10 m, tanto los coeficientes de correlación como las gráficas del ciclo diurno entre IDEAM y ERA5, ponen en evidencia las grandes diferencias entre ambas fuentes de información, donde el reanálisis presenta desemejanzas tanto en los valores de la magnitud como en la evolución temporal. Sin embargo, se resaltan las series de tiempo de la estación de Montería, donde las gráficas del ciclo diurno y la hodógrafa fueron semejantes entre las fuentes de información (ver Figura 2.18 y 2.30). Por tanto, el pixel apareado de ERA5 con la estación Montería tiene un mejor desempeño que el resto, especialmente para la temporada de mitad de año.

El bias mostró que los errores positivos se cancelan con los negativos produciendo un valor cercano a cero en 4 de las 6 estaciones. En cuanto a la magnitud de los sesgos (RMSE), las diferencias estuvieron por encima de un 1 m/s. Estas diferencias pueden ser grandes, ya que los vientos en la región son débiles con magnitudes entre 0 - 6 m/s, siendo este un factor determinante.

Las observaciones del viento sugieren la existencia de una brisa marina, porque las hodógrafas hechas a partir de estos datos presentan direcciones y cambios de norte a sur (o viceversa), es decir, de océano a continente y en dirección contraria. Además, ERA5 captura tal comportamiento, ya que representa de forma adecuada la componente meridional del viento a 10 m, gracias a el contraste

océano - continente; que posiblemente le permite a los vientos de ERA5 tener sentidos de rotación coherentes con la realidad, además de presentarlos en los momentos correctos. Por el contrario, ERA5 tiene dificultades reproduciendo la componente zonal quizás por la resolución del modelo, la mala representación de la topografía, tipos de cobertura vegetal, entre otros. Con lo mencionado se espera que ERA5 represente algunas características importantes del ciclo diurno de la brisa en la región.

3. Capítulo 3: Climatología de vientos de bajo nivel y temperatura según ERA5

A continuación se presenta un análisis basado en el conjunto de datos de ERA5, respecto a las variables temperatura a dos metros y viento a dos diferentes alturas: 10 metros sobre la superficie del suelo y el nivel de 925 hPa, que en altura corresponde aproximadamente a 750 msnm. El análisis se realizó para todos los meses del año, sin embargo solo se muestra la descripción de tres meses: enero, junio y octubre, debido a que cada uno es representativo de un patrón de brisa marina entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel. Así, los meses *diciembre-enero-febrero-marzo-abril*, *mayo-junio-julio-agosto* y *septiembre-octubre-noviembre* fueron agrupados por la característica de su respectiva brisa, es decir, cada conjunto de meses se comporta de manera similar (los meses en *cursiva* fueron identificados como meses de transición). Los promedios espaciales para las diferentes series de tiempo de Ayapel y Línea de costa se hicieron para el área: 8.74° N, 75.5° W, 7.98° N, 74.75° W; 9.5° N, 76.25° W, 8.74° N, 75.75° W, respectivamente (ver Figura 1.2).

3.1. Temperatura a dos metros

3.1.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa

El ciclo diurno de la temperatura a dos metros de altura se comporta de manera similar en todos los meses del año en ambas regiones (Figura 3.1), comportamiento característico de los climas tropicales donde la variación de la temperatura es mayor a escala diurna que estacional. Las mayores temperaturas superficiales en Ayapel se dan entre las 18:00:00 - 21:00:00 horas UTC, es decir, entre las 13:00:00 - 16:00:00 horas en Colombia; la temperatura más baja ERA5 la reproduce a las 09:00:00 horas UTC, es decir, a las 04:00:00 de la mañana en hora Colombiana, dicho valor mínimo fue uno de los sesgos identificados en el reanálisis para la variable t2m en el capítulo 2. Es preciso mencionar que ERA5 muestra que el ciclo diurno de la t2m en los primeros meses del año: enero, febrero y marzo alcanza las temperaturas más altas, las cuales son superiores a los 31.0 °C en las horas más cálidas del día. La temperatura de los ciclos diarios mensuales en el transcurso del año va decreciendo, siendo octubre y noviembre los meses más fríos con las temperaturas promedio más bajas.

El comportamiento de la temperatura superficial en la línea de costa es bastante similar al de la t2m en Ayapel, presentando los valores mínimos en las mismas horas y los valores máximos un poco antes. No obstante, las mayores temperaturas no superan los 29.0 °C y las menores no son inferiores a los 24.0 °C, de tal manera que Ayapel es más caliente en las horas máximas y más frío en la hora mínima. Lo anteriormente descrito también sucede en los datos observados (ver Figura 2.1 a 2.4), ya que se da tanto el retraso en el pico de temperatura máxima en Ayapel, como las diferencias en los valores máximos y mínimos de ambos lugares.

Es importante recordar que las observaciones muestran el pico de t2m máximas en promedio a las mismas horas que ERA5 (ver Figura 2.2 a 2.5). Por otro lado las pocas observaciones disponibles

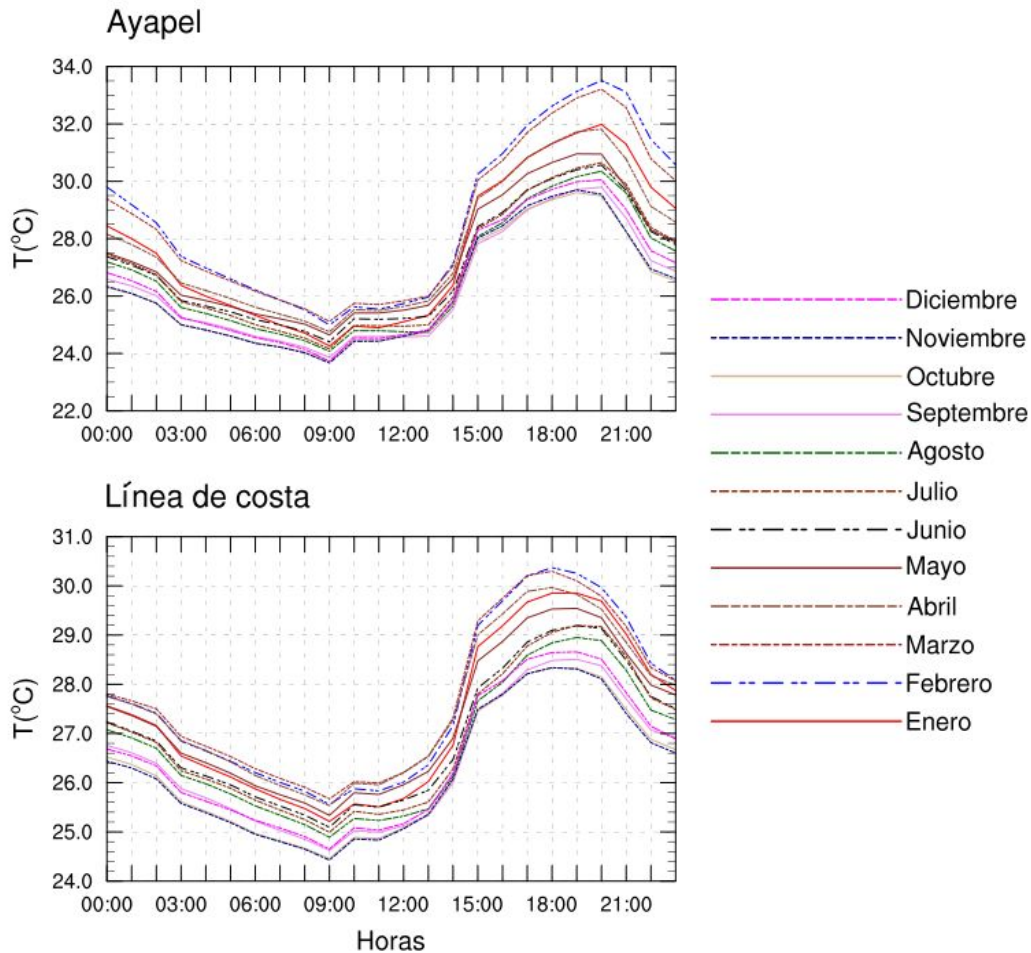


Figura 3.1: Ciclo diurno de temperatura a dos metros de altura en °C, para todos los meses del año a partir del promedio horario mensual de los años 1989-2018. Para Ayapel (arriba) y línea de costa (abajo), en hora UTC, según ERA5.

también muestran que enero, febrero y marzo son los meses más cálidos, y los meses septiembre, octubre y noviembre los más fríos. Aunque, ERA5 en promedio los muestra más fríos que las observaciones.

3.1.2. Ciclo diurno de la t_{2m} en el mes de junio

En la hora 00:00:00 UTC (19:00:00, HL) la temperatura en el municipio de Ayapel y en el mar es de 27 °C aproximadamente, acorde al paso del tiempo gracias a la ausencia de radiación solar ambas superficies océano y continente liberan calor por medio de radiación de onda larga, disminuyendo sus temperaturas. Es importante mencionar que el continente se enfría a una tasa mayor que el mar. De la hora 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) en adelante ambas superficies comienzan a ganar grados de temperatura de forma progresiva. En la hora 15:00:00 UTC (10:00:00, HL) el cambio de temperatura sobre el continente es fuerte pasando de 26.0 °C a 28.0 °C en solo una hora. Por otro lado el mar alcanza su mayor temperatura (27.0 °C) a las 17:00:00 UTC (12:00:00, HL) y la

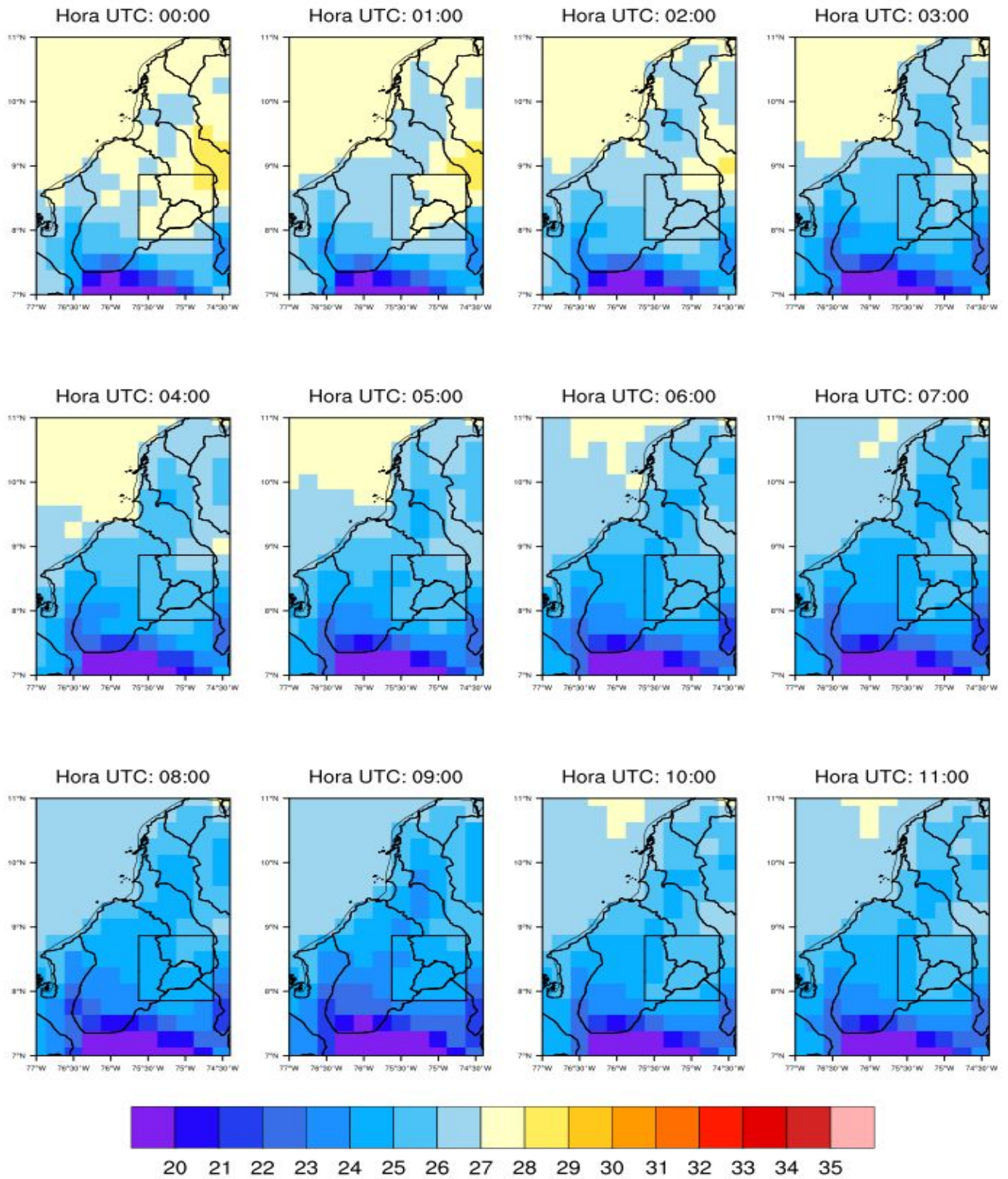


Figura 3.2: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de junio (1989-2018) en Ayapel, de las 00:00:00 a 11:00:00 horas UTC. Según ERA5.

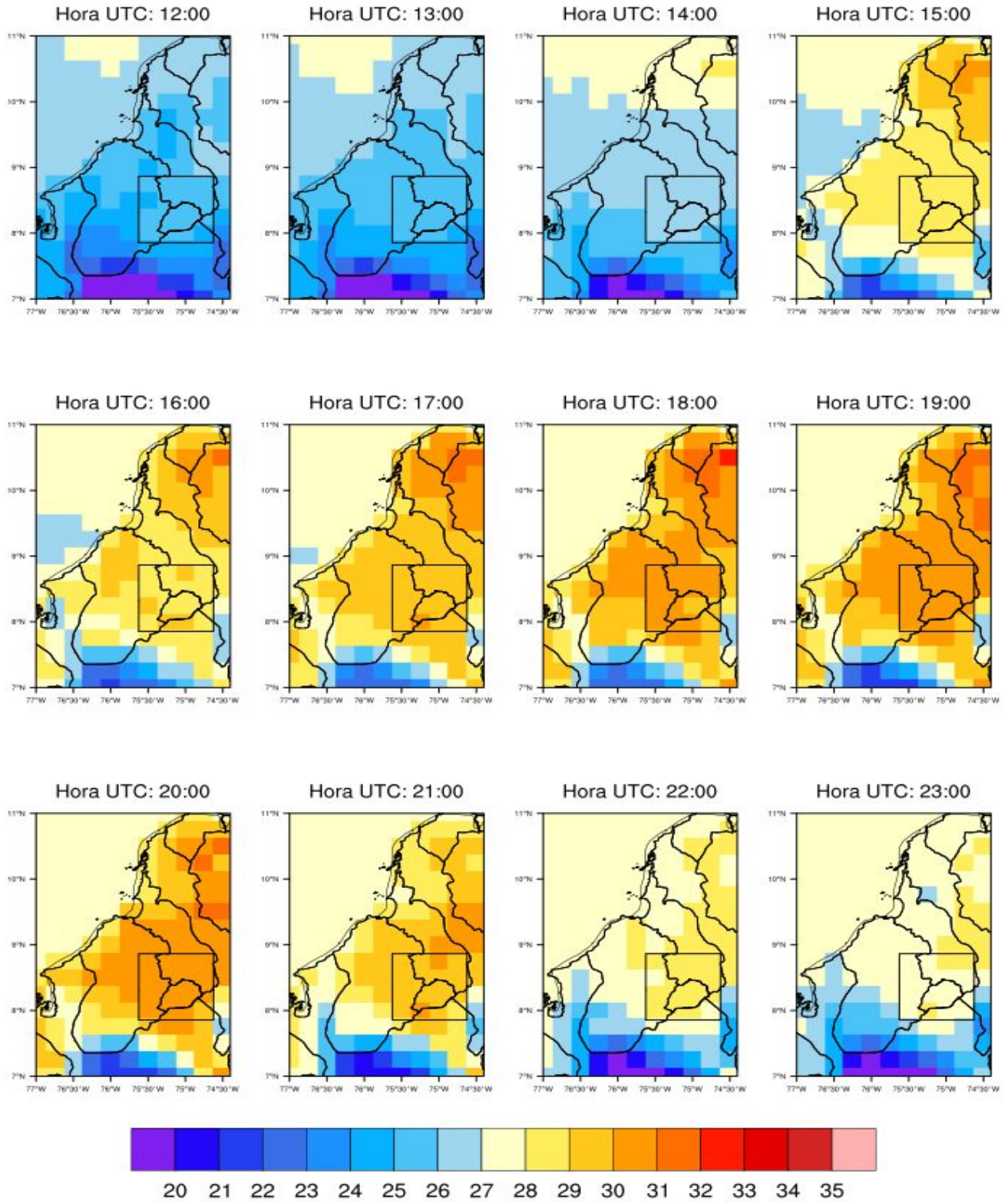


Figura 3.3: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de junio (1989-2018) en Ayapel, de las 12:00:00 a 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

conserva de ahí en adelante; el continente sigue aumentando su temperatura y el pico máximo lo presenta a las 19:00:00 UTC (14:00:00, HL) con 30.0 °C de temperatura aproximadamente, temperatura que se distingue en Ayapel y el territorio hasta la línea de costa. Más tarde la temperatura superficial en el continente baja. No obstante la temperatura sobre Ayapel es la última en disminuir alrededor de las 22:00:00 UTC (17:00:00, HL), a partir de la hora 23:00:00 UTC (18:00:00, HL) el mar, la línea de costa, el intermedio línea de costa - Ayapel y Ayapel, presentan la misma temperatura de 27°C (ver Figura 3.2 y 3.3). Cabe resaltar que en este mes la temperatura sobre el mar es un grado mayor con respecto a los demás meses del año (esto podría facilitar los vientos de retorno).

3.1.3. Ciclo diurno de la t2m en el mes de enero

En la hora 00:00:00 UTC (19:00:00, HL) la temperatura en el municipio de Ayapel es de 28.3 °C aproximadamente. A partir de esta hora la temperatura comienza a decrecer con el paso del tiempo a causa de la ausencia de radiación incidente y de la liberación de energía de la superficie en forma de onda larga, hasta la hora 09:00:00 UTC (04:00:00, HL). En este lapso de tiempo la temperatura en el municipio de Ayapel es superior a la de las regiones entre y sobre la línea de costa, es decir, la superficie de Ayapel se enfría más lentamente con respecto a las superficies vecinas. A partir de la hora 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) con 24.8 °C la temperatura en la región de interés comienza a aumentar gracias a los primeros rayos de sol. Sin embargo, entre las 03:00:00 UTC y 13:00:00 UTC (22:00:00 y 08:00:00, HL), las temperaturas sobre el mar son mayores a las continentales. Más tarde, alrededor de las 14:00:00 UTC (09:00:00, HL) las temperaturas del mar y del continente son relativamente homogéneas. La temperatura a dos metros de altura en el continente continúa aumentando y particularmente en la hora 15:00:00 UTC (10:00:00, HL) se observa un aumento significativo de 29.4 °C, en las horas siguientes la temperatura aumenta aún más, presentando valores iguales o superiores a 31.0 °C en las horas 19:00:00, 20:00:00 y 21:00:00 UTC (14:00:00, 15:00:00 y 16:00:00; HL). De tal manera que a partir de las 15:00:00 UTC, la superficie continental se encuentra lo suficientemente caliente, superando la temperatura sobre el mar. En las dos últimas horas del día la temperatura superficial decrece gracias a que el sol comienza a esconderse presentando un valor aproximado de 29.0 °C (ver Figura 3.4 y 3.5). Es claro que existe una diferencia de temperatura (un gradiente) entre el mar, la línea de costa, el intermedio línea de costa - Ayapel y la región de Ayapel. De las 05:00:00 a las 15:00:00 horas UTC el continente (línea de costa - Ayapel) se calienta casi de forma homogénea, entre las 16:00:00 y las 20:00:00 el área entre la línea de costa y Ayapel es la que presenta mayor temperatura, en las horas de la noche 21:00:00 - 23:00:00 UTC y la madrugada 00:00:00 - 04:00:00 UTC la temperatura decrece pero la región de Ayapel es la última en enfriarse.

3.1.4. Ciclo diurno de la t2m en el mes de octubre

El mes de octubre es uno de los meses más “fríos” del año en la región Caribe y el más “frío” junto con noviembre en Ayapel, donde a diferencia de los demás meses del año el promedio de la temperatura superficial no supera los 29.58 °C. Los mapas correspondientes al ciclo diario según ERA5 (Figura 3.6 y 3.7) muestran que la t2m se comporta de la siguiente manera en dicho mes: en la hora 00:00:00 UTC (19:00:00, HL) la región de Ayapel tiene una temperatura promedio de 26.0 °C, a esta hora no existe un gradiente de temperatura entre el mar, la línea de costa, el intermedio

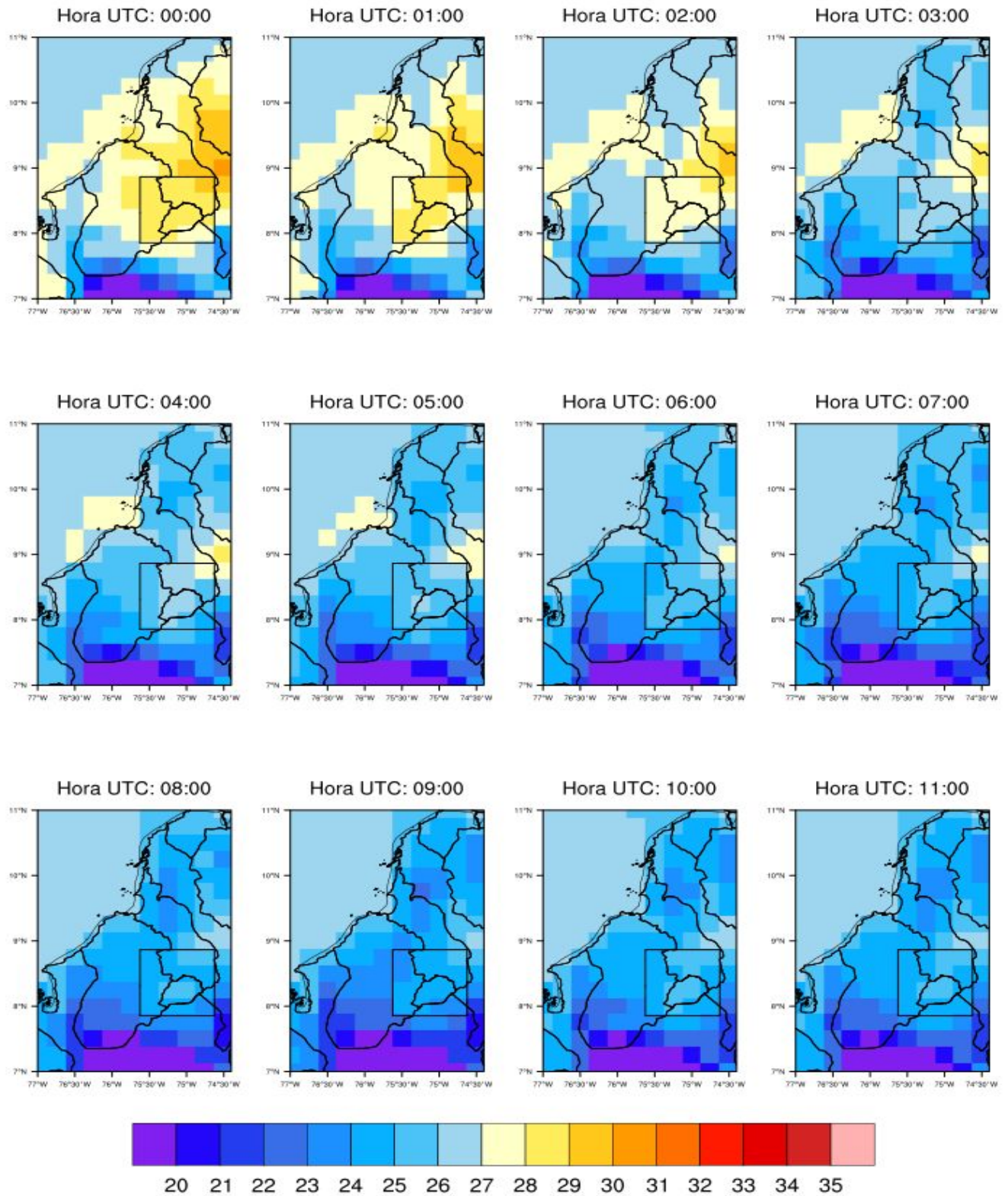


Figura 3.4: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de enero (1989-2018) en Ayapel, de las 00:00:00 a las 11:00:00 horas UTC. Según ERA5.

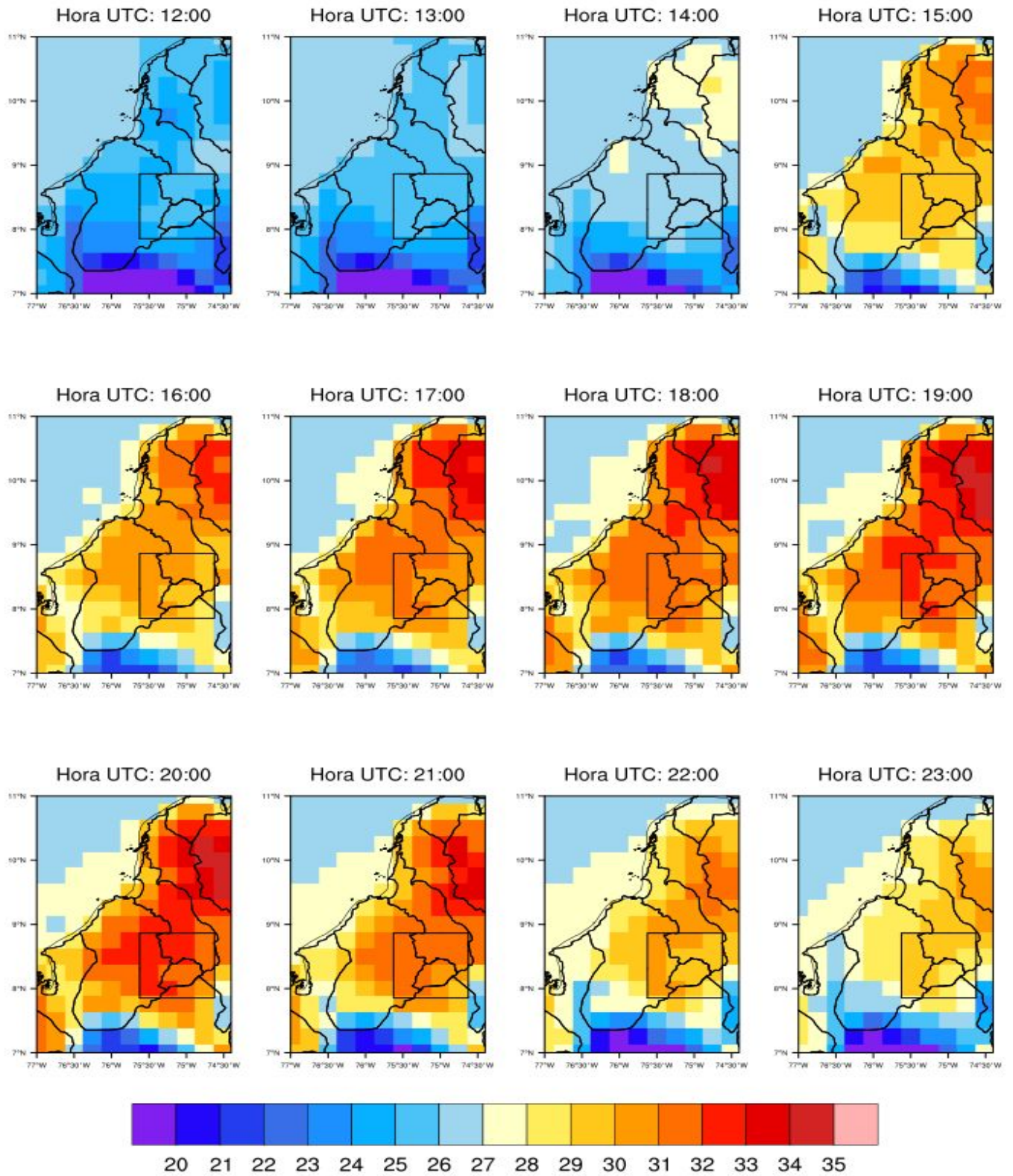


Figura 3.5: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de enero (1989-2018) en Ayapel, de las 12:00:00 a las 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

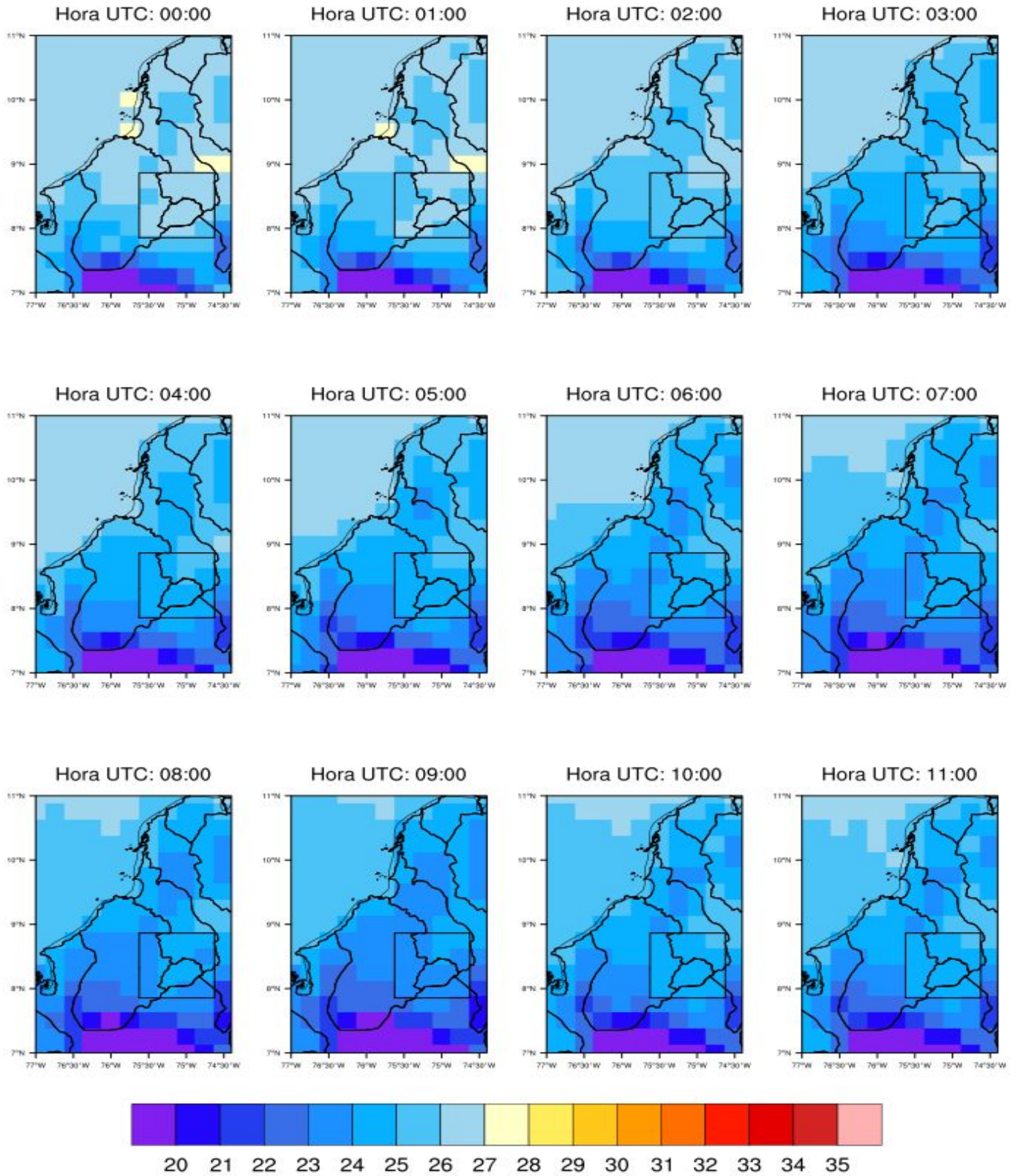


Figura 3.6: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de octubre (1989-2018) en Ayapel, de las 00:00:00 a las 11:00:00 horas UTC. Según ERA5.

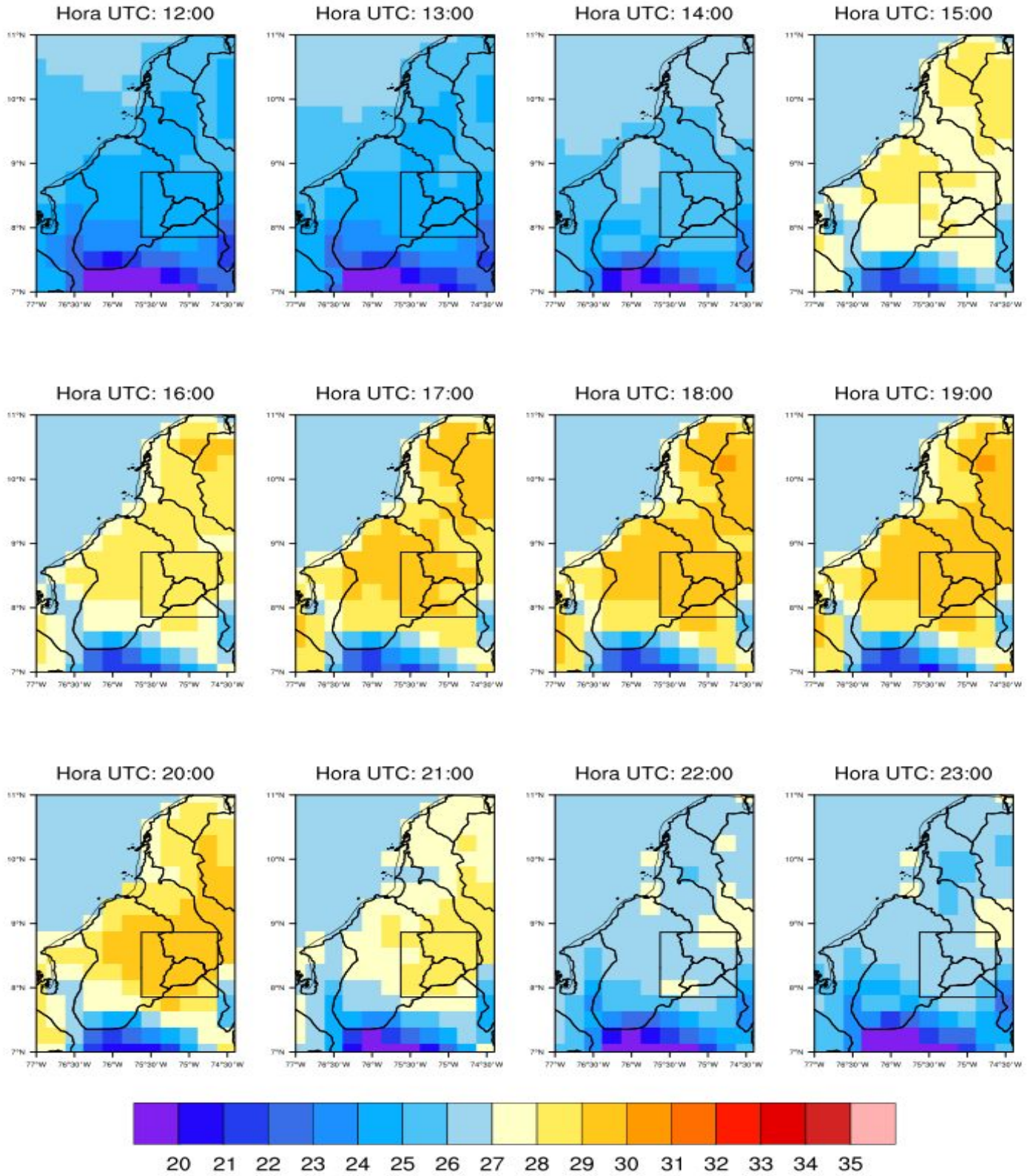


Figura 3.7: Mapas del ciclo diario de la temperatura en °C a dos metros de altura para el mes de octubre (1989-2018) en Ayapel, de las 12:00:00 a las 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

línea de costa - Ayapel y Ayapel, es decir, el conjunto presenta la misma temperatura. En las horas siguientes debido a la ausencia del sol y gracias a las diferentes propiedades térmicas de las superficies, la temperatura en el continente comienza a decrecer más rápidamente en comparación a la caída de la temperatura en el mar. Así, de las 00:00:00 a las 05:00:00 UTC (19:00:00 a las 00:00:00, HL) el continente desde la línea de costa a Ayapel se enfría más o menos homogéneamente presentado una temperatura de 24.0 °C a las 05:00:00 UTC, mientras el mar aún conserva los 26.0 °C. En las próximas horas hasta la hora 09:00:00 UTC (04:00:00, HL) se continúa enfriando la superficie continental aunque esta vez no de manera uniforme, se observa que el enfriamiento se da del medio a los extremos, es decir, la línea de costa y Ayapel son los últimos en enfriarse e igualar la temperatura a la hora 09:00:00 UTC, donde desde la línea de costa hasta Ayapel se da la temperatura más baja del ciclo con 23,0 °C aproximadamente (recordar que la temperatura mínima según las observaciones es a las 06:00:00 HL). En este mismo lapso de tiempo el mar comienza a cambiar de temperatura (enfriarse) y lo hace desde las proximidades a la línea de costa hacia mar adentro terminando a la hora 09:00:00 UTC con 24.0 °C un grado más caliente que el continente. De la hora 12:00:00 a 20:00:00 UTC (07:00:00 a 15:00:00, HL) gracias a la presencia del sol, las superficies: océano y continente ganan temperatura, nuevamente quien sufre un cambio más rápido es el continente ya que el mar se resiste un poco más a aumentar su temperatura. Entre las 10:00:00 y 12:00:00 UTC la temperatura desde la línea de costa a Ayapel es semejante, en las siguientes horas se nota un gradiente de temperatura donde la línea de costa está más caliente que Ayapel hasta que igualan la temperatura en las horas 18:00:00 y 19:00:00 UTC (13:00:00 y 14:00:00, HL), en las horas 20:00:00 y 21:00:00 UTC (15:00:00 y 16:00:00, HL) la temperatura decrece pero Ayapel se enfría más lentamente que la línea de costa, en las últimas dos horas 22:00:00 y 23:00:00 UTC (17:00:00 y 19:00:00, HL) el mar, la línea de costa, el intermedio línea de costa - Ayapel y Ayapel presentan una temperatura homogénea de 26.0 °C.

3.2. Viento a 10 metros de altura

3.2.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa

Sobre la región de Ayapel los vientos son débiles, sus magnitudes están entre el rango de 0 - 2 m/s, mientras que sobre la línea de costa las magnitudes son más fuertes y alcanzan valores de hasta 4.4 m/s. Los picos máximos para ambos lugares se dan en el mes de febrero con magnitudes de 1.9 m/s en Ayapel y de 4.4 m/s en la línea de costa, seguidos por magnitudes de 1.6 y 4.1 m/s en marzo y 1.3 y 3.7 m/s en enero para la región de Ayapel y la línea costera respectivamente. Estos picos máximos ocurren en horas diferentes tomando lugar en la línea costera alrededor de las 00:00:00 UTC (19:00:00, HL), mientras que en la región de Ayapel se dan más o menos a las 03:00:00 UTC (22:00:00, HL), por consiguiente los vientos viajan de la línea de costa hacia Ayapel con tres horas de retraso aproximadamente, llegando con magnitudes más débiles a causa de la fricción superficial. Los picos mínimos se dan en octubre y diciembre sobre Ayapel, y en abril y diciembre sobre la línea costera tales mínimos presentan magnitudes cercanas a 0 m/s (ver Figura 3.8). No es clara la relación de las magnitudes mínimas entre Ayapel y la línea de costa.

Es importante mencionar que los meses con mayores magnitudes son los que a su vez presentan un mayor rango de oscilación (enero, febrero, marzo) con valores entre 0.3 y 1.9 m/s en Ayapel y 1.5 y 5.1 m/s en la línea de costa, mientras los demás meses presentan una amplitud menor, es decir, sus rangos de oscilaciones son más reducidos yendo desde 0.01 a 1.2 m/s en Ayapel y 0.2 y 3.4 m/s en la línea de costa.

Cabe aclarar que ERA5 muestra al igual que en las observaciones vientos de mayor magnitud en la línea de costa y vientos de menor magnitud en Ayapel, aunque el reanálisis subestima los valores en Ayapel. De forma semejante, ERA5 reproduce parecido al IDEAM los valores de magnitud máximos en los primeros meses del año, con excepción de abril en la línea de costa. Con respecto a meses puntuales; en línea de costa: los meses de enero, abril y diciembre tienen serias diferencias o sea el reanálisis no mejora la reproducción de estos tras realizar la operación de promedios multianuales. Mientras que, con dicha operación mejora el desempeño del ciclo diario de septiembre y octubre. En Ayapel: los meses de noviembre y diciembre no son reproducidos con precisión, mientras que al promediar mejora la reproducción del ciclo de Febrero (ver Figura 2.17 a 2.21).

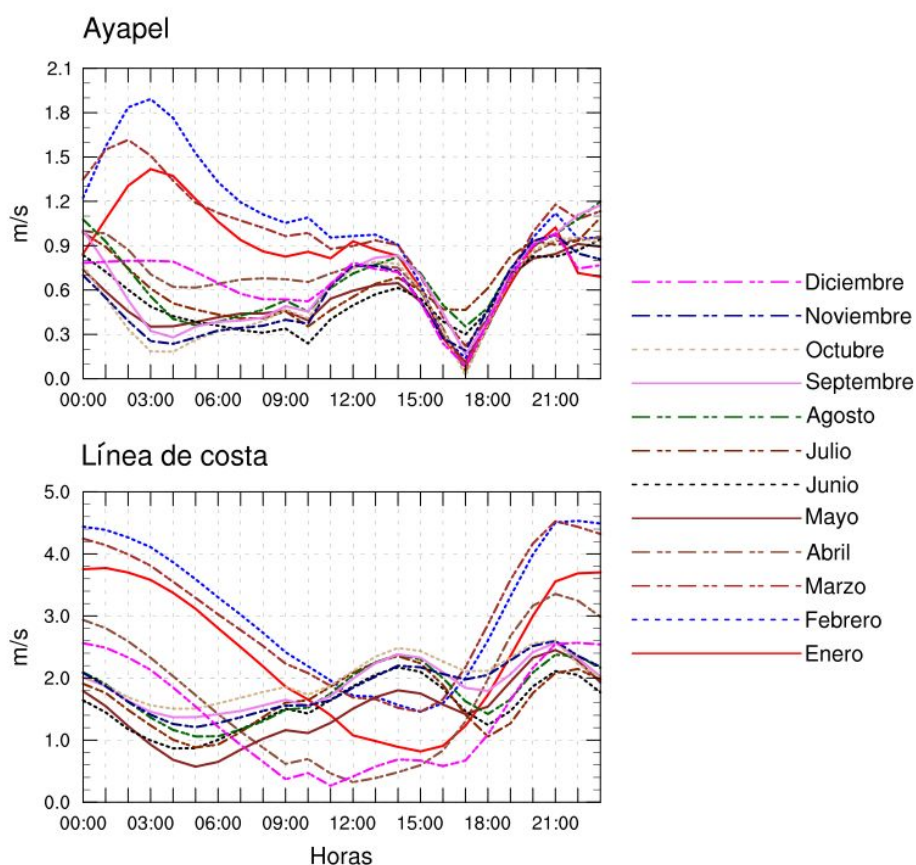


Figura 3.8: Ciclo diario de la magnitud del viento en m/s a 10 metros de altura, para todos los meses del año a partir del promedio horario mensual de los años 1989-2018. Para Ayapel (arriba) y línea de costa (abajo). En hora UTC, según ERA5.

3.2.2. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de junio

El mes de junio es un mes representativo de una circulación de brisa marina entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel (Figura 3.9 y 3.10). En la primera hora 00:00:00 UTC (19:00:00 HL), los vientos presentan un patrón con dirección océano a continente con magnitudes entre 1 - 2 m/s, este se mantiene hasta aproximadamente las 04:00:00 UTC (23:00:00, HL) cuando estos se debilitan en magnitud y rotan en sentido antihorario paulatinamente hasta las 10:00:00 UTC (05:00:00, HL), momento en el se logra definir un patrón con dirección continente a océano, durante las horas posteriores los vientos se fortalecen principalmente sobre la línea de costa donde alcanzan valores entre 2.5 y 3 m/s, mientras que sobre y alrededor de Ayapel las magnitudes están entre 0.5 y 1.5 m/s; el patrón de vientos continente a océano termina a las 17:00:00 UTC (12:00:00, HL), ya que los vientos comienzan a rotar en sentido horario y sufrir debilitamientos sutiles en su magnitud. A partir de las 20:00:00 UTC (15:00:00, HL), los vientos sobre la línea de costa toman la dirección océano a continente con magnitudes entre 2.5 - 3 m/s, estas condiciones avanzan continente adentro durante las horas posteriores y logran alcanzar Ayapel alrededor de las 22:00:00 UTC (17:00:00, HL) con magnitudes entre 1 - 2 m/s. Las diferencias entre las mayores magnitudes sobre la línea de costa y menores sobre Ayapel, son el producto del efecto de la fricción de la superficie a lo largo de la trayectoria de los vientos. Consecuente con lo anteriormente descrito, durante el mes de Junio se logra diferenciar los cuatro momentos de las brisas marinas propuestos por diferentes autores (Tijm, 1999; Gustavsson et. al 1995; Carnesoltas et. al 2002). El primer momento con vientos débiles paralelos a la línea de costa y con rotación en sentido antihorario se da entre las 04:00:00 - 09:00:00 UTC (23:00:00 - 04:00:00, HL), dentro de este periodo a las 06:00:00 UTC (01:00:00, HL) los vientos son paralelos a línea de costa. El segundo momento con el patrón vientos de continente a océano se da entre las 10:00:00 - 16:00:00 UTC (05:00:00 - 11:00:00, HL), con magnitudes entre 2-3 m/s sobre la línea de costa y entre 0.5 - 1.5 m/s en la región de Ayapel, la dirección de estos vientos no es perpendicular a la línea de costa, presenta una dirección hacia el norte, con una componente meridional muy superior a la zonal (ver Figura 3.11). Posteriormente en el tercer momento los vientos que rotan en sentido horario, se da entre las 17:00:00 - 19:00:00 UTC (12:00:00 - 14:00:00, HL); vale la pena mencionar que a las 17:00:00 UTC, los vientos son paralelos a la línea de costa. El cuarto y último momento con un patrón de vientos con dirección océano a continente se da entre las 20:00:00 - 03:00:00 UTC (15:00:00 - 22:00:00, HL) con magnitudes entre 2 - 3 m/s sobre la línea costera y 1 - 2 m/s sobre Ayapel.

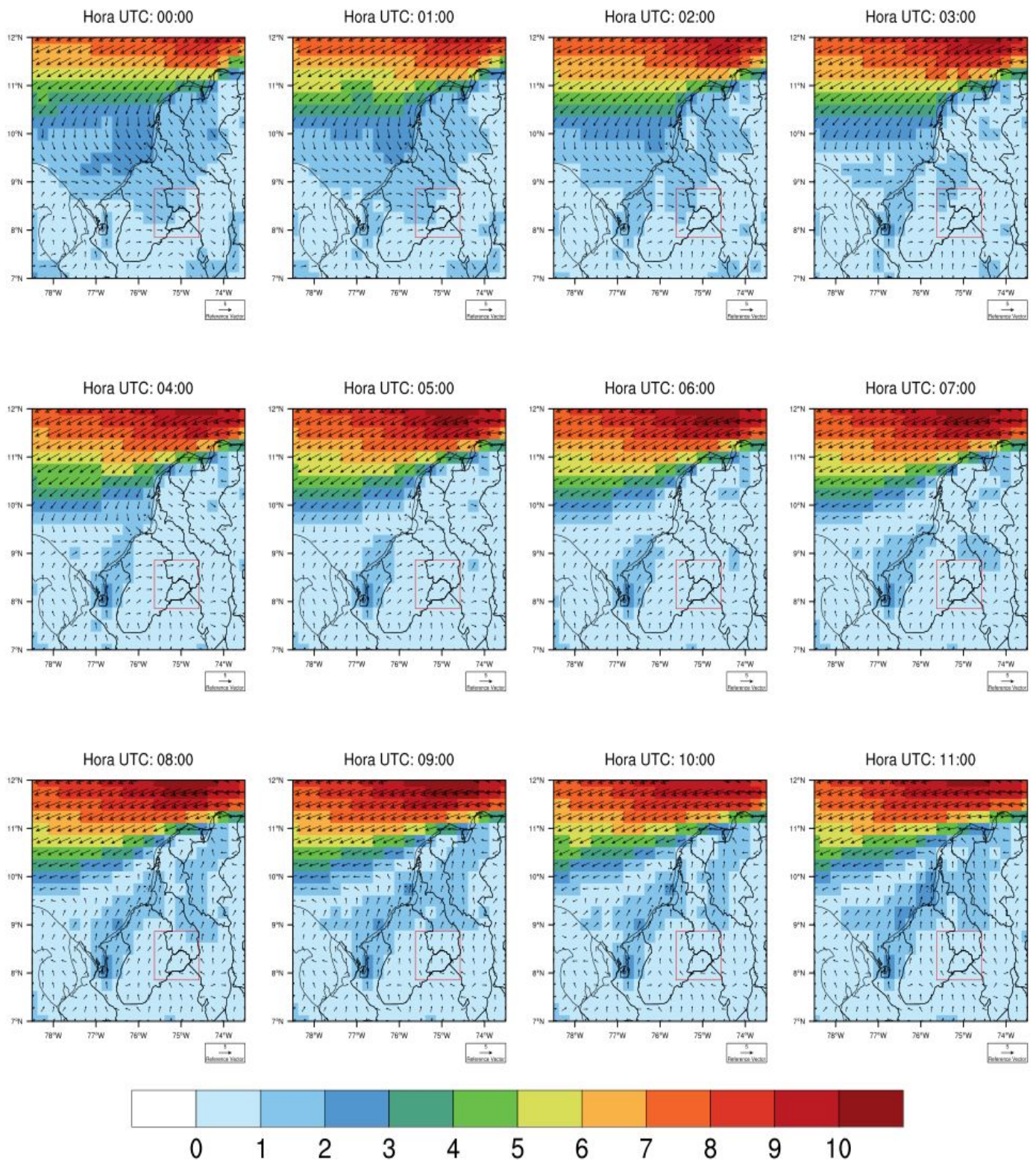


Figura 3.9: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de junio (1989-2018), de las 00:00:00 a las 11:00:00 horas UTC. -Según ERA5.

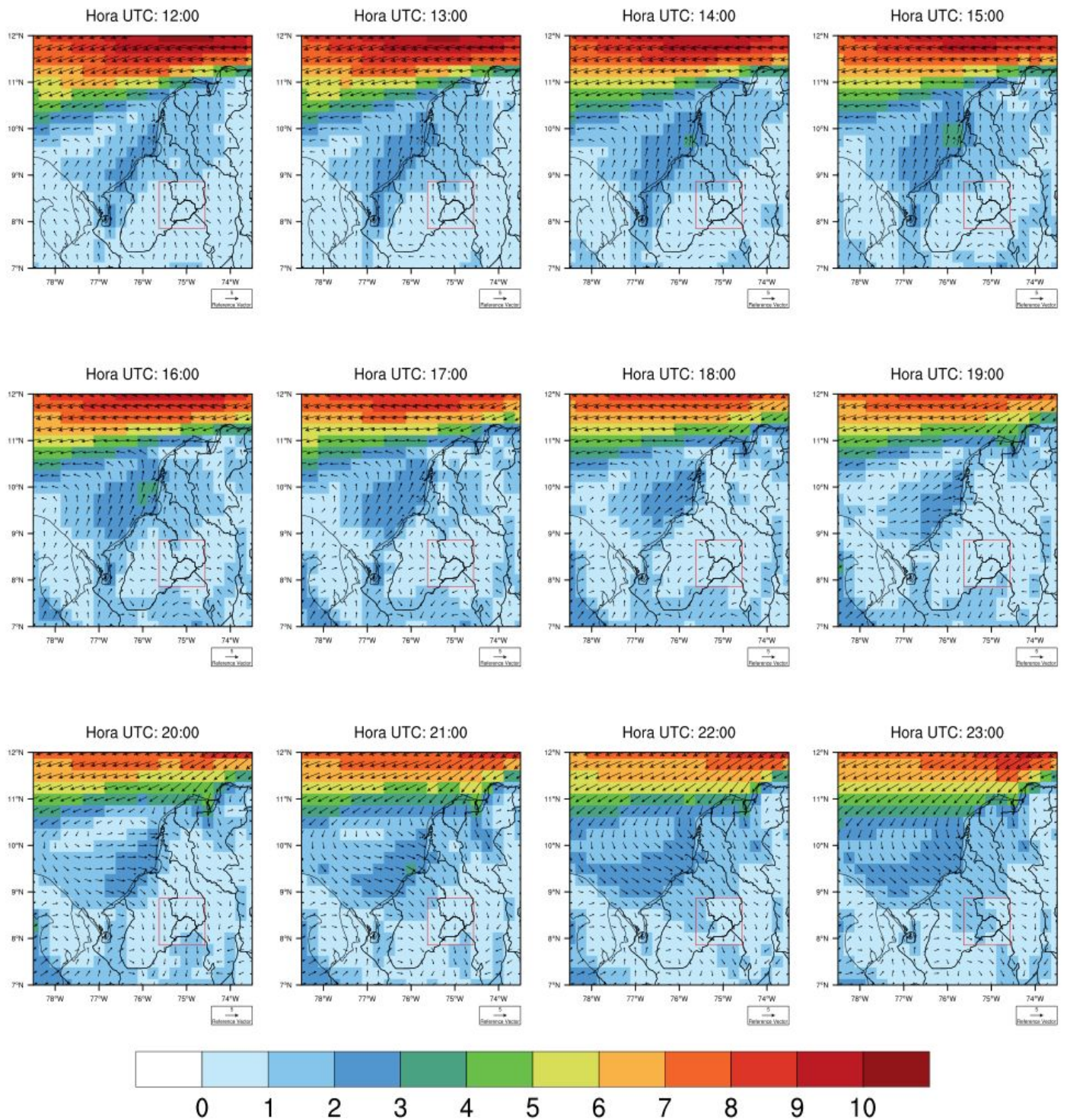


Figura 3.10: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de junio (1989-2018), de las 12:00:00 a las 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

3.2.2.1 Hodógrafa mes de junio para línea de costa y Ayapel

El comportamiento del viento a 10 m en Ayapel y la línea de costa se representa a través de hodógrafas (Figura 3.11) de acuerdo a la forma y ubicación de estas con respecto a la línea de costa puede determinarse la presencia de una brisa, además de su magnitud ($V = \sqrt{u^2 + v^2}$) y dirección ($\phi = \tan^{-1} \frac{v}{u}$) pueden ser calculadas. La hodógrafa correspondiente a la región Ayapel tiene una forma elíptica cuya rotación es en contra de las manecillas del reloj. Durante gran parte del ciclo diario, los vientos presentan direcciones hacia el noreste y sureste, con periodos de rotación, estas condiciones favorecen que la hodógrafa en este mes presente gran amplitud. Las horas del día con magnitudes más fuertes se dan de las 20:00:00 - 00:00:00 UTC (15:00:00 - 19:00:00, HL) con dirección oceano-línea de costa-Ayapel, entre las 23:00:00 y 01:00:00 UTC (18:00:00 y 20:00:00 HL) cambia la dirección del viento en sentido Ayapel-línea de costa-océano. La magnitud del viento decrece progresivamente desde las 01:00:00 - 10:00:00 UTC (20:00:00 - 05:00:00, HL), en este periodo de tiempo el viento presenta una rotación Ayapel-línea de costa en sentido antihorario. Más tarde Entre las 11:00:00 - 15:00:00 UTC (06:00:00 - 10:00:00, HL) la dirección del viento cambia en la región de Ayapel la componente zonal (u) se debilita y la meridional (v) se fortalece, por lo tanto, los vientos salen de Ayapel buscando el océano. Este patrón se debilita a la hora 14:00:00 UTC (09:00:00, HL) ya que la componente v se debilita y la componente u se fortalece. En las horas siguientes 15:00:00 -19:00:00 UTC (10:00:00 - 14:00:00, HL) la magnitud del viento es débil, y se fortalece a partir de las 20:00:00 UTC (15:00:00, HL). En la línea de costa la hodógrafa muestra una forma elíptica que rota en sentido horario, con una orientación sureste-noroeste. La magnitud del viento es más fuerte de las 20:00:00 - 00:00:00 UTC (15:00:00 - 19:00:00, HL) y de las 11:00:00 -17:00:00 UTC (06:00:00 - 12:00:00,HL). Durante estos dos periodos de máxima magnitud se dan vientos con dirección continente a océano entre las 12:00:00 a 14:00:00 UTC (07:00:00 a 09:00:00, HL), posteriormente entre las 15:00:00 - 17:00:00 UTC (10:00:00 - 12:00:00, HL), los vientos rotan en sentido horario hasta alcanzar el segundo periodo de máxima magnitud. Durante este, de las 21:00:00 a 23:00:00 UTC (16:00:00 a 19:00:00, HL) los vientos presentan una dirección océano a continente. Entre las 00:00:00 - 04:00:00 (19:00:00 a 00:00:00, HL) aún se logra definir la dirección océano a continente, sin embargo, en estos hay una disminución en la magnitud. Por último los vientos se fortalecen para rotar y comenzar el ciclo de nuevo.

En la Figura 3.11 se puede observar que el máximo en la magnitud del viento en la línea de costa es a las 21:00:00 UTC (16:00:00, HL) y en Ayapel a las 22:00:00 UTC (18:00:00, HL). Como se explica anteriormente los vientos van en dirección océano a continente, por lo que se concluye que la brisa marina llega a Ayapel una hora después con magnitudes un poco menores, es decir si existe una circulación océano - línea de costa - Ayapel.

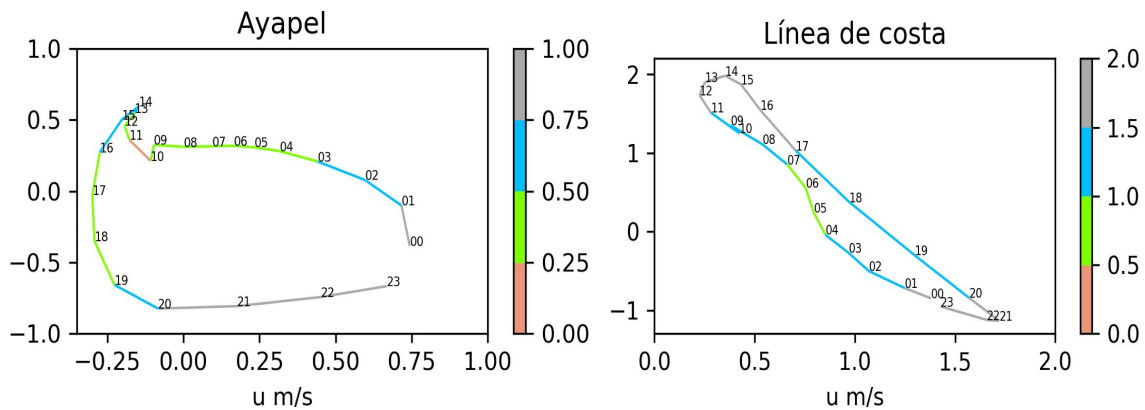


Figura 3.11: Hodógrafas a partir de vientos a 10 metros en el mes de junio (1989 - 2018). Ayapel (izquierda) y la línea de costa (derecha).

3.2.3. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de enero

La dirección de los vientos a 10 metros en el mes de enero va del océano a continente en la primera hora del día 00:00:00 UTC (19:00:00, HL), patrón que se mantiene hasta las 04:00:00 UTC (23:00:00, HL) cuando estos comienzan a debilitarse y rotar progresivamente en sentido anti horario; alrededor de las 09:00:00 UTC (04:00:00, HL) los vientos presentan una rotación ciclónica que a partir de las 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) logra definir un vórtice entre los 8-10 °N y los 74-76 °W, el cual se disipa a las 16:00:00 UTC (11:00:00, HL). Posteriormente los vientos presentan cambios súbitos, tomando la dirección océano a continente y aumentando su magnitud, estas condiciones se dan sobre la línea costera entre las 18:00:00 - 19:00:00 UTC (13:00:00 - 14:00:00, HL) y avanzan continente adentro, alcanzando la región de Ayapel alrededor de las 21:00:00 UTC (16:00:00, HL). Lo anterior indica que los vientos con dirección océano a continente se dan entre las 17:00:00 - 03:00:00 UTC (12:00:00 - 22:00:00, HL) con magnitudes entre 2-3 m/s. Los vientos se debilitan y rotan en sentido antihorario entre las 04:00:00 - 10:00:00 UTC (23:00:00 - 05:00:00, HL), estos dos momentos se asemejan al patrón de brisas marinas presentando las mayores magnitudes del día durante el primero de estos. Durante este mes se da la particularidad de que los vientos con dirección continente a océano no se definen, posiblemente consecuencia del vórtice que se da entre las 11:00:00 - 16:00:00 UTC (06:00:00 - 11:00:00, HL) (ver Figura 3.12 y 3.13).

3.2.3.1 Hodógrafa mes de enero para línea de costa y Ayapel

La hodógrafa que representa a Ayapel tiene una forma elíptica con rotación en contra de las manecillas del reloj, con una orientación noreste-suroeste. En Ayapel los vientos más fuertes se dan entre 01:00:00 - 07:00:00 UTC (20:00:00 - 02:00:00, HL) y en un periodo más corto a las 21:00:00 UTC (16:00:00, HL). El cambio en la dirección del viento más aparente se da entre 02:00:00 - 04:00:00 UTC (21:00:00 - 23:00:00, HL), donde los vientos rotan en dirección Ayapel-línea de costa. Desde entonces, el viento rota en sentido antihorario, disminuyendo su magnitud hasta las

09:00:00 UTC (04:00:00, HL), cuando los vientos toman dirección noreste hasta las 15:00:00 UTC (10:00:00, HL). Posteriormente entre las 16:00:00 y 18:00:00 UTC (11:00:00 y 13:00:00, HL), los

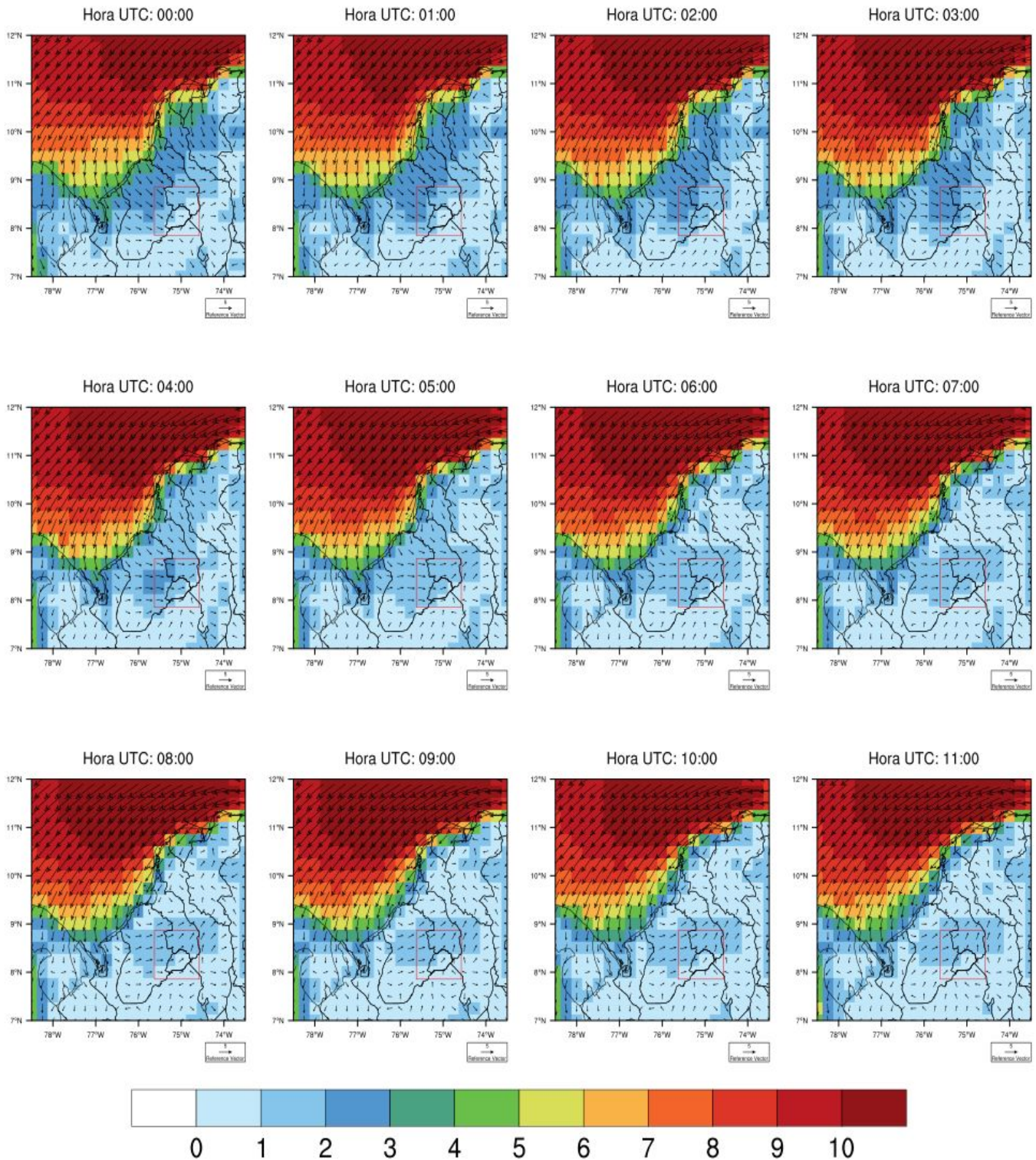


Figura 3.12: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de enero (1989 - 2018), de las 00:00:00 a las 11:00:00 horas UTC. Según ERA5.

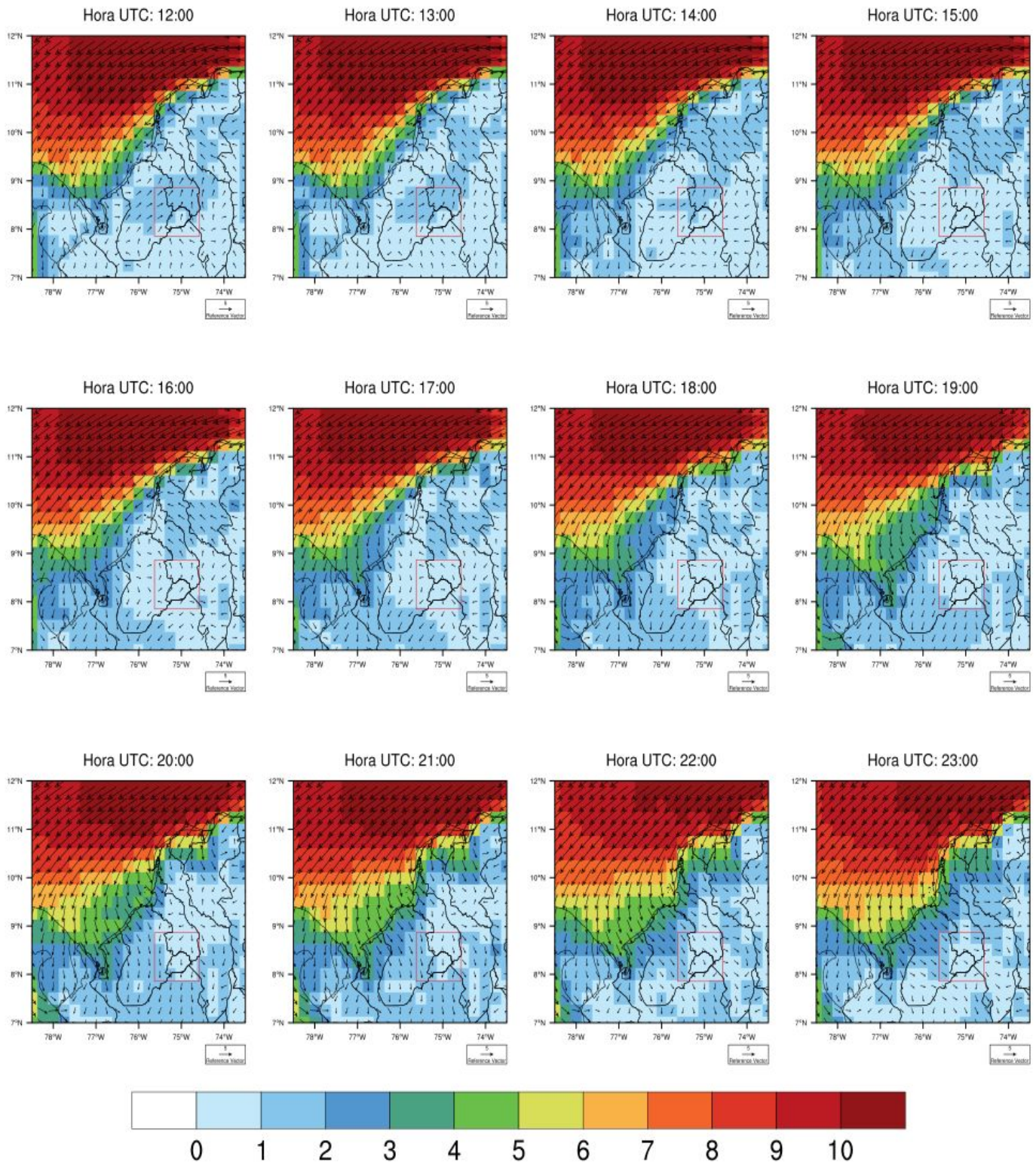


Figura 3.13: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de enero (1989 - 2018), de las 12:00:00 a las 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

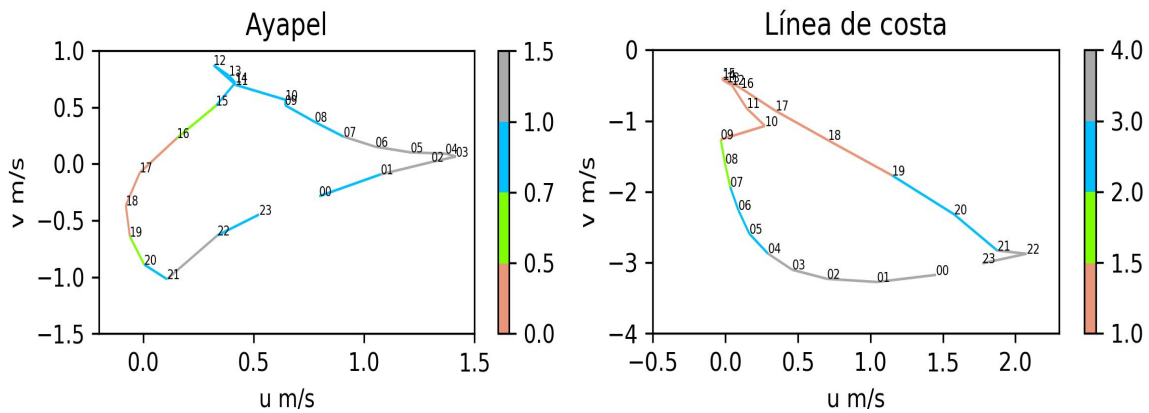


Figura 3.14: Hodógrafas a partir de vientos a 10 metros en el mes de enero (1989 - 2018). Ayapel (izquierda) y la línea de costa (derecha).

vientos se debilitan aún más y continúan rotando, hasta que a las 19:00:00 UTC (14:00:00, HL), estos se fortalecen progresivamente y comienzan a tomar dirección océano - línea de costa- Ayapel, condiciones que se mantienen hasta las 23:00:00 UTC (18:00:00, HL). En la línea de costa se observa que la hodógrafa tiene forma elíptica poco definida con rotación en sentido horario y una orientación sureste principalmente, con periodos de rotación. Las horas con las magnitudes más fuertes se dan en un periodo largo y continuo 00:00:00 - 06:00:00 UTC (19:00:00 - 01:00:00, HL) y 20:00:00 - 23:00:00 UTC (15:00:00 - 18:00:00, HL); durante el primer periodo los vientos tienen dirección océano a continente principalmente entre las 00:00:00 - 04:00:00 UTC (19:00:00 - 23:00:00, HL), posteriormente los vientos comienzan a debilitarse y a rotar en sentido horario entre las 05:00:00 - 18:00:00 UTC (00:00:00 - 13:00:00, HL), dentro este periodo de tiempo se dan pequeños momentos en los que los vientos presentan una dirección hacia el sur, alrededor de las 11:00:00 y 16:00:00 UTC (06:00:00 y 11:00:00, HL). Entre las 19:00:00 y 23:00:00 UTC (14:00:00 y 18:00:00, HL), los vientos se fortalecen y toman la dirección océano a continente.

Al igual que la Figura 3.11, en la Figura 3.14, se puede identificar que la máxima magnitud en la línea de costa se da a las 20:00:00 UTC (15:00:00, HL), mientras que en Ayapel se da a las 21:00:00 UTC (16:00:00, HL), por la dirección del viento océano a continente predominante en ambas regiones para estas horas del ciclo diario, se puede concluir que las brisas marinas sobre la línea de costa alcanzan Ayapel y logran fortalecer los vientos allí.

3.2.4. Ciclo diurno del viento a 10 metros en el mes de octubre

El ciclo diurno en el mes de octubre a las 00:00:00 UTC (19:00:00, HL) muestra que el patrón de vientos va de océano a continente, con el detalle de que los vientos provienen de Panamá (del océano Pacífico) entran al mar Caribe y se encuentran con una porción de vientos provenientes del Caribe. Los vientos con dirección océano - continente presentan magnitudes entre 1.5 - 2.5 m/s sobre la línea de costa y entre 0.5 - 1.5 m/s sobre Ayapel. Este patrón de vientos parece disiparse a las 02:00:00 UTC (22:00:00, HL), ya que a partir de esta hora la magnitud del viento se ve

debilitada y los vientos rotan en sentido antihorario durante la horas posteriores, en un corto periodo entre las 05:00:00 - 10:00:00 UTC (00:00:00 - 05:00:00, HL) los vectores de viento son paralelos a

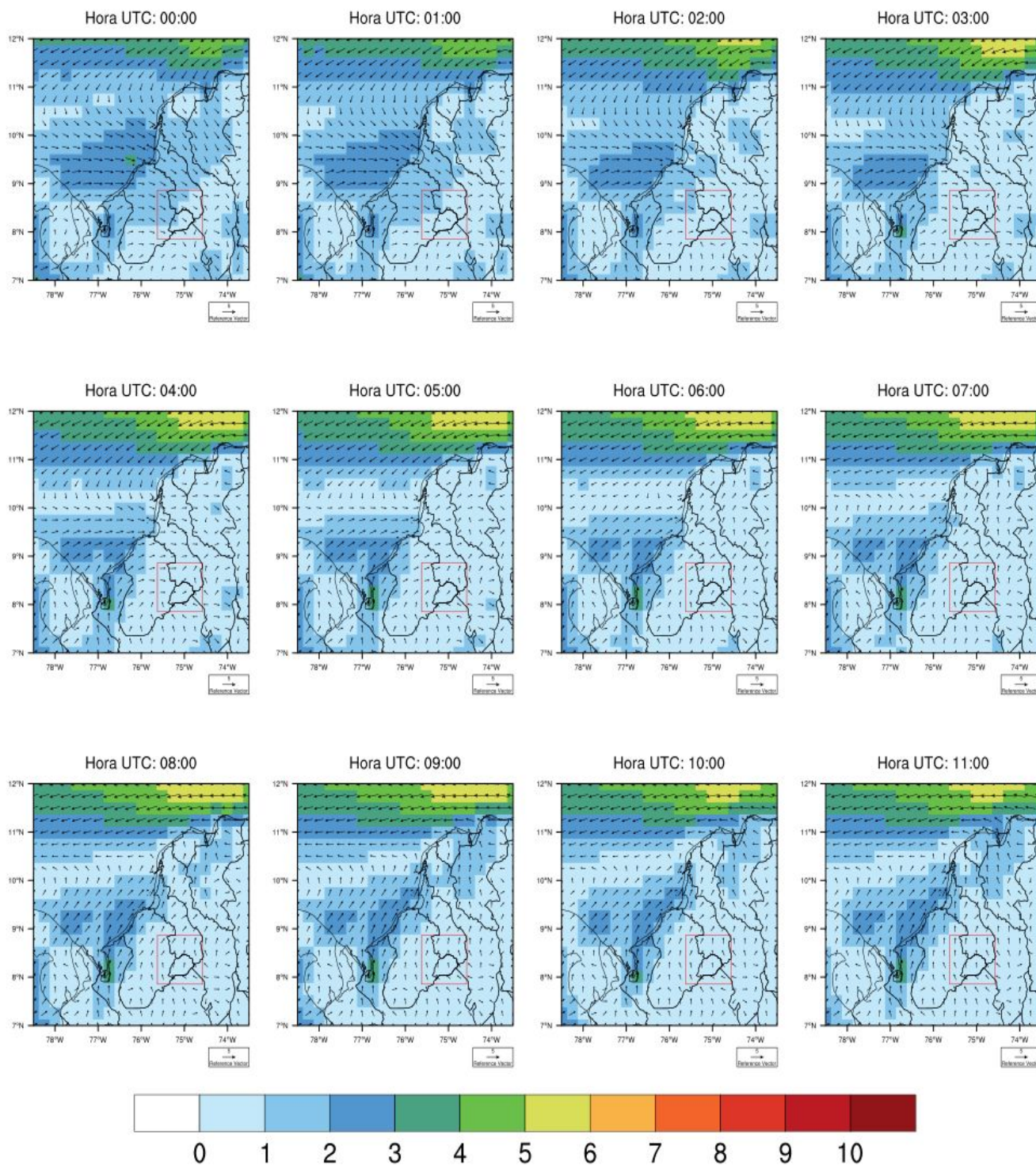


Figura 3.15: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de octubre (1989 - 2018), de las 00:00:00 a las 11:00:00 horas UTC. Según ERA5.

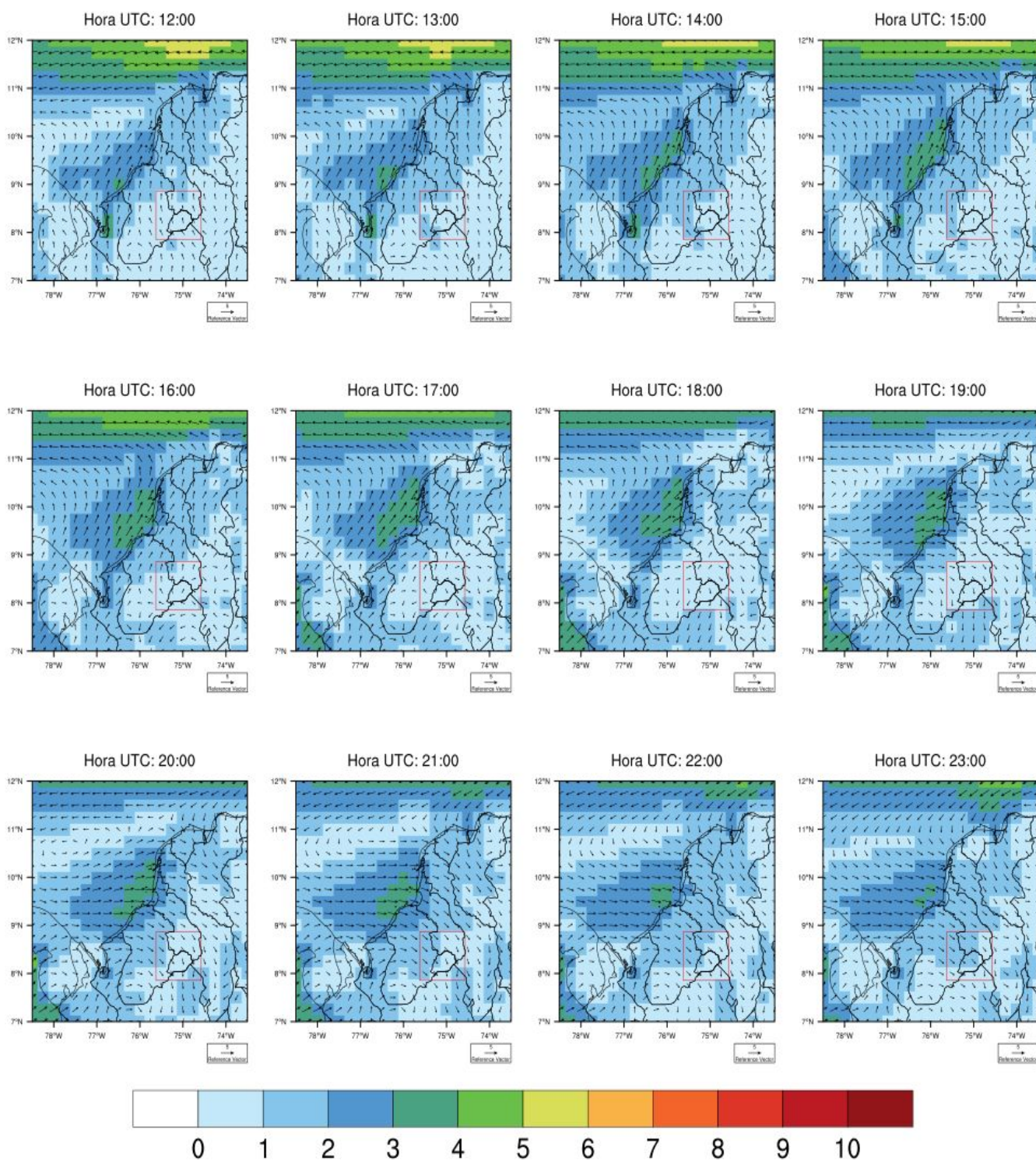


Figura 3.16: Mapas del ciclo diario del viento en m/s a 10 metros de altura en el mes de octubre (1989 -2018), de las 12:00:00 a las 23:00:00 horas UTC. Según ERA5.

la línea de costa. A partir de las 11:00:00 UTC (06:00:00, HL), se define un patrón con dirección continente a océano, con aumentos progresivos en la magnitud del viento principalmente sobre la línea costera, durante las horas previas al cambio en su dirección (14:00:00 - 15:00:00 UTC; 09:00:00 - 10:00:00, HL) los vientos alcanzan las máximas magnitudes del ciclo diurno, con valores entre 3.5 - 4 m/s sobre la línea costera y de 1.5 - 2 m/s sobre Ayapel, aunque los vientos del continente alcanzan a cruzar la línea de costa, estos tienen una componente meridional fuerte, es decir, presentan una dirección hacia el norte, además de que los vientos por encima de la línea de costa son paralelos a esta, ambos patrones de viento convergen en el mismo lugar. Luego, desde las 16:00:00 UTC (11:00:00, HL) los vientos sobre la línea de costa son paralelos a ésta, sin embargo a partir de las 17:00:00 UTC (12:00:00, HL) se nota que los vientos rotan en sentido horario, la magnitud de los vientos sobre la línea de costa se mantiene entre 2 - 3 m/s, mientras que sobre Ayapel decae a magnitudes entre 0 - 0.5 m/s. A partir de las 20:00:00 UTC (15:00:00, HL), los vientos muestran un patrón de océano a continente, a medida que avanzan las horas estos vientos se mueven continente adentro logrando alcanzar Ayapel alrededor de las 22:00:00 UTC (17:00:00, HL), momento en el que las magnitudes sobre la región se fortalecen presentando valores de entre 1.5 - 2 m/s. Durante el mes de octubre el patrón de brisas marinas muestra: vientos débiles que a medida que avanzan las horas rotan en sentido antihorario, con un periodo corto en el que son paralelos a la línea de costa (05:00:00-10:00:00 UTC), este es el primer momento de la brisa, ERA5 lo proyecta entre las 02:00:00 - 10:00:00 UTC (21:00:00 - 05:00:00, HL). Los vientos fuertes con dirección continente al océano se dan entre las 11:00:00 - 15:00:00 UTC (06:00:00 - 10:00:00, HL), con magnitudes entre 2 - 3.5 m/s sobre la línea de costa y entre 0.5 - 1.5 m/s sobre Ayapel, este es el segundo momento de las brisas marinas. Posteriormente los vientos rotan en sentido horario, las magnitudes sobre la línea de costa se mantienen altas. Sin embargo, sobre el continente disminuyen y aún más sobre la región de Ayapel, durante este periodo los vientos son paralelos a línea de costa a las 16:00:00 UTC (11:00:00, HL), y rotan entre las 16:00:00 - 19:00:00 UTC (11:00:00 - 14:00:00, HL); este es el tercer momento de la brisa. El cuarto momento con un patrón de continente a océano se da entre las 20:00:00 - 02:00:00 UTC (15:00:00 - 22:00:00, HL), con magnitudes entre 2.5 - 4 m/s sobre la línea de costa y entre 1 - 2 m/s sobre Ayapel; los vientos alcanzan la región de interés a las 22:00:00 UTC (17:00:00, HL).

3.2.4.1 Hodógrafa mes de octubre para línea de costa y Ayapel

La hodógrafa de Ayapel tiene forma elíptica, se puede definir que rota en sentido antihorario, durante la mayor parte de su trayectoria. Presenta sus máximos entre las 20:00:00 - 01:00:00 UTC (15:00:00 - 20:00:00, HL) y entre las 13:00:00 - 15:00:00 UTC (08:00:00 - 10:00:00, HL). Durante la hora 00:00:00 UTC (19:00:00, HL), los vientos tienen dirección océano a continente, en seguida las magnitudes comienzan a decrecer y se da una rotación antihoraria, después de las 07:00:00 UTC (02:00:00, HL) los vientos presentan dirección Ayapel - línea de costa es decir hacia el norte, los vientos continúan rotando en sentido horario, particularmente entre las 11:00:00 y 15:00:00 UTC (06:00:00 y 10:00:00, HL) los vientos tienen dirección noroeste y entre las 13:00:00 - 15:00:00 UTC (08:00:00 - 10:00:00, HL) las magnitudes son máximas, consecuente con lo anterior los vientos presentan dirección Ayapel - línea de costa entre las 11:00:00 - 15:00:00 UTC (06:00:00 - 10:00:00, HL) con direcciones norte y noroeste. A partir de las 16:00:00 UTC (11:00:00, HL) los

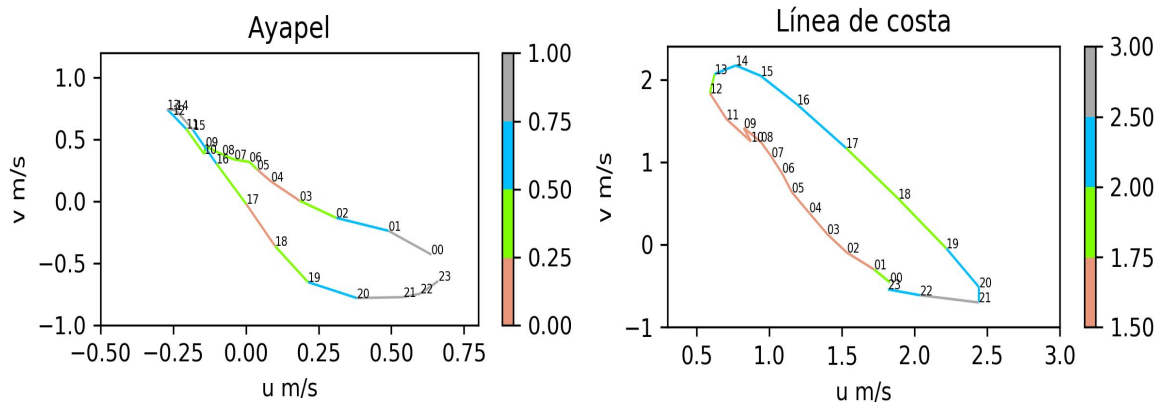


Figura 3.17: Hodógrafas a partir de vientos a 10 metros en el mes de octubre (1989 - 2018). Ayapel (izquierda) y la línea de costa (derecha).

vientos rotan nuevamente, hasta las 19:00:00 UTC (14:00:00, HL) cuando los vientos toman dirección océano - línea de costa - Ayapel, estas condiciones se mantienen hasta las 23:00:00 UTC (18:00:00, HL). La hodógrafa de la línea de costa cuenta con una forma elíptica con rotación horaria y una orientación noreste - sureste. Las mayores magnitudes se dan entre las 20:00:00 a 22:00:00 UTC (15:00:00 a 17:00:00, HL) con dirección océano continente y un poco menos fuerte entre las 13:00:00 a 16:00:00 UTC (09:00:00 a 12:00:00 HL) con dirección contraria, es decir, continente a océano. Los cambios en la dirección se dan entre las 04:00:00 a 10:00:00 UTC (23:00:00 - 05:00:00, HL) y las 17:00:00 a 19:00:00 UTC (12:00:00 a 14:00:00, HL), ambos periodos presentan un rotación en sentido horario.

En octubre la relación entre las hodógrafas no es tan definida, ya que los periodos máximos coinciden a las mismas horas, al igual que las direcciones océano a continente y viceversa. Vale la pena mencionar que la rotación sobre la línea de costa es en sentido horario, mientras que sobre Ayapel tiene sentido antihorario, patrón que se ha repetido en las hodógrafas anteriores (ver Figuras 3.11 y 3.14); la causa aparente puede deberse a la forma compleja que presenta la línea de costa de intereses, condicionando el comportamiento diurno de los campos de vientos.

3.3. Viento a 925 hPa

3.3.1. Ciclo diurno y anual en Ayapel y en la línea de costa

Las magnitudes de los vientos a 925 hPa (en altura ~ 750 msnm) presentadas en la Figura 3.18 son mayores en comparación con las magnitudes de los vientos a 10 metros (ver Figura 3.8), gracias a que el efecto de fricción superficial se reduce con la altura, facilitando el desarrollo de corrientes de viento. Asimismo, las diferencias en magnitudes sobre la región de Ayapel y la línea de costa son menores en comparación con los vientos a 10 metros. El pico máximo de vientos a 925 hPa sobre la región de Ayapel se da en el mes de marzo a las 02:00:00 UTC (21:00:00, HL) con magnitudes de 4.7 m/s, el segundo pico máximo se da en febrero a las 03:00:00 UTC (22:00:00, HL) con una

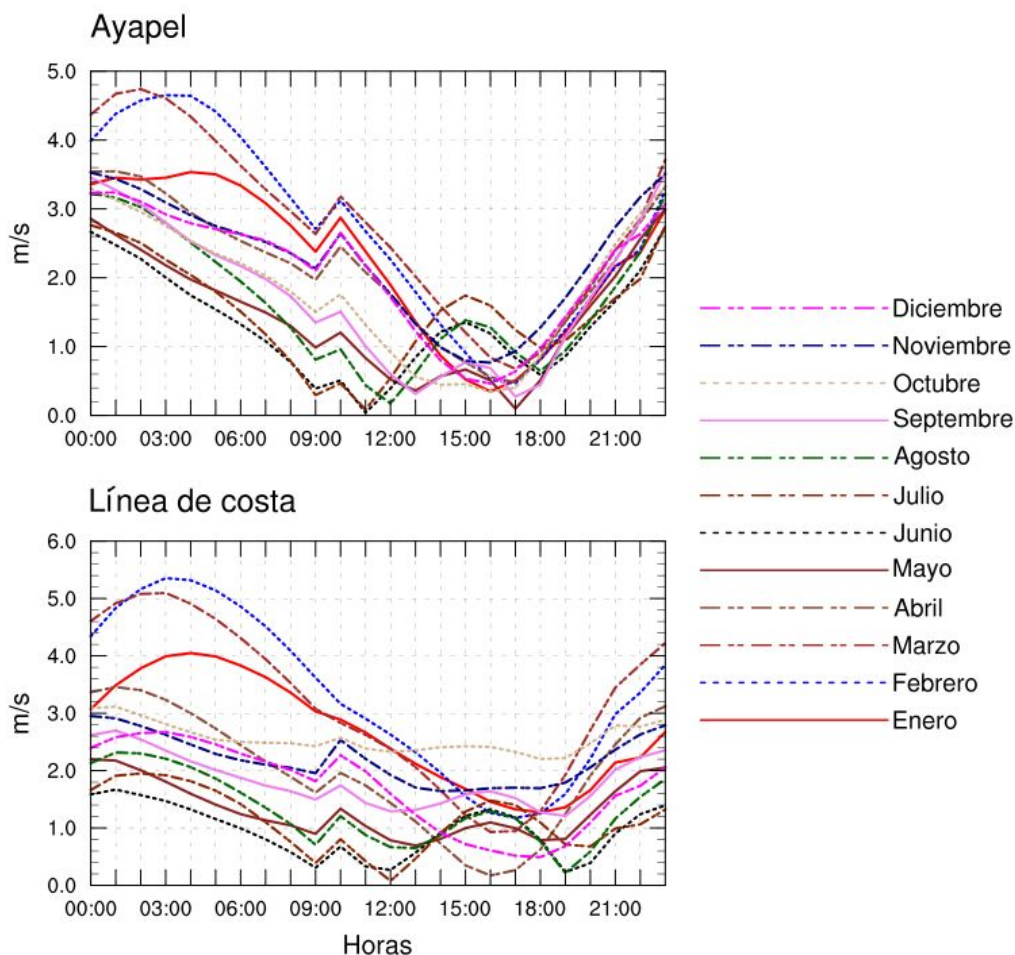


Figura 3.18: Ciclo diario de la magnitud del viento a 925 hPa en m/s, para todos los meses del año a partir del promedio horario mensual de los años 1989-2018. Para Ayapel (arriba) y línea de costa (abajo), En horas UTC, según ERA5.

magnitud de 4.6 m/s. El pico mínimo se da en junio a las 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) con magnitudes de 0.04 m/s, a la misma hora se da el segundo mínimo en Julio con magnitudes de 0.08 m/s. Sobre la línea de costa, el pico máximo se da en febrero a las 04:00:00 UTC (23:00:00, HL) con magnitudes de 5.7 m/s, el segundo máximo se da en marzo a las 03:00:00 UTC (22:00:00, HL) con magnitudes de 5.4 m/s, sobre la línea de costa se puede diferenciar un tercer pico en el mes de enero a las 04:00:00 UTC (23:00:00, HL) con magnitudes de 4.3 m/s. Los picos mínimos se dan en Junio y Julio a las 09:00:00 UTC (04:00:00, HL) y 12:00:00 UTC (07:00:00, HL) con magnitudes de 0.1 y 0.08 m/s respectivamente.

3.3.2. Ciclo diario del viento a 925 hPa en el mes de junio

En el mes de junio los vientos a 925 hPa (Figura 3.19 y 3.20) entran al continente perpendiculares a la línea de costa con magnitudes de 1 - 2 m/s, avanzan y cruzan Ayapel con magnitudes de 2-3 m/s hasta que se encuentran y chocan con el fin de la cordillera central, esto sucede entre las 21:00:00 - 00:00:00 - 08:00:00 UTC (16:00:00 - 19:00:00 - 03:00:00, HL), siendo más fuertes en las primeras

horas y debilitándose con el paso del tiempo. Cabe recordar que a 10m de altura en el mes de junio los vientos entran al continente de las 21:00:00 a las 02:00:00 UTC (16:00:00 a las 21:00:00, HL) (Figura 3.9 y 3.10). A las 09:00:00 UTC (04:00:00, HL) los vientos sobre el continente comienzan a rotar en sentido antihorario, a las 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) se define una circulación ciclónica que dura poco y desaparece en la hora 12:00:00 UTC (07:00:00, HL). Posteriormente a las 13:00:00 - 14:00:00 UTC (08:00:00 - 09:00:00, HL) los vientos con magnitudes débiles de 0 - 1 m/s toman dirección de continente a océano, se fortalecen un poco y alcanzan valores de 1-2 m/s entre las horas 15:00:00 - 16:00:00 UTC (10:00:00 - 11:00:00, HL). Enseguida, en la hora 17:00:00 UTC (12:00:00, HL) los vientos se debilitan nuevamente y comienzan a rotar, hasta las 20:00:00 UTC (15:00:00, HL) donde los vientos comienzan a tornar en sentido océano a continente. En las tres últimas horas del ciclo 21:00:00, 22:00:00 y 23:00:00 UTC (16:00:00, 17:00:00 y 18:00:00, HL) los vientos son perpendiculares a la línea de costa donde presentan magnitudes débiles de entre 0 - 1 m/s, estos vientos perpendiculares a la línea de costa llegan a Ayapel un poco más fuertes con magnitudes entre 2 - 3 ms.

3.3.3. Ciclo diurno del viento a 925 hPa en el mes de enero

Los campos de esta variable tienen dirección océano a continente entre las 00:00:00 - 12:00:00 UTC (19:00:00 - 07:00:00, HL), las magnitudes más altas de 5-6 m/s se dan entre las 00:00:00 - 06:00:00 UTC (19:00:00-01:00:00 HL), aunque la dirección se mantenga durante las horas posteriores los vientos se debilitan hasta alcanzar magnitudes entre 2-3 m/s sobre las 12:00:00 UTC (07:00:00, HL). A partir de las 13:00:00 UTC (08:00:00, HL) los vientos además de debilitarse, rotan en sentido horario tomando dirección suroeste hasta las 17:00:00 UTC (12:00:00, HL). Posteriormente a las 18:00:00 UTC (13:00:00, HL), los vientos se fortalecen y rotan en sentido antihorario y nuevamente toman la dirección de océano a continente a las 22:00:00 UTC (17:00:00, HL). Acorde a lo anterior los vientos van del océano al continente durante la mayor parte del día entre las 22:00:00-12:00:00 UTC (17:00:00-07:00:00, HL) con magnitudes entre 5-6 m/s. Con un periodo corto de debilitación y redireccionamiento hacia el suroeste entre las 13:00:00-17:00:00 UTC (08:00:00-12:00:00, HL) con magnitudes entre 1-3 m/s, se fortalecen y rotan nuevamente hasta tomar la dirección océano a continente entre las 18:00:00-22:00:00 UTC (13:00:00-17:00:00, HL) (ver Figura 3.21 y 3.22).

3.3.4. Ciclo diurno del viento a 925 hPa en el mes de octubre

Durante las primeras horas del ciclo diurno, el patrón de vientos presenta dirección océano a continente hasta alrededor de las 07:00:00 UTC (02:00:00, HL), vale la pena mencionar que gran parte de los vientos que cruzan la línea de costa provienen de Panamá y otra parte del mar Caribe; entre las 00:00:00, 01:00:00 se dan las mayores magnitudes con valores entre 1-2 m/s sobre la línea de costa y de 3-4 m/s sobre Ayapel, en esta última región las magnitudes caen a entre 2-3 m/s al pasar las horas. A partir de las 08:00:00 UTC (03:00:00, HL) los vientos comienzan a debilitarse aún más, y desde las 11:00:00 UTC (06:00:00, HL) estos comienzan a rotar en sentido antihorario, alrededor de las 13:00:00 UTC (08:00:00, HL) los vientos son paralelos a la línea de costa, durante las horas posteriores estos continúan rotando, hasta las 15:00:00 UTC (11:00:00, HL) donde se

logra definir un patrón con vientos de continente a océano, con magnitudes entre 2-3 m/s sobre la línea de costa y de 0.5 - 2 m/s sobre Ayapel, este patrón de vientos tiene corta duración. Entre las

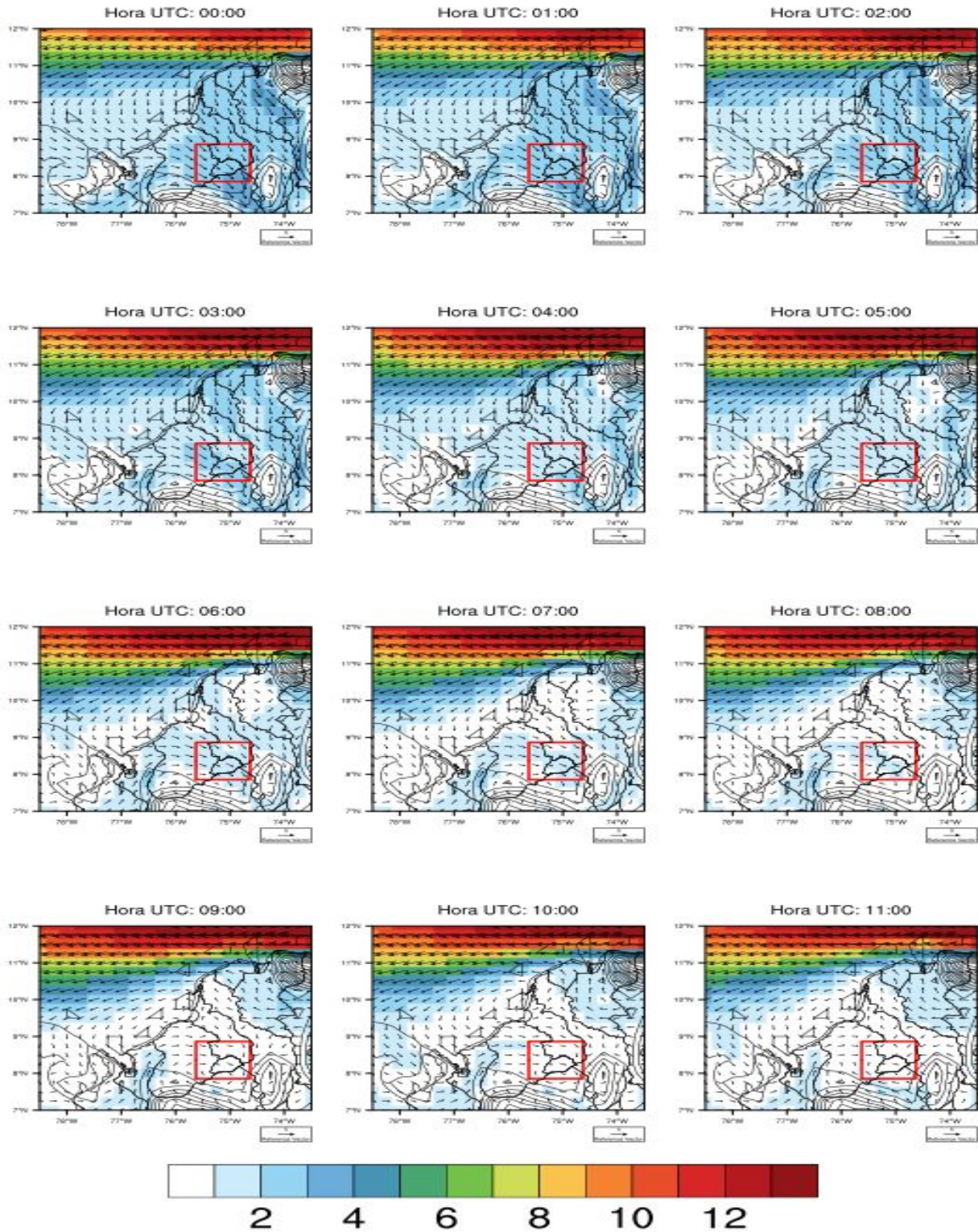


Figura 3.19: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de junio en Ayapel, de las 00:00:00 a las 11:00:00 UTC. Según ERA5.

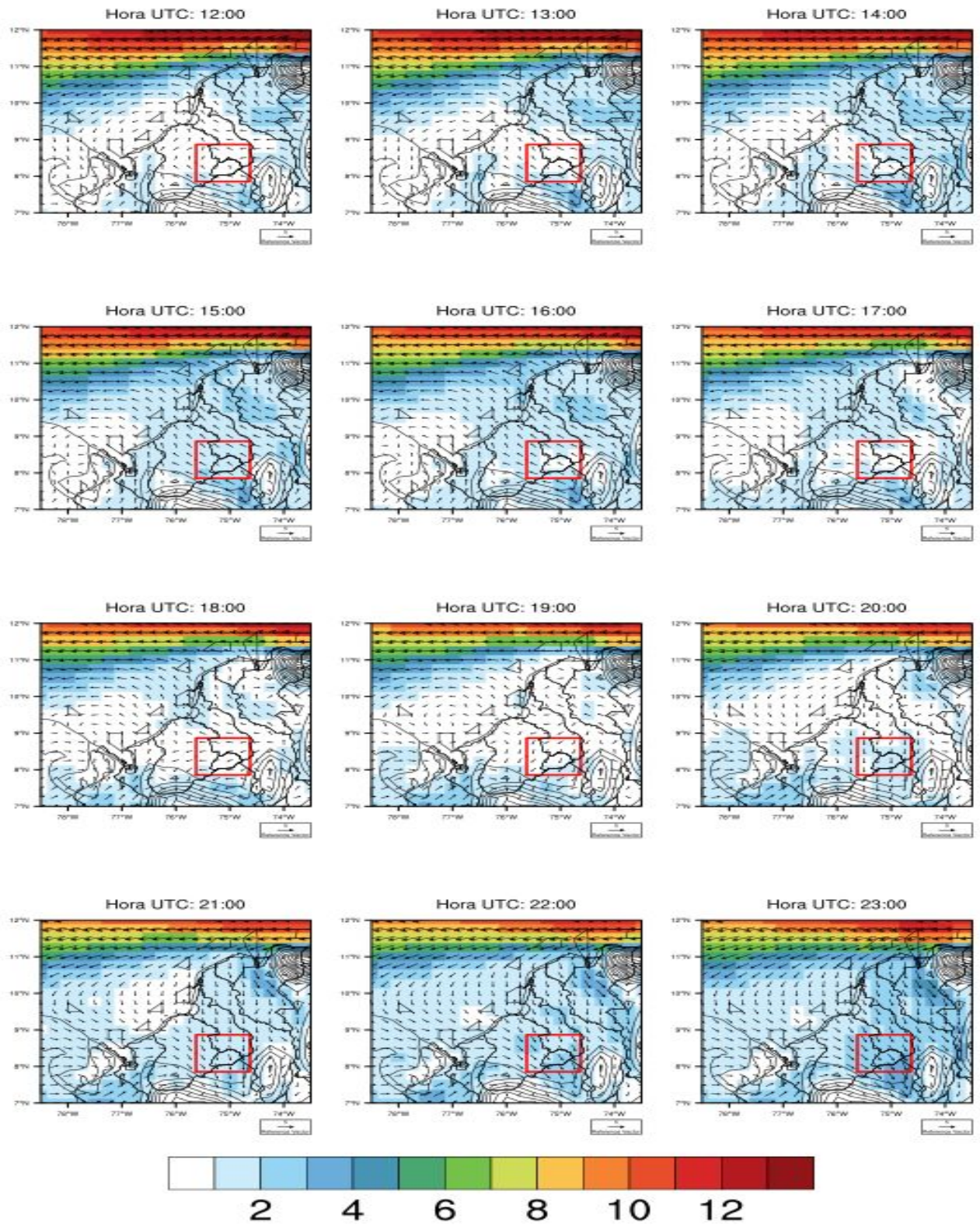


Figura 3.20: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de junio en Ayapel, de las 12:00:00 a las 23:00:00 UTC. Según ERA5.

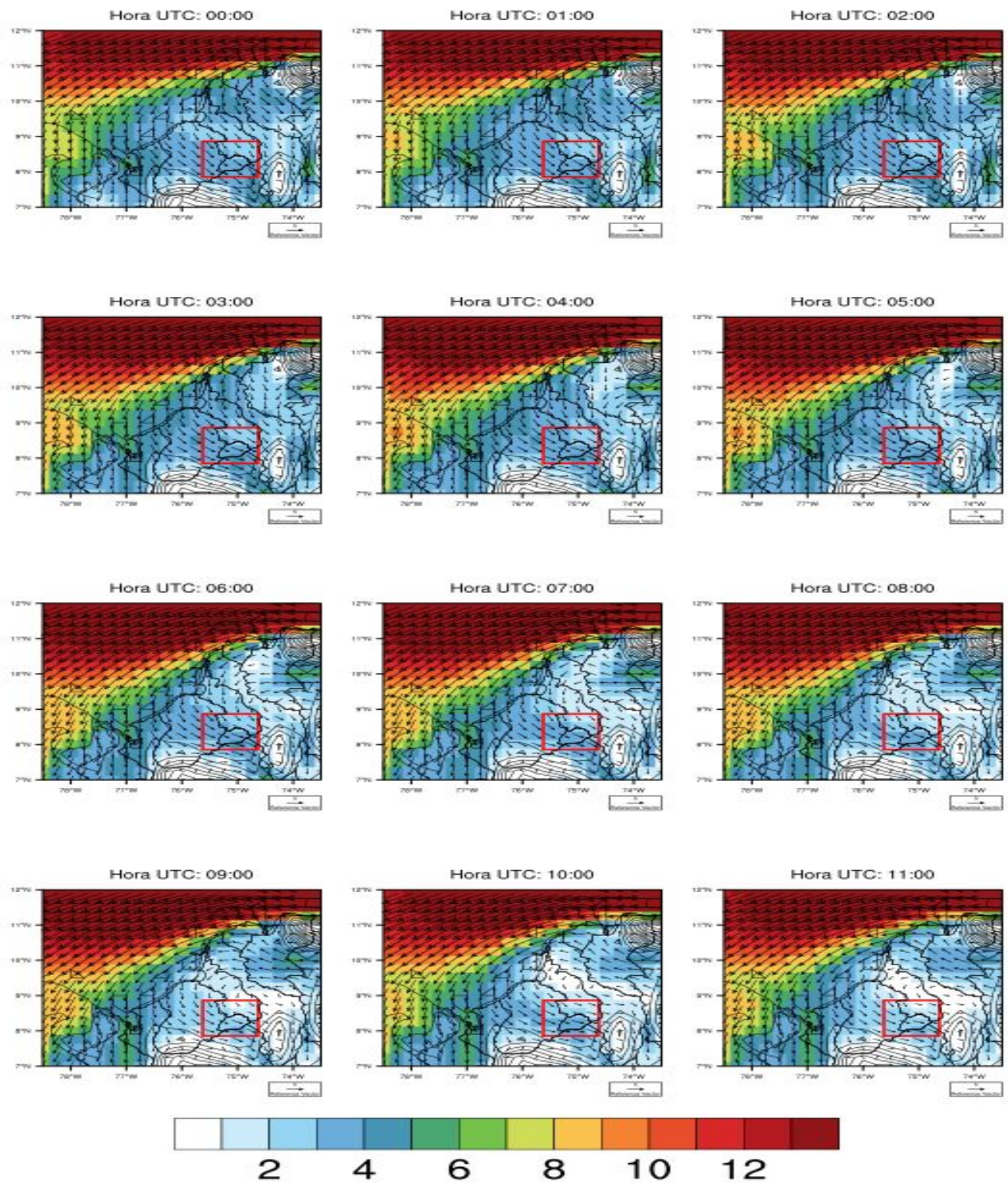


Figura 3.21: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de enero en Ayapel, de las 00:00:00 a las 11:00:00 UTC. Según ERA5.

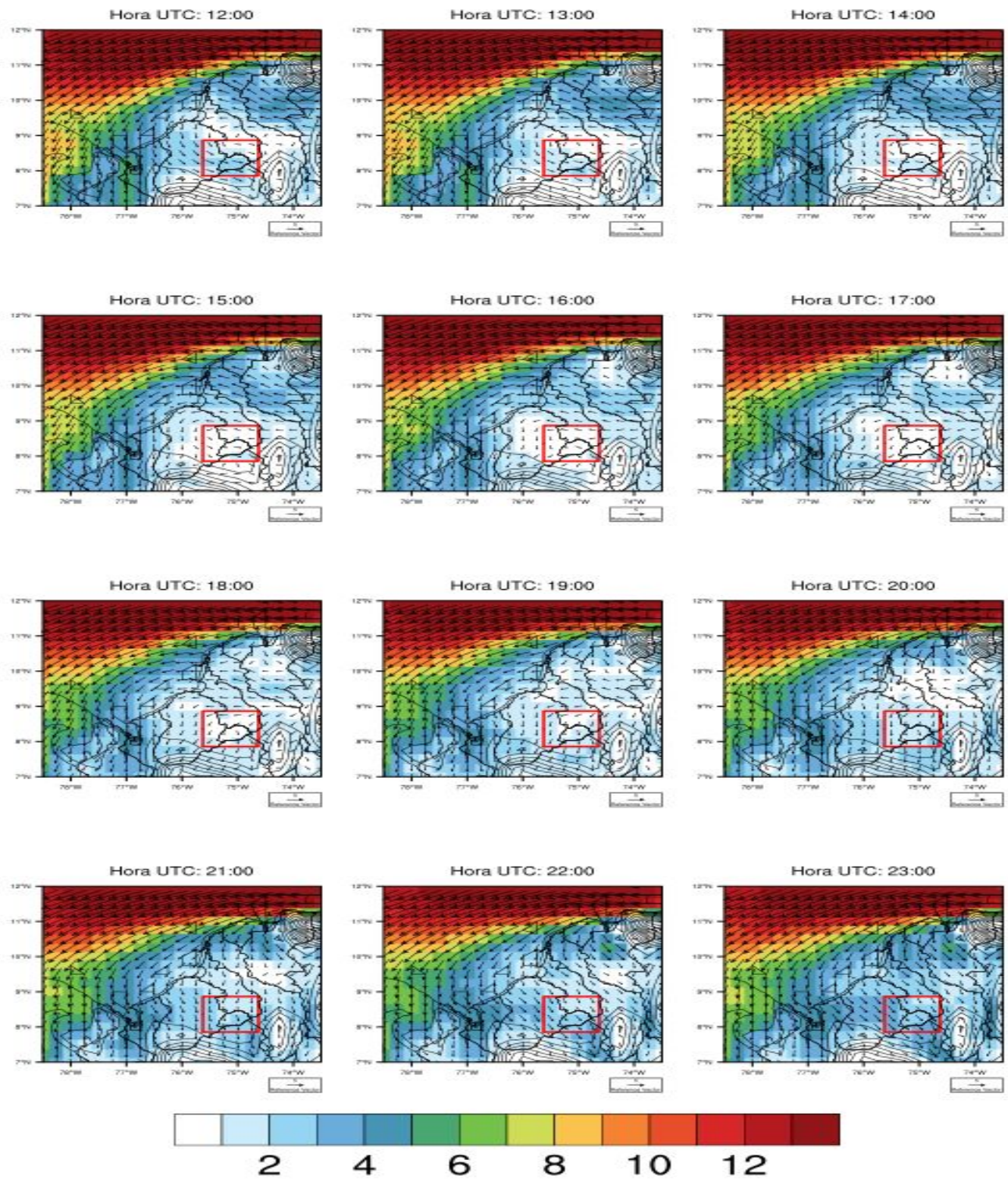


Figura 3.22: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de enero en Ayapel, de las 12:00:00 a las 23:00:00 UTC. Según ERA5.

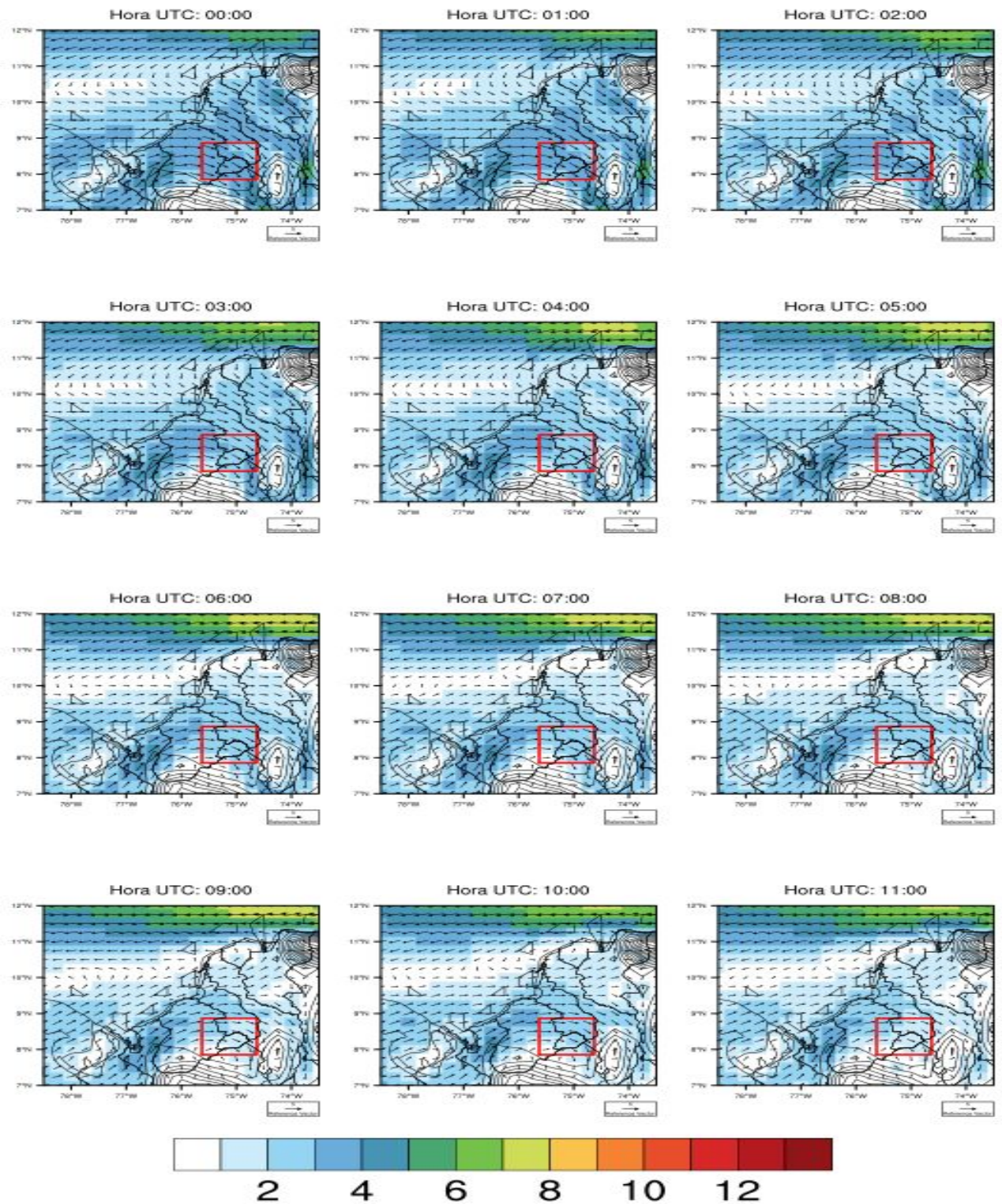


Figura 3.23: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de octubre en Ayapel, de las 00:00:00 a las 11:00:00 UTC. Según ERA5.

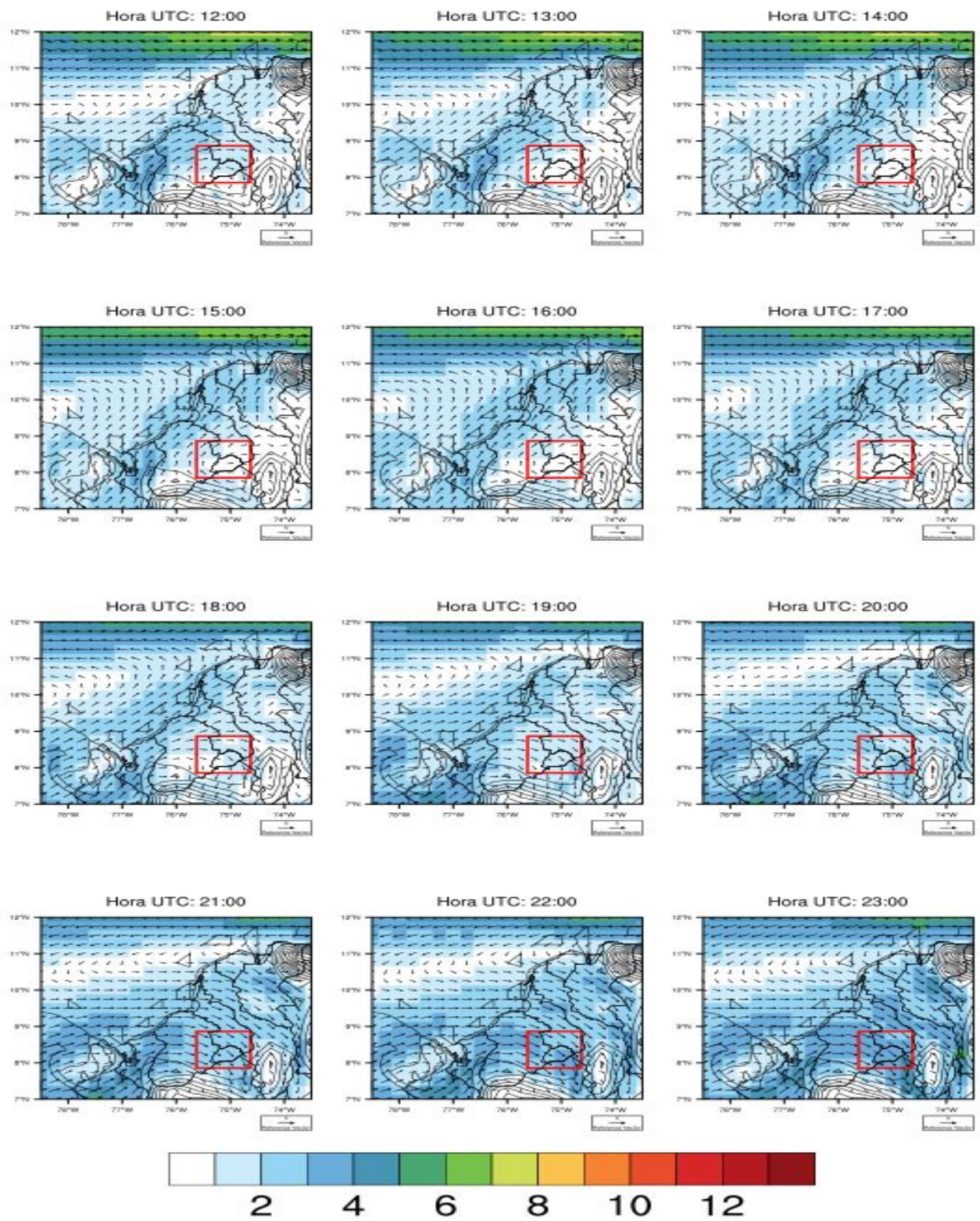


Figura 3.24: Mapas del ciclo diario del viento a 925 hPa en m/s para el mes de octubre en Ayapel, de las 12:00:00 a las 23:00:00 UTC. Según ERA5.

17:00:00 - 20:00:00 UTC (12:00:00 - 15:00:00, HL), los vientos rotan en sentido horario, dentro de este periodo de tiempo los vientos son paralelos a la línea de costa entre las 17:00:00 y 18:00:00 UTC (12:00:00 y 13:00:00, HL). Luego a las 21:00:00 UTC (16:00:00, HL), los vientos se fortalecen y presentan un patrón con dirección continente a océano, condiciones que se mantienen hasta el final del ciclo diurno.

3.4. Síntesis de la brisa en la región

El segmento siguiente discutirá las relaciones entre la temperatura a 2 metros de altura y los vientos a diferentes niveles (10 metros, 925 y 850 hPa), a través de temporadas (agrupaciones de meses con características similares) específicos representativos de un patrón de brisa marina identificado en las Figuras anteriores. Estos periodos se agrupan entre los siguientes conjuntos de meses: *diciembre-enero-febrero-marzo-abril*; mayo-junio-julio-agosto; septiembre-octubre-noviembre (Los meses en *cursiva* son identificados como meses de transición). Además, basados en el análisis previo para cada hora del día, hemos definido periodos del día según características y cambios importantes en la brisa. En esta síntesis nos enfocamos entonces en los periodos del día definidos por “**tarde-noche**” (20:00 - 03:00 UTC, 15:00 - 22:00 HL), “**madrugada**” (04:00 - 09:00 UTC, 23:00 - 5:00 HL), “**mañana**” (10:00 - 16:00 UTC, 5:00 - 11:00 HL) y “**mediodía**” (17:00 - 19:00 UTC, 12:00 - 14:00 HL). De cada temporada se extrajo un mes representativo de la brisa: enero para el primer periodo del año, junio para el segundo y octubre para el último. Las discusiones se llevarán a cabo sobre estos meses, al igual que se hizo con las Figuras anteriores.

3.4.1. Junio - brisa mar- tierra y tierra mar

El comportamiento de la temperatura en el mes de junio muestra que durante la tarde y primeras horas de la noche (i.e. sobre las 20:00:00 - 03:00:00 UTC, 15:00:00 - 22:00:00, HL; ver primera columna en Figura 3.25), las temperaturas sobre océano - línea de costa son relativamente homogéneas, estando el mar alrededor de un grado menor a la costa. Sobre las regiones entre la línea de costa - Ayapel, se distinguen aumentos en la temperatura a medida que se avanza hacia Ayapel, mostrando que existe un gradiente de temperatura entre océano - línea de costa - Ayapel, siendo los valores más bajos sobre el océano y los más altos sobre Ayapel. Los vientos son influenciados por los gradientes de temperatura y presión, en fenómenos como las brisas marinas donde los gradientes entre el continente y el océano, son el agente principal en la evolución diaria de este (Miller, 2003; Simpson, 1994). Para la región de interés, los vientos apuntan hacia las zonas más cálidas (i.e. hacia Ayapel entre las 20 y 03 UTC), ya que es allí donde se dan los centros de baja presión. Esta influencia se logra diferenciar para los vientos a 10 metros y 925 hPa (ver primera columna en Figura 3.25), ya que en ambas alturas los vientos cruzan la línea de costa y logran alcanzar Ayapel. Vale la pena resaltar que los vientos a 925 hPa, sobrepasan la región y chocan con la cordillera central; este patrón se logra definir unas horas después del pico máximo de temperatura sobre el continente. A diferencia de estos, los vientos a 850 hPa tienen una dirección principalmente zonal hacia el oeste.

Entre las 10:00:00 - 16:00:00 UTC (tercera columna en Figura 3.25), el gradiente de temperatura es inverso, es decir las mayores temperaturas se dan sobre el océano mientras que las menores en la línea de costa y regiones continente adentro (Ayapel), por lo que los vientos toman la dirección de continente a océano. Dada la morfología de la línea de costa y la distribución espacial de la temperatura sobre el océano, la dirección de estos vientos no es perpendicular a línea de costa. Estas condiciones son similares para los vientos a 10 metros y 925 hPa, mientras que los vientos a 850 hPa presentan una corta rotación en sentido horario, disminuyendo su componente zonal haciendo que logren cruzar la línea de costa.

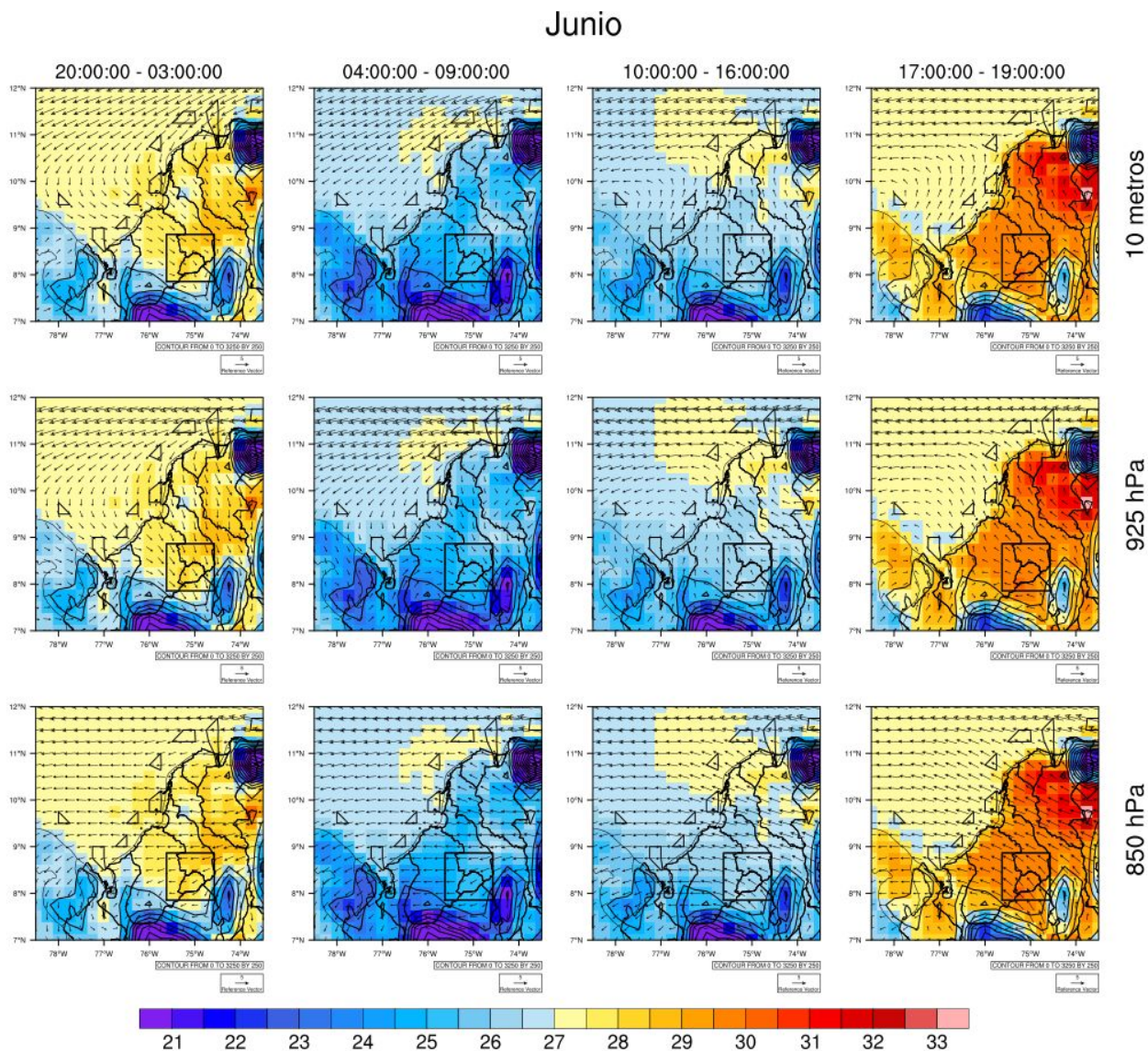


Figura 3.25: Mapas de temperatura más vientos a 10 m (arriba), 925 hPa (medio) y 850 hPa (abajo), en horas representativas de la circulación brisa mar - tierra. Los periodos del día definidos por "tarde-noche" (20:00 - 03:00 UTC, 15:00 - 22:00 HL), "madrugada" (04:00 - 09:00 UTC, 23:00 - 5:00 HL), "mañana" (10:00 - 16:00 UTC, 5:00 - 11:00 HL) y "mediodía" (17:00 - 19:00 UTC, 12:00 - 14:00 HL).

En la madrugada (23:00:00 - 04:00:00 HL, segunda columna en Figura 3.25) y el mediodía (12:00:00 - 14:00:00 HL, cuarta columna en Figura 3.25), los vientos rotan; esto también se puede apreciar en las figuras 3.9, 3.10 y 3.11. En ambos momentos del ciclo diurno, aún persisten diferencias de temperatura entre el océano y línea de costa. Sin embargo también se pueden diferenciar gradientes de temperatura en la horizontal, los cuales se superponen a los meridionales, lo que en consecuencia hace que los vientos roten, bien sea para luego entrar (salir) del continente. Por otro lado, en los vientos a 925 hPa las direcciones del momento inmediatamente anterior persisten. Esto apunta a un retraso en el efecto del gradiente superficial sobre los vientos a mayor altura. En las Figuras 3.19 y 3.20 se puede notar que los vientos rotan alrededor de las 10:00:00 - 12:00:00 UTC (05:00:00 - 07:00:00, HL) y 18:00:00 - 19:00:00 UTC (13:00:00 - 14:00:00, HL). Los vientos a 850 hPa entre las 04:00:00 - 09:00:00 UTC, tienen una dirección zonal hacia el oeste.

En el mediodía (12:00:00 - 14:00:00 HL), los vientos tienen una dirección que apunta del continente al océano. Acorde a lo anterior, los vientos a 10 metros y 925 hPa, tienen comportamientos diarios similares durante este mes, con retrasos de 1-2 horas en los periodos de rotación. Los vientos a 850 hPa presentan un ciclo diurno propio, diferenciado de los vientos a 10 m y 925 hPa. Aunque entre las 10:00:00 - 19:00:00 UTC (05:00:00 - 14:00:00 HL) se den direcciones de continente a océano, no se puede definir si es efecto de los gradientes superficiales de temperatura. Por tanto los vientos a esta altura (850 hPa) no se pueden relacionar directamente con las brisas marinas, ni con la corriente de retorno característica de las celdas de brisas marinas.

En resumen, durante un mes de junio típico, existe una circulación en horas de la tarde-noche que va desde el mar hacia el continente en el noroccidente de Colombia, incluyendo vientos que llegan hasta Ayapel. Esta circulación se invierte en las horas de la madrugada-primeras horas del día. Esta circulación de bajo nivel, del mar a la tierra en la tarde-noche, y de tierra hacia el mar en la madrugada-mañana, puede asociarse con una brisa marina. Este fenómeno ha sido descrito previamente en relación con los vientos entre el mar Caribe y la zona costera de Colombia. Nuestro análisis anterior describe además como parte de esta circulación de brisa marina llega hasta Ayapel.

3.4.2. Enero - brisa fuerte con circulación ciclónica

Los campos de temperatura en el mes de enero muestran que entre las 20:00:00 - 03:00:00 UTC (15:00:00 - 22:00:00, HL), la temperatura en la línea de costa - Ayapel (siendo mayor aún en Ayapel) superan a la oceánica, en respuesta a esto, los vientos toman la dirección océano a continente en ambas alturas. Posteriormente entre las 04:00:00 - 09:00:00 UTC (23:00:00 - 04:00:00, HL), los vientos a 10 metros sobre el continente rotan en sentido antihorario, mientras que a 925 hPa, los vientos a 925 hPa aún tienen dirección océano a continente, este retraso es similar al expuesto en la Figura anterior. En la Figura 3.22 los vientos a 925 hPa rotan a partir de las 12:00:00 UTC (07:00:00, HL) en sentido horario. En el periodo a continuación, sobre la línea de costa, se da un vórtice con rotación ciclónica en los campos de 10 metros, algunos vectores sobre la región de Ayapel apuntan hacia el océano como en las figuras de junio, sin embargo los vientos son atraídos por la vorticidad antes mencionada, evitando la dirección de vientos directa de océano a continente. *Es interesante que ERA5 representa temperaturas superiores, justo en el centro del vórtice.* Los

campos a 925 hPa, muestran vientos con dirección océano a continente y además una curvatura irregular sobre la línea de costa. Como se mencionó anteriormente durante este mes existe un retraso en el redireccionamiento de los vientos a esta altura. Entre las 17:00:00 - 19:00:00 UTC (12:00:00 - 14:00:00, HL), los vientos provenientes del océano cruzan la línea costa, sin embargo esta dirección se hace cada vez menos clara, a medida que se avanza continente adentro, para los campos a 10 metros; este comportamiento es aún más atípico para los vientos a 925 hPa donde los vientos parecen tener una dirección hacia el suroeste. Los vientos a 850 hPa, tienen un comportamiento muy distanciado de los vientos a alturas menores (10 metros y 925 hPa), ya que estos presentan una dirección este a oeste principalmente, condición que persiste a través del ciclo diario a 850 hPa. Lo anterior indica que: los vientos a 10 metros y 925 hPa presentan un comportamiento similar, al menos durante tres de los cuatros momentos del día definidos, mientras que los vientos a 850 hPa tienen su propio comportamiento, no necesariamente relacionado con las brisas marinas.

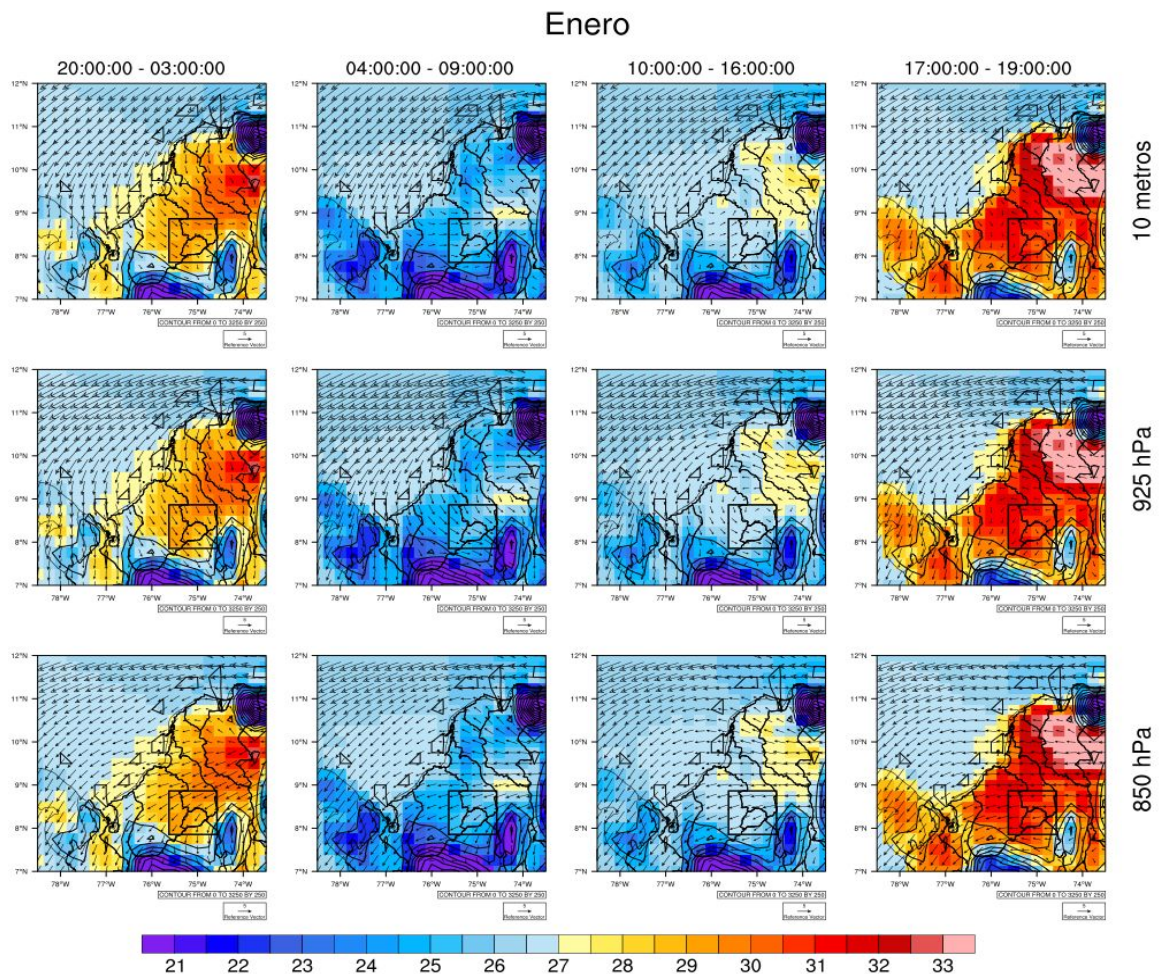


Figura 3.26: Mapas de temperatura más vientos a 10 m (arriba), 925 hPa (medio) y 850 hPa (abajo), en horas representativas de la circulación brisa mar - tierra. Los periodos del día definidos por “tarde-noche” (20:00 - 03:00 UTC, 15:00 - 22:00 HL), “madrugada” (04:00 - 09:00 UTC, 23:00 - 5:00 HL), “mañana” (10:00 - 16:00 UTC, 5:00 - 11:00 HL) y “mediodía” (17:00 - 19:00 UTC, 12:00 - 14:00 HL).

3.4.3. Octubre - gradiente débil

Las temperaturas en octubre son menores al resto de meses expuestos. En la tarde noche (20:00:00 - 03:00:00 UTC, 15:00:00 - 22:00:00 HL), las temperatura entre la línea de costa - océano son relativamente homogéneas. Sin embargo, continente adentro al rededor de Ayapel las temperaturas aumentan levemente. Aún con estas condiciones, el gradiente superficial de t2m es suficiente para que los vientos a las diferentes alturas (10 metros y 925 hPa) tomen la dirección océano a continente. Vale la pena mencionar que los vientos a 850 hPa no presentan este patrón tan definido, es decir no hay corriente de retorno. En cambio, los vientos sobre la línea de costa son paralelos a esta y unos metros continente adentro, estos se direccionan de manera similar a los vientos a alturas más bajas. El gradiente invertido se da entre las 10:00:00 - 16:00:00 UTC (05:00:00 - 11:00:00, HL). Durante estas horas las temperaturas más altas sobre el océano están asociadas a un gradiente débil, pues no se logra

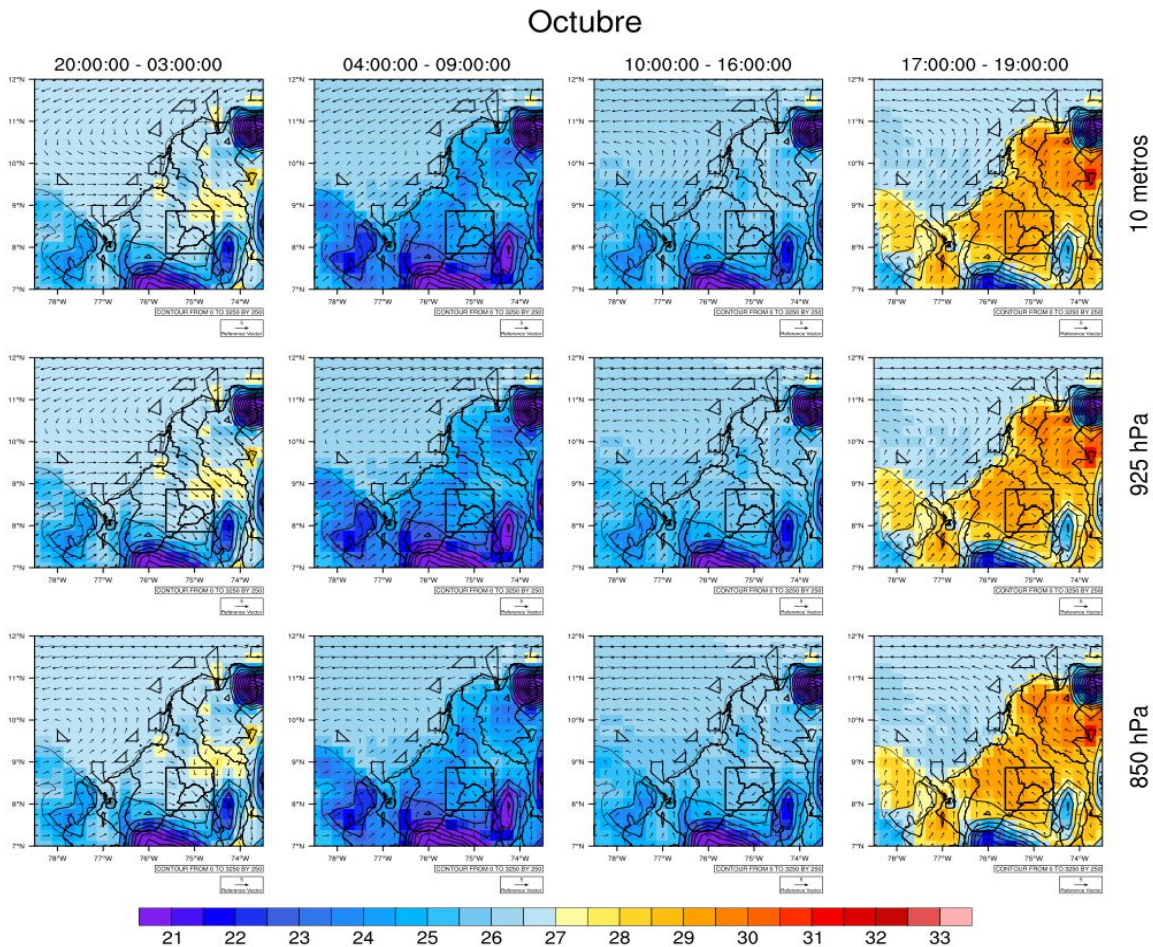


Figura 3.27: Mapas de temperatura más vientos a 10 m (arriba), 925 hPa (medio) y 850 hPa (abajo), en horas representativas de la circulación brisa mar - tierra. Los periodos del día definidos por “tarde-noche” (20:00 - 03:00 UTC, 15:00 - 22:00 HL), “madrugada” (04:00 - 09:00 UTC, 23:00 - 5:00 HL), “mañana” (10:00 - 16:00 UTC, 5:00 - 11:00 HL) y “mediodía” (17:00 - 19:00 UTC, 12:00 - 14:00 HL).

distinguir diferencias muy marcadas entre la temperatura del continente con respecto a la oceánica. Sin embargo, los vientos parecen responder a este gradiente, y cruzan la línea de costa buscando el océano. Vale la pena mencionar, que la dirección de los vientos de salida no es perpendicular a la línea de costa, incluso están más cerca de ser paralelos a esta, como se puede ver en los vientos a 925 hPa la dirección océano a continente se define más claramente en los campos a 850 hPa, donde se ve claramente que los vientos cruzan la línea de costa en busca del océano. En los periodos de rotación entre las 04:00:00 - 09:00:00 UTC (23:00:00 - 04:00:00, HL) y 17:00:00 - 19:00:00 (12:00:00 - 14:00:00, HL), los vientos a 10 metros y 925 hPa parecen estar más acoplados a diferencia de los meses anteriormente descritos (junio y enero), ya que los vientos parecen tener una respuesta similar a los gradientes de temperatura definidos en la superficie. Por otro lado, los vientos a una altura mayor (850 hPa), tienen un comportamiento similar a los vientos más bajos entre las 04:00:00 - 09:00:00 UTC, mientras que entre las 17:00:00 - 19:00:00 UTC los vientos tienen dirección de continente a océano, cuando los vientos por debajo son paralelos a línea de costa, es decir, con dirección noreste.

3.5. Conclusiones del capítulo

ERA5 reproduce una la circulación de brisa marina entre el mar Caribe y el municipio Ayapel. Los vientos con dirección océano a continente alcanzan la región de Ayapel desde de las 5 pm hora local. Se encontró que la circulación brisa mar-tierra está presente todos los meses del año, no obstante, la brisa presenta estacionalidad, es decir, se identificó que este fenómeno de mesoescala muestra diferencias entre las temporadas formadas por los meses diciembre-enero-febrero-marzo-abril, mayo-junio-julio-agosto y septiembre-octubre-noviembre. Cada temporada mencionada presenta sus propias características. En general, el hecho de que la superficie del suelo sobre la región de Ayapel sea de las que logra mayor temperatura en el ciclo diurno, y además, sea de las últimas en enfriarse, posiblemente causa un efecto relevante sobre el gradiente superficial de presión entre el continente y el océano.

La principal característica que parece condicionar la circulación de brisa marina en el mes de enero es el fuerte gradiente de temperatura superficial. La temperatura del aire a 2 metros del suelo es la más cálida del año, mientras que la temperatura del mar es la más fría del año. En consecuencia, gracias al gran contraste de temperatura entre el océano y el suelo, los vientos a 10 m son los más fuertes del ciclo anual. En general, para enero (y la temporada de diciembre a abril) se distingue claramente una circulación brisa mar-tierra, es decir, los vientos se dirigen del océano al continente en las horas 12:00:00 - 22:00:00 HL. No se encontró una circulación brisa tierra-mar, o sea, vientos en dirección continente a océano, lo cual puede estar relacionado con una circulación ciclónica que ERA5 representa cerca a la zona estudiada. Los vientos a 925 hPa durante enero también presentaron un patrón con dirección océano a continente dominante durante gran parte del ciclo diario, aunque, comienza más tarde y se sostiene un periodo más extenso, entre las 15:00:00 - 07:00:00 HL. El vórtice visto a 10 m no se puede apreciar a esta altura (~750 msnm), sin embargo, este parece influenciar los vientos en esta, ya que, mientras está sobre la línea costera (entre las 08:00:00 - 11:00:00 HL), los vientos a 925 hPa se curvan alrededor de este (pero sin rotar alrededor de su centro), una vez este se disipa comienza a definirse la circulación océano a continente.

La brisa marina en la temporada que contiene al mes de junio presenta los cuatro momentos característicos de este fenómeno. Los vientos toman dirección de océano a continente entre las 15:00:00 a 22:00:00 HL (circulación brisa mar-tierra), van de continente a océano entre las 05:00:00 a 11:00:00 HL (circulación brisa tierra-mar) y entre estos, dos periodos de rotación entre las 23:00:00 - 04:00:00 y 12:00:00 - 14:00:00 HL. La temporada climática en el Caribe está en transición a el *Veranillo de San Juan*, la posible disminución en precipitación (y por tanto de nubosidad) facilita el calentamiento de las superficies, por consiguiente el desarrollo de los gradientes de temperatura. Sin embargo, menos fuertes como los de la temporada de principio de año, ya que la t_2m y la temperatura superficial del mar no presentan picos máximos ni mínimos (i.e. el gradiente de temperatura puede ser más débil), respectivamente, los vientos son débiles. Los vientos a 925 hPa tienen patrones similares a los de superficie, no obstante, las magnitudes del viento aumentan y los periodos en los que cruzan la línea de costa parecen alargarse; la causa de esto podría ser la disminución de los efectos de fricción superficial disminuyendo la obstrucción del movimiento a esta altura.

Durante el mes de octubre la brisa marina se ve afectada por la presencia de lluvias en el Caribe colombiano, causadas por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), además de la convergencia de vientos del mar Caribe y del Chorro del Chocó (Poveda, 2004). Cabe mencionar que la temperatura del mar Caribe durante octubre es la más cálida del ciclo anual y la temperatura en el continente la más fría de este. En consecuencia, todos los factores mencionados hacen que el gradiente superficial de temperatura sea el menos marcado de las estaciones del año, y por esta razón, los vientos en octubre presentan las magnitudes más pequeñas de este. Sin embargo, el gradiente de temperatura entre el océano y la tierra, es suficiente para que se forme una circulación de vientos océano a continente (brisa mar-tierra) y una circulación continente a océano (brisa tierra-mar), entre las 15:00:00 a 22:00:00 HL y 06:00:00 a 11:00:00 HL, respectivamente. Lo anterior sucede, para los vientos a 10 metros de altura, los vientos a 925 hPa solo parecen tener vientos con dirección océano a continente entre las 16:00:00 - 03:00:00 HL.

Los vientos a 850 hPa presentan un comportamiento propio, es decir, no se identificó características de una circulación de brisa marina, pese a que en dicha altura se buscaban vientos de retorno con dirección continente océano, mientras, inmediatamente en superficie los vientos se dirigen del océano al continente. Lo anterior se conoce en la literatura como una celda de circulación de brisa marina (ver definiciones en Miller et al., 2003). Posiblemente a este nivel las interacciones dominantes provienen de fenómenos a escala mayor o propios de esa altura, y por tanto la celda de circulación de brisa marina no se aprecia cerrada, por la falta del retorno a 850 hPa. Se hipotetiza que los vientos de retorno se podrían ubicar a una altura entre los 925 hPa y 850 hPa, debido a que la primera altura mencionada presenta una señal clara de brisa, mientras que, en la segunda ya no existe.

Los vientos responden a cambios en la distribución espacio-temporal de la temperatura a dos metros del suelo. Alrededor de tres horas pasado el pico máximo de esta variable, los vientos cruzan la línea de costa en busca de zonas continentales, mientras, alrededor de tres/cuatro horas después del

pico mínimo de radiación los vientos se dirigen de continente a océano debido a que la superficie terrestre se encuentra más fría que el océano. Dicho comportamiento se vincula, a que la circulación de brisa comienza cuando el gradiente de temperatura es estable, lo cual sucede horas posteriores a los picos máximos y mínimos de temperatura.

4. Capítulo 4 : Relación entre los vientos sobre Ayapel, con el CLLJ, la SST y entre la t_2m y los campos de vientos a 10 metros y 925 hPa.

Un máximo en el viento zonal proveniente del este a una altura cercana a los 925 hPa (750 msnm) en la región Caribe, es conocido como el chorro de bajo nivel del Caribe (CLLJ, por sus siglas en inglés). El CLLJ varía semianualmente con dos máximos en verano e invierno y dos mínimos en otoño y primavera (boreal). Por otro lado, es una importante característica climática en la región Caribe (no sólo el Caribe Colombiano, es importante tanto para el Caribe de América del sur, central y norte) ya que desempeña un rol tanto en el tiempo atmosférico como en el clima de dicha región. Este fenómeno es de interés en nuestro estudio debido a que no se conoce con exactitud cómo es su interacción con otros fenómenos en la región caribe (e.g. huracanes, temporales, *veranillos*, frentes fríos), (Wang., 2007; Amador., 2008). Por lo tanto, conocer la interacción del CLLJ con la brisa mar - tierra que toma lugar entre el mar Caribe y el municipio de Ayapel ayudaría a cubrir vacíos en la ciencia.

En este capítulo se utilizaron las anomalías del viento zonal a 925 hPa para medir la variabilidad del Chorro de bajo nivel del Caribe, en busca, de una explicación acerca de su relación con la estacionalidad de la brisa entre la costa Caribe y el municipio de Ayapel (Figura 1.1). El índice se define tomando el negativo de las anomalías del viento zonal a 925 hPa en la región $12.5^{\circ} N - 17.5^{\circ} N$, $80^{\circ} W - 70^{\circ} W$ (Figura 1.2). Dado que los vientos a 925 hPa en la región de interés vienen del este, la definición indica que cuando el índice es positivo, el CLLJ es anormalmente fuerte, y por el contrario cuando el índice es negativo, el CLLJ es anormalmente débil. Dichas anomalías se correlacionaron con los vientos sobre línea costa y Ayapel a tres diferentes alturas: 10 m, 975 hPa y 925 hPa (los ciclos diarios de las Figuras a 975 hPa no se muestran debido a su similitud con los vientos a 10m), con el fin de observar cómo interactúa el chorro con los diferentes niveles de la atmósfera. Debido a que, el CLLJ presenta el núcleo cerca a los 925 hPa, y este afecta la cortante de los niveles en la vertical (Cook et. al, 2009).

Se analizaron las relaciones entre el ciclo diario, el rango diario y el ciclo anual del Jet del Caribe y los vientos en Costa y Ayapel, para todos los meses del año excepto en las correlaciones del ciclo diario donde solo se analizaron los meses: febrero, abril, julio y octubre, debido a la variación semianual del CLLJ (ver Figura 4.2). Por consiguiente, se realizaron análisis a diferentes escalas:

1. A escala horaria, motivados por lo expuesto en los resultados de Muñoz et. al, 2008 y Cook et. al, 2009. En los cuales, se resalta la importancia del ciclo diario del Jet; teniendo esto en cuenta se exploró la relación de este con el ciclo diario de la brisa.
2. Se estudió la relación con los rangos de la magnitud del viento del ciclo diario a los diferentes niveles mencionados, con el objetivo de identificar la influencia del Jet sobre las oscilaciones diarias de las regiones de interés (Ayapel y línea de costa).

3. De la misma manera se indagó la relación entre el Jet y el ciclo anual del viento. No obstante, los resultados no se muestran y solo serán mencionados debido a que no se obtuvieron correlaciones importantes en la mayoría de meses.

También estudiamos la relación entre la temperatura del mar en el Caribe y las condiciones de temperatura y viento en la región de Ayapel. En particular estudiamos la correlación entre las variaciones interanuales de la temperatura del mar en el Caribe y los cambios en temperatura y vientos en Ayapel y Costa. Se realizaron ciclos anuales de mapas de correlación entre las anomalías sin tendencia del campo de temperatura superficial del mar (SST) y las series de tiempo (o promedios espaciales) de los vientos a 10 m y 925 hPa. De este modo podemos identificar qué lugares del océano dentro del área de estudio se relacionan con las regiones de interés: Costa y Ayapel. Asimismo, se hizo para el campo de vientos a 10 m y 925 hPa y las series de tiempo (o promedios espaciales) de la temperatura superficial del aire en Costa y Ayapel. Con estos se buscó identificar qué regiones de los campos de vientos están más relacionados con la temperatura de las regiones de interés, además de estudiar su evolución espacio-temporal a lo largo del año e indagar aún más en las temporadas donde domine la influencia local y/o regional.

4.1. Climatología de la Región Caribe y Ayapel

La temperatura superficial del mar en la región del CLLJ muestra un solo pico máximo alrededor de los meses septiembre y octubre con una temperatura cercana a los 29.0 °C. El pico mínimo en la SST en la región del CLLJ se da en los meses enero y febrero con un valor aproximado a 26.6 °C (ver Figura 4.1). Por otro lado, la estacionalidad climática típica tanto para el Caribe colombiano como para la parte sur del mar Caribe, es causada por la oscilación de la zona de convergencia intertropical y los vientos alisios del NE, los cuales a su vez están asociados con el CLLJ. Debido a esto, dos principales periodos pueden ser identificados durante el año: La temporada seca y la temporada de lluvia. La principal temporada seca se da entre diciembre a abril, una segunda ocurre en un periodo corto entre julio y agosto, llamado en Colombia como “*Veranillo de San Juan*”. Durante estas temporadas, se dan centros de alta presión sobre el Caribe, que coinciden con vientos alisios fuertes y máximos en el chorro de bajo nivel del Caribe. En cuanto a la temporada húmeda, que se extiende durante el resto del año (mayo a noviembre con excepción del *Veranillo*), presenta condiciones opuestas, es decir, centros de baja presión y vientos débiles, además, de una intensificación del Chorro de bajo nivel del Chocó (Bernal et. al, 2006; Maza et. al, 2006).

Temperatura superficial del mar

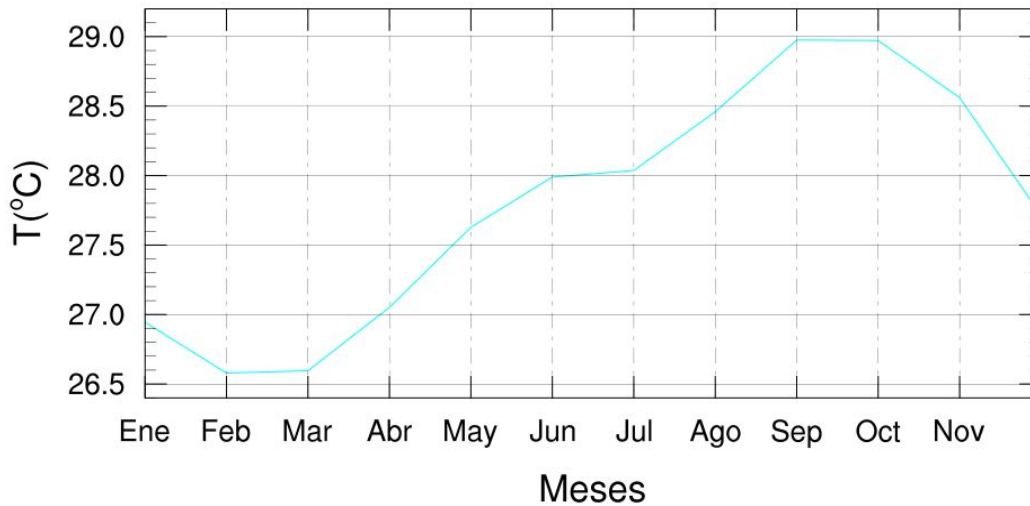


Figura 4.1: Ciclo anual de la temperatura superficial del mar (1989-2018) en la región chorro de bajo nivel del Caribe 12.5 N–17.5 N, 80 W–70 W (área representada en la Figura 1.2), según ERA5.

Sin duda el municipio de Ayapel pertenece a la región Caribe de Colombia, por lo tanto, su estacionalidad climática es semejante a la descrita anteriormente. Sin embargo, dada la ubicación geográfica de este, la oscilación de la ZCIT hace que el ciclo anual de la precipitación sea unimodal con un periodo húmedo desde mayo a octubre y un periodo seco de diciembre a marzo (Poveda, 2004 Serna et. al, 2019).

4.2. Variabilidad estacional Chorro de bajo nivel del Caribe

4.2.1. Ciclo diario y anual del viento zonal a 925 hPa sobre el mar Caribe

El chorro de bajo nivel del caribe reside sobre el mar Caribe a lo largo del año. En este estudio usamos el viento zonal a 925 hPa en la región 12.5° N - 17.5° N, 80° W - 70° W (área representada en el cuadro sobre el mar en la Figura 1.2) para identificar los máximos de velocidad del viento asociados a este fenómeno. La Figura 4.2 muestra la climatología del viento zonal multiplicada por -1 en la región CLLJ, como se mencionó anteriormente gracias a la literatura el CLLJ muestra una variabilidad semianual con dos máximos en el verano boreal (junio-julio-agosto) y el invierno boreal (diciembre-enero-febrero) y dos mínimos en el otoño boreal (septiembre-octubre-noviembre) y la primavera boreal (marzo-abril-mayo).

El ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe (Figura 4.3) es homogéneo (en patrón) en los diferentes meses del año presentando siempre dos valores mínimos a las 10:00:00 y 22:00:00 UTC (05:00:00 y 17:00:00, HL), claro está, que los meses muestran diferentes magnitudes de acuerdo a la época del año. Las variaciones diarias del CLLJ son condicionadas por el ciclo diario del

gradiente de altura geopotencial meridional, a su vez, asociada con cambios en la extensión de las Altas Subtropicales del Atlántico Norte. Otro fenómeno que es determinado por el gradiente meridional de la altura geopotencial es la briza caracterizada en este estudio y por este relacionarse con el ciclo diario del Chorro del Caribe. Como ha sido explicado por diferentes autores (Simpson, 1995; Miller et. al, 2003), los fenómenos de escala mayor, suelen tener una fuerte conexión con las brisas. Por tanto, teniendo en cuenta esto y lo anterior, se consideró importante la relación del CLLJ en escala diaria y estacional.

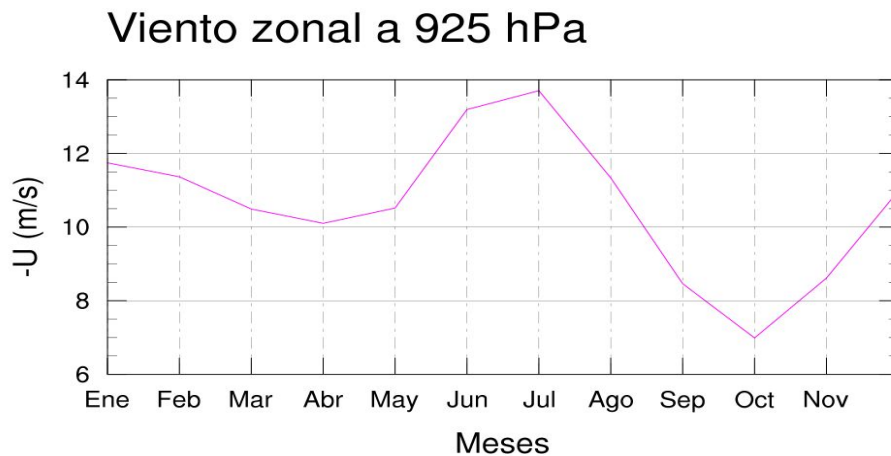


Figura 4.2: Ciclo anual del viento zonal a 925 hPa (1989-2018) en la región chorro de bajo nivel del Caribe 12.5 N -17.5 N, 80 W-70 W (área representada en la Figura 1.2), según ERA5.

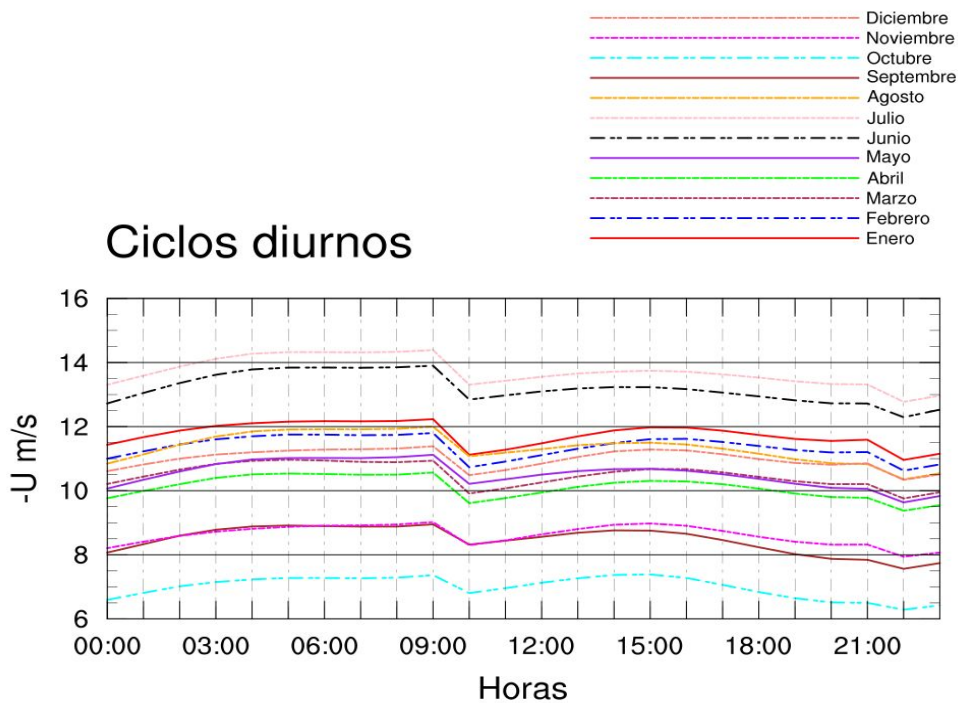


Figura 4.3: Ciclo diario del viento zonal a 925 hPa (1989-2018) en la región chorro de bajo nivel del Caribe 12.5 N -17.5 N, 80 W-70 W (área representada en la Figura 1.2), según ERA5.

4.3. Correlaciones regionales y locales

4.3.1. Febrero - Chorro Fuerte

Las correlaciones a 10 metros entre Ayapel y Costa (Figura 4.4, abajo) indican que ambos lugares están acoplados. Debido a que los coeficientes son superiores a 0.4 la mayor parte de ciclo diurno, excepto en las horas 15:00:00 a 19:00:00 UTC (10:00:00 a 14:00:00 HL) (recordar que en este momento del día los vientos rotan para posteriormente entrar al continente que ya está lo suficientemente cálido para generar un gradiente de presión). Es importante mencionar que, en las horas 17:00:00 y 18:00:00 UTC (12:00:00 y 13:00:00 HL) entre el CLLJ x Ayapel (Figura 4.4, arriba) se dan correlaciones importantes cercanas a 0.4. Sin embargo, es evidente que Ayapel no presenta conexión con los vientos del CLLJ. En cuanto a las correlaciones del CLLJ x Costa (Figura 4.4, medio) se dan valores de correlaciones importantes negativas de las 06:00:00 a las 19:00:00 UTC (01:00:00 a 14:00:00 HL), evidenciando que los vientos en Costa presentan una relación inversa con el Jet. Esto puede ser explicado debido a que durante este mes una de las salidas del Jet

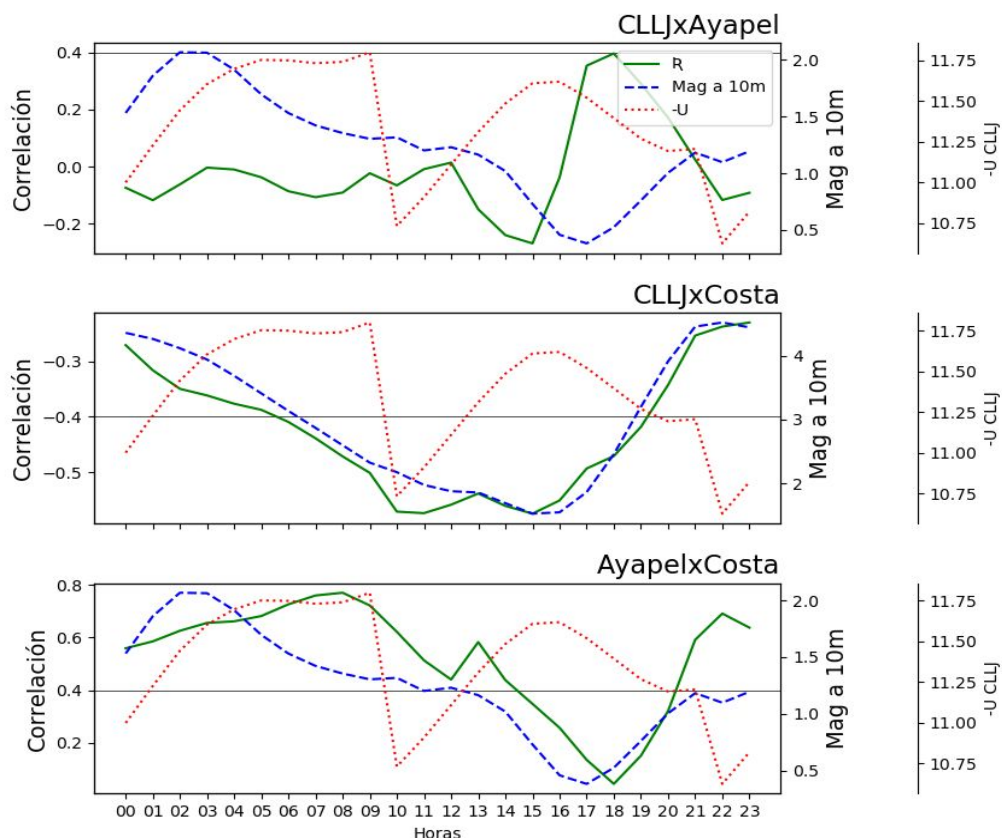


Figura 4.4: Correlaciones entre el ciclo diurno del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 10 m en el mes de febrero, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

pasa por el norte de Colombia (Poveda et. al, 2004), y que además, considerando que el jet es fuerte, podría pasar sobre la línea de costa en su recorrido en busca del pacífico, debilitando las magnitudes del viento a 10m sobre la línea de costa. Un comportamiento similar se observó en conjuntos correlacionados a la altura de 975 hPa (no se muestra).

El ciclo diario de correlaciones entre el Jet y los vientos a 925 hPa sobre las regiones continentales muestran que, los coeficientes entre el CLLJ x Ayapel no son interesantes, ya que, ningún valor supera los ± 0.4 a lo largo del día. Para el ciclo entre el CLLJ x Costa, se dieron anticorrelaciones relevantes

entre las horas 09:00:00 - 12:00:00 UTC (04:00:00 - 07:00:00 HL) y 19:00:00 - 23:00:00 UTC (14:00:00 - 18:00:00 HL), estos dos momentos coinciden con un debilitamiento del Jet (09:00:00 y 22:00:00 UTC, ver Figura 4.4). Como se mencionó anteriormente en esta temporada el CLLJ pasa cerca la costa caribeña Colombiana, por lo tanto, interactúa directamente con los vientos en ella. En efecto, cuando estos vientos del caribe se debilitan dan espacio a que la magnitud de los vientos de costa aumente. Los coeficientes de Ayapel x Costa, muestran que los vientos a esta altura también se encuentran fuertemente acoplados (entre 22:00:00 - 09:00:00 UTC, 17:00:00 - 04:00:00 HL) durante el transcurso del ciclo diario, resaltando la conexión entre línea de costa y Ayapel.

Acorde a lo anteriormente descrito, se infiere que para el mes de febrero, priman las interacciones a escala local, es decir, entre costa y Ayapel. Esto tiene sentido puesto que, durante esta temporada hay un pico de radiación incidente, la cual contribuye con el calentamiento de las superficies continentales (ver Figura 3.1), adicionalmente, se da el mínimo de la temperatura superficial del mar (Figura 4.1). De ahí, se da un mejor desarrollo del gradiente de temperatura superficial y en consecuencia, la formación de una brisa mar-tierra con magnitudes fuertes. Otro factor que puede favorecer la conexión local entre ambos sitios de interés es que este mes pertenece a la temporada seca de la región Caribe colombiana.

4.3.2. Julio - Chorro muy fuerte

En la Figura 4.6 se puede apreciar que durante las horas 00:00:00 - 05:00:00 UTC (19:00:00 - 00:00:00 HL), existe un acople entre las tres regiones estudiadas, puesto que, las correlaciones son importantes (mayores a 0.4) en todos los conjuntos analizados, es decir, existe una comunicación a nivel a local (Ayapel y Costa), y a su vez a escala regional (CLLJ con Ayapel y Costa). En consecuencia, costa comunica los vientos del Chorro de bajo nivel del Caribe con la región de Ayapel, debido a que en este momento del día los vientos tienen la dirección océano a continente (ver Figura 3.9). Un comportamiento similar se observó en conjuntos correlacionados a la altura de 975 hPa (no se muestra).

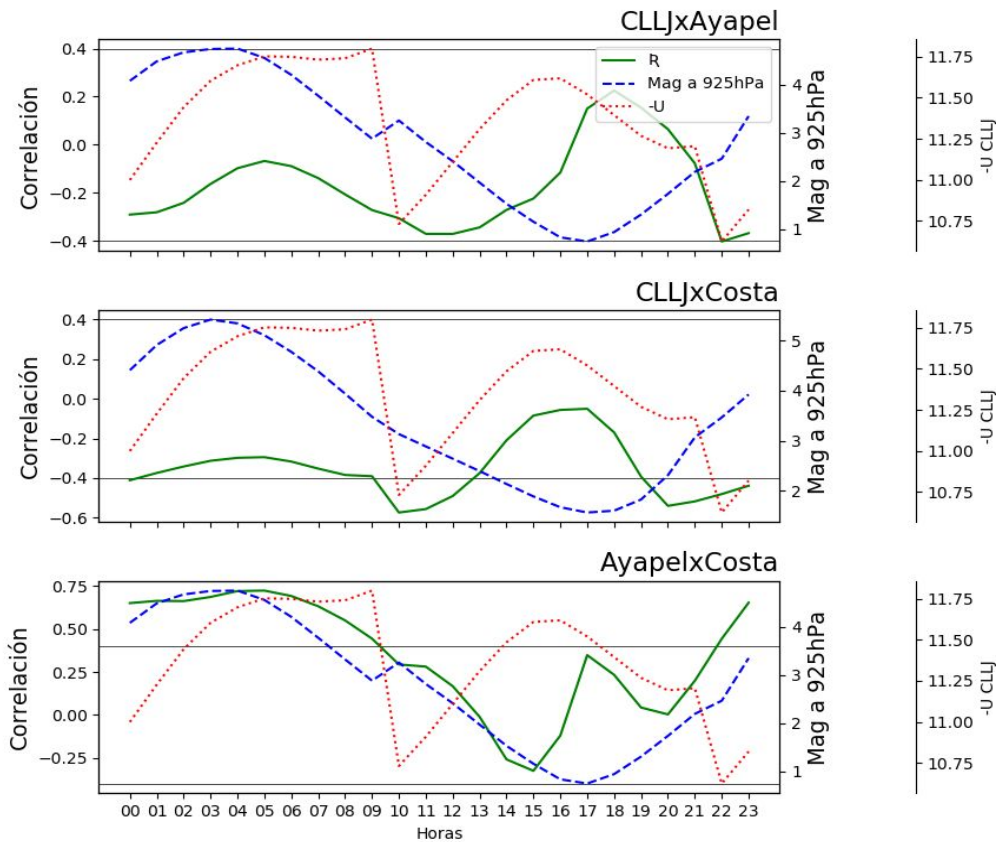


Figura 4.5: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 925 hPa en el mes de febrero, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

En la Figura 4.7 las correlaciones entre los vientos a 925 hPa en Ayapel x Costa se intensifican en duración e intensidad, visto que, todos los valores superan los 0.4. Por otro lado, las correlaciones entre el Jet y los vientos a 925 hPa sobre las regiones de interés, muestran valores importantes alrededor de las 12:00:00 a 19:00:00 UTC (07:00:00 a 14:00:00 HL) con Ayapel y las 15:00:00 a 18:00:00 UTC (10:00:00 a 13:00:00 HL) con costa. Durante este periodo a esta altura, los vientos tienen sentido continente a océano, lo que traduce que Costa nuevamente comunica al Jet con Ayapel. Sin embargo, como las bajas presiones están sobre el mar y las altas en el continente los vientos se dirigen desde Ayapel, pasan por costa e interaccionan con el Jet.

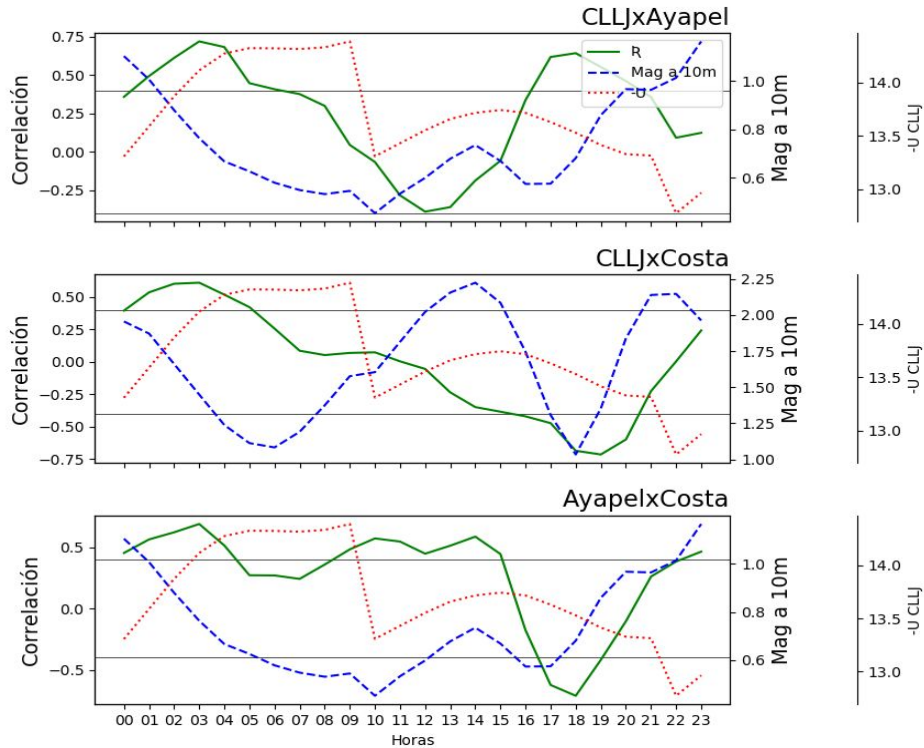


Figura 4.6: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 10m en el mes de julio, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

En resumen, para el mes de Julio cuando el CLLJ presenta magnitudes máximas, existe una comunicación regional entre el chorro del Caribe con los sitios de interés Costa y Ayapel, teniendo en cuenta que la interacción del Jet con Ayapel es gracias a la línea de costa, la cual, sirve de “puente” entre estos, a través de las brisas. Es importante aclarar que a 10 m (975 hPa) y 925 hPa suceden cosas diferentes, o al menos a diferentes horas. El veranillo (MSD, Mid Summer Drought, por sus siglas en inglés) está fuertemente asociado con los vientos máximos del CLLJ en este mes, debido a que comienza cuando el chorro se fortalece y termina cuando este se debilita (Cook et. al, 2009), dicho fenómeno puede ser un agente (tercero) asociado en la conexión del jet y la costa Caribe hasta el territorio de Ayapel.

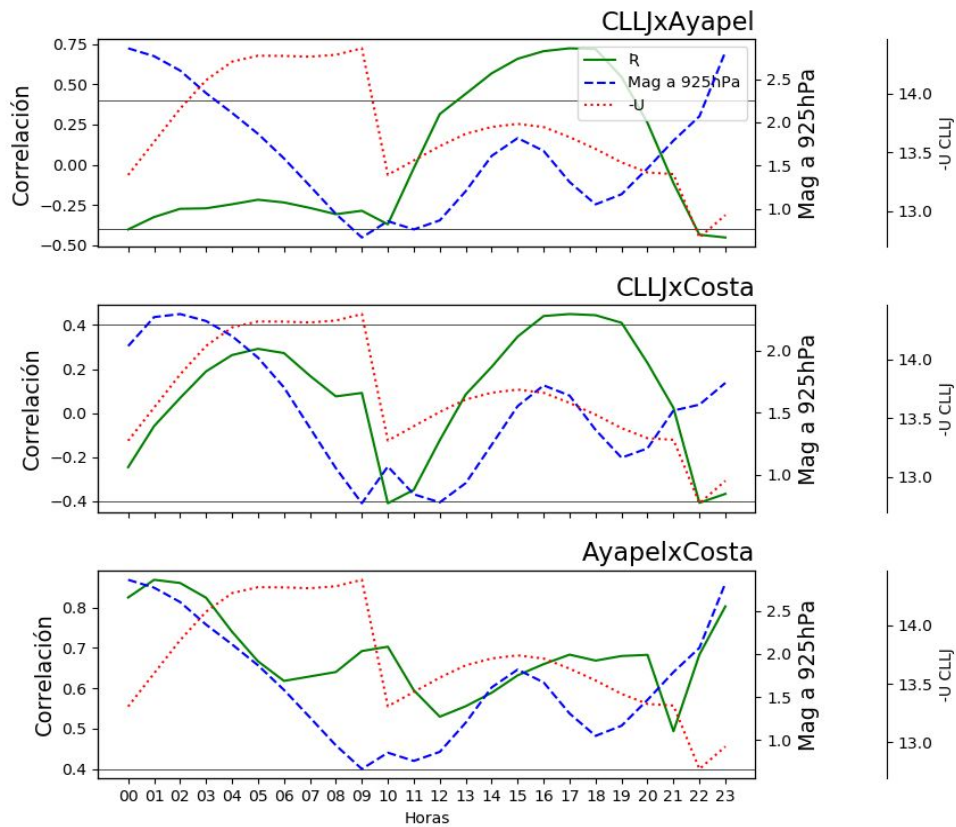


Figura 4.7: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 925 hPa en el mes de julio, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

4.3.3. Abril - Chorro débil

En la Figura 4.8 se exponen los coeficientes de correlación durante el mes de abril. Para Ayapel x Costa (abajo) al igual que en los analizados anteriormente, muestran un acople local importante en gran parte del ciclo diario (00:00:00 - 12:00:00 UTC; 19:00:00 - 07:00:00 HL). Mientras que, las correlaciones entre CLLJ con los vientos a 10 m en línea de costa no son importantes en ninguna hora del ciclo diario. A diferencia de esto, las correlaciones entre el Jet y los vientos en Ayapel son interesantes en las horas 00:00:00 - 05:00:00 UTC (19:00:00 - 00:00:00 HL), es decir, la región de Ayapel se encuentra acoplada tanto con los vientos en Costa como con los del Caribe, a pesar de que

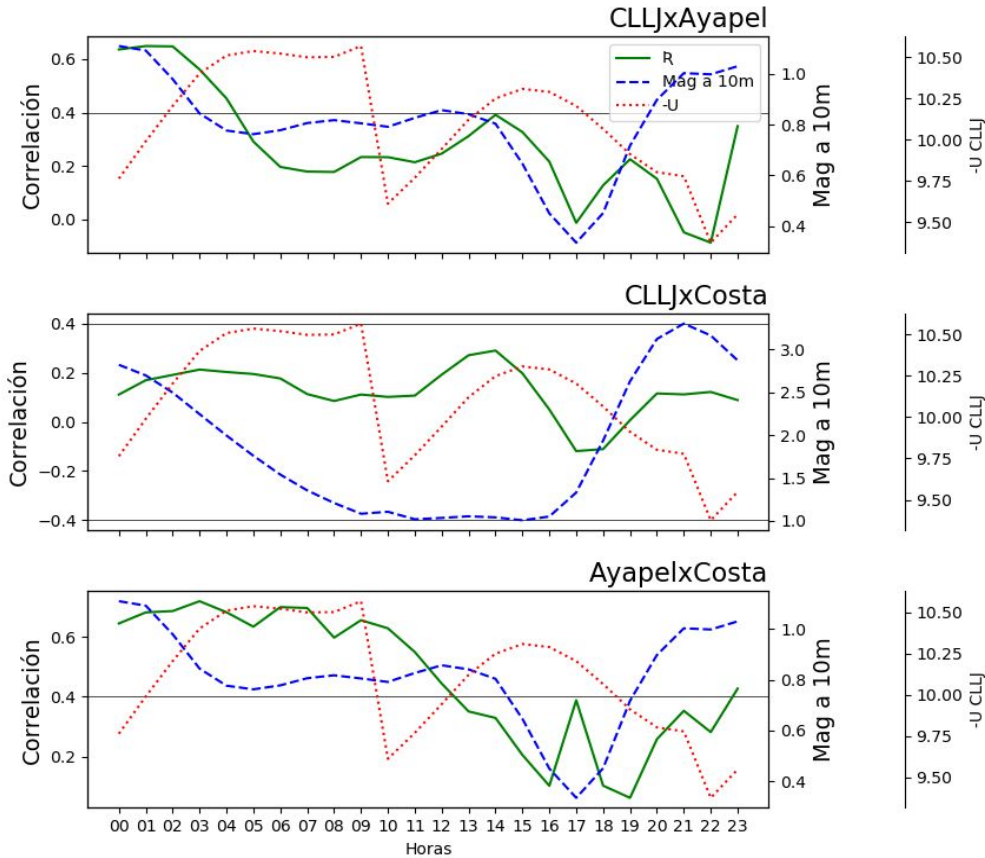


Figura 4.8: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 10m en el mes de abril, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

la región línea de costa no se relaciona de ninguna forma con el Jet. Durante este periodo de tiempo los vientos tienen dirección de océano a continente, lo cual soporta (o se asocia) con la correlación fuerte entre Ayapel y Costa. Visto que, los vientos en la región línea de costa presentaron independencia respecto a los vientos del Jet, esta no es la zona intermedia entre las interacciones de los vientos en Ayapel con el CLLJ. Es posible, que los vientos del Caribe alcancen las regiones continente adentro a través de una zona alterna, es decir, puede existir una ruta secundaria a la estudiada, por la cual los vientos del Caribe alcanzan Ayapel en este mes.

Las correlaciones entre los vientos a 925 hPa, Ayapel x Costa muestran que a esta altura las regiones de interés están acopladas con valores importantes la mayor parte del ciclo diario exceptuando las horas 19:00:00 y 20:00:00 UTC (14:00:00 y 15:00:00 HL). Para las correlaciones entre el Chorro y los vientos a 925 hPa sobre Costa se dan valores negativos importantes en los momentos 10:00:00 a 14:00:00 y 18:00:00 a 22:00:00 UTC (05:00:00 a 09:00:00 y 13:00:00 a 17:00:00 HL).

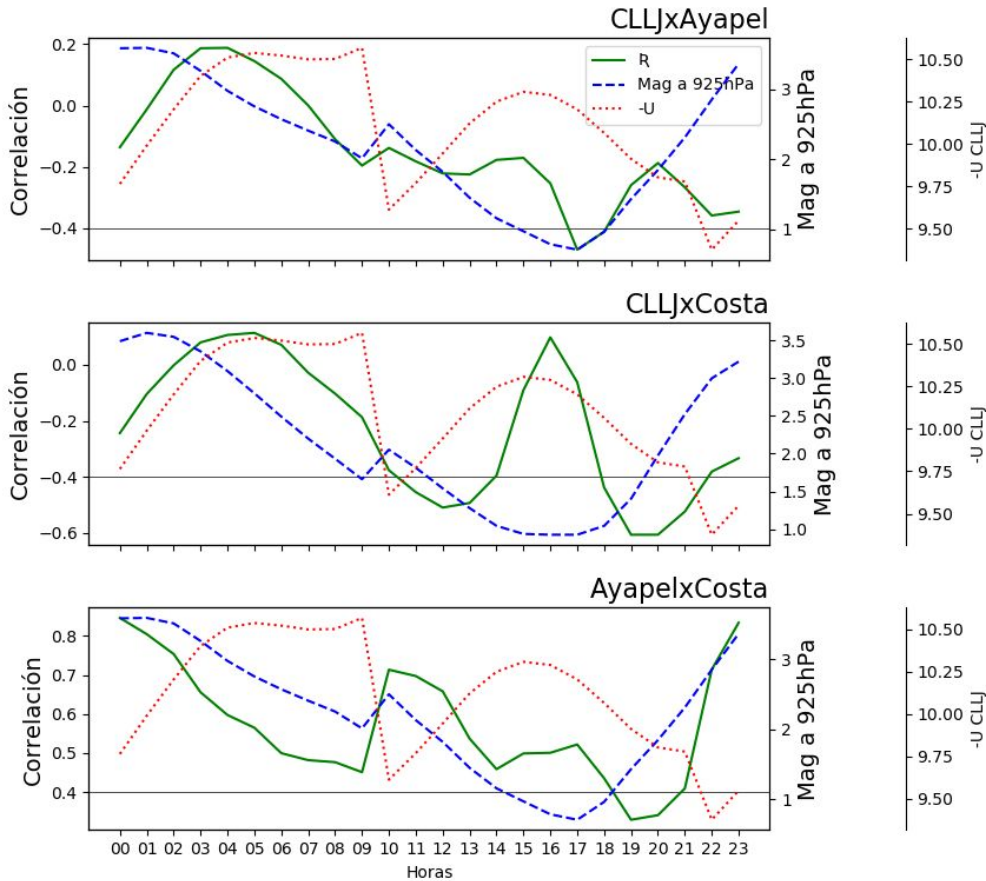


Figura 4.9: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 925 hPa en el mes de abril, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a la magnitud del CLLJ.

Vale la pena mencionar que alrededor de las 19:00:00 UTC (14:00:00 HL), la fuerte anticorrelación de CLLJ x Costa coincide con una disminución en la relación entre Ayapel x Costa. La influencia del Jet sobre la región en línea de costa es análoga al mes de febrero, está debilita los vientos que están entrando de Costa a Ayapel y por tanto su posible interacción. Por último, a diferencia de las correlaciones del chorro con los vientos en superficie a esta altura no se presentan valores importantes con Ayapel (solo un valor de aproximadamente -0.4 a la hora 17:00:00 UTC)

Las condiciones en este mes son las siguientes: El Chorro de bajo nivel del Caribe presenta magnitudes débiles de aproximadamente 10 m/s, en superficie se comunica con Ayapel pero no necesariamente por la Costa seleccionada en nuestro estudio, debido a que con esta no existe ninguna correlación de interés. Para lo vientos a la altura de 975 hPa (no se muestra) se observó un comportamiento similar a los conjuntos correlacionados a 10 m. Con respecto al nivel de 925 hPa no hay una correspondencia entre los vientos en el mar Caribe y el municipio de Ayapel, por el contrario, con línea de costa sí. Aclarando que la conexión entre el Chorro y Ayapel se da en los

niveles de 10 m y 975 hPa. A 925 hPa, las interacciones dominantes son locales. Abril es un mes perteneciente a la temporada seca de la región Caribe. Sin embargo, es un mes de transición dado que la temporada de lluvias comienza en mayo.

4.3.4. Octubre - Chorro muy débil

Los vientos a 10 metros sobre Ayapel están poco correlacionados con el chorro del Caribe (Figura 4.10, arriba), ya que solo en tres cortos momentos las correlaciones son ± 0.4 . A diferencia de los otros meses estudiados, el ciclo de correlaciones entre Ayapel x Costa muestra un desacople durante gran parte del día, puesto que, los coeficientes apenas logran superar los 0.4 de referencia en dos tenues periodos a las horas 12:00:00 UTC (07:00:00 HL) y entre las 16:00:00 - 19:00:00 UTC (11:00:00 - 16:00:00 HL). En contraste, las correlaciones entre el chorro y Costa presentaron anticorrelaciones fuertes durante casi todo el ciclo diario. Esta última, puede ser el factor causante del desacople a nivel local (Ayapel x Costa). Aún así, hay un pequeño periodo entre las 17:00:00-18:00:00 UTC donde CLLJ x Ayapel/Costa tuvieron valores de anticorrelación relevantes, y a su vez Ayapel x Costa mostraron un acople fuerte, lo cual podría apuntar que dentro de este momento del día, la influencia de la región del Caribe logró alcanzar Ayapel a través de la línea de costa estudiada. Un comportamiento similar se observó en conjuntos correlacionados a la altura de 975 hPa (no se muestra).

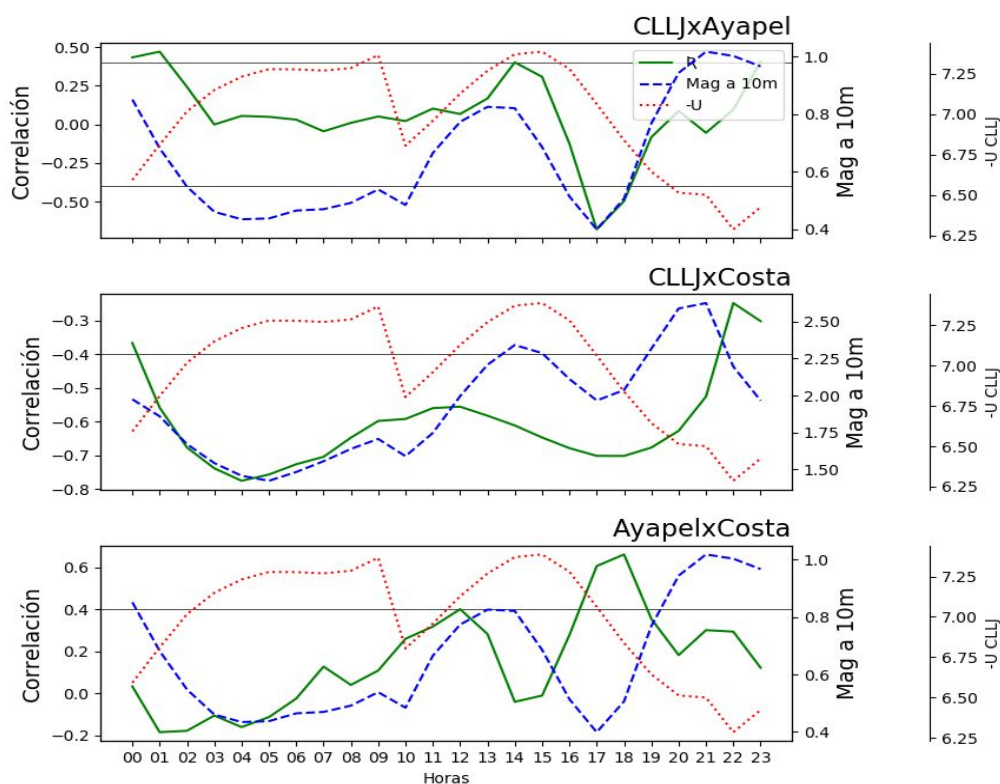


Figura 4.10: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 10m en el mes de octubre, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

Al nivel de 925 hPa las correlaciones entre el Chorro de bajo nivel del Caribe y Costa se fortalecen, mostrando valores para todas las horas del ciclo diurno aproximadamente entre -0.75 y -0.8. En general a esta altura la conexión entre las regiones aumenta, para las correlaciones a escala local (Ayapel x Costa) las correlaciones son importantes gran parte del día, excepto las horas 07:00:00 a 09:00:00 UTC (02:00:00 a 04:00:00 HL). Por último, también se dan correlación interesantes negativas entre los vientos en el Caribe y Ayapel en las horas 12:00:00 a 21:00:00 UTC (07:00:00 a 16:00:00 HL).

Para este mes las condiciones locales y regionales son algo diferentes a las analizadas previamente, por un lado, las magnitudes del Chorro de bajo nivel del Caribe son las más bajas del año con velocidades promedios de 7.0 m/s. Por otro lado, la región Caribe presenta su temporada de lluvias. Estas condiciones pueden afectar tanto las conexiones locales como regionales en superficie (vientos a 10 m y 975 hPa), mientras que a mayor altura se facilita las interacciones tanto a escala local como regional.

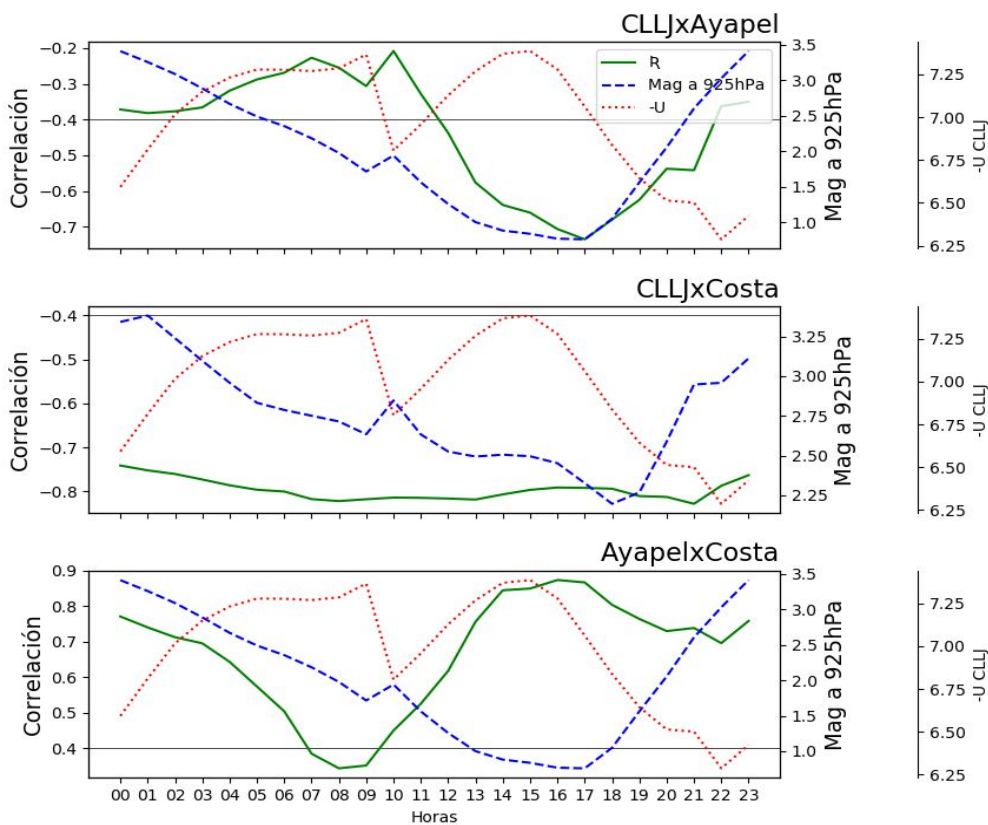


Figura 4.11: Correlaciones entre el ciclo diurno del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 10m en el mes de octubre, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa. El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.



Figura 4.12: Síntesis de la interacción de los vientos en Ayapel con los vientos en línea de costa y con el Chorro de bajo nivel de Caribe.

La Figura 4.12 se divide en cuatro cuadrantes cada uno correspondiente a uno de los meses analizados anteriormente. Cada cuadrante resume la interacción de los vientos en Ayapel con los vientos en línea de costa y con el Chorro de bajo nivel de Caribe, para el respectivo mes. En el centro se encuentra la magnitud del jet y se despliega hacia abajo, primero se leen las observaciones respecto a la interacción con el Jet. Posteriormente la escala de conexión, donde se especifica si bien las interacciones dominantes son locales y/o regionales a cada nivel estudiado, finalmente, se define la temporada climática de la región Caribe de acuerdo al mes.

La Figura 4.12 sintetiza que: en febrero el Caribe se encuentra en temporada seca, Ayapel presenta interacciones principalmente con Costa en todas las alturas estudiadas, es decir, una conexión fuerte a escala local, también se observó que la circulación de brisas solo se da en sentido mar - tierra, y por último la magnitud del CLLJ es fuerte en este mes. En abril el Caribe está en temporada de transición de seca a húmeda. En los niveles de 10 m y 975 hPa Ayapel presenta conexión con el CLLJ, es decir, una conexión a nivel regional, para el nivel de 925 hPa la conexión dominante es con Costa, o sea, a escala local. En este mes la magnitud del CLLJ es débil. Además, se observó que las interacciones entre el Chorro y Ayapel, no son a través de la línea de costa de interés. Para el

mes de Julio, la región Caribe está en *El Veranillo de San Juan*. Ayapel presentó conexiones fuertes tanto con Costa como con el CLLJ, lo que quiere decir que hay conexiones regionales y locales, se observó que las interacciones a escala regional, son a través de la línea de costa estudiada. Finalmente, el Chorro es muy fuerte en este mes. En octubre, se da la temporada más húmeda de la región Caribe, en las alturas de 10 metros y 975 hPa, no hubieron conexiones relevantes con las regiones estudiadas (el Chorro y Costa), mientras que a 925 hPa si hubieron correlaciones relevantes de Ayapel con Costa y el Chorro, el CLLJ es muy débil en este mes.

4.4. Correlaciones con el rango del ciclo diurno

Al nivel de altura de 10m (Figura 4.13), el chorro de bajo nivel del Caribe se relaciona con el rango diurno de la magnitud del viento tanto en Costa como en Ayapel. Para la primera región, los meses con correlaciones importantes son febrero, marzo, junio y los meses de agosto a noviembre; para Ayapel principalmente abril (donde $R > 0.6$) y en menor medida los meses entre junio - septiembre. Lo que quiere decir que, durante estos meses los vientos son más “sensibles” a las variaciones del

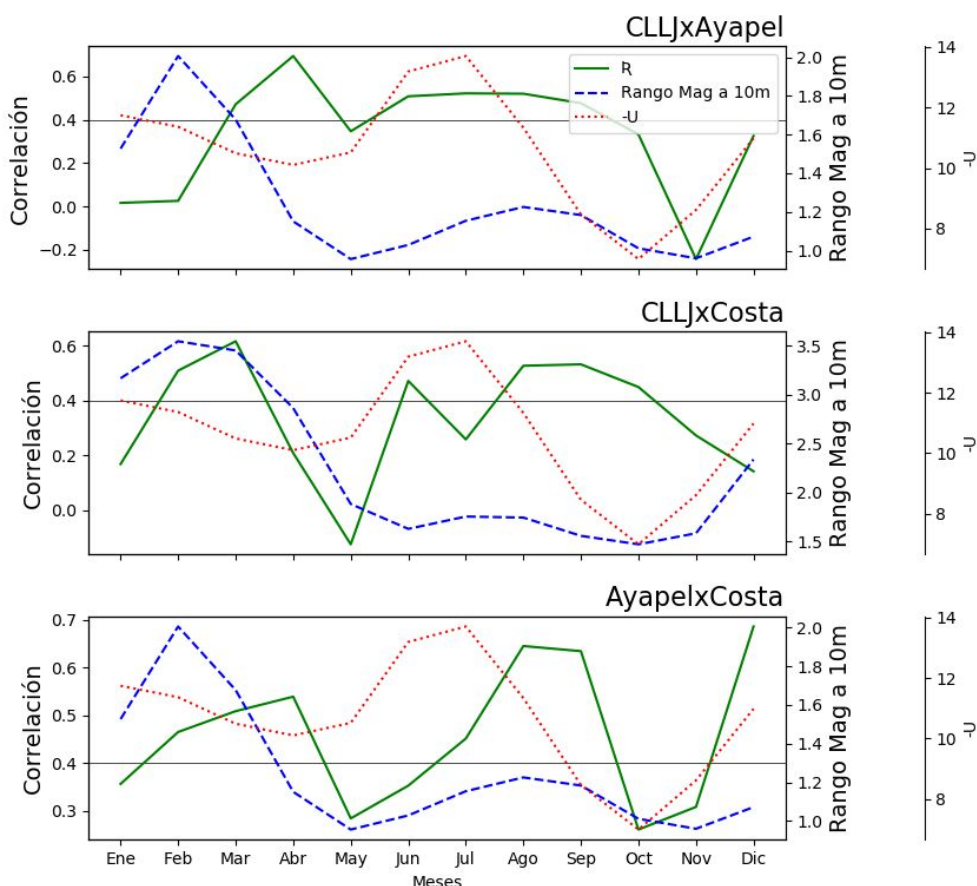


Figura 4.13: Correlaciones entre el ciclo diurno del Chorro de bajo nivel del Caribe con el rango diario de la magnitud del viento a 10 m, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

Caribe, es decir, si los vientos en el Caribe son anómalamente fuertes (débiles) en las regiones de interés el rango del viento será más amplio (estrecho), bien sea, haciendo los vientos más fuertes o más débiles de lo normal. A nivel local el rango de la magnitud del viento de las regiones de interés Costa y Ayapel están relacionados de forma lineal la mayoría de los meses, excepto mayo, junio, octubre y noviembre. Es importante resaltar que en estos meses se da la temporada de lluvias de la región

Caribe colombiana, recordar además, que julio y agosto tienen una disminución en la lluvia. Por consiguiente, en los meses en donde se presentan lluvias no hay relación local, mientras que, en los demás meses las variaciones en el rango de la magnitud del viento sobre costa influncian las variaciones sobre Ayapel o viceversa.

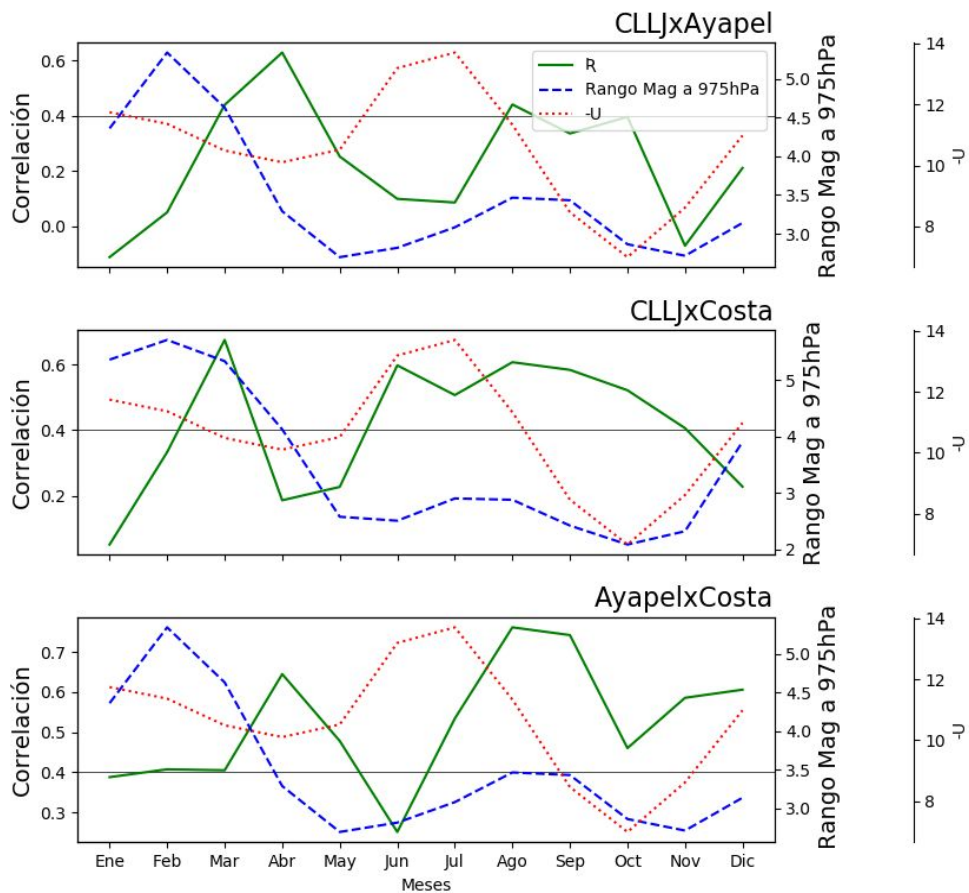


Figura 4.14: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con el rango diario de la magnitud del viento a 975 hPa, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa. El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

Las correlaciones de las anomalías del CLLJ con el rango de la magnitud del viento a 975 hPa en Ayapel continuaron siendo fuertes en el mes de abril, mientras que, de agosto a octubre pasaron a presentar correlaciones menos interesantes cercanas a 0.4, comparado con 10 m. Las correlaciones entre CLLJ x Costa tuvieron patrones similares a las del nivel inferior (Figura 4.14, medio), aún se puede apreciar un acople en los meses febrero, marzo y junio - noviembre. Por último, las correlaciones entre los rangos a 975 hPa para Ayapel y Costa, muestran un acople fuerte entre ambas regiones en al menos 10 meses, excluyendo enero y junio.

Los rangos de vientos a 925 hPa (Figura 4.15) mostraron que: entre Ayapel y el Jet, no existe relación alguna, puesto que todos los coeficientes estuvieron alrededor de cero. Análogamente, las correlaciones entre Costa y el Jet cayeron súbitamente, y sólo se pudo identificar valores importantes en el mes de marzo cuyo coeficiente superó los 0.4, el resto de meses mostraron independencia a la influencia del Jet. Por otro lado, Los rangos diarios de las zonas continentales de interés están fuertemente acoplado a lo largo de año, especialmente en los primeros meses del año (enero-marzo).

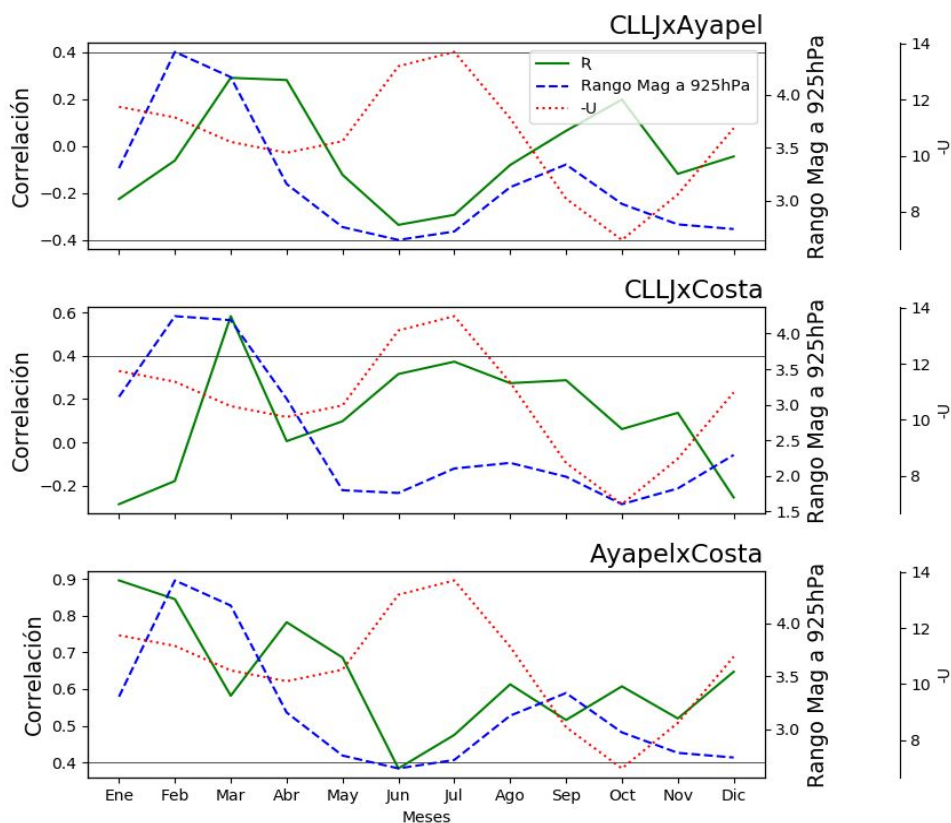


Figura 4.15: Correlaciones entre el ciclo diario del Chorro de bajo nivel del Caribe con la magnitud del viento a 925 hPa en el mes de octubre, CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa. El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

4.5 Mapas de correlaciones entre la temperatura superficial del mar con vientos a 10 m y 925 hPa

La Figura 4.16 muestra que los vientos a 10 m sobre Ayapel son afectados por las variaciones de la temperatura superficial del mar a lo largo del año, aunque, de maneras distintas dependiendo del mes; en los tres primeros meses del año: enero, febrero y marzo, las correlaciones son en su mayoría positivas. En este caso, valores positivos de las correlaciones, sugieren que aumentos en la temperatura del mar van asociados con aumentos en los vientos a 10 m sobre Ayapel. Estos valores positivos de correlación también sugieren que una disminución en las temperaturas del mar están asociados con debilitamiento de los vientos en Ayapel. Además, las correlaciones positivas en enero significan que, al comparar todos los enero del periodo de estudio (30 enero, desde 1989 hasta 2018), para la mayor parte de fluctuaciones en la temperatura del mar tenemos fluctuaciones del mismo signo (i.e. positivas con positivas, o negativas con negativas) en las anomalías de viento sobre Ayapel. Una interpretación análoga se hace para los otros meses.

Para enero las correlaciones son interesantes en el Caribe cercano a Centro América y en el Pacífico junto al Chocó (la imagen da la impresión de que hace falta ampliar el área de estudio, debido a que queda la sensación de la existencia de correlaciones importantes más hacia América central y el Pacífico cercano a Colombia). En febrero se encuentran algunos sectores con correlaciones positivas mayores a 0.4 ubicados en el mar Caribe y lago de Maracaibo. En marzo aunque las correlaciones son positivas ninguna es importante. Los demás meses presentan correlaciones negativas con los vientos a 10 m sobre Ayapel, en los cuales, junio y septiembre destacan por el área de correlaciones y valores interesantes. Estas correlaciones negativas sugieren que un aumento de la temperatura del mar en estos meses (e.g. junio y septiembre) está generalmente asociado con vientos más débiles sobre Ayapel comparado con lo usual. También tendríamos que, por ejemplo a lo largo de los junios de todos los años de estudio, temperaturas más bajas en el mar Caribe estarían asociadas con vientos más fuertes en Ayapel.

Aunque Costa y Ayapel sean lugares cercanos, la temperatura superficial del mar se relaciona diferente con los vientos a 10 m de ambos lugares (Figura 4.17). Por consiguiente, aun cuando las correlaciones en los meses enero y febrero son similares a las descritas en Ayapel, para los demás meses priman las correlaciones positivas a lo largo del año, y sin lugar a dudas el mes de octubre destaca, ya que, la mayor parte del mar estudiado presenta valores superiores a 0.4. El mar próximo al continente de América del Sur (Venezuela y parte de la Guajira colombiana) posee valores de correlaciones entre 0.6 y 0.7. Es decir que, por ejemplo, cuando el mar Caribe está más cálido de lo usual, los vientos en Costa son más fuertes. Por otro lado, en noviembre llama la atención la fuerte conexión con el océano Pacífico donde las correlaciones son negativas y de magnitud considerable (alrededor de -0.7): esto sugiere que en este mes los vientos en Costa son más débiles cuando el Pacífico es más cálido.

Las correlaciones de la SST con los vientos a 925 hPa sobre Ayapel (Figura 4.18) se alejan de lo descrito anteriormente a 10 m. En los meses enero, abril, mayo y septiembre no se presentan

correlaciones importantes. En los meses marzo, junio, julio, agosto y octubre las correlaciones son positivas e importantes en gran parte del área del mar Caribe, principalmente en el mes de agosto en el cual se observan correlaciones superiores a 0.7, lo cual indica que un calentamiento (enfriamiento) en la cuenca del Caribe se asocia a vientos fuertes (débiles) sobre Ayapel. Los meses diciembre y noviembre presentan correlaciones negativas mayores (en magnitud) a -0.5 en la porción del océano Pacífico abarcada por el área de estudio, por consiguiente bajas temperaturas van acompañados por vientos fuertes, de forma análoga temperaturas cálidas están ligadas a vientos débiles. Sin embargo, para estos meses queda nuevamente la sensación de que hay correlaciones importantes hacia América central y el Pacífico cercano a Colombia.

La Figura 4.19 muestra las correlaciones entre la temperatura superficial del mar y los vientos en Costa a 925 hPa, el patrón a lo largo del año se parece en general al descrito en la Figura 4.17 (SST x vientos a 10 m en Costa). Aunque, en este nivel las correlaciones en el mar Caribe se fortalecen. En los meses marzo, junio y septiembre la conexión entre la SST en el Caribe y los vientos a 925 hPa sobre costa aumenta, pasando de correlaciones sin importancia en el nivel de 10 m a valores superiores a 0.4. Además, se pueden apreciar dos diferencias: en marzo, a la altura de 925 hPa se dieron correlaciones sobre el mar Caribe, mientras que a 10 metros no se pudo apreciar ninguna. Cabe mencionar que agosto presenta las correlaciones positivas más importantes con el Caribe, y noviembre y diciembre poseen correlaciones negativas fuertes con el Pacífico. En general para la altura de 925 hPa la relación entre la temperatura del Caribe y los vientos es lineal, es decir, las altas temperaturas del mar están relacionadas con vientos fuertes, mientras que a temperaturas frías los vientos son débiles. Con el Pacífico la relación es inversa, en efecto a menores (mayores) temperaturas vientos fuertes (débiles).

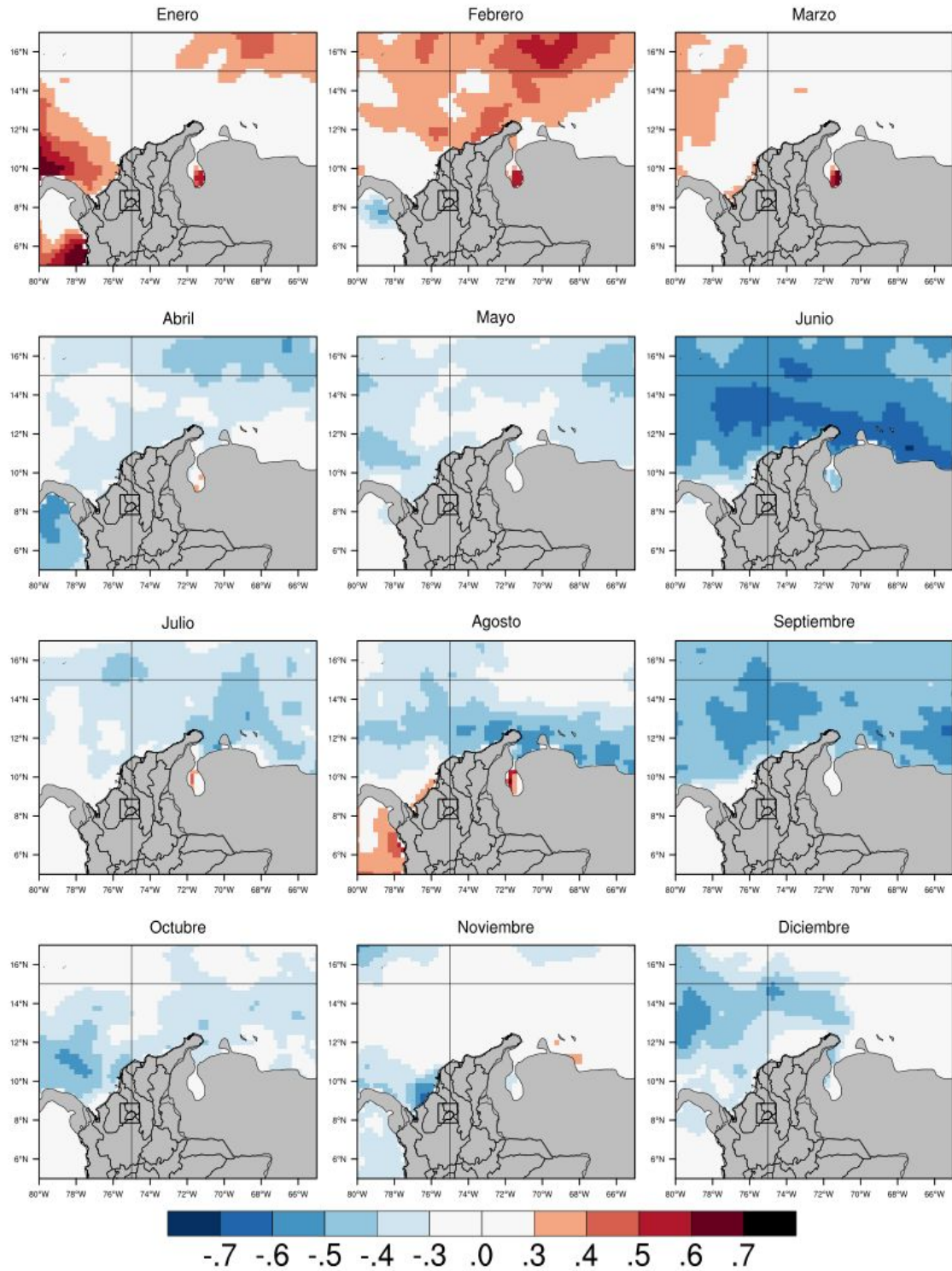


Figura 4.16: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de la temperatura superficial del mar y los vientos a 10 metros sobre Ayapel

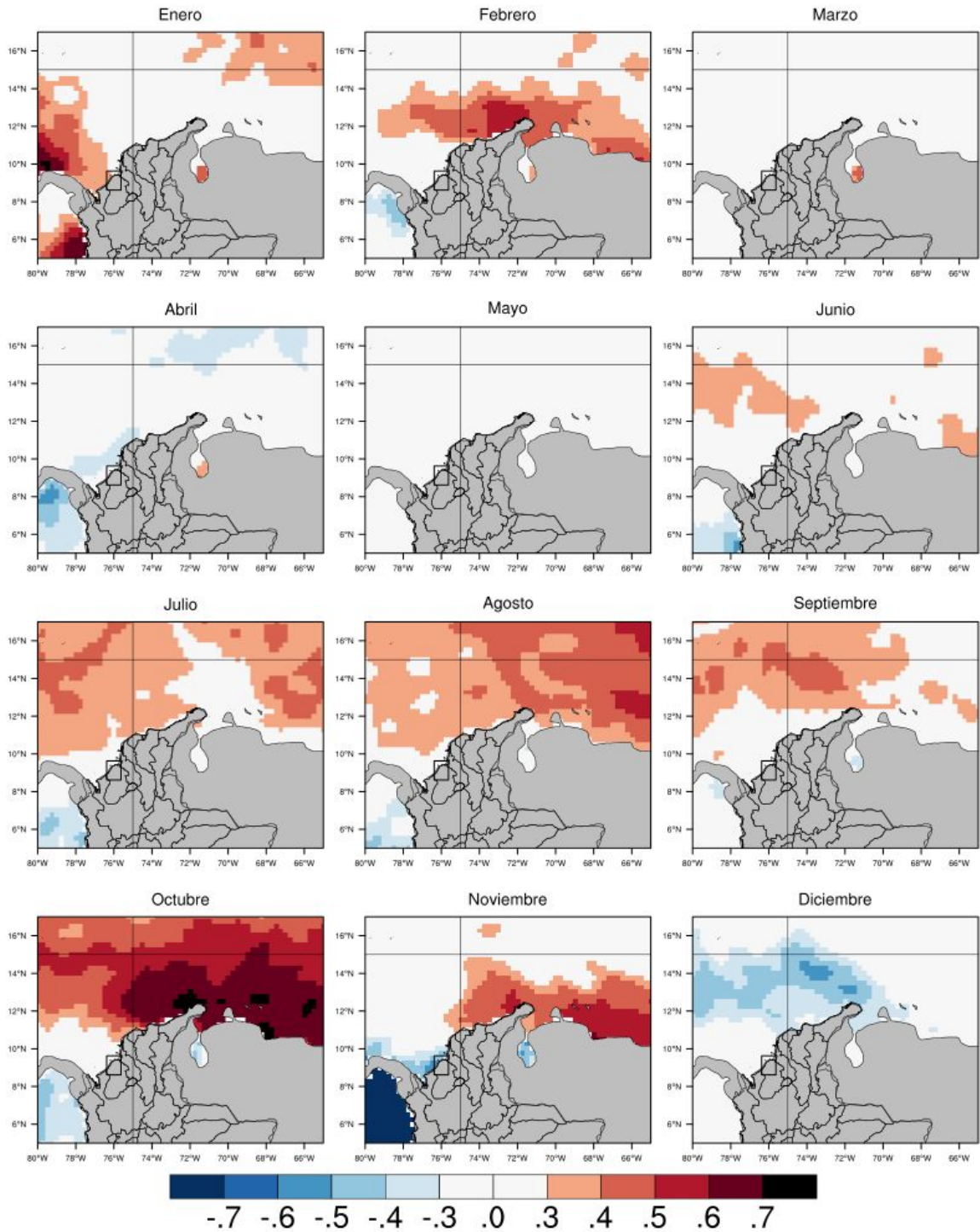


Figura 4.17: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de la temperatura superficial del mar y los vientos a 10 metros sobre Costa.

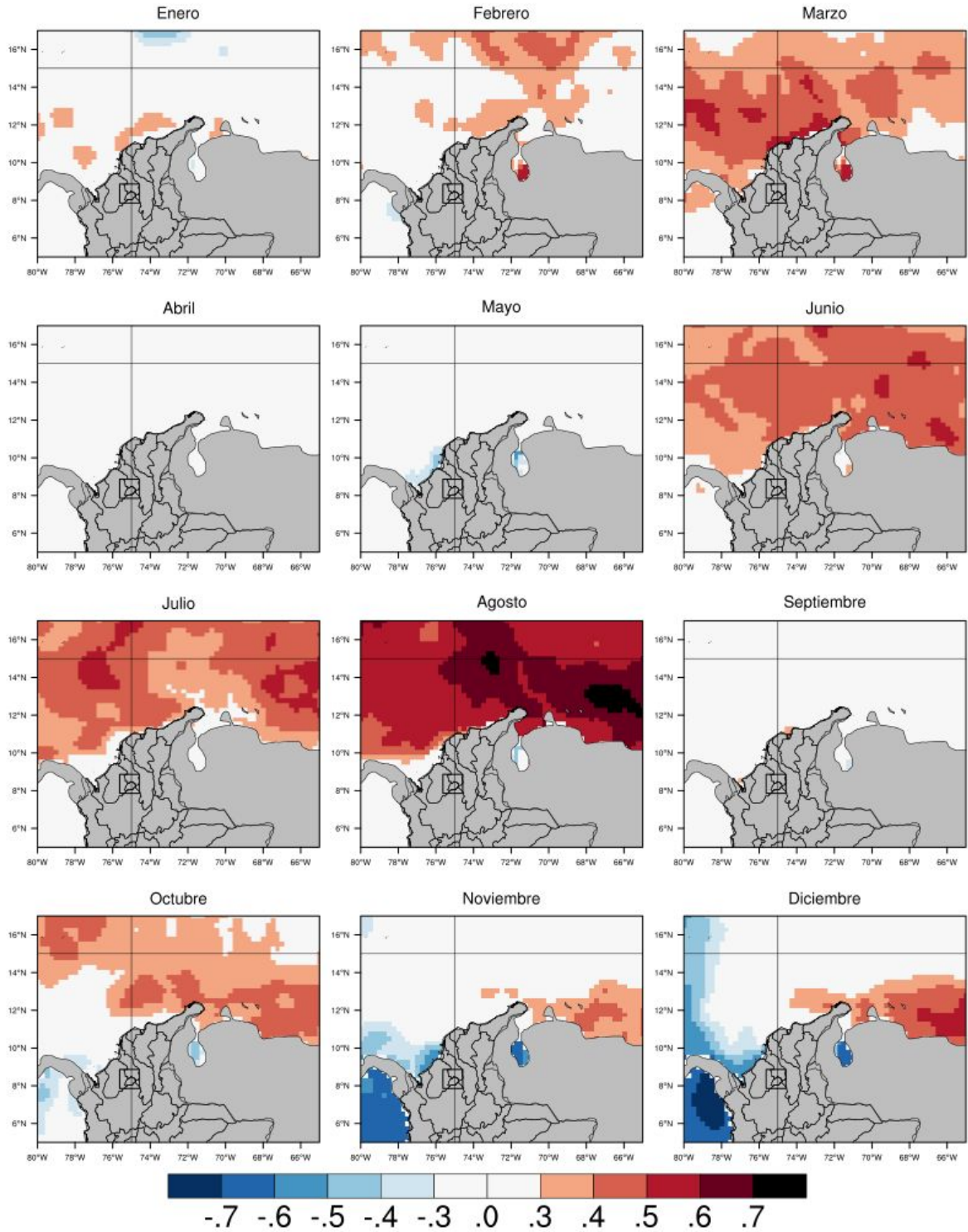


Figura 4.18: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de la temperatura superficial del mar y los vientos a 925 hPa sobre Ayapel.

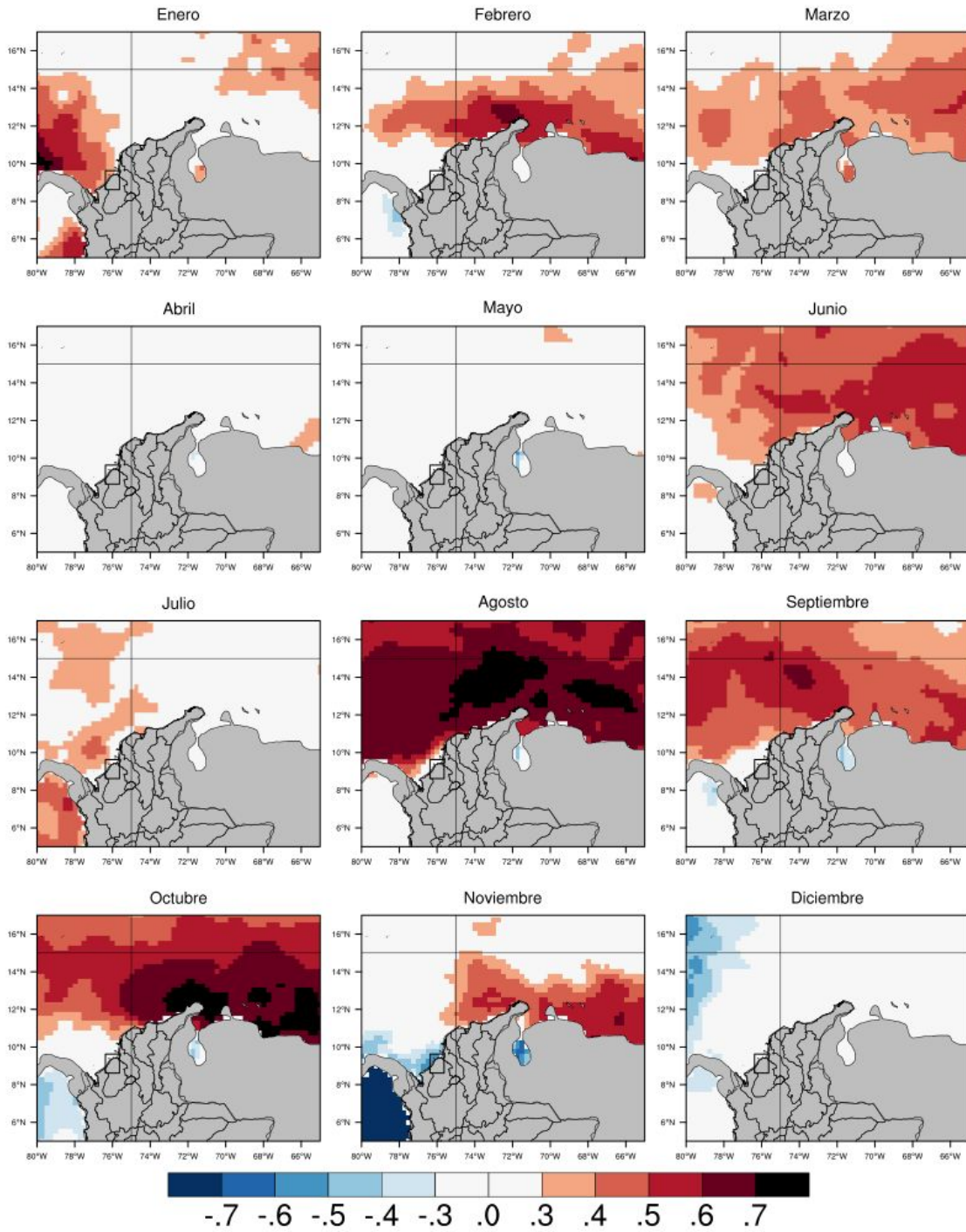


Figura 4.19: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de la temperatura superficial del mar y los vientos a 925 hPa sobre Costa.

4.6. Mapas de correlación entre la temperatura a dos metros y los vientos a 10 m y 925 hPa

Las Figuras a continuación presentan mapas de correlación calculados entre el promedio espacial de las anomalías sin tendencia de la temperatura a 2 metros sobre el suelo en las regiones Ayapel y Costa, con los campos de la magnitud vientos a 10 metros y 925 hPa. Los colores rojos, representan las correlaciones positivas, es decir, los lugares donde aumentos (disminuciones) en la magnitud del viento están relacionados con aumentos (disminuciones) en la temperatura sobre las regiones. Por el contrario, los colores azules representan las correlaciones negativas, donde aumentos (disminuciones) en la velocidad del viento se encuentran asociados con disminuciones (aumentos) de la temperatura a 2 metros.

En general para las figuras a continuación (Figura 4.20 a 4.23) se pudo identificar que, entre los meses de enero a marzo, las principales correlaciones se presentaron sobre las regiones continentales del Caribe colombiano. Por ejemplo, en la figura 4.20 los colores rojos sobre la región de la costa noroccidental de Colombia (región que hemos venido llamando Costa) indican que vientos más fuertes de lo que es usual en esa región están asociados con temperaturas más altas en la región de Ayapel. Por la cercanía de la región con correlaciones de interés a la región de Ayapel, podríamos decir que durante esta temporada hay una fuerte conexión a **nivel local**, entre los vientos y la temperatura superficial de las regiones de interés, especialmente en el mes de enero. La relación lineal entre las variables puede estar asociada al movimiento de masas de aire, donde vientos fuertes dificultan la convergencia y posible formación de nubosidad, la cual aumentaría la radiación incidente y en consecuencia la temperatura (los vientos débiles tendrían el efecto contrario). Una causa adicional, podrían ser los fenómenos de advección, teniendo en cuenta la temporada seca durante estos meses y lo frío que se encuentra el mar, los vientos serían un medio de transporte de masas de aire secas y calientes, las cuales también aumentan la temperatura.

Posteriormente, la señal parece disiparse en abril, donde las correlaciones caen y no se diferencian relaciones importantes. El mes de mayo tiene similitudes con abril, sin embargo, se destacan algunas señales alrededor de los 10° N y 75° W. Esta ubicación corresponde a una zona costera no estudiada; es posible que los vientos sobre este lugar puedan tener una relación con la temperatura de Ayapel y la línea de costa.

Los meses entre junio y agosto, mostraron correlaciones importantes principalmente en **escala regional** aproximadamente sobre el área del Chorro de bajo nivel del Caribe (70° - 80° W y 12.5° - 17.5° N), lo que apunta al hecho de que durante esta temporada las temperaturas en Ayapel y Costa, están fuertemente relacionadas por los vientos en regiones más lejanas en el Caribe. Los mecanismos físicos detrás de esta relación son similares a lo descritos para los meses entre enero y marzo, pero esta vez a una escala espacial mayor. Los meses septiembre y noviembre, muestran anticorrelaciones importantes con los vientos del Pacífico, es decir, estos se relacionan de manera inversa con las temperaturas de las regiones de interés. La relación inversa puede deberse a que cuando hay fortalecimiento del Chorro de bajo nivel del Chocó, incluso entrando a, o modificando los vientos de la región Caribe durante esta época, se podrían tener entonces vientos más fuertes

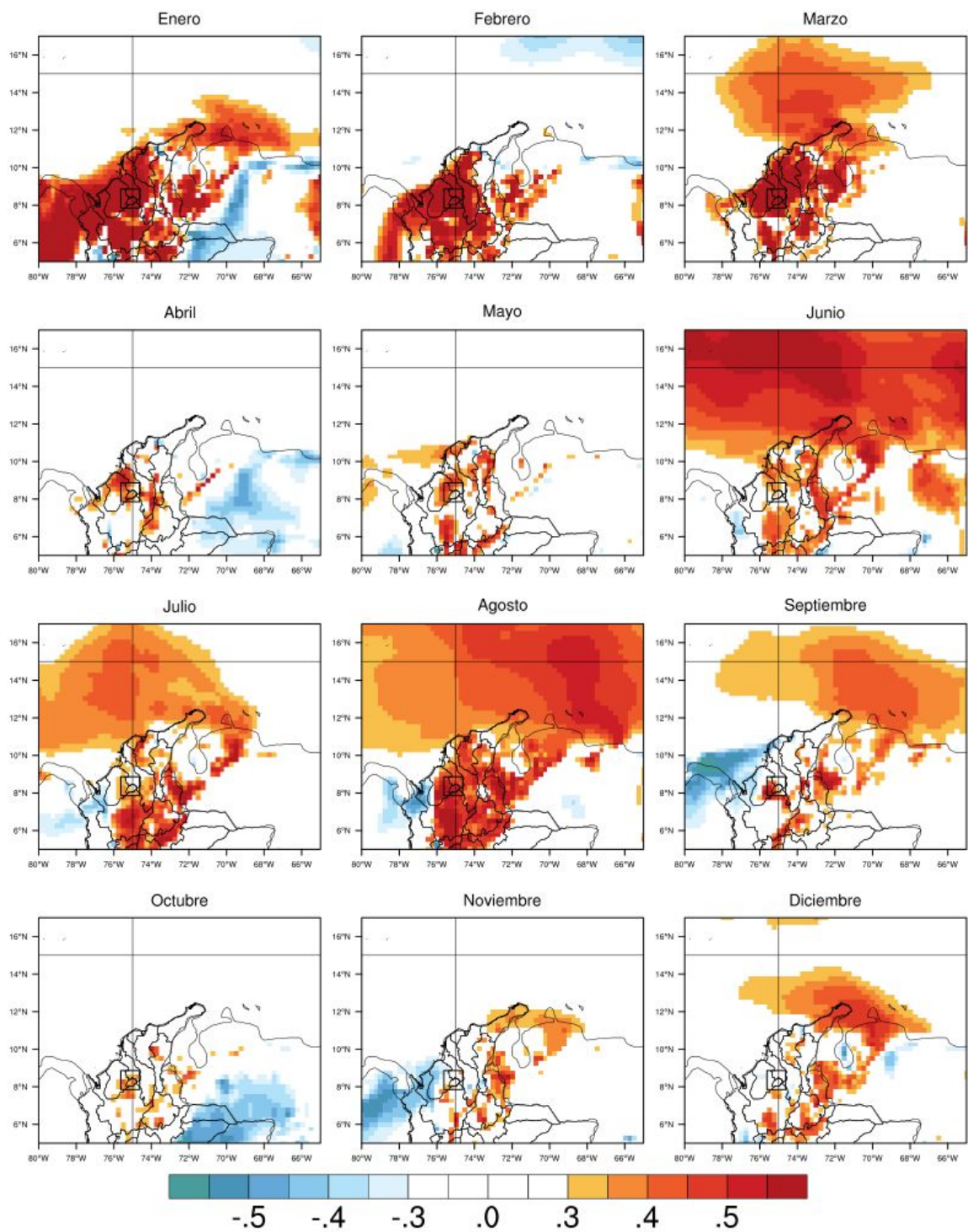


Figura 4.20: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de los vientos a 10 m y la temperatura a dos metros del suelo sobre Ayapel.

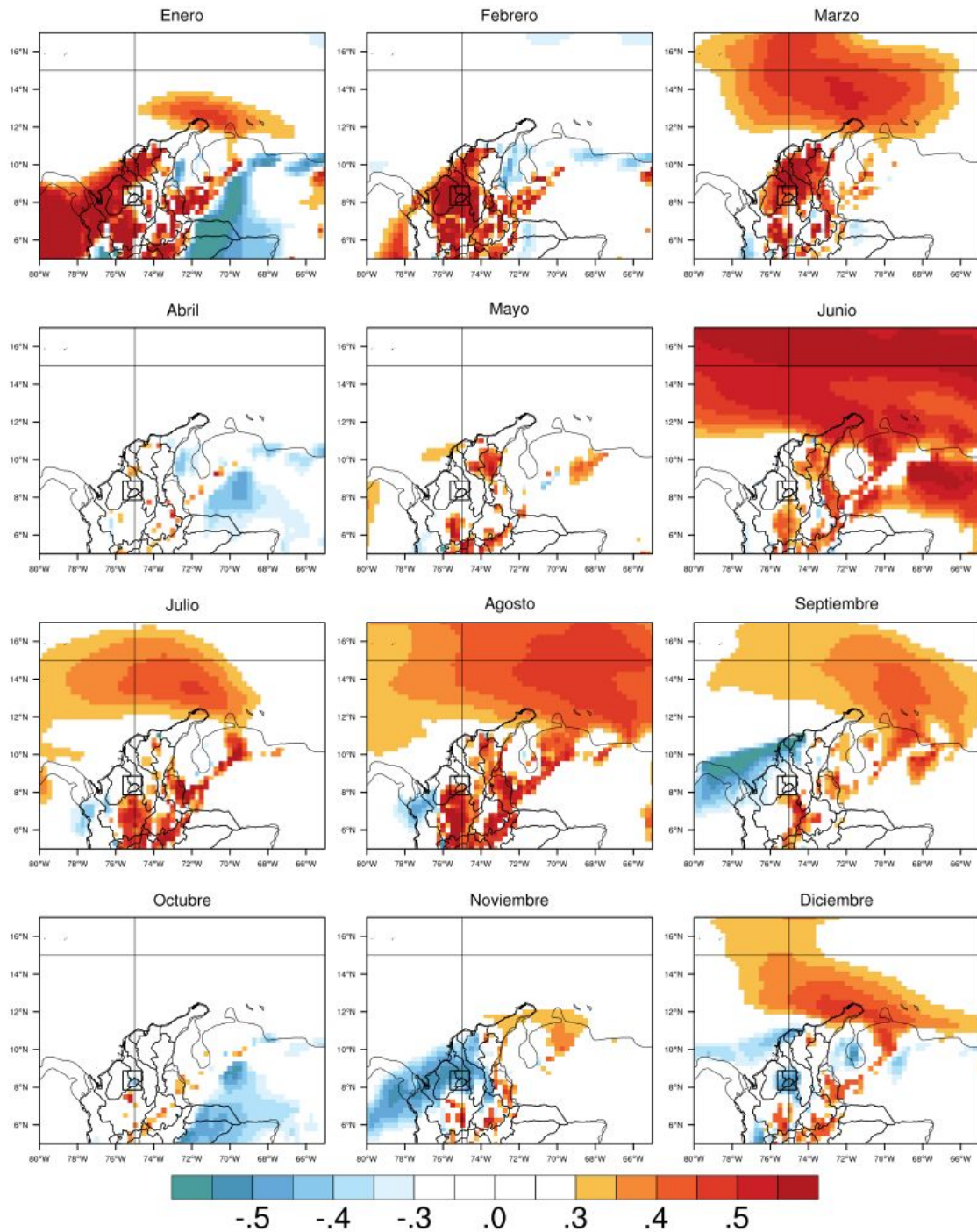


Figura 4.21. Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de los vientos a 925 hPa y la temperatura a dos metros del suelo sobre Ayapel

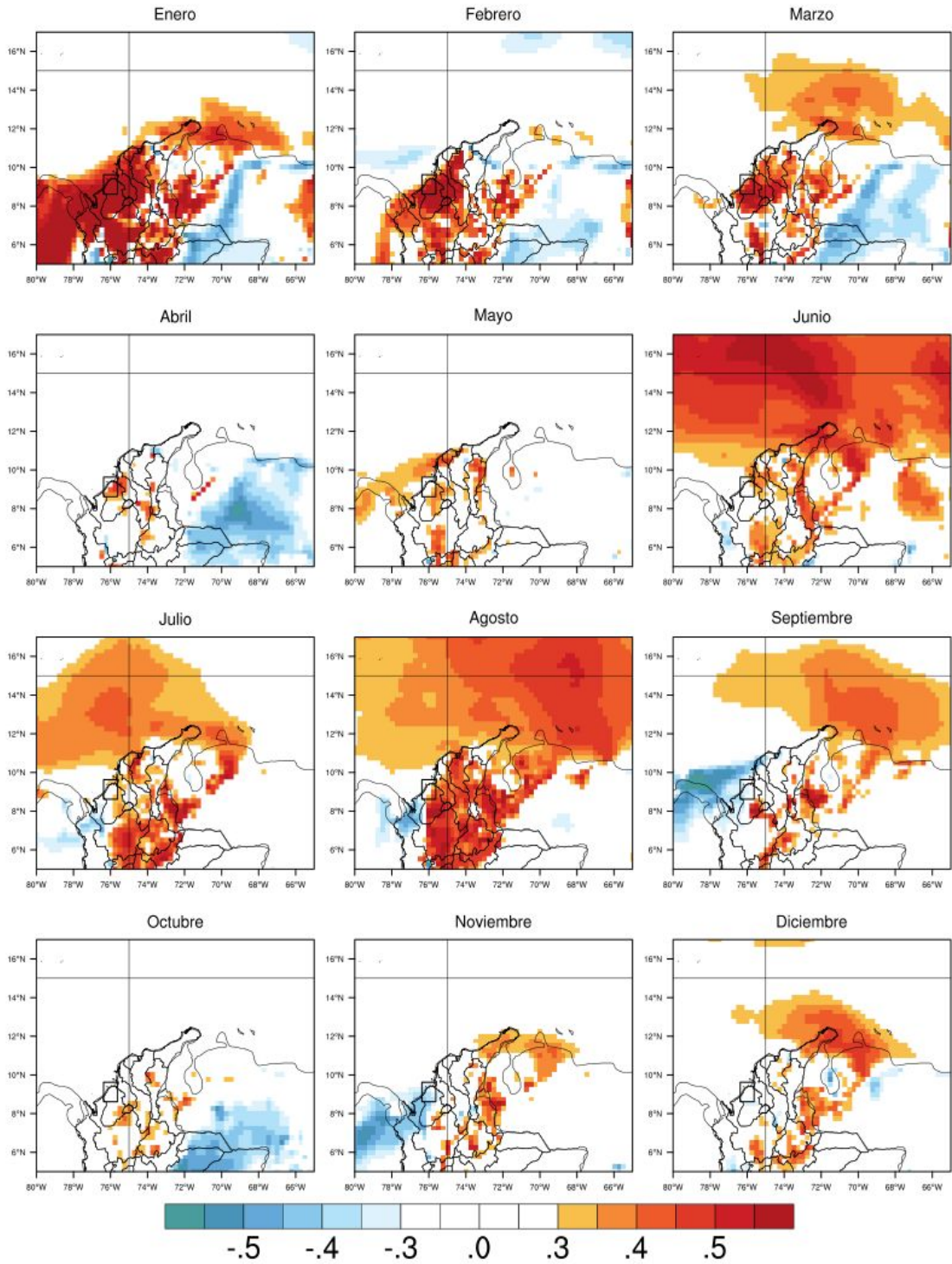


Figura 4.22: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de los vientos a 10 m y la temperatura a dos metros del suelo sobre Costa.

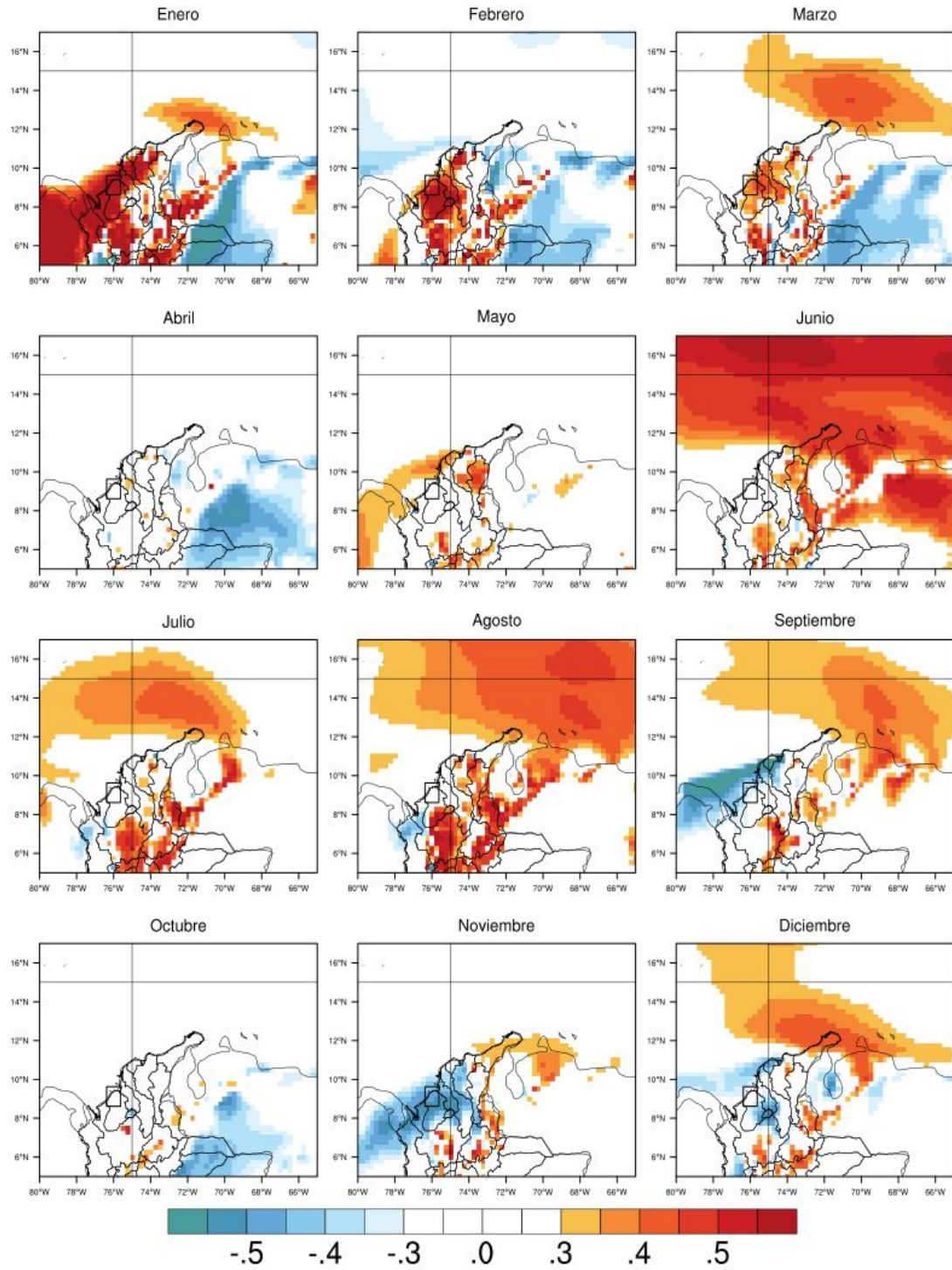


Figura 4.23: Mapas de correlaciones entre las anomalías sin tendencia de los vientos a 925 hPa y la temperatura a dos metros del suelo sobre Costa.

desde el occidente, ayudando al transporte y convergencia de considerables cantidades de humedad sobre las regiones que alcanza, facilitando la formación de nubes y disminuyendo la temperatura en superficie sobre la región de Ayapel. Finalmente el mes de octubre no mostró acople con ninguna región; es posible que durante este mes sea más dominante el efecto de fenómenos a mayor escala como el paso de la ZCIT, con lo cual cambios en los vientos no necesariamente van correlacionados con cambios en la temperatura sobre Ayapel y Costa. En diciembre, las correlaciones cercanas a la Guajira y el resto del Caribe, sugieren que vientos fuertes en esa región están asociados con temperaturas más altas tanto en Costa como en Ayapel. Este tipo de correlación podría sugerir una advección de aire seco a escala regional, facilitando cielos despejados y un aumento en la temperatura.

4.7. Conclusiones del capítulo

De manera general la comunicación entre el CLLJ con los vientos a 10 m de las regiones Costa y Ayapel, es más interesante a escala diaria que mensual, debido a que en el transcurso del ciclo diario de los meses estudiados (febrero, abril, julio y octubre) se observan correlaciones importantes, mientras que en los coeficientes de correlación con anomalías mensuales (i.e. a escala inter-anual) de vientos no se presentan valores interesantes en la mayoría de los meses del año (ver Anexo A5 a A7).

Para el mes de febrero, anomalías en los ciclos diarios de los vientos (10m, 975 hPa y 925 hPa) sobre Ayapel se relacionan de forma notable con anomalías en los vientos en la región Costa. Factores como la temporada seca, las temperaturas bajas en el mar y altas sobre el continente, favorecen el desarrollo de un fuerte gradiente de temperatura (por lo tanto de presión). Gracias a estas condiciones locales, los vientos presentan magnitudes fuertes facilitando interacciones entre Costa y Ayapel por encima de la escala regional. Es decir, la relación entre anomalías del Jet respecto a su ciclo diario y las anomalías en Ayapel parecen no ser tan relevantes en comparación con la relación entre las anomalías en Costa y las variaciones en Ayapel, a pesar de que el Chorro del Caribe es fuerte en este mes. En otras palabras, a escala intra-diaria, cambios en Ayapel parecen estar más relacionados con cambios en Costa (local) que en el Jet del Caribe (regional) cuando analizamos esta relación en febrero.

En abril existe una comunicación de los vientos superficiales (10 metros y 975 hPa) entre la región del CLLJ y los vientos sobre Ayapel. No obstante, para este mes no es claro el lugar por el cual se da la comunicación, puesto que, el CLLJ no presenta relación alguna con los vientos en Costa para ninguna de las alturas analizadas. Posiblemente existe otro mecanismo diferente a la brisa marina estudiada, a través del cual variaciones en los vientos del mar Caribe se relacionan con variaciones en la región de Ayapel. Se encontró que a 925 hPa los vientos en Ayapel se encuentran principalmente conectados con los vientos de Costa (mayores correlaciones), mientras que, no se observa relaciones con el CLLJ.

En el mes de julio los vientos en todos los niveles sobre Ayapel presentaron interacciones relevantes con el Chorro de bajo nivel del Caribe y la región Costa, es decir, una conexión tanto con los

vientos cercanos de costa y los alejados del mar Caribe. En esta temporada es muy importante el mecanismo de brisas marinas, ya que, por medio de éste los vientos provenientes del Jet cruzan la región Costa para interactuar con Ayapel y viceversa. Condiciones propias de este mes como el máximo en la magnitud del CLLJ, y la presencia del *Veranillo de San Juan*, pueden ayudar con el acople de las tres regiones expuestas.

Octubre mostró que los vientos a 10 m y 975 hPa de la región de Ayapel exhiben un desacople total con las regiones estudiadas, es decir, no se vinculan con los vientos en Costa ni con los vientos del CLLJ. Lo contrario, sucede entre el Chorro del Caribe y la región Costa los cuales presentan una fuerte relación inversa, en todos los niveles estudiados, especialmente a 925 hPa. Según lo descrito, es posible que la presencia de una importante temporada lluviosa sobre el norte de Colombia interrumpa la conexión con Ayapel, pese a la existencia del fuerte acople entre el CLLJ y Costa. A diferencia de los niveles de 10 m y 975 hPa, los vientos a 925 hPa en Ayapel si se conectan con el CLLJ y lo hacen por medio de la costa estudiada; al estar más arriba en la atmósfera los efectos de la topografía serían menos fuertes sobre el nivel de 925 hPa, facilitando un patrón de viento más continuo.

Las variaciones en el CLLJ pueden tener un efecto sobre las magnitudes del viento en las regiones de interés, principalmente en los niveles más cercanos a la superficie. Teniendo en cuenta el ciclo anual de correlaciones entre los rangos diarios del viento y el Chorro del Caribe, meses como febrero, marzo, abril, junio, julio, septiembre y/o octubre, tendrían brisas sensibles a las anomalías en las magnitudes de los vientos del Caribe, haciendo los rangos del ciclo diario del viento en Ayapel más estrechos o amplios.

Las relaciones entre anomalías mensuales en el campo de vientos a 10 metros y 925 hPa y las temperaturas a dos metros sobre Ayapel y Costa fueron similares y presentaron una estacionalidad. Los primeros meses del año, las correlaciones fueron positivas y fuertes en las regiones del Caribe colombiano. Durante la temporada de mitad de año (alrededor de junio), los campos de vientos mostraron acoples lineales tanto en las regiones continentales como en el mar Caribe. En ambos periodos mencionados, los fortalecimientos (debilitamientos) del viento van acompañados de aumentos (disminuciones) de la temperatura; esto se puede asociar a disminución (aumento) en la convergencia de humedad a través de aumento (disminución) en los vientos y/o fenómenos de advección de masas de aire cálidas.

Finalizando el ciclo anual (especialmente en septiembre y noviembre), se identificaron fuertes anticorrelaciones con vientos provenientes del Pacífico, dando la idea de que una intensificación (debilitamiento) de estos vientos, disminuye (aumenta) las temperaturas en la región de Ayapel (y de la costa Caribe colombiana, lo que hemos llamado Costa en este estudio). Los mecanismos físicos detrás de esto pueden ser los mismos a los de meses anteriores: e.g. vientos más fuertes desde el Pacífico pueden aumentar la convergencia de humedad sobre la parte noroccidental de Colombia, aumentando la nubosidad y disminuyendo la temperatura en regiones como Ayapel. También se logró identificar meses donde los campos de vientos no tienen una influencia relevante sobre la temperatura. Por ejemplo en octubre, cuando fenómenos de mayor escala como el paso de

la ZCIT y/o convergencia de vientos del Pacífico y Caribe, tienen efectos dominantes sobre la temperatura superficial.

5. Capítulo 5: Conclusiones y discusión

El reanálisis ERA5 logra representar de manera realista el ciclo anual de la temperatura a dos metros y la magnitud del viento de las estaciones mostradas en la Tabla 2.1 y Figura 2.1, proyectando los máximos y mínimos en los meses correctos, aunque, la magnitud del viento tuvo una excepción en el mes de abril donde hay vientos fuertes según las observaciones del IDEAM, pero ERA5 lo reproduce como un mes de vientos débiles.

En cuanto a los ciclos diurnos, el reanálisis representa la temperatura a 2 metros de manera similar a las observaciones, identificando correctamente las horas de máximos y los mínimos. Es posible que el ciclo de radiación solar esté bien definido dentro de las simulaciones de ERA5, en escala diurna y anual. Aún así, ERA5 presenta subestimaciones y sobrestimaciones promedio de 1.0 °C a lo largo del ciclo diurno. Teniendo en cuenta que las brisas marinas, ocurren debido al gradiente de temperatura, la precisión en los valores de ésta puede ser un factor determinante en la incertidumbre en la representación de la brisa marina por parte de ERA5.

Los ciclos diurnos de magnitud del viento del IDEAM fueron diferentes a los de ERA5, en la mayoría de casos estudiados. Los valores de correlaciones entre ambos conjuntos de información también apuntan a que el reanálisis no representa de manera realista las magnitudes del viento. Solo logró acercarse a la realidad en la estación de Montería, para el periodo de junio - julio 2011 y junio - septiembre 2010, donde identificó los picos de vientos máximos, con un rango de error muy cercano a 0 m/s (ver Figura 2.18). También se destaca que al realizar promedios a escala climática mejora el desempeño del reanálisis. Por otro lado, el reanálisis presenta mejores resultados reproduciendo la dirección del viento, ya que reconoce los momentos donde el viento rota, siendo muy preciso con la componente meridional, mientras que, tiene una mayor dificultad con la componente zonal; posiblemente los problemas asociados a la componente zonal, también están involucrados en la representación de la magnitud.

En general el rango diurno de temperatura y vientos es más estrecho en el reanálisis que en las observaciones. Los sesgos de ERA5 respecto al IDEAM pueden estar asociados a la resolución, ya que, al visualizar el mundo de manera más gruesa, los detalles a menor escala como procesos de microfísica, la topografía y/o tipos de cobertura del suelo, no se definen con el nivel de detalle suficiente dentro de las simulaciones, generando diferencias con las observaciones. Teniendo en cuenta que el reanálisis logra representar “bien” algunos aspectos de las variables estudiadas, y la poca información disponible de datos de observaciones a nivel nacional, consideramos que vale la pena continuar investigando y haciendo experimentos que mejoren la representación que ERA5 hace de nuestra zona de estudio. Al ser una fuente de información libre y de fácil acceso, ERA5 podría ser una herramienta valiosa en la caracterización de diferentes sistemas en el país, con un correcto diagnóstico de sus limitaciones, lo cual intentamos hacer en el presente estudio a través de su validación con datos del IDEAM. Por el momento se sugiere utilizar ERA5, para estudios a escala climática, con fenómenos mayores o iguales a la mesoescala (sistemas mayores a 50 km,

incluyendo brisas marinas, vientos del este, monzones, jets de escala regional, fenómenos sinópticos, etc.).

El contraste de temperatura entre el mar Caribe y la superficie continental adyacente, efectivamente son la causa principal de la formación de las brisas marinas. Un patrón de cambio diurno en la dirección de los vientos en la región de interés se pudo observar tanto para las observaciones como en el reanálisis (ver Figuras 2.29 a 2.31). Sabiendo que, las observaciones presentan magnitudes fuertes con dirección sur, sur-oeste, además de que los vientos de Costa y Ayapel en ERA5 están fuertemente correlacionados durante la mayoría del año (ver Figuras 4.13 a 4.15), es muy posible que esta circulación logre alcanzar el municipio de Ayapel. De ser así, las brisas podrían ser un mecanismo importante de conexión entre el mar Caribe y Ayapel, incluyendo procesos de transporte de humedad, disipación o acumulación de contaminantes, formación de lluvias o nubes y/o además de una corriente de vientos para aves migratorias (Chiquetto et. al, 2018; Azorín-Molina et. al, 2011, Asimakopoulos et. al, 1999).

Las BM-T se pudieron apreciar en los campos de vientos durante todo el año. Sin embargo, según sus características tienen una estacionalidad marcada., Las temporadas de brisas se podrían definir según agrupaciones de meses con características similares, incluyendo diciembre-a-abril, mayo-a-agosto, y septiembre-a-noviembre. En la temporada diciembre-enero-febrero-marzo-abril, los vientos presentan un pico máximo en magnitud, gracias al fuerte contraste entre la t2m más caliente del año sobre el continente y una SST más fría, además de ser la principal temporada seca del año. Todos estos factores contribuyen con la formación de un fuerte gradiente de temperatura en esta temporada, el cual fortalece los vientos. Las brisas de esta temporada solo presentan vientos con dirección mar-tierra. Durante la segunda temporada, mayo-junio-julio-agosto, las brisas presentan tanto direcciones mar-tierra, como tierra- mar, con dos periodos de rotación para luego cruzar la línea costera. El gradiente de temperatura durante estos meses no es tan fuerte, como en la temporada anterior, por lo que los vientos son más débiles. Por último, en la temporada de septiembre-octubre-noviembre, el reanálisis produjo los vientos más débiles del año, lo cual fue acorde a las observaciones del IDEAM. En este periodo de tiempo, se da la temporada de lluvias más intensa del año, lo que posiblemente tiene un efecto sobre la temperatura a dos metros, al restringir el calentamiento radiativo, además de enfriar las superficies a través de mecanismo detrás de la precipitación. Como consecuencia, los gradientes de temperatura se pueden ver debilitados, y por tanto los vientos. Sin embargo las brisas mar-tierra y tierra-mar aún logran definirse, posiblemente gracias a lo estable que es el ciclo de radiación. Cabe resaltar que la circulación de brisa está presente todo el año quizá porque las temperaturas tropicales son siempre lo suficientemente cálidas para formar un gradiente de presión.

En este trabajo también estudiamos la relación de vientos y temperatura en Ayapel con condiciones a escala “cercana” (en nuestro caso las condiciones en Costa, a lo que llamamos “local”) y escala regional (temperaturas y vientos más adentro en el mar Caribe, en el Pacífico, entre otros). En el mes de febrero, las condiciones locales están tan bien definidas (e.g. un gradiente de temperatura marcado), que dominan por encima de la influencia regional de los vientos del Caribe. Durante el mes de abril, la temperatura en la región de Ayapel se encuentra correlacionada con el CLLJ, pero

el mecanismo a través del cual interactúan no es el de las brisas marinas estudiadas en este trabajo, ya que la Costa no tiene relación alguna con el Chorro. En el mes de junio, el análisis de correlaciones sugiere que el Chorro del Caribe parece tener una influencia sobre Ayapel. Se argumenta que dada la relación que tiene el Chorro del Caribe con la región Costa, dicha influencia se propaga a través del mecanismo de brisas, específicamente en los momentos donde los vientos cruzan la línea de costa. Por último, en el mes de octubre las relaciones entre los vientos a 10 metros y 975 hPa sobre Costa y Ayapel se ven debilitadas. Es posible que el paso de la ZCIT y la convergencia de vientos provenientes del Pacífico en esta temporada logren inhibir las interacciones a escala local, mientras que los vientos a 925 hPa presentan interacciones tanto locales como regionales. De acuerdo a lo descrito entre la interacción del Chorro del Caribe y Ayapel, Ayapel puede ser menos susceptible a fenómenos climáticos de escala regional y gran escala (p.e El Niño, La Niña) en el mes de febrero, cuando prima la conexión local con la región Costa en todas las alturas estudiadas.

Las relaciones entre el CLLJ y Costa fueron negativas en febrero, octubre y parte de Julio (ver Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.10 y 4.11) lo cual apunta a que los fortalecimientos de los vientos del Caribe, debilitan la magnitud de los vientos costeros y viceversa. Las correlaciones entre los rangos diurnos de la magnitud del viento y el Jet, mostraron que la relación es más persistente entre Costa y el CLLJ a lo largo del año, esto se puede asociar a la cercanía entre ambas regiones (ver Figuras 4.13 y 4.14). Por tanto, el efecto principal del CLLJ sería debilitar los vientos en Costa, y ante la ausencia (o debilitamiento) del CLLJ, los vientos en Costa podrían ser más fuertes.

En resumen, en este trabajo hemos visto que ERA5 puede usarse para estudiar algunos aspectos de los vientos y las temperaturas sobre el noroccidente de Colombia, incluyendo brisas marinas. Hemos encontrado que las brisas marinas en ERA5 pueden conectar el Caribe con la región de Ayapel. Según ERA5, la brisa en sí es más fuerte en diciembre-enero-febrero-marzo-abril, con vientos fuertes del mar hacia Ayapel en las horas 12:00 a 22:00 HL. En términos de variabilidad (es decir, desviaciones respecto a los ciclos promedio) el efecto de escala regional de los vientos en el Caribe sobre Ayapel puede tener mayores impactos en abril y julio, y menores impactos durante febrero y octubre. En cambio, en los meses enero, febrero y marzo las variaciones en los vientos hacia Ayapel, e incluso la brisa marina, puede depender más de condiciones de escala que hemos llamado local, incluyendo la vecindad cercana de Ayapel hasta la zona de la Costa.

Futuros trabajos para complementar nuestro análisis pueden incluir: estudiar los patrones de transporte de humedad desde el mar Caribe, al igual que las variables agua precipitable y lluvias asociadas a las brisas marinas. Caracterizar algunos parámetros de la circulación como el frente de brisa y definir las corrientes de retorno en los vientos por encima de 925 hPa, es decir definir la celda de la brisa marina completamente. Además, se podrían incluir la caracterización de los flujos de energía en superficie, con el objetivo de mejorar la definición del gradiente de temperatura. También se podría incluir el análisis de la relación de las regiones locales (Ayapel y Costa) con el Chorro de bajo nivel del Caribe en los meses no estudiados (o de transición entre los máximos y mínimos de la magnitud del CLLJ) en la escala diurna.

Referencias

- Calvo, M. C. (2002). *La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales. Revista cubana de Meteorología*, 9(1).
- Aguilera, M. (2009). *Ciénaga de Ayapel: riqueza en biodiversidad y recursos hídricos. BANCO DE LA REPÚBLICA-ECONOMÍA REGIONAL*.
- Crosman, E. T., & Horel, J. D. (2010). *Sea and lake breezes: A review of numerical studies. Boundary-layer meteorology*, 137(1), 1-29.
- Simpson, JE (1994). *Brisa marina y vientos locales . Prensa de la Universidad de Cambridge*.
- Pérez, R., Ortiz, R., Juan, C., Bejarano, A., Luis, F., Otero, D., ... & Franco, H. (2018). *Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. Atmósfera*, 31(4), 389-406.
- Aguirre, N. J., Palacio, J., Flórez, M. T., Wills, A., Caicedo, O., Jiménez, L. F., ... & Vélez, J. (2005). *Análisis de la relación río-ciénaga y su efecto sobre la producción pesquera en el sistema cenagoso de Ayapel, Colombia. Informe final del proyecto Colciencias. Medellín (Colombia): Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA, Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia*.
- Miller, S. T. K., B. D. Keim, R. W. Talbot, and H. Mao, *Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts, Rev. Geophys.*, 41(3), 1011, doi:10.1029/2003RG000124, 2003.
- B. W. Atkinson, *Meso-Scale Atmospheric Circulations, Academic Press, New York, NY, USA, 1981*.
- Maza M.A. and Voulgaris G., 2011. *Subtidal inner shelf currents off Cartagena de Indias, Caribbean coast of Colombia. Geophys. Res. Lett.* 33, L21606. DOI: 10.1029/2006GL027324
- Shuttleworth, W. J. (2012). *Terrestrial hydrometeorology. John Wiley & Sons*.
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey (Vol. 92). Elsevier*.
- Gustavsson, T., Lindqvist, S., Borne, K., & Bogren, J. (1995). *A study of sea and land breezes in an archipelago on the west coast of Sweden. International Journal of Climatology*, 15(7), 785-800.
- Tijm, A. B. C.: 1999, *Sea-Breeze Studies, Ph.D. Thesis, University of Utrecht, 183 pp*.
- Chiquetto, J. B., Ribeiro, F. N. D., Alvim, D. S., Ynoue, R. Y., da Silva, J., & Silva, M. E. S. (2018). *Transport of Pollutants by the Sea Breeze in São Paulo under the South Atlantic High. Revista do Departamento de Geografia*, 148-161.
- Thomas, Y., A. Nicolae-Lerma y B. Posada. *Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias - Gobernación del Magdalena - Invemar. Serie de Publicaciones especiales # 25. Santa Marta. 132 páginas + CD*.

Schulzweida, Uwe. (2019, February 6). CDO User Guide (Version 1.9.6). <http://doi.org/10.5281/zenodo.2558193>.

Melas, D., Ziomas, I., Klemm, O., & Zerefos, C. S. (1998). Anatomy of the sea-breeze circulation in Athens area under weak large-scale ambient winds. *Atmospheric Environment*, 32(12), 2223-2237.

Orlanski, I. (1975). A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 527-530.

Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate dynamics*, 29(4), 411-422.

Amador, J. A. (2008). The intra-Americas sea low-level jet: Overview and future research. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 153-188.

Muñoz, E., A. J. Busalacchi, S. Nigam, and A. Ruiz-Barradas, 2008: Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet. *J. Climate*, 21, 1260–1276

Cook, K. H., & Vizy, E. K. (2010). Hydrodynamics of the Caribbean low-level jet and its relationship to precipitation. *Journal of Climate*, 23(6), 1477-1494.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 28(107), 201-222.

Bernal, G., Poveda, G., Roldán, P., & Andrade, C. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Colomb. Cienc*, 30(115), 195-208.

Azorin-Molina, C., Chen, D., Tijm, S., & Baldi, M. (2011). A multi-year study of sea breezes in a Mediterranean coastal site: Alicante (Spain). *International Journal of climatology*, 31(3), 468-486.

Asimakopoulos, D. N., Helmis, C. G., Papadopoulos, K. H., Kalogiros, J. A., Kassomenos, P., & Petrakis, M. (1999). Inland propagation of sea breeze under opposing offshore wind. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 70(1-2), 97-110.

Python Software Foundation. *Python Language Reference*, version 3.7. Available at <http://www.python.org>

The NCAR Command Language (Version 6.6.2) [Software]. (2019). Boulder, Colorado: UCAR/NCAR/CISL/TDD. <http://dx.doi.org/10.5065/D6WD3XH5>

Pablo Serna-López, J., & Eduardo Cañón-Barriga, J. (2020). Projecting the future of Ayapel Ciénaga: A hydroecologic analysis under climate change scenarios. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (95).

Anexos

Se observó que algunas estaciones del IDEAM deben ser sometidas a una revisión debido a que sus datos no concuerdan con los demás valores observados (Ver la Figura A1). Estos errores se encontraron para temperatura en: Ayapel (01-16 mayo de 2017), Loricá (01-16 enero de 2005). Para la variable velocidad del viento se observaron dos tipos de errores: el primero, observaciones que superan el rango de datos por hasta 20 m/s (ver Figura A2 y A3), esto sucedió en las estaciones de Majagual y Arboletes en los períodos noviembre del 2001 y marzo 02-30 del 2007.

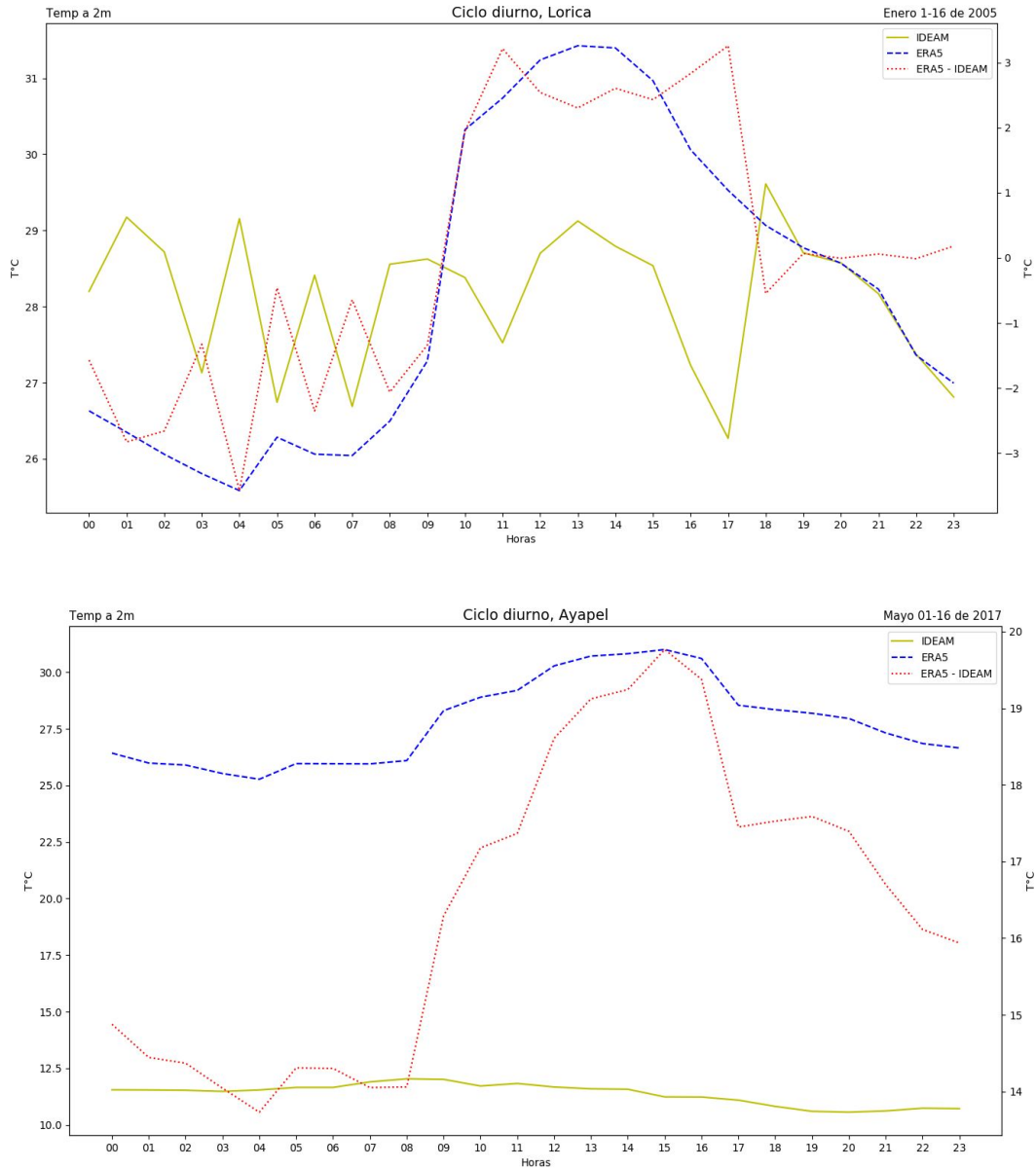


Figura A1. Ciclo diario de temperatura a dos metros, para la estación de Ayapel en el periodo de 01-16 mayo en el 2017 y Loricá del 01-17 de enero en el 2005.

El segundo, observaciones en valores demasiado específicos, dando la impresión de que la estación solo le es posible tomar datos de ciertos valores específicos. Es improbable que la magnitud del viento se concentre en valores tan puntuales y más teniendo la distribución en todos los cuadrantes del diagrama de dispersión, como se observó en los gráficos de las Figuras de la sección 2.2.3 dentro del Capítulo 2.

De la Figura A5 a la Figura A7 se muestra el ciclo anual de correlaciones entre el Chorro de bajo nivel del Caribe con las regiones: Ayapel (arriba) y Costa (medio), además, de las correlaciones entre Ayapel y Costa (abajo). A diferencia del ciclo diurno no se observa conexión importante entre el Chorro y Ayapel en el nivel de 10 m. Sin embargo, a medida que se gana altura aparecen correlaciones interesantes: el de nivel de 975 hPa presenta valores cercanos a 0.4 en los meses enero, agosto y septiembre y un valor cercano a -0.4 el mes de noviembre. A 925 hPa se observan más meses de interés con correlaciones negativas, estos meses son: enero, junio, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre.

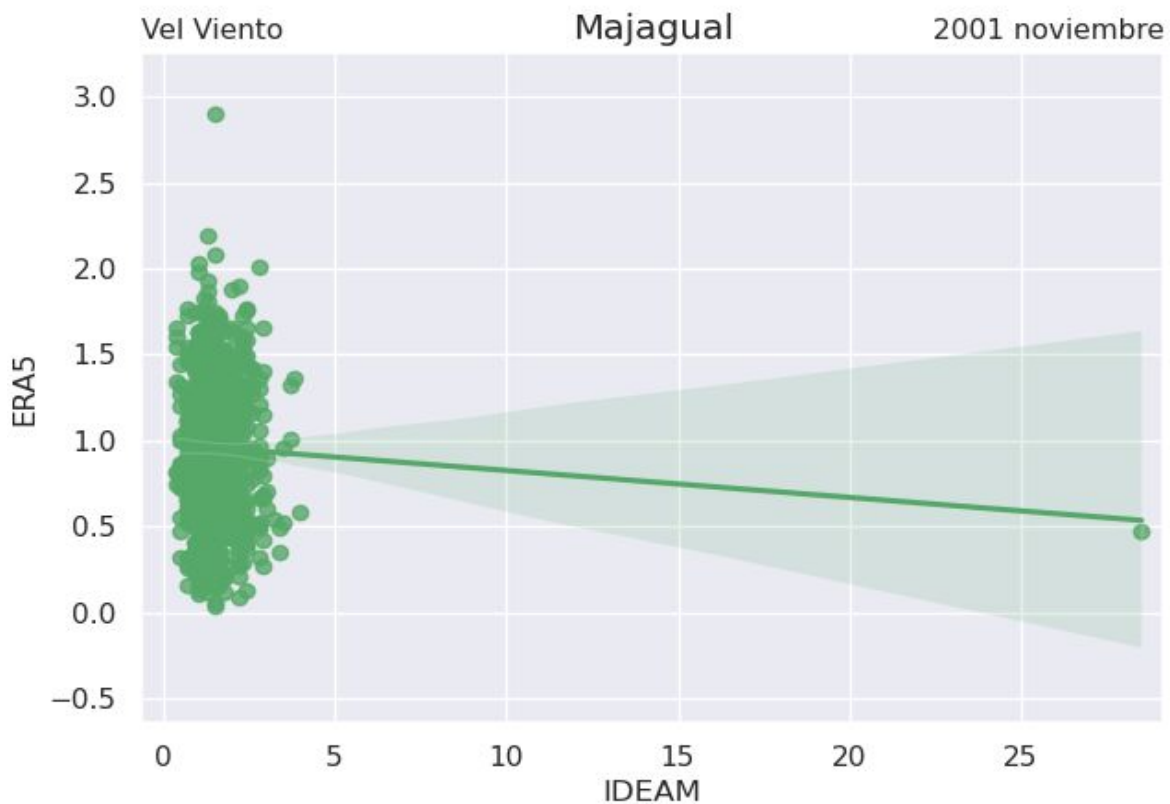


Figura A2. Diagrama de dispersión de la magnitud del viento para la serie de datos originales de la estación de Majagual en el periodo noviembre del 2001.

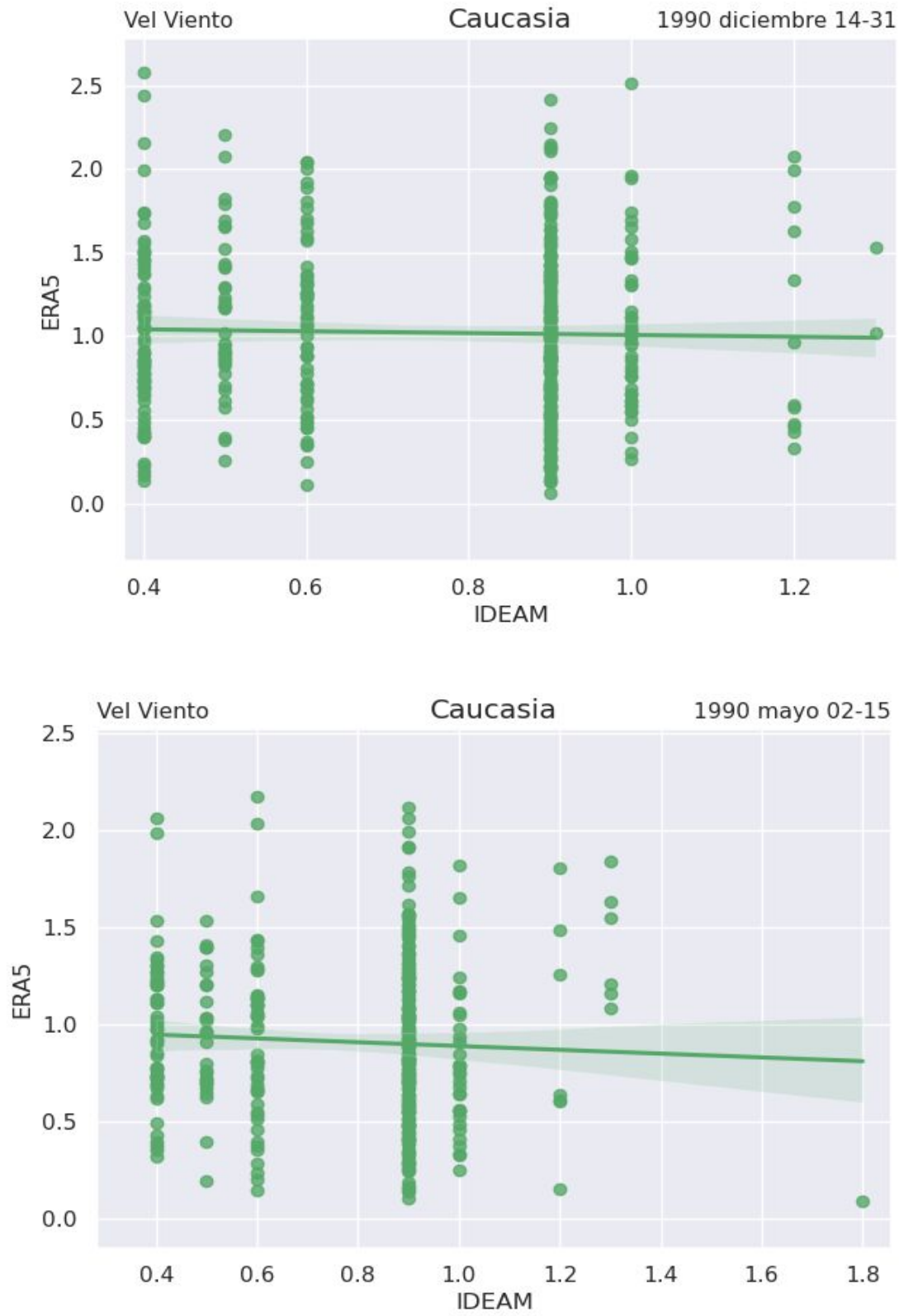


Figura A4. Diagrama de dispersión de la magnitud del viento para la serie de datos originales de la estación de Caucasia en los periodos de diciembre 14-31 de 1990 (arriba) y mayo 02-15 de 1990(abajo).

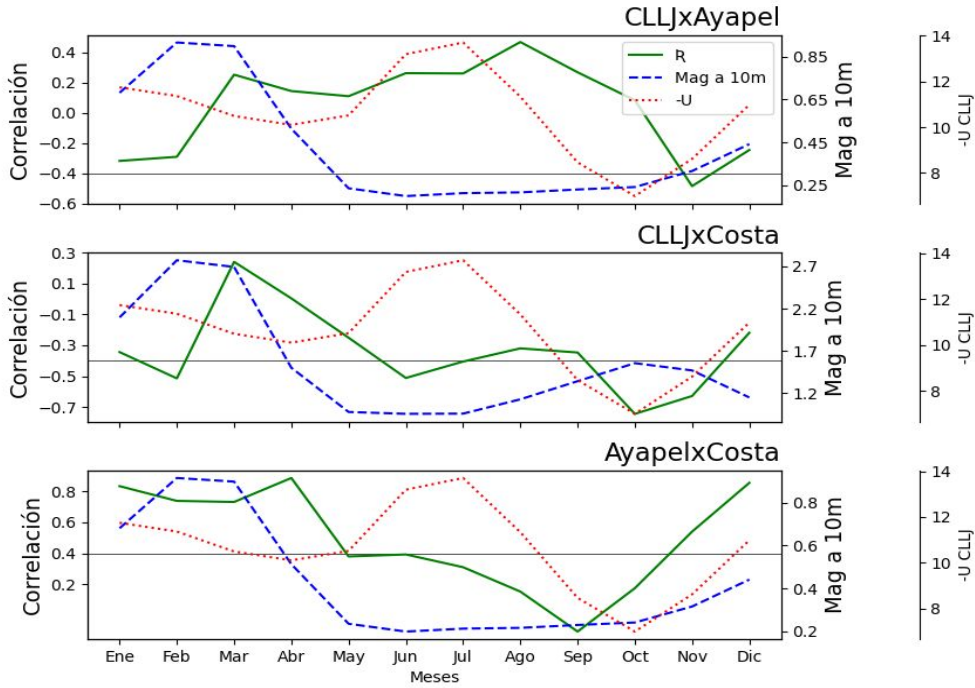


Figura A5. Ciclo anual de correlaciones entre la magnitud del viento a 10 metros y el Chorro de bajo nivel del Caribe. CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

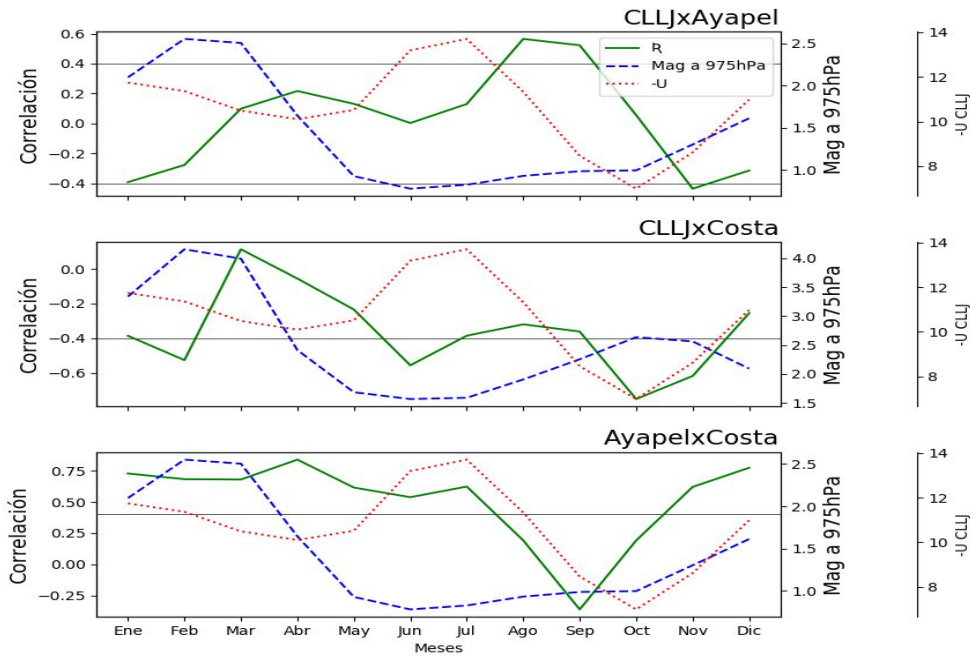


Figura A6. Ciclo anual de correlaciones entre la magnitud del viento a 975 hPa y el Chorro de bajo nivel del Caribe. CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.

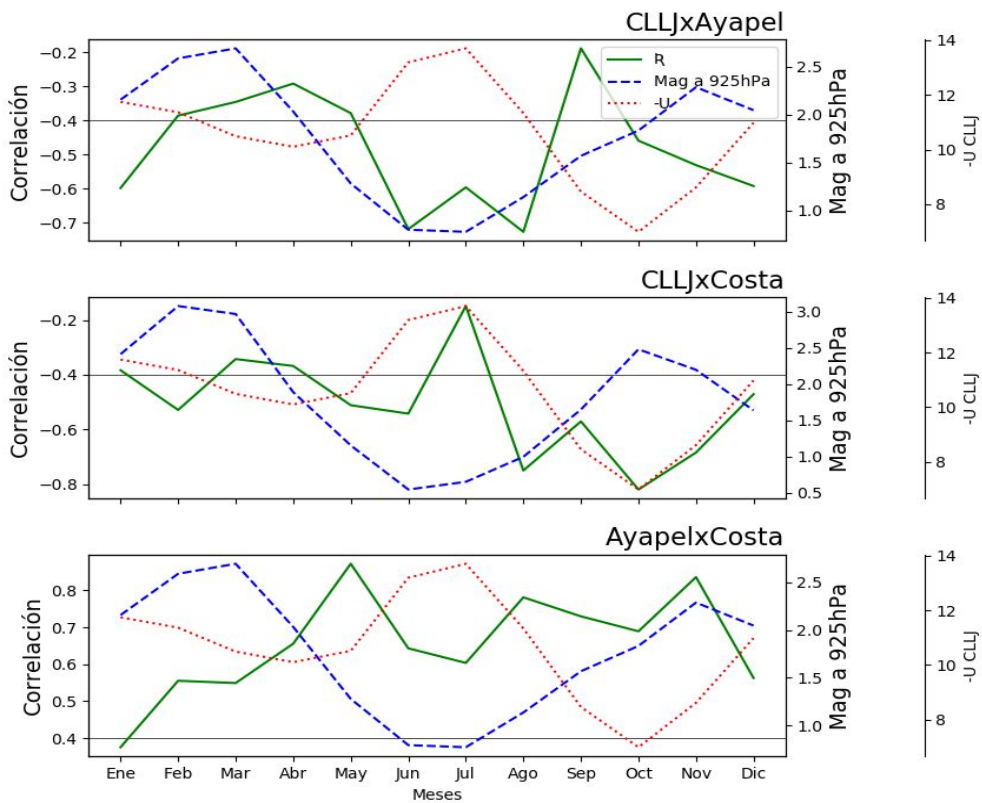


Figura A7. Ciclo anual de correlaciones entre la magnitud del viento a 925 hPa y el Chorro de bajo nivel del Caribe. CLLJ x Ayapel (arriba), CLLJ x Costa (medio) y las correlaciones entre ambas regiones Ayapel x Costa (abajo). El eje de la izquierda corresponde a los valores del coeficiente de correlación, el eje derecho las magnitudes del rango del viento y el eje fuera del recuadro corresponde a lo magnitud del CLLJ.