



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**CARACTERIZACIÓN DEL CICLO DE BRISAS DIURNAS EN
EL GOLFO DE URABÁ A PARTIR DE RESULTADOS DEL
MODELO ATMOSFÉRICO WRF**

Autor:

Leidys Milena Arroyo Quinto

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



Caracterización del ciclo de brisas diurnas en el golfo de urabá a partir de resultados del modelo atmosférico WRF

Leidys Milena Arroyo Quinto

Trabajo de grado
como requisito para optar al título de:
Ingeniera Ambiental

Asesor:

Eisinhower Rincón Vargas, Magister en Ingeniería Ambiental

Co- Asesor:

Vladimir Toro Valencia, Doctor en Oceanografía Física

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental.
Medellín, Colombia
2019.

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo a mi madre Yulis Quinto y al resto mi familia, por su apoyo y comprensión, además a quienes con sus palabras de ánimo y afecto me impulsaron a seguir adelante en el alcance de este logro tan importante para mi desarrollo académico y profesional...

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por permitirme tener salud y fortaleza a lo largo de esta etapa tan importante de mi vida y ayudarme a mantener fuerza interior para no desfallecer.

Al profesor Einsinhower Rincón por sus asesorías, aportes y recomendaciones durante el trabajo y a mi coasesor Vladimir Toro por su acompañamiento constante, sus palabras de ánimo y por darme la oportunidad de vincularme a esta tarea de investigación tan significativa para mi desarrollo personal y profesional.

Al profesor José Posada por suministrarme la información requerida para el desarrollo de la investigación.

A mis compañeros de trabajo y de estudio por su tolerancia, apoyo y consejos en el transcurso del trabajo.

RESUMEN

El entendimiento de las brisas marinas es indispensable para la comprensión de otros fenómenos oceánicos-atmosféricos que ocurren en las zonas costeras. Uno de los más relevantes son la dispersión de contaminantes, el oleaje y las corrientes marinas que, a su vez, afectan la morfología de la línea de costa. Dada la ausencia de investigaciones sobre este tema en la región de Urabá, en el presente trabajo se realizó una caracterización del ciclo de las brisas diurnas sobre el golfo a través de la interpretación de simulaciones con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Para esto, se analizaron los resultados de las modelaciones correspondientes a los meses de enero y febrero de 2008 a 2017 en 37 niveles sigma en la vertical, con resolución espacial y temporal de 3,3 km y 3 horas respectivamente. Para identificar el ciclo de la brisa marina y su duración, se empleó el método de Gustavsson (Pérez et al., 2018) y se realizaron hodógrafas del viento en tres puntos cercanos a la línea de costa ubicados al sur, centro y norte del golfo de Urabá usando las climatologías a escala horaria. Además, se hicieron perfiles verticales de la temperatura y de las componentes zonal y meridional del viento, se construyeron campos de viento para analizar la variabilidad espacial en el nivel más cercano a la superficie y se realizaron comparaciones con datos medidos a 5 m de la costa y otros obtenidos de ERA 5. Se encontró que las señales de brisa marina en el golfo de Urabá se evidencian alrededor de las 13:00LT con desplazamiento en sentido Este y velocidades cercanas a los 3 m/s y finalizan a las 19:00 LT alcanzando alturas de 730 m, las hodógrafas mejor definidas se observan en las temporadas NIÑO y en el punto localizado en la parte intermedia del golfo donde las diferencias de temperatura son mayores, y en general las velocidades y temperaturas más altas se observan en el mes de febrero. Los datos de velocidad del WRF muestran valores más cercanos a los medidos; sin embargo, en cuanto a la simulación de las direcciones del viento el resultado fue contrario, pero logra representar las brisas mejor que ERA 5. Este estudio es uno de los primeros esfuerzos académicos con el fin de entender procesos atmosféricos como las brisas marinas y su posible relación con procesos como la erosión costera y la dispersión de contaminantes en las costas urabaenses.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Definición de brisa marina.....	15
3.2. Componentes de la brisa.....	16
3.3. Algunos factores que afectan las brisas.....	17
3.4. Parámetros característicos de las brisas marinas.....	18
3.5. Estudio de la brisa.....	19
3.6. Weather Research and Forcasting (WRF).....	19
3.7. Validación del WRF.....	21
4. METODOLOGÍA	22
4.1. Área de estudio.....	22
4.2. Datos.....	23
4.3. Métodos.....	24
4.3.1. Caracterización de la brisa con promedios horarios mensuales.....	25
4.3.2. Perfil vertical del viento y la temperatura.....	25
4.3.3. Comparación de WRF vs ERA 5 y datos <i>in situ</i>	26
5. ANÁLISIS Y RESULTADOS	28
5.1. Cambios en la dirección y la velocidad del viento.....	28
5.1.1. Representación hodográfica.....	28
5.1.2. Representación hodográfica ENSO.....	29
5.1.3. Cambios de dirección del viento Enero.....	30
5.1.4. Cambios de dirección del viento febrero.....	31
5.1.5. Cambios de velocidad y temperatura Enero.....	32
5.1.6. Cambios de velocidad y temperatura Febrero.....	34
5.2. Análisis vertical del viento.....	36
5.2.1. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 1.....	36
5.2.2. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 2.....	38

5.2.3. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 3	40
5.3. Análisis vertical de la temperatura	42
5.4. Diferencias de temperatura.....	44
5.5. Campos de viento.....	45
5.6. Validación de datos del WRF	47
5.6.1. Validación cualitativa con datos in situ.....	47
5.6.2. Comparación cualitativa de hodógrafas.....	49
5.6.3. Validación con Diagrama de Taylor.....	51
6. CONCLUSIONES.....	52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes de la brisa marina	17
Figura 2. Area de Estudio	23
Figura 3. Dominios usados con el WRF	24
Figura 4. Hodógrafas de los meses de enero y febrero del periodo 2008 -2017 en tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de Urabá a una altura promedio de 69.5 m Aprox.....	28
Figura 5. Hodógrafas de los años NIÑO Y NIÑA del periodo 2008 -2017 en Figura 5. tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de Urabá a una altura promedio de 69.5 m (sigma 0)...	29
Ilustración 6. A) Rosas de viento y dirección del viento a una altura de 30.7 m cada 3 horas en el mes de febrero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea del costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur) , (B) punto 2 (centro) , (C)	31
Figura 7. A) Rosas de viento y dirección del viento a una altura aproximada de 69,5 m 3 horas en el mes de febrero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2 (centro), (C) punto	32
Ilustración 8. Temperatura y Magnitud del viento cada 3 horas en el mes de enero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea del costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur) , (B) punto 2 (centro) , (C) punto 3 (norte).....	33
Figura 9. Temperatura y Magnitud del viento cada 3 horas en el mes de febrero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2(centro), (C) punto 3 (norte).	36
Figura 10. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 1. (lat. 7.90° N) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B) Febrero.	38
Figura 11. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 2 (long. -76.73° W) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B) Febrero.....	40
Figura 12. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 3 (Long. -76.74°W) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B) Febrero.	42
Figura 13. Perfiles verticales de la temperatura en un ciclo diurno para 4 alturas en 3 secciones transversales en la línea de costa del golfo de Urabá durante el periodo de 2008-2017.....	43
Figura 14. Diferencias de temperatura a lo largo del día para las 3 secciones transversales en el sur, centro y norte del golfo de Urabá en los meses de enero y febrero de 2008 a 2017	44

Figura 15. Campos de viento de las 6:00 a las 21:00 horas del mes de enero a una altura promedio de 69,5 m aprox. durante el periodo de 2008 -2017.....46

Figura 16 . Campos de viento de las 6:00 a las 21:00 horas del mes de febrero a una altura promedio de 69,5 m aprox. durante el periodo de 2008 -201747

Figura 17. (A) Histograma de frecuencias de la dirección del viento (B) Histograma de frecuencias de la velocidad del viento: para el periodo de febrero 20 a febrero 27 de 2019 en la estación meteorológica de la Martina.48

Figura 18. (A) Velocidad promedio mediciones (horaria): para el periodo de febrero 20 a febrero 27 de 2019 en la estación meteorológica de la Martina (B) Velocidad generada con WRF49

Figura 19. Hodógrafas para el mes enero del periodo de 2008 -2017 en tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de.....50

Figura 20. Diagrama de Taylor de la capacidad de ERA y WRF para presentar la velocidad y la dirección del viento en un punto cercano a la línea de costa en el golfo de Urabá en la latitud 8.2° N, para un ciclo diurno durante del periodo del 20 al 27 de febrero51

INTRODUCCIÓN

La relación océano-continente-atmósfera, facilita la ocurrencia de procesos naturales que afectan las zonas costeras. Un fenómeno representativo en estos lugares son las brisas marinas, cuyo origen se debe a la generación de un gradiente de presión entre tierra y mar durante el día, causado por el calentamiento desigual de estos dos ambientes (Pérez et al. 2018). Dicho efecto hace que el aire frío sobre el mar se mueva hacia la tierra y produzca un flujo de aire en la costa. Este comportamiento ocurre en la noche de forma invertida generando las llamadas brisas terrestres (Papanastasiou, Melas, & Lissaridis, 2010). Los regímenes circulatorios de brisas costeras influyen de forma significativa en los procesos atmosféricos que gobiernan la dispersión de contaminantes, pues estos últimos están sometidos a transporte, fumigación y recirculación (Salvador & Millán, 2003). Además, las brisas son relevantes en el entendimiento de los cambios morfológicos de la costa y se ha encontrado que su acción es consistente con el campo de las olas y por ende con la modificación de la morfología de las playas (Masselink & Pattiaratchi, 1998)

El tema de las brisas tanto marinas como terrestres ha sido ampliamente estudiado en diferentes lugares alrededor del mundo, y en la mayoría de los casos usando información modelada e *in situ*. En la india, Rani et al. (2010) realizaron una caracterización de la circulación de brisa de tierra y mar durante la temporada de pre-monzón empleando datos de modelación regional (Global Model Extended). Por su parte, Comin et al. (2015) analizaron la convergencia de las brisas marinas en la península mediterránea de Salomoto al norte de Italia, usando información satelital y salidas de los modelos MOLOCH y Weather Research and Forecasting (WRF), con lo cual pudieron determinar la precipitación asociada a las brisas. Otro trabajo en el que se empleó modelación numérica para estudiar las brisas marinas fue el realizado por Jiménez et al. (2016), donde se caracterizó la transición entre la brisa marina y brisa terrestre en la isla de Mallorca España.

Algunos estudios han utilizado análisis de datos medidos, por ejemplo, Delgado et al. (1994) en su investigación sobre las brisas durante algunos meses de primavera y verano en el noreste del golfo de California, analizaron información de una estación meteorológica a 500 m de la costa. De igual forma Huamantínco y Pícolo (2011) realizaron la caracterización de la brisa marina en el balneario de Monte Hermoso Argentina, con datos de una estación meteorológica a 200 m de la costa. En el caso de Colombia el tema no ha sido ampliamente abordado, pero se tiene reporte del trabajo de Pérez et al. (2018) donde se hizo la caracterización de la brisa marina en la costa caribe colombiana, para ello se usaron datos de tres estaciones meteorológicas con distancias desde la costa de 100 m, 200 m y 2 Km y se encontró que el comienzo de la brisa se da las 12:00 LT con una velocidad de 2.4 m/s y termina alrededor de las 18:00 horas.

En el Urabá antioqueño, a pesar de ser una zona costera del país y contar con un golfo, no se han realizado investigaciones de este tipo. Por tal motivo, es importante generar conocimiento sobre cómo se comportan las brisas marinas en esta región, en efecto, el presente trabajo pretende determinar algunos de los elementos que las caracterizan, específicamente con respecto al sentido del giro de dirección, sus velocidades horizontales y la detección de su inicio y finalización (Carnesoltas, 2002) (IDEAM, 2012).

Sin embargo, debido a la usencia de estaciones meteorológicas cerca de la costa del golfo de Urabá se carece de información histórica de viento y temperatura, adicionalmente las descripciones atmosféricas hasta ahora realizadas han sido hechas en escalas espaciales y temporales gruesas, lo cual sugiere la necesidad de reducirlas con el fin de avanzar en el entendimiento del comportamiento de las brisas diurnas. No obstante, la información disponible de campos de vientos proviene de bases de datos tipo Era-Interim y NCEP/NCAR. Estas fuentes de información a pesar de tener valores medios consistentes con datos medidos, no resultan ser suficientes para ciertos análisis a escala local (Bao & Zhang, 2013)

Por estas razones, en este caso se recurrió a datos generados con modelación numérica, específicamente salidas del modelo Weather Research and Forecasting (WRF), que es una herramienta de última generación con la que se obtienen campos de viento, presión, temperatura y humedad a alta resolución (Fernández et al., 2011). En Colombia el WRF se ha empleado especialmente para el estudio de la precipitación. (IDEAM ,2012) (Jiménez, 2014) (Posada et al, 2018) y se ha encontrado que sobreestima el valor de la dicha variable en regiones con topografía compleja como la cordillera oriental de Colombia (Jiménez, 2014) mientras que en los Andes centrales hace una buena representación (posada et al, 2018). Sin embargo, se debe considerar que una resolución demasiado fina con una topografía muy accidentada representa mal las lluvias. (IDEAM, 2012)

Para el caso puntual de este estudio se emplearon datos de un experimento de modelación similar al realizado por Posada et al. (2018), donde se hicieron las simulaciones en los meses de diciembre, enero y febrero de los años entre 2008 y 2017, en tres dominios anidados de 30 km, 10 km y 3,3 km respectivamente. En esta investigación se usó la resolución más fina y la información de enero y febrero. Los datos se produjeron cada 3 horas (8 datos diarios) y en 37 niveles sigma en la vertical. Todo el trabajo se realizó usando tres puntos y tres secciones transversales cerca de la línea de costa en el sur, centro y norte del golfo de Urabá; se desarrolló en 3 etapas. La primera fue el análisis de la dirección y velocidad del viento con promedios horarios mensuales, representados a través de rosas de viento y hodógrafas, en la segunda fase se representaron los perfiles verticales de la temperatura y de las componentes zonal y meridional del viento, así como campos de vientos del golfo para mirar la variabilidad espacio temporal de la brisa marina. La última etapa, fue la validación de los datos modelados con datos de ERA 5 y datos obtenidos de mediciones hechas durante 7 días en el balneario la martina de la zona rural de Turbo, para lo cual se usaron algunos estadísticos que fueron representados en un Diagrama de Taylor.

Esta investigación es un estudio novedoso en la región de Urabá, por ser el primer esfuerzo realizado para describir las brisas del golfo y emplear en su desarrollo información modelada con una resolución espacial y temporal fina, además de mostrar el comportamiento del viento en diferentes niveles en la vertical. Adicionalmente, es útil para posibles estudios sobre procesos atmosféricos como las mezclas verticales que inciden en la dispersión de contaminantes y procesos oceánicos como el oleaje. Siendo este último importante en la comprensión de problemas locales como la erosión costera, que se presenta a lo largo de toda la línea de costa en el golfo de Urabá.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento del ciclo de brisas diurnas en el golfo de Urabá, a través de la interpretación de información generada por el modelo WRF

1.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los períodos diurnos de las brisas sobre el golfo de Urabá, en época de vientos intensos.
- Describir los perfiles verticales de viento y temperatura sobre el Golfo de Urabá.
- Validar los datos generados por las simulaciones con WRF sobre el golfo de Urabá con información de bases de datos disponibles en la red y datos in situ

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Definición de brisa marina

La brisa marina es un viento local que ocurre durante el día en las zonas costeras, debido a las diferencias de temperatura del aire que está sobre el mar y el que se encuentra sobre el continente. Este gradiente térmico se produce porque el suelo en la costa alcanza mayores temperaturas que el agua, gracias a que su calor específico es menor. El resultado es un aire más caliente y menos denso sobre el suelo que se eleva y un aire fresco que sale del mar hacia la tierra (Eslava, 1993). La mayor intensidad se alcanza después del momento de máxima diferencia de temperatura, originándose por lo general entre las 10:00 y 11:00 hora local (LT) (Carnesoltas, 2002). Para el caso de la costa caribe de Colombia los gradientes de densidad son considerados los principales generadores de la brisa diurna durante las temporadas secas de Diciembre–Marzo, presentando la más alta velocidad del viento alrededor de las 12:00 (Pérez et al. 2018).

Una de las características importantes del sistema de brisas es que la circulación opera de manera autónoma dentro de una circulación general de la atmósfera a escala sinóptica. Cuando a esta escala el gradiente de presión entre los anticiclones y las borrascas es suficiente para provocar vientos generalizados, la ventilación resultante desorganiza el aire ascendente de las eventuales columnas convectivas, impidiendo o entorpeciendo la formación de una circulación local o regional de brisas (Alomar, 2013).

Las brisas al tener un origen puramente térmico, su intensidad y frecuencia dependerán del grado de calentamiento de la superficie terrestre. Se estima una diferencia de temperatura de tierra y mar entre 3°C y 6 °C (Hernández, 2011) (Alomar, 2013), aunque Azarín (2004) propuso que dicha diferencia puede ser de 2°C y en la costa caribe de Colombia se encontró una diferencia de temperatura hasta de 1°C (Pérez et al., 2018).

En el momento no existe un método de selección general reconocido por la comunidad científica para la detección de las brisas que pueda ser aplicado a cualquier espacio costero del planeta (Azarín & López, 2006) sin embargo, Azarín (2004) considera que el cambio brusco de la dirección y la velocidad del viento, así como la diferencia térmica entre tierra firme y mar pueden ser buenos filtros. Una herramienta para detectar cambios de dirección y velocidad del viento son las hodógrafas (Salvador & Millán, 2003) porque describen la formación de la brisa al tener una forma elíptica. (Carnesoltas,2002)

2.2. Componentes de la brisa

De acuerdo a Miller et al. (2003) el sistema de brisa marina está compuesta por(imagen1):

La circulación de la brisa marina (SBC, por sus siglas en inglés) es una célula de mesoescala que gira verticalmente, con flujo hacia la costa cerca de la superficie de la Tierra, corrientes de aire ascendentes hacia el interior, corrientes de hundimiento difusas varios kilómetros hacia el mar y (generalmente) flujo de retorno hacia el mar cerca de 900 hPa.

La corriente de gravedad de la brisa marina (SBG) es el flujo hacia el interior de aire marino fresco y húmedo en el brazo horizontal inferior de la CSB.

El frente de brisa marina (SBF) es el borde terrestre del SBG y el SBC, a menudo asociado con cambios bruscos de temperatura, humedad y viento. Su enfoque puede estar marcado por el desarrollo de nubes de cúmulos en condiciones climáticas moderadas (Cu).

La cabeza de la brisa marina (SBH, por sus siglas en inglés) es la cabeza elevada por encima e inmediatamente detrás de la SBF, creada por corrientes ascendentes dentro de las masas de aire tanto continentales como marinas. Es aproximadamente el doble de alto que el siguiente flujo de "alimentador" detrás del SBF.

Las ondas de Kelvin - Helmholtz (KHB) son ondas que se desarrollan a lo largo del límite superior del SBG durante períodos de baja estabilidad estática (mediodía).

La capa límite interna convectiva (CIBL) es una región inestable dentro de la masa de aire marino, que aparece en la costa y crece en profundidad con una distancia hacia el interior, en la que los contaminantes de bajo nivel pueden quedar atrapados y concentrados.

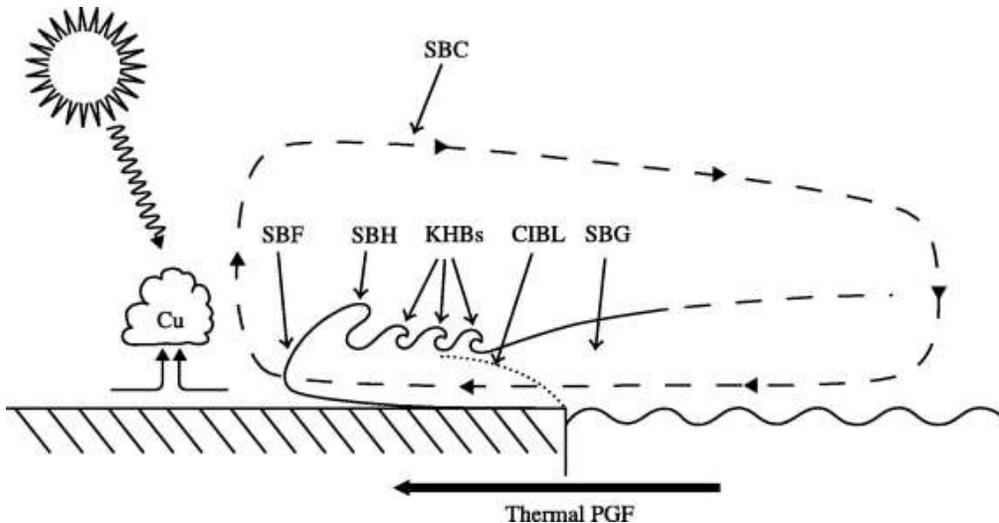


Figura 1. Componentes de la brisa marina

2.3. Algunos factores que afectan las brisas

Se han considerado algunos factores que condicionan el surgimiento y desarrollo de la circulación de las brisas (Manta, 2017). Algunos propuestos por Carnesoltas (2002) son: **la latitud**, responsable del ángulo de incidencia de los rayos solares y del valor de la fuerza de Coriolis. Esta última tiene que ver con el giro de 360° de la brisa durante las 24 horas del día por efecto de su componente horizontal, otro aspecto relevante es **la forma de la costa** porque determina la convergencia o divergencia del flujo. También es importante considerar **el tipo de relieve**, pues si este es montañoso añade la ocurrencia de circulación de brisa de valle-montaña. Además, las brisas se afectan por **la época del año**, debido a que hay temporadas más soleadas que otras y esto influye en el

calentamiento de las superficies. Otros elementos a tener en cuenta, son la **intensidad del flujo general sobre la región y la profundidad del agua**. El primero determina la advección horizontal de calor de la masa de aire sobre la zona y el otro aspecto afecta la rapidez con la que se calienta el aire sobre la superficie del mar.

2.4. Parámetros característicos de las brisas marinas

En general, uno de los parámetros que ayudan a caracterizar las brisas son su velocidad, penetración interior, así como, las direcciones desde donde soplan, el sentido del giro de la dirección y las alturas a las que comienza su corriente de retorno (Miller et al., 2003) (Carnesoltas,2002).

Direcciones desde donde sopla: Esta característica dependerá de la orientación de la costa con respecto al norte. En una costa recta orientada con el mar hacia el norte se producirá una brisa que en inicio soplará del norte (Carnesoltas,2002).

Alturas desde las que comienza la corriente de retorno: Esta varía de acuerdo a la latitud y puede ser hasta de 200-500 metros en climas moderadamente cálidos (Carnesoltas,2002). En lugares como la costa cantábrica oriental, de España se registran alturas de entre 1000-1500 m (Arrillaga et al., 2016).

Sentido del giro de la dirección: Ya que la dirección del viento tierra adentro se orienta a lo largo del gradiente de presión, la brisa de mar es, inicialmente, perpendicular a la costa, de manera que su dirección depende de la orientación de la línea litoral. No obstante, la brisa se mueve acoplada al terreno, razón por la cual puede adoptar direcciones distintas en función de la orografía y la misma morfología litoral (Alomar,2003)

Penetración en tierra: Describe las dimensiones horizontales de la brisa marina medida a partir de la costa a la que llega el efecto del segmento más cercano de tierra y varía de acuerdo a la latitud y las condiciones locales. En países tropicales puede alcanzar de 50

- 60 km, aunque también se describen distancias entre 16 y 32 km (Carnesoltas, 2012). En la costa oeste de la India se registraron distancias de 100 km (Rani et al., 2010).

Velocidades: Se estima que la intensidad de la brisa varía de 2,8 a 10,7 m/s, alcanzándose los valores máximos poco después del momento de la más alta diferencia de temperatura (Carnesoltas,2012).

2.5. Estudio de la brisa

Para determinar las principales características de una brisa se usan a menudo los estudios de campo, debido a que estos producen buenos resultados sobre el comportamiento de la misma, sin embargo, los modelos informáticos pueden diferenciar mejor muchos fenómenos físicos superpuestos en el sistema de brisa marina como la difusión de calor, la estabilidad vertical, la fuerza de Coriolis, la topografía y el viento predominante (Manta,2017).

Un ejemplo son los modelos numéricos, los cuales disponen de un conjunto de ecuaciones físico-matemáticas que representan los procesos dinámicos y las relaciones energéticas del sistema tierra-atmósfera. Estos realizan cuatro fases: (1) recopilación de datos meteorológicos, (2) asimilación y procesamiento de datos, (3) resolución de ecuaciones físico-matemáticas y procesos termodinámicos y (4) postprocesamiento, que incluye la presentación visual de los resultados (Stolz, 2008). No obstante, uno de sus limitantes es la resolución espacio-temporal, pues tienden a subestimar el gradiente térmico tierra-mar y por lo tanto la intensidad del viento. Además, la resolución horizontal puede subestimar la complejidad del relieve y la morfología, conllevando a errores en la estimación de la dirección del viento (Manta,2017).

2.6. Weather Research and Forecasting (WRF)

En la actualidad se cuenta con el modelo meteorológico de mesoescala Weather Research and Forecasting (WRF) ampliamente usado por permitir la obtención de campos

de viento, presión, temperatura y humedad a alta resolución espacio-temporal y por tener la particularidad de poder ser configurado localmente para representar dominios espaciales en diferentes escalas de acuerdo al estudio. Para ello se debe seleccionar adecuadamente las bases de datos y las condiciones iniciales y de contorno que mejor describan el fenómeno deseado (Fernández et al.,2011). Asimismo, es necesario tener en cuenta las inhomogeneidades del terreno para definir la grilla horizontal y vertical, pues esto determina su capacidad para pronosticar las estructuras meteorológicas inducidas por el relieve (IDEAM, 2012).

Entre las ventajas que posee el modelo están. (Stolz, 2008):

1. Tener varias parametrizaciones para cobertura nubosa y precipitación
2. permitir elegir varias capas límite planetarias
3. permitir anidar varias regiones con diferentes resoluciones espaciales
4. poder retroalimentarse las regiones anidadas de forma que se modulan entre ellas.

Además, el WRF contiene un ejemplo idealizado de la brisa marina. Ese esquema pre-configurado se caracteriza por ser bidimensional (x-z), con 35 niveles verticales y diversas opciones para las parametrizaciones de la capa límite, la radiación de onda corta (ROC) y onda larga (ROL), la física de la superficie terrestre (elección de uso de tipo de vegetación y suelo) y la microfísica de las nubes (Domínguez, 2017)

Tabla 1. Ejemplo de configuración del WRF para simulación de brisas

Tiempos de simulación	12 horas,24 horas,1 mes
Pasos de tiempo en segundos	15
Salidas de archivos en minutos	30
Niveles en la vertical	35, 54
Resolución	2 km
Puntos de malla horizontal	202
microfísica	Lin et al scheme
Física de onda larga	RRTM scheme
Física de onda corta	Dudhia scheme

Capa superficial	Monin-Obukhov Similarity scheme
Física del suelo	Thermal difusión scheme
Capa limite	YSU scheme
Coriolis	$0, 7.2722 \times 10^5$
Dinámica	Runge Kutta 3er orden
Difusión horizontal constante	$300 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
Difusión vertical constante	$1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Tomado de Ayala, 201 8

2.7. Validación del WRF

Debido a los errores del modelo WRF con respecto a la sobreestimación y subestimación de variables, en algunos estudios ha resultado importante realizar la respectiva validación de sus salidas (Fernández et al., 2011) (Jiménez, 2014) (IDEAM, 2012) (Posada et al, 2018). Siendo este ejercicio una verificación de variables continuas que típicamente suministra estadísticas sobre cuanto difieren los valores del pronóstico con los de las observaciones. Algunos de los parámetros que se verifican son la temperatura, la dirección y velocidad del viento, la precipitación acumulada, etc. (Jiménez,2014). Se ha generalizado el uso de estadísticos simples por mostrar resultados efectivos, y entre los más usados están:

BIAS: (el sesgo) Proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar. se calcula mediante la diferencia media entre el pronóstico y las observaciones. El rango va desde menos infinito hasta infinito, y una puntuación perfecta es 0 (IDEAM, 2012)

RMSE (muestra el error total del modelo): corresponde al cálculo de la raíz cuadrada del promedio de las diferencias cuadradas de cada una de los valores del pronóstico y la observación. Este cálculo permite ponderar los errores positivos y negativos, por lo cual en él están incluidos los errores sistemáticos y aleatorios de los modelos (IDEAM, 2012)

Desviación Estándar: corresponde a la raíz cuadrada de la diferencia media cuadrática entre el error de pronóstico y el error de pronóstico promedio. Se utiliza para medir la cantidad de variabilidad en el pronóstico de variables meteorológicas. Cuanto mayor sea el valor de la desviación estándar, mayor será la variabilidad del pronóstico. (IDEAM, 2012)

Correlación: Nos permite establecer la relación lineal entre los modelos utilizados y la observación y está acotada entre -1 y 1. (IDEAM, 2012)

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

Con el fin abarcar diferentes zonas de la costa, el estudio se centró en 3 puntos y 3 secciones transversales en la parte sur, central y norte cerca de la línea de costa del golfo de Urabá (ver Figura 2). Un estuario con aproximadamente 25 km de ancho y 80 km de largo, para un área cercana a los 1800 km². Sus profundidades medias son de 25 m y las máximas de 60 m (Bernal et al., 2005), la temperatura promedio anual es de 27.2°C, situado entre las latitudes de 7° y 8.67° Norte y las longitudes -76° y -77.38° Oeste. Este golfo tiene una forma alargada, cuyo eje pasa de una orientación norte-sur a noroeste-sureste y se caracteriza por tener dos épocas climáticas. Una seca que va de diciembre a abril con vientos promedios de 4m/s y otra húmeda que comienza en mayo y termina en noviembre, donde se presentan vientos más débiles provenientes del sur (Chevillot, Molina & Giraldo, 1993).



Figura 2. Area de Estudio

--- Sección transversal 1 Lat.7.9 °N , Long. -76.7 °W -76.9 °W	□ Punto 1 Lat.7.9 °N, Long.-76.8 °W
--- Sección transversal 2 Long. -76.7 °W , Lat. 8.0 °N - 8.2 °N	□ Punto 2 Lat. 8.17°N , Long. -76.7 °W
--- Sección transversal 3 Long. -76.7 °W, Lat. - 8.2 °N - 8.5 °N	□ Punto 3 Lat. 8.5 °N , Long. -76.8 °W

3.2. Datos

Los datos se obtuvieron del modelo WRF, una herramienta de modelación destinada a la investigación atmosférica y pronóstico operacional, que permite analizar las variables climáticas en la mesoescala (Skamarock et al., 2005). Se realizó un ejercicio de modelación en los meses de diciembre, enero y febrero de los años entre 2008 y 2017. Todas las simulaciones fueron hechas en tres dominios anidados de 30 km, 10 km y 3 km respectivamente. Para el caso de este trabajo se usó la información generada en la resolución más fija (ver Figura 3) (Posada et, al. 2018). Se produjeron datos de viento cada 3 horas (8 datos diarios), con 37 niveles sigmas en la vertical y un tope en 50 hPa. Las salidas del WRF corresponden a simulaciones realizadas por la componente de

modelación numérica de la atmósfera, enmarcadas dentro del proyecto “Investigación para estabilización del proceso de erosión en las costas del mar de Antioquia”.

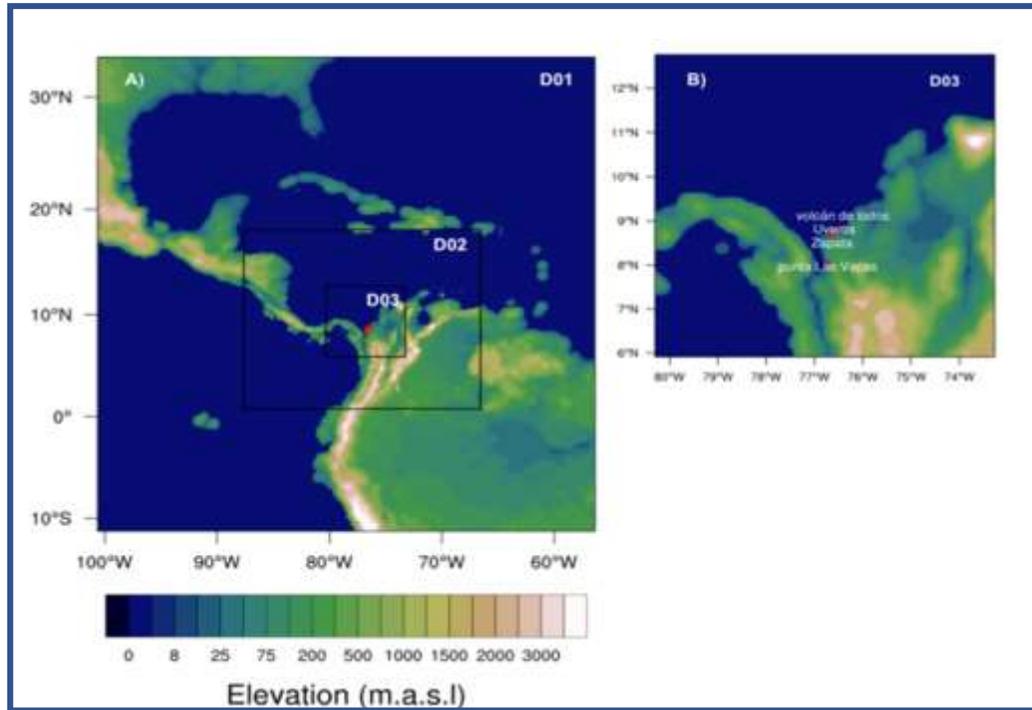


Figura 3. Dominios usados con el WRF

3.3. Métodos

Para caracterizar el ciclo de brisas diurnas en el Golfo de Urabá a partir de datos modelados con el WRF, se desarrollaron 3 pasos específicos. El primero fue la realización de gráficas con promedios horarios mensuales de los datos de velocidad y dirección del viento generados por el modelo (paso 4.3.1), el segundo constó del análisis de los perfiles verticales de las componentes del viento y de la temperatura del aire (paso 4.3.2) y finalmente se hizo la validación de la información del modelo WRF con información *in situ* e información disponible en la red (paso 4.3.3).

3.3.1. Caracterización de la brisa con promedios horarios mensuales.

Se realizó un promedio de los 8 datos horarios de viento por día, de los meses de enero y febrero del periodo entre 2008 y 2017. Estos cálculos fueron usados para representar el comportamiento de la velocidad y la dirección del viento a través de rosas de viento y de hodógrafas en los tres puntos seleccionados cerca de la línea de costa en el golfo de Urabá. Las hodógrafas se hicieron para el nivel sigma 0 de la vertical y se realizaron en el plano horizontal del viento. Estas describen su trayectoria y cambios de dirección (Salvador & Millán, 2003) (Delgado et al.,1994) además, facilitan el estudio del sistema de brisas y proporcionan información del viento a cada hora del día (Delgado et al.,1994). La presencia de brisa se identificó usando el método empleado por Pérez et al. (2018) y Gustavsson et al. (1995), en el cual se consideran los siguientes criterios:

1. El ciclo de la brisa marina comienza cuando hay un cambio brusco en la dirección del viento, $\geq 100^\circ$, con circulaciones de mar a tierra, y un aumento de velocidad del viento no superior a 10 m/s, así como una reducción de la temperatura.
2. El ciclo de la brisa marina termina cuando hay un cambio abrupto en la dirección del viento, $\geq 100^\circ$, con circulaciones de la tierra al mar, y una reducción de la velocidad y temperatura.

La magnitud y la dirección del viento se calcularon utilizando las ecuaciones 1 y 2 respectivamente (Pérez et al. 2018), (Delgado et al, 1994):

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{v}{u} \quad (2)$$

Donde V es la magnitud de la brisa y θ es la dirección del viento

3.3.2. Perfil vertical del viento y la temperatura

Los perfiles verticales de las componentes zonal (U) y meridional (V) del viento, así como de la temperatura fueron analizados a través de gráficas de contorno en las tres

secciones transversales (ver Figura 1) a lo largo de la línea de costa en el golfo de Urabá. La primera situada en el sur, entre las longitudes -76.7° Oeste y -76.9° Oeste, la segunda en la parte intermedia entre las latitudes 8.0° Norte y 8.2° Norte y la última en el norte entre las latitudes 8.2° Norte y 8.5° Norte. Los análisis se hicieron de las 07:00 hora local (LT) a las 16:00 LT, por ser las principales horas de sol, además de incluir las 22:00LT y se realizaron para los 7 primeros niveles en la vertical entre las alturas de 30m y 1.340 m. Además, se hicieron representaciones del campo de viento sobre el golfo de Urabá con los valores promedios de las componentes zonal y meridional para el nivel sigma 0, de las 7:00 LT a las 22:00 LT. Estas gráficas se elaboraron con contornos de la temperatura promedio de los años entre 2008 a 2017. Adicionalmente se calcularon las diferencias de temperatura entre el aire sobre el mar y el aire sobre tierra para puntos ubicados en las longitudes -76.86° Oeste, lat. 8.17° Norte y lat. 8.52° Norte, correspondientes a zonas específicas en el sur, centro y norte del golfo de Urabá respectivamente.

3.3.3. Comparación de WRF vs ERA 5 y datos *in situ*

3.3.3.1. Comparación datos ERA5

Las validaciones se hicieron empleando información de ERA5, correspondientes a los meses de enero y febrero del periodo de 2008 a 2017. Estos datos se descargaron de la red con 35 niveles de presión en la vertical, con valores entre 1 a 1000 hPa y una resolución temporal de 3 horas. Se usaron para realizar hodógrafas en los puntos situados en la parte sur, centro y norte del golfo de Urabá en el nivel de 1000 hPa. También se realizaron gráficas de contorno de las componentes U y V del viento para las tres secciones transversales empleadas en el análisis de los datos del WRF.

3.3.3.2. Datos *in situ*

se hicieron validaciones con información medida en campo en un intervalo de muestreo de 5 minutos. Estas mediciones fueron realizadas del 21 al 27 de febrero de 2019 en una

estación meteorológica localizada a 6 m de la línea de costa en el golfo de Urabá y a una altura sobre el suelo de 10 m en el balneario conocido como la Martina en la zona rural de Turbo-Antioquia, (en la latitud 8.2° N). De esta medición se obtuvo información de la velocidad y la dirección del viento que fue llevada a una resolución horaria a través de medias móviles y utilizada para comparar los datos de ERA 5 con los del WRF.

3.3.3.3. Diagrama de Taylor

La comparación entre los datos modelados y los de ERA 5 fue representada en un diagrama de Taylor (Taylor,2001) realizado con los siguientes estadísticos: (3) Error cuadrático medio (RMSE) (4) Coeficiente de correlación (R), y (5) Desviación estándar (SD). Como datos de referencia se empleó la información obtenida de las mediciones en la estación meteorológica de la Martina:

$$\text{RMSE} = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - O_n)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(O_n - \bar{O})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (e_n - \bar{e})^2} \quad (5)$$

Donde f_n representa los datos modelados, O_n los datos medidos, N el numero de la muestra

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Cambios en la dirección y la velocidad del viento

4.1.1. Representación hodográfica

Las hodógrafas (figura 4) muestran un giro del viento en sentido horario, evidenciando cambios de dirección a partir de las 7:00 hora local (LT) (12UTC). Entre las 10:00 LT y las 16:00 LT los valores de la componente zonal (U) para los puntos 2 (figura 4 B, E) y 3 (figura 4 B, E) se hacen positivos, ubicando dicho segmento de la representación hodográfica en tierra, aunque este resultado no coincide exactamente con el de Pérez et al. (2018) en el caribe colombiano, donde las velocidades más altas se dan alrededor de 12:00 LT, incluye a esta hora en el intervalo de 10:00 LT a 13:00 LT, donde inicia la intensificación del viento. Además, se observa en todas las hodógrafas la descripción de una forma elíptica, pero especialmente en el punto 2 (figura 4 B, E); esto según Carnesoltas (2002) está relacionado con la formación de la brisa. En este mismo punto se evidencian hodógrafas más perpendiculares a la costa y con un desarrollo más centrado en el origen en relación a las otras dos zonas (Figura 4 A, D). (Figura 4 C, F). por su parte, en el mes de enero (figura.1 A, B, C) en comparación con febrero (Figura 4 D, E, F) las hodógrafas tienen una forma elíptica más regular.

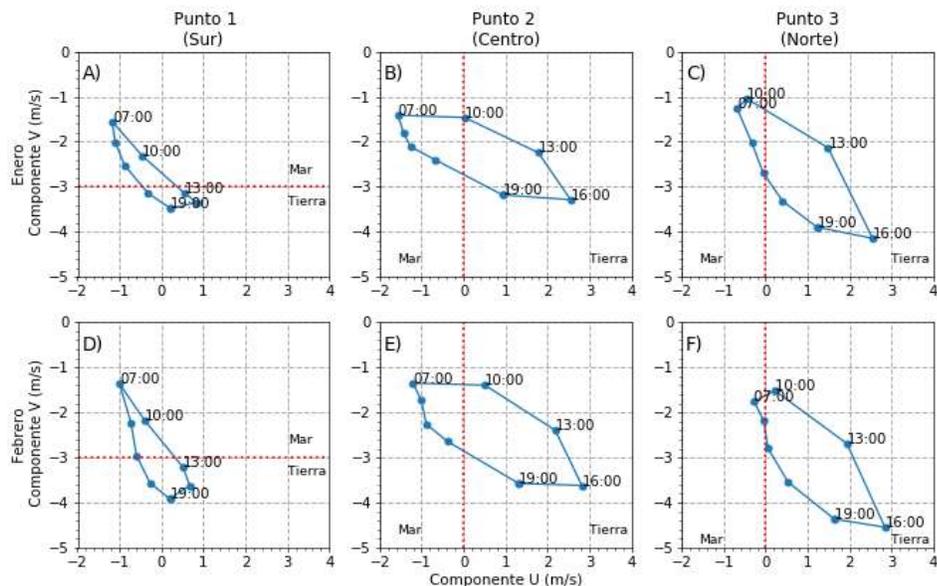


Figura 4. Hodógrafas de los meses de enero y febrero del periodo 2008 -2017 en tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de Urabá a una altura promedio de 69.5 m Aprox.

4.1.2. Representación hodográfica ENSO

La Figura 5 muestra que en los años con efecto del NIÑO (Figura 5 D, E, F) la forma de las hodógrafas para los tres puntos en la línea de costa del golfo de Urabá es elíptica, lo cual puede deberse a mayores temperaturas en el aire por la reducción de la humedad del suelo (Poveda,2004). En el caso de los años NIÑA (Figura 5 A, B, C) este comportamiento se observa en los puntos 1 (figura 5 A) y 2 (Figura 5 B), mientras en el punto 3 (Figura 5 C) se registra una forma más circular. Adicionalmente, La figura 5 A, deja ver que todos los puntos de la hodógrafas están por encima de -3, ubicándola en la zona asumida como mar, de forma contraria en la figura 5 F la mayoría de los puntos están en tierra como resultado de valores positivos para la componente zonal (U).

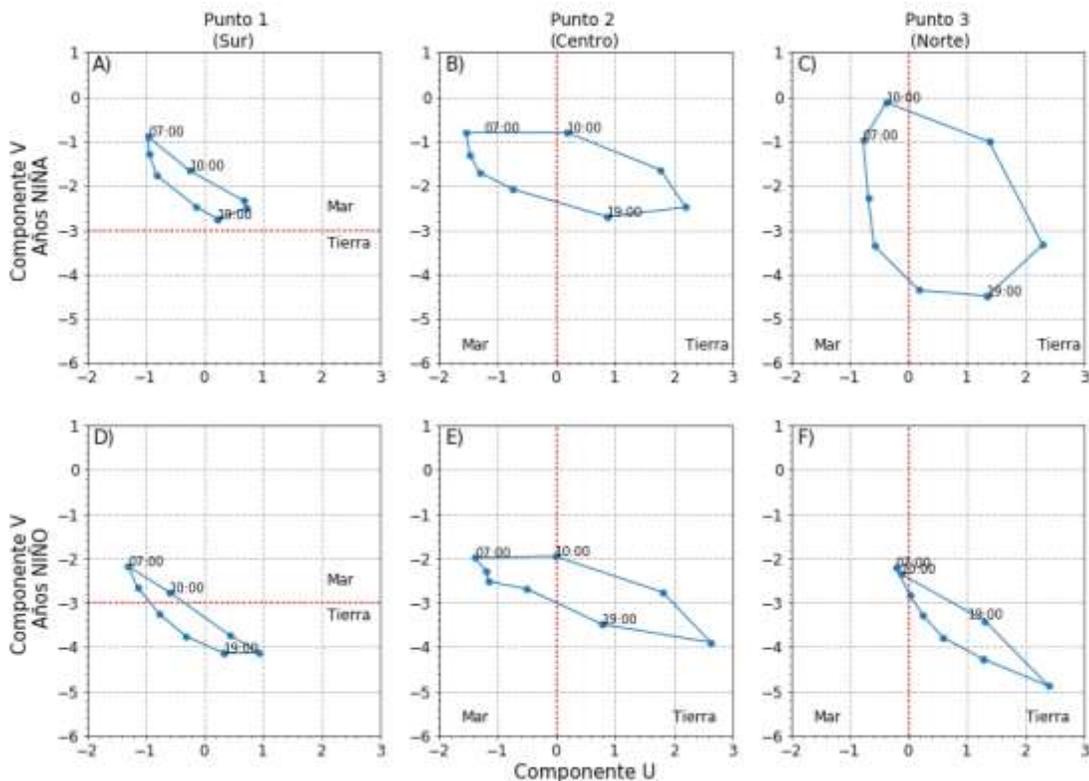
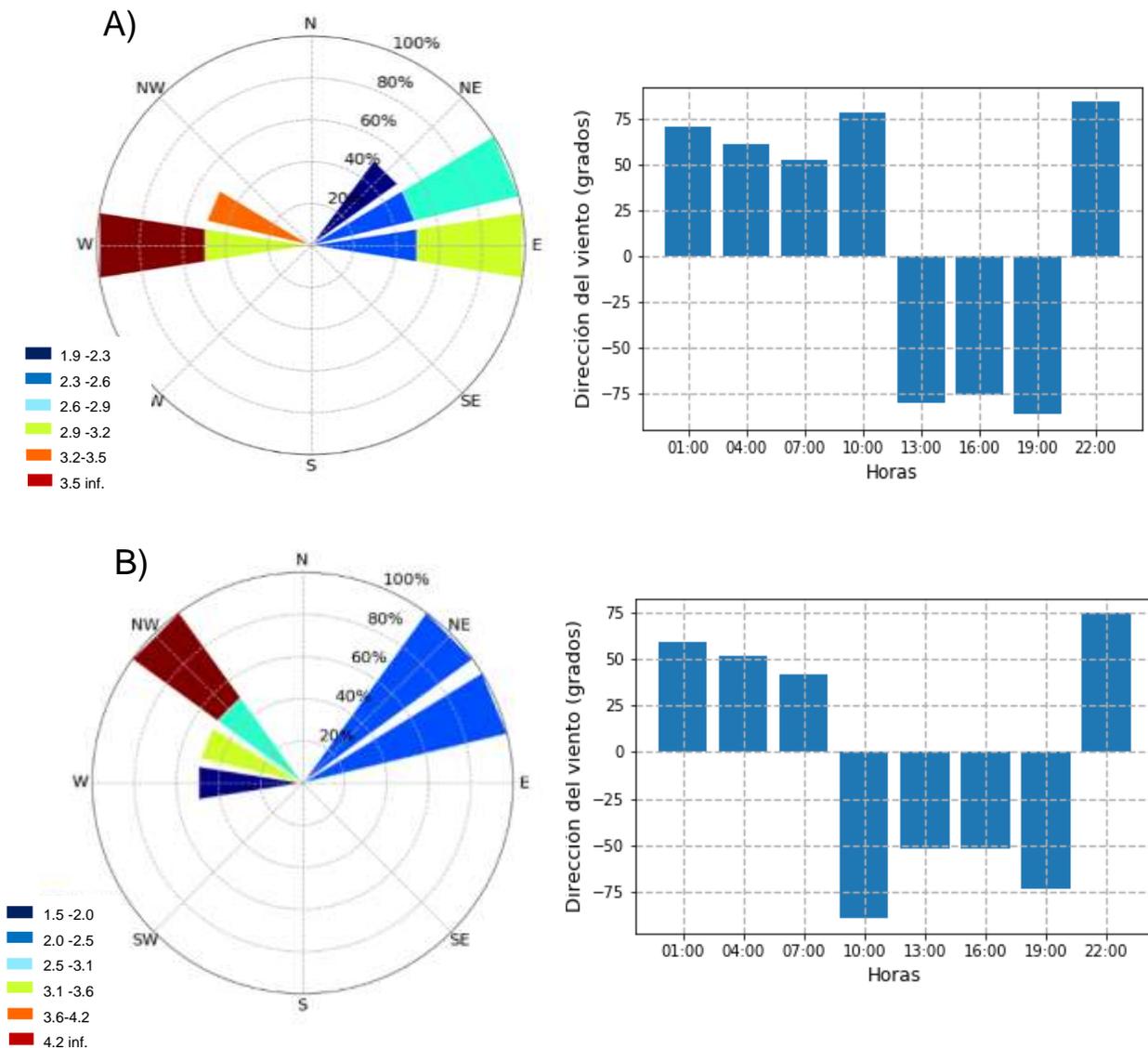


Figura 5. tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de Urabá a una altura promedio de 69.5 m (sigma 0)

4.1.3. Cambios de dirección del viento Enero

En el mes de enero las modificaciones bruscas de la dirección del viento ($>100^\circ$) (Pérez, 2018) (Figura 6) durante el día, se evidencian a las 10:00 LT para el punto ubicado en la parte central de la línea de costa del golfo de Urabá y a 13:00 LT en el punto localizado en el norte, indicando un cambio en la procedencia del viento del Noreste (NE) al Noroeste (NW). Esta dirección se mantiene hasta las 19:00 LT para los puntos del sur y el centro (Figura 6 A y B), mientras en el punto del norte (Figura 6 C), es hasta las 22:00 LT.



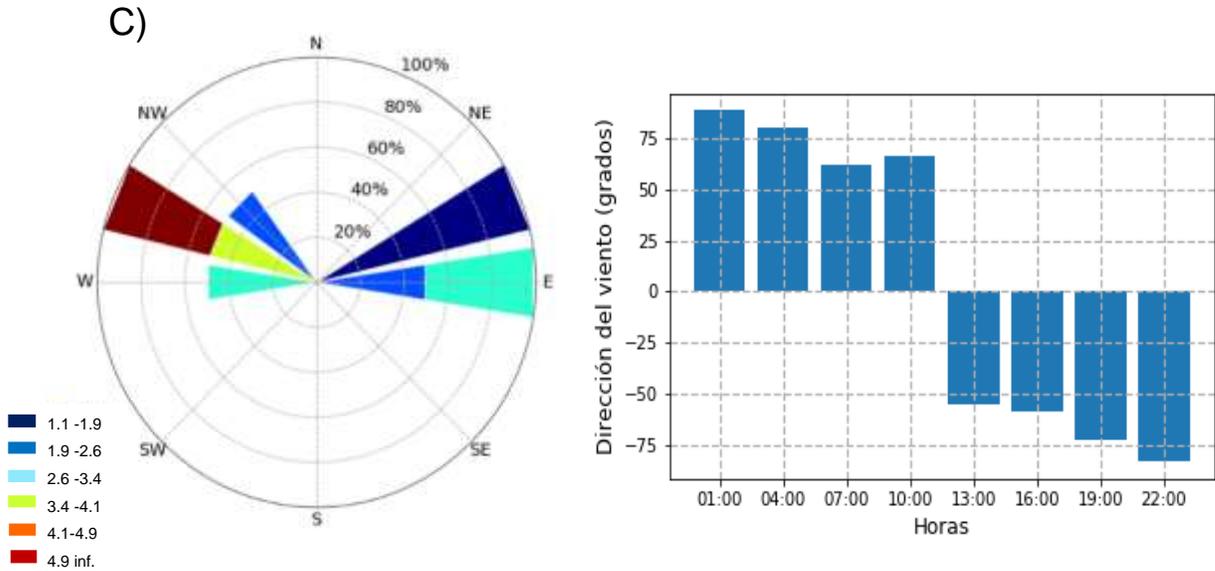
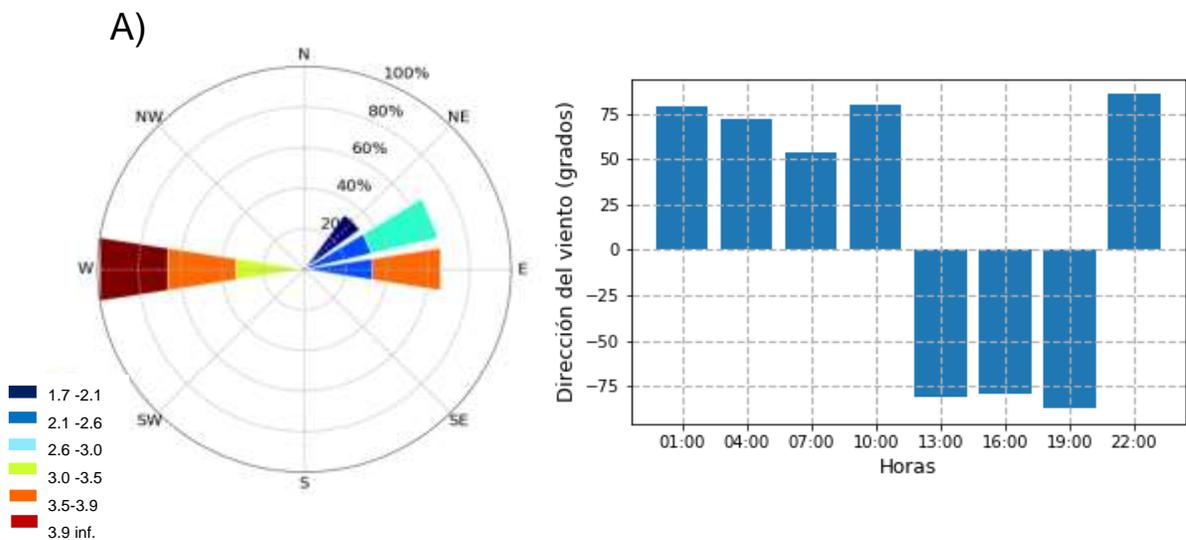


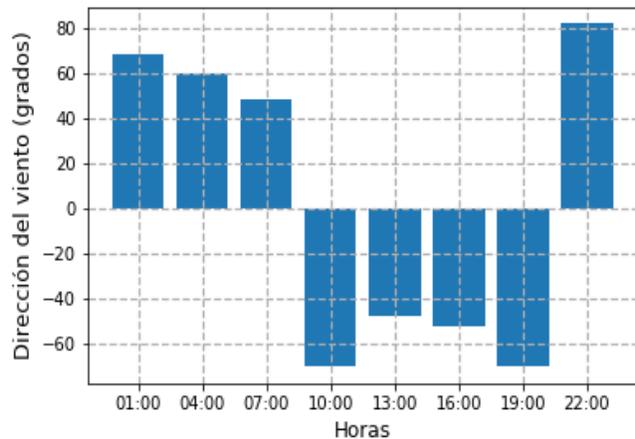
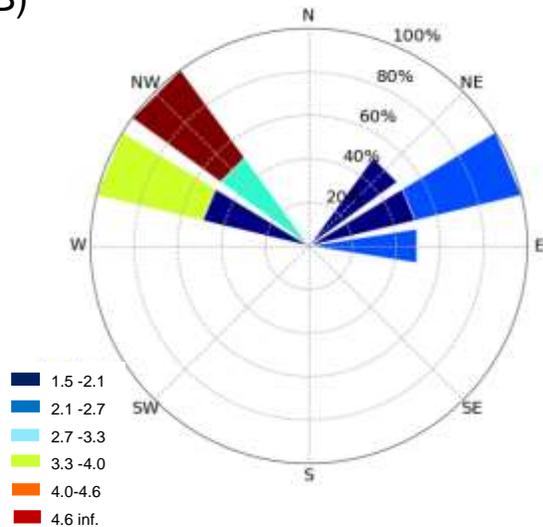
Figura 6. Rosas de viento y dirección del viento a una altura aproximada de 69,5 m cada 3 horas en el mes de enero durante el periodo de 2008-2017, en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2

4.1.4. Cambios de dirección del viento febrero

En febrero las modificaciones en la dirección del viento durante el día $>100^{\circ}\text{C}$ (Figura 7), a diferencia de enero (Figura 6), se dan a las 10:00 LT para los puntos ubicados en el centro y el norte del golfo de Urabá (Figura 7 B, C) y 13:00 LT para el sur (Figura 7 A), mostrando un giro en la procedencia del viento del NE a NW. Este cambio se mantiene hasta las 19:00 LT en los puntos al sur y centro de la línea de costa del golfo de Urabá como sucedió en enero, pero en el punto al norte permanece hasta la 01:00LT.



B)



C)

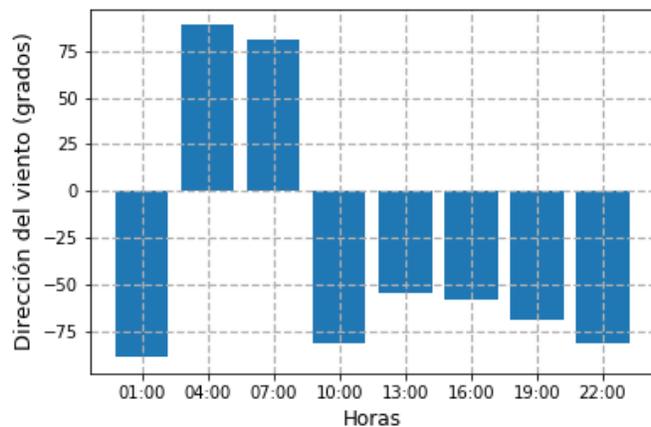
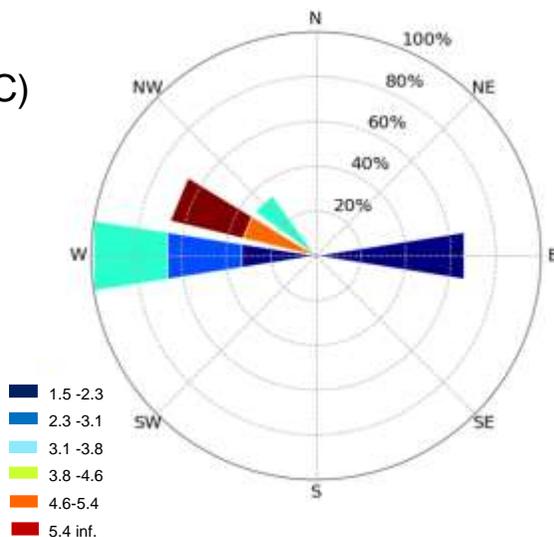
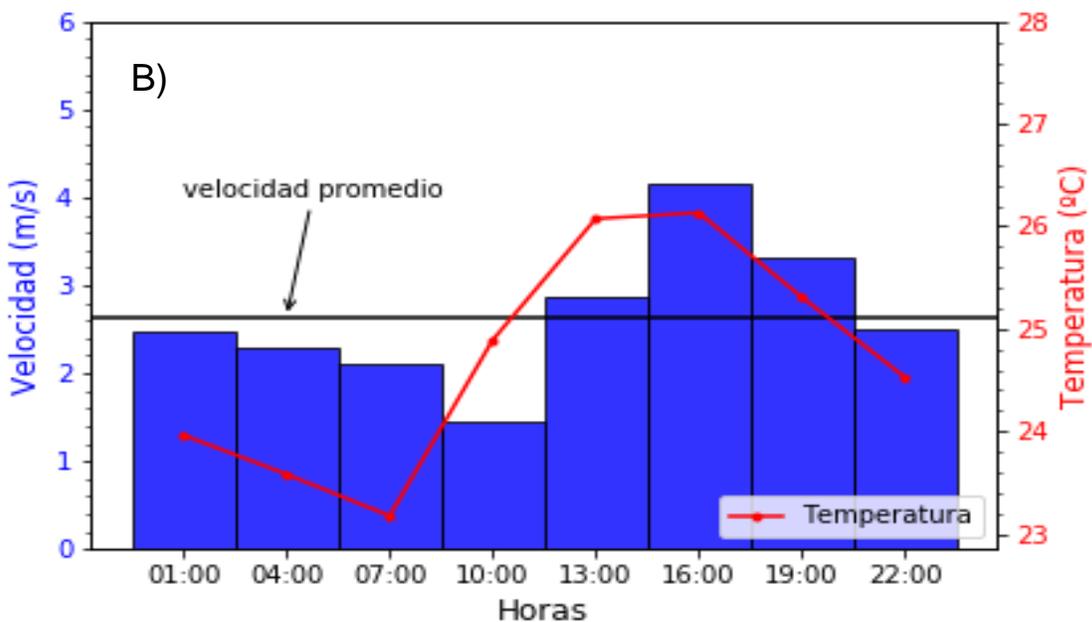
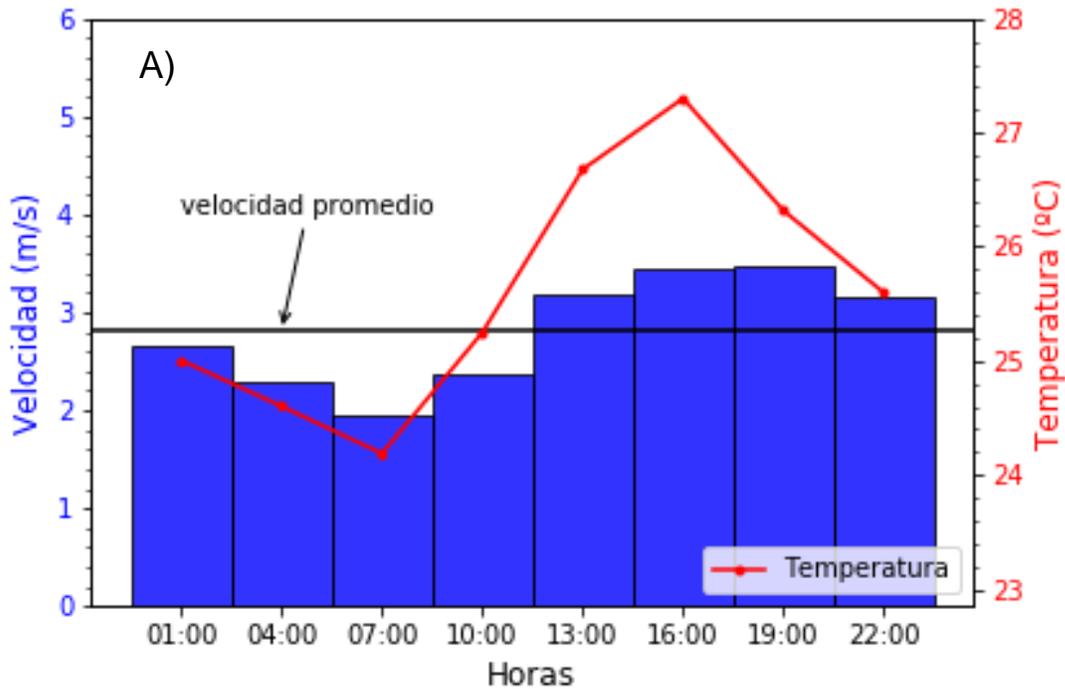


Figura 7. A) Rosas de viento y dirección del viento a una altura aproximada de 69,5 m 3 horas en el mes de febrero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2 (centro), (C) punto

4.1.5. Cambios de velocidad y temperatura Enero

La Figura 8 muestra que para el mes de enero la velocidad promedio del viento es de 2,74 m/s, además se observa que las magnitudes mínimas en el sur (Figura 8 A) centro (Figura 8 B) y norte (Figura 8 C) del golfo de Urabá son de 1.1 m/s, 1.46 m/s y 1.94 m/s respectivamente. En el caso de la primera zona se presentan a las 07:00 LT, mientras en los otros dos puntos se da a las 10:00 LT, para los 3 casos después de esta reducción

en la magnitud del viento comienza el aumento de la velocidad (menor a los 10 m/s) alcanzando su máximo valor a las 16:00 LT. En el sur de 3.4m/s, en la parte intermedia de 4.2 m/s y en el norte 4.9 m/s. La temperatura muestra su valor más pequeño a las 7:00 LT y los máximos entre las 13:00 LT y 16:00 LT, registrando 27.3°C para el sur, 26.13°C para el centro y 26.7°C para norte. Estos resultados muestran una relación directa entre el aumento de la temperatura y la velocidad del viento.



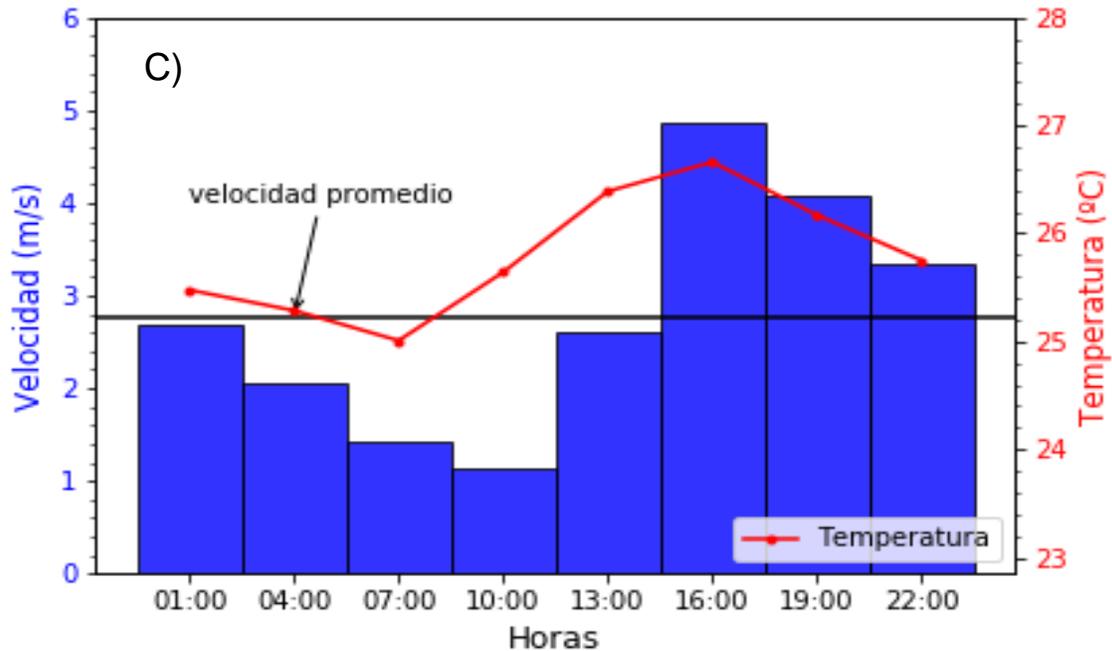
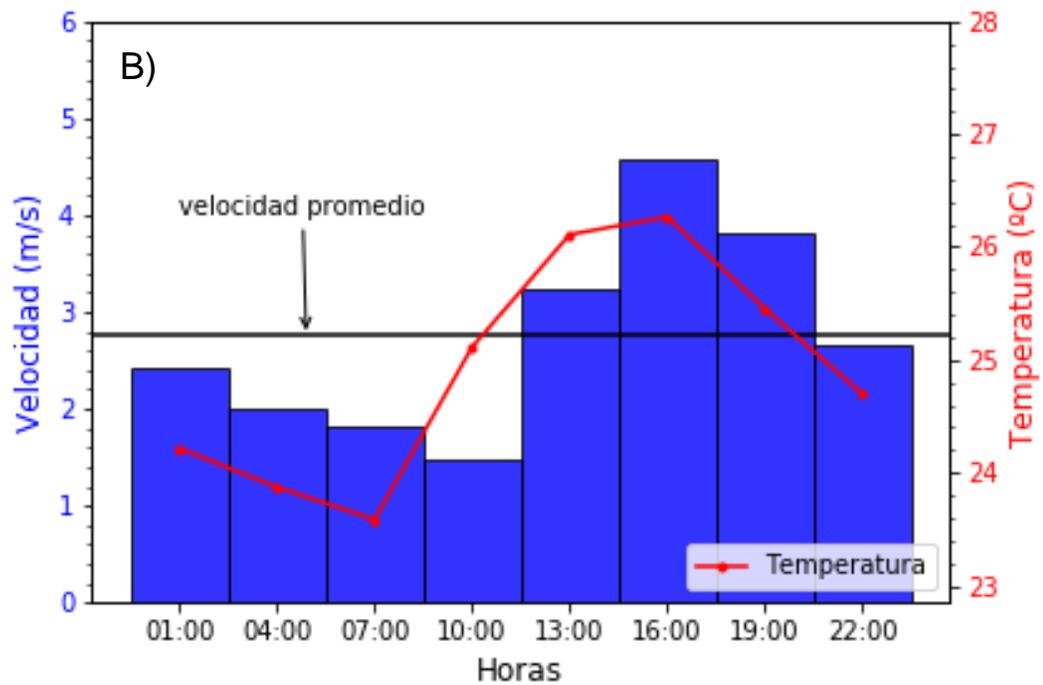
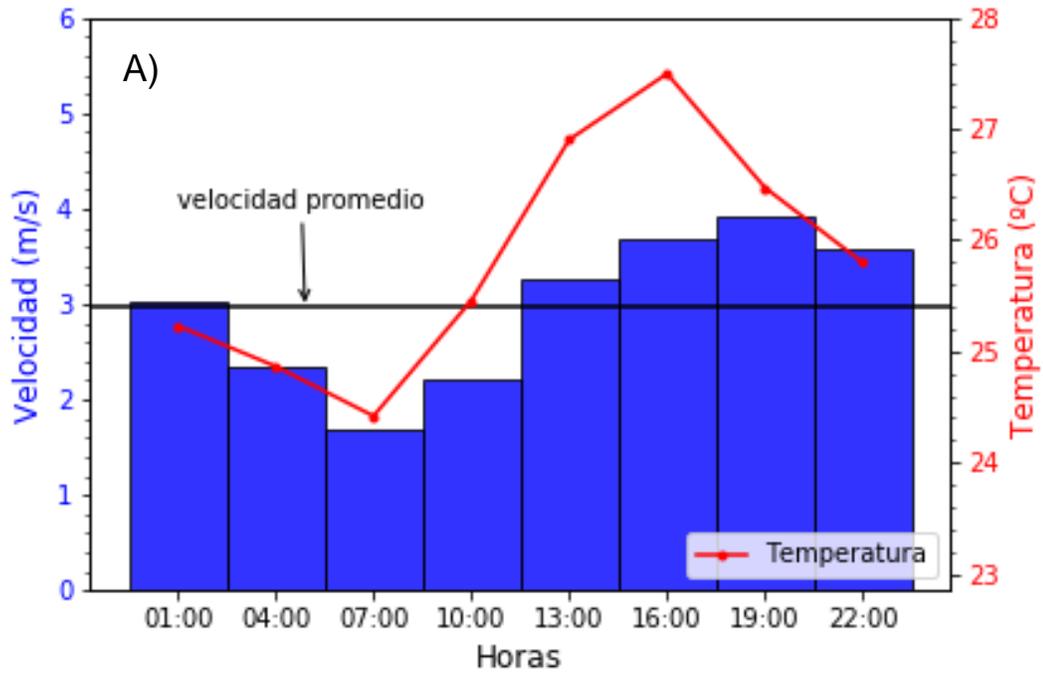


Figura 8. Temperatura y Magnitud del viento cada 3 horas en el mes de enero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2 (centro), (C) punto 3 (norte).

4.1.6. Cambios de velocidad y temperatura Febrero

Para el mes de febrero (Figura 9) la velocidad promedio del viento es de 2,96 m/s y las magnitudes mínimas en el sur (Figura 9 A), centro (Figura 9 B) y norte (Figura 9 C) del golfo de Urabá son de 1.69 m/s, 1.49 m/s y 1.54 m/s respectivamente. Al igual que en enero (Figura 8), dicho valor en el sur se presenta a las 07:00 LT, mientras en las otros dos puntos se da a las 10:00 LT, pero para los 3 casos después de esta reducción en la magnitud del viento comienza el aumento de la velocidad (menor a los 10 m/s) alcanzando su valor máximo a las 16:00 LT, en este caso de 3.9 m/s en el sur, 4.5 m/s en la parte intermedia y 5.36 m/s en el norte. La temperatura mínima se presenta también a las 7:00 LT y la máxima entre las 13:00 LT y 16:00 LT, con valores de 27.5°C para el

sur, 26.2°C para el centro y 26.8°C para norte. Nuevamente se observa una relación directa entre el aumento de la temperatura y la velocidad del viento.



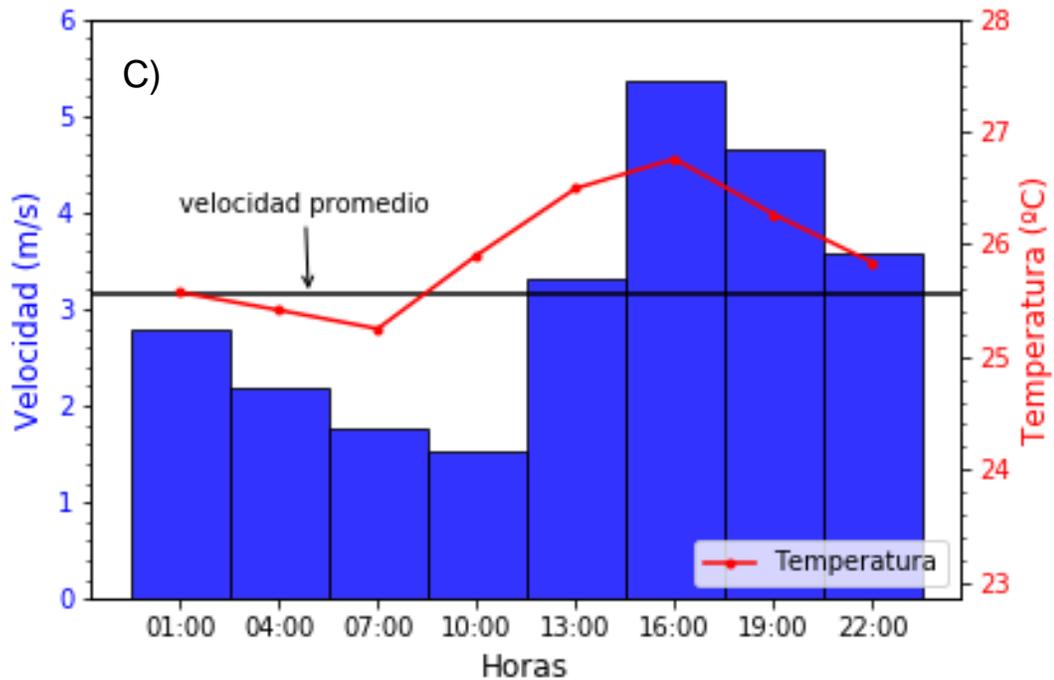
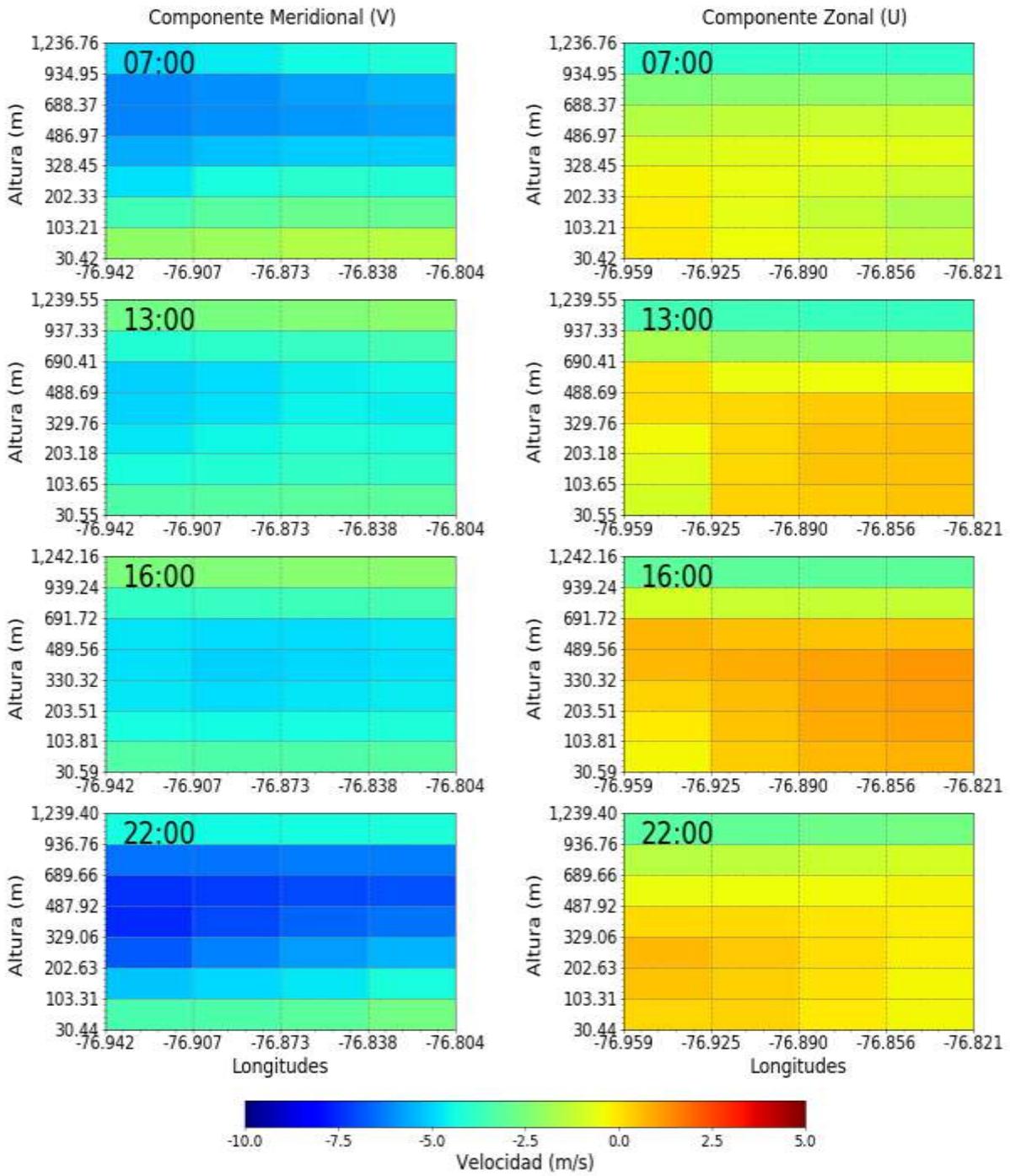


Figura 9. Temperatura y Magnitud del viento cada 3 horas en el mes de febrero durante el periodo de 2008-2017 en 3 puntos cercanos a la línea de la costa en el golfo de Urabá: (A) punto 1 (sur), (B) punto 2(centro), (C) punto 3 (norte).

4.2.1. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 1

En la sección transversal ubicada al sur los perfiles verticales de las componentes del viento (Figura 10) muestran un comportamiento similar para el mes de enero (Figura 10 A) y de febrero (Figura 10 B). Además, se observa que la componente meridional (V) toma valores negativos (desplazamiento hacia el sur) a lo largo de los 8 niveles en todas las horas estudiadas, mostrando las menores velocidades entre los 30 m y 103 m (sigma 0 y sigma 1). Para el caso de la componente zonal (U) se observan valores positivos (desplazamiento hacia el Este) a las 13:00 LT y 16:00 LT hasta aproximadamente los 730 m (en casi todas las longitudes), mientras en las alturas posteriores a estas mismas horas (940 m y 1,240 aprox.) se registran velocidades negativas (desplazamiento hacia el Oeste).

A)



B)

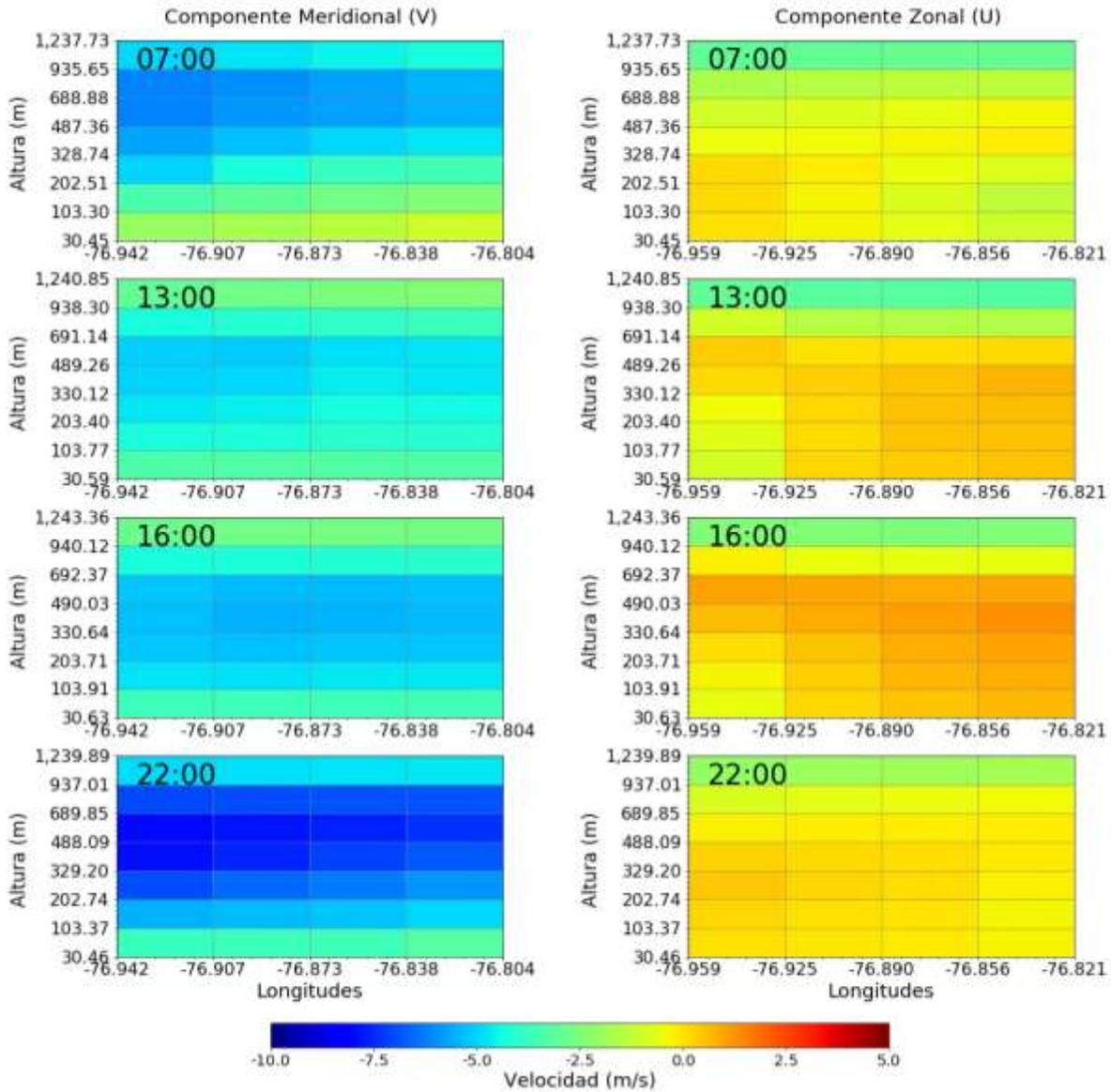


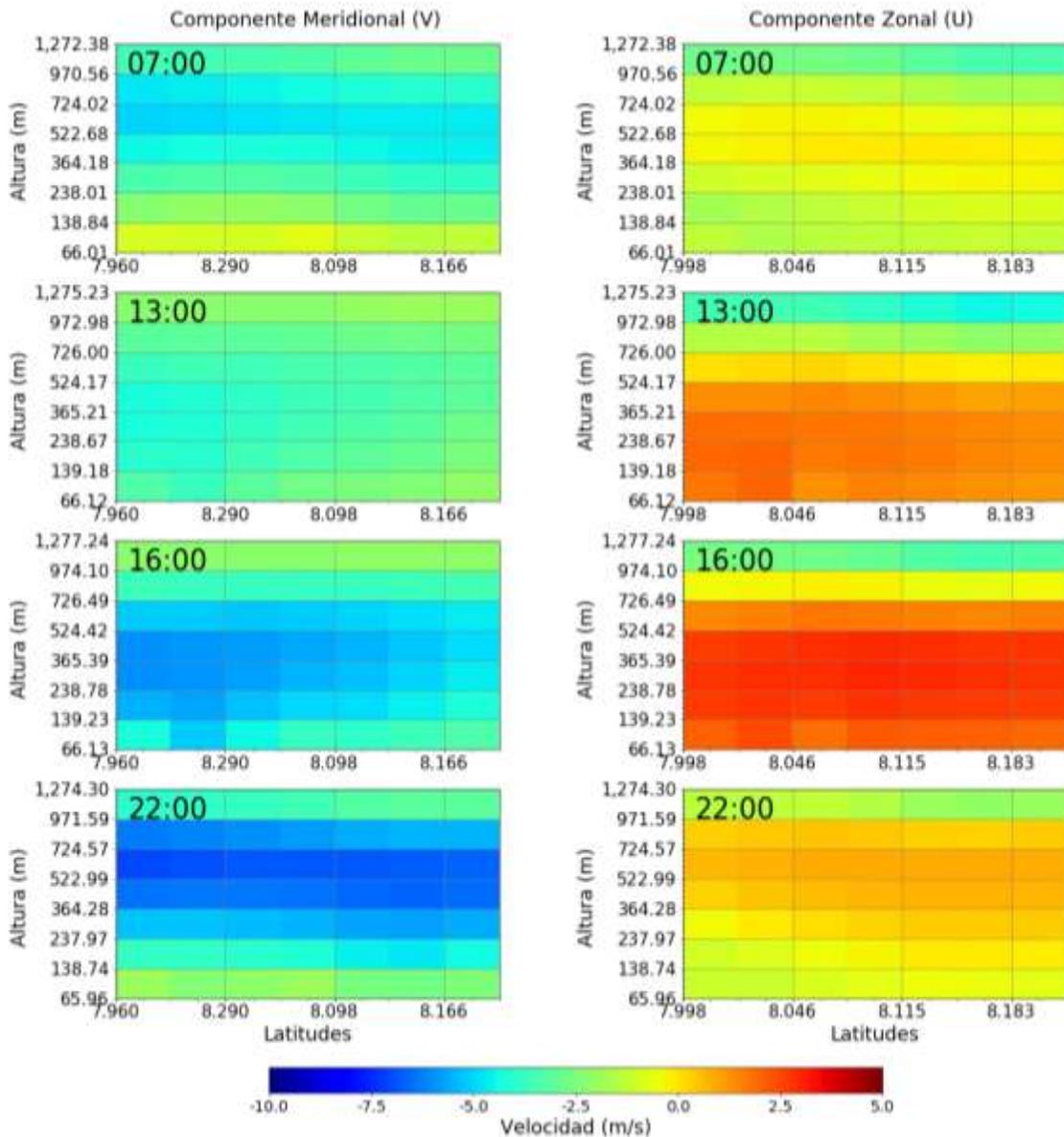
Figura 10. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 1. (lat. 7.90° N) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B) Febrero.

4.2.2. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 2

En la sección transversal localizada en la parte central del golfo de Urabá (Figura 11), se evidencia al igual que en el sur (Figura 10) valores negativos para la componente meridional (V) (desplazamiento hacia el sur) con las menores magnitudes entre las alturas de 30 m y 103 m; aunque se observa una disminución de la negatividad con

respecto a la primera sección transversal, principalmente a las 7:00 LT y las 16:00 LT. La componente zonal (U) toma valores positivos (Desplazamiento al Este) y mayores que en el sur a las 13:00 LT y 16:00 LT hasta una altura 730 m aproximadamente, siendo más altos los del mes de febrero (Figura 11 B). A las 07:00 LT y 22:00 se observan valores negativos (Desplazamiento al Oeste) hasta los 240 m aproximadamente.

A)



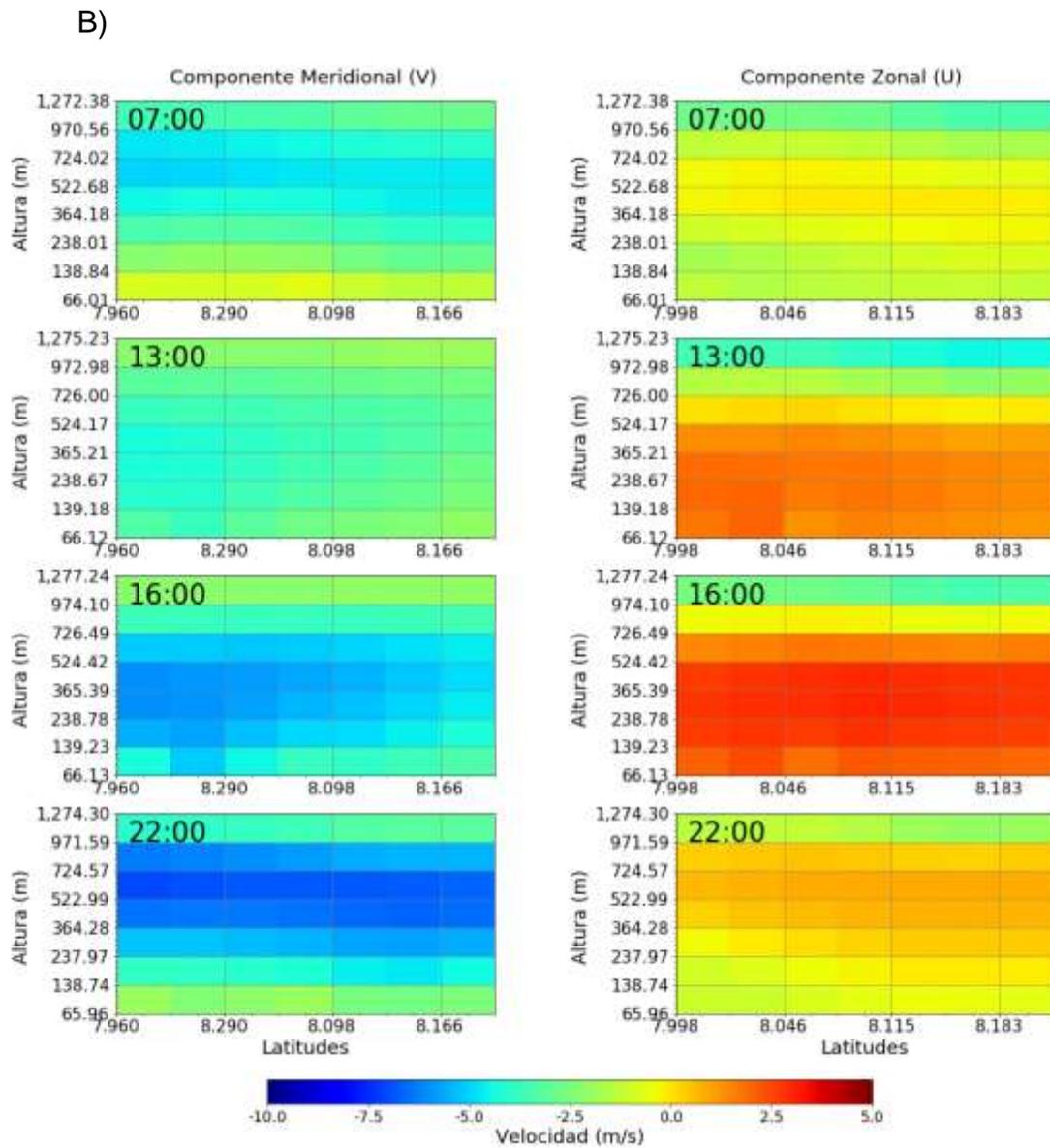
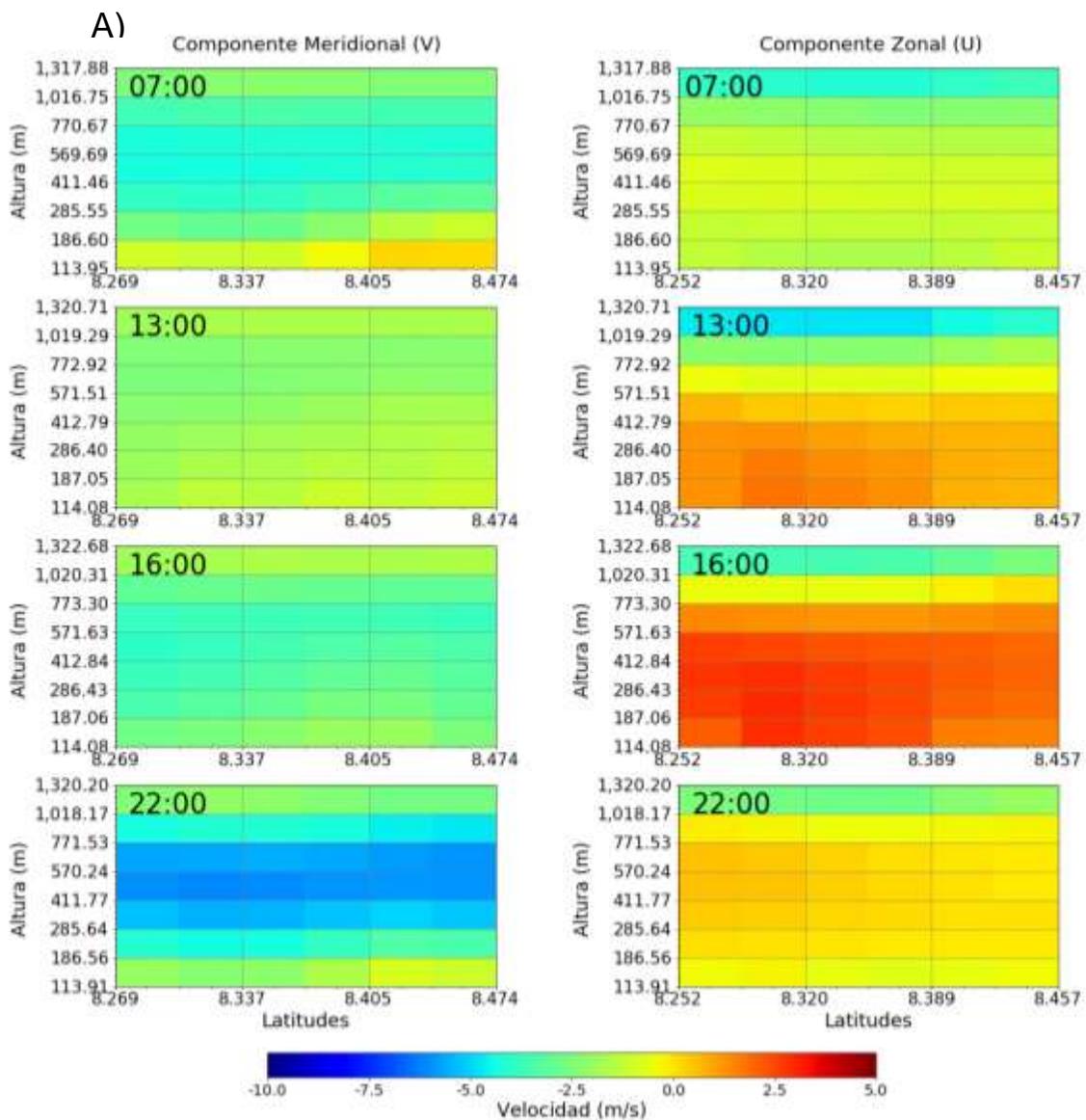


Figura 11. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 2 (long. -76.73° W) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B) Febrero

4.2.3. Perfil vertical de las componentes del viento sección transversal 3

En la sección transversal localizada en el norte del golfo de Urabá (Figura 12), se observa el mismo comportamiento que en las dos primeras zonas (Figura 10 y 11) con respecto

a la componente meridional (V) (desplazamiento hacia el sur) y al igual que en el centro del golfo se registra una disminución en la negatividad de esta componente con relación a la primera sección transversal, principalmente de las 7:00 LT a las 16:00 LT. La componente zonal (U) toma valores positivos (Desplazamiento al Este) y muy similares a los del norte a las 13:00 LT y 16:00 LT hasta una altura 730 m aproximadamente y al igual que las secciones transversales 1 y 2 en febrero los valores son mayores que en enero. A las 07:00 LT y 22:00 LT se observan valores negativos (Desplazamiento al Oeste) hasta los 187 m aproximadamente.



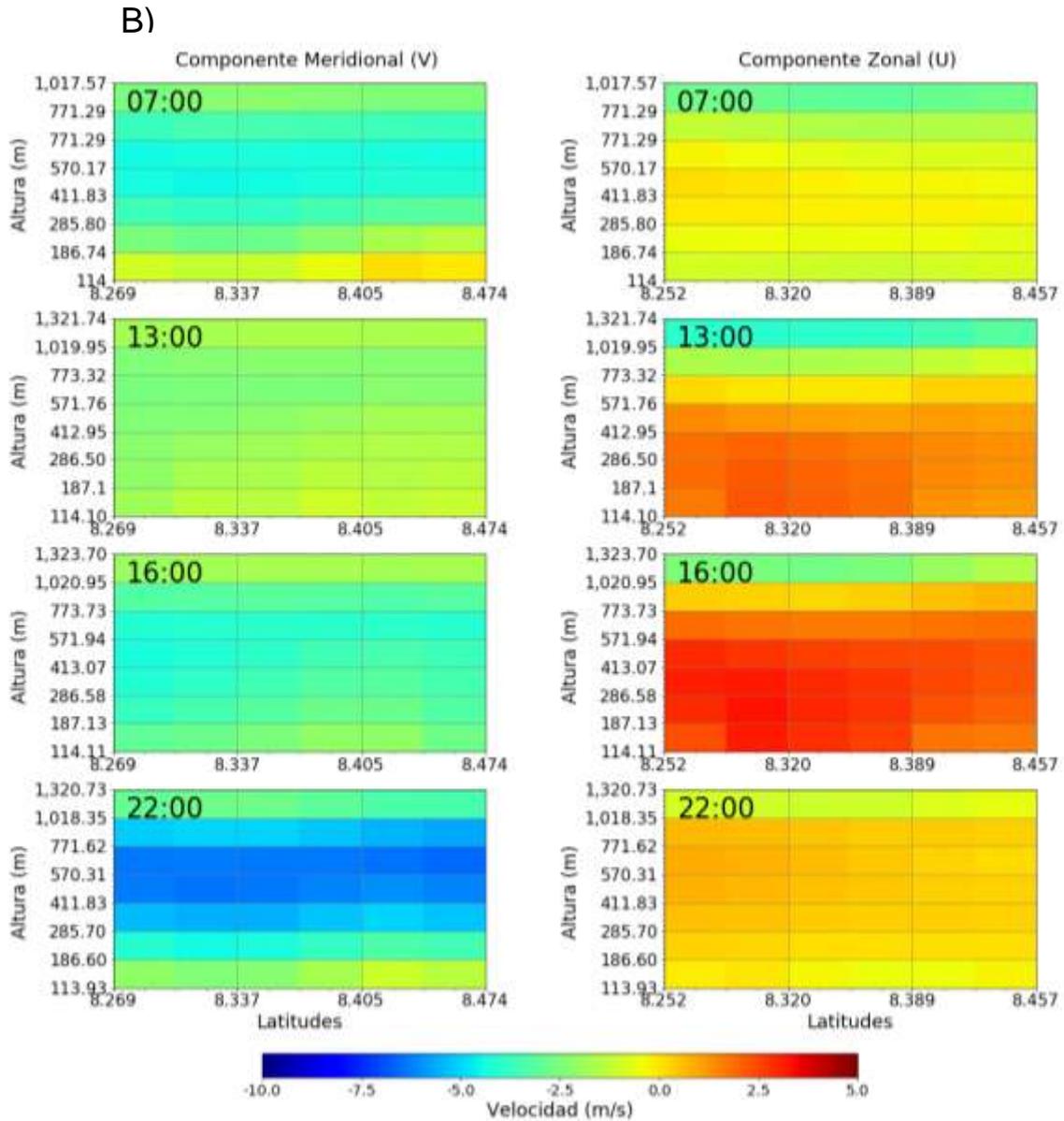


Figura 12. Perfiles verticales de las componentes del viento para un ciclo diurno en la sección transversal 3 (Long. $-76.74^{\circ}W$) durante el periodo de 2008-2017: (A) Enero, (B)

4.3. Análisis vertical de la temperatura

La Figura 13 muestra que en los tres primeros niveles (entre 30 y 287 m aprox.), en las tres zonas estudiadas, se registran las mínimas temperaturas a las 07:00 LT. Sin embargo, en el caso del sur este comportamiento se observa en todos los niveles. Por su parte, en las secciones transversales del centro y norte del golfo de Urabá se evidencia inversión térmica entre las alturas de 30 y 187 m a las 07:00 LT. Las máximas

temperaturas para el sur se registran a las 19:00 LT, mientras en el centro y el norte es a la 13:00 LT. En comparación con las otras secciones transversales, la del sur registra las mayores temperaturas, siendo de 26,7 °C en enero y 27°C en febrero. Las diferencias de temperatura de un nivel en la vertical a otro no supera un 1°C y los tres primeros niveles (Los más cercanos a la superficie) toman temperaturas que van de los 23°C a 27 °C.

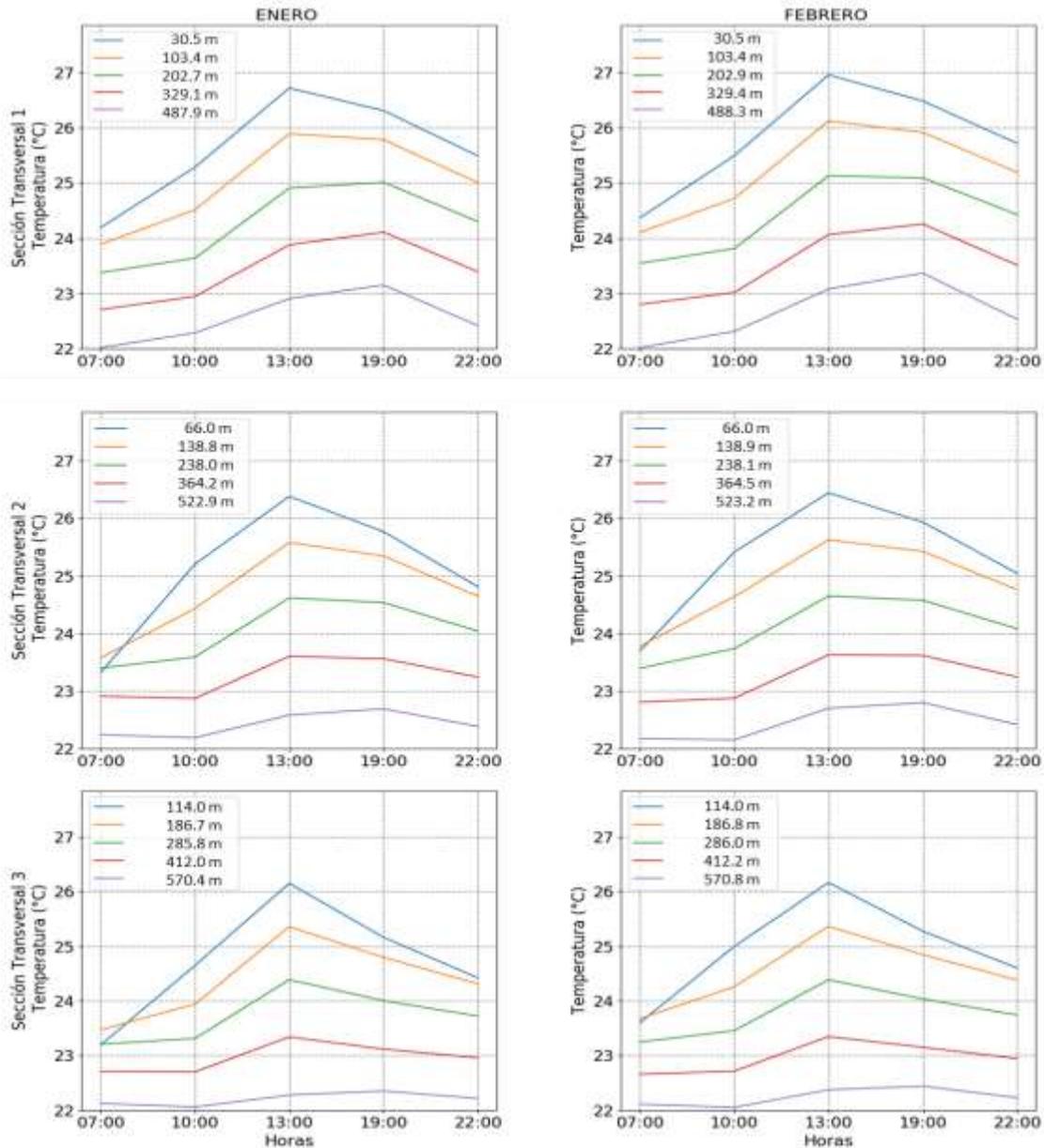


Figura 13. Perfiles verticales de la temperatura en un ciclo diario para 4 alturas en 3 secciones transversales en la línea de costa del golfo de Urabá durante el periodo de 2008-2017

4.4. Diferencias de temperatura

En la figura 14 se observa que al sur (Figura 14 A, D) y al norte del golfo (Figura 14 C, F) las mayores diferencias de temperatura se dan a las 07:00 LT, a pesar de ser la hora en la que se registran los mínimos valores para dicha variable, tanto en el aire sobre el mar como en el que se encuentra sobre tierra. Mientras a las 13:00 LT este gradiente térmico es el menor pese a que a esta hora las temperaturas son unas de las más altas del día. Dichas diferencias son en promedio de $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el sur, $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte central y $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el norte. En la parte intermedia (Figura 14 B, E) los valores se mantienen más o menos constantes entre las 19:00 LT y las 07:00 LT ($2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y empiezan a decaer después del medio día. En general las gráficas muestran valores de temperatura del aire sobre el mar mayores a los del aire sobre la tierra, aunque en el sur (Figura 14 A, D) este comportamiento deja de observarse a partir de las 10:00 LT.

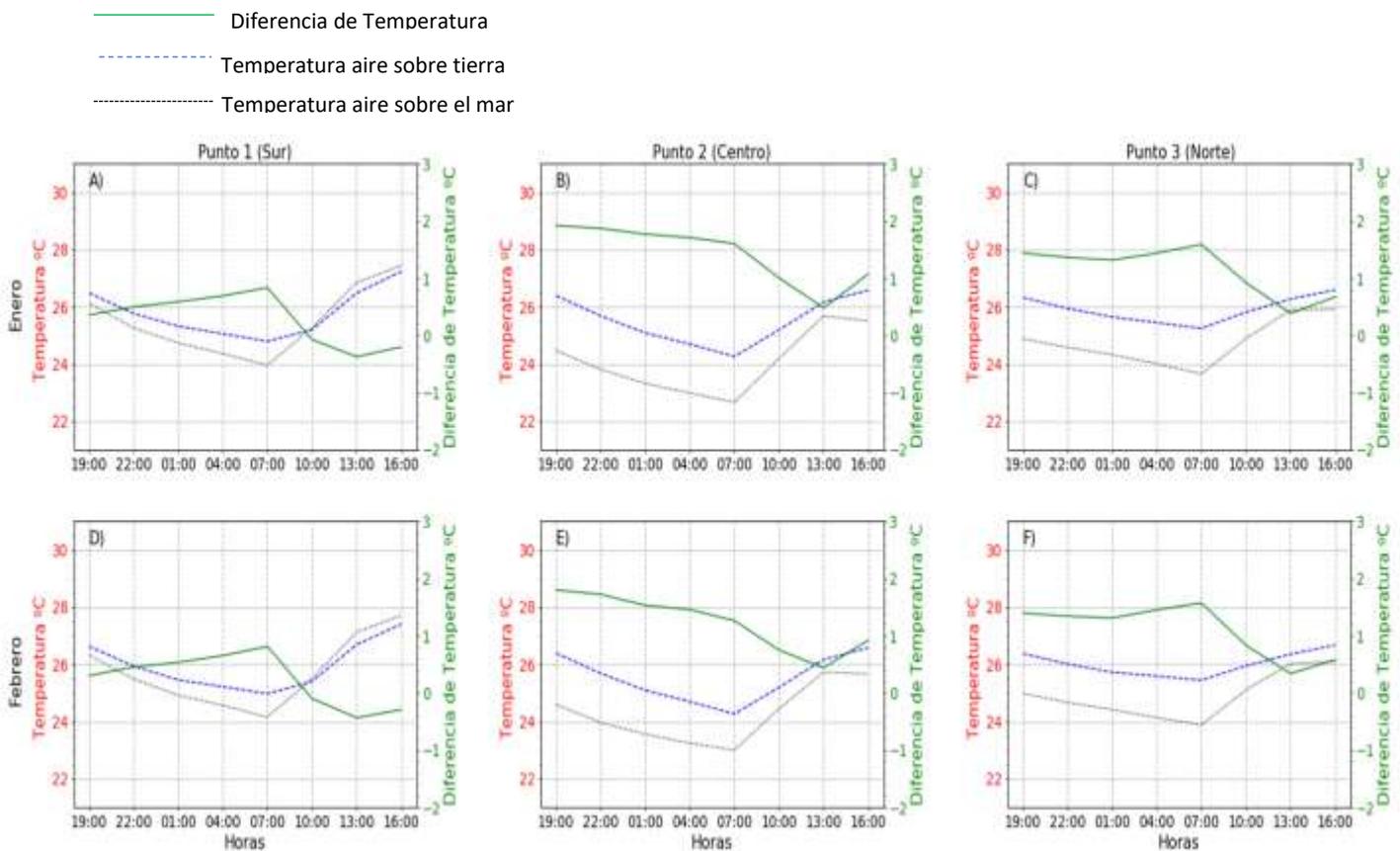
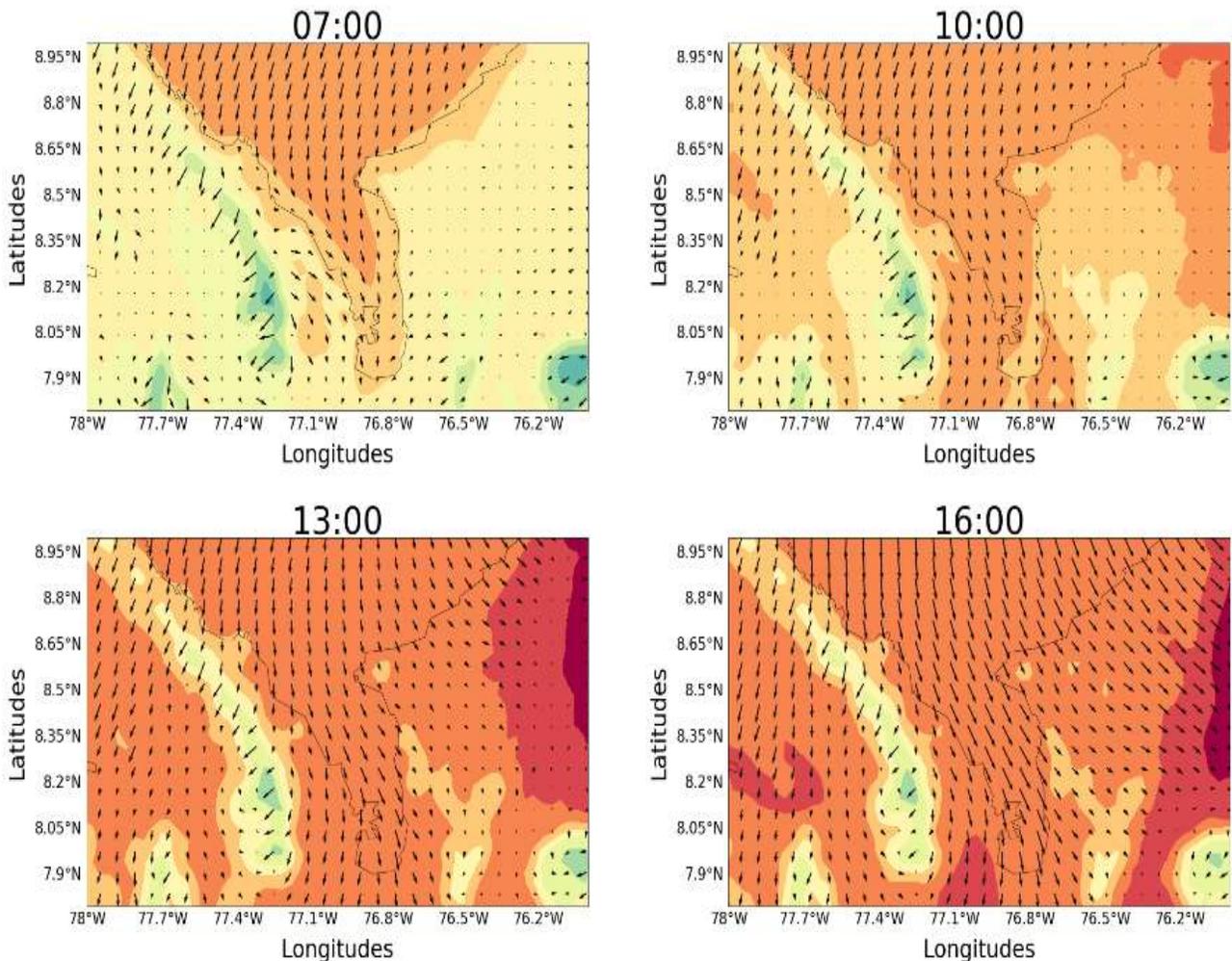


Figura 14. Diferencias de temperatura a lo largo del día para las 3 secciones transversales en el sur, centro y norte del golfo de Urabá en los meses de enero y febrero de 2008 a 2017

4.5. Campos de viento

Las figuras 15 y 16 muestran que el viento tiene una procedencia del norte y que las temperaturas al interior del golfo son mayores que las registradas en la costa para las 07:00 LT, 10:00LT, 19:00 LT y 22:00 LT tanto en enero como en febrero, mientras a las 13:00 LT y 16:00 LT se observa que ésta es muy cercana a los valores de las zonas vecinas a la línea de costa y cambia a partir de las 19:00 LT. Este comportamiento es coherente con lo encontrado en las diferencias de temperatura (Fig. 14), donde a las 13:00 LT y 16:00 se observa los menores gradientes térmicos, pero las más mayores temperaturas; además, a estas horas el viento inicia a aumentar y cerca de la línea de costa se desplaza en sentido Este; es decir, saliendo del mar. Esta dirección sugiere la formación de brisa en la parte Este del golfo (Pérez et al., 2018) como perturbaciones del viento procedente del norte. (Carnesoltas, 2002)



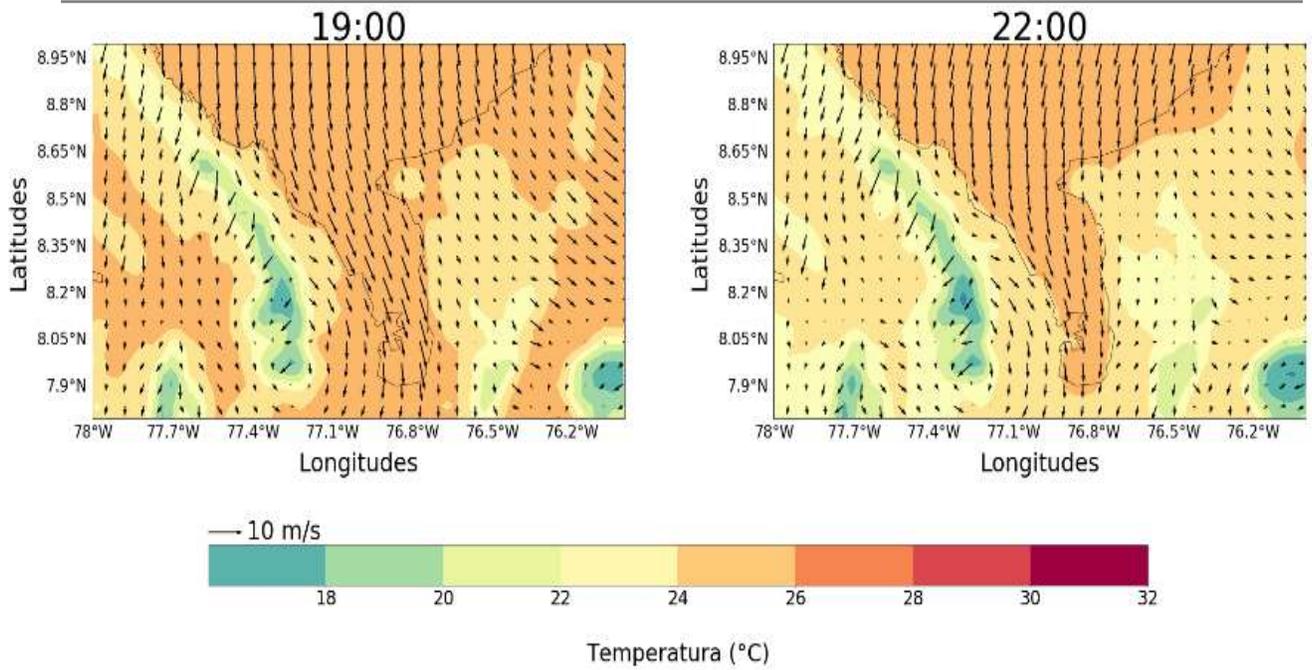
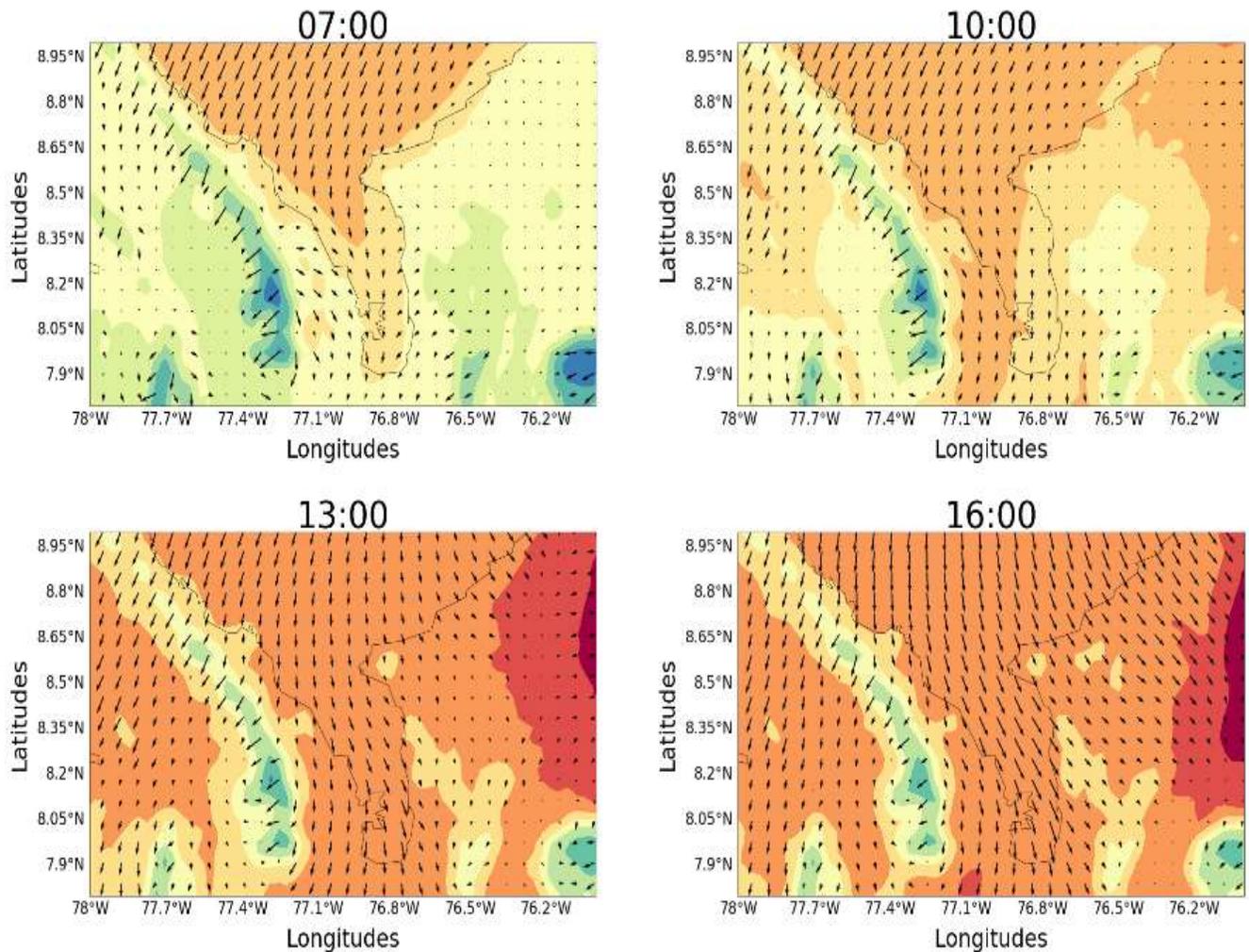


Figura 15. Campos de viento de las 6:00 a las 21:00 horas del mes de enero a una altura promedio de 69,5 m aprox. durante el periodo de 2008 -2017



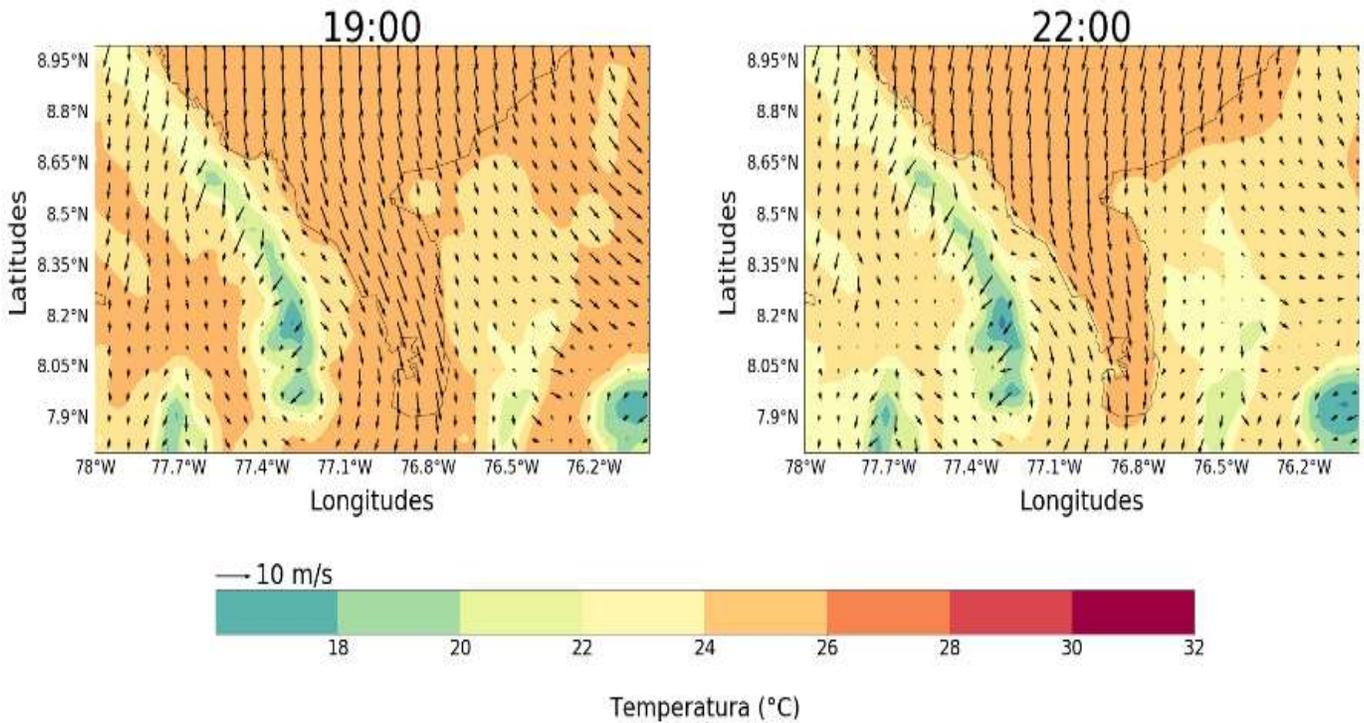


Figura 16 . Campos de viento de las 6:00 a las 21:00 horas del mes de febrero a una altura promedio de 69,5 m aprox. durante el periodo de 2008 -2017

4.6. Validación de datos del WRF

4.6.1. Validación cualitativa con datos in situ

Los datos medidos (Figura 17 A) muestran que el viento en el golfo de Urabá procede de direcciones entre el NW y el E. siendo más frecuente el desplazamiento desde el Norte (89%) y el NNW (>70%). Estos resultados concuerdan con los valores obtenidos de la modelación con el WRF que se mantienen en esas mismas direcciones (Figura 6 y Figura 7). Por su parte, la velocidad del viento (Figura 17 B) registra valores de hasta 24 m/s en la costa del golfo de Urabá, pero los valores más frecuentes están alrededor de los 12 m/s y 2.5 m/s (>86% y 71%, respectivamente). Estos últimos son más cercanos a los obtenidos con el experimento de modelación (Figura 8, Figura 9).

La figura 18 sobre mediciones de la velocidad del viento en el golfo de Urabá, registra los menores valores (0 m/s – 7m/s) en las horas nocturnas, desde las 20:00 a las 04:00 y

durante el día, después de 06:00 hasta 08:00. La velocidad inicia aumentar luego de las 09:00, alcanzando su máximo valor a las 15:00 (17.5 m/s), hora a partir de la cual empieza a descender hasta llegar la noche. Estos resultados muestran un comportamiento parecido al obtenido con las simulaciones del WRF, sin embargo, en los datos modelados se observan velocidades inferiores a las de las mediciones para cada una de las horas estudiadas. Es importante destacar que las observaciones en campo se hicieron desde una altura de 10 m y el nivel más bajo en la vertical usado para el modelo (sobre el punto geográfico en el que se situó la estación meteorológica) representa una altura de 66 m aproximadamente. En este sentido, la resolución vertical del WRF no se configuró para generar datos muy cercanos a la superficie, como en lo hicieron Steele et al. (2013), donde usando una resolución horizontal de 3 km y un tope en la atmosfera de 50 hPa al igual que en este trabajo, emplearon 5 niveles por debajo del nivel 1, exactamente 0.999, 0.997, 0.994, 0.987, 0.972 y 0.959, equivalentes a 4, 10, 16, 40, 87, 170 m de altura y en el caso de Steele et al. (2014) donde se usaron 8 niveles por debajo de 1 km, aproximadamente 10, 20, 40, 90 y 300 m. Dichas configuraciones permitieron obtener resultados consistentes con los medidos.

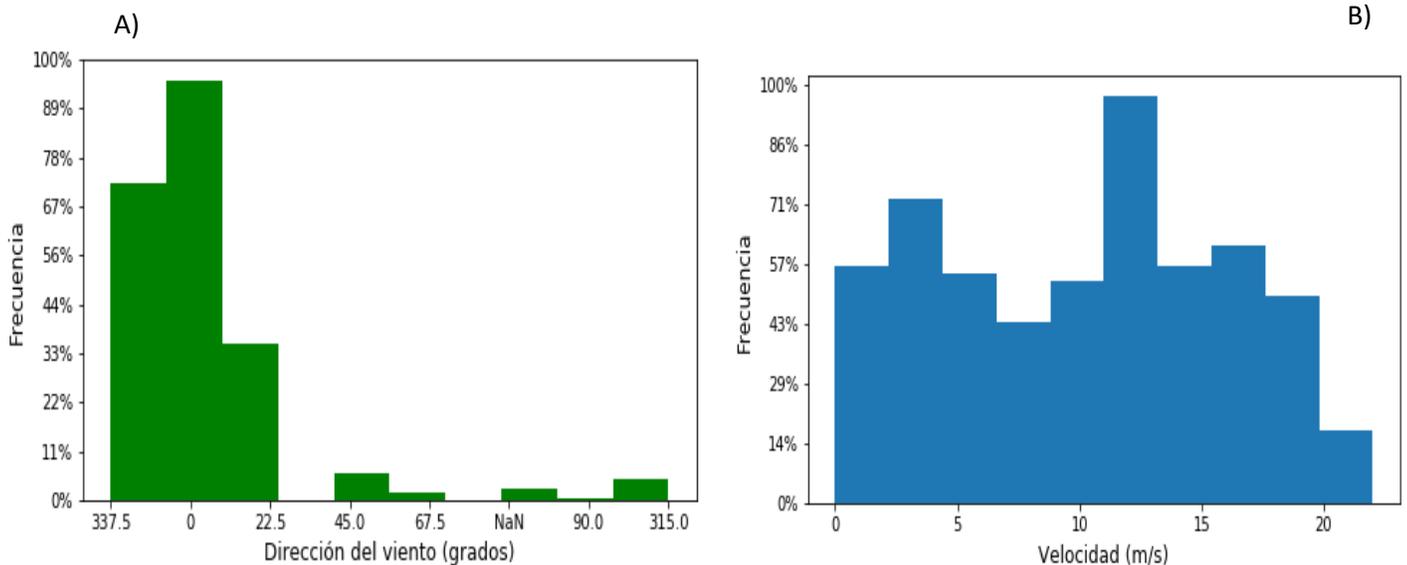


Figura 17. (A) Histograma de frecuencias de la dirección del viento (B) Histograma de frecuencias de la velocidad del viento: para el periodo de febrero 20 a febrero 27 de 2019 en la estación meteorológica de la Martina.

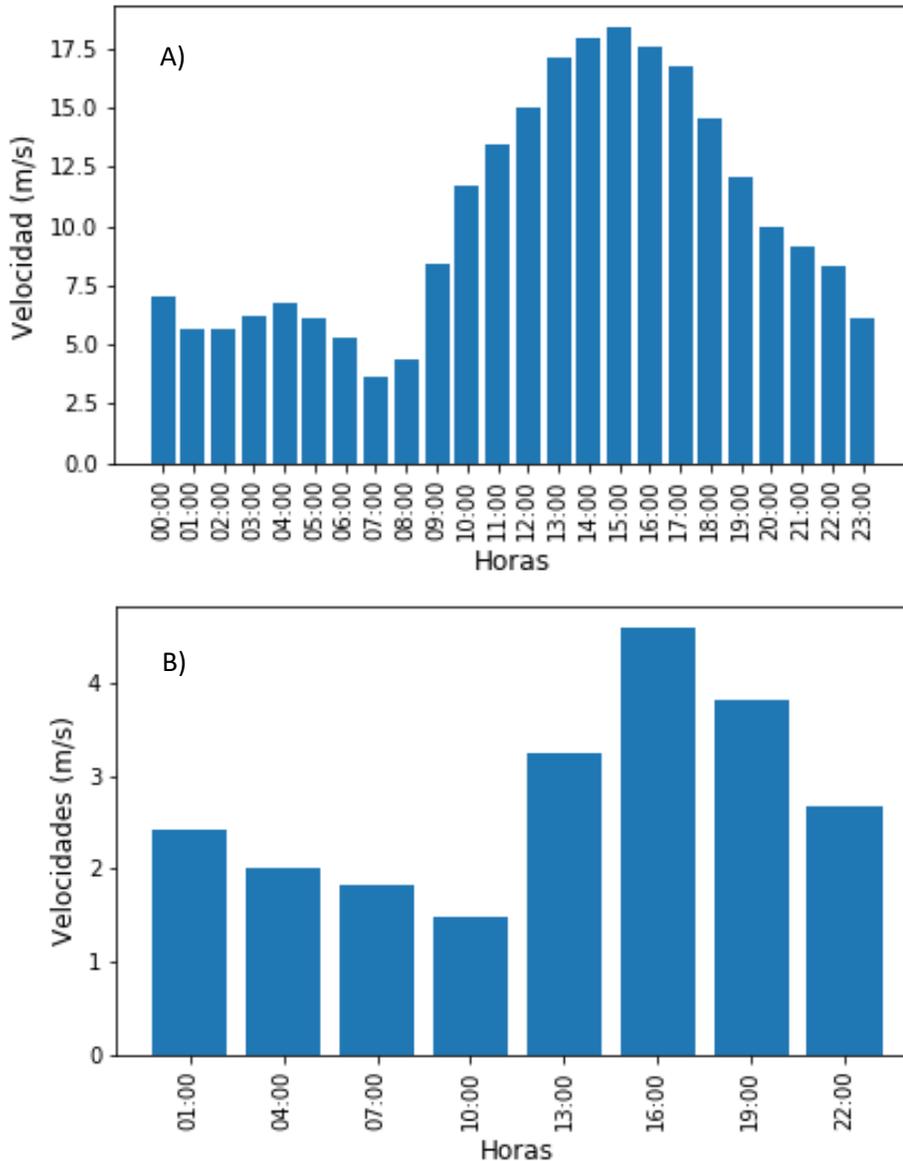


Figura 18. (A) Velocidad promedio mediciones (horaria): para el periodo de febrero 20 a febrero 27 de 2019 en la estación meteorológica de la Martina (B) Velocidad generada con WRF

4.6.2. Comparación cualitativa de hodógrafas

Las hodógrafas realizadas con los datos del WRF (Figura 19 A) en comparación con las correspondientes a los datos de ERA (Fig.19 B), muestran una forma elíptica más clara y representan mejor los cambios de dirección del viento en cada uno de los momentos del día, por su parte las que se realizaron usando datos de ERA evidencian que la componente meridional (Norte-sur), en todos los casos tiene valores negativos,

lo que hace que las hodógrafas se muestren en tierra. Debe destacarse que al igual que la representación hodográfica con datos del WRF las de ERA evidencian un giro en el sentido de las manecillas del reloj.

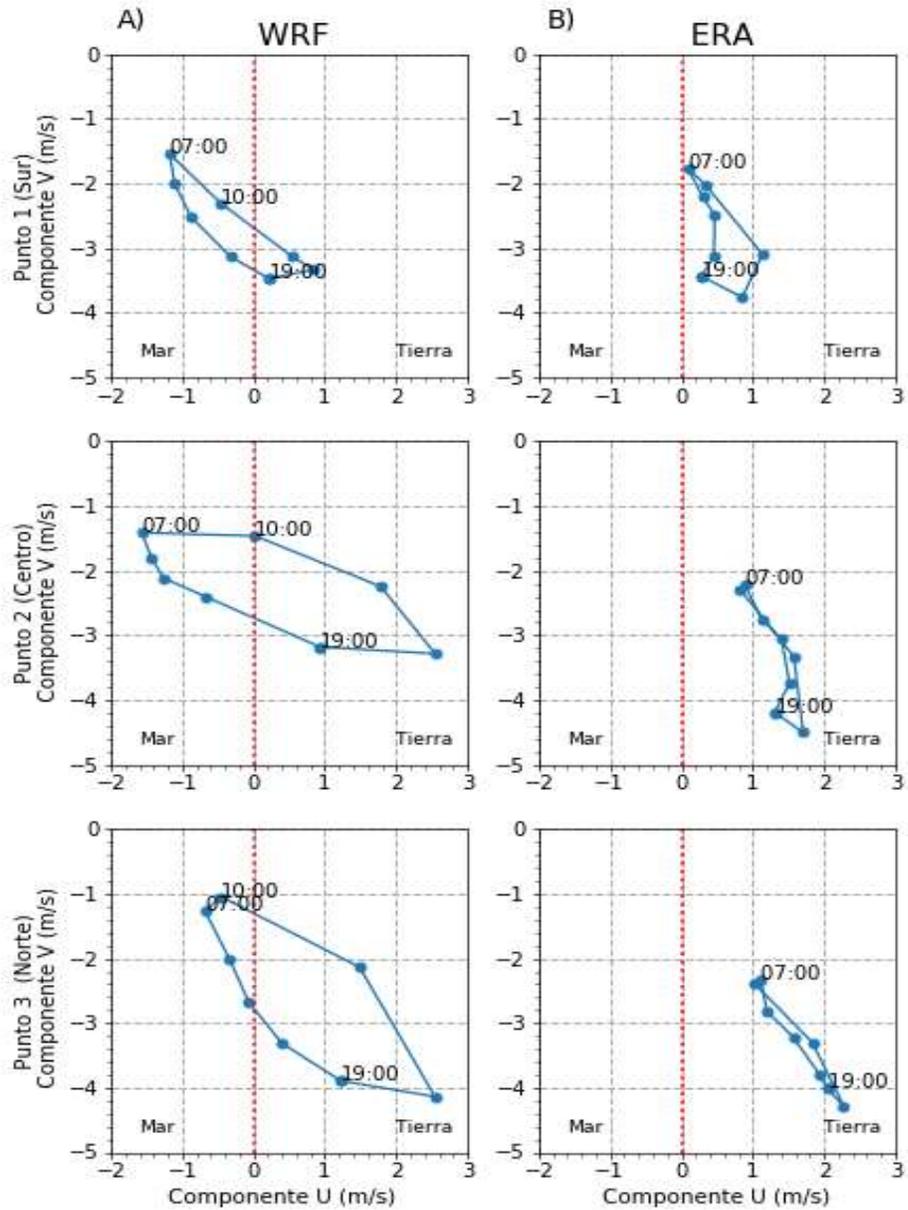


Figura 19. Hodógrafas para el mes enero del periodo de 2008 -2017 en tres puntos cercanos a la línea de costa en el golfo de

4.6.3. Validación con Diagrama de Taylor

Usando como referencia mediciones *in situ* de la dirección y la velocidad del viento en el golfo de Urabá en la latitud 8.2°N, encontramos que el WRF representa mejor la velocidad del viento local que los datos de ERA (Figura 20), pues su correlación con los datos observados es de 1.15, siendo mayor a la de ERA que es igual a 0.69, además, presenta un error cuadrático más pequeño. Sin embargo, con respecto a la dirección del viento los datos del WRF muestran menos relación con las observaciones respecto valores de correlación de los datos de ERA que es igual a 0.64, mientras WRF es de -0.58.

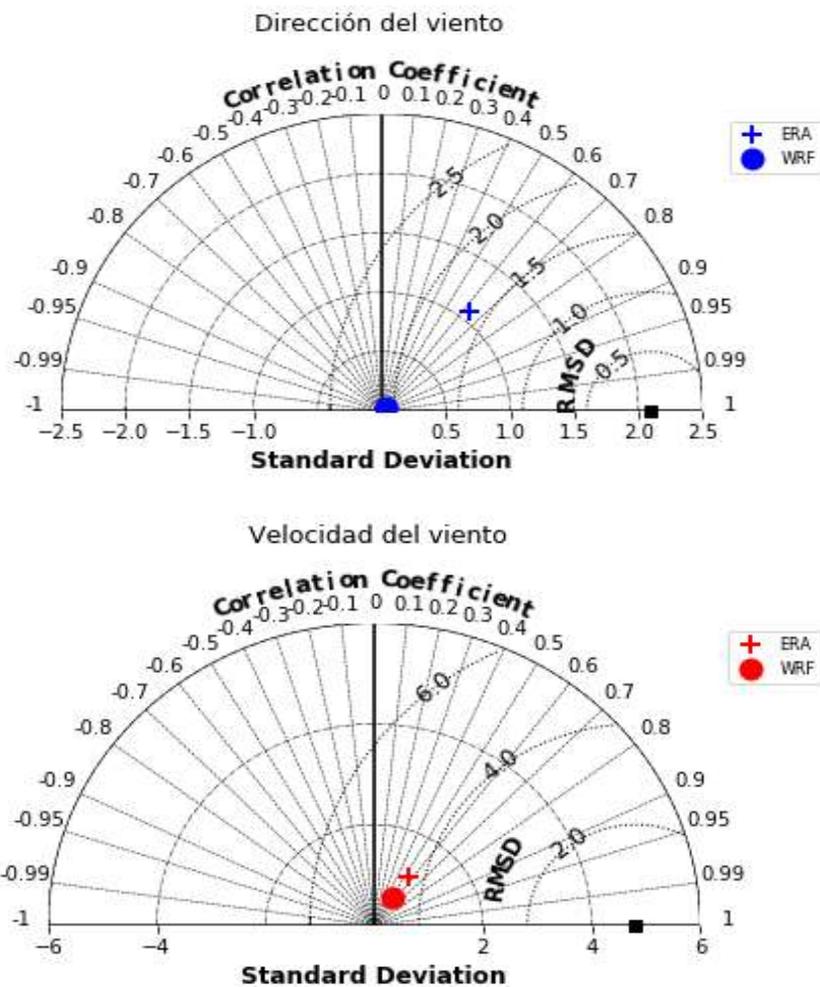


Figura 20. Diagrama de Taylor de la capacidad de ERA y WRF para presentar la velocidad y la dirección del viento en un punto cercano a la línea de costa en el golfo de Urabá en la latitud 8.2° N, para un ciclo diario durante del periodo del 20 al 27 de febrero

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los cambios de dirección y velocidad del viento en el golfo de Urabá, la brisa marina inicia a formarse alrededor de las 13:00 LT con una orientación hacia el Este y una velocidad promedio de 2.88 m/s para enero y 3.26 m/s en febrero.

El mayor desarrollo de la brisa se observa a las 16:00 LT con velocidad promedio de 4.15 m/s en enero y 4.54 m/s en febrero. A esta misma hora se observa los mayores gradientes de temperatura promedio después del inicio de la brisa marina en el centro y el sur del golfo (0.87°C enero y 0.75°C febrero). La terminación de la brisa se marca a las 19:00 LT, momento en el que se reduce la velocidad y la temperatura, además de observarse cambios de dirección mayores a 100° exactamente en el sur y el centro del golfo.

La componente meridional del viento en el golfo de Urabá para los meses de enero y febrero tiene una procedencia desde el norte durante el día y con dirección hacia el sur (valores negativos), mientras la zonal ayuda a indicar el inicio de la brisa y marca su desarrollo vertical hasta alrededor de los 730 m.

La temperatura del aire modula la velocidad del viento a lo largo de la línea de costa del golfo de Urabá, por ende, en el mes de febrero, es donde se alcanzan las mayores temperaturas y velocidades. Las mínimas temperaturas se observan a las 7:00 LT tanto en enero como febrero, por tal razón, el criterio de disminución de la temperatura para identificar el inicio de la brisa marina no coincidió con las horas en donde se observaron cambios de velocidad y dirección del viento, dichas inconsistencias también las encontró Manta (2017) en un trabajo de caracterización de la brisa de Uruguay.

La mejor señal de brisa se observa en la parte intermedia del golfo de Urabá, donde además se presentan los mayores gradientes de temperatura durante el día, que van de 0.5°C a 1.92°C en enero y de 0.44°C a 1.8 °C en febrero, además los años con efecto

del NIÑO muestran hodógrafas más definidas en comparación con los años NIÑA, gracias al mayor calentamiento de la superficie en la fase cálida del ENSO.

El WRF en comparación con ERA 5, muestra un desarrollo de la velocidad del viento a lo largo del día, más cercano al de los datos observados y permite realizar representaciones hodográfica más definidas, sin embargo, subestima su magnitud en todas las horas. Estos resultados se obtuvieron a pesar de que la configuración del modelo para este caso no corresponde exactamente a la implementada en la simulación de brisa.

Por otro lado, ERA5 representa mejor la dirección del viento, pero los datos del WRF siguen siendo útiles para la detección de la brisa marina, pues la información que genera permite realizar representaciones hodográfica más definidas. Es de anotar, que los datos medidos corresponden a un periodo de tiempo corto (días), lo cual puede inducir a errores en los resultados; esto sugiere la necesidad de realizar mayor monitoreo *in situ* de las variables climatológicas en el golfo de Urabá.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALOMAR, Gabriel. Las brisas marinas y su significación geográfica El caso de Mallorca. En: SEMATA, Ciencias Sociales e Humanidades.Vol.23(2013); p.7-28. ISSN: 1137-9669
- ARRILLAGA, Jon; YAGUE, Carlos; SASTRE, Mariano Y ROMAN-CASCÓN, Carlos. Evaluación de las características de la brisa marina en la costa Cantarica oriental mediante observaciones y simulaciones con el modelo WRF.Madrid,españa.2016,p.7. Tesis de maestría en Meteorología y geofísica. Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Geofísica y Meteorología.
- AYALA ENRIQUEZ, Rosario. Análisis numérico del sistema frontal de la brisa marina a una latitud crítica. Tesis de maestría en Ciencias y Tecnología del Agua, Jiutec,México,2018,p.98. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- AZORÍN MOLINA, César. Estimación de la ocurrencia de la brisa marina en Alicante. Alicate, España.2004, p.12. Universidad de Alicante. Instituto Universitario de Geografía, Laboratorio de Climatología.
- AZARÍN MOLINA, César y LÓPEZ BUSTINS, Joan Albert. WeMOi: Criterio Objetivo de selección de la brisa marina en el sureste de la península Ibérica (Alicante).En: Clima, sociedad y medio ambiente. Zaragoza: Asociación Española de Climatología. Serie A, N°5(2006); p. 1-11. ISBN: 978-84-6112-463-3
- BAO, Xinghua y ZHANG, Fuqing. Evaluation of NCEP–CFSR, NCEP–NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 Reanalysis Datasets against Independent Sounding Observations over the Tibetan Plateau.En: Journal of Climate.Vol.26,N° 1(Dic-2013); p.206-214.
- BERNAL, Gladys; MONTAYA, Luis Javier; GARIZÁBAL, Camilo y TORO, Mauricio. La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del Golfo de Urabá, Colombia.En:Gestión y Ambiente.Vol.8, N°1(Abril-2005); p.123-135.ISSN: 0124-177X
- CARNESOLTAS CALVO, Mario. La Circulación local de brisas de mar y tierra. Conceptos fundamentales.En: Revsta Cubana de Metereología.Vol.9,N°1(2002);p.39-59.ISSN:2664-0880

- CHEVILLOT, Phellipe; MOLINA, Amparo; GIRALDO, Luis y MOLINA Consuelo. Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. En: Boletín Científico CIOH Armada Nacional.N°14(Jul-1993); p.79-89. ISSN: 1200542
- COMIN,Alcimoni ; ACEVEDO, Otávio ; MIGLIETTA,Mario Marcello; RIZZA, Umberto y DEGRAZIA, Gervacio Annes. Investigation of sea-breeze convergence in Salento Peninsula (southeastern Italy).En: Atmospheric Research,Vol. 160(Junio-2015);p.68-79. ISSN: 0169-8095
- DELGADO GONZÁLEZ, Oscar E.; LARIOS CASTILLO, Sergio; OCAMPO TORRES, Francisco J. Las brisas durante algunos meses de primavera y verano en el noroeste del golfo de California. En: Ciencias Marinas. vol. 20, N° 3(1994); p. 421-440. ISSN: 0185-3880
- DOMINGUEZ PÉREZ, Carlos Alejandro. Influencia de los sistemas de brisas marinas en el desarrollo de precipitación sobre la Península de Baja California.Tesis de maestría en Ciencias. Baja California, México,2017,p.77. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- ESLAVA, Jesús. Climatología y diversidad climática de Colombia. En: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Vol. 18, N°71(Marzo-1993);p.507-538.ISSN:0370-3908
- FERNANDEZ, Rafael; LAKKIS, Gabriela; ALLENDE, David; SANTOS, Ruben; CREMADES, Pablo; PULIAFITO, Enrique. Modelación de un evento metereologico de mesoescala utilizando el modeo WRF.En: Contaminación Atmosférica e Hídrica en Argentina (2011); p. 289-298. ISBN 978-950-42-0136-6
- GUSTAVSSON, T.; LINDQVIST, S.; BORNE, K. y BOGREN, J. A study of sea and land breezes in an archipelago on the west coast of Sweden. En: Royal Meteorological Society. Vol.15, N°7(Jul-1995); p.785-800.
- HERNÁNDEZ CEBALLOS, Miguel Ángel. Caracterización meteorológica y modelización de Andalucía occidental.Huelva,España,2011.Tesis de doctorado. Universidad de Huelva.Departamento de Física Aplicada.
- HUAMANTINCO CISNEROS, María Andrea; PICCOLO, Cintia. Caracterización de la brisa de mar en el balneario de Monte Hermoso, Argentina. En: Estudios Geográficos, Vol.72, N°271(jul-Dic -2011); p.461-475.ISSN: 0014-1496

- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Implementación del modelo WRF para la sabana de Bogotá. Bogotá D.C: Colombia, 2012
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). Validación De Los Pronósticos De Precipitación Con Los Modelos GFS, MM5, WRF, CMM5 Y CWRF Sobre El Territorio Colombiano. Bogotá D.C: Colombia, 2012
- JIMÉNEZ CORTÉS, María Antonia; SIMÓ, Gemma; WRENGER, Burkhard; TELISMAN-PRTENJAK, Maja; GUIJARRO, José A. y CUXART, Joan. Morning transition case between the land and the sea breeze regimes. En: Atmosphaera Research, Vol.172(may-2016);p. 95-108.ISSN: 0169-8095
- JIMÉNEZ GARCÍA, Mauricio. Validación de la capacidad del modelo "Weather Research and Forcasting" para pronodticar lluvia intensa,usando el método orientado a objetivos y tablas de contingencia.Bogotá,2014,p.162.Tesis de maestría en Ciencias Meteorológicas. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias.
- MANTA DOMÍNGUEZ, Gastón. Caracterización de la brisa marina en Uruguay, Montevideo, 2017, p.185. Tesis de maestría en Geociencias. Universidad de la República de Uruguay. Facultad de Ciencias.
- MASSELINK, Gerhard; PATTIARATCHI, Charita. The effect of sea breeze on beach morphology, surf zone hydrodynamics and sediment resuspension. En: Journal of Coastal Research, Vol.14, N°2(Feb-1998); p. 393-406.ISSN: 0749-0208.
- MILLER, S.; KEIM, Barry; TALBOT, Robert; MAO, Huiting. Sea breeze: Structure, forecasting, and impacts. En: Reviews of Geophysics. Vol. 41, N°3(Agos-2003); p. 312-320.
- PAPANASTASIOU, Dimitris; MELAS, Dimitrios y LISSARIDIS. Study of wind field under sea breeze conditions; an application of WRF model. En: Atmospheric Research. Vol. 98, N° 1(Oct-2010); p.102-117.ISSN: 0169-8095
- PÉREZ, Ascario; ORTIZ, Juan C.; BEJARANO, Luis F.; OTERO, Luis; RESTREPO, Juan y FRANCO, Andrés. Sea breeze in the Colombian Caribbean coast. En: Atmosphere. Vol. 31, N° 4 (Ago-2018); P. 389-406.ISSN: 0187-6236

- POVEDA, Germán. La hidro-climatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. En: Rev. Académica Colombiana de Ciencia. Vol.28, N° 107(Ene, 2004); p. 201-222. ISSN:0370-3908.
- RANI, Indira; RAMACHANDRAN, Radhika; SUBRAHAMANYAM, Bala; ALAPPATTU, Denny y KUNHIKRISHNAN, P.K. Characterization of sea/land breeze circulation along the west coast of Indian sub-continent during pre-monsoon season. En: Atmospheric Research, Vol. 95, N° 4 (Oct-2010); p. 367-378. ISSN: 0169-8095
- SALVADOR, Rosa y MILLÁN; M. Análisis histórico de las brisas en Castellón. En: TETHYS, revista de meteorología, Vol. 2 (2003); p. 21-19. Disponible <http://www.tethys.cat/antics/num02/articles/art0204.htm>
- SKAMAROCK, William; KLEMP, Joseph; DUDHIA, Jimmy; GILL, David; WANG, Wei y POWERS, Jordan. A Description of the Advanced Research WRF Version 2. En: NCAR Technical Note NCAR (jun-2005); p.100
- STEELE, C. J.; DORLING, S. R.; VON GLASOW, R.; BACON, J. Idealized WRF model sensitivity simulations of sea breeze types and their effects on offshore windfields. En: Atmospheric Chemistry and Physics. Vol.13,N°1(Ene, 2013); p. 443-461.
- STEELE, C. J.; DORLING, S. R.; VON GLASOW, R.; BACON, J. Modelling sea-breeze climatologies and interactions on coasts in the southern North Sea: implications for offshore wind energy. En: Royal Meteorological Society. Vol.141, N°690(Oct,2014); p. 1821-1835
- STOLZ, Werner. Predicción del clima y modelos numéricos. En: Ciencias Ambientales. Vol.35,N°1(junio-2008);p.34-42. ISSN: 2215-3896
- TAYLOR, Karl. Summarizing multiple aspect of model performance in a single diagram. En: Journal of Geophysical Research. Vol.106, N°D7(abril- 2001); p.7183-7192