



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**Escuela Profesional de Física**

**Modelación física de la hidrodinámica y los patrones  
de circulación marina en la Bahía de Paracas, Pisco -  
Perú, para el año 2014**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

**AUTOR**

Juver Santos PERICHE VEGA

**ASESOR**

Jorge Martín QUISPE SÁNCHEZ

Lima, Perú

2016



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Periche, J. (2016). *Modelación física de la hidrodinámica y los patrones de circulación marina en la Bahía de Paracas, Pisco - Perú, para el año 2014*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS  
(Universidad del Perú, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS  
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL  
TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 17:00 horas del miércoles 16 de noviembre del 2016 en el Salón de Grados de la Facultad (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Octavio Fashé Raymundo (Presidente), del Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe (Miembro), Mg. Jorge Quispe Sánchez (Asesor) y del Lic. José Carlos Eche Llenque (Suplente), se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para la Licenciatura en Física mediante la modalidad M1 del bachiller:

**JUVER SANTOS PERICHE VEGA**

Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado invitó al bachiller Periche Vega, Juver Santos a realizar una exposición del trabajo de tesis titulado "Modelación física de la hidrodinámica y los patrones de circulación marina en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú para el año 2014."

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, el Mg. Octavio Fashé Raymundo invitó al candidato y al público a pasar al Salón de Grados de la Facultad para dar lectura del resultado de la deliberación. El candidato ha obtenido la calificación de:

*Muy Bueno*  
(MENCIÓN)

*17*  
(NÚMERO)

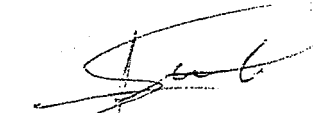
*Diecisiete*  
(LETRAS)

Finalmente, el Presidente del Jurado propone al Consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al bachiller Periche Vega, Juver Santos. Siendo las *18:40* horas, se levanta la Sesión.

  
Mg. Octavio Fashé Raymundo  
PRESIDENTE

  
Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe  
MIEMBRO

  
Mg. Jorge Martin Quispe Sánchez  
ASESOR

  
Lic. José Carlos Eche Llenque  
SUPLENTE

## INDICE GENERAL

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos .....	3
1.2 Antecedentes del Estudio .....	4
1.3 Zona De Estudio Y Sus Características.....	8
1.3.1 Localización y Morfología .....	8
1.3.2 Climatología y Meteorología .....	10
1.3.3 Temperatura del Aire .....	10
1.3.4 Precipitación .....	11
1.3.5 Humedad Relativa .....	11
1.3.6 Vientos .....	12
1.4 Hidrología .....	13
1.4.1 Cursos de Agua de régimen Permanente: Río Pisco .....	13
1.4.2 Cursos de Agua de Regimen Estacional .....	14
1.4.3 Caudales medios y Caudales máximos de Avenidas. ....	15
2. MARCO TEORICO .....	16
2.1 Introducción .....	16
2.2 Hidrodinámica de Sistemas Semicerrados. ....	17
2.3 Modelos Hidrodinámicos .....	19
2.4 Características del modelo ELCOM .....	22
2.5 Ecuaciones Hidrodinámicas Fundamentales .....	23
2.6 Condición en la superficie Libre .....	26
2.7 Condición en el Fondo.....	26
2.8 Conservación de salinidad .....	27
2.9 Termodinámica y Flujo de masa .....	27
2.10 Radiación de Onda Corta .....	27

2.11	Radiación de onda Larga .....	28
2.12	Modelo de Mezcla .....	30
2.13	Método de Solución Numérica .....	31
3.	METODOLOGÍA .....	32
3.1	Simulación Numérica .....	32
3.1.1	Descripción del Modelo .....	32
3.1.2	Datos de entrada al Modelo. ....	35
3.1.2.1	Batimetría .....	36
3.1.2.2	Forzantes Físicos .....	37
3.1.2.3	Aspectos considerados para calibrar la simulación. ....	42
3.1.2.4	Condiciones de fondo .....	42
3.1.2.5	Conservación de salinidad y temperaturas en las fronteras	43
3.1.2.6	Termodinámica y flujos de masa .....	43
4.	RESULTADOS .....	44
4.1	Secciones Horizontales .....	45
4.1.1	Velocidades – mes marzo 2014 .....	45
4.1.2	Velocidades – mes noviembre 2014 .....	76
4.2	Validación .....	126
5.	Conclusiones .....	131
5.1	Factor de Correlación .....	131
5.2	Apreciaciones .....	132
	Referencias Bibliográficas .....	133

## LISTA DE CUADROS

- I Estadística de la magnitud de los vientos diarios para el mes de marzo
- II Estadística de la magnitud de los vientos diarios para el mes de Noviembre
- III Categorización de las secciones horizontales y variables
- IV Descripción series temporales

## LISTA DE FIGURAS

- 1      Ciclo anual en la superficie de los patrones de circulación medios junto a un trazador que sale por el Río León.
- 2      Simulación numérica con forzante de viento y marea simultáneamente (modelo ELCOM 3D) . 15 Mayo, 2005.
- 3      La columna de la derecha muestra las velocidades a 2 metros de profundidad durante la bajamar.
- 4      Resultados de la simulación, salinidad y velocidad en superficie en las campañas de medición.
- 5      Área de estudio (Bahía de Paracas)
- 6      Batimetría del área de estudio, Bahía de Paracas, Pisco.
- 7      El análisis de la marea se muestra en la figura
- 8      serie de datos de tiempo (magnitud) con los que se forzó el modelo numérico. Marzo -2014
- 9      serie de datos de tiempo (magnitud) con los que se forzó el modelo numérico. Noviembre -2014
- 10     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa superficial
- 11     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 20:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa superficial
- 12     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa superficial
- 13     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa superficial
- 14     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa superficial
- 15     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa superficial
- 16     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 12:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa superficial
- 17     Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa superficial



- 18 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Fondo
- 19 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 2:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Fondo
- 20 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 4:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Fondo
- 21 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Fondo
- 22 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 02:00 a 10:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Fondo
- 23 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Fondo
- 24 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 8:00 a 12:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa Fondo
- 25 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa Fondo
- 26 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 8:00 horas, 20-Mar-2014 - Capa Fondo
- 27 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 22:00 horas, 20-Mar-2014 - Capa Fondo
- 28 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Promedio
- 29 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Promedio
- 30 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 8:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Promedio
- 31 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Promedio
- 32 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 8:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Promedio
- 33 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Promedio
- 34 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 8:00 a 20:00 horas, 15-Mar-2014 - Capa Promedio
- 35 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 15-Mar-2014 - Capa Promedio
- 36 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 04:00 horas, 19-Mar-2014 - Capa Promedio
- 37 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 19-Mar-2014 - Capa Promedio

- 38 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Superficial
- 39 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Superficial
- 40 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 05-Nov-2014 - Capa Superficial
- 41 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 22:00 horas, 05-Nov-2014 - Capa Superficial
- 42 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 09-Nov-2014 - Capa Superficial
- 43 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 09-Nov-2014 - Capa Superficial
- 44 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Superficial
- 45 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Superficial
- 46 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 15-Nov-2014 - Capa Superficial
- 47 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 15-Nov-2014 - Capa Superficial
- 48 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 21-Nov-2014 - Capa Superficial
- 49 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 21-Nov-2014 - Capa Superficial
- 50 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 4:00 horas, 24-Nov-2014 - Capa Superficial
- 51 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 24-Nov-2014 - Capa Superficial
- 52 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 53 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 54 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 06-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 55 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 14:00 horas, 06-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 56 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 08-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 57 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 08-Nov-2014 - Capa de Fondo

- 58 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 8:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 59 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 60 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 61 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 62 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 18-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 63 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 18-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 64 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 65 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 66 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 25-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 67 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 22:00 horas, 25-Nov-2014 - Capa de Fondo
- 68 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Promedio
- 69 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Promedio
- 70 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 07-Nov-2014 - Capa Promedio
- 71 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 07-Nov-2014 - Capa Promedio
- 72 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa Promedio
- 73 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 20:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa Promedio
- 74 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Promedio
- 75 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Promedio
- 76 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa Promedio
- 77 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa Promedio

- 78 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 17-Nov-2014 - Capa Promedio
- 79 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 17-Nov-2014 - Capa Promedio
- 80 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 19-Nov-2014 - Capa Promedio
- 81 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 19-Nov-2014 - Capa Promedio
- 82 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa Promedio
- 83 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa Promedio
- 84 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 26-Nov-2014 - Capa Promedio
- 85 Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 26-Nov-2014 - Capa Promedio
- 86 Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa Superficial
- 87 Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa de Fondo
- 88 Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa Promedio
- 89 Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa Superficial
- 90 Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa de Fondo
- 91 Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa de Promedio
- 92 Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa Superficial
- 93 Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa de Fondo
- 94 Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa Promedio
- 95 Correlación de datos Temperatura



## Resumen

En las últimas décadas la oceanografía física costera pasó de ser una ciencia descriptiva a una ciencia explicativa y con poder de predicción, en su evolución en el tiempo y ha madurado en el campo de la física ambiental, como subdisciplinas en los procesos oceanográficos costeros están: modelación numérica de procesos oceánicos, hidrodinámica de cuerpo de aguas costeros, circulación y oleaje en la zona costera.

El presente trabajo tiene por objetivo determinar la hidrodinámica de la Bahía de Paracas mediante simulaciones numéricas con datos de mediciones en campo. Los datos que se analizó consistieron en perfiles de temperatura, salinidad y velocidad de corrientes, y fueron complementados con datos meteorológicos y de nivel del mar. Las simulaciones numéricas se realizaron con el modelo computacional – ELCOM 3D – (Estuary and Lake Computer Model). El modelo ELCOM utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua semicerrados y estratificados sometidos a forzamientos físicos externos. EL modelo resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier – Stokes y el transporte de escalares para un flujo no permanente, no viscoso e incompresible utilizando la aproximación hidrostática y de Boussineq.

El modelo se aplicó sobre una malla cartesiana rectangular con  $dx = dy = 150m$ ,  $dz = 2m$ , con un paso de tiempo  $dt = 10s$ , será forzado con series de tiempo de marea, velocidad y dirección del tiempo. Se utilizó diferentes condiciones iniciales y de frontera en el modelo para analizar la capacidad de reproducir la dinámica física del sistema.

**Palabras Claves:** Forzantes Físicos, Circulación, Simulación, Hidrodinámica.

## Summary

In recent decades the physical oceanography coastal evolved from a descriptive science to an explanatory science and predictive power in its evolution over time and has matured in the field of environmental physics, as subdisciplines in coastal oceanographic processes are: numerical modeling of ocean processes, coastal hydrodynamics of body water, circulation and waves in the coastal zone.

This paper aims to determine the hydrodynamics of the Paracas Bay by numerical simulations with data from field measurements. The data analyzed consisted of profiles of temperature, salinity and speed of currents, and were supplemented with meteorological data and sea level. Numerical simulations were performed using the computational model - 3D ELCOM - (Estuary and Lake Computer Model). The hydrodynamic model uses ELCOM thermodynamic principles and to simulate the spatial and temporal behavior of water bodies and semi-stratified subjected to external physical forcing. The model numerically solves the Navier - Stokes and transport of scalars for unsteady flow, inviscid and incompressible using hydrostatic and Boussineq approach.

The model was applied to a rectangular Cartesian mesh with  $dx = dy = 150m$ ,  $dz = 2m$ , with a time step  $dt = 10s$ , will be forced to tidal time series, speed and direction of time. different initial conditions was used and border in the model to analyze the ability to play physical system dynamics.

**Keywords:** Forcing Physicists, Circulation, Simulation, Hydrodynamics.

## CAPITULO 1

### INTRODUCCIÓN

Los procesos físicos que rigen cualquier masa de agua resultan ser tan complejos que es necesario dividirlos en dos campos principales: la hidrodinámica y la hidrostática. Donde entendemos que la primera es más compleja que la segunda, ya que en ella se introducen factores externos al sistema. Estos factores se encargan de forzar el sistema y llevarlo desde estados relativamente simples a estados caóticos, como es el caso de ríos, lagos, mares y océanos.

En la oceanografía de pequeña escala, se considera como forzamientos externos del sistema, al viento, gravedad, morfología, condiciones ambientales, características del agua y variación del nivel del mar, siendo el último el más importante (Fischer et al., 1979). La variación del nivel del mar afecta de manera considerable la hidrodinámica de cualquier sistema conectado parcialmente a un océano o mar adyacente, como es el caso de lagunas costeras, estuarios, bahías y puertos.

En estos sistemas semicerrados existe un balance entre la intrusión de la marea, el esfuerzo del viento, la fricción con el fondo y los gradientes de densidad dentro del agua (Ramírez e Imberger, 2001).

Un sistema estratificado puede reducir la calidad del agua, aumentar los tiempos de residencia y terminar por deteriorar el sistema.

La ausencia de mezcla afecta la distribución de nutrientes y contaminantes; cuando esto ocurre el sistema es gobernado por un régimen gravitatorio, que hace que el sistema interactúe entre mezclado y estratificado (Ramírez, 2001). Los modelos numéricos pueden clasificarse como unidimensionales- (1D), bidimensionales- (2D), tridimensionales (3D).



Desde 1990 con el desarrollo de esquemas semi-implícitos de diferencias finitas, una familia de modelos TRIM (Tidal, Residual, IntertidalMudflat), desarrollada por V. Casulli y colaboradores (Casulli y Cheng, 1992; Casulli y Cattani, 1994; Casulli y Stelling, 1998; Casulli y Walters, 2000), han realizado aplicaciones para resolver flujos en 2D y 3D, usando o no aproximaciones hidrostáticas.

El método numérico de ELCOM toma su estructura básica del esquema de TRIM, con adaptaciones para mejorar su precisión, la conservación de escalares, la difusión numérica y el desarrollo de un esquema de cerradura basado en una capa de mezcla de viento.

## **1.1 Objetivos**

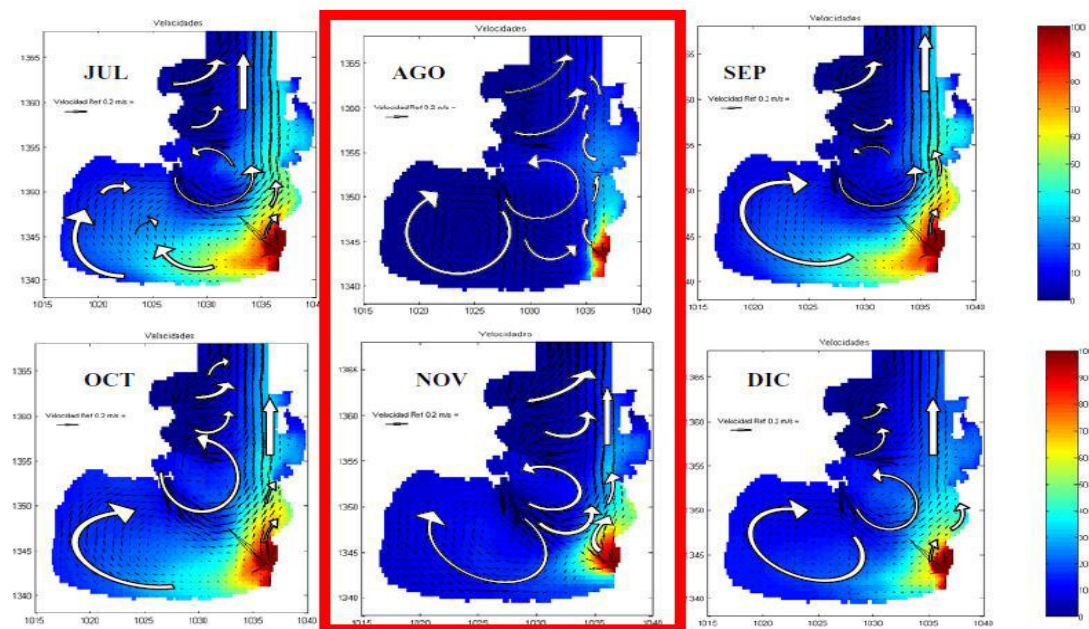
El objetivo general del presente trabajo conocer la hidrodinámica y los patrones de circulación costera en la Bahía de Paracas, utilizando un modelo físico hidrodinámico tridimensional y baroclínico.

Este objetivo general contempla los siguientes objetivos particulares:

1. Describir la hidrodinámica en la Bahía de Paracas mediante la implementación de un modelo físico hidrodinámico.
2. Describir la circulación en la Bahía de Paracas mediante la implementación de un modelo físico hidrodinámico.
3. Determinar los mecanismos responsables de la circulación en la Bahía de Paracas

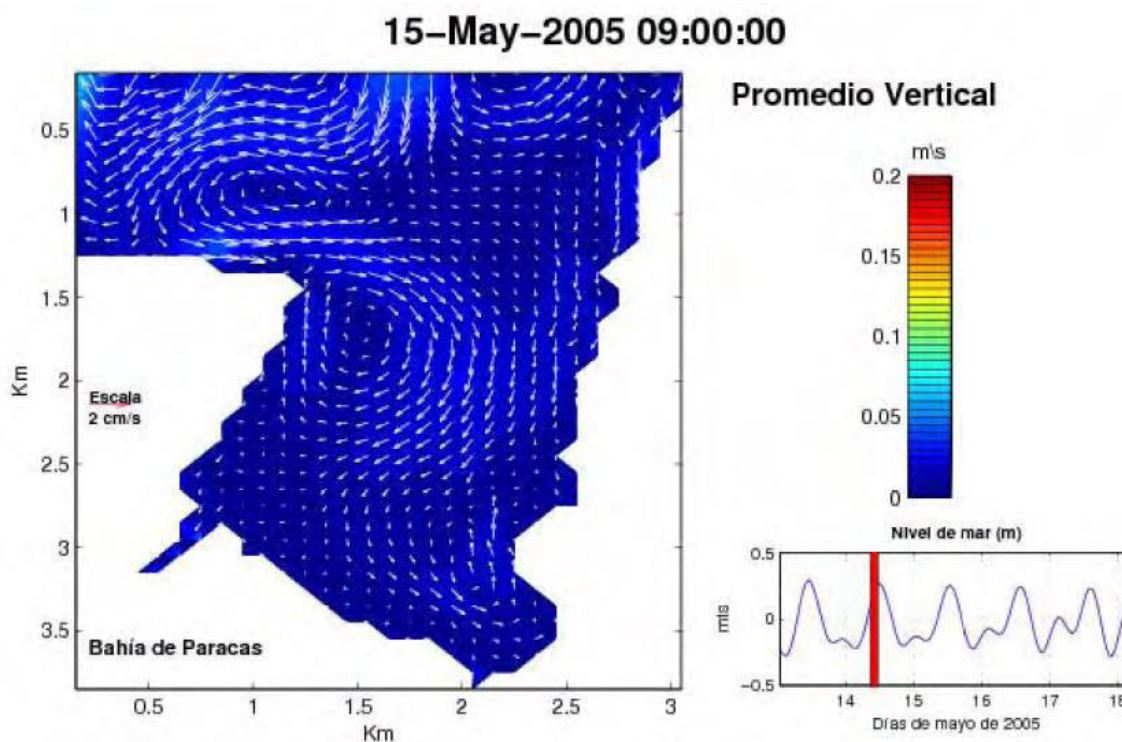
## 1.2 Antecedentes Del Estudio

**Roldán, P. et al. (2008).** Presentan los resultados de la simulación numérica del patrón de circulación en la Bahía de Colombia, Golfo de Urabá, para dos épocas climáticas extremas del país determinadas básicamente por el paso de la Zona de Convergencia Intertropical activando los vientos Alisios provenientes del sur y los vientos Alisios provenientes del norte respectivamente. Los resultados de la simulación muestran que el patrón de circulación para la época de invierno es dominado por las corrientes superficiales generadas por la acción combinada de los vientos y el caudal de los ríos, y se caracteriza por la presencia de dos vórtices que nacen en la boca Leoncito del río Atrato; para la época de verano el patrón de circulación es dominado por las corrientes superficiales en dirección sur generadas por la acción del viento fuerte y persistente desde el norte. Aparecen entonces tres grandes corrientes sobre la bahía, una que se dirige paralela a la costa en el costado occidental, otra en la zona media del dominio y una tercera bordeando la costa oriental de la Bahía.



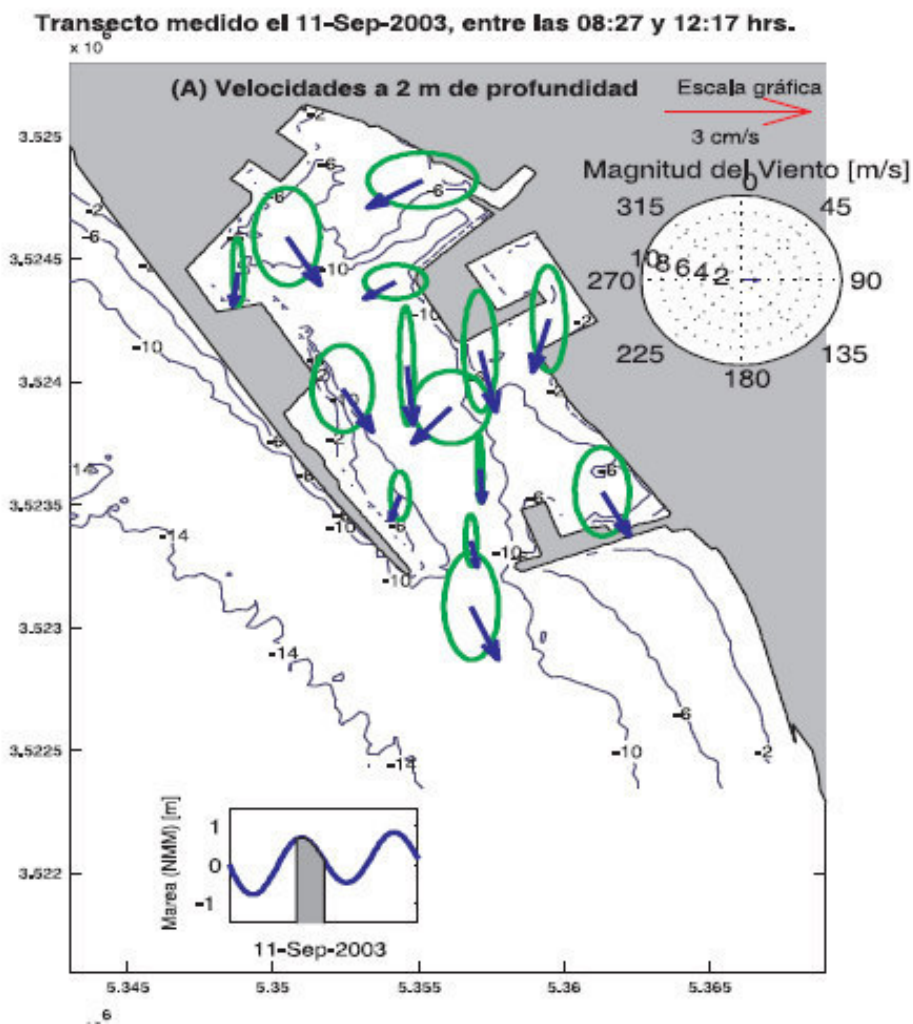
**Figura 1:** Ciclo anual en la superficie de los patrones de circulación medios junto a un trazador que sale por el Río León.

**Quispe, J. et al. (2007).** Determino la hidrodinámica de la bahía de Paracas mediante mediciones de campo y simulaciones numéricas. Se analizó una serie de datos medidos durante la campaña de mediciones oceanográficas; los datos consistieron en perfiles de temperatura, salinidad, velocidad de corrientes, fueron complementados con datos meteorológicos y de nivel del mar. Las simulaciones se realizaron con el modelo computacional ELCOM 3D (Estuary and Lake Computer Model). EL Modelo ELCOM utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua semicerrados y estratificados sometidos a forzamientos físicos externos.



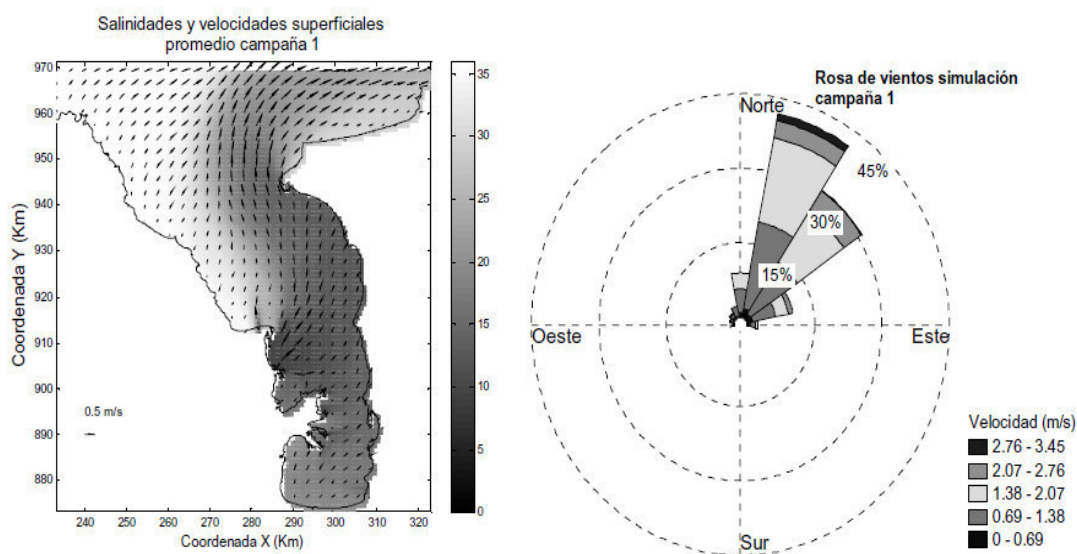
**Figura 2: Simulación numérica con forzante de viento y marea simultáneamente (modelo ELCOM 3D) . 15 Mayo, 2005.**

**Flores, X. et al. (2005).** Se definió la circulación y mezcla en el Puerto de Ensenada, se analizaron una serie de datos medidos durante distintas épocas del año. Los datos consistieron en perfiles de temperatura y velocidad obtenidos en posiciones predefinidas dentro del puerto de Ensenada y fueron complementados con datos meteorológicos y de nivel de mar. Adicionalmente se implementó un modelo numérico tridimensional alimentado por los datos medidos. El modelo permitió extender las series de tiempo y tener un panorama general del sistema. El análisis y las simulaciones numéricas brindaron una estimación de la variación anual del sistema, encontrando características diferentes para cada época en particular.



**Figura 3:** La columna de la derecha muestra las velocidades a 2 metros de profundidad durante la bajamar

**Luis M. et al. (2008).** Se realizó un estudio numérico para explicar el comportamiento de la pluma estuarina del río Atrato. Se presentan los resultados obtenidos en la calibración del modelo ELCOM, la cual fue realizada con datos de campo recolectados en tres campañas oceanográficas. Se realizaron una serie de experimentos numéricos para analizar la respuesta del sistema a diferentes condiciones climáticas y oceánicas. Dicho análisis ayudo en la descripción de los patrones de circulación en el golfo de Urabá. Se encontró que el río Atrato forma una pluma estuarina estable, que esta principalmente dominada por la acción del viento. La marea mostro ser importante solo a lo largo del ciclo diurno. La descarga de los ríos también mostro que tiene importancias especialmente en la formación de una pluma boyante.



**Figura 4. Resultados de la simulación, salinidad y velocidad en superficie en las campañas de medición.**

### **1.3 Zona de estudio y sus características**

En este capítulo se describe la zona de estudio, lo localización, morfología, climatología, hidrología y oceanografía. Esta descripción se hace con base en la información disponible a la fecha.

#### **1.3.1 Localización y Morfología**

La Bahía de Paracas se encuentra ubicada en el Distrito de Paracas en la Provincia de Pisco, Región Ica, entre los  $13^{\circ} 47' 2''$  a  $13^{\circ} 51' 5''$  S y  $76^{\circ} 15' 0''$  a  $77^{\circ} 18' 5''$  O (Figura 2.5), limita por el norte con la Bahía Pisco y por el sur con la península de Paracas, tiene una extensión aproximada del borde costero de 24 km. Se encuentra dividida por el límite norte de la Reserva Nacional de Paracas (creada mediante el D.S. 1281-75-AG, del 25/09/1975).

Su borde costero se caracteriza por la presencia de humedales reconocidos por la Convención Relativa de Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas (RAMSAR), inscrita en la Lista de Humedales de Importancia Internacional, el 10 de Abril de 1992, que está conformado por playa Santo Domingo, La Aguada, Cangrejal, El Sequión y playa Atenas.



Figura 5. Área de estudio (Bahía de Paracas)

La Bahía y alrededores, se denomina “zona de Pisco”, por las características morfológicas del litoral y la batimetría (ver figura 5). La zona comprendida entre Caucato, la desembocadura del río Pisco y el fondo de la Bahía se encuentra casi al nivel del mar, profundizándose en Punta Sequión y Punta Pejerrey. Aquí se inicia la zona de acantilados. EL relieve del fondo submarino frente al borde costero de Pisco es de suave pendiente, haciéndose marcado frente a la desembocadura del río Pisco. La configuración geográfica de la Península de Paracas y la Isla San Gallán son las características geográficas más relevantes. Al Sur está el área de afloramientos intensos y permanentes de San Juan en donde la circulación superficial es forzada por vientos. Los principales factores en el desarrollo económico de la ciudad de Pisco son el turismo, la pesca y la industria de transformación pesquera.

La bahía de Paracas ha logrado un desarrollo industrial durante los últimos años, siendo la pesquería la actividad más importante de la región por la presencia de fábricas dedicadas a actividades conserveras y productoras de harina y aceite de pescado. La producción genera gran cantidad de materia orgánica en suspensión, grasas, aceites y otros residuos que son arrojados al ecosistemas marinos (Jacinto M.E. 1996)

En la bahía se encuentra el puerto San Martín donde se desarrolla la actividad portuaria. Dentro de la Bahía se reciben las descargas de los colectores urbanos y emisores submarinos provenientes de la zona urbana. Por otro lado la geomorfología costera protege la bahía de corrientes y oleaje.

Los sedimentos en la Bahía de Paracas son de texturas limosas, limoarcillosas, arcilla y fango; están asociados a bajas intensidades de corrientes. Los sedimentos arenosos (arena y arenas limosas) que predominan, se distribuyen muy cerca de la costa.

Esta estrecha franja costera se amplía cerca de la desembocadura del río Pisco, que es el principal afluente de material al mar. Cerca de la costa se incrementa la corriente y el oleaje, transportando el material más fino hacia lugares donde la corriente es menor y ocurre una sedimentación. En la zona Sur de la bahía hacia la Puntilla se presentan mezclas de fango y arena (texturas de arcilla, arena arcillosa y fango). Frente a San Andrés



existen fondos rocosos cerca de la línea de costa donde se presenta la mayor energía hidrodinámica ocasionada por el oleaje. Dentro de la bahía la energía de las corrientes es menor, la morfología del fondo tiene una topografía plana y ciertas depresiones.

### ***1.3.2 Climatología y meteorología***

El clima se caracteriza por ser templado, desértico y oceánico. Para la caracterización climática se ha considerado la temperatura, precipitación, humedad relativa y vientos, etc.

### ***1.3.3 Temperatura del aire***

Temperatura El área de estudio se caracteriza por ser un zona, árida, soleada y cálida durante el verano, de diciembre a marzo y templada a sensiblemente fría durante los meses de invierno. Por registros de temperaturas se sabe que la media anual de temperatura máxima y mínima entre el período 1980 –2001, fue de 23.7 °C y 15.8 °C respectivamente. En esta serie de datos, durante la estación del verano se registró una temperatura promedio de 20 °C. Mientras que para la estación del invierno, se registró una temperatura máxima promedio fue de 20.8 °C y una temperatura mínima de 14.6°C. Entre los años 1980 – 2001, el rango entre las temperaturas máximas y mínimas no superaron los 7 ° C. Las temperaturas mínimas generalmente se registran entre las 6.00 y las 8.00 horas, mientras que las temperaturas máximas se presentan entre las 14.00 y las 18.00 horas. En el desierto la medida en la estación Lanchas, alcanza unas temperaturas máximas de 31.9°C y como temperaturas mínimas de 15.8 °C. Sin embargo hay temperaturas extremas que se presentan cuando se presentan fenómenos extraordinarios como el fenómeno de El Niño, el cual aumenta sensiblemente la temperatura, pero no modifica la condición desértica del lugar.

### **1.3.4 Precipitación**

La precipitación es muy escasa, en esta zona del presente proyecto por ser una de las zonas áridas de la costa de nuestro país, siendo los meses de posible ocurrencia de ligeras lloviznas, en la estación invernal, estas son nieblas densas sobresaturadas, típicas de esta región, predominantemente en los meses de invierno (junio a agosto), es decir en el área del proyecto, las garúas se muestran frecuentes en gran parte del año (mayo a noviembre), pero en esta zona, influenciada por los fuertes vientos Paracas y los cambios de presión debidos al extenso mar superficial y Bahía de Paracas, la nubosidad y humedad atmosférica son menores al resto de la costa central; siendo el promedio total anual de 1,83 mm, proveniente principalmente de la condensación de las neblinas invernales. En conclusión, podemos decir que esta zona es extremadamente árida, con precipitaciones inferiores a 50 mm anuales, con precipitaciones escasas y normalmente inferiores a 15 mm anuales, solo excepcionalmente se producen lluvias de gran intensidad pero de corta duración y que tienen un origen extrazonal; se estima que en este tramo comprendido en el desierto litoral, se presenta una precipitación promedio anual de 20 mm, desde un nivel altitudinal de 0 a 400 msnm.

### **1.3.5 Humedad relativa**

La humedad relativa promedio anual oscila entre 81 a 82% y se presenta durante los meses de verano, mientras que los valores más altos se registran entre los meses de mayo y septiembre y oscilan en 86%, se conoce que la humedad atmosférica es alta en el litoral y disminuye hacia el interior; el desierto costero de esta zona es considerado uno de los más secos del mundo.

### **1.3.6 Vientos**

La información existente para este parámetro es muy reducida, porque sólo se tienen datos de la estación Pisco; el régimen de vientos en el litoral costero es bastante regular; la velocidad durante el año es débil salvo excepciones que generan vientos de mediana a fuerte intensidad, la velocidad del viento se presenta comúnmente mayor en horas del día que en horas de la noche, la máxima velocidad por lo general se presentan en las primeras horas de la tarde y la mínima en las primeras horas de la mañana, antes de la salida del sol.

Las direcciones predominantes son: sur, sur oeste y algunas componentes del oeste, con velocidades entre 2 y 17 m/s., teniendo en cuenta los registros de viento disponibles, se tiene que la velocidad del viento promedio es de 5 y 8 m/s (20 y 30 km/h), en tanto que la máxima velocidad puede superar valores de 17 m/s (60 km/h), esto ocurre mayormente cuando se presenta el viento "Paracas", que se forman por las diferencias barométricas que hay principalmente entre las zonas desérticas interiores y el mar amplio y poco profundo de la bahía de Paracas, y que se caracteriza por ser muy fuerte y elevar las partículas de arena haciendo imposible la visibilidad, hecho que se observa principalmente en el mes de agosto, esto hace notar la presencia de los vientos "Paracas" comunes en esta zona, que son muy intensos y se presentan saturados de polvo y arena, alcanzando velocidades de hasta 17,44 nudos, entre los meses de julio y agosto; estos se presentan entre la península de Paracas y Pisco y provoca la comúnmente llamada "lluvia de arena" o "paraca", que da su nombre al área. La dirección predominante del viento cambia frecuentemente con las estaciones del año, que modifican la temperatura y la presión entre los océanos y continentes; las observaciones de los vientos en esta zona demuestran que el curso anual de la velocidad no se debe sólo a la influencia directa de la radiación solar sino también al intercambio en gran escala de la circulación general. (Fuente, Estudio Línea Base Ambiental, MO CONTRATISTAS Y SERVICIOS GENERALES SAC)

## **1.4 Hidrología**

El Sistema Hidrográfico principal de la zona de estudio pertenece a la vertiente del Pacífico, cuenca del río Pisco.

La información disponible sobre las reservas hídricas en esta región de estudio del proyecto (Pisco-Paracas), indican que el acuífero se difunde a través de los sedimentos aluviales no consolidados depositados por el río Pisco; la alimentación de la napa freática se debe casi exclusivamente a las infiltraciones del actual río Pisco y otro tanto de los canales de riego, poco se atribuye a filtraciones del río seco de rumbo NE-SW, que es un paleocauce del río Pisco y a nivel litoral se conoce que no existe suministro para el acuífero debido a las precipitaciones pluviales. Inventarios de Cuerpos de Agua

### **1.4.1 Cursos de Agua de Régimen Permanente: Río Pisco**

El curso de agua dulce más próximo a la zona de estudio es el río Pisco, el cual tiene su origen en la laguna Pultoc (Departamento de Huancavelica) ubicada a 4 490 msnm. El área de la cuenca es de 4 416 km<sup>2</sup> y tiene una longitud aproximada de 170 Km. desde la naciente en la laguna Pultoc hasta su desembocadura en el Océano Pacífico. La cuenca tiene una forma ensanchada en las nacientes y alargada angosta en su desembocadura, siguiendo un rumbo esencialmente este-oeste desde la confluencia del río Huaytará su último afluente importante.

La estación Hidrométrica de Letrayoc es la única con que cuenta el río Pisco, está ubicada en la cabecera del valle agrícola; geográficamente, su ubicación es apropiada pues registra el rendimiento de la totalidad de la cuenca húmeda.

Aguas arriba de esta estación, existen aproximadamente 3 000 ha (hectareas) bajo riego, cuyo consumo, si bien con poca incidencia, hace disminuir el caudal de escurrimiento natural de la cuenca. En esta estación se registran caudales cuatro veces al día, en horario de 6:00 a.m., 12:00 m, 6:00 p.m. y 0:00 a.m.

La escorrentía superficial de los ríos Huaytará y Pisco se debería principalmente a las precipitaciones estacionales que ocurren en las partes altas de la cuenca. La máxima descarga del río registrada en la estación Letrayoc (13° 40" S y 75° 45" W, 640 msnm) ha sido de 355m<sup>3</sup> /s y la mínima de 0,54m<sup>3</sup> /s. La descarga media anual ha sido calculada en 25,98 m<sup>3</sup> /s (INRENA 2002).

El régimen del río Pisco, puede ser dividido en tres periodos característicos que conforman un ciclo:

- a) Período de Avenidas, que se originan en los meses de enero a Marzo.
- b) Período de Estiaje, comprendido en los meses de Agosto a Diciembre.
- c) Período Transicional, entre el fin de las avenidas y el principio del estiaje en los meses de Abril a Julio. Este régimen, es una consecuencia directa del comportamiento de las precipitaciones que se presentan en la cuenca húmeda, siendo muy poco afectado por las obras de regulación construidas en la parte alta.

La fisiografía de la cuenca receptora, caracterizada por fuertes pendientes y superficie accidentada, así como su bajo poder de retención debido a la escasa cobertura vegetal, determinan que la precipitación se convierta en forma inmediata en descarga superficial del río.

#### **1.4.2 Cursos de Agua de Régimen Estacional**

Estos cursos de agua tienen circulación hidrológica sólo durante los meses lluviosos de verano, especialmente cuando ocurren años húmedos o cuando se presenta el fenómeno El Niño. El escurrimiento de estas quebradas puede representar por breves momentos caudales de varios m<sup>3</sup>/seg., aunque se trata de flujos altamente saturados en sólidos en suspensión y arrastre, que actúan como avenidas torrenciales conocidas en el Perú como "huaycos". Luego de estas avenidas estacionales, los caudales descienden rápidamente hasta pocos litros por segundo, para secarse completamente durante varios meses de la estación seca.

### **1.4.3 Caudales Medios y Caudales Máximos de Avenidas**

Los caudales medios en el río Pisco, registrados en la estación Letrayoc para el periodo 1950-1999, determinan un caudal medio anual de 24,66 m<sup>3</sup>/s, un máximo medio anual de 52,72 m<sup>3</sup>/s y un mínimo medio anual de 6,34 m<sup>3</sup>/s. De toda esta serie de caudales calculados en base a registros diarios de caudales, el caudal medio mensual máximo pertenece al mes de febrero de 1984 con 312,36 m<sup>3</sup>/s y el mínimo medio mensual pertenece a noviembre de 1990 con 0,56 m<sup>3</sup>/s. .

El acuífero de la cuenca del río Pisco está conformado por materiales de origen aluvial de la edad cuaternaria. La morfología de la napa es relativamente uniforme y el flujo subterráneo sigue dos trayectorias principales: la primera de sureste a noroeste y la segunda de noreste a suroeste; mientras que su gradiente hidráulica varía de 0,64 % a 2,25 %.

La profundidad de la napa freática en el valle fluctúa entre 0,34 y 32m, la conductividad eléctrica en el área de estudio fluctúa entre 0,44 y 4,90 mS/cm., valores que caracterizan aguas de baja a alta mineralización. La dureza de las aguas en el valle fluctúa entre 39,9 a 1470,4 mg/l de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>), que implica la presencia de aguas dulces a muy duras. (Fuente, Estudio Línea Base Ambiental, NO CONTRATISTAS Y SERVICIOS GENERALES SAC).

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

El conocer y entender cada uno de los factores que alteran y definen la circulación de estos cuerpos de agua, permitirá identificar y definir sobre bases sólidas, la hidrodinámica en la bahía de Paracas.

#### ***2.1 Introducción***

En sistemas de aguas costeras semicerrados como lagos, estuarios, puertos y bahías, el viento, la onda de marea, los gradientes de densidad del agua, las condiciones meteorológicas, la batimetría y las descargas de agua dulce inducidas al sistema son factores que compiten constantemente por modificar la circulación y, en otros escenarios la mezcla del sistema está presente lo que da como resultado un sistema complejo e inestable (Fischer et al., 1979).

En sistemas semicerrados de aguas costeras, donde la dinámica es controlada por las corrientes de marea, los intercambios surgen debido a que las distribuciones espaciales de las corrientes y de las propiedades transportadas, no son simétricas.

En una zona donde las surgencias costeras enriquecen los niveles superiores del océano, las aguas nuevas durante cada ciclo de marea favorecen también el enriquecimiento dentro del sistema.

El gradiente de densidad vertical es otro factor importante en el intercambio del agua entre un sistema semicerrado y el océano adyacente (Bakun y Nelson, 1977)

El viento, la rotación terrestre y la fricción con el fondo son considerados factores secundarios que modifican en menor escala estos patrones de intercambio en sistemas semicerrado-océano, ya que solo pueden apreciarse al eliminar el efecto de marea

(circulación residual o submareal). Sin embargo, son importantes, pues la circulación residual determina como se encuentra el sistema.

## **2.2 Hidrodinámica De Sistemas Semicerrados**

Se define como cuerpos de agua influenciados por la descarga de un río (agua dulce) y/o parcialmente conectados a un océano o mar adyacente (agua salada).

Se identifica cuatro tipos básicos de distribución agua salada – agua dulce: cuña de sal, horizontalmente estratificado, verticalmente estratificado y verticalmente mezclado.

La interacción entre estos cuatro tipos de estuarios da lugar a otro tipo de estuario, llamado estuario intermitente, en el que se pueden encontrar dinámicas representativas de los cuatro tipos básicos de estuarios, dependiendo de la época del año y de la intensidad de la descarga de agua dulce.

En ausencia de descarga de agua dulce se produce un tipo adicional de estuario llamado estuario inverso o hipersalino, en el que generalmente la salinidad se incrementa de la boca hacia la cabeza, debido al exceso de evaporación sobre precipitación (Tomczack, 2002).

Los conceptos clásicos sobre la hidrodinámica de lagunas, bahías, puertos o cuerpos de agua costeros, en general, consideran 3 agentes que modifican la dinámica de manera directa: la marea, las variables meteorológicas y la batimetría.

Estos forzamientos generan patrones de circulación inmediata y dan lugar a la formación de otros factores que empiezan a interactuar con ellos (apilamientos de agua, gradientes de presión, gradientes de densidad, entre otros), y que incluso en algunas ocasiones llegan a ser más importantes que los forzamientos primarios (Fisher et al., 1979).

Durante los años 1990 y 2000 los estudios se restringían solo a la medición de parámetros oceanográficos (salinidad, temperatura, densidad) durante periodos de tiempo cortos (2-3 días). Las corrientes, la presión, la batimetría eran parámetros difíciles



de medir en áreas costeras por esos años. El uso de nuevas tecnologías de medición (ADCP's, CTD's, ecosondas, etc.) y de modelos numéricos y analíticos, fue el factor determinante que permitió ahondar en el estudio de la dinámica de estos sistemas.

Actualmente, la literatura sobre estos sistemas es vasta y abarca diversos tipos de circulación. En bahías, puertos o lagunas costeras donde los gradientes de densidad vertical son despreciables, se ha demostrado que la dinámica obedece a los forzamientos de marea, viento y batimetría.

En particular el viento genera patrones de circulación superficial (Fischer et al., 1979); esto favorece la mezcla vertical e incluso llega a afectar el nivel de mar (Bowden, 1978). Dentro de los estudios enfocados sobre el efecto del viento encontramos a (Argote et al. 1991) quienes encuentran la formación de dos giros en una bahía como respuesta al forzamiento de viento. La influencia del viento llega a ser tan importante que da lugar a diferentes dinámicas en función de la dirección del viento (Valle Levinson et al. (2001b)). Los autores encuentran también que bajo ciertas condiciones de viento, se genera apilamiento de agua y que a su vez induce corrientes.

En estos sistemas parcialmente conectados al océano adyacente, la marea es el agente que modifica en primera instancia la circulación (Fischer et al., 1979; Tomzak, 2002). Por lo tanto, al eliminar el efecto del flujo y reflujo de la marea es posible observar el transporte neto o circulación residual dentro del sistema.

Diversos estudios han demostrado la dependencia de los patrones de circulación con la rotación de la tierra y los efectos de fricción inducidos por viento y marea (alta turbulencia).

Mediante datos (Valle Levinson et al., 2001a; Valle Levinson y Kamazima, 1997, 1995) y modelos analíticos (Valle Levinson et al., 2003; Kasai et al., 2000) se ha mostrado

evidencia de que el intercambio entre los cuerpos de agua costeros y el océano adyacente, se restringe a los canales profundos y a los "bajos" como respuesta al balance entre los efectos de la rotación de la tierra y los efectos de fricción.

Experimentos de campo indican que los eventos de estratificación y desestratificación son comunes en este tipo de sistemas (Ramírez e Imberger, 2000). Las variaciones en tiempo y espacio de las características de mezcla dependen directamente de la variación de los factores que la domina. Es decir, la zona que experimenta los mayores gradientes de densidad y por lo tanto de estratificación y circulación termohalina, es la zona directamente afectada por la descarga del río (Schroeder et al., 1990). En el caso de una bahía la zona menos propensa a estratificación es la boca de conexión con el océano, debido a la constricción morfológica que ocasiona un aumento en la velocidad de las corrientes.

### ***2.3 Modelos hidrodinámicos***

Muchos de los modelos costeros se han concentrado en modelar las zonas más cercanas a la costa y en particular los estuarios y bahías, pues es donde existe mayor interacción con las actividades humanas. Los ambientes estuarios son de particular importancia por la diversidad biológica que ellos soportan, principalmente por los aportes de nutrientes transportados por los ríos y dadas sus condiciones son especialmente sensibles y mantienen sus estados de equilibrio dependiendo de los cambios, tanto en el río como en el mar.

Para el análisis hidrodinámico de estos ambientes es necesario resolver el sistema de ecuaciones diferenciales constituido por las ecuaciones de Reynolds, la ecuación de conservación de masa, algún modelo de turbulencia y, en algunos casos, una ecuación de mezcla, junto con una ecuación de conservación de energía. Acoplado a un modelo hidrodinámico se pueden también resolver modelos de calidad de agua. Para la modelación de la calidad del agua además de la solución de la hidrodinámica, hay que modelar los procesos químicos y biológicos que ocurren en el agua, lo que implica un

esfuerzo de modelación adicional para considerar la mayor cantidad de los procesos involucrados (Chapra, 1997).

En la actualidad existen gran cantidad de modelos hidrodinámicos tridimensionales y diversas modificaciones de ellos, utilizados para la modelación en zonas costeras. En general, debido a que los fenómenos hidrodinámicos se producen en diferentes escalas tanto en el espacio como en el tiempo, la solución simultánea en estas diferentes escalas no es posible con los recursos actuales, y para resolver este problema estos modelos recurren a parametrizaciones de ciertos fenómenos, por lo que existen diferentes modelos que se diferencian en las ecuaciones que resuelven. Adicionalmente, existen diferentes técnicas numéricas de solución de dichas ecuaciones. Existen, entonces, diferentes modelos hidrodinámicos, con diferentes limitaciones, rangos y campos de aplicación (Castañedo, 2000).

Algunas de las principales diferencias que existen entre los modelos hidrodinámicos tridimensionales para zonas costeras son:

- Las simplificaciones en el tratamiento que realizan a la ecuación de momentum en la dirección vertical, utilizando o no la distribución hidrostática de presiones. Algunos modelos utilizan un concepto de compresibilidad artificial (Chorin ,1967 citado por Catañedo, 2000), y otros modelos, conocidos como cuasi-hidrostáticos, resuelven primero la componente hidrostática y luego corrigen la solución introduciendo la parte dinámica de la presión. Un modelo de este tipo es el presentado por Casulli y Stelling (1998) para flujos cuasi-hidrostáticos, en los cuales la presión dinámica representa una pequeña perturbación.
- El manejo que se le da a la solución a lo largo del tiempo y la forma en que se solucionan las ecuaciones. Castañedo (2000) enuncia tres grupos: un primer grupo como el modelo de Casulli y Cheng (1992) donde se resuelven las ecuaciones 3D en cada intervalo de tiempo; un segundo grupo como el de modelos espectrales (Davies y Aldridge, 1993) donde resuelven las ecuaciones promediadas en la vertical y luego calculan el perfil de velocidades utilizando unos coeficientes y unas funciones específicas para corregir la solución promediada en la vertical; y un tercer grupo de modelos (utilizado por

Castañedo, 2000; Blumberg y Mellor, 1987; Sheng, 1990; Jin y Kranenburg, 1993), conocidos como método *splitting*, los cuales dividen el proceso en dos partes, en una primera se resuelven las ecuaciones promediadas en la vertical y en un segundo paso se calcula la estructura vertical de las variables.

- El método numérico utilizado. Entre los diversos métodos aproximados para la discretización de las ecuaciones se pueden mencionar las diferencias finitas, los elementos finitos, y los volúmenes finitos (o de control).
- La representación de la malla vertical. Entre las principales formas de discretizar el dominio computacional en la dirección vertical se encuentran: el sistema coordenada-z, en el cual la vertical se divide en niveles  $\Delta z$  constantes. Una segunda representación, conocida como coordenada isopicna, transforma las coordenadas verticales siguiendo líneas de igual salinidad o densidad potencial. Un tercer sistema es el denominado coordenada  $-\sigma$  en el que se transforma la coordenada vertical de tal forma que sea constante independiente de la profundidad, para lo cual se utiliza una transformación de la forma  $P = (z-h)/(h+T)$  donde  $z$  es la coordenada vertical,  $h$  es la profundidad y  $T$  es la cota de la superficie libre. Esta representación es la utilizada en modelos como los de Blumberg et al. (1993) y Sheng (1990).
- Las ecuaciones de cierre y el manejo dado a la turbulencia. Se pueden mencionar modelos que utilizan el concepto de coeficiente de torbellino (Eddy viscosity) (Boussinesq, 1877 citado por Castañedo, 2000) el cual, utiliza un modelo análogo al de las tensiones viscosas, en donde las tensiones turbulentas son proporcionales al gradiente de la velocidad promedio. Los modelos de turbulencia disponibles en la actualidad se pueden clasificar como: modelos algebraicos, modelos de una ecuación, modelos de dos ecuaciones y modelos de cascadas de energía (Wilcox, 1993, Kundu, 1990). Dada la diferencia en escalas de espacio y tiempo entre los procesos verticales y horizontales se suele dar un tratamiento diferente a la turbulencia en la horizontal y en la vertical. Gran cantidad de modelos como los de Blumberg y Mellor (1987), Casulli y Cheng (1992),

Sheng (1990) utilizan un coeficiente de torbellino horizontal constante. Para modelar la turbulencia vertical existen diferentes opciones de acuerdo con el tipo de flujo que se quiere modelar.

Cada modelo tiene una o varias hipótesis de partida y una serie de parámetros que es necesario ajustar a las condiciones locales y por ello es necesaria una adecuada calibración y validación de los modelos antes de su utilización. Además, por la gran cantidad de modelos de simulación hidrodinámica disponibles, se han desarrollado metodologías y procesos más o menos estandarizados para calibración y validación (Chapra, 1997; Palacio, 2002).

Otra consideración importante para el uso de estos modelos es la adecuada definición de las condiciones de frontera. En zonas costeras (bahías y puertos) se debe definir adecuadamente las condiciones tanto en la frontera abierta al océano, como la frontera fluvial. Esta información se podría obtener de mediciones o del uso de modelos anidados (es decir, utilizar un modelo general, que incluya la zona de estudio y que arroje información sobre las condiciones de frontera y luego usar éstas condiciones para un modelo mucho más detallado, Palacio, 2002 b).

En el presente estudio se utilizó el modelo ELCOM, modelo hidrodinámico desarrollado por el "Centre for Water Research" (CWR) de la Universidad de "Western Australia". Estos modelos han sido aplicados exitosamente en una gran variedad de proyectos en golfos, estuarios y lagos, tal como se puede verificar en la página web de CWR o en las referencias que se citan a continuación: Alavian et al. (1992), Dallimore et al. (2001), Hodges et al. (2000), Stocker e Imberbger (2003), Ramírez y Imberger (2002), Gal et al. (2003), León et al. (2004) y Romero et al. (2004), entre muchas otras.

#### **2.4 Características del modelo ELCOM**

El modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) es un modelo hidrodinámico tridimensional que simula flujos a superficie libre en estuarios considerando la salinidad, la temperatura, la acción del viento y las mareas. Las principales características físicas y numéricas del modelo se presentan en detalle en el manual científico del mismo,

disponible en la dirección web: <http://www.cwr.uwa.edu.au/services/models>. A continuación se presentan algunas de sus características.

## **2.5 Ecuaciones hidrodinámicas fundamentales**

El modelo ELCOM resuelve las ecuaciones de transporte de Reynolds o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas para estado no estacionario y una ecuación para transporte de especies, en las que se usa la aproximación de Boussinesq y se desprecian los términos no hidrostáticos de la presión. La evolución de la superficie libre se encuentra de la integración vertical de la ecuación de conservación de masa. Para el manejo de la turbulencia utiliza una aproximación del coeficiente de torbellino en la horizontal (Hodges et al., 2000) y un modelo uni-dimensional de mezcla en la vertical (Imberger y Paterson, 1990).

El mezclado vertical se calcula utilizando un esquema explícito de balance de energía cinética turbulenta que se aplica en cada paso temporal (Hodges et al., 2000) y el esfuerzo inducido por el viento induce un flujo de momentum que se distribuye en la vertical utilizando un modelo de capa de mezcla. Para la solución numérica de las ecuaciones se utiliza un método semi-implícito con una discretización cuadrática tipo Euler-Lagrange de los términos advectivos en las ecuaciones de momentum (Cassulli y Cheng, 1992) y el esquema ULTIMATE QUICKEST para un adecuado manejo de los términos advectivos en la ecuación de transporte para los escalares (Leonard, 1991).

A continuación presentamos las ecuaciones hidrodinámicas utilizadas en ELCOM (adaptado de Hodges y Dalimore, 2001, manual científico ELCOM)

Ecuación de conservación del momentum (Reynolds)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \\ = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_3 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\} \\ + f \bar{v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \\ = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_1 \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_3 \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right\} \\ - f \bar{u} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \\ = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ v_1 \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ v_2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ v_3 \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right\} \end{aligned}$$

Ecuación de conservación de masa:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

Condición de frontera de momentum en la superficie libre

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

Condición de frontera de momentum en el fondo y en las paredes

$$\bar{u} = 0 \quad \bar{v} = 0 \quad \bar{w} = 0$$

Transporte de escalares

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{u}c}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{v}c}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{w}c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + S_c$$

Condición de frontera para transporte de escalares

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0$$

Evolución de la superficie libre:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \bar{u} dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \bar{v} dz$$

Esfuerzo cortante del viento en la superficie

$$(u_0)^2 = C_{10m} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (W_y W_y)^{1/2} W_x \quad (v_0)^2 = C_{10m} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (W_x W_x)^{1/2} W_y$$

Momentum inducido por el viento

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{(u_0)^2}{h} \quad \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \frac{(v_0)^2}{h}$$

Donde,  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$  y  $\bar{w}$  representan las componentes de la velocidad promediadas en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $\eta$  la altura de la superficie libre medida con respecto a un nivel de referencia asumido (el cual puede ser tomado como el nivel medio del mar);  $\rho'$  la densidad;  $\rho_0$  la densidad de referencia;  $\nu_1, \nu_2$  y  $\nu_3$  los coeficiente de difusividad (para la salinidad, la temperatura o alguna otra sustancia según el caso) en direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ ;  $S_c$  las fuentes o sumidero del escalar transportado;  $c$  la concentración del escalar transportado;  $h$  la profundidad de la capa con respecto al nivel de referencia asumido;  $C_{10m}$  el coeficiente degradado del viento;  $W_y$  la magnitud de la velocidad del viento en dirección  $y$ ;  $W_x$  la magnitud de la velocidad del viento en dirección  $x$ ;  $\rho_{aire}$  densidad del aire;  $\rho_{agua}$  densidad del agua (de la capa superficial);  $u_0$ ,  $v_0$  las velocidades de corte en la dirección  $x$  y  $y$ .



## 2.6 Condición en la superficie libre

En la superficie libre hay una adición de momentum por el viento, la cual puede ser representada como una condición de esfuerzo cortante en la superficie libre de la siguiente forma:

$$\nu \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{z=n} = u_0^2$$

Donde  $\nu$  es el coeficiente de torbellino y  $u_0^2$  es la velocidad de corte calculado en función del esfuerzo generado por el viento. En el modelo no se utiliza un coeficiente de torbellino en la vertical, por lo que para simular la transferencia de momentum inducida por el viento se utiliza el espesor de la capa mezclada por el viento obtenida de acuerdo al modelo de mezcla vertical presentado por Hodges et al. (2000). Así la condición de frontera del viento es:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{u_0^2}{h}$$

Mayores detalles los puede consultar en Hodges (2000) e Imberger y Patterson (1990).

## 2.7 Condición en el fondo

ELCOM permite imponer tres tipos de condiciones de frontera en el fondo del dominio, correspondientes a la condición de no deslizamiento, deslizamiento total o la especificación de un esfuerzo de fricción (Hodges, 2000). Una condición para simular la mezcla inducida por el fondo puede ser calculada mediante una condición de capa béntica en la frontera (benthic boundary - layer), en la cual una fracción fija de la energía de cada capa es removida y transferida a la capa sobre ella, el proceso de mezcla empieza en el fondo y continua hacia arriba.

## 2.8 Conservación de salinidad y temperatura en las fronteras

Para las variables escalares (temperatura, salinidad, trazadores inertes), en las fronteras cerradas se aplica una condición tipo Newman, donde no existe cambio de dicha propiedad a través de la frontera. En las fronteras abiertas o donde existan algún tipo de flujo, se deben especificar un valor para cada una de 0.08 estas propiedades.

## 2.9 Termodinámica y flujos de masa

El modelo ELCOM incluye calentamiento debido a la penetración y radiación de onda corta y flujos de calor en la superficie debido a evaporación y convección de calor de la superficie del agua a la atmósfera en forma de calor sensible y radiación de onda larga. En la tabla 3.2 se presenta un resumen de los flujos termodinámicos utilizados en el modelo. Principales flujos termodinámicos utilizados en ELCOM (Hodges y Dalimore, 2006 en el manual científico de ELCOM)

## 2.10 Radiación de onda corta

La radiación de onda corta neta

$$Q_{sw} = (1 - r_a^{sw}) Q_{sw \text{ total}}$$

Hemisferio sur

$$r_a^{sw} = 0.08 + 0.02 \times \text{sen} \left( \frac{2\pi d}{D} - \frac{\pi}{2} \right)$$

Ecuador:

$$r_a^{sw} = 0.08$$

Hemisferio Norte:

$$r_a^{sw} = 0.08 + 0.02 \times \text{sen} \left( \frac{2\pi d}{D} + \frac{\pi}{2} \right)$$

Flujo de radiación de onda corta para la capa K:

$$\Delta Q = Q_k (1 - e^{-\eta_\alpha \Delta Z_k})$$

## 2.11 Radiación de onda larga

Radiación de onda larga incidente

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{lw}) Q_{lw \text{ incidente}} - \varepsilon_w \sigma T_w^4$$

Radiación de onda larga neta

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{lw}) Q_{lw \text{ neta}}$$

Cobertura de nubes

$$Q_{lw} = \left(1 - r_a^{(lw)}\right) (1 + 0.17 C^2) \varepsilon_\alpha (T_\alpha) \sigma T_\alpha^4 - \varepsilon_w \sigma T_w^4$$

Flujo de calor sensible

$$Q_{sh} = C_s \sigma_\alpha C_p U_\alpha (T_\alpha - T_w) \Delta T$$

Para un intervalo de tiempo  $\Delta T$

Flujo de calor latente

Cuando hay condensación

$$Q_{lh} = \min\left(0, \frac{0.622}{p} C_L \rho_\alpha L_E U_\alpha (e_a - e_s T_s) \Delta T\right)$$

El total de energía no penetrativa en la superficie

$$Q_{no-pen} = Q_{lw} + Q_{sh} + Q_{lh}$$

Donde:

$Q_{sw\ total}$  es la radiación de onda corta total incidente a la superficie

$r_a^{sw}$  es el albedo para la radiación de onda corta

$r_a^{lw}$  es el albedo para la radiación de onda larga, que el modelo toma como 0.03,

$\varepsilon_w$  es la emisividad de la superficie del agua, tomada como 0.96,

$\sigma$  es la constante de Stefan- Boltzman igual a  $5.6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$C$  es una fracción de cobertura de nubes (entre 0 y 1)

$C_s$  es el coeficiente de transferencia de calor sensible para la velocidad del viento medido a 10 m de la superficie del agua y se toma un valor por defecto de  $1.3 \times 10^{-3}$ ,

$\rho_a$  la densidad del aire

$C_p$  el calor específico del aire a presión constante (se toma un valor por defecto de 1000 Joules  $\times \text{Kg}^{-1} \times ^\circ\text{K}^{-1}$ ),

$U_s$  la velocidad del viento medida a 10 m sobre la superficie,

$T_a$  y  $T_{sw}$  son las temperaturas del aire y de la superficie del agua,

$P$  es la presión atmosférica

$C_L$  es el coeficiente de transferencia de calor latente (se toma un valor por defecto de  $1.3 \times 10^{-3}$  )

$L_E$  es el calor latente de evaporación del agua ( $2,453 \times 10^6$  Joules  $\times \text{Kg}^{-1}$  ),

$U_a$  la velocidad del viento medida a 10 m sobre la superficie,

$e_a$  la presión del vapor de aire,

$e_s$  la presión de saturación de vapor a una temperatura en la superficie del agua de  $T_{sw}$ , la cual se calcula como,

$$e_s(T_{sw}) = 100 \exp \left( 2.3026 \left( \frac{7.25 T_{sw}}{T_{sw} + 273.3} + 0.758 \right) \right)$$

## 2.12 Modelo de mezcla

Para entender los términos involucrados en este modelo de mezcla. Hodges et al. (2000) utilizan los siguientes términos de energía: (1) la energía cinética turbulenta disponible  $E_A$ , (2) la energía cinética turbulenta requerida para la mezcla  $E_R$ , (3) la energía cinética turbulenta disipada  $E_\epsilon$ , y (4) la energía residual del mezclado  $E_M$ .

Hodges et al. (2000) y Hodges (2000), caracterizan dos tipos de eventos en flujos estratificados, de acuerdo a la energía cinética turbulenta requerida para la mezcla:

(1) Mezcla convectiva con gradientes de densidad inestables que produce una disminución en la energía potencial en el fluido y una liberación de energía cinética turbulenta durante el mezclado de dicho gradiente de densidad inestable.

(2) Mezcla con gradientes de densidad estables que disipan energía turbulenta e incrementan la energía potencial del sistema.

Hodges et al. (2000), además, definen el concepto de capa de mezclado como una serie de celdas contiguas en la vertical que comparten la misma densidad y velocidad.

El modelo calcula cambios en la densidad a partir del modelo termodinámico, analiza si se produce mezcla estable o inestable y calcula la energía disponible para la mezcla en cada caso. Luego calcula la energía de mezcla debida al viento y la adiciona a la energía disponible en la superficie libre. Posteriormente, se adiciona a la energía disponible, la energía debida al cortante de velocidades entre las celdas. Teniendo en cuenta estas contribuciones, la mezcla se calcula capa a capa a lo largo de toda la columna de agua, comparando la energía disponible para mezcla ( $E_A$ ) (resultante de vuelcos convectivos, producción de esfuerzo cortante y mezclado del viento) y la energía residual del mezclado ( $E_M$ ) con los incrementos en la energía potencial ( $E_R$ ) requerida para mezclar una celda desde una capa inferior hacia arriba, cuando la suma entre la energía disponible  $E_A$  y la energía residual del mezclado  $E_M$  son mayores que la energía requerida para la mezcla  $E_R$ , estas celdas se convierten en una región bien mezclada. El modelo de mezcla realiza un barrido hacia las capas inferiores en la columna de agua adicionando la correspondiente energía disponible y comparada con la energía requerida para el mezclado, hasta que

alcance el final de la región bien mezclada, donde la energía disponible restante es reducida por disipación (E) y es almacenada en la capa inferior de la región bien mezclada, para luego ser transportado como un escalar (así la energía de mezclado puede ser acumulada con el tiempo). Mayores detalles sobre el modelo de mezcla se pueden encontrar en Hodges et al. (2000) o en Hodges (2000).

### **2.13 Método de solución numérica**

Los modelos hidrodinámicos del tipo de los utilizados para simulaciones en estuarios, utilizan, básicamente, las mismas ecuaciones para resolver la hidrodinámica, encontrándose las principales diferencias en el tratamiento que los diferentes autores dan al problema de la turbulencia y en la técnica de solución numérica utilizada. El modelo ELCOM utiliza un método semi-implícito de solución basado en el método presentado por Casulli y Cheng (1992). Las ecuaciones de transporte de Reynolds o ecuaciones de Navier-Stokes promediadas para estado no estacionario se discretizan en una malla cartesiana de una serie de paralelepípedos donde las componentes de la velocidad se definen para las caras de las celdas y las propiedades escalares en su centro. El modelo ELCOM realiza una discretización semi-implícita para las ecuaciones de momentum. La superficie libre se obtiene por integración de la ecuación de conservación de masa y se resuelve utilizando el método del gradiente conjugado (Casulli y Cheng, 1992).

Para los términos convectivos y viscosos, incluyendo los términos turbulentos en la horizontal, el modelo utiliza una discretización híbrida, utilizando diferentes esquemas para diferentes regiones de flujo, de acuerdo a los requerimientos de estabilidad numérica para cada región dados por el criterio de estabilidad de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), utilizando aproximaciones lineales semi-Lagrangianos o esquemas cuadráticos de Euler-Lagrange. Para el transporte de escalares utiliza la discretización de ULTIMATE QUICKEST (Leonard, 1991). Mayores detalles sobre el método de solución utilizado se encuentran en Hodges (2000).

## CAPITULO 3

### 3 METODOLOGÍA:

Se basa en la utilización de datos Oceanográficos en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú, para los meses de marzo y noviembre del 2014. Se caracterizó la hidrografía de la Bahía de Paracas. La información recopilada fue utilizada para aplicar el modelo.

Se describe en este capítulo el procedimiento de trabajo, la metodología del procesamiento de los datos y finalmente las simulaciones numéricas.

#### ***3.1 Simulación Numérica***

##### ***3.1.1 Descripción Del Modelo***

Para el estudio de la simulación hidrodinámica de la Bahía de Paracas se implementó el Estuary and Lake Computer Model (ELCOM), desarrollado en el Centre for Water Research (CWR), de la Universidad de Western Australia (UWA) (B.R.Hodges, 2000).

El modelo ELCOM utiliza principios hidrodinámicos y termodinámicos para simular el comportamiento espacial y temporal de distribuciones de velocidad, temperatura, salinidad y densidad, en cuerpos de agua semicerrados y estratificados, sometidos a forzamientos físicos externos; es considerado una herramienta de simulación numérica tridimensional para lagos, ríos y estuarios, que aplica módulos hidrodinámicos y termodinámicos.

El modelo resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y el transporte de escalares para un flujo no permanente, no viscoso e incompresible, utilizando la aproximación de Boussineq, y la aproximación hidrostática para la presión. La solución numérica de las ecuaciones se basa en el método semi-ímplicito de diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng (1992). El método de solución separa la mezcla y la difusión turbulenta de los cálculos de advección (Hodges, 2000). Los cambios en la

evolución de la superficie fue modelada usando el esquema semi - implícito de Casulli y Catani (1994). La advección de momentum utilizó un esquema de Euler-Lagrange de Casulli y Cheng (1992).

Las ecuaciones escritas para un espacio cartesiano con el eje Z vertical, positivo hacia arriba son:

$$\frac{\partial U_\alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_j} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x_\alpha} - \frac{g}{\rho_\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_{a'}^a \rho' dz \left( y \frac{\partial U_\alpha}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{u_\beta u_\alpha} - \epsilon_{\alpha\beta} f U_\beta \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\beta} (C U_j) = \frac{\partial}{\partial x_\beta} \left( k \frac{\partial C}{\partial x_\beta} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\beta} \overline{u_\beta c} + S \quad (2)$$

Dónde:  $\eta$  es la altura de la superficie libre,  $f$  es el parámetro de Coriolis;  $\nu$  y  $\kappa$  son los parámetros de viscosidad turbulenta y difusividad turbulenta, y  $S$  representa fuentes escalares. Las letras latinas mayúsculas y minúsculas distinguen a los promedios de las cantidades fluctuantes relativas a la escala de tiempo promediada, con  $(U_i, u_i)$  representando los vectores de velocidad y  $(C, c)$  representando un escalar (e.g. temperatura, salinidad o concentración de trazadores) (Hodges et al., 2000).

Se usa notación tensorial con la convención de suma de Einstein, aplicada al espacio tridimensional para los subíndices latinos (e.g.  $j=1,2,3$ ) y al espacio horizontal de dos componentes para los subíndices griegos (e.g.  $\alpha = 1,2$ ). El tensor permutación de dos componentes  $\epsilon_{\alpha\beta}$  está definido de tal manera que:

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 0 \quad ; \quad \epsilon_{12} = 1 \quad ; \quad \epsilon_{21} = -1$$



La evolución de la superficie libre se rige por la integración vertical de la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles, aplicada a la condición cinemática de frontera (Hodges et al., 2000):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \int_b^\eta U_\alpha dz \quad (3)$$

La simulación de la turbulencia está basada en un modelo de capas para mezcla por viento, transportando momentum desde la superficie por medio de mezcla en regiones con gradientes de densidad inestable (Hodges et al., 2000).

El esfuerzo del viento en la superficie libre, fue calculado a partir de la velocidad del viento de la siguiente manera:

$$\tau_\omega = \rho_\alpha C_D |u_\omega| u_\omega \quad (4)$$

Dónde:  $\rho_a$  es la densidad del aire tomada como  $1.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $u_w$  es la velocidad del viento medida a 10 m sobre la superficie del agua.

Las ecuaciones se resuelven numéricamente sobre una malla cartesiana rectangular que permite  $\Delta x$  y  $\Delta y$  variables, con  $\Delta z$  variable como función de  $z$  pero horizontalmente uniforme. El grillado está basado en la malla de Arakawa-C (Arakawa y Lamb, 1977) con las velocidades definidas en las caras de la celda mientras que la concentración de los escalares y la altura de la superficie libre se definen en el centro. En el fondo se impone una condición de no-deslizamiento (Dirichlet) y una condición de gradiente-cero (Neumann) a los escalares. En las paredes laterales o fronteras sólidas (celdas consideradas tierra) se consideraron condiciones de deslizamiento libre para las

componentes tangenciales, mientras que para las componentes normales se impuso la condición de no-flujo, es decir, gradiente cero a los escalares.

Los procesos de simulación con el modelo ELCOM incluyen respuestas a flujos inducidos por cambios en la pendiente de la superficie del agua (respuestas barotrópicas), flujos inducidos por cambios en la densidad en cuerpos de agua no homogéneos (respuestas baroclínicas), efectos rotacionales, esfuerzos del viento, intercambio térmico superficial, caudales afluentes y efluentes, transporte de sal, calor y escalares pasivos (trazadores).

Para la ejecución del modelo Hidrodinámico se requiere una adecuada información de campo de datos batimétricos, variables climáticas, niveles de agua, mediciones de corriente, información de viento; para realizar las simulaciones se preparó los datos en los formatos correspondientes relacionados con la geometría (batimetría) del dominio, las condiciones iniciales y de borde: los parámetros de configuración, de control y salida se ingresaron a través de archivos de entrada preparados manualmente.

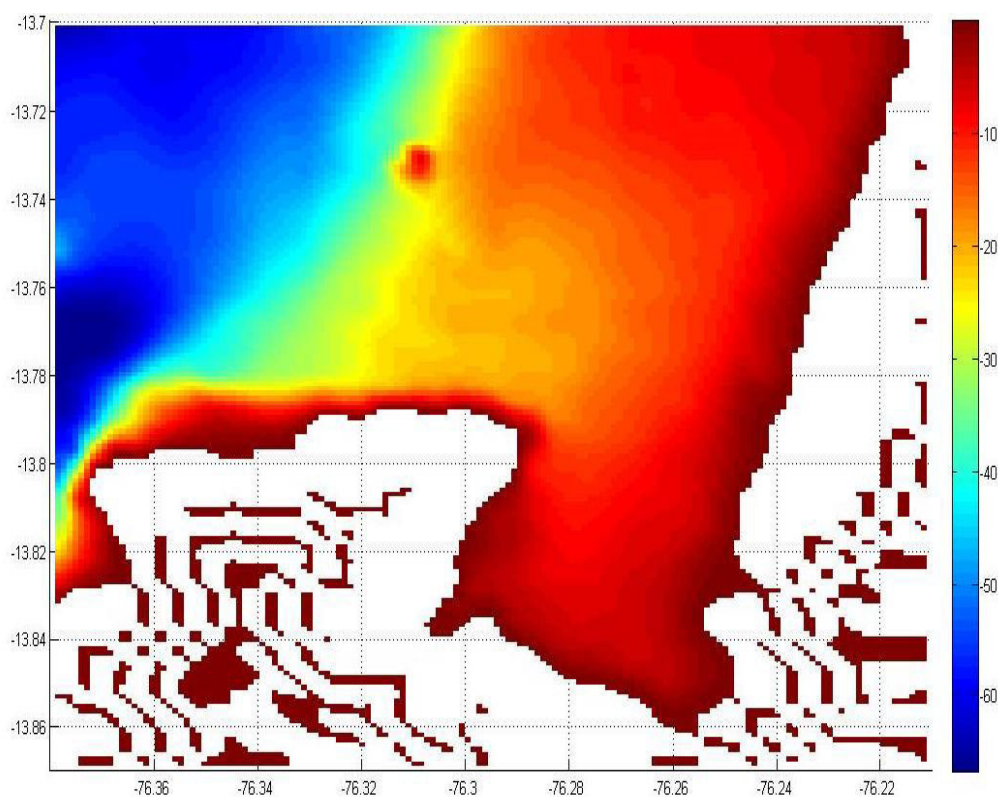
### ***3.1.2 Datos De Entrada Al Modelo***

El modelo ELCOM requiere como datos fundamentales la batimetría, series de tiempo de los forzamientos ambientales, condiciones iniciales y condiciones de frontera. A continuación se describe cada uno de ellos.

**3.1.2.1 Batimetría.** Uno de los parámetros más importantes de todo modelo es la definición del dominio de cálculo y de su batimetría. Como dominio de estudio en este trabajo se considera La Bahía de Paracas y alrededores, o también denominado “zona de Pisco”.

La información batimétrica y perfil costero en detalle, fueron extraídas de un estudio batimétrico realizada como parte de estudio en la zona, observándose que al interior de la Bahía las profundidades entre 0 y 65 m recorren de forma casi paralela a la línea de la costa a lo largo de todo el área de estudio. Esta información, ha sido ingresada al modelo numérico de corrientes marinas, mediante la interpolación de una grilla de cálculo, la cual presenta profundidades máximas de hasta 70 metros.

La información batimétrica y perfil costero en detalle, fueron extraídas de un estudio batimétrico realizada como parte de estudio en la zona. (Figura 3.1)



**Figura 6 - Batimetría del área de estudio, Bahía de Paracas, Pisco.**

**3.1.2.2 Forzantes Físicos.** El modelo fue forzado con series de tiempo de marea, radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento.

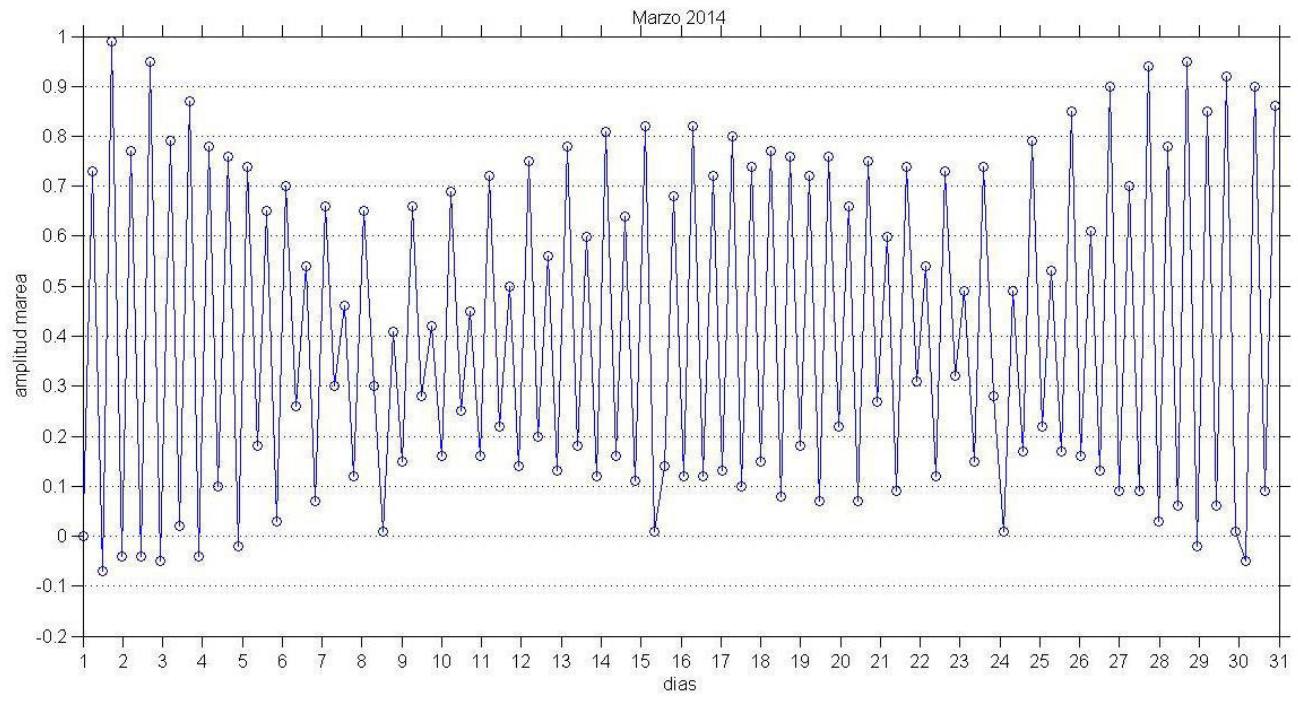
Las series de tiempo requieren un formato que consiste en un encabezado, seguido por columnas de datos. La primera columna debe tener el tiempo en día juliano; las siguientes columnas contienen los datos para ese instante de tiempo. El usuario no necesita dar información para el mismo intervalo que la simulación usa ( $\Delta t$ ): el modelo interpola linealmente para encontrar el valor apropiado para un instante de tiempo específico.

**a) Marea**

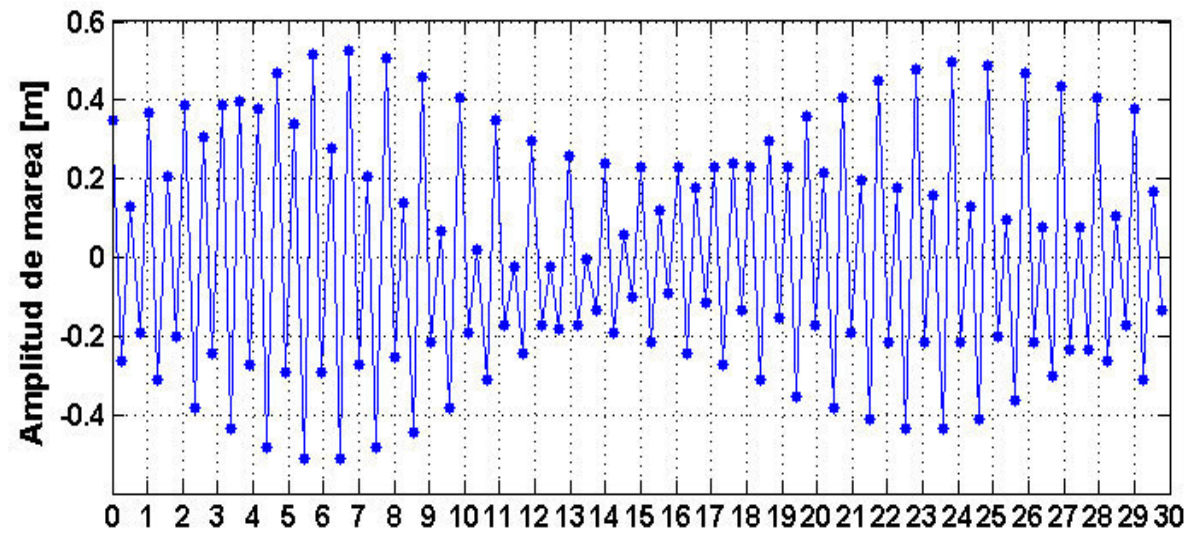
El modelo ELCOM utiliza el forzante de marea especificado la altura del nivel del mar en la frontera abierta. La variación del nivel de mar se obtuvo de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina. EL nivel de referencia fue el nivel medio del Mar (NMM).

Se elaboraron series de tiempo para la campaña simulada, con datos cada hora y referidas al Nivel Medio del Mar. (NMM). Presentamos la serie de tiempo de marea para las simulaciones

Los datos de mareas, se obtuvieron de la Tabla de Mareas del año 2014, de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina, los datos se promediaron cada 6 horas para los periodos de noviembre del 2014. El régimen de mareas es de tipo mixto preponderantemente de carácter semidiurno. La amplitud media fue de 0.54 m y en sicigias de 0.94 (Fuente Tabla de MAREAS), el valor máximo de la amplitud y de marea fue ~0,53 m en pleamar y se registró aproximadamente a las 18:52 h y las 19:55 h de los días 06 y 23 de noviembre respectivamente; mientras que el mínimo (~-0,5 m) fue en bajamar a las 11:25 h y 00:45 h de los días 6 y 23 de noviembre respectivamente (Figura 7).



**PERIODO MARZO**



**PERIODO NOVIEMBRE**

**Figura 7: Serie de datos de amplitud de mareas (Periodo de marzo y noviembre del 2014)**

**b) Viento**

ELCOM tiene la capacidad de simular escenarios con viento que varía en escala temporal (magnitud y dirección). La fuente de datos de viento fue de la Estación Meteorológica de Pisco; en este trabajo se aplicó viento con velocidad y dirección uniformes en todo el dominio, variando en tiempo según la serie de datos proporcionada.

Los datos de viento fueron registrados durante el periodo comprendido en el año 2014 para los meses de marzo y diciembre.

(Figura 3.3) y (figura 3.4) se presenta la serie de tiempo de los forzantes meteorológicos, la magnitud del viento, con las que se forzó el modelo para la campaña simulada.

CUADRO I. Estadística de la magnitud de los vientos diarios para el mes de Marzo 2014.

Rango de Magnitud (m/s)	N° de Datos	Porcentaje(%)	Máximo = 7.43
[0;2>	259	34.81%	Mínimo = 0
[2;4>	230	30.92%	Promedio = 3.01
[4;7.43>	255	34.27%	Desviación estándar = 2.0755
Total:	744	100%	Varianza = 4.3075

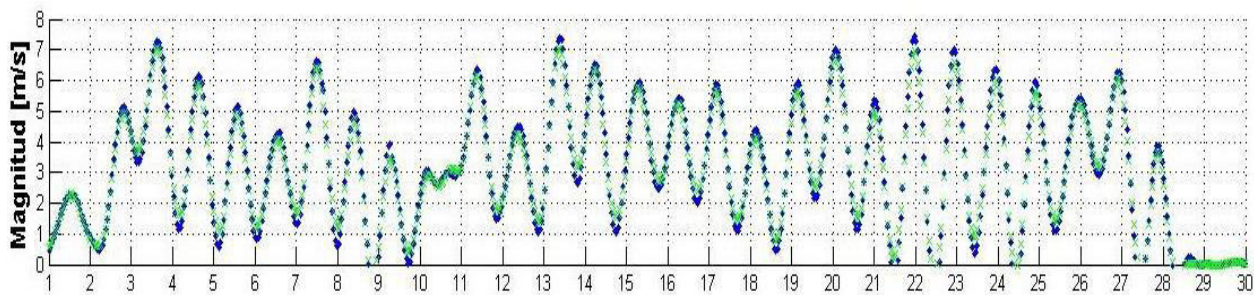


Figura 8 - serie de datos de tiempo (magnitud) con los que se forzó el modelo numérico.

Marzo -2014

CUADRO II. Estadística de la magnitud de los vientos diarios para el mes de noviembre 2014.

Rango de Magnitud (m/s)	N° de Datos	Porcentaje(%)	Máximo = 7.43
[0;3>	229	31.8%	Mínimo = 0
[3;6>	365	50,7%	Promedio = 4.0259
[6;9>	126	17.5%	Desviación estándar = 1.9188
Total:	720	100%	Varianza = 3.6819

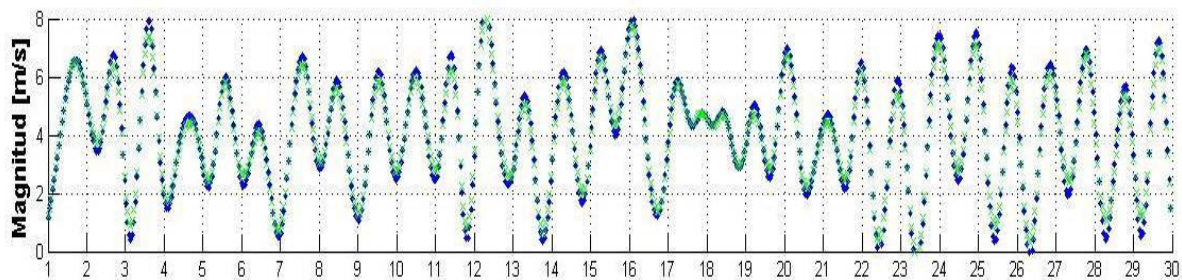


Figura 9 - Serie de datos de tiempo (magnitud) con los que se forzó el modelo numérico. Noviembre -2014



**3.1.2.3 Aspectos Considerados Para Calibrar La Simulación.** Para la calibrar y validar el modelo se realizaron varios experimentos numéricos. Se analizó la sensibilidad del modelo a parámetros físicos y se compararon las mediciones y las simulaciones obteniéndose ajustes adecuados.

En cuanto a las principales forzantes se han tomado en consideración lo siguiente:

- Mareas: fue necesario caracterizar la onda de marea para la zona de estudio, para este caso se empleó la información antes mencionada y de los armónicos de marea calculados. Los datos fueron tratados con la aplicación de la estadística descriptiva y filtrados para eliminar los errores sistemáticos.
- Viento: con la información de registro se preparó la serie de tiempo mensual (marzo - noviembre), con lo de acuerdo a los escenarios definidos; se tomó en consideración salidas numéricas en mapas de distribución horizontal.

**3.1.2.4 Condiciones en El Fondo.** ELCOM permite imponer tres tipos de condiciones de frontera en el fondo del dominio, correspondientes a la condición de no deslizamiento, deslizamiento total o la especificación de un esfuerzo de fricciones (Hodges, 2000). Una condición para simular la mezcla inducida por el fondo puede ser calculada mediante una condición de capa béntica en la frontera (benthic Boundary-layer), en la cual una fracción fija de la energía de cada capa es removida y transferida a la capa sobre ella, el proceso de mezcla empieza en el fondo y continúa hacia arriba.

### **3.1.2.5 Conservación De Salinidad Y Temperaturas**

**En Las Fronteras.** Para las variables escalares (temperatura, salinidad, trazadores inertes), en las frontera cerradas se aplica una condición de tipo Newman, donde no existe cambio de dicha propiedad a través de la frontera. En las fronteras abiertas o donde existían algún tipo de flujo, se deben especificar un valor para cada una de estas propiedades.

### **3.1.2.6 Termodinámica Y Flujos De Masa.**

El modelo ELCOM incluye calentamiento debido a la penetración de radiación de onda corta y flujos de calor en la superficie debido a evaporación y convección de calor de la superficie del agua a la atmosfera en forma de calor sensible y radiación de onda larga.

## CAPITULO 4

### 4. RESULTADOS

Los datos obtenidos con ELCOM se presentan respecto a las secciones horizontales, en el cuadro III tenemos la descripción de la misma.

Se realizaron simulaciones para los meses de Marzo y Noviembre del año 2014.

La información de Marzo se guardó con paso de tiempo de 20 s, con números de paso de tiempo de 90 000 para un tiempo de simulación de 22 días; el número total de figuras generadas por las simulaciones fueron de 250.

Para el caso de Noviembre se guardó con paso de tiempo de 20 s, con números de paso de tiempo de 120 000 y el tiempo de simulación de 30 días; el número total de figuras generadas por las simulaciones fueron de 250.

Cuadro III. Sección Horizontal y variables que se describen.

Categoría	Grupo	Comentario	Variable
Sección Horizontal	Superficie	Superficie Libre	Velocidades Temperatura Salinidad Densidad
	Fondo	Capa de Fondo	Velocidades Temperatura Salinidad Densidad
	Promedio	Valor promedio en la columna de agua	velocidad

Por razones de espacio, solo se presentan resultados de grupos seleccionados sobre la base de los siguientes criterios: importancia dinámica, información representativa y la capacidad de validar estos resultados con datos de campo.

#### **4.1 Secciones Horizontales**

Las figuras 4.1 a 4.28 muestran los resultados generados por ELCOM para las siguientes secciones horizontales; superficie libre, capa de fondo y promedio en la columna de agua. Se presentan resultados de las velocidades horizontales y temperatura. Cada panel contiene la velocidad en forma vectorial y sobrepuesto a este, se presentan los contornos de rapidez.

##### **4.1.1 Velocidades - mes Marzo 2014**

En las figuras 10 a 17 se presentan la circulación general mediante la distribución de velocidades en la superficie libre de la Bahía de Paracas simuladas con ELCOM, durante el periodo de marzo del 2014.

Durante esta simulación la magnitud del viento fue moderado ( $< 3\text{m/s}$ ), incrementándose a  $4\text{m/s}$  el día 4 de marzo – 2014 a las 12:00 horas.

El efecto de entrada de flujo fue apreciable en la parte Oeste a partir de la zona de la Reserva Nacional Islas Ballestas (ver figura 12 y 13) mientras que el efecto de reflujó fue notorio levemente frente a Punta Pejerrey y Punta Paracas (ver figura 14 y 15).

La figura 12 y 13 y 14 presenta la variación diurna y nocturna de la temperatura y de la distribución superficial de velocidad en la Bahía de Paracas y alrededores. Durante las primeras horas del día de simulación, la temperatura superficial presento una variabilidad entre  $21.5^\circ$  y  $19^\circ$ , y homogénea en toda la bahía y alrededores. El resto del día, ver Figura 12 (bajamar), la temperatura disminuyo a  $18.5^\circ$ , ingresando esta masa de agua a la bahía.

Las velocidades superficiales alcanzaron valores máximos (4cm/s) en las cercanías a Punta Paracas y Punta Pejerrey (Zonas de la boca y Norte), durante la pleamar. Durante los estados de reposo de la marea, las velocidades superficiales fueron mínimas (1cm/s).

La disminución de 1.5°C en la temperatura superficial, entre la mañana y la tarde coincidió con la pleamar, por lo que seguramente el enfriamiento fue causado por agua fría de la zona Sur adyacente que entro a la Bahía por efecto de la pleamar. La boca de conexión es una zona que por su morfología y constricción se vuelve más dinámica, lo que explica claramente el incremento en la magnitud de las velocidades superficiales.

La zona norte, hasta la altura del río Pisco pegada a la costa es la más somera de toda la bahía, con profundidades de 5m, lo que podría explicar la dinámica diferente al resto de la Bahía además de la descarga por parte del río.

Durante el 16 de marzo (figura 16) las costas de la Bahía de Paracas y alrededores estuvieron sus agua casi en reposo con velocidades mínimas (1cm/s)

Las figuras - 18 a 27 -, muestran la variación de la temperatura y de la distribución de velocidad en el fondo de la Bahía.

La temperatura de fondo se muestra con notorios cambios respecto a la temperatura superficial se tiene temperatura de 18.5°C en la mayor parte de la Bahía y alrededores, es decir se mantuvo homogénea; durante este período de tiempo la Bahía se inundó completamente con aguas frías provenientes del Sur, claramente se debe a la entrada de agua durante la pleamar.

En las figuras - 22 a 25 -, Durante las siguientes bajamar y pleamar se presentan flujos provenientes de la zona sur, a medida que van ingresando a la Bahía las velocidades van disminuyendo.

El promedio en la vertical proporciona una idea general de los patrones de circulación en la Bahía. Las figuras – 28 a 39 – son las correspondientes al promedio vertical. Se muestra como en las primeras horas del día se observa un flujo proveniente de la zona sur exterior, hacia el interior de la Bahía.

En las aguas adyacentes a la isla Ballestas (oeste) se presenta divergencia de las corrientes y están dirigidas hacia todas las direcciones.

En la figura (4.28) se presenta sistemas de convergencia de las corrientes marinas frente a las costas de La Pampilla,

Hubo periodos en los que las aguas estuvieron casi en reposo con velocidades lentas dentro de la Bahía, ver figuras (4.22 a 4.26)

Se presenta la existencia de sistemas de ciclónicos frente a Punta Pejerrey durante el 12 de marzo (figura 4.23).

Los remolinos que se observan en las figuras (4.23) se forman por interacción de las corrientes, la topografía, fricción de fondo y la fuerza del viento, debido a la irregularidad en la boca de conexión y la parte Norte donde se presenta la zona mas profunda pero de la Bahía y las corrientes observadas en la parte Norte se deben a las condiciones de frontera.

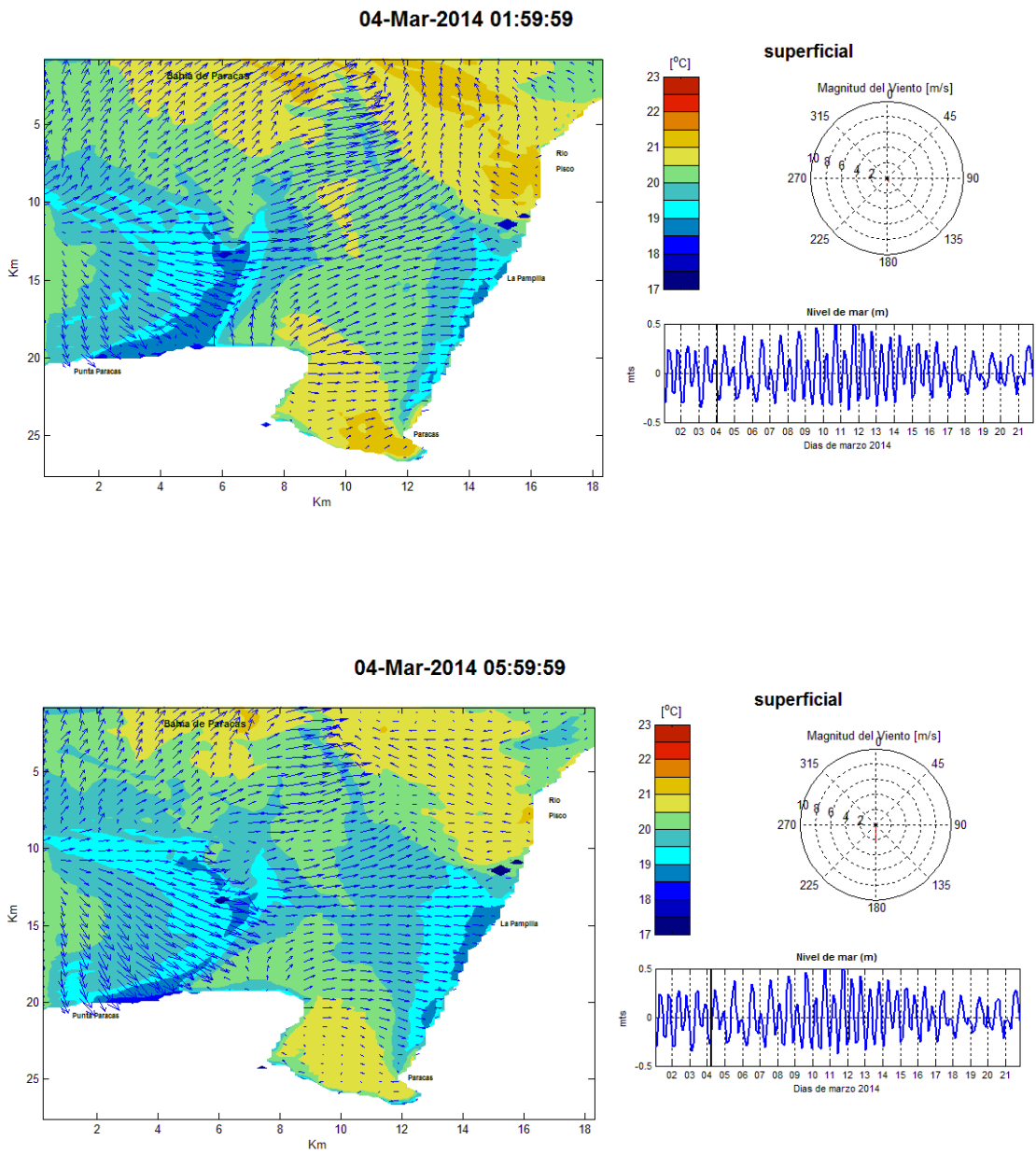


Figura 10: Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa superficial

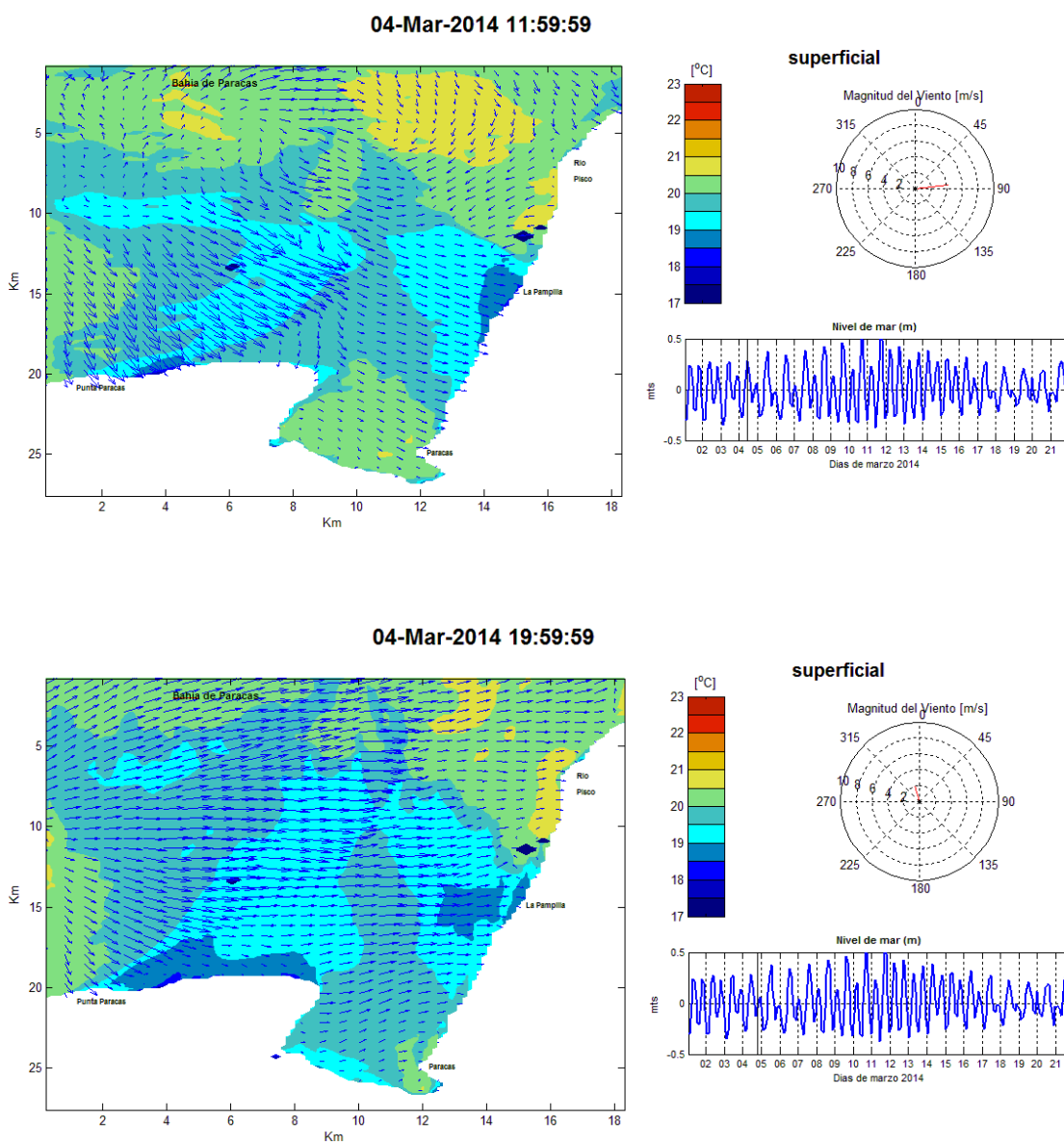


Figura 11: Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 20:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa superficial



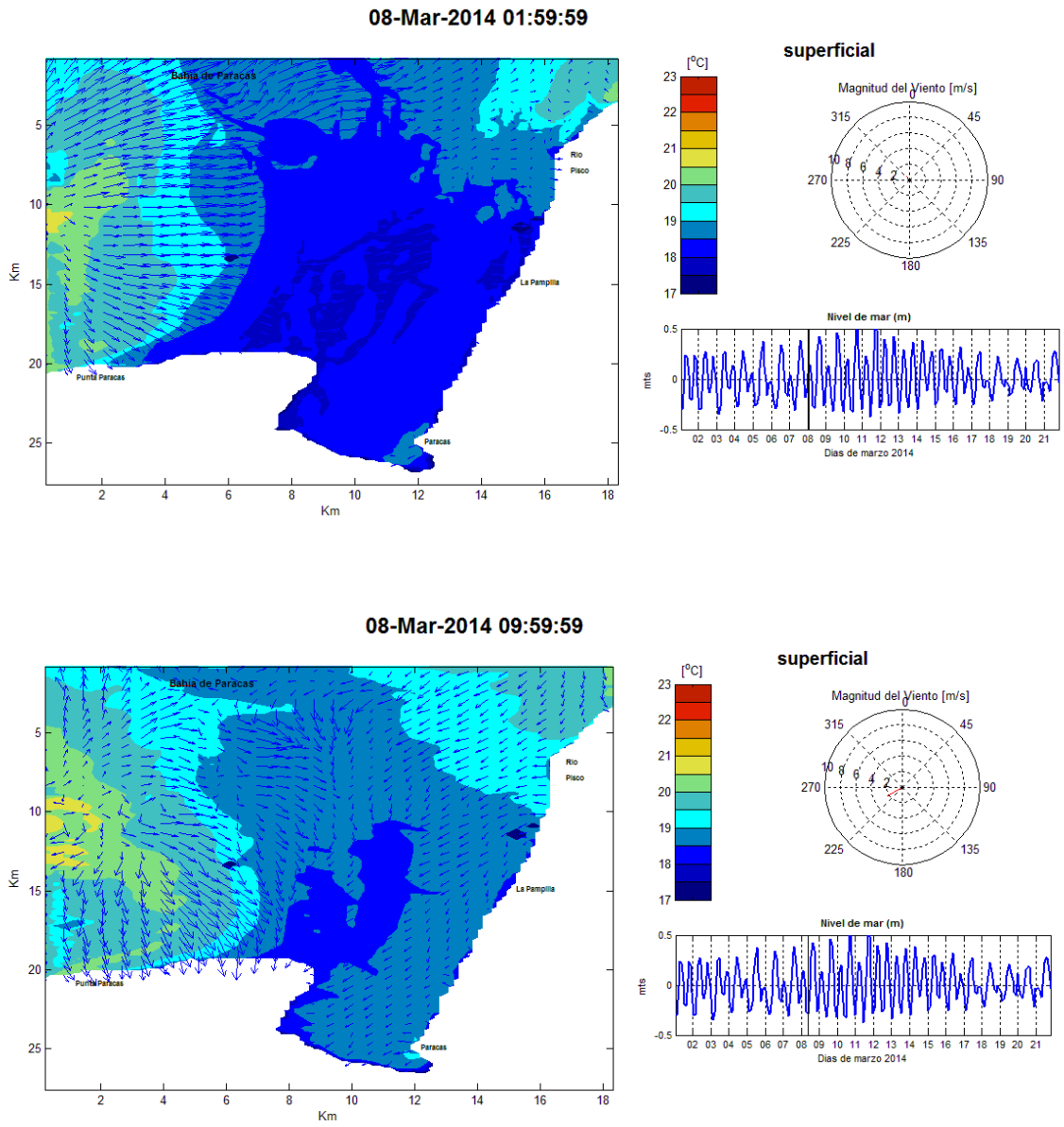


Figura 12 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa superficial

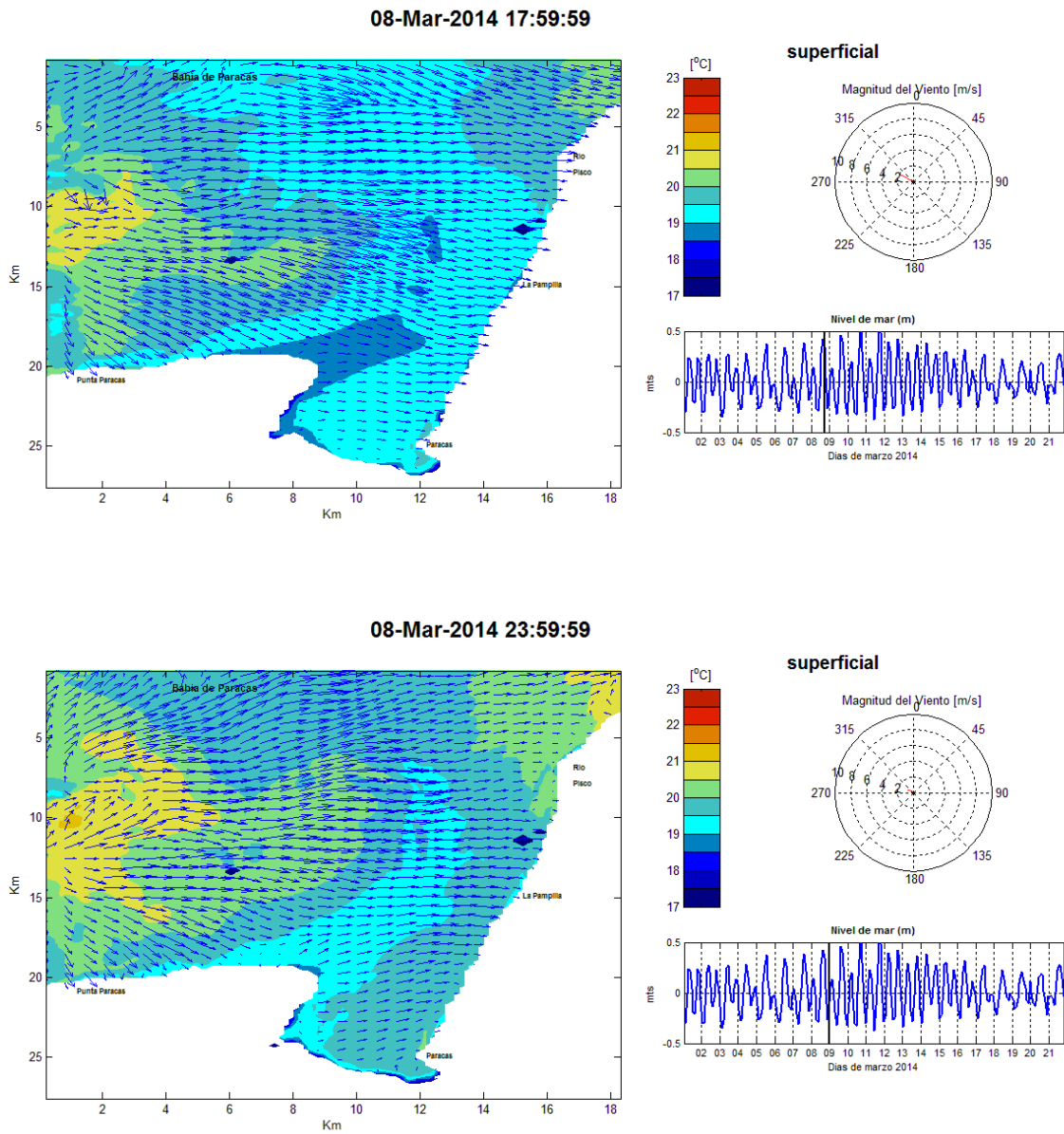


Figura 13 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa superficial

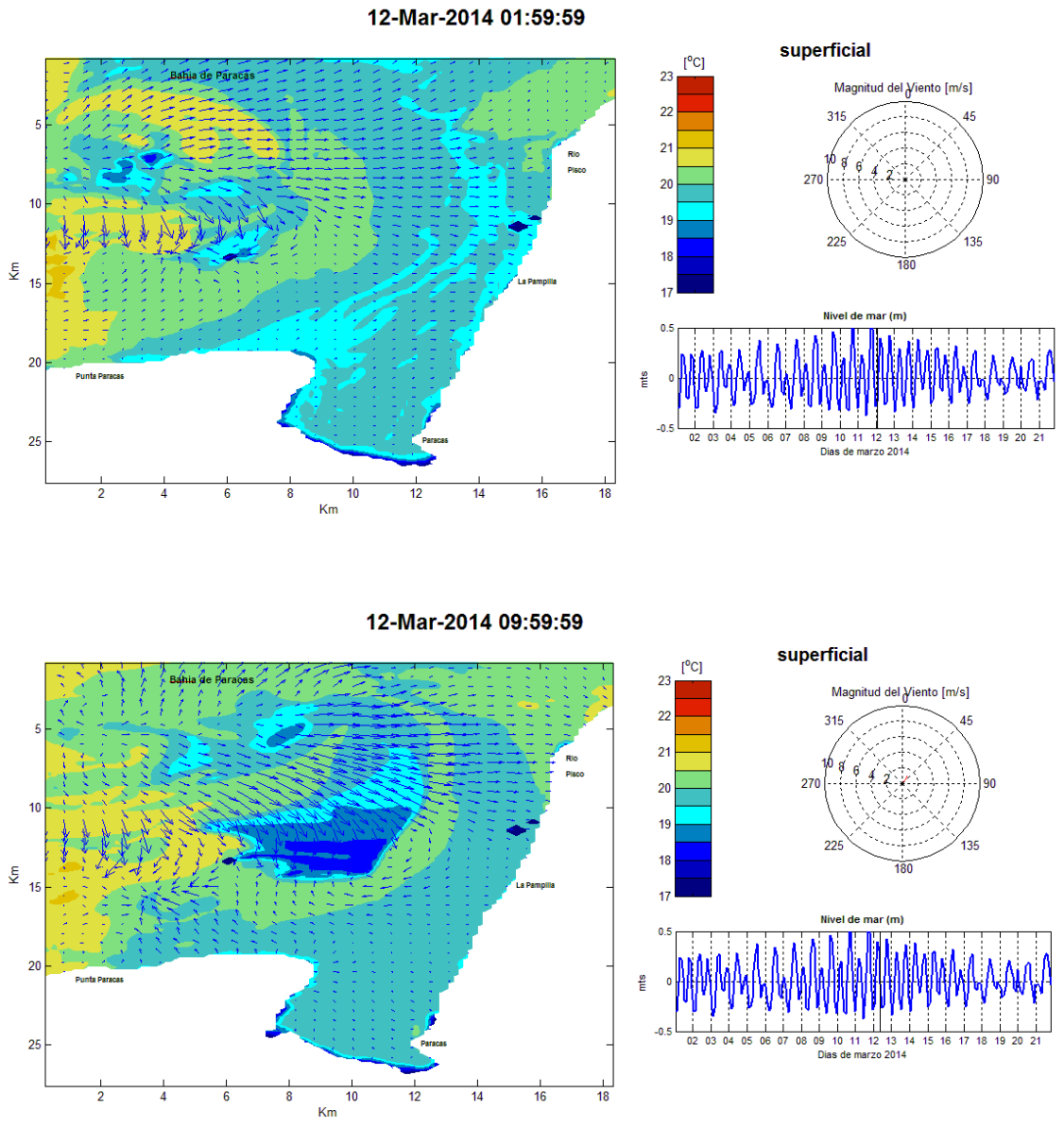


Figura 14 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa superficial

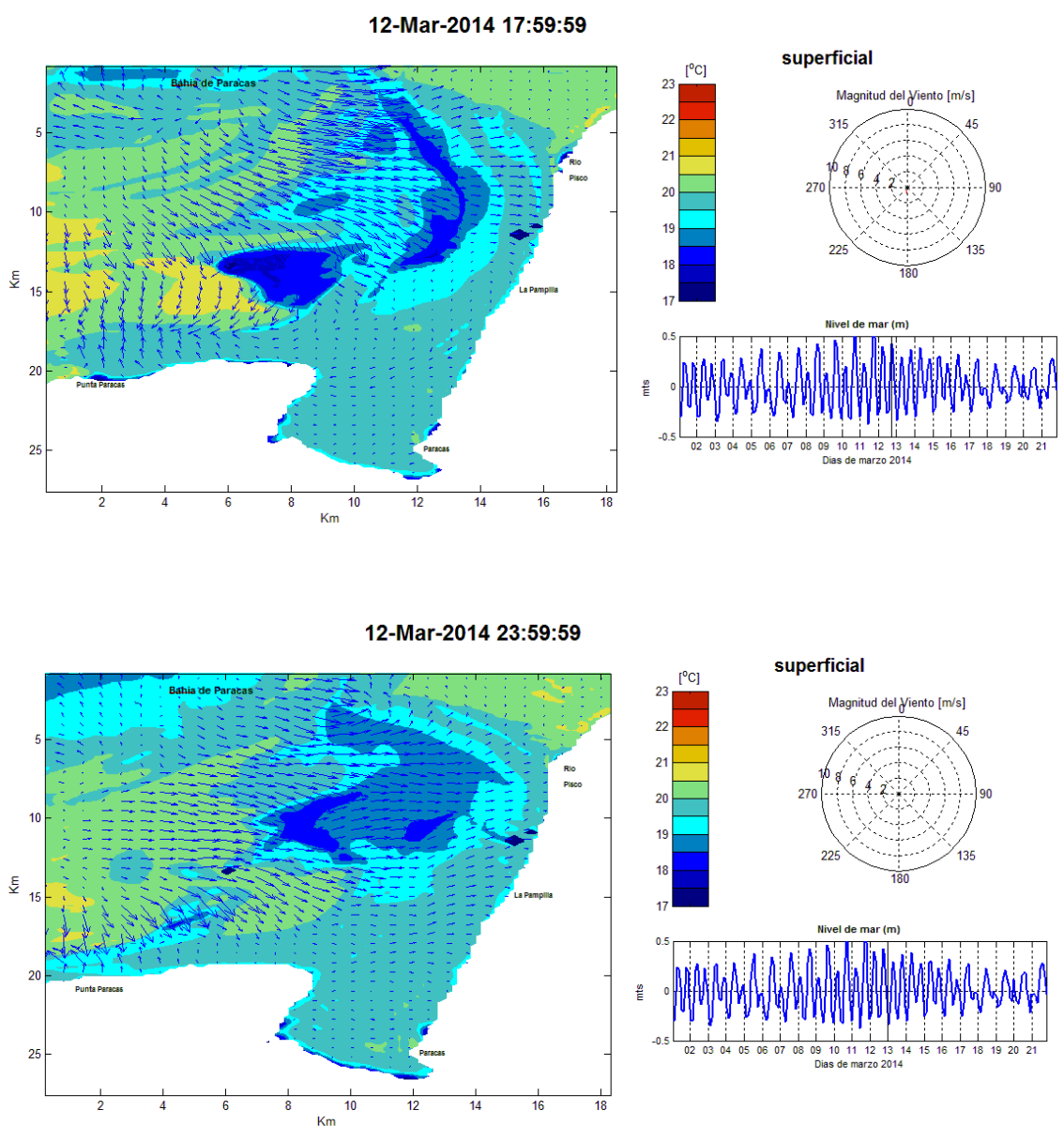


Figura 15 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa superficial

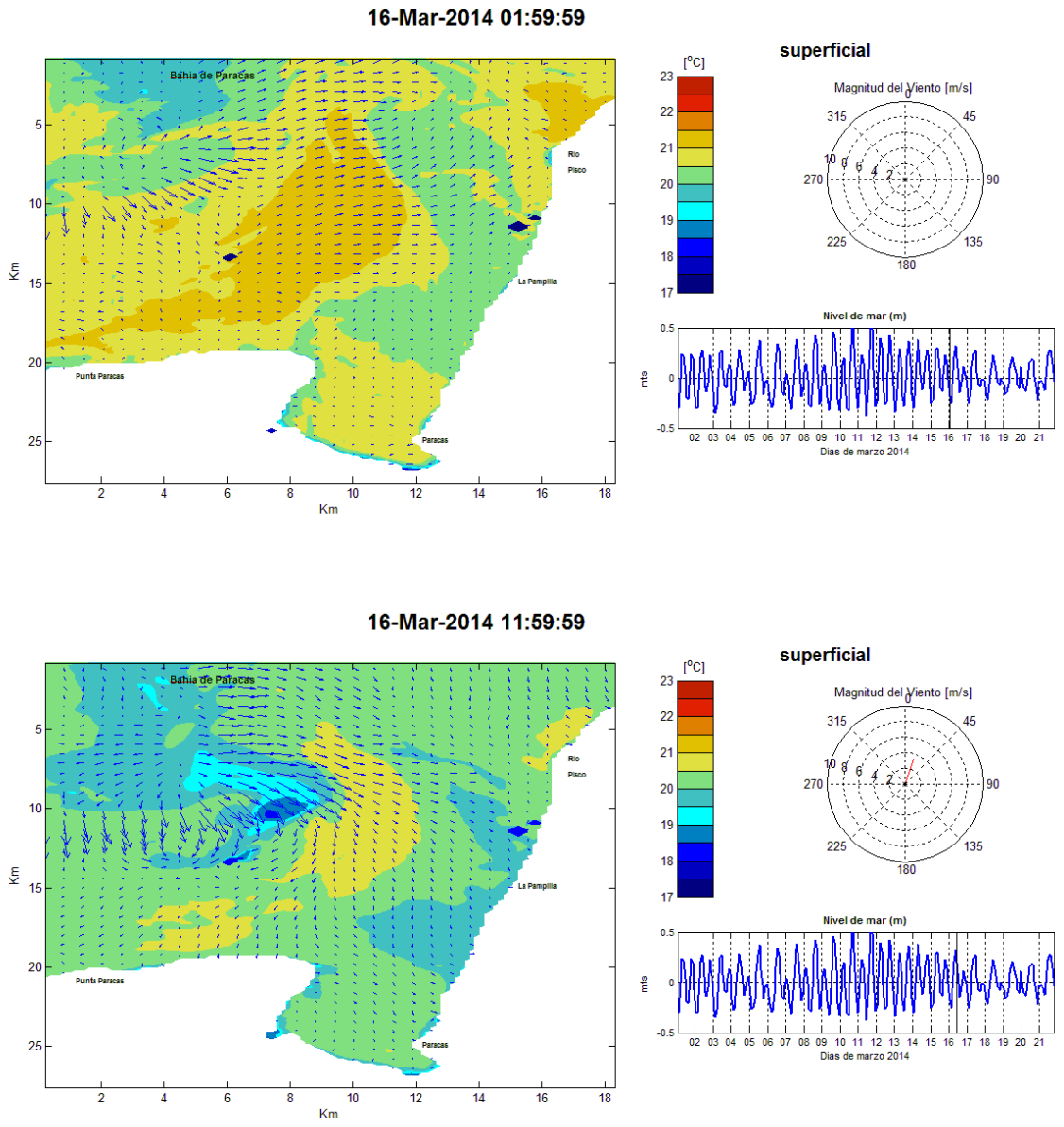


Figura 16 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 12:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa superficial

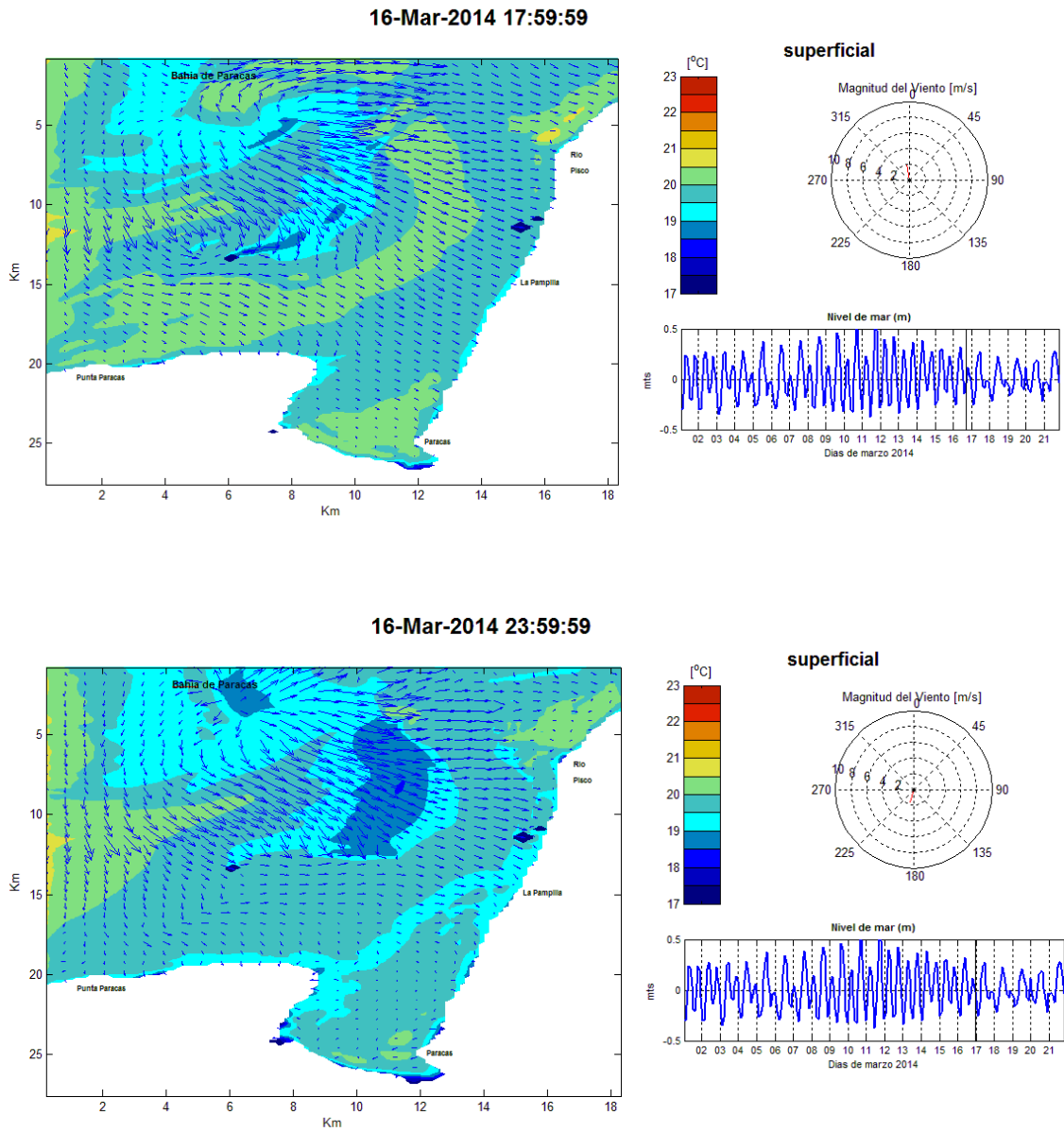


Figura 17 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa superficial

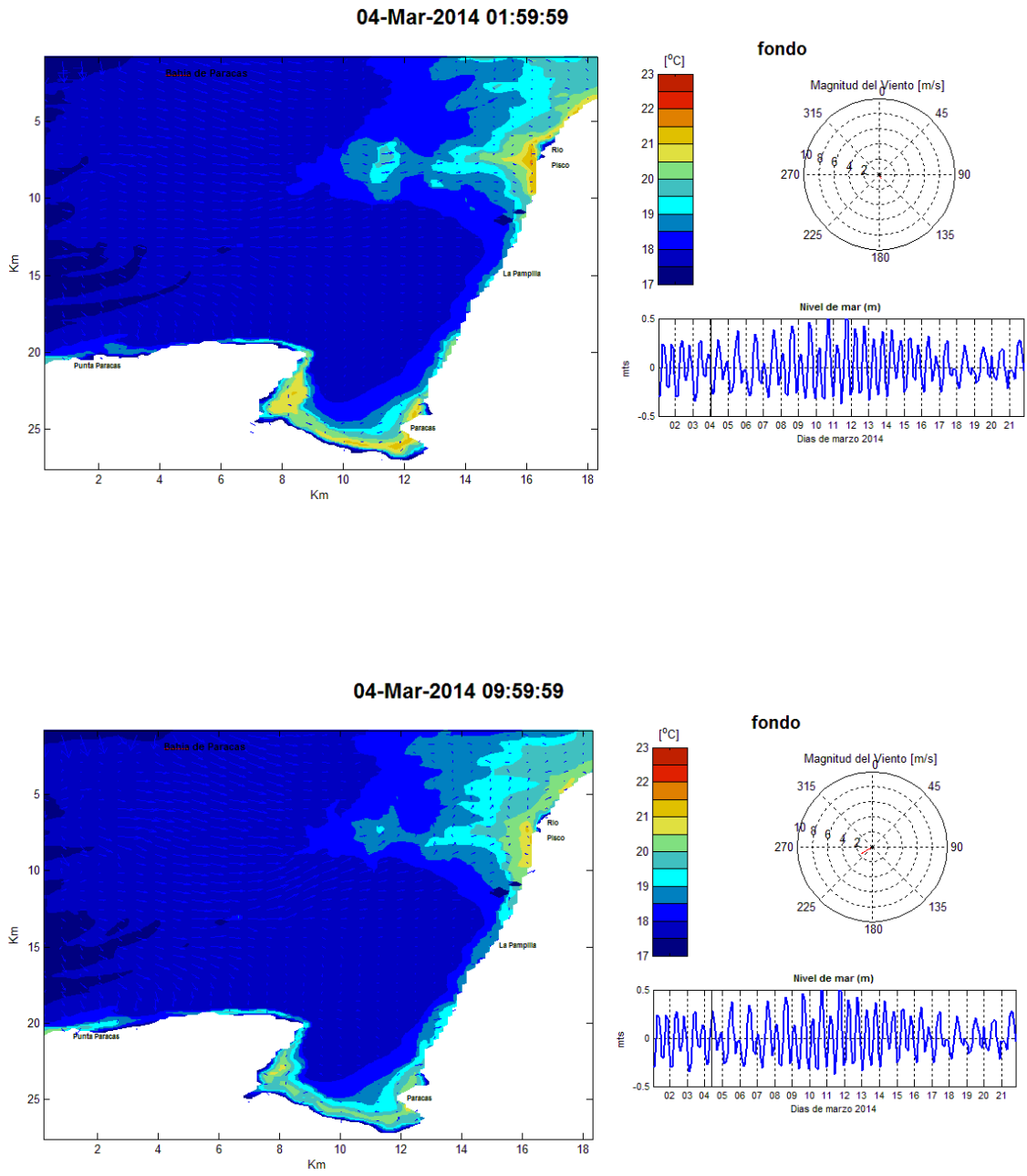


Figura 18 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Fondo

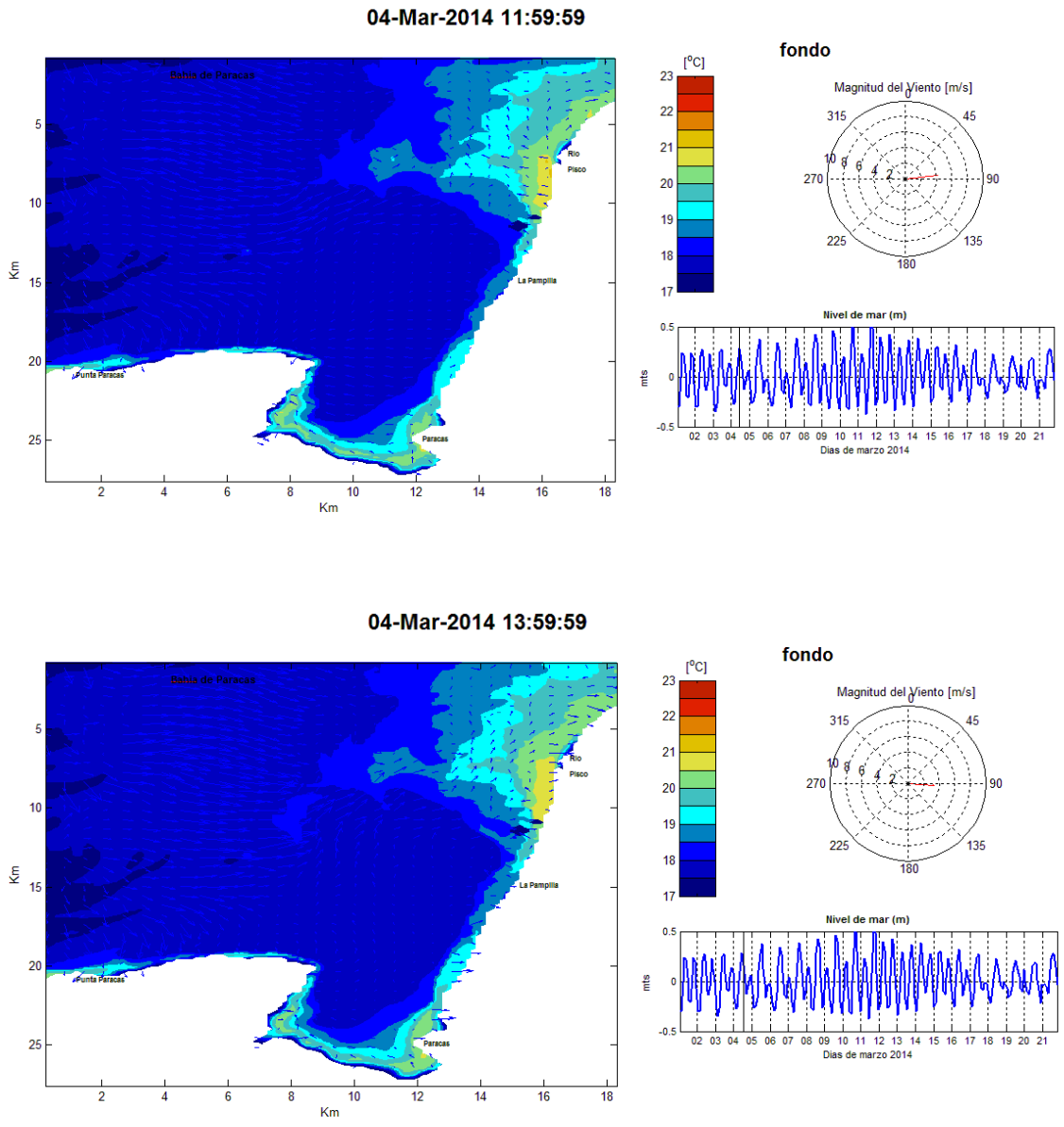


Figura 19 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 2:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Fondo



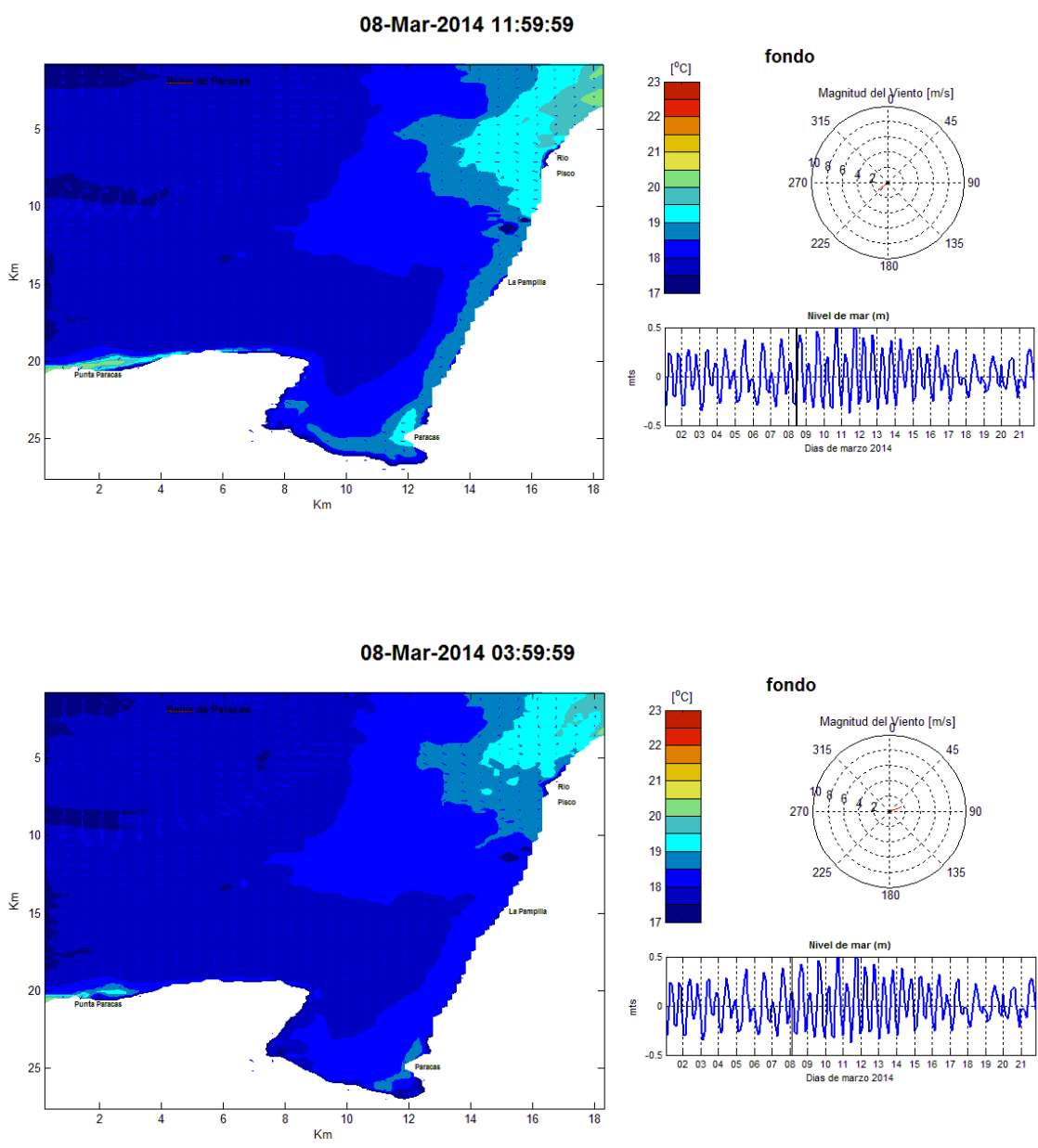


Figura 20 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 4:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Fondo

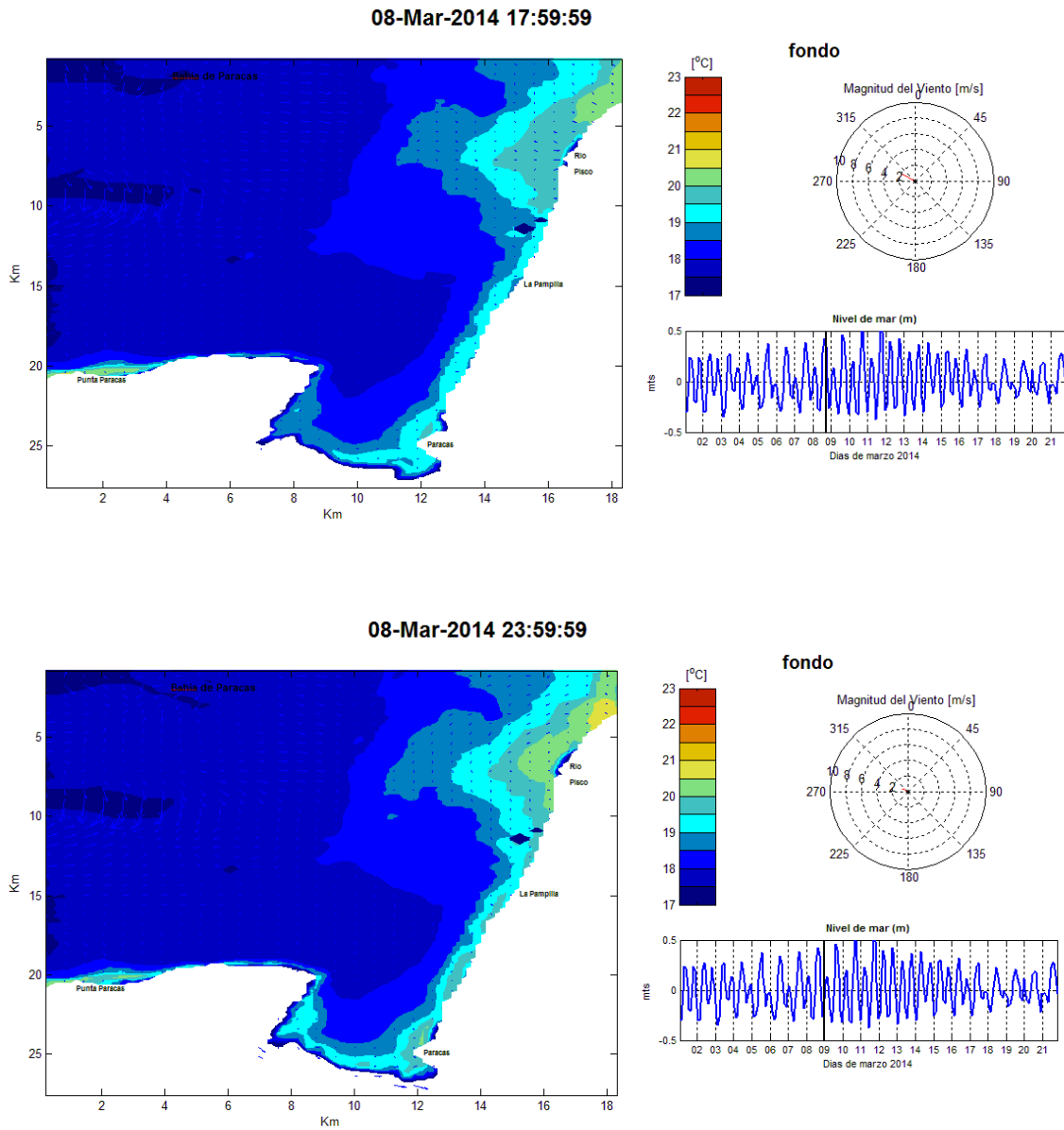


Figura 21 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Fondo

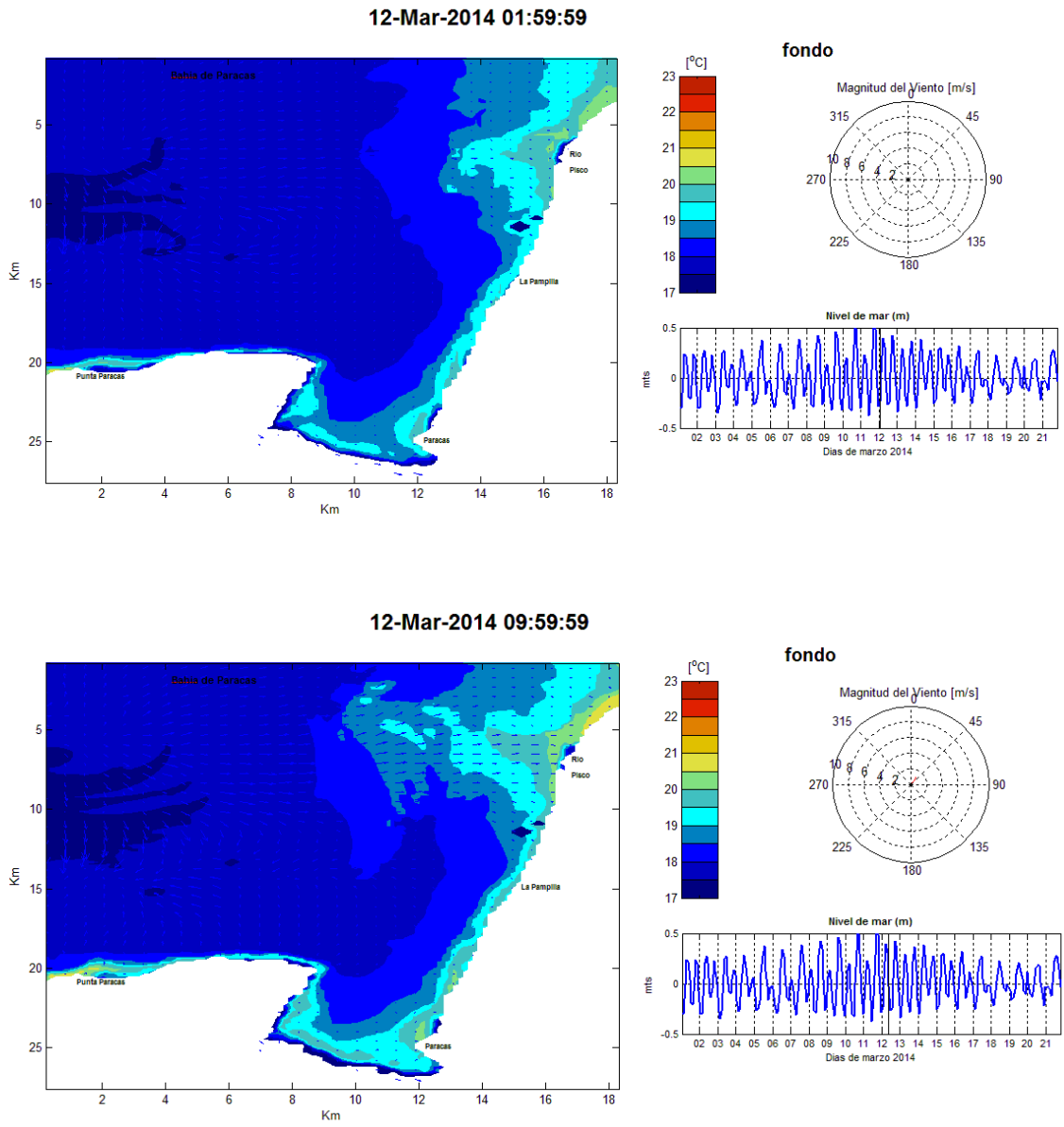


Figura 22 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 02:00 a 10:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Fondo

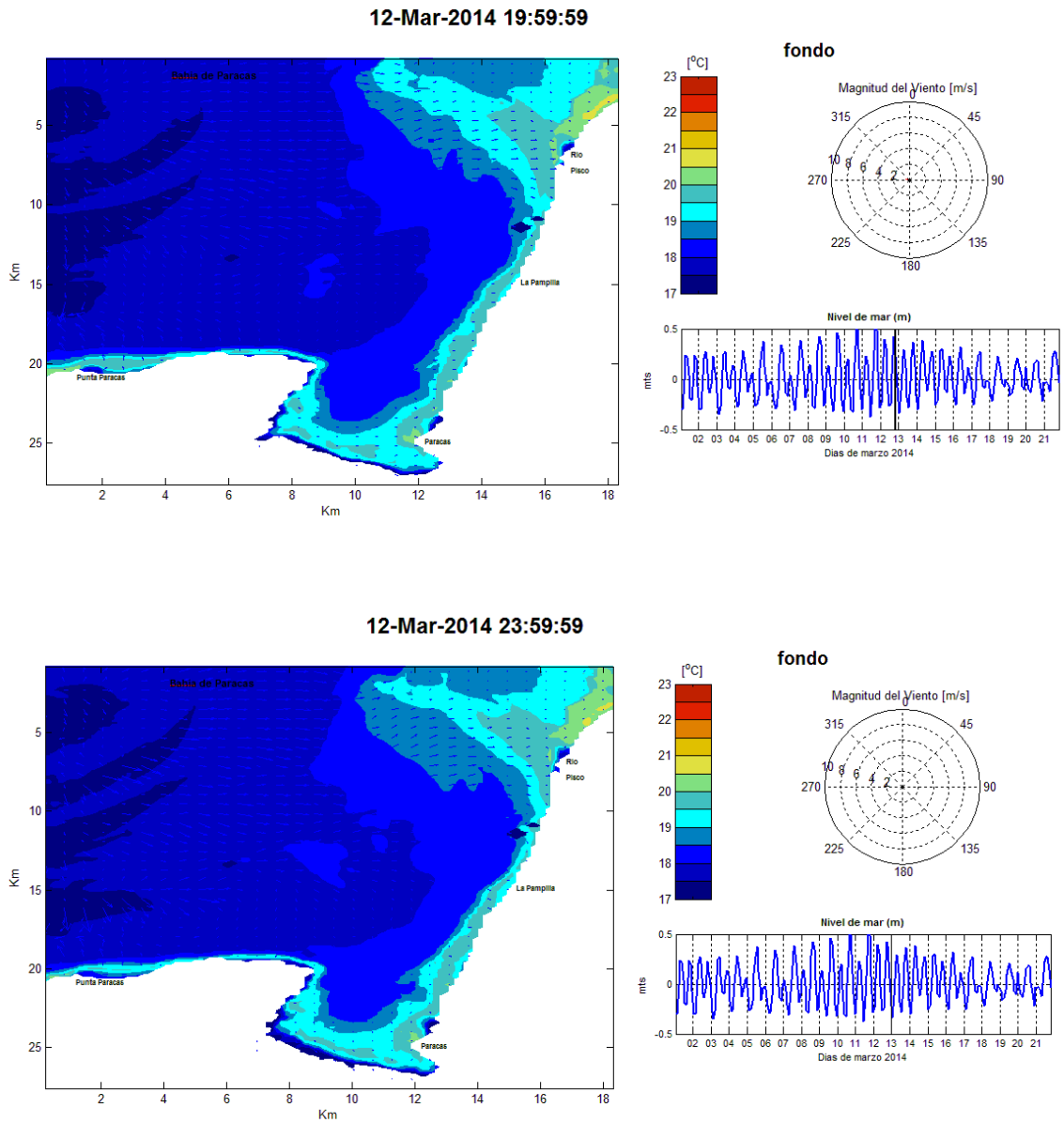


Figura 23 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Fondo

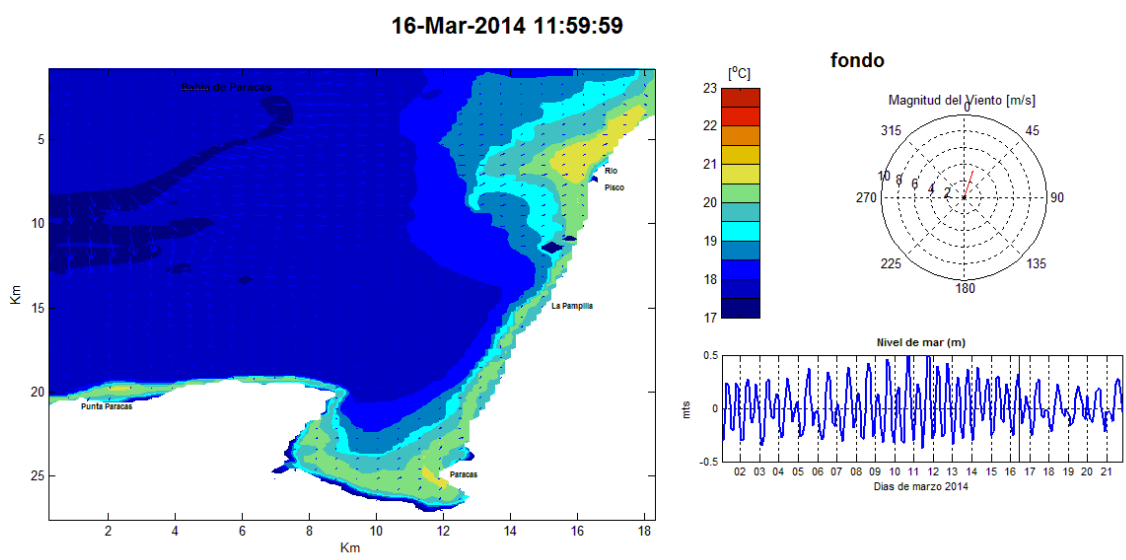
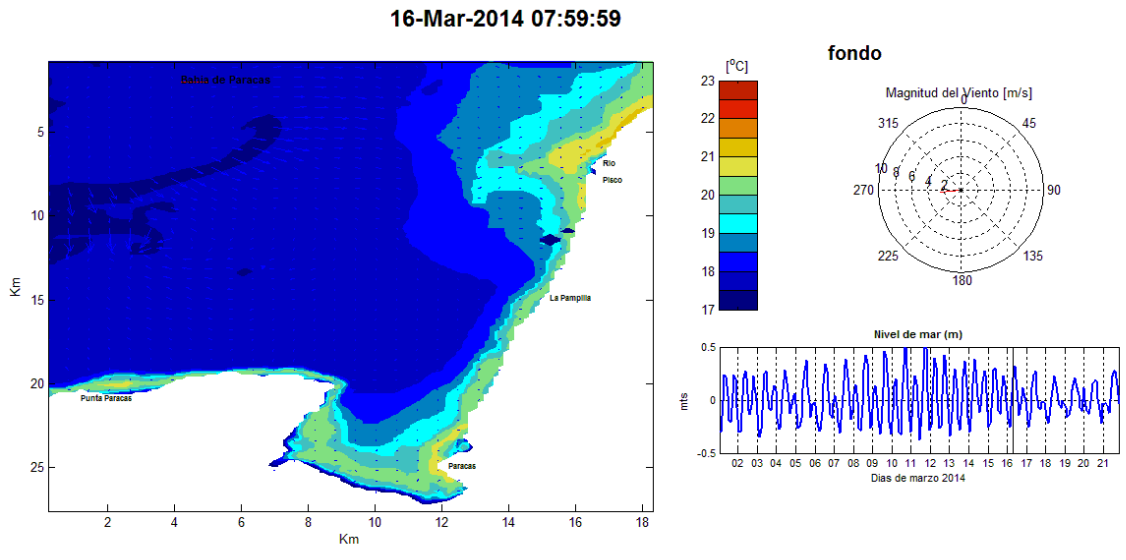


Figura 24 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 8:00 a 12:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa Fondo

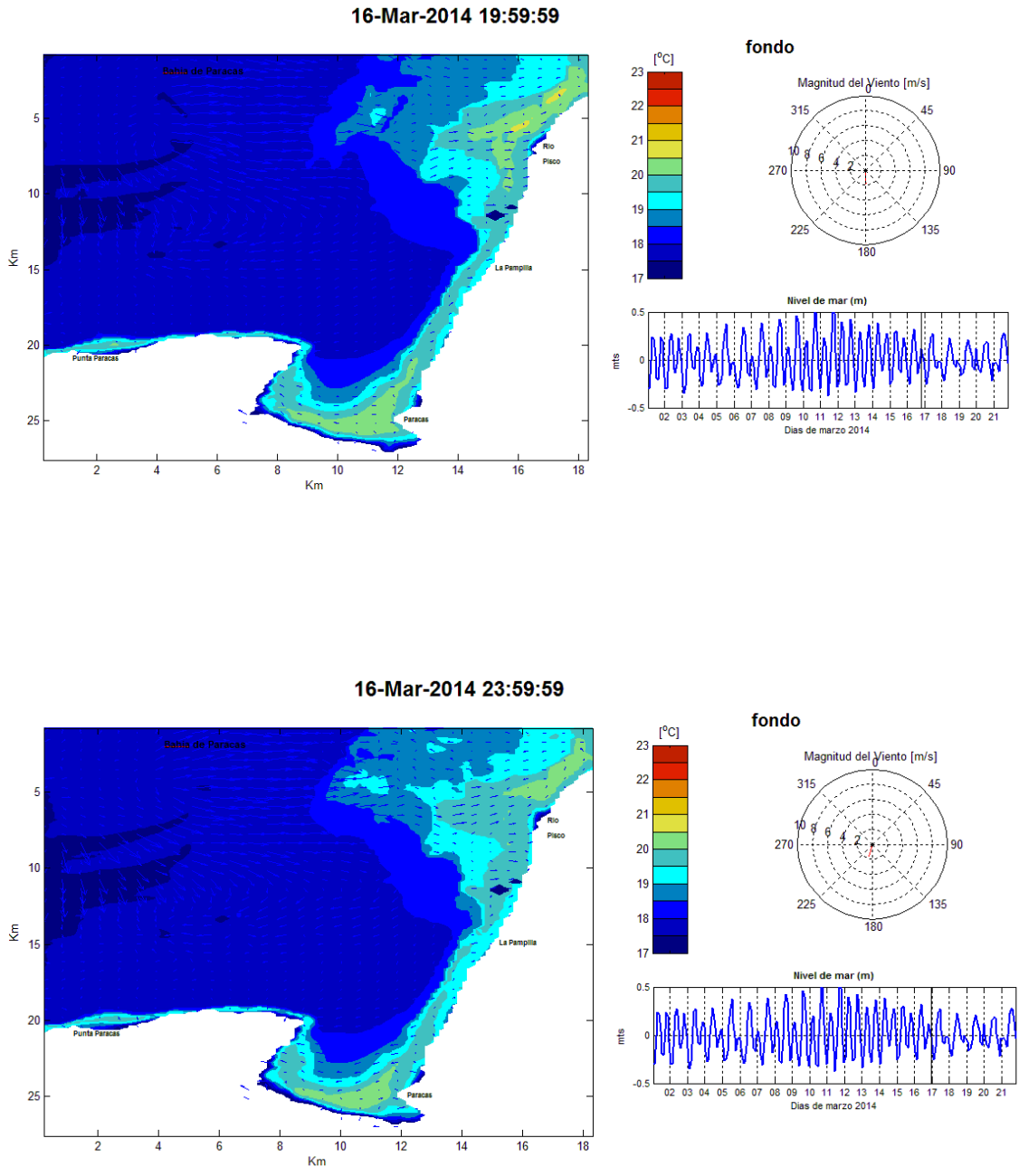


Figura 25 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 16-Mar-2014 - Capa Fondo

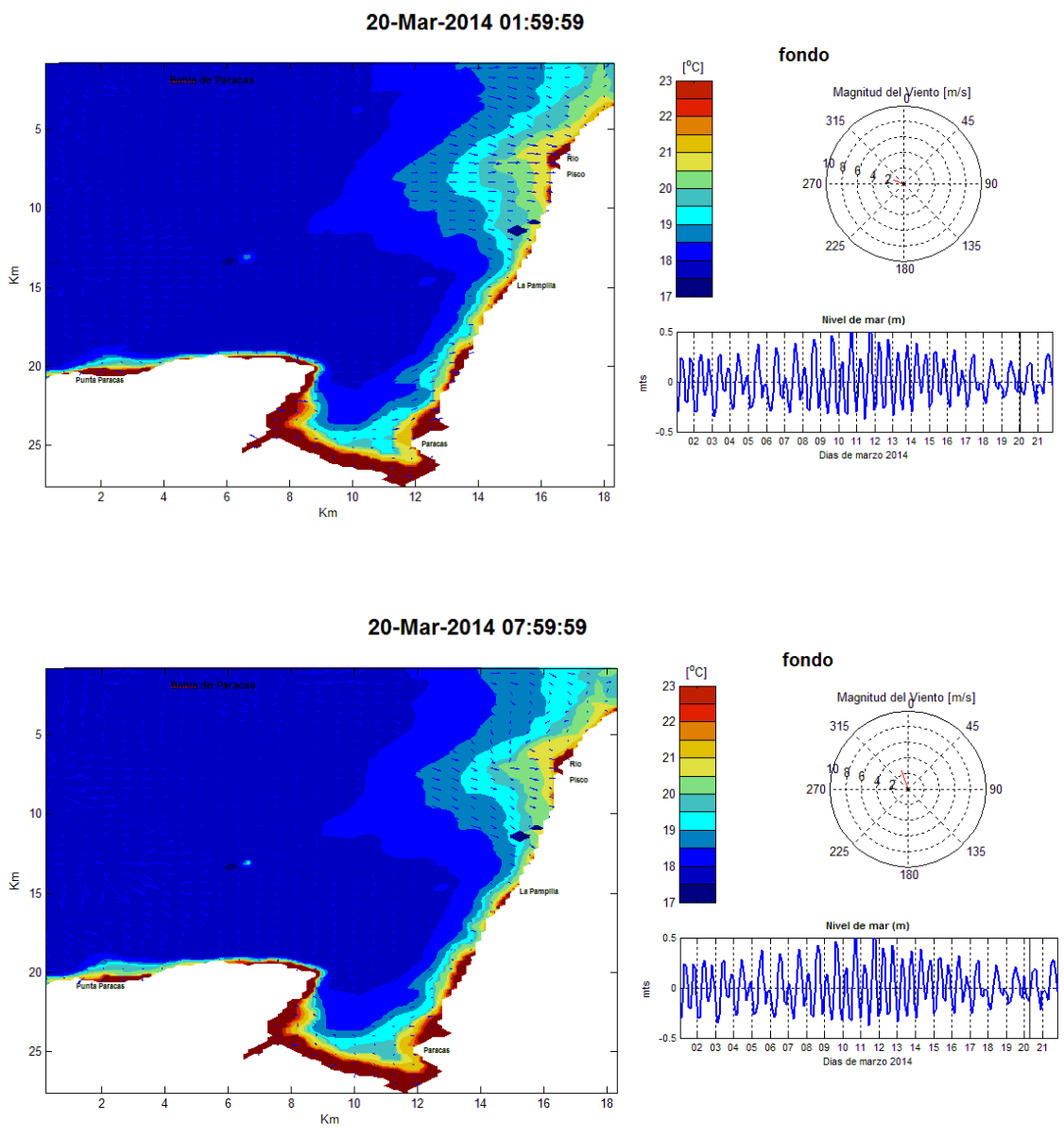


Figura 26 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 8:00 horas, 20-Mar-2014 - Capa Fondo

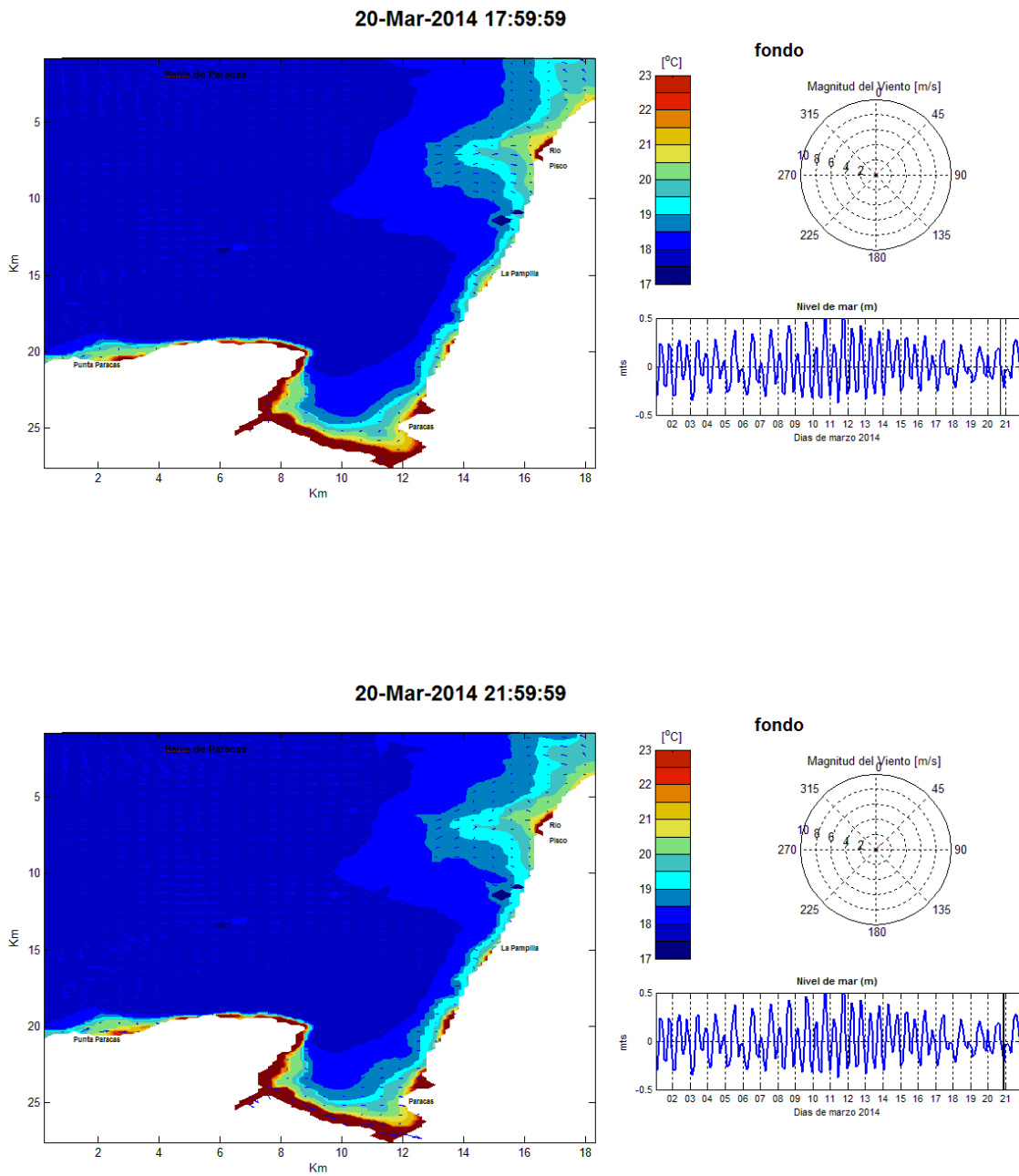


Figura 27 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 22:00 horas, 20-Mar-2014 - Capa Fondo



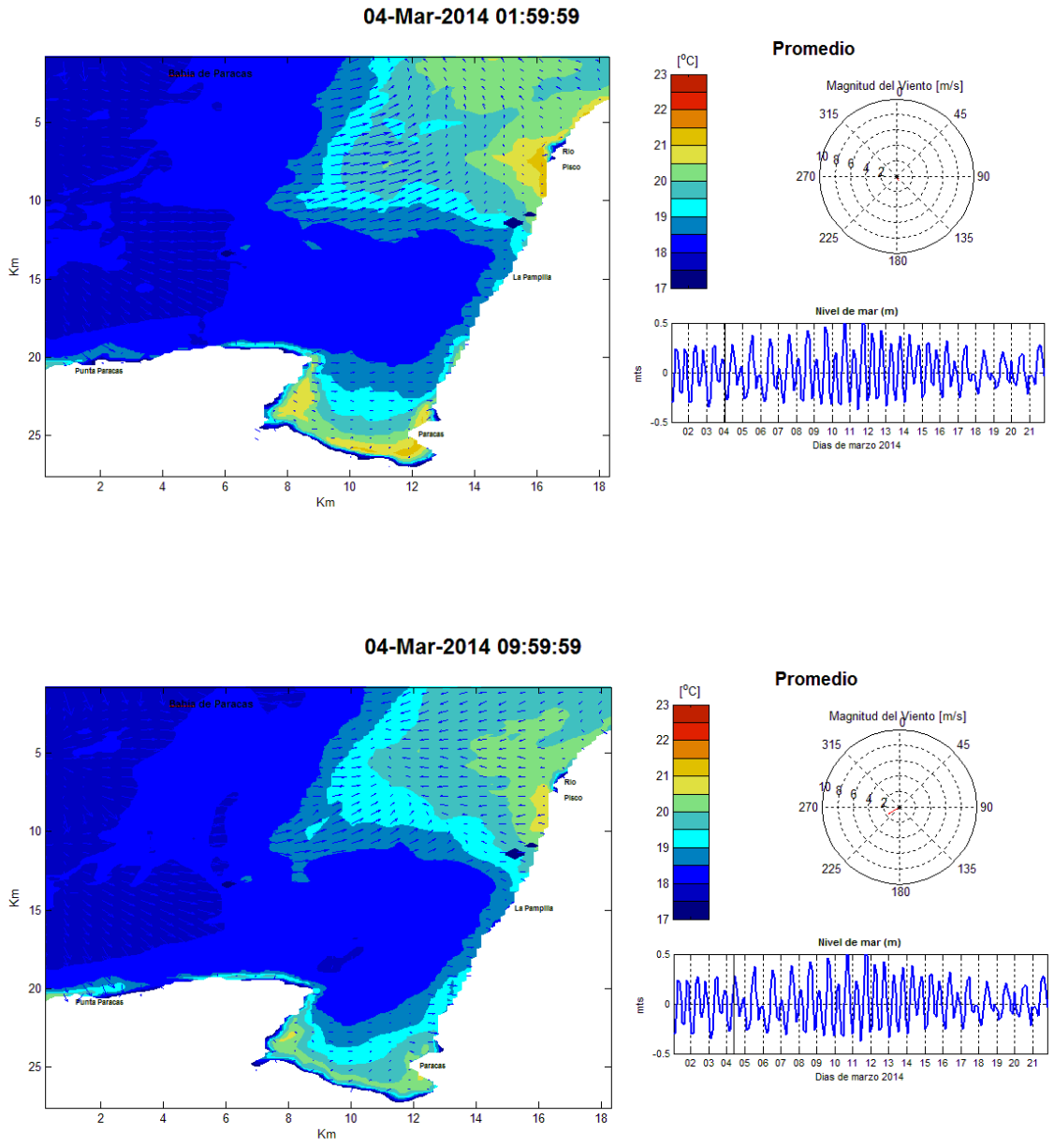


Figura 28 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 10:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Promedio

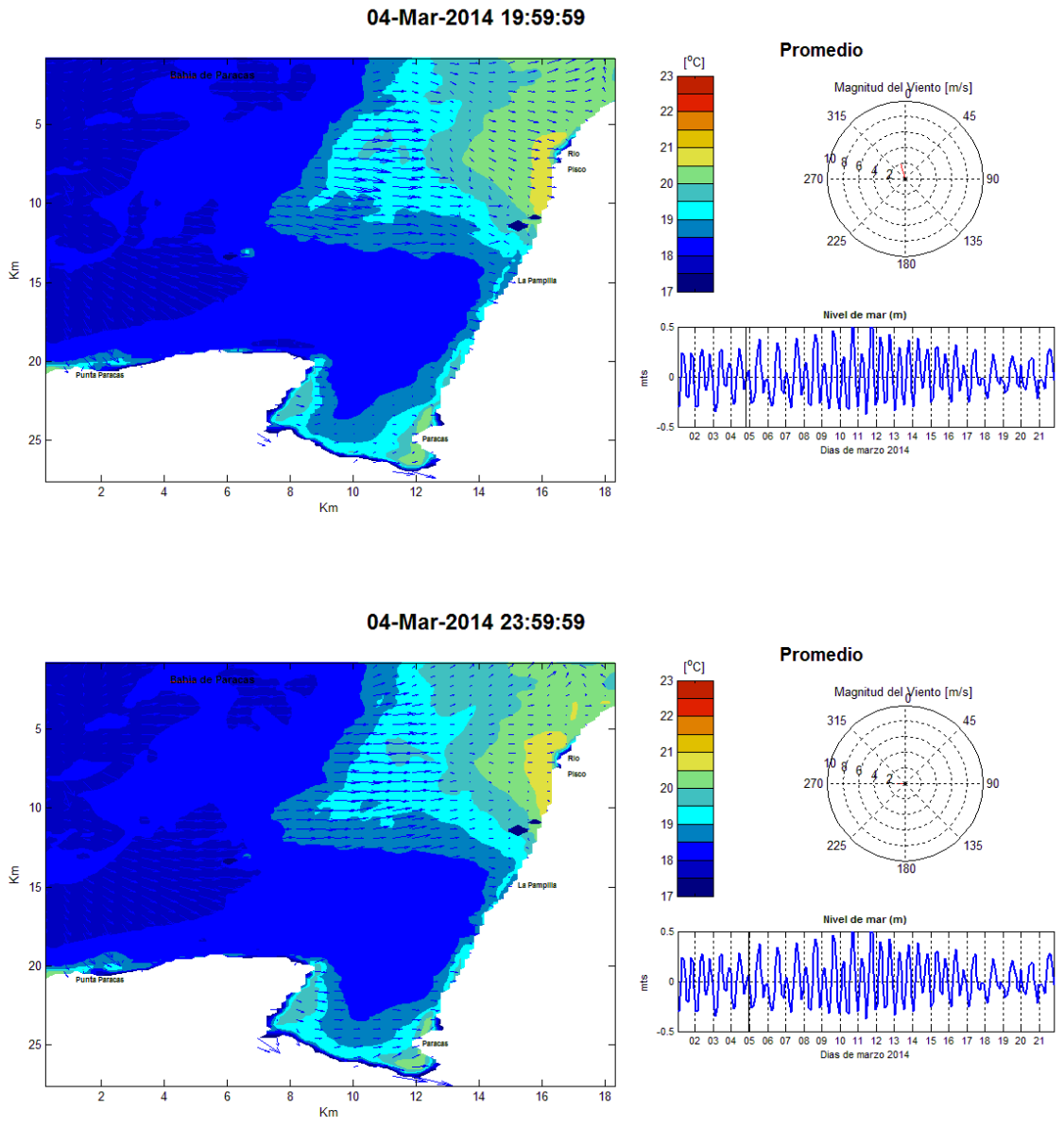


Figura 29 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 04-Mar-2014 - Capa Promedio

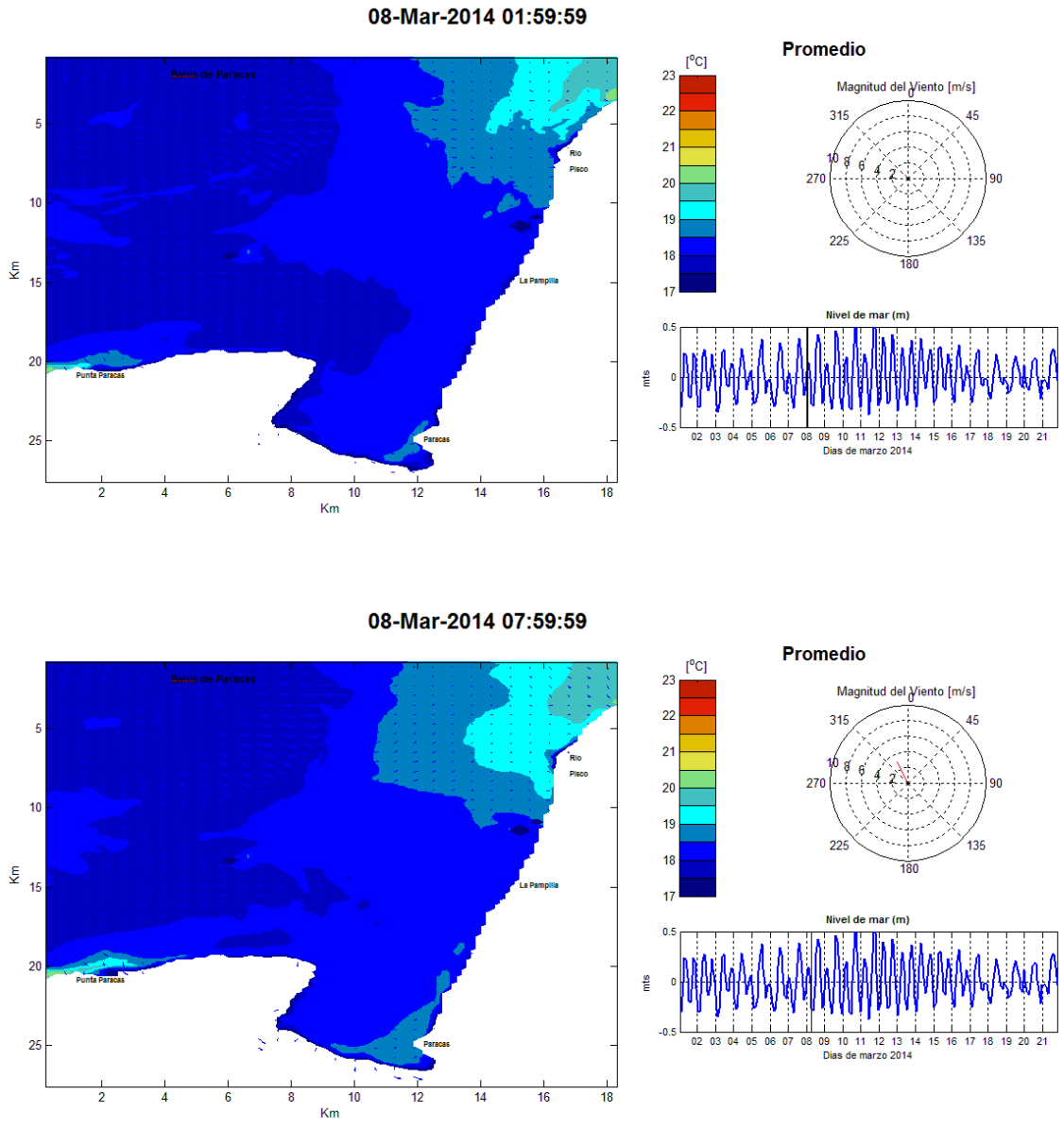


Figura 30 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 8:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Promedio

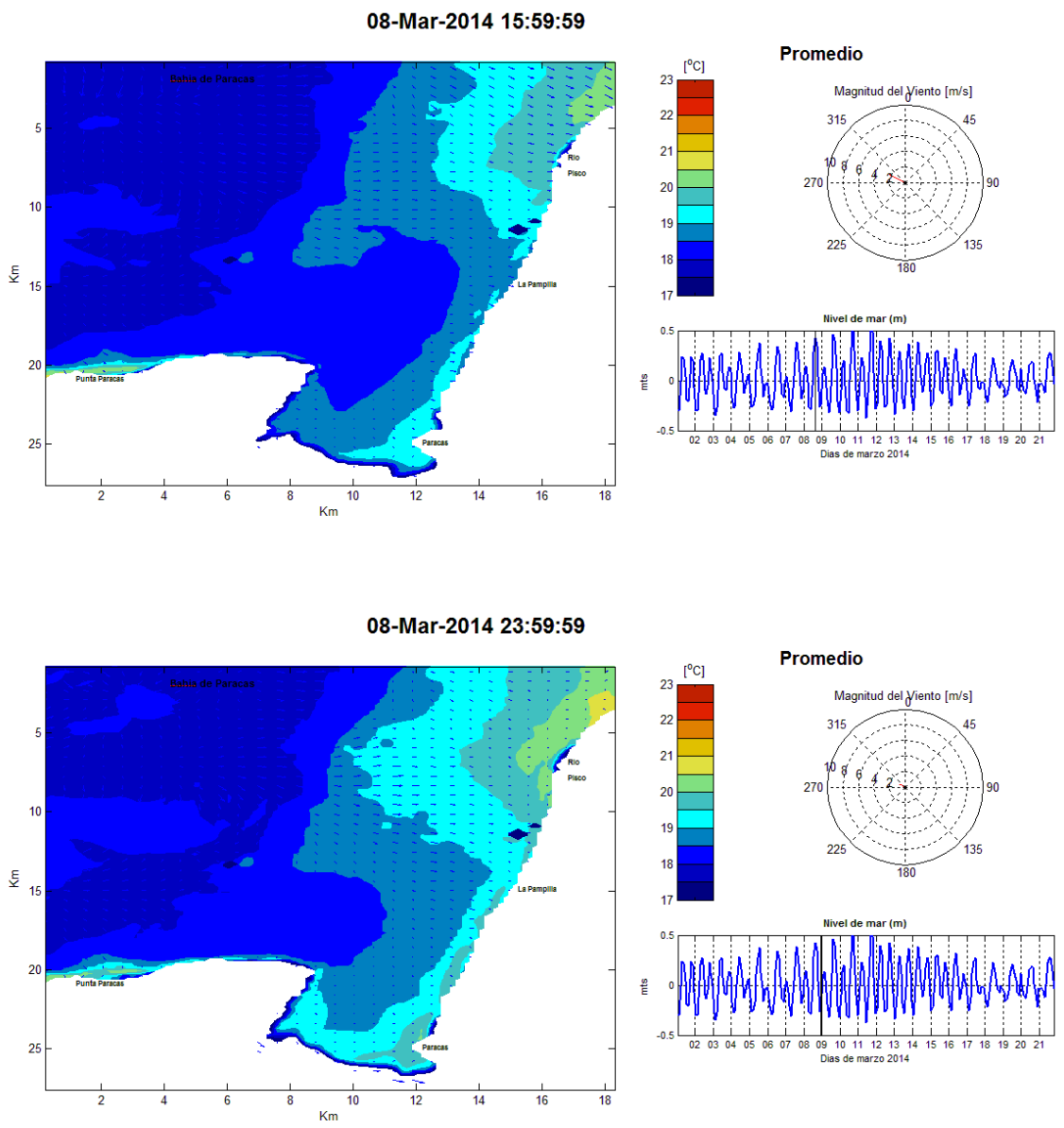


Figura 31 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 24:00 horas, 08-Mar-2014 - Capa Promedio

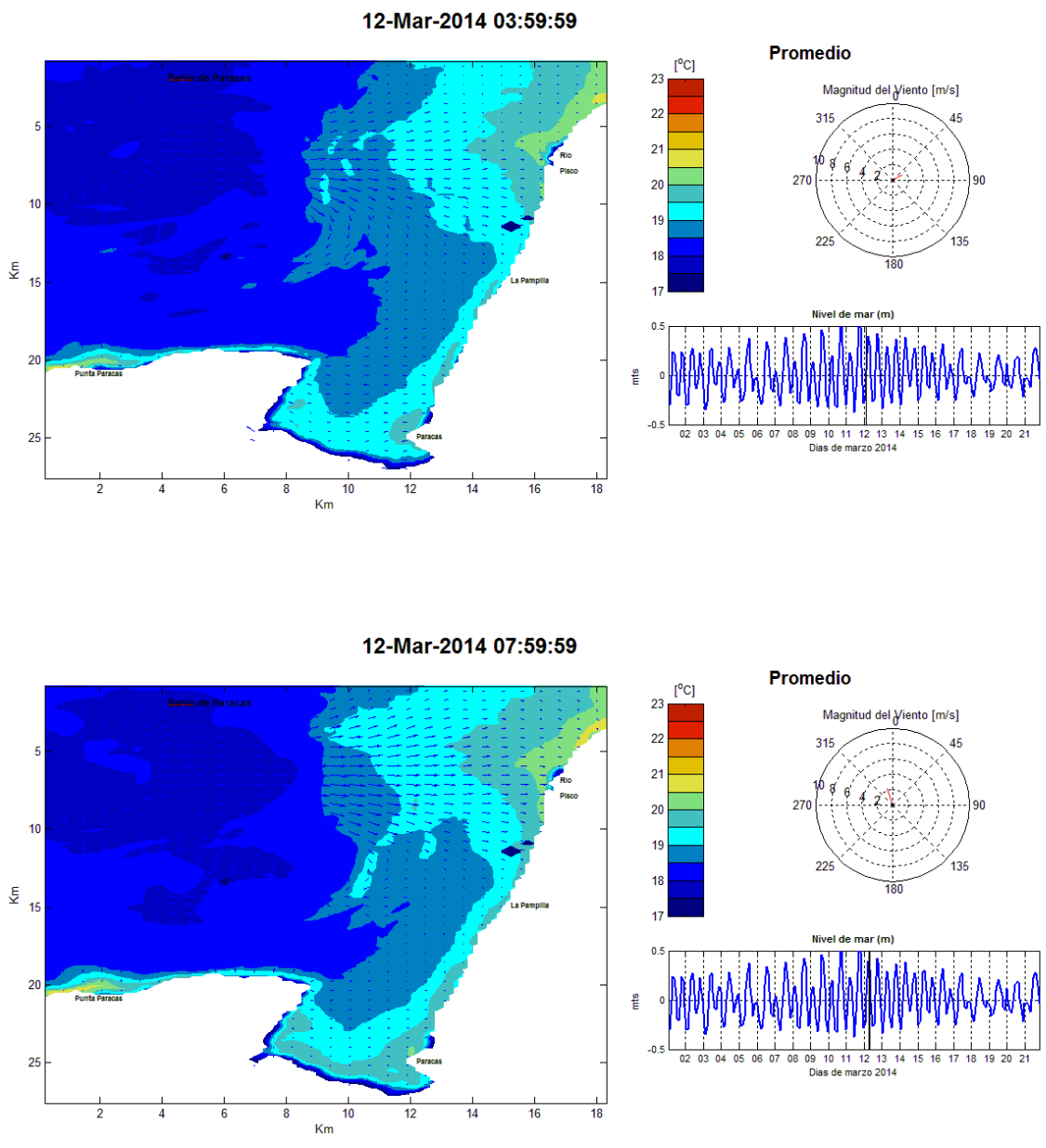


Figura 32 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 8:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Promedio

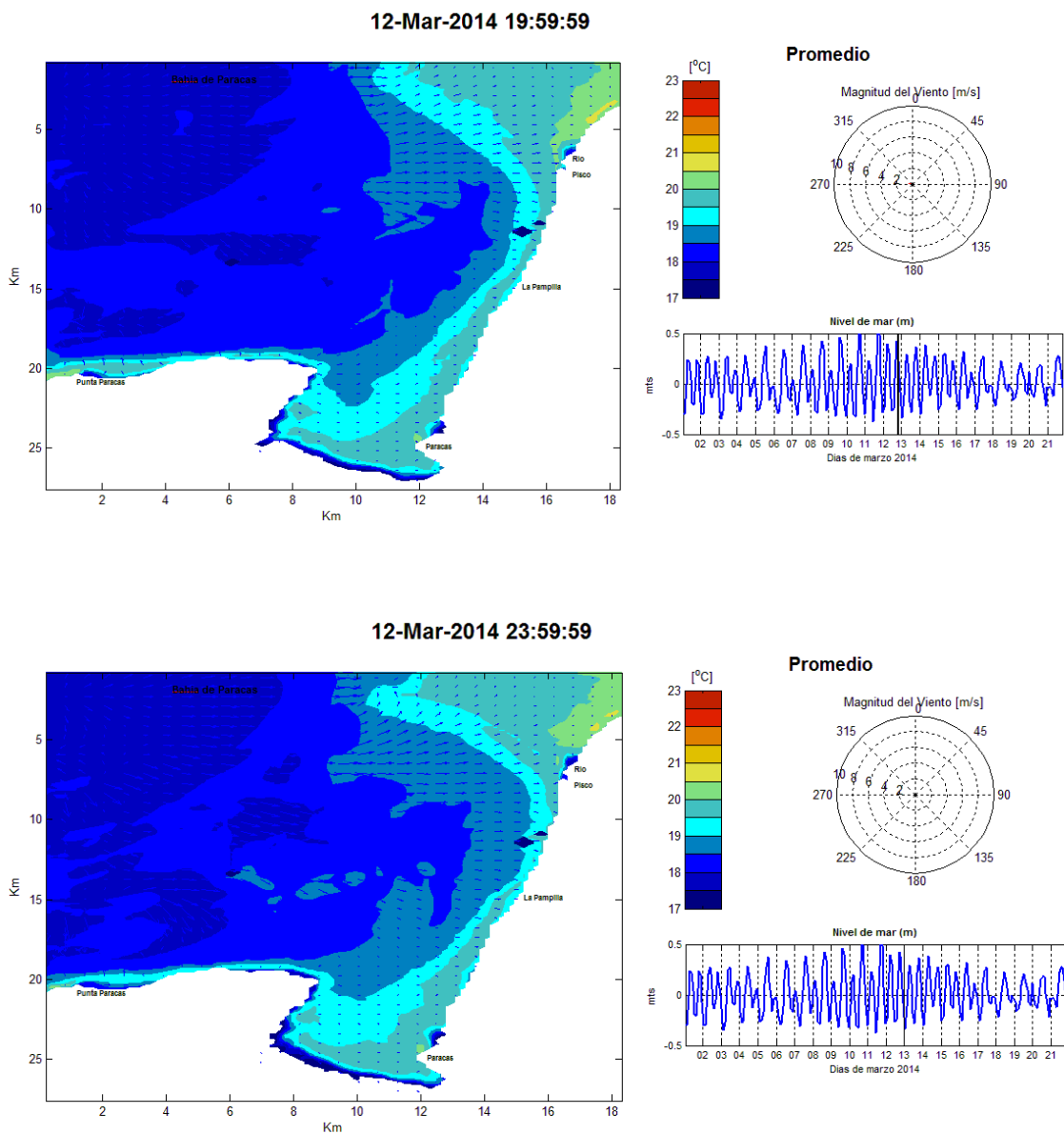


Figura 33 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 24:00 horas, 12-Mar-2014 - Capa Promedio

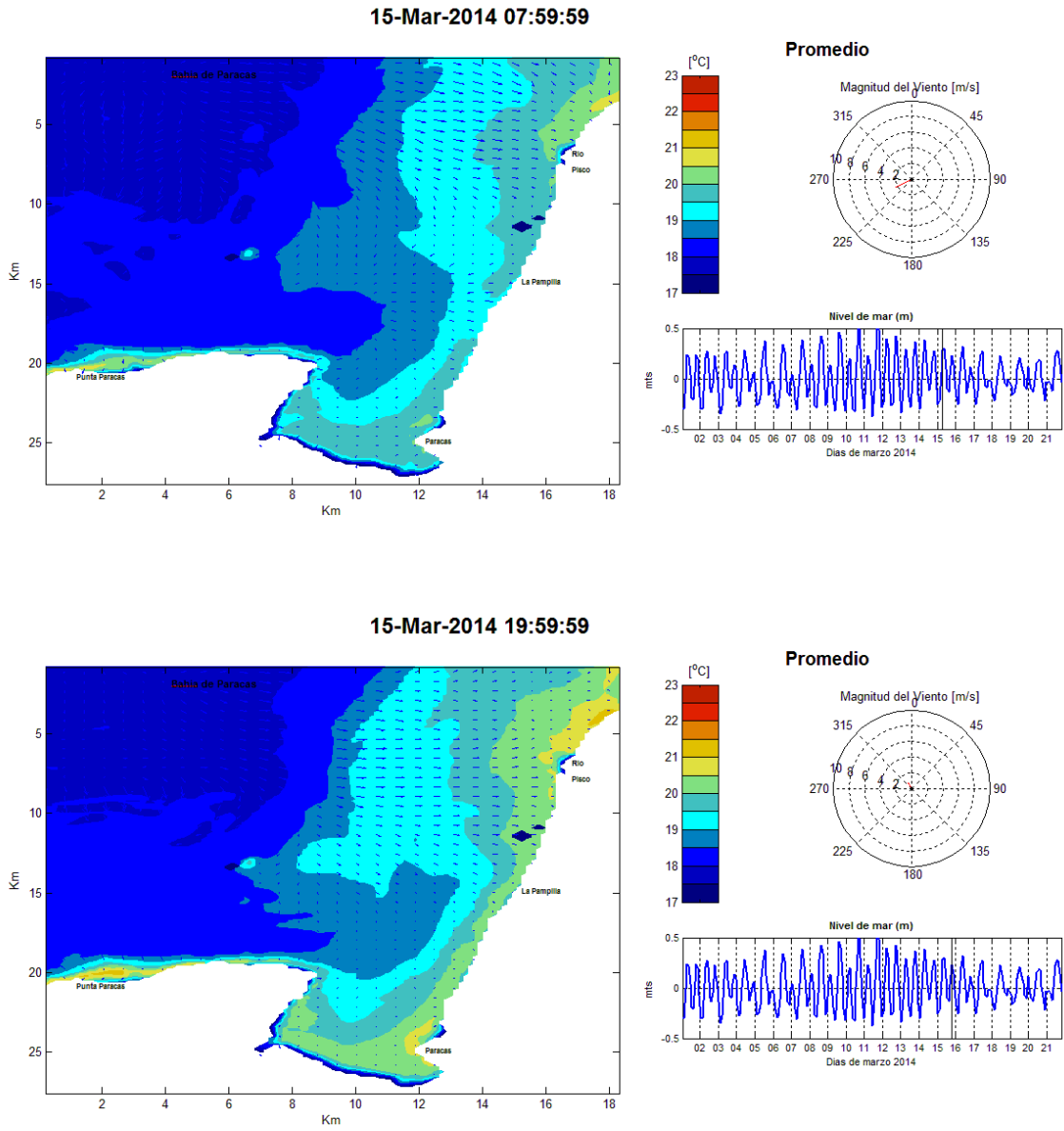


Figura 34 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 8:00 a 20:00 horas, 15-Mar-2014 - Capa Promedio

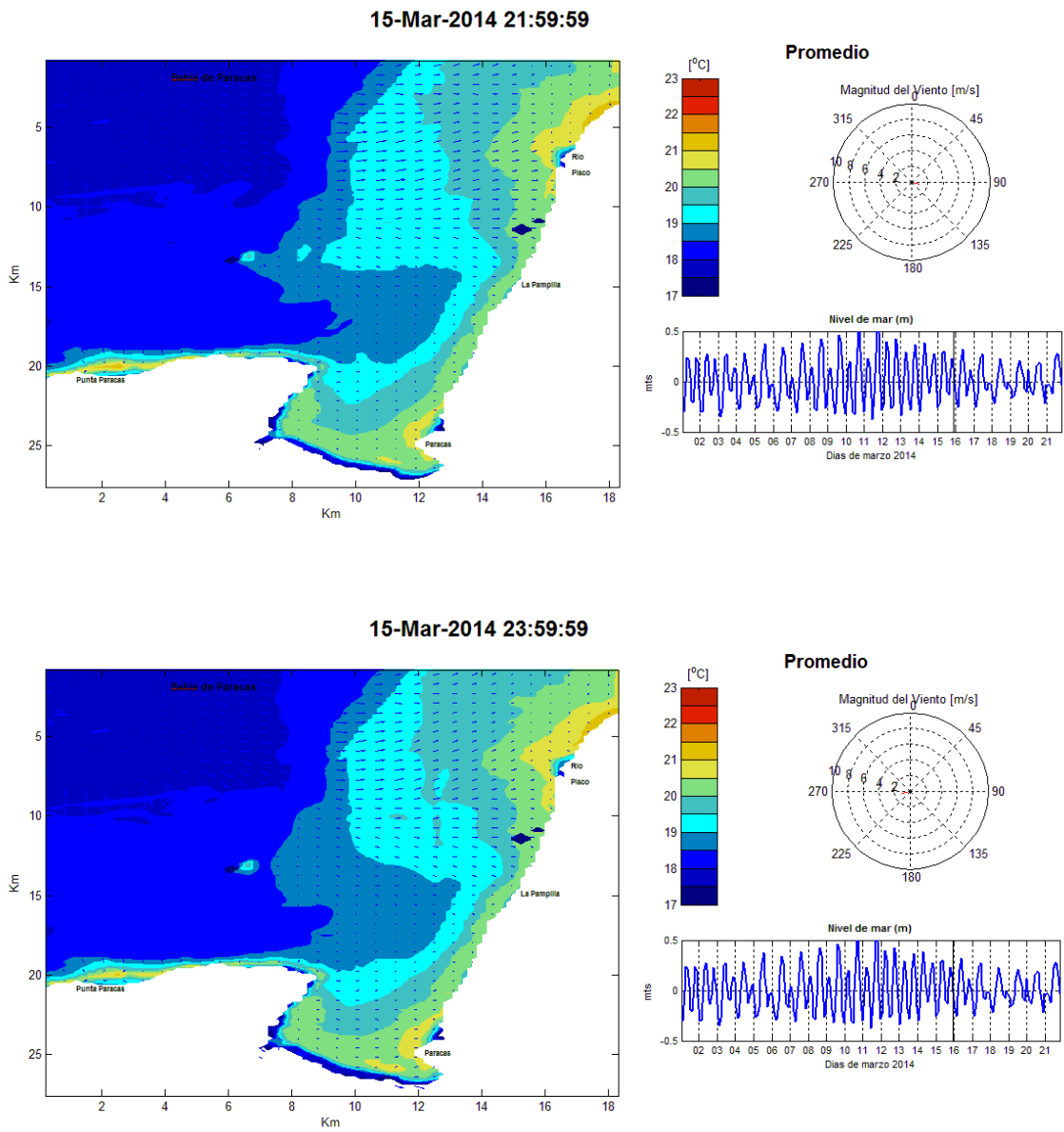


Figura 35 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 15-Mar-2014 - Capa Promedio



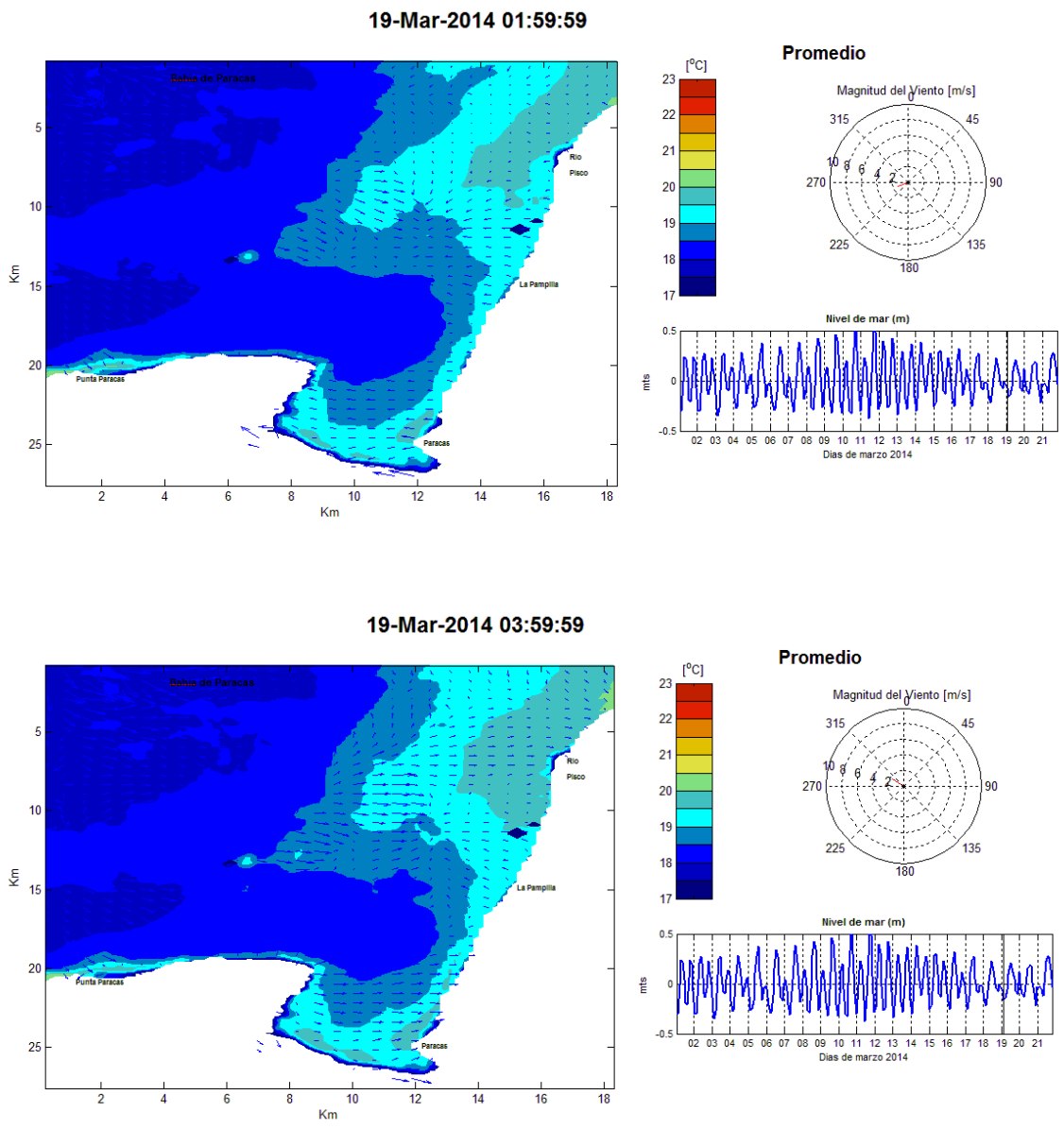


Figura 36 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 04:00 horas, 19-Mar-2014 - Capa Promedio

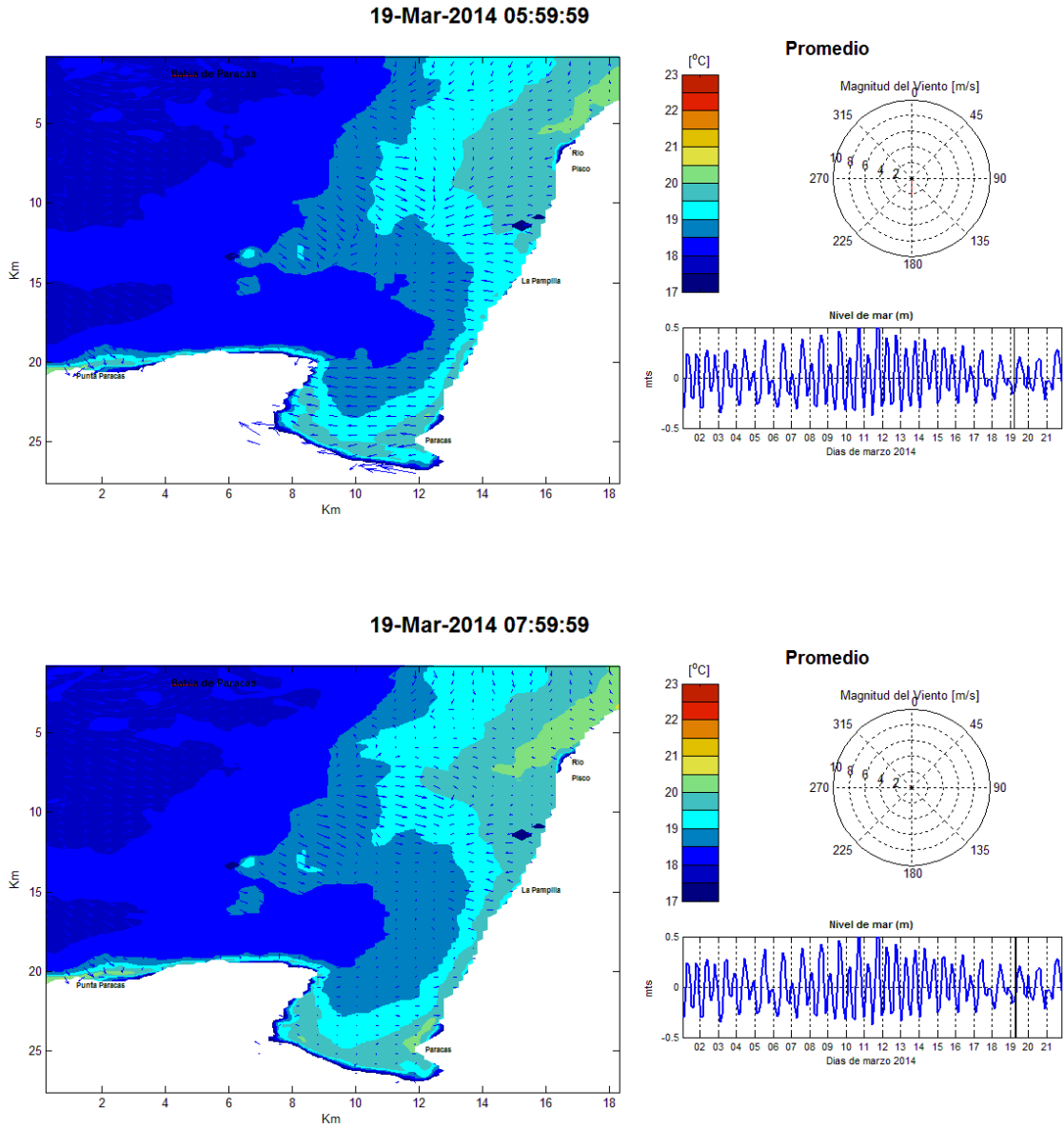


Figura 37 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 19-Mar-2014 - Capa Promedio

### **4.1.1 Velocidades - mes Noviembre 2014**

En las figuras 4.29 a 4.76 se presentan la circulación general mediante la distribución de velocidad y temperatura en la superficie libre de la Bahía de Paracas, simulada con ELCOM, durante el periodo de Noviembre del 2014.

Durante esta simulación la magnitud del viento fue moderado ( $< 4\text{m/s}$ ), se puede apreciar significativamente en la figura 4.29 - fecha 4 Noviembre- lo siguiente, que la dirección de las corrientes marinas vienen de oeste hacia el este con dirección hacia el sur en las primeras horas de la tarde, y a medida que transcurre el tiempo la dirección es más directa hacia las costas.

Además la temperatura promedio dentro de la bahía es mayor ( $20.5^\circ$ ) que fuera de la misma ( $19^\circ$ ) a excepción de las aguas adyacentes del Río Pisco que tiene también una temperatura mayor ( $21^\circ$ ).

Durante las últimas horas del día – figura 4.30 - tiene el mismo comportamiento que en las primeras horas de la tarde las corrientes marinas, en estas circunstancias la temperatura dentro de la bahía desciende ( $19^\circ$ ) y en los exteriores ( $18.5^\circ$ ).

El efecto de entrada del flujo en la bahía, fue apreciable en las aguas adyacentes a Punta Pejerrey fecha 5 de Noviembre– figura 4.31 – también la magnitud del viento superficial fue leve ( $< 2\text{cm/s}$ ), y se parecía la misma características que en días anteriores la temperatura dentro de la bahía ( $20.5^\circ$ ) es ligeramente mayor que en los exteriores ( $19.5^\circ$ ).

En la fecha 9 de Noviembre -figura 4.33- se tuvo velocidades mínimas casi en reposo en la Bahía de Paracas y así se mantuvo durante toda la tarde ya a partir de la noche 6:00 pm la situación de las corrientes cambió notoriamente, la temperatura se mantuvo casi homogénea en este caso dentro y fuera de la bahía ( $18^\circ - 19^\circ$ ) durante todo el día.

En todo el litoral hasta el río Pisco –figura 4.35 – la temperatura se mantuvo constante ( $19^\circ$ ) durante las horas de la mañana, además se puede apreciar que las corrientes marinas inciden en Punta Pejerrey y Punta Paracas en las mismas horas, durante la noche la temperatura fueron heterogéneas.

A mitad de mes de noviembre, día 15 – figura 4.37- se aprecia que la temperatura es constante ( $19^\circ$ ) y ocupa una mayor extensión en toda el área hasta las costas de las islas Ballestas, además las corrientes provienen del norte y se dirigen hacia el suroeste. Las corrientes marinas van de este hacia el oeste, se hace apreciable –figura 4.38 – durante las 5pm a 7pm del mismo día.

Se menciona que la temperatura dentro de la bahía es generalmente mayor que en los exteriores para la fecha de 21 de Noviembre – figura 4.39 – la temperatura aumentó considerablemente ( $22^\circ$ ) existe también irregularidad de las corrientes marinas, se presentan flujos provenientes del sur, a medida que van ingresando a la Bahía, se presenta el efecto de divergencia hacia Punta Pejerrey y Paracas.

El efecto de salida de reflujo en la bahía –figura 4.41- se presenta notoriamente el 24 de Noviembre a 4:00pm, a partir de las 6:00pm – figura 4.42- la magnitudes del viento se elevan (< 6m/s) provenientes del Sur.

#### Para la Capa de Fondo

Durante el día 4 de Noviembre –figura 4.44 - en la desembocadura del Río Pisco y las costas dentro de la Bahía, se presenta aumento de temperatura considerable (21°), a diferencia de las masas de agua externas (17.5°), este evento se mantuvo durante todo el día, a pesar que en el periodo de 4:00pm a 6:00pm, la temperatura en las aguas adyacentes al Río Pisco y las costas dentro de la Bahía se mantuvieron altas pero disminuyeron significativamente (20°).

Para la fecha de 6 de Noviembre –figura 4.45 y 4.46- la característica en la Bahía se mantiene respecto a la temperatura.

#### Para la capa Promedio

Existe la misma tendencia de la temperatura respecto de la capa de fondo, la diferencia es que se presentan mayor masa de agua con mayor temperatura (21°) en la desembocadura del río Pisco y en las costas de la Bahía.

Para la fecha 10 de Noviembre – figura 4.63 – esta característica cambio completamente y la temperatura se mantuvo casi homogénea en la temperatura (18.5°), durante la tarde e inicios de la noche las costas peruanas en Paracas, la Pampilla hasta el Río Pisco disminuyen (17.5°).

Para la fecha 12 de Noviembre – figura 4.66- la temperatura se mantiene constante en toda la costa peruana (19°).

Durante el 22 de Noviembre – figura 4.73 – la temperatura en las costas aumentaron (20.5°).

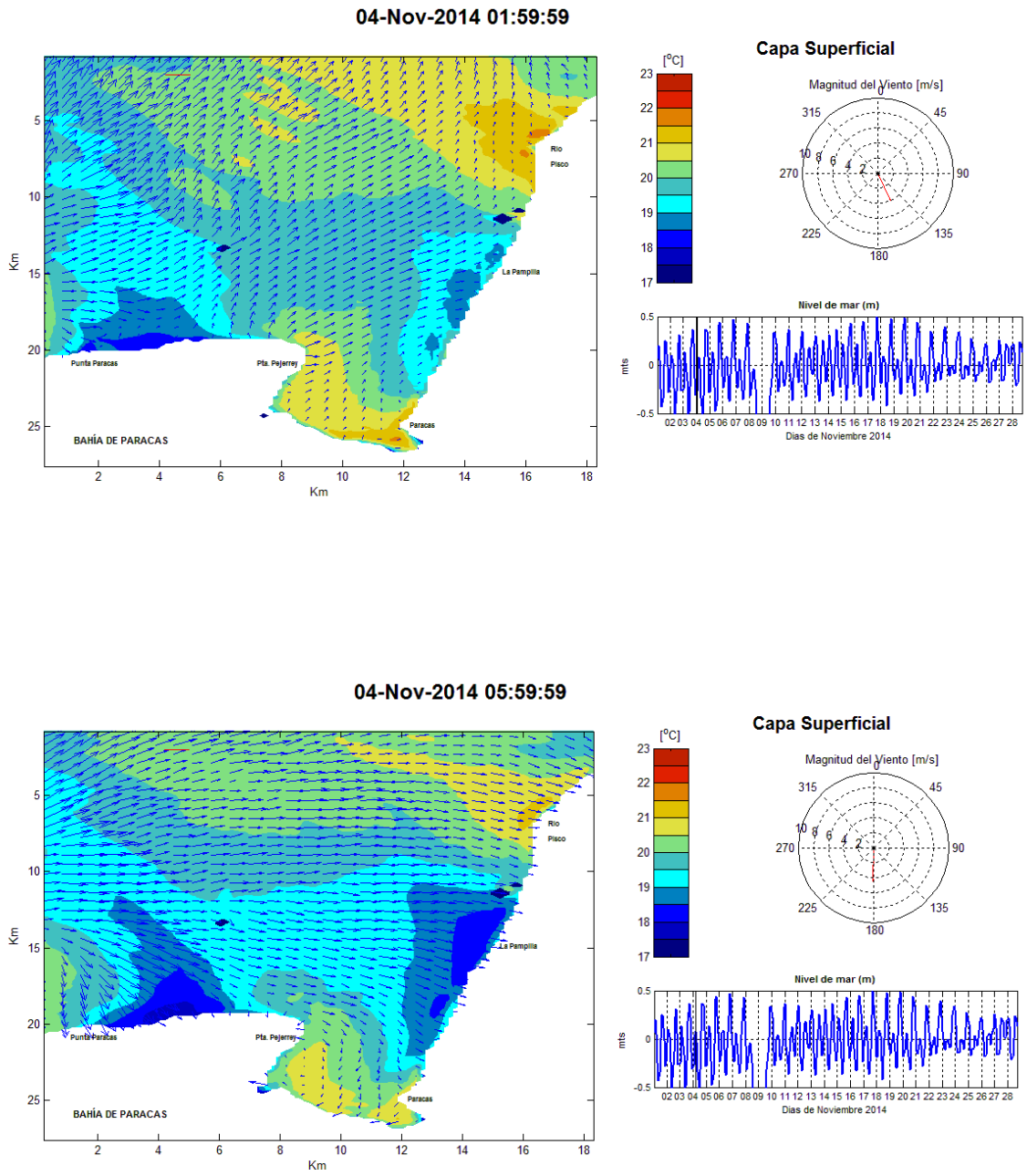


Figura 38 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Superficial

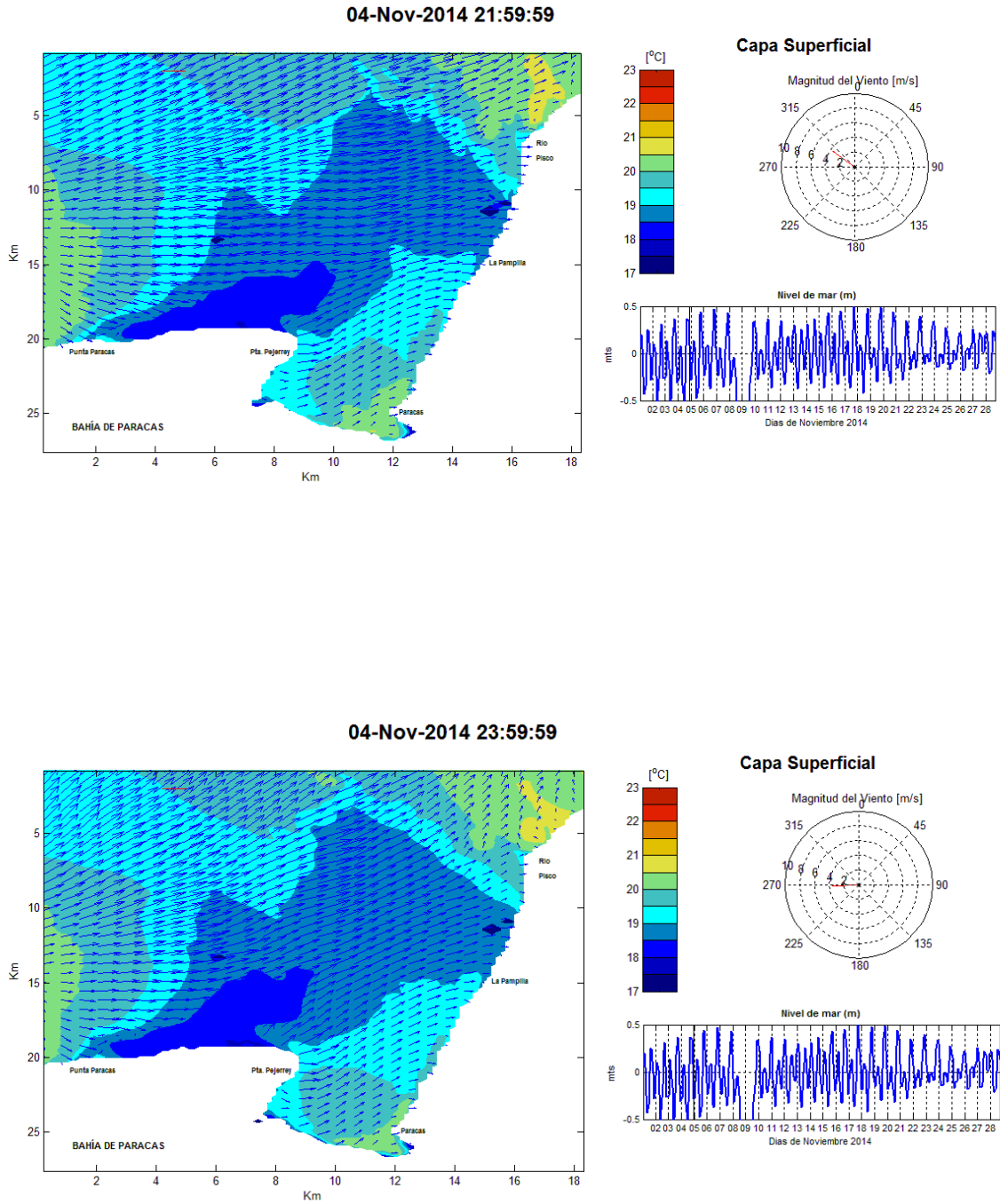


Figura 39 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Superficial

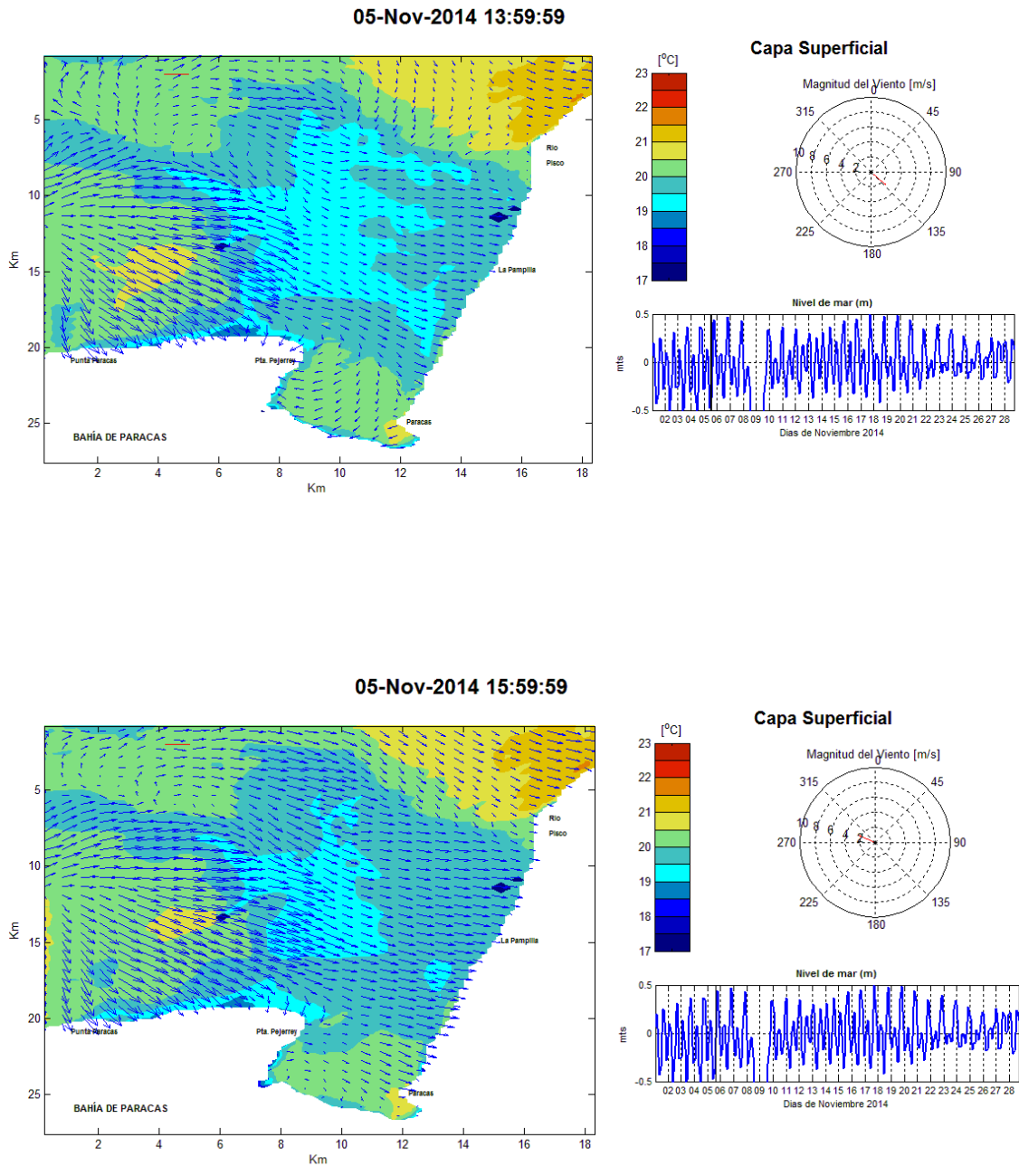


Figura 40 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 05-Nov-2014 - Capa Superficial

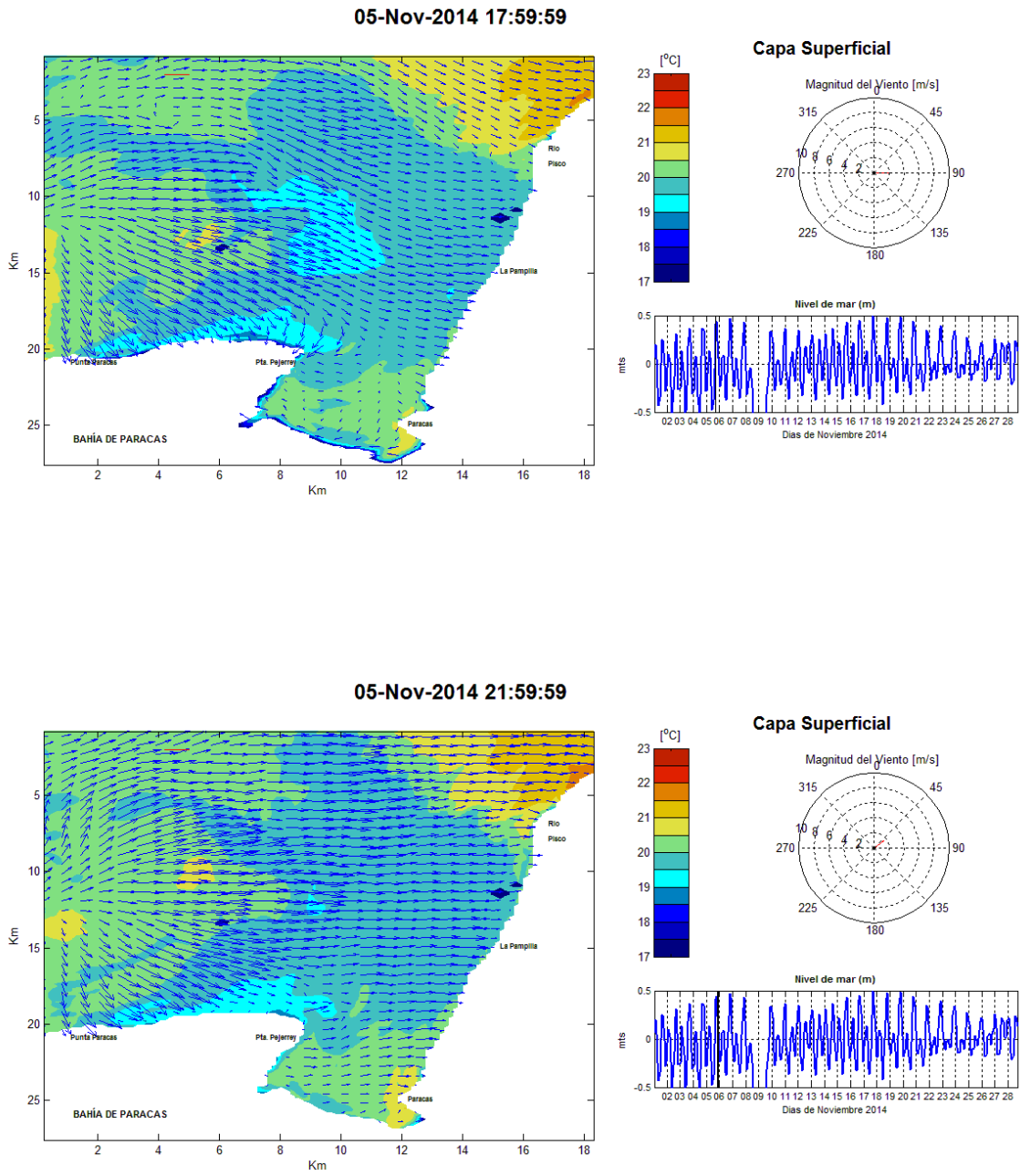


Figura 41 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 22:00 horas, 05-Nov-2014 - Capa Superficial



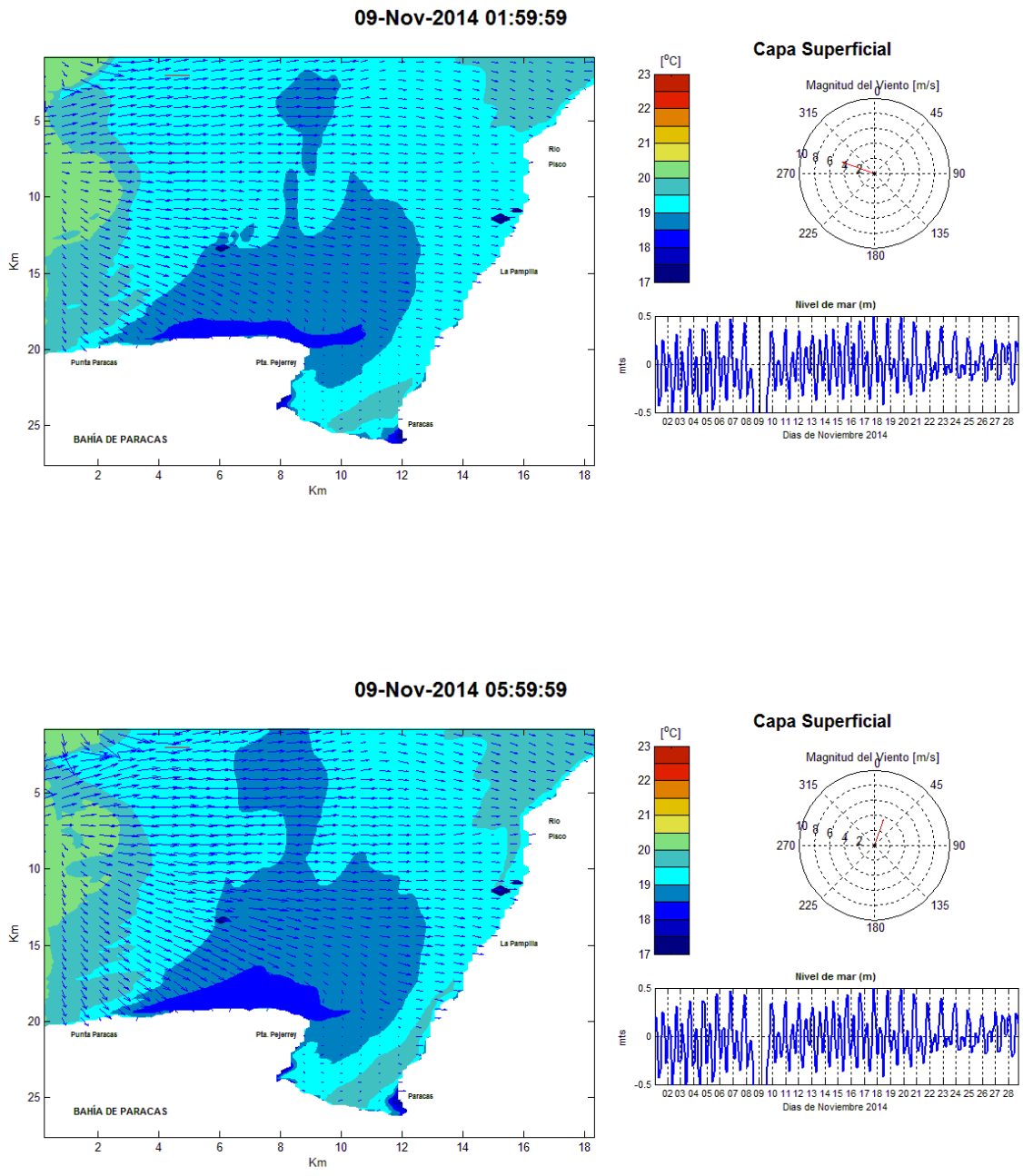


Figura 42 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 09-Nov-2014 - Capa Superficial

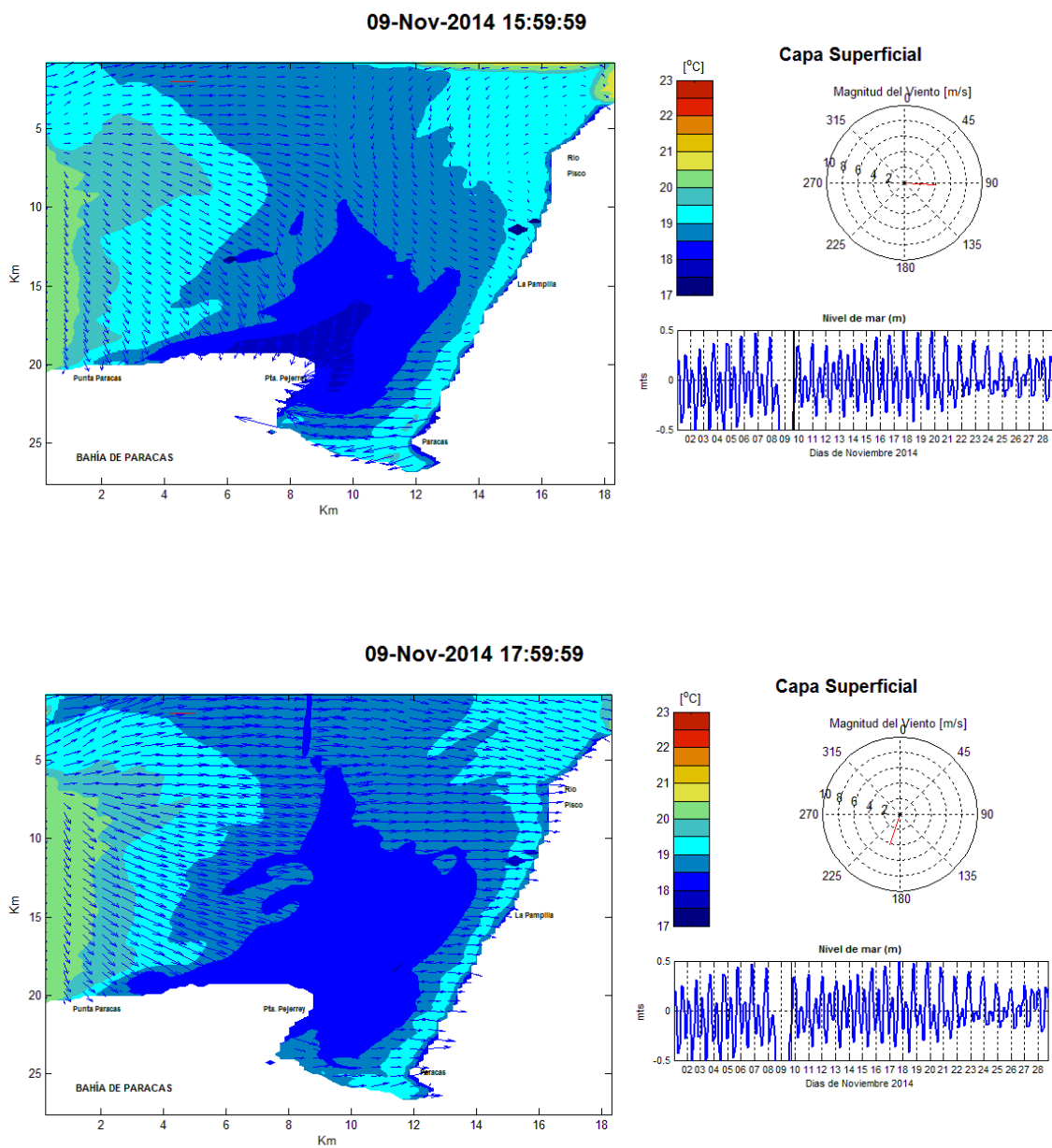


Figura 43 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 09-Nov-2014 - Capa Superficial

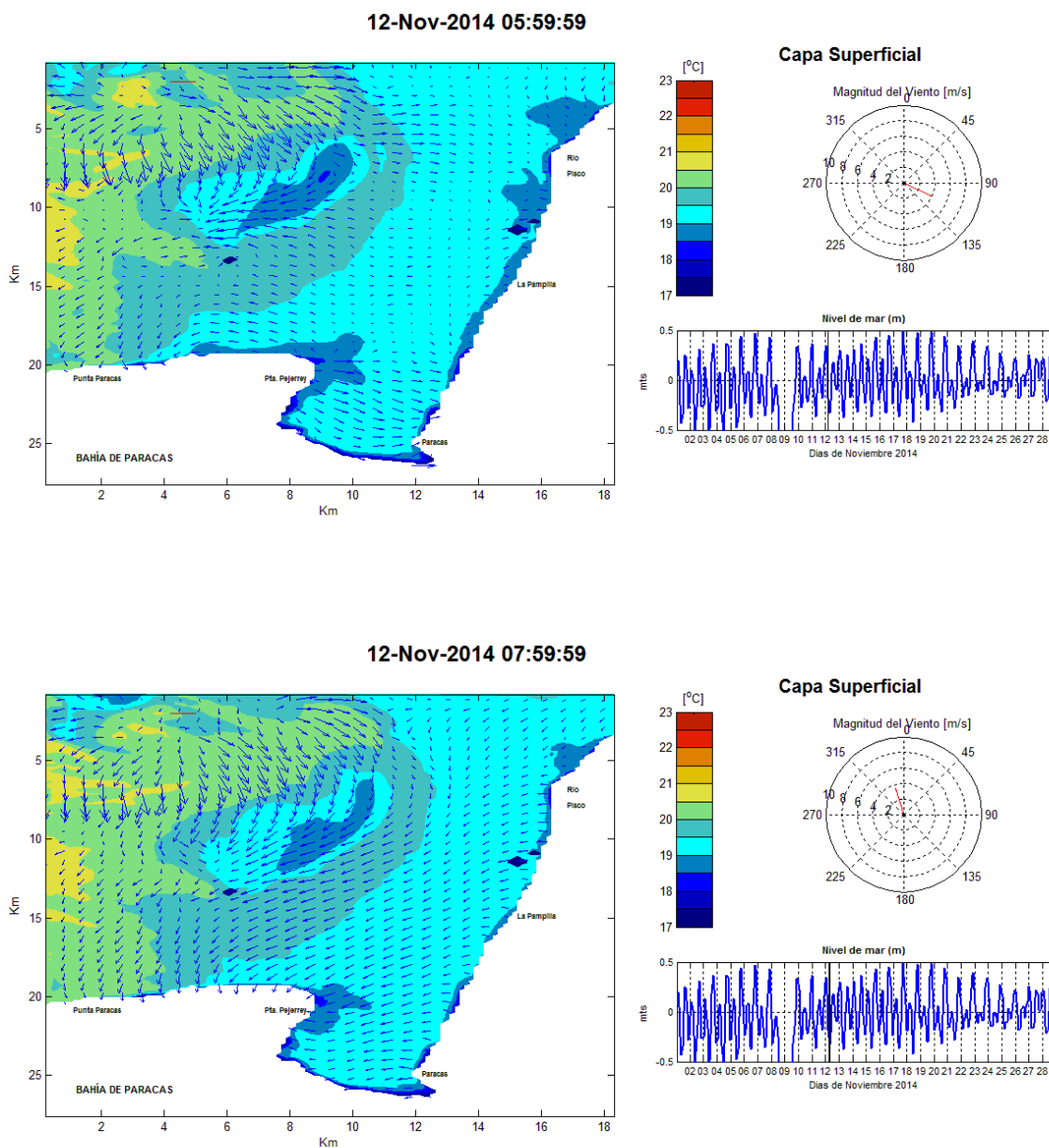


Figura 44 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Superficial

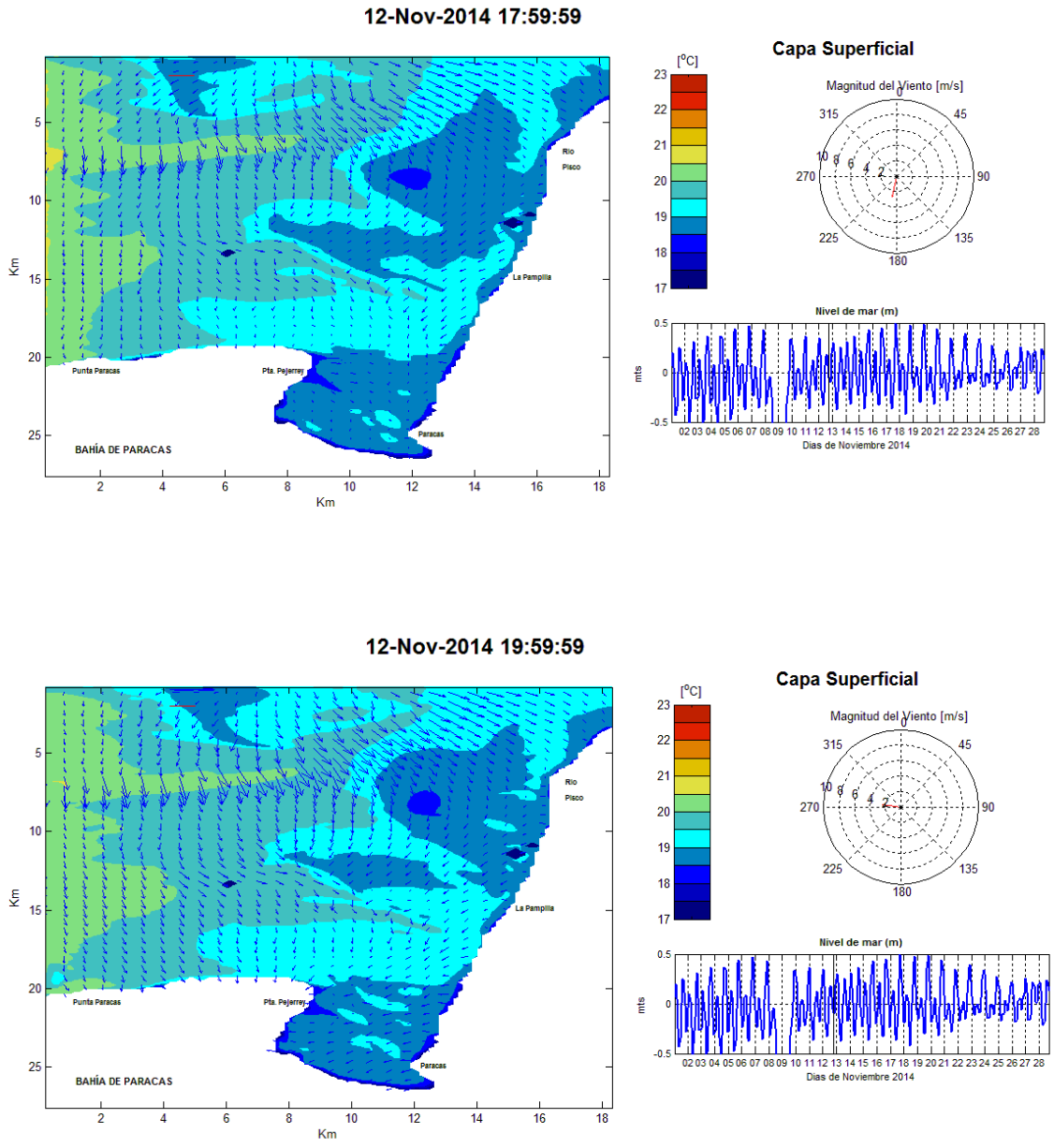


Figura 45 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Superficial

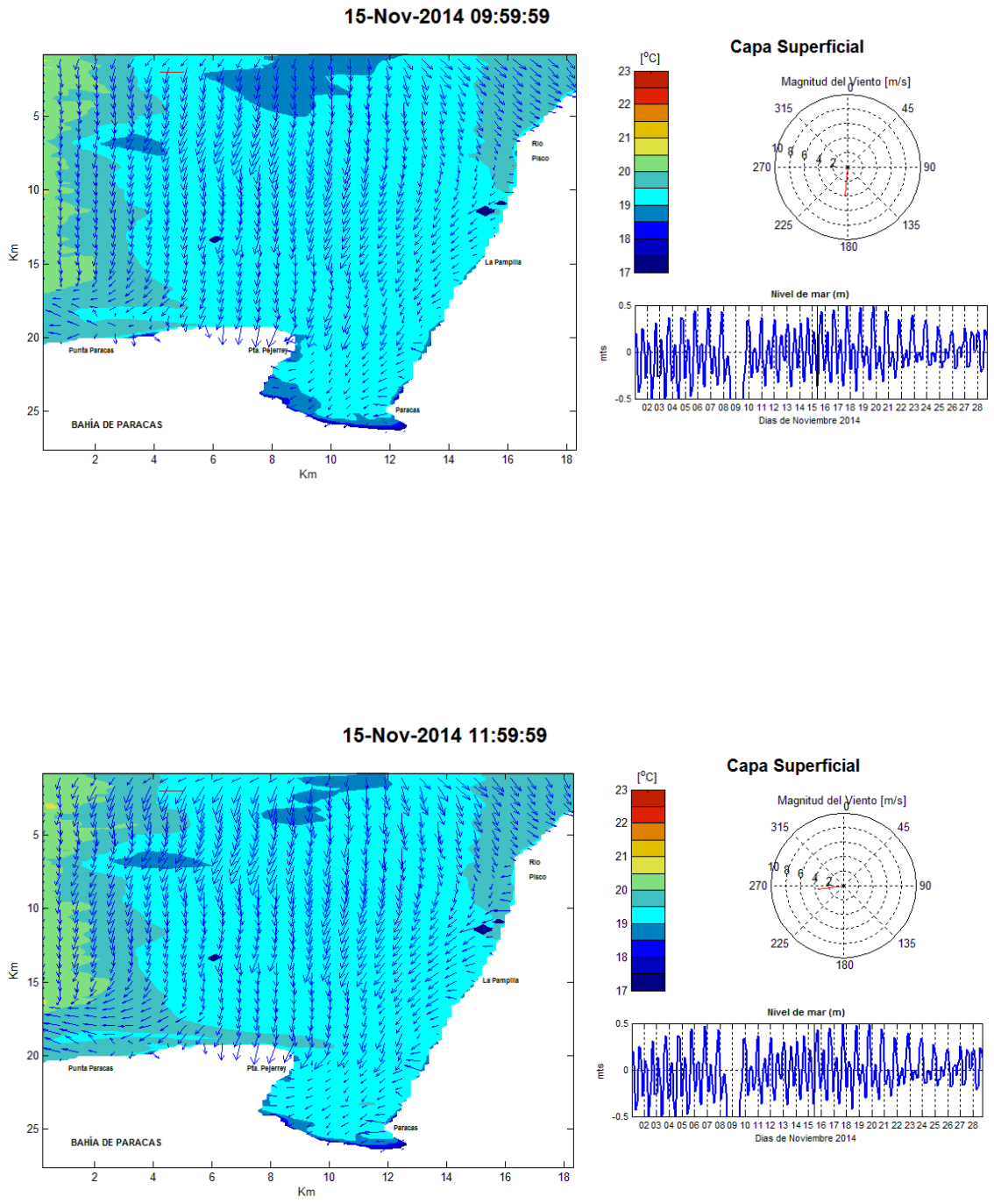


Figura 46 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 15-Nov-2014 - Capa Superficial

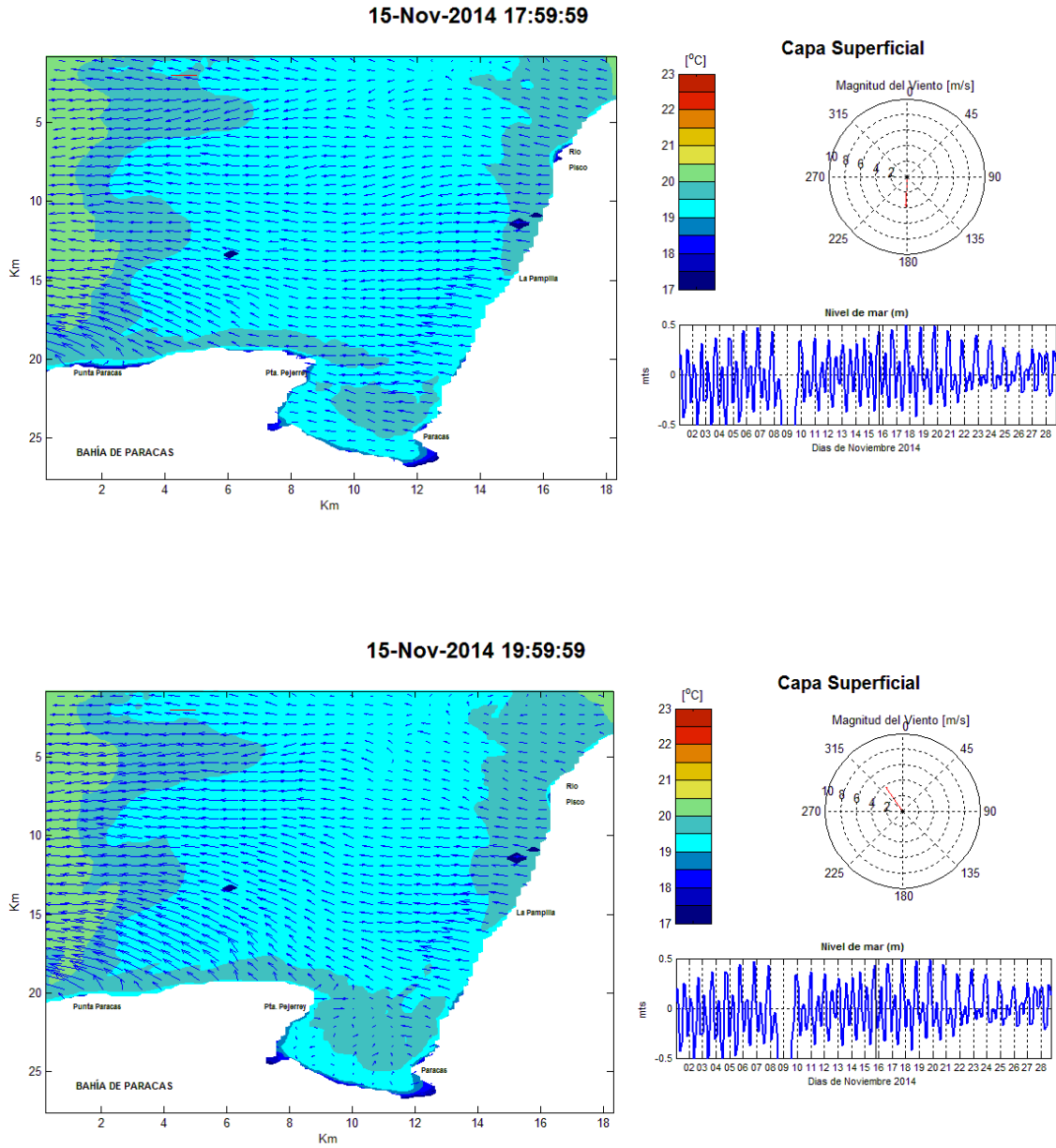


Figura 47 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 15-Nov-2014 - Capa Superficial

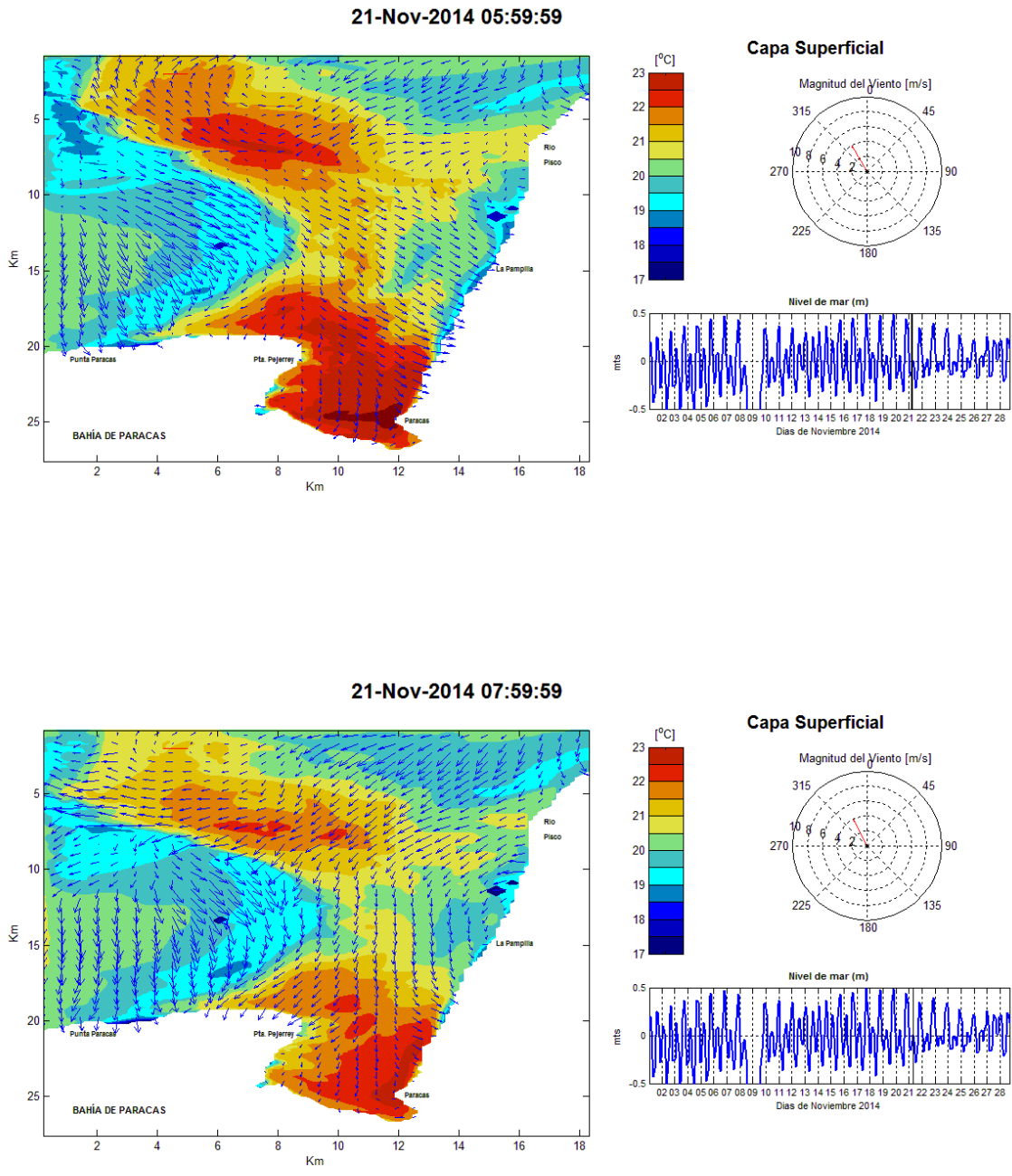


Figura 48 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 21-Nov-2014 - Capa Superficial

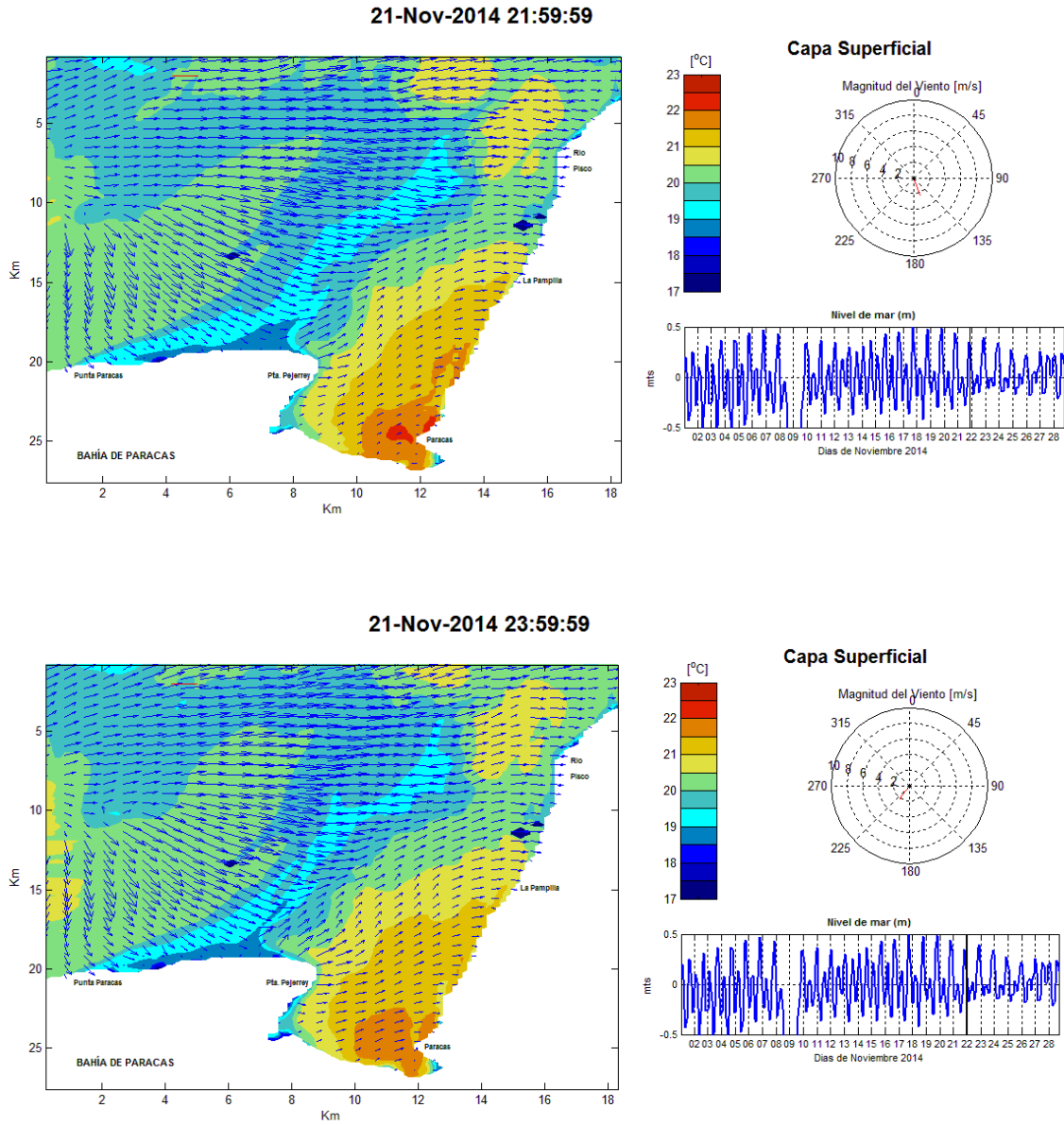


Figura 49 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 21-Nov-2014 - Capa Superficial



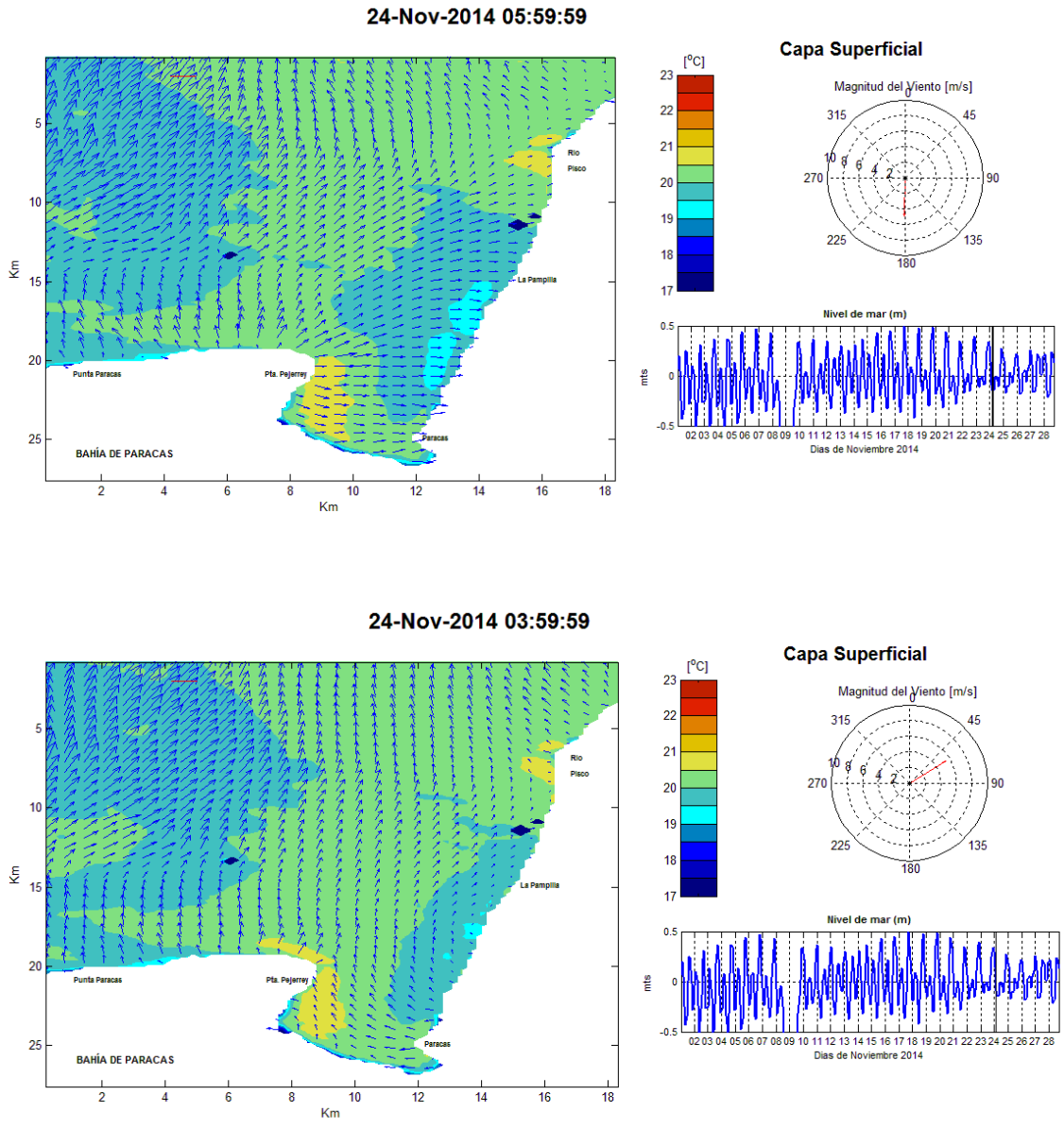


Figura 50 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 4:00 horas, 24-Nov-2014 - Capa Superficial

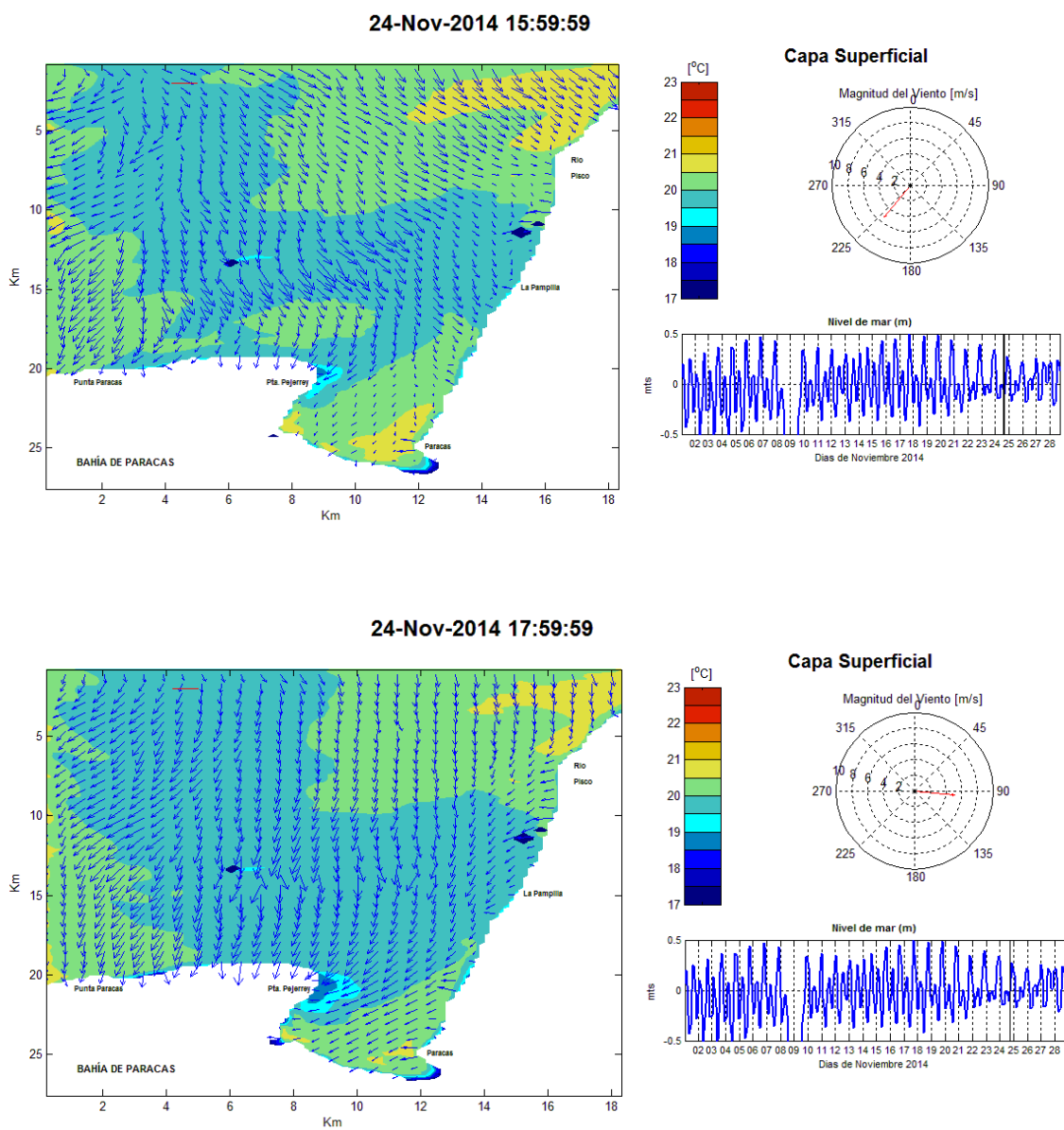


Figura 51 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 24-Nov-2014 - Capa Superficial

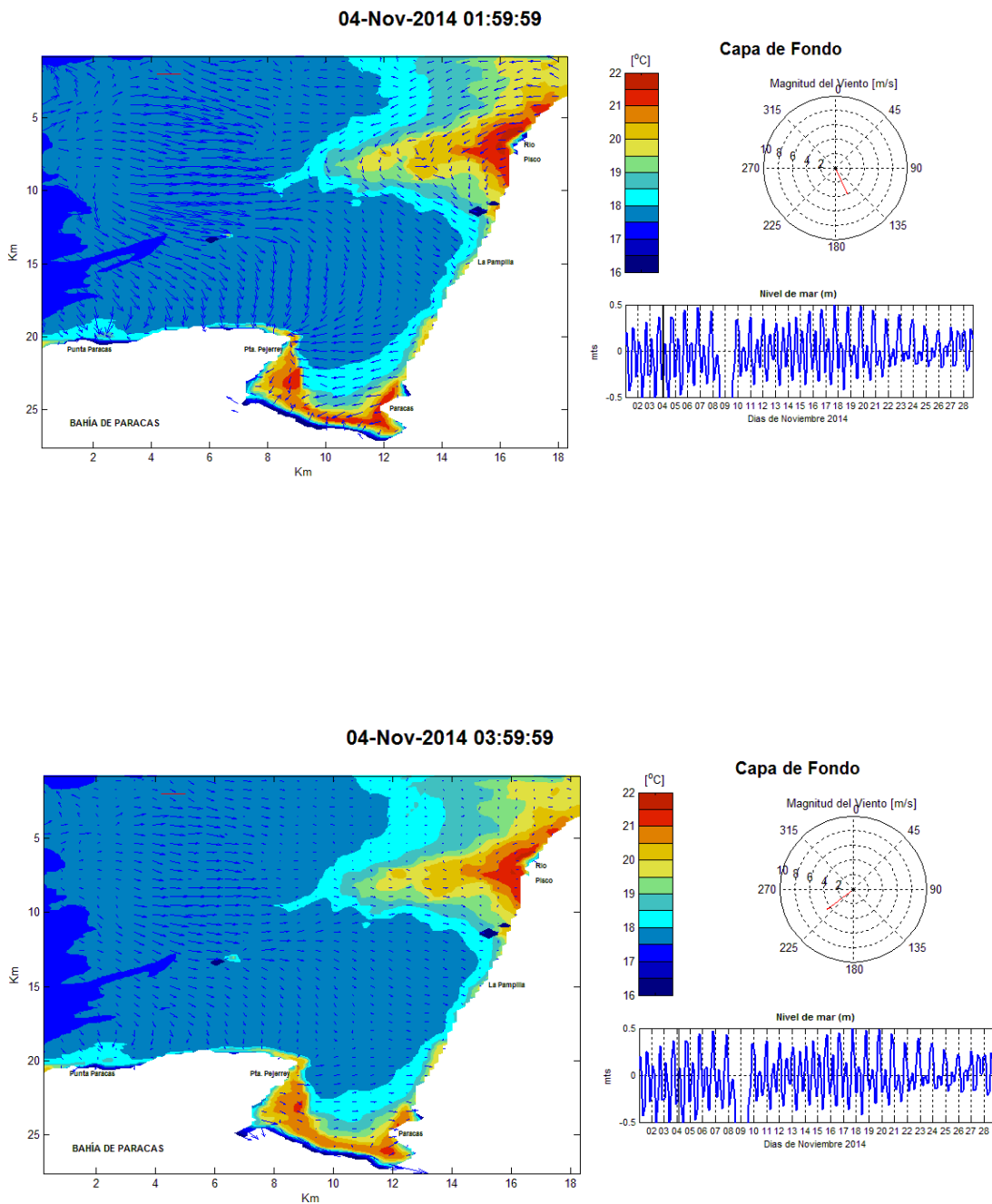


Figura 52 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa de Fondo

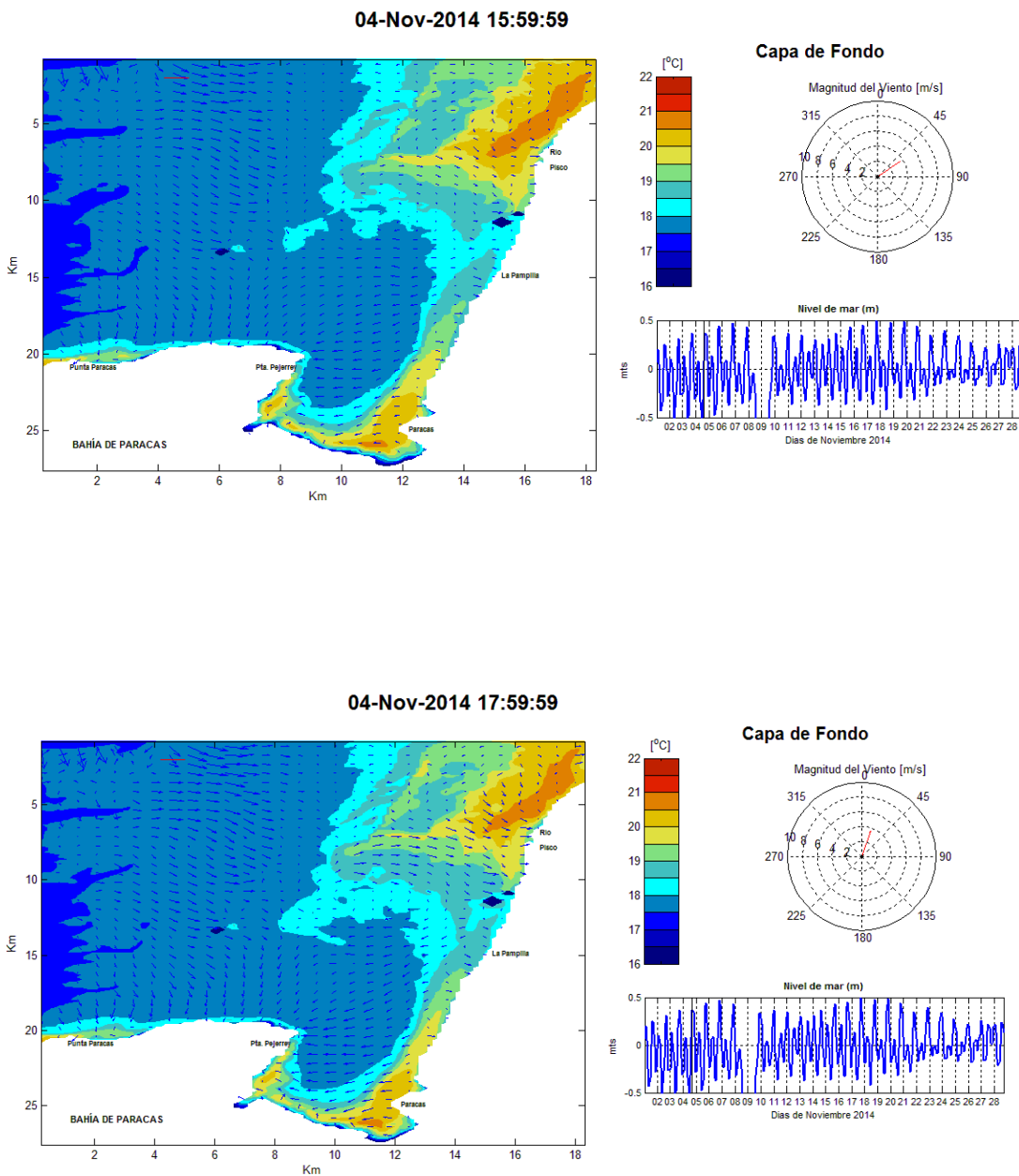
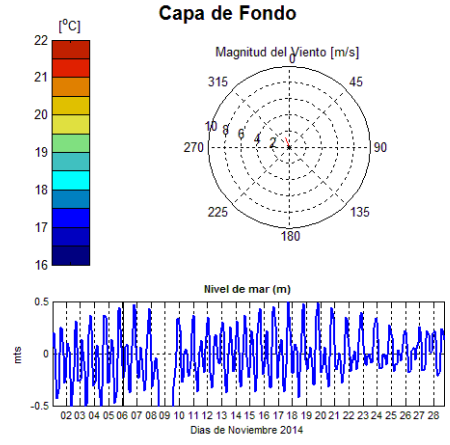
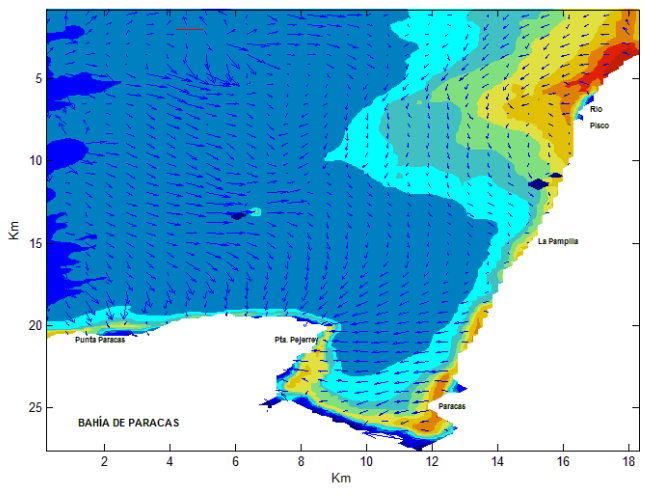


Figura 53 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 18:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa de Fondo

06-Nov-2014 01:59:59



06-Nov-2014 03:59:59

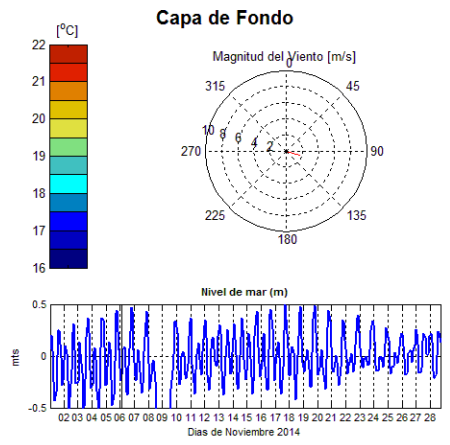
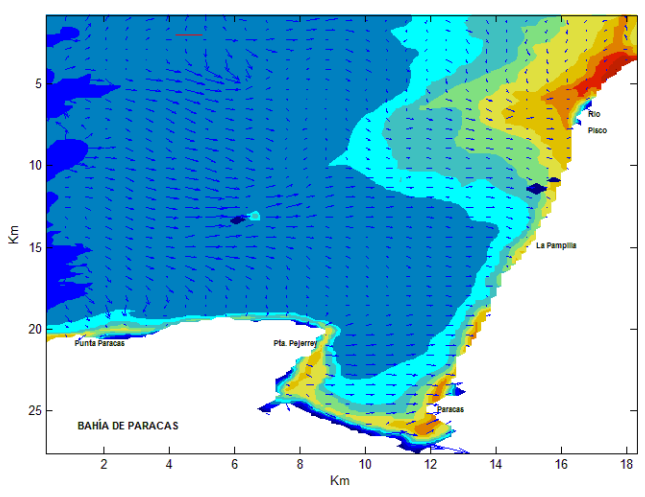


Figura 54 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 06-Nov-2014 - Capa de Fondo

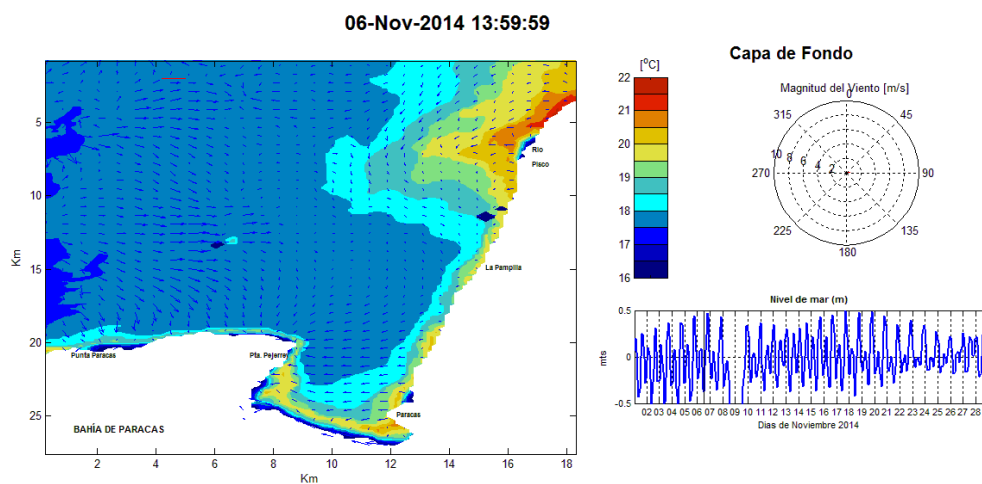
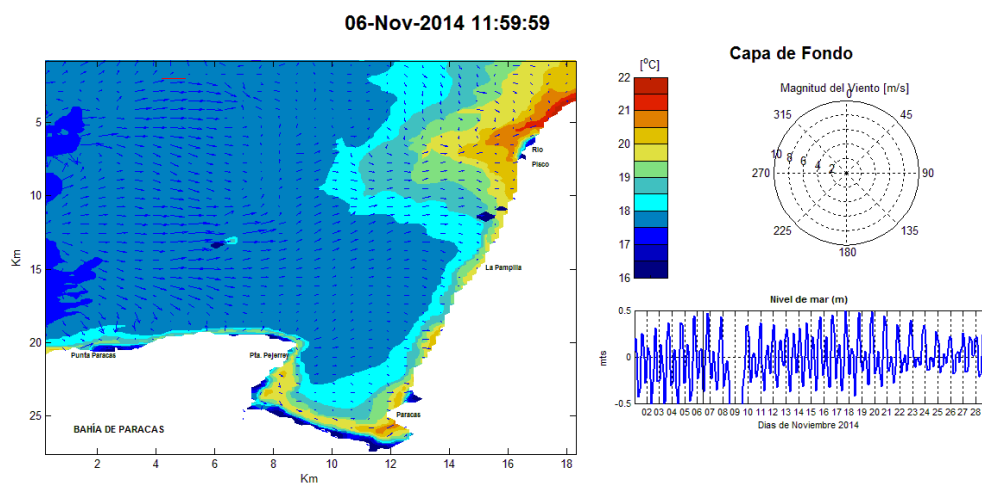


Figura 55 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 12:00 a 14:00 horas, 06-Nov-2014 - Capa de Fondo

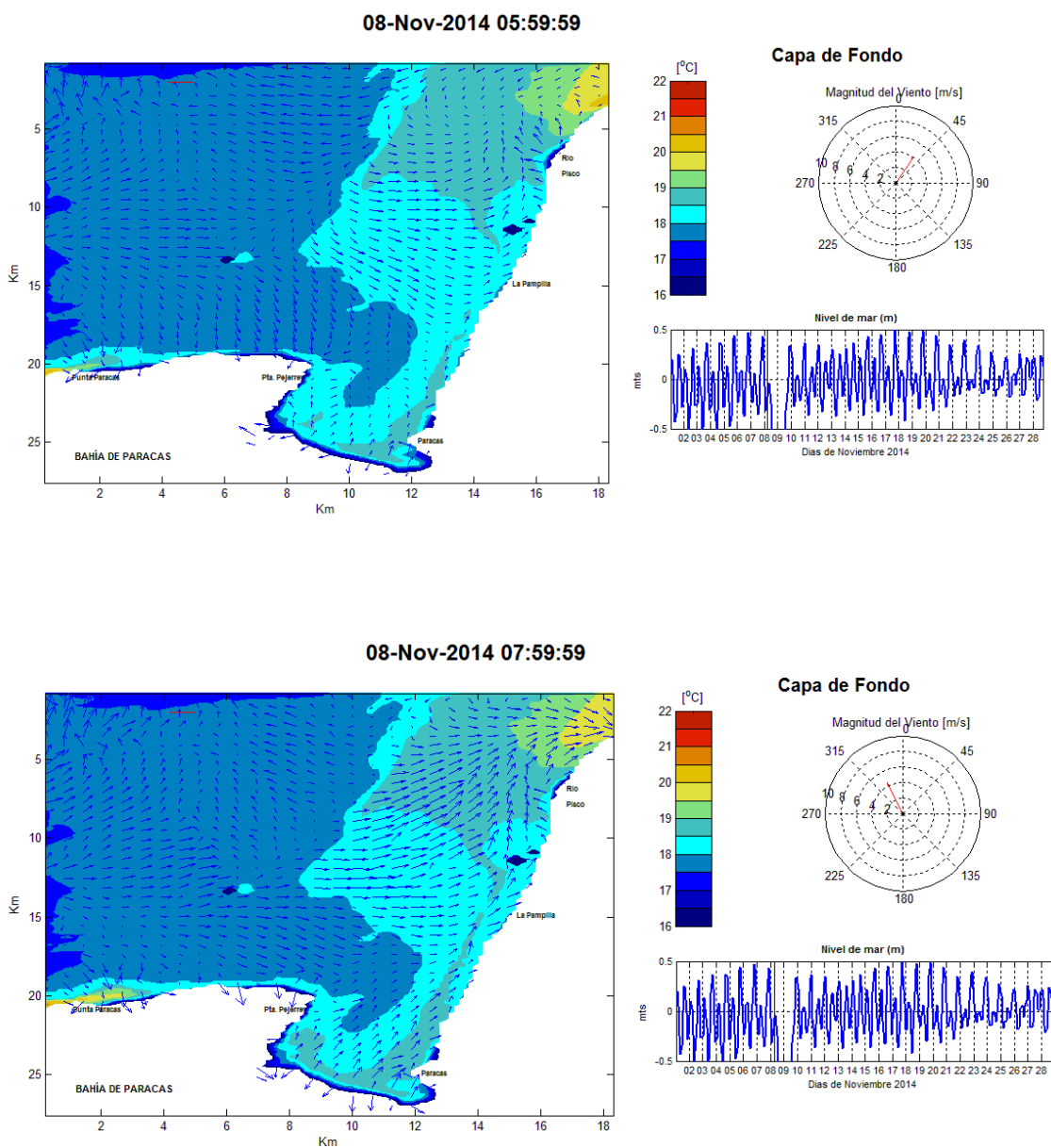


Figura 56 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 08-Nov-2014 - Capa de Fondo

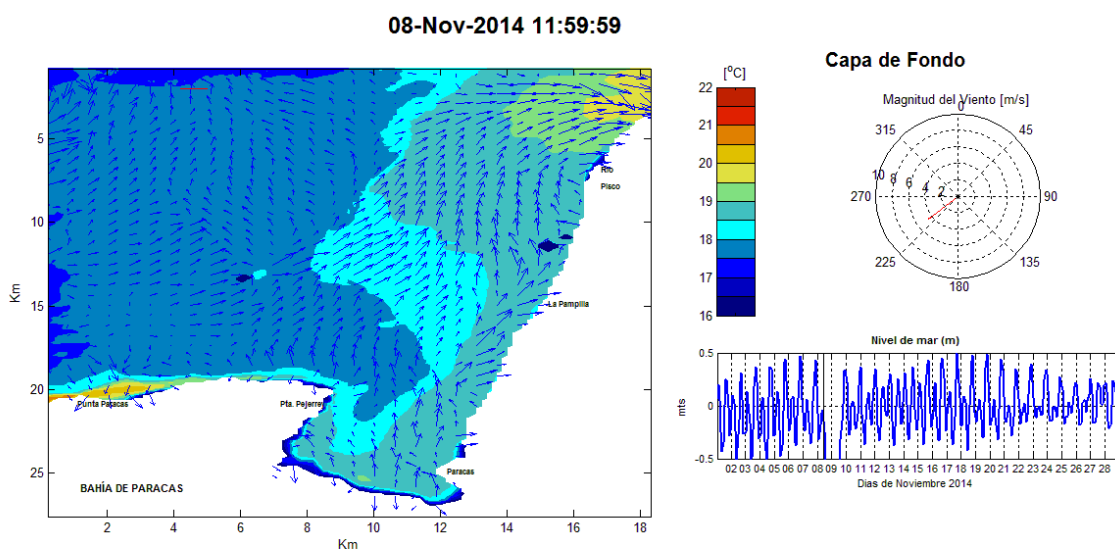
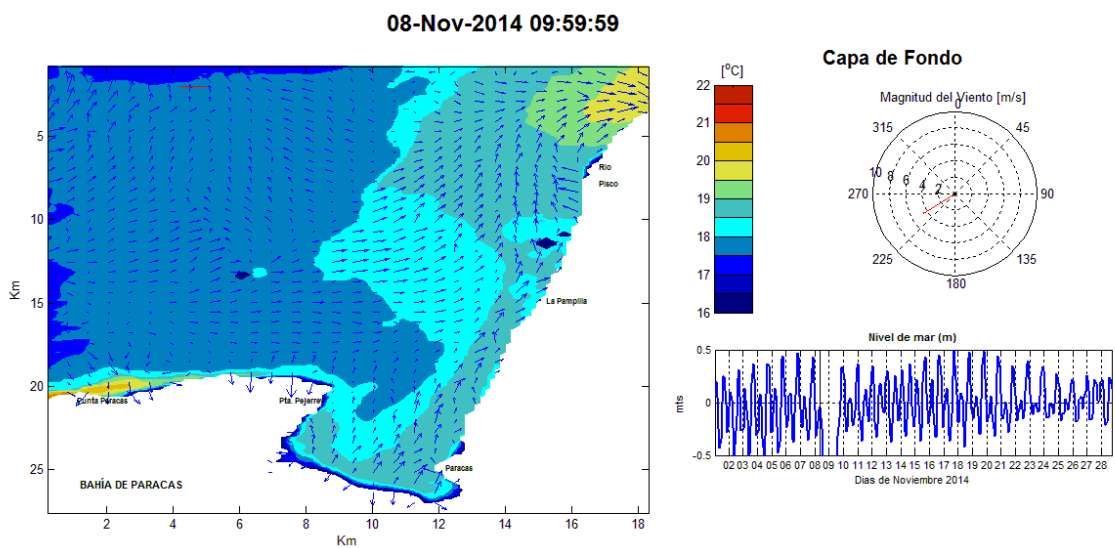


Figura 57 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 08-Nov-2014 - Capa de Fondo



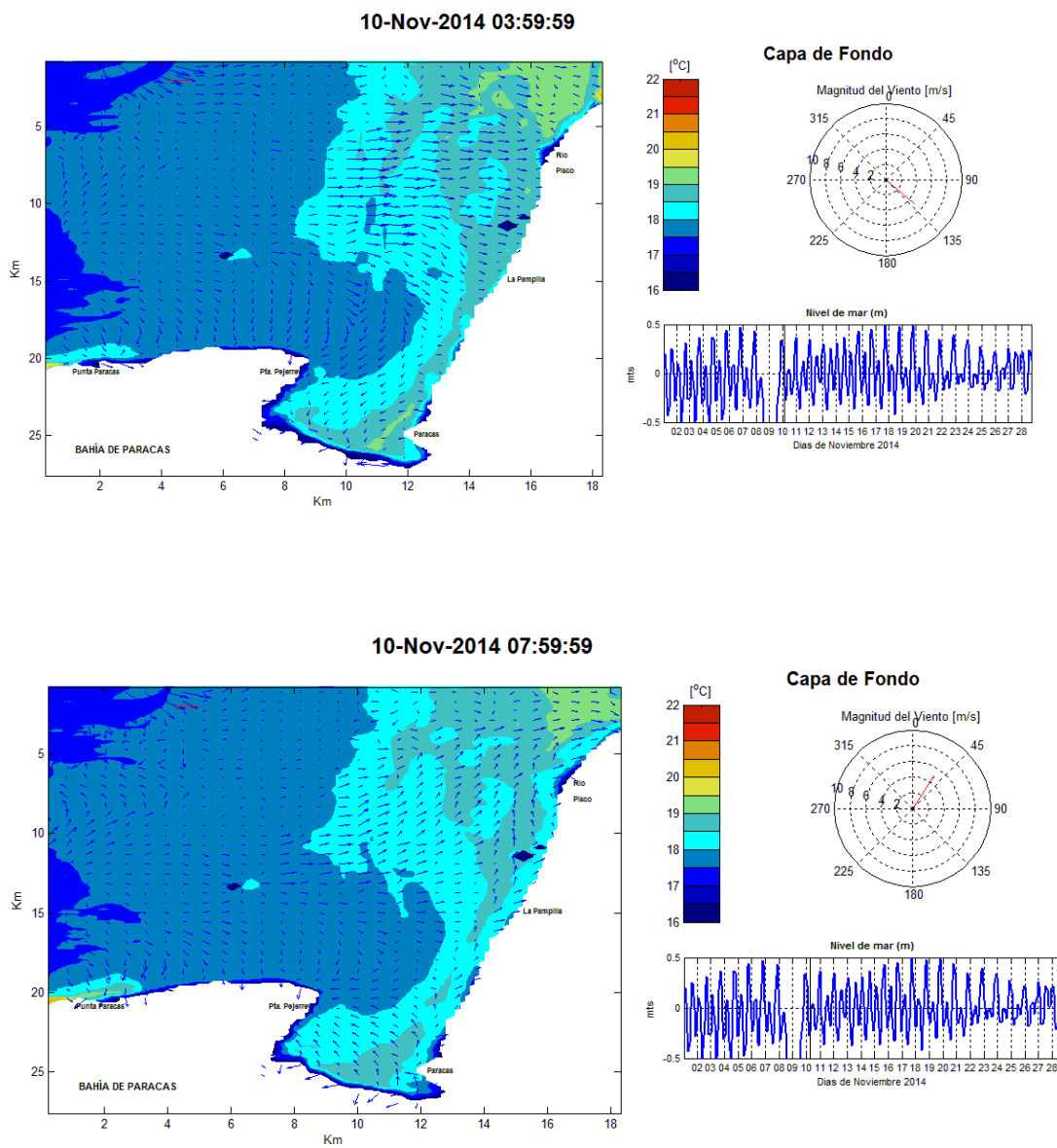


Figura 58 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 8:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa de Fondo

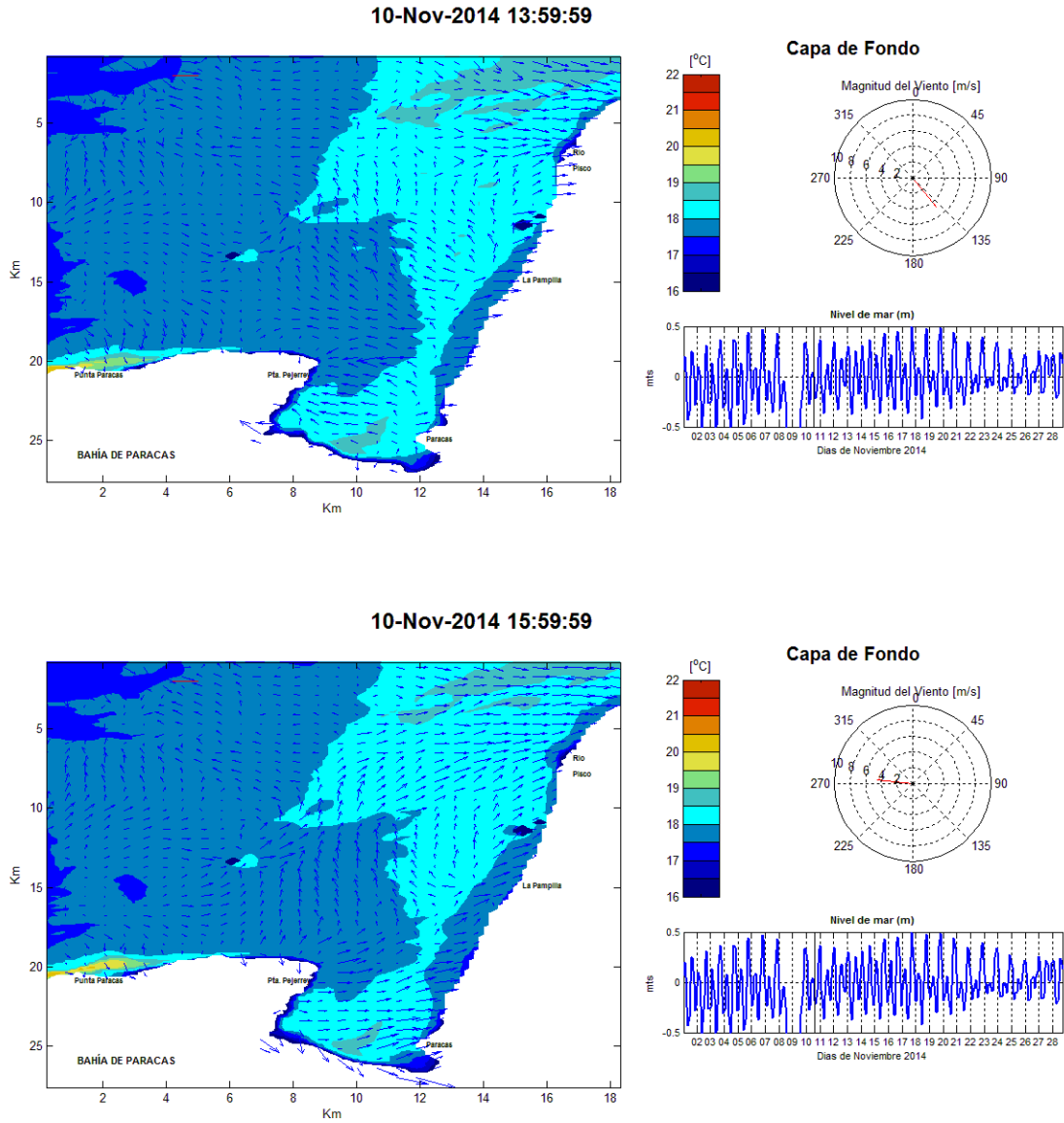


Figura 59 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa de Fondo

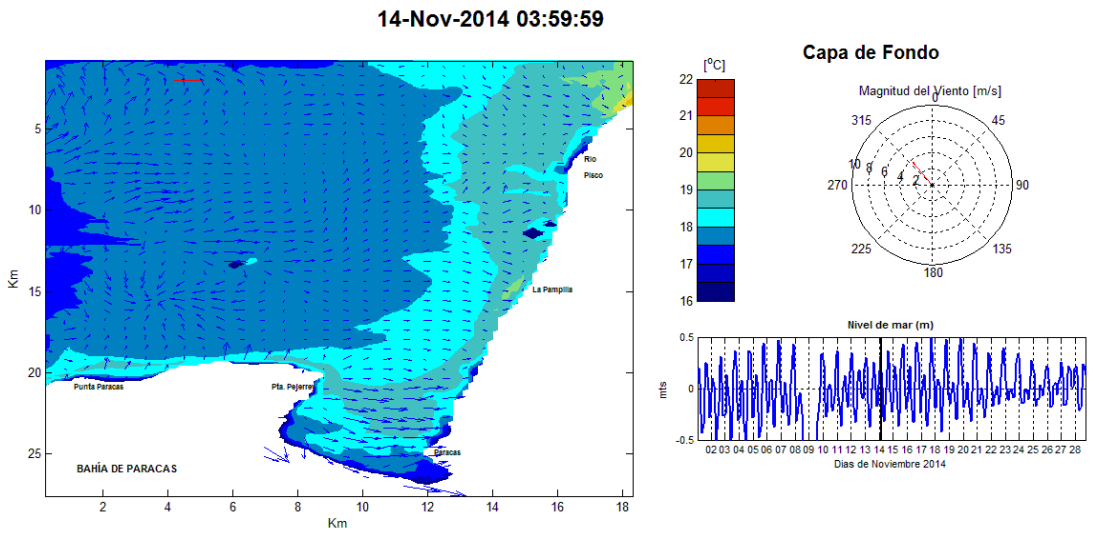
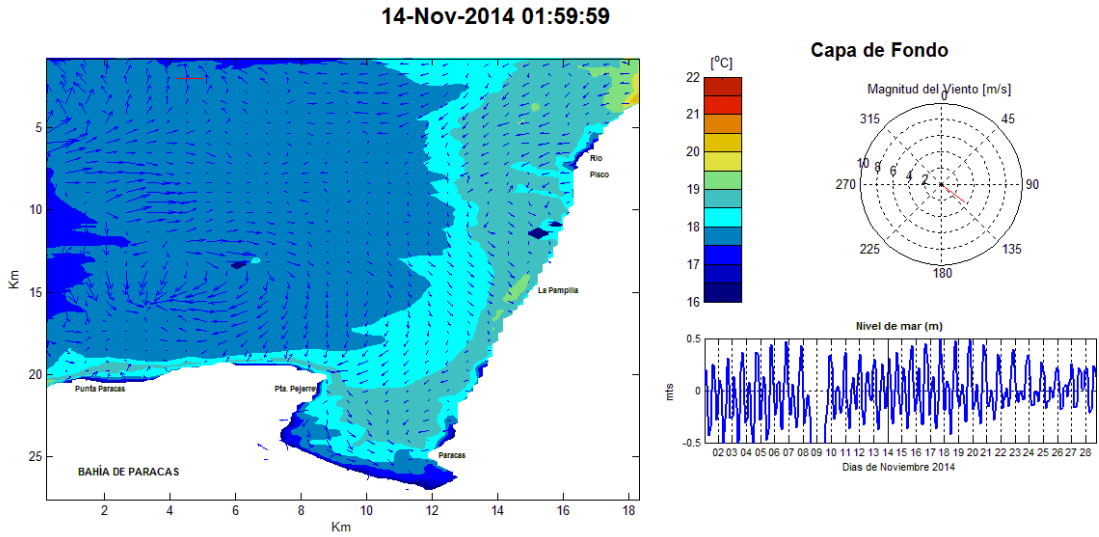


Figura 60 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa de Fondo

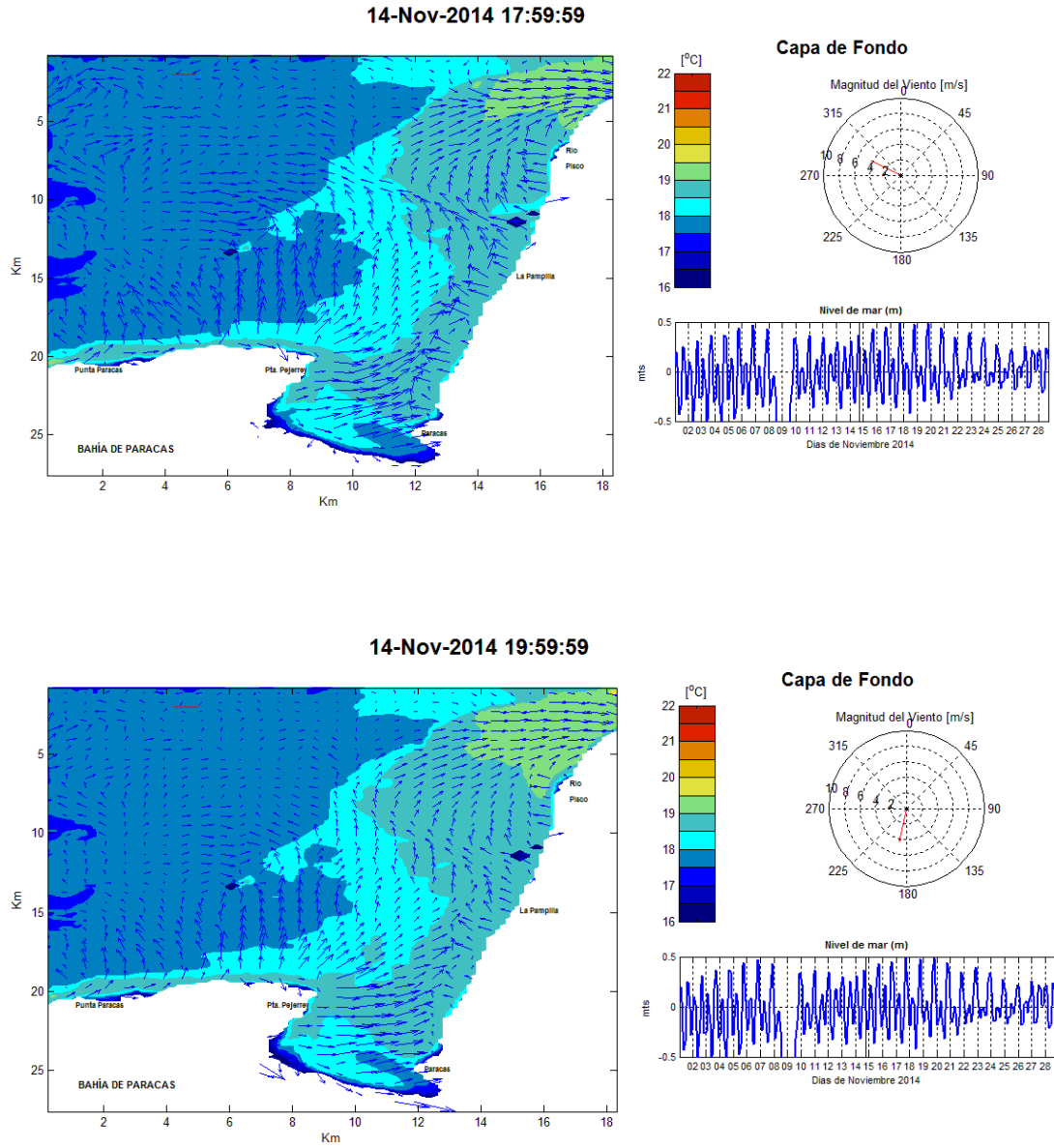


Figura 61 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 18:00 a 20:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa de Fondo

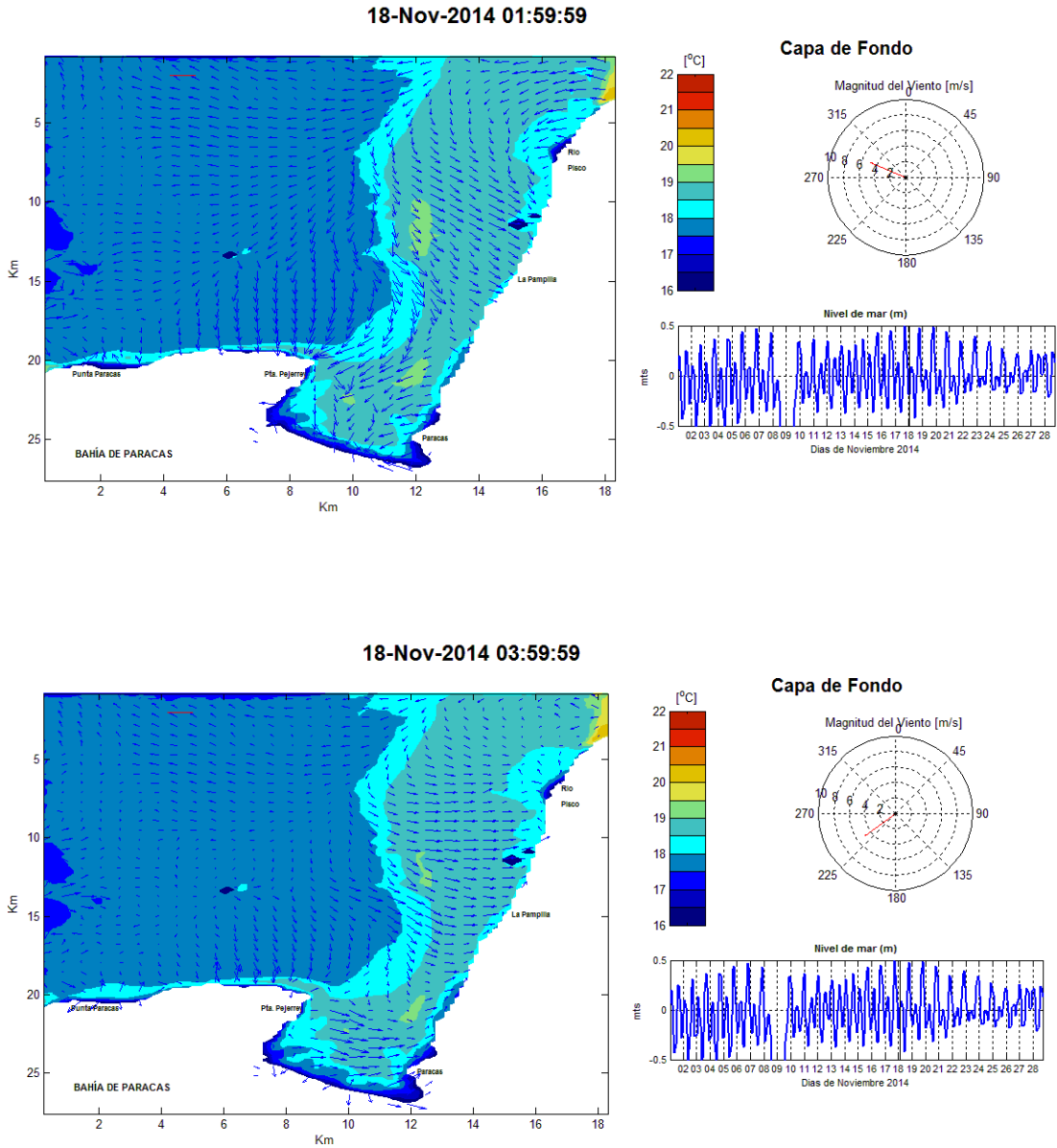


Figura 62 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 18-Nov-2014 - Capa de Fondo

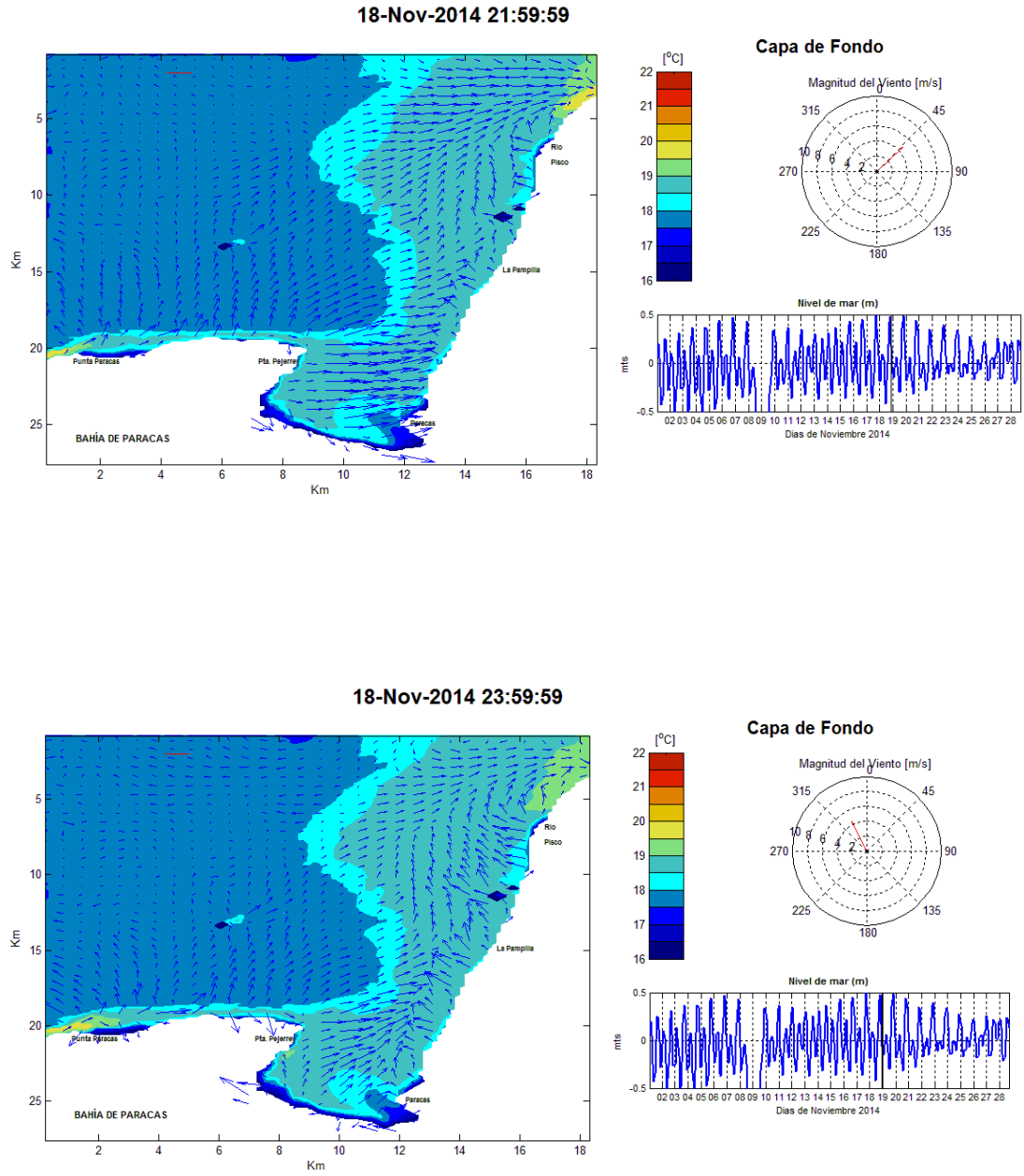


Figura 63 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 18-Nov-2014 - Capa de Fondo

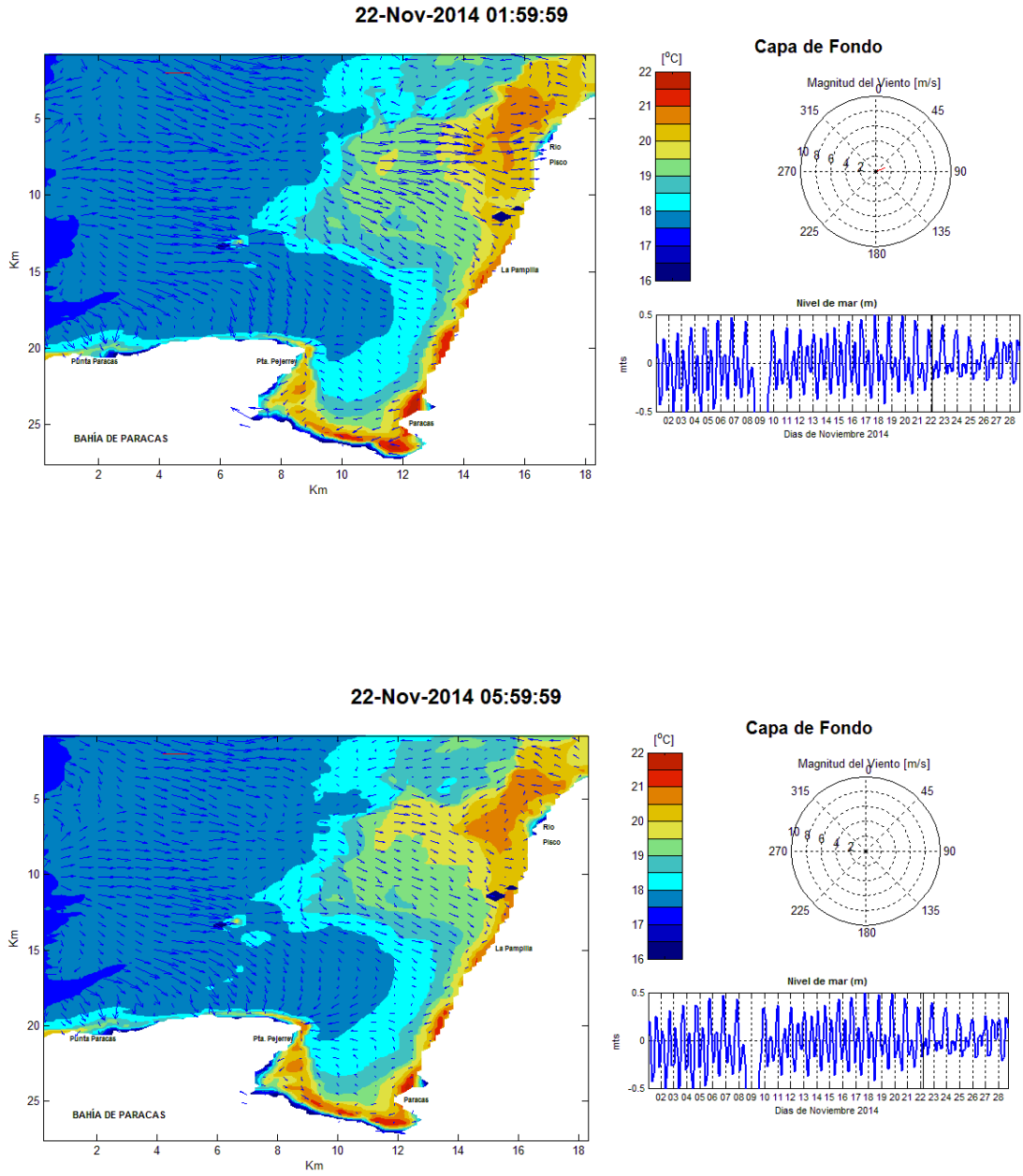


Figura 64 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 6:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa de Fondo

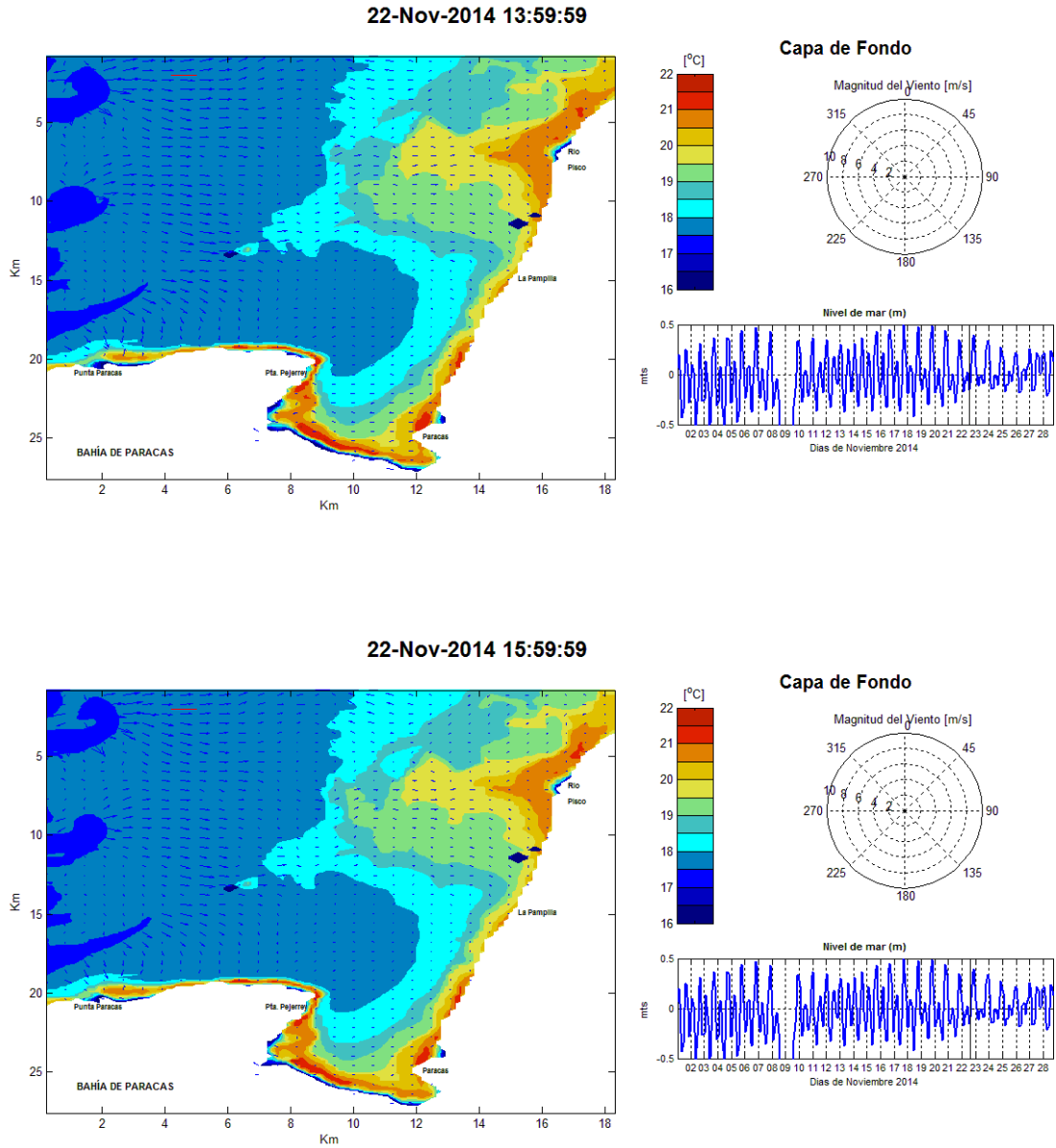


Figura 65 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 14:00 a 16:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa de Fondo



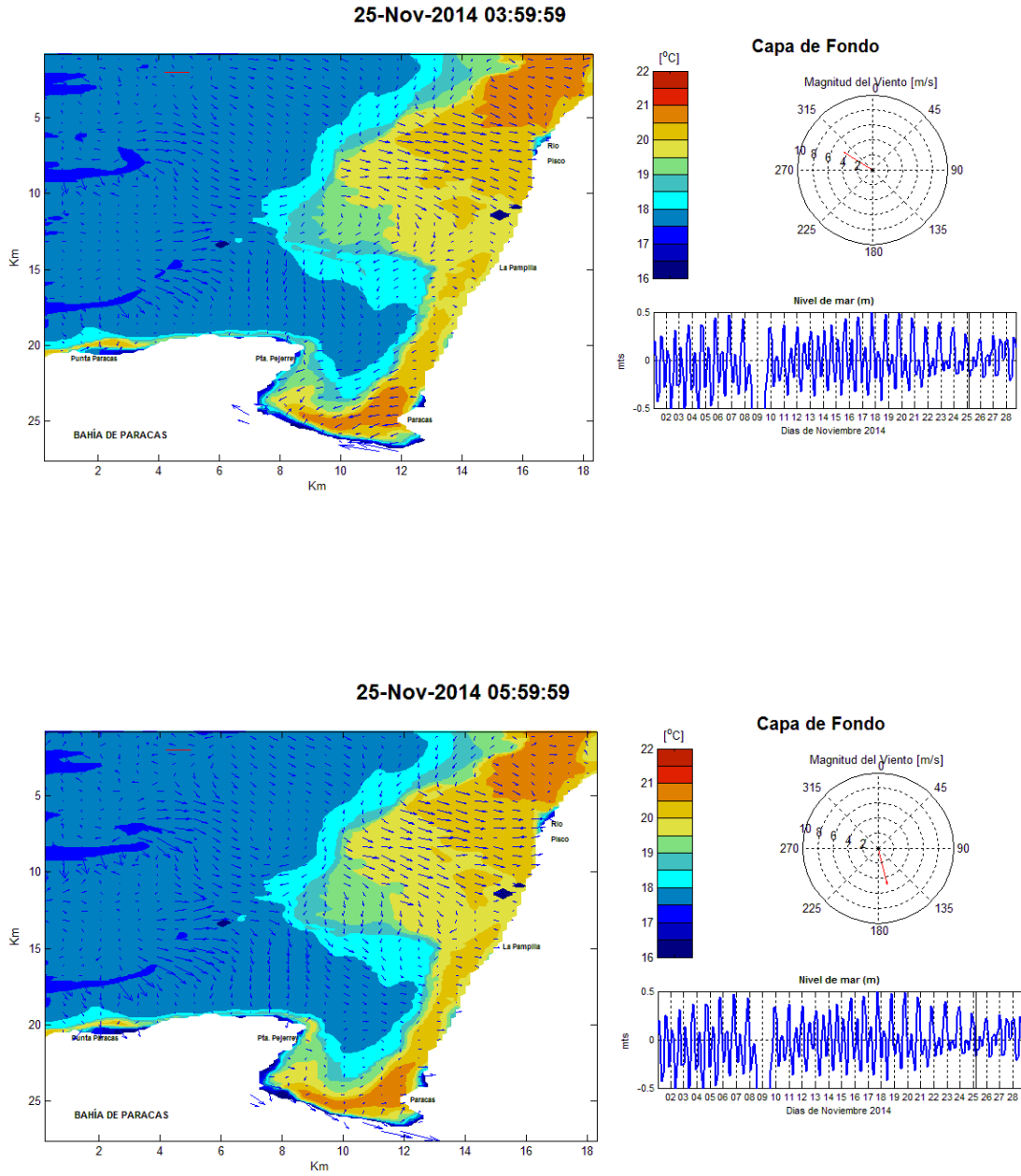


Figura 66 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 25-Nov-2014 - Capa de Fondo

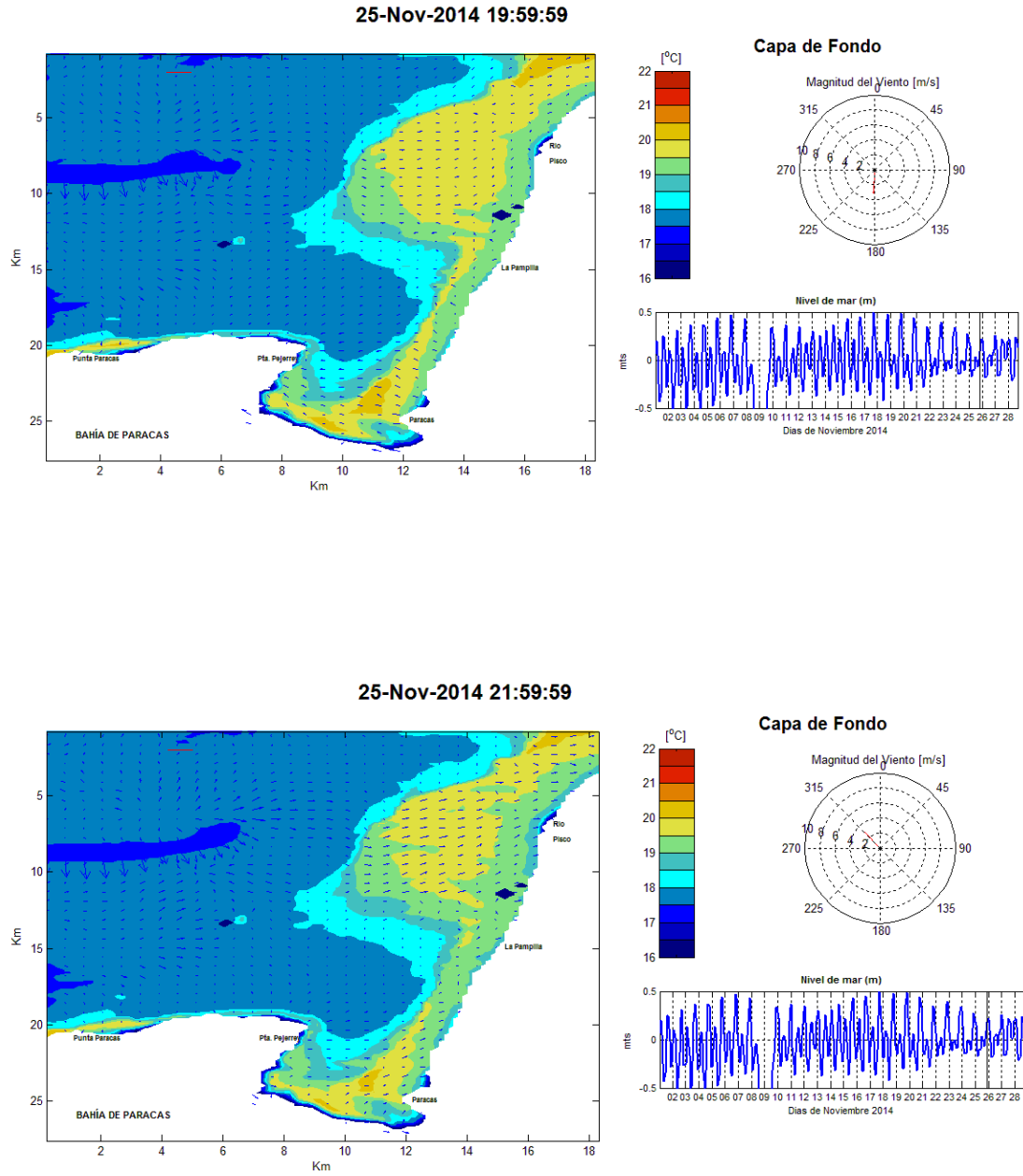


Figura 67 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 20:00 a 22:00 horas, 25-Nov-2014 - Capa de Fondo

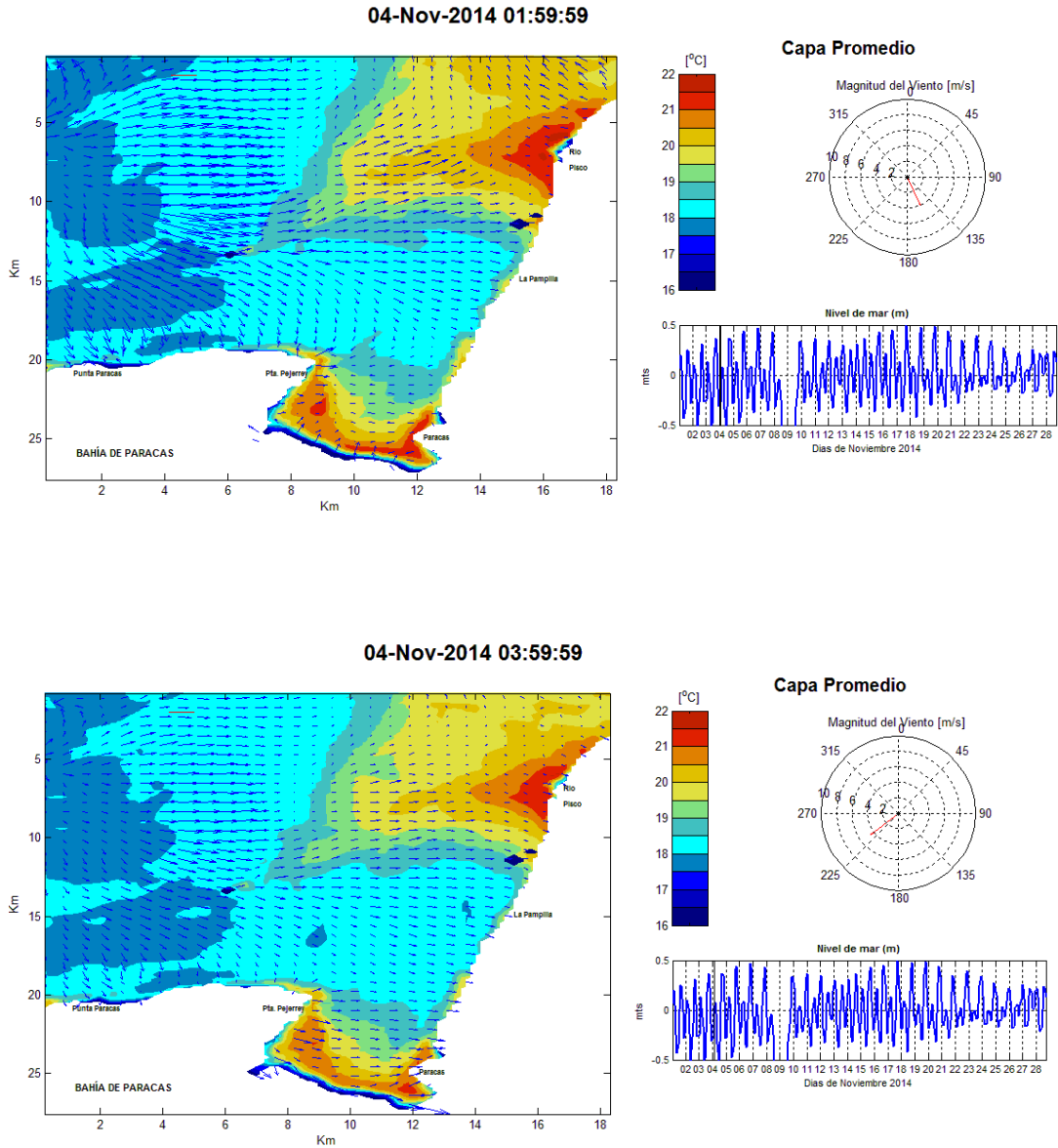


Figura 68 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Promedio

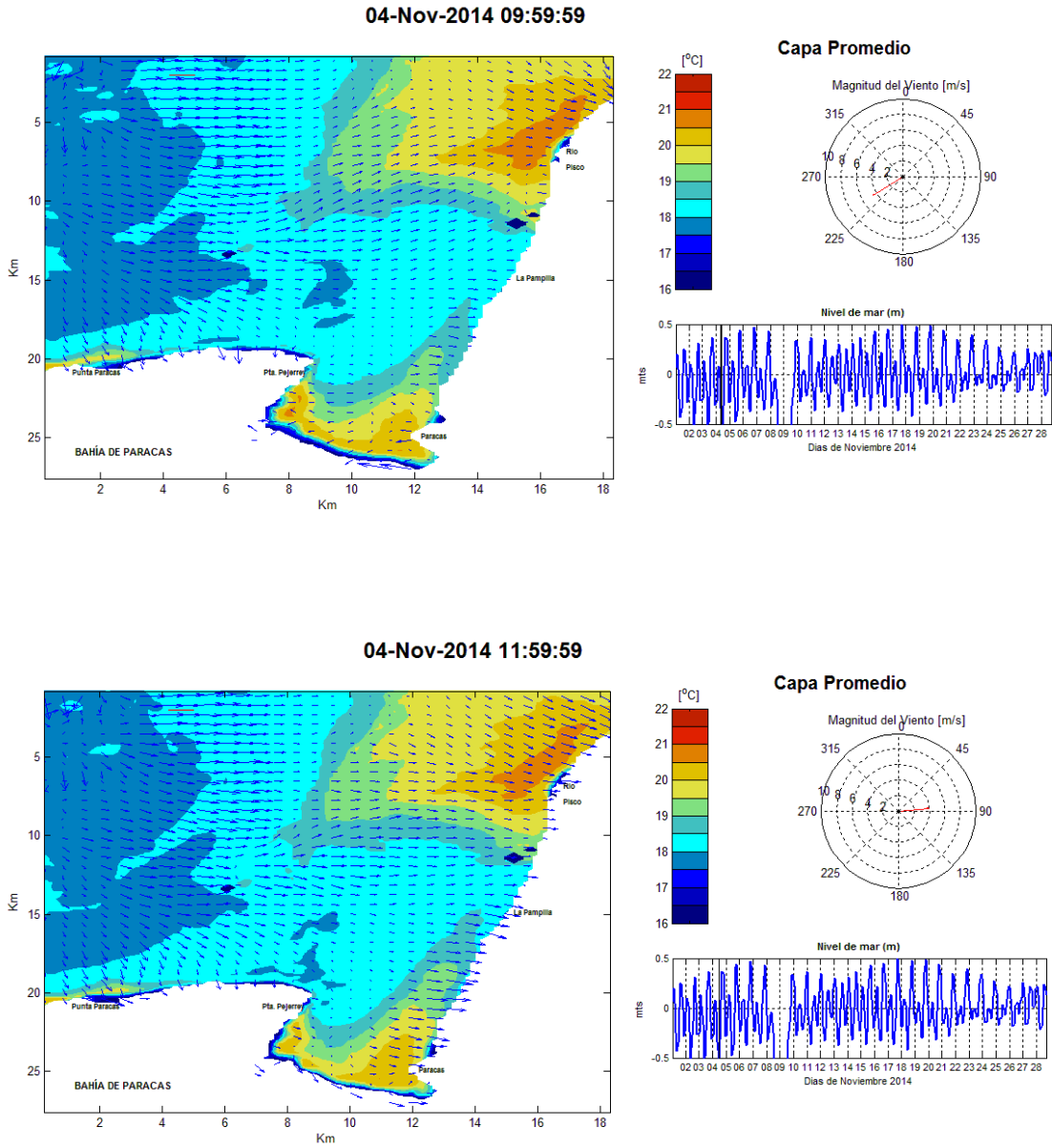


Figura 69 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 04-Nov-2014 - Capa Promedio

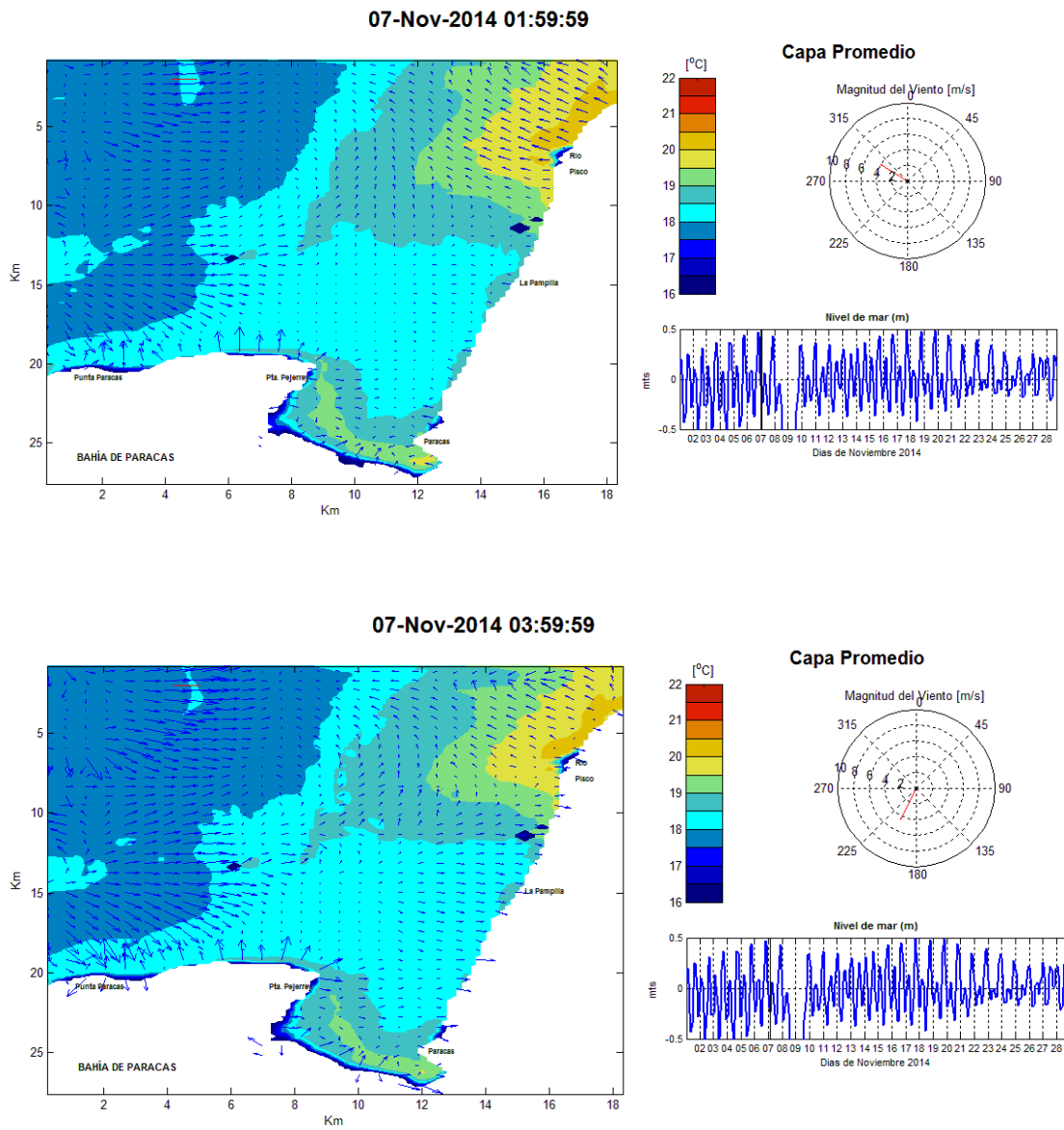


Figura 70 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 07-Nov-2014 - Capa Promedio

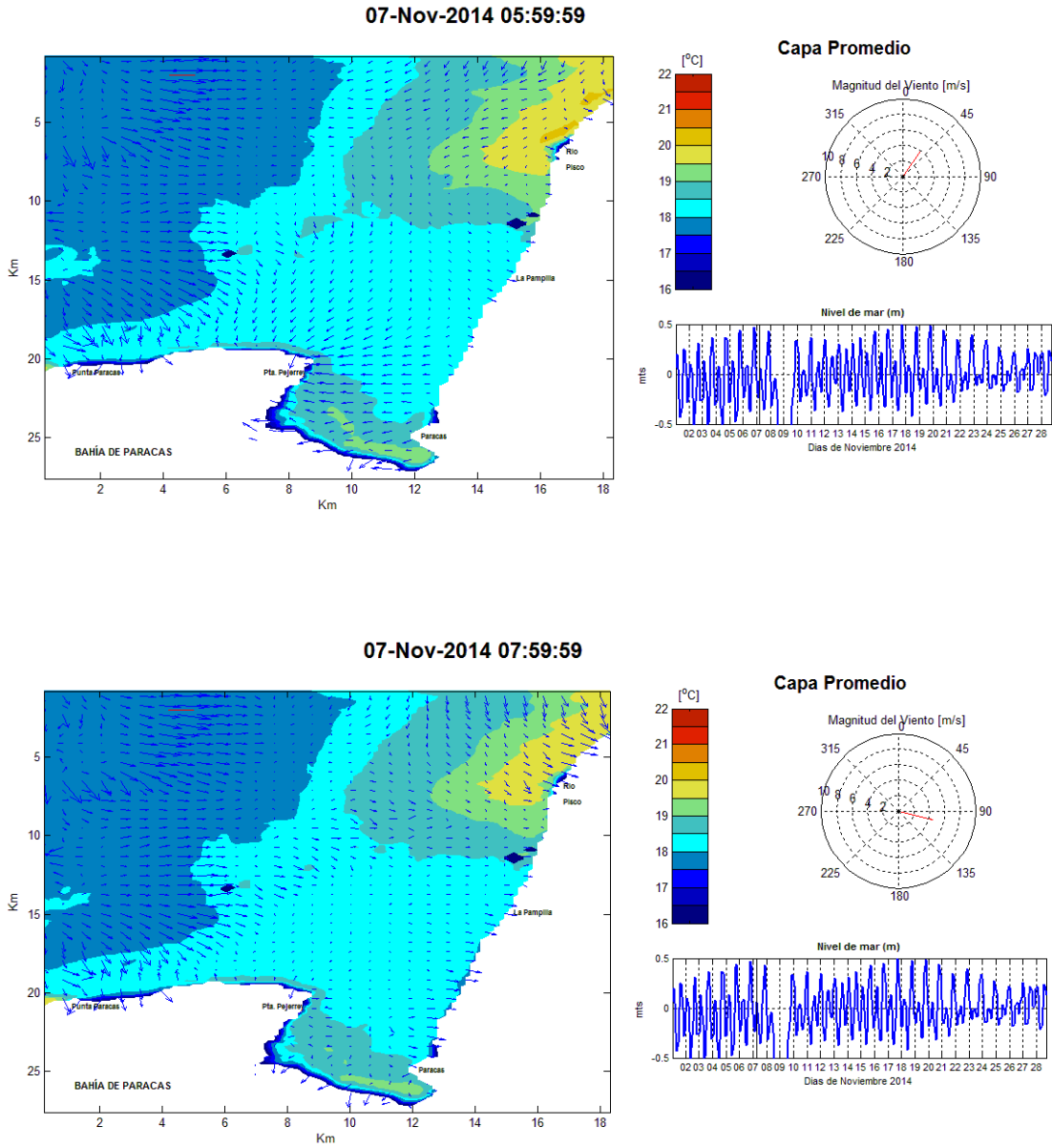


Figura 71 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 07-Nov-2014 - Capa Promedio

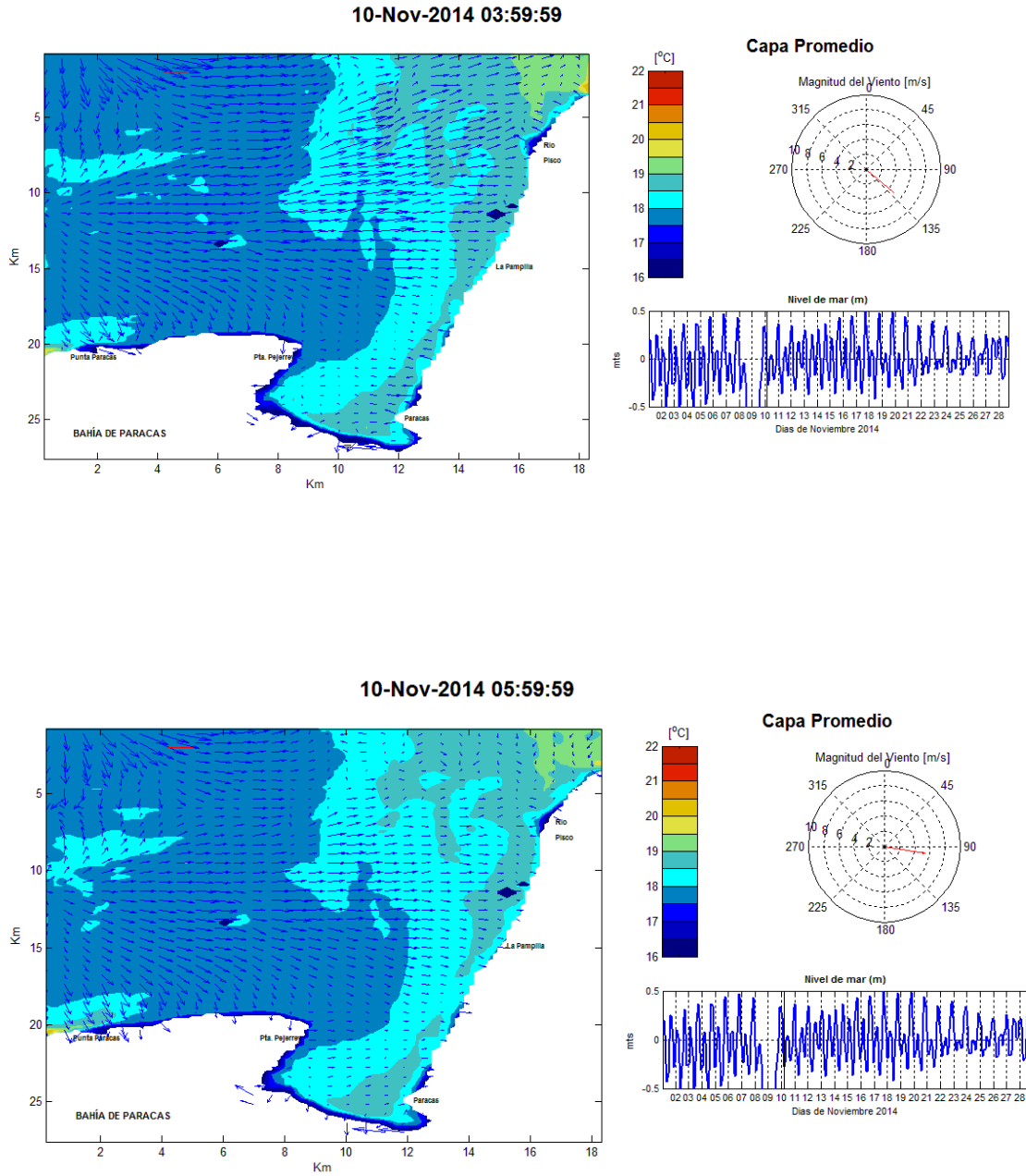


Figura 72 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa Promedio

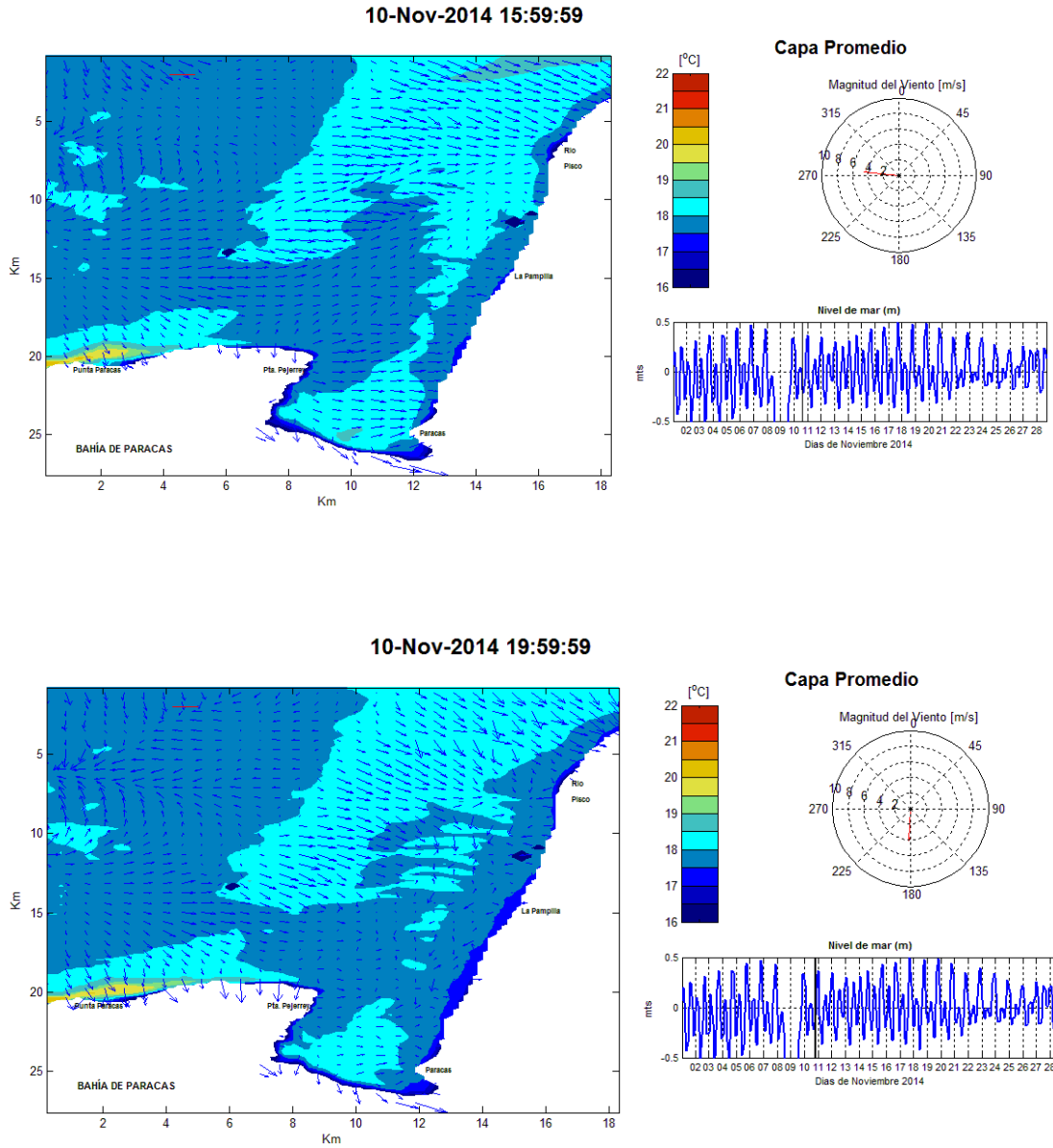


Figura 73 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 16:00 a 20:00 horas, 10-Nov-2014 - Capa Promedio



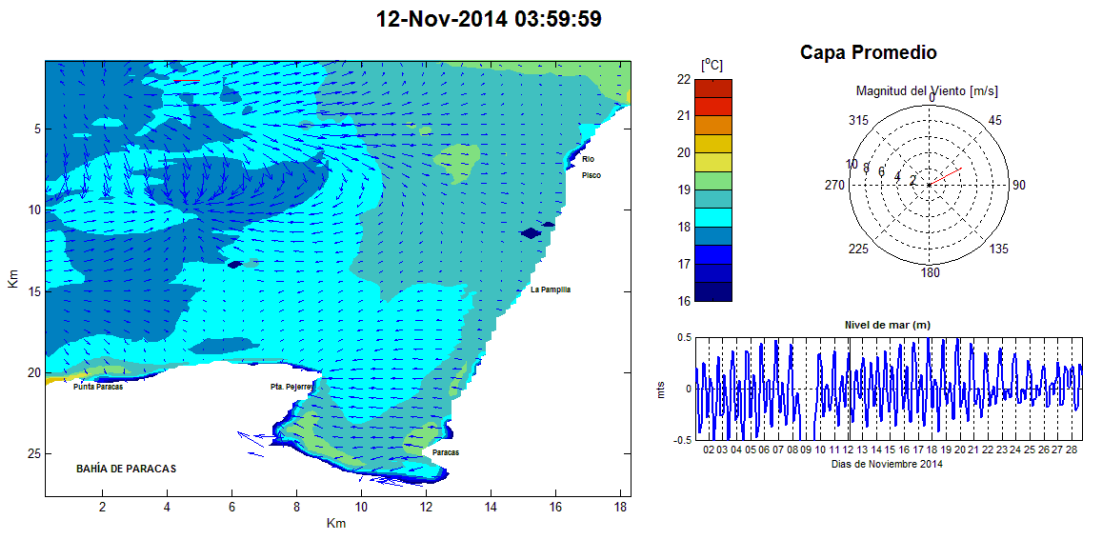
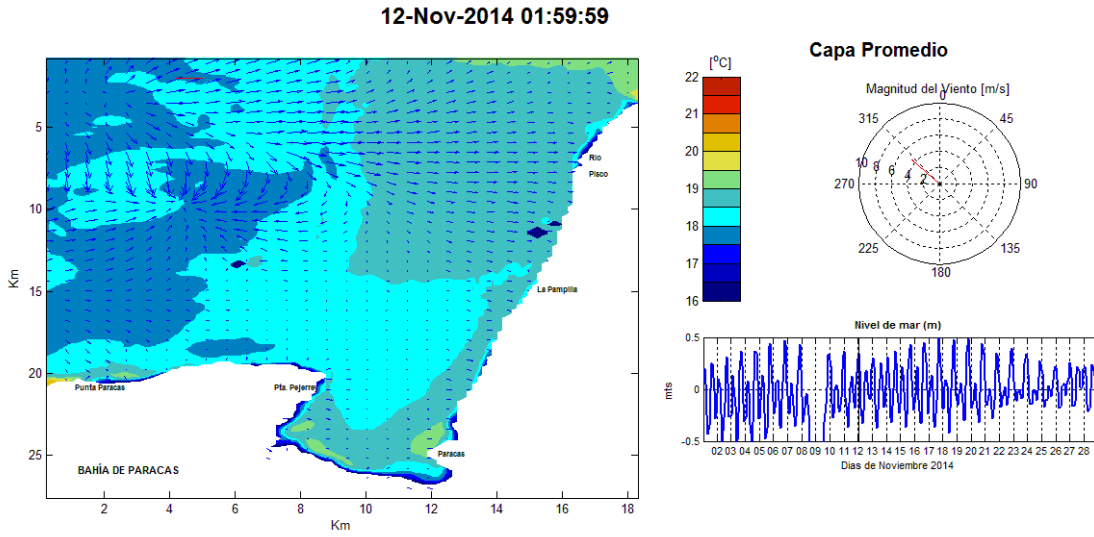


Figura 74 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Promedio

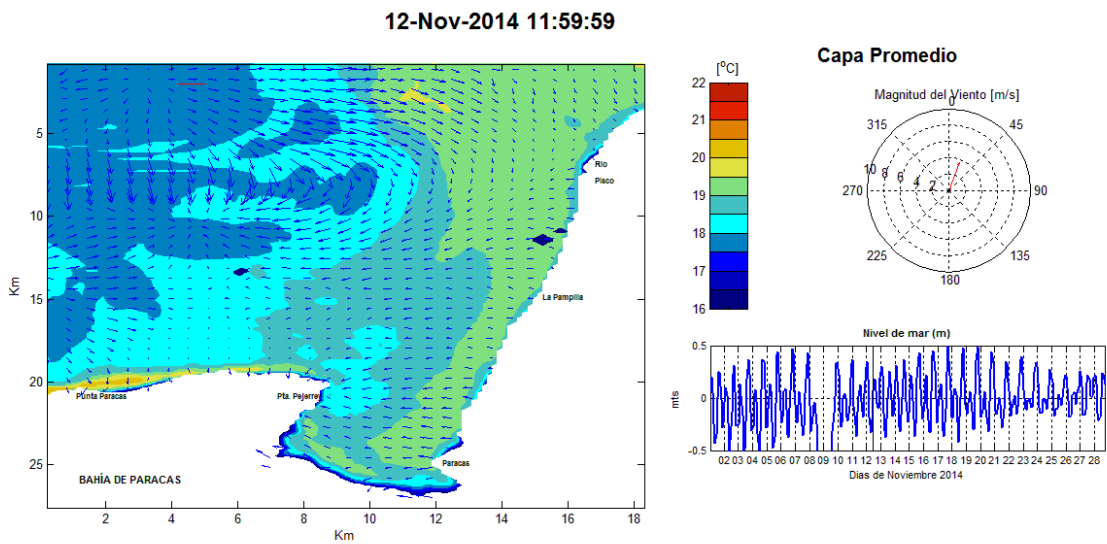
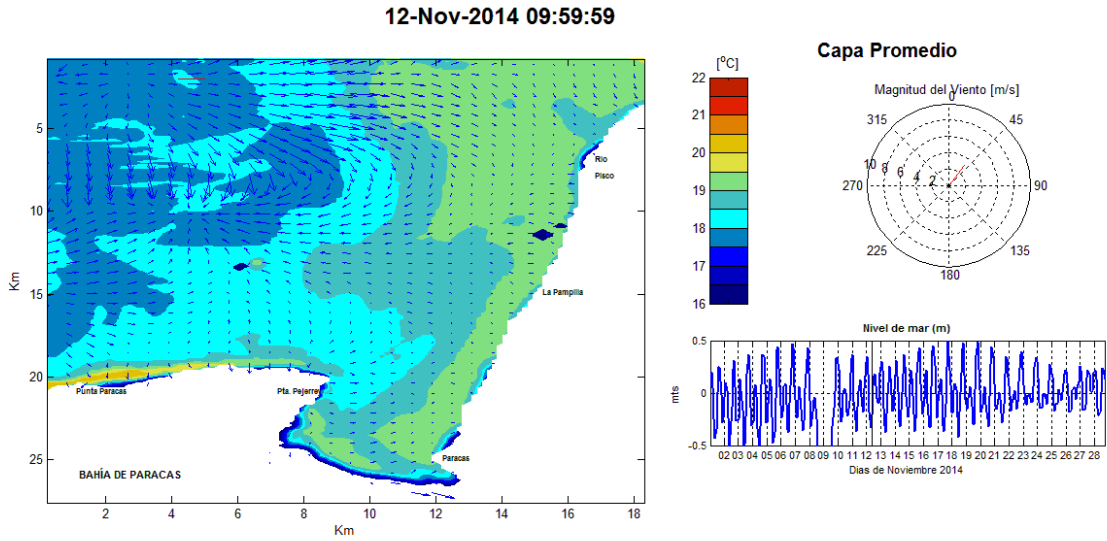


Figura 75 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 12-Nov-2014 - Capa Promedio

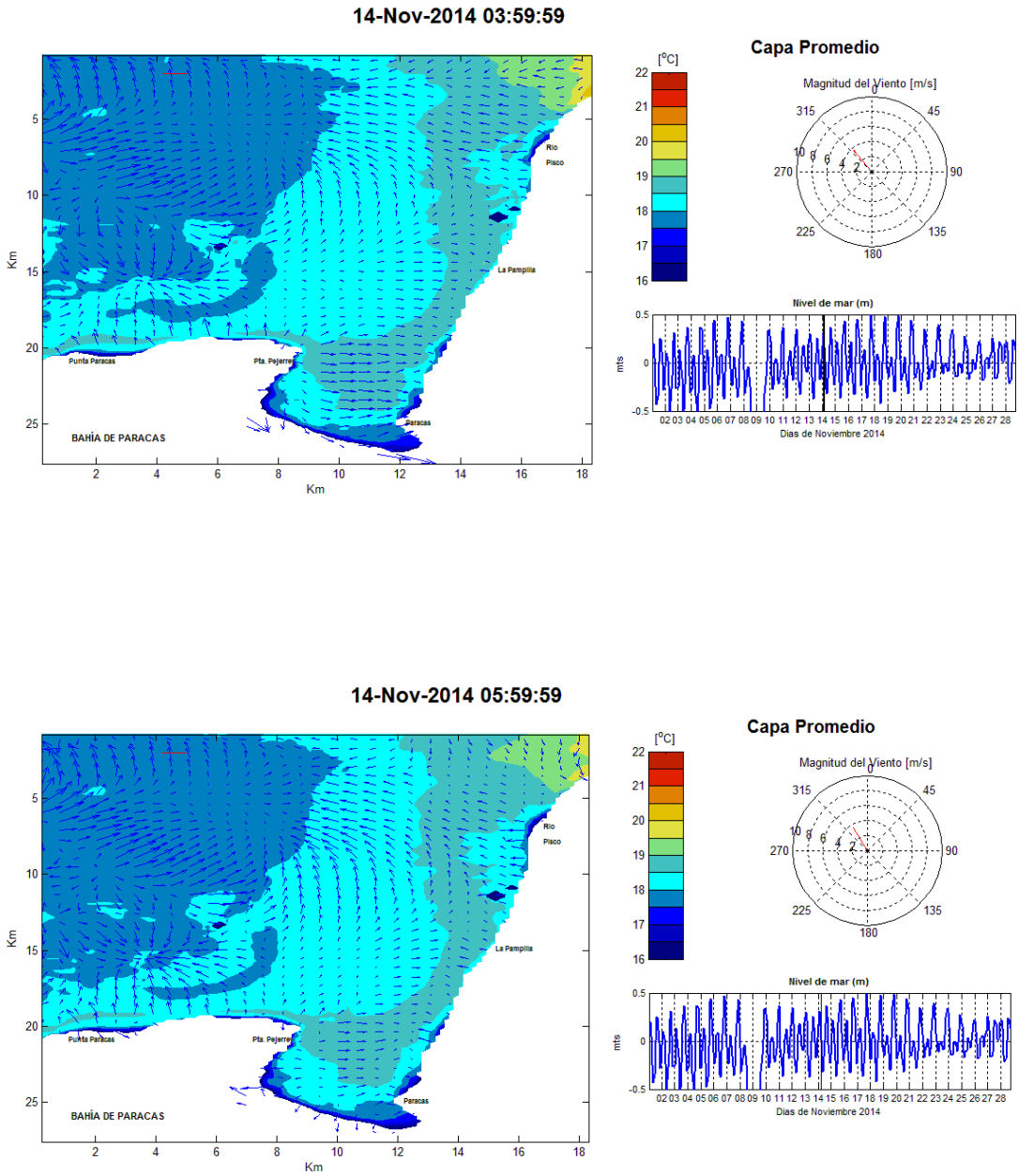


Figura 76 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa Promedio

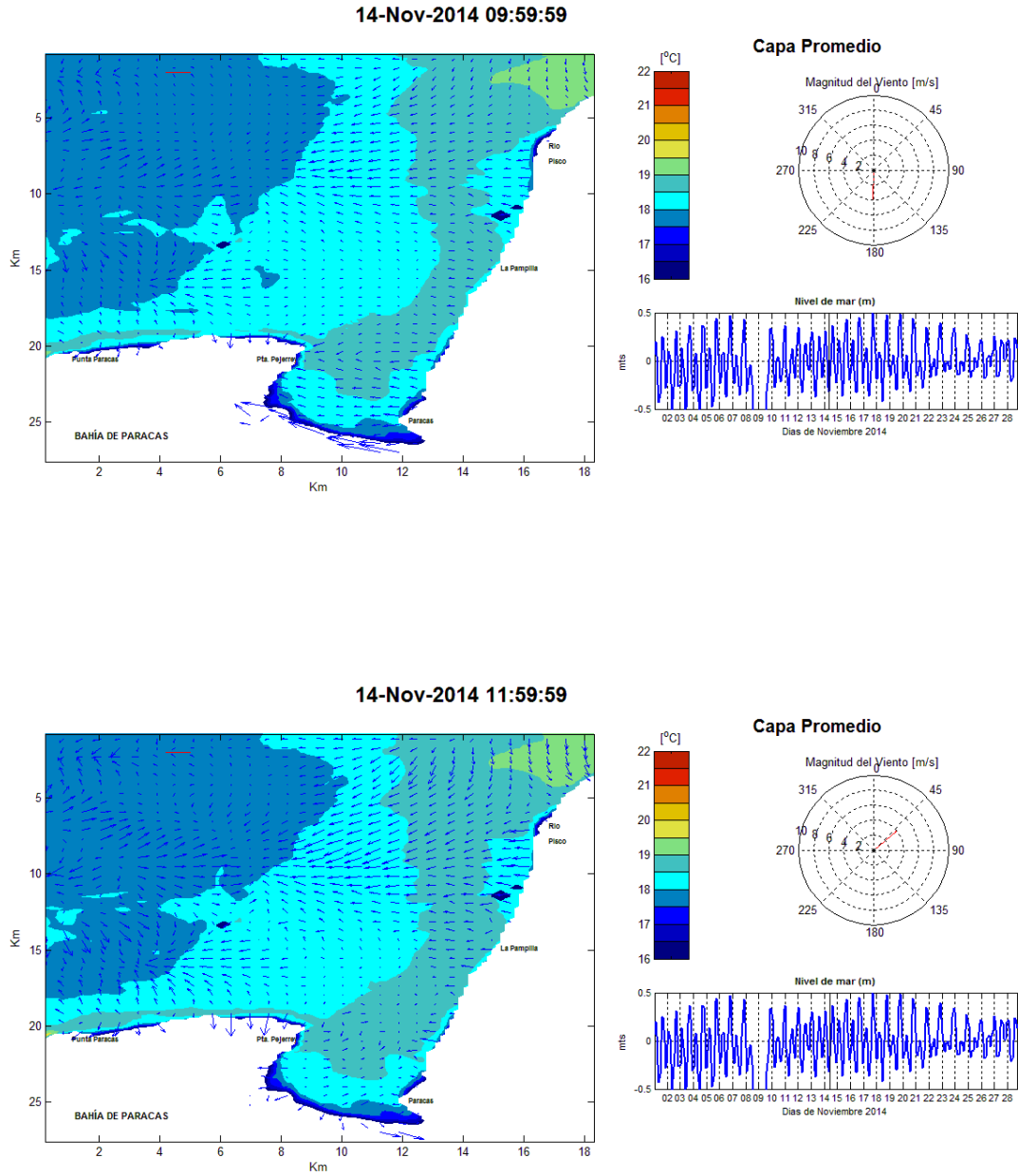


Figura 77 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 10:00 a 12:00 horas, 14-Nov-2014 - Capa Promedio

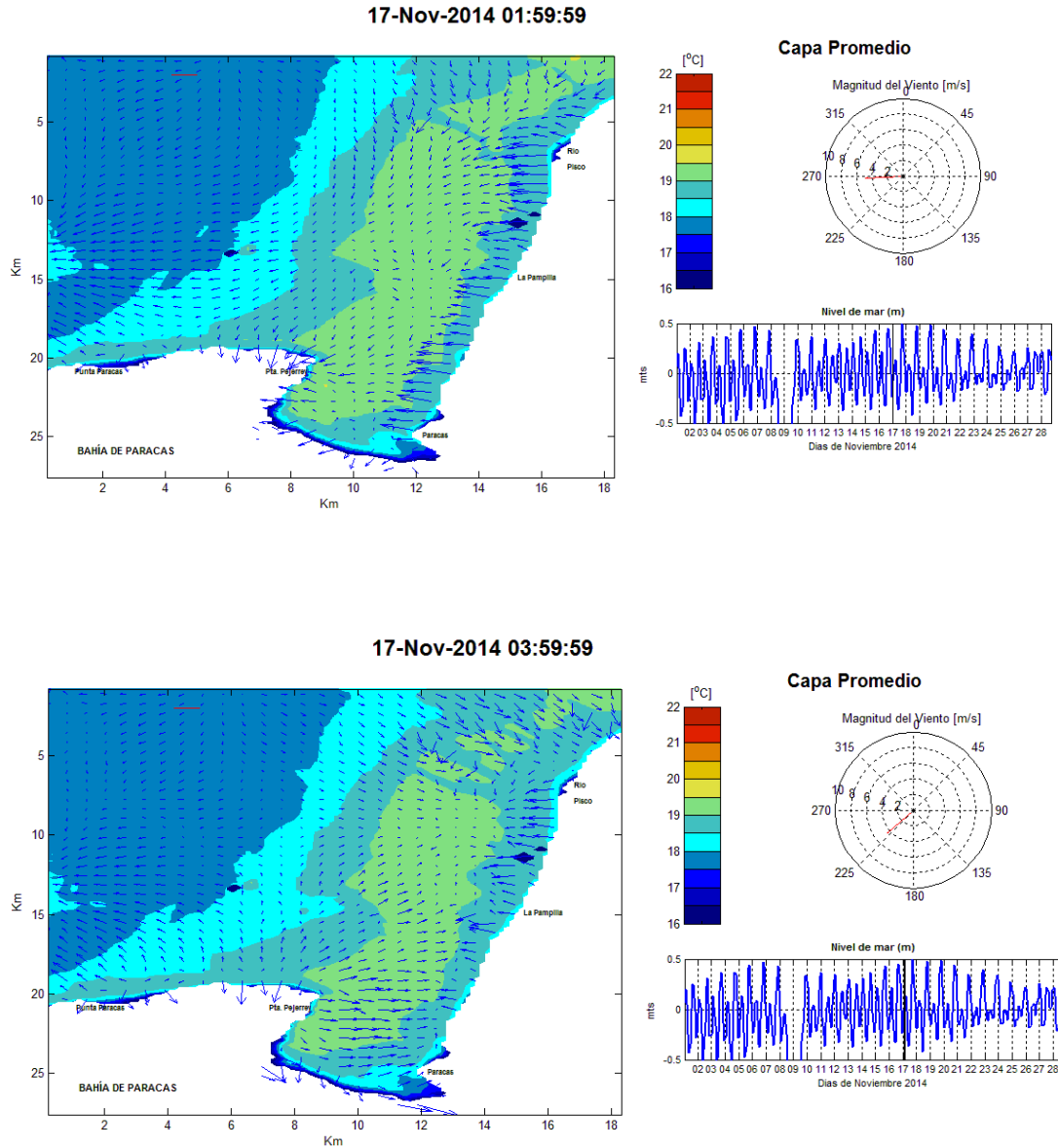


Figura 78 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 17-Nov-2014 - Capa Promedio

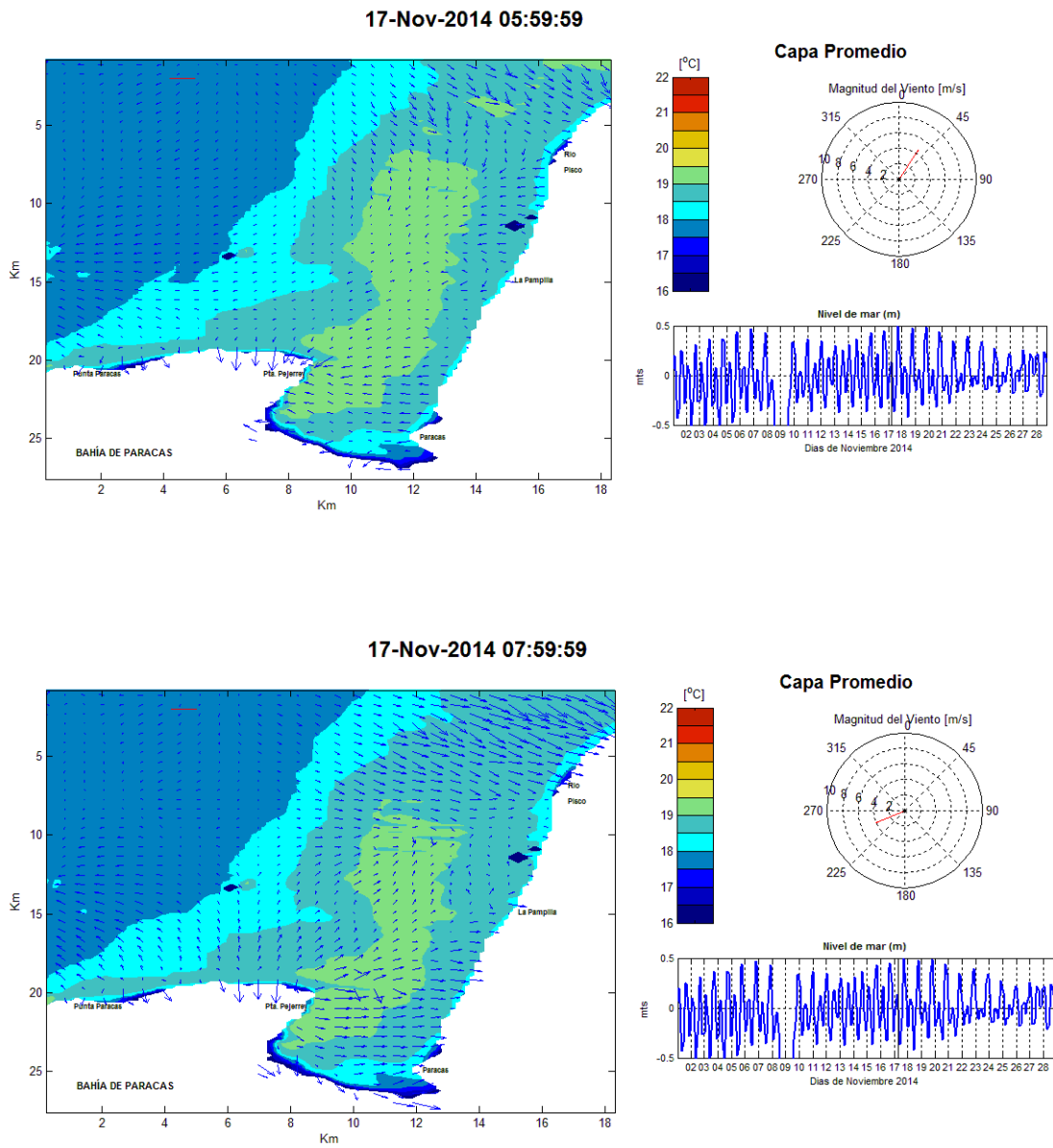


Figura 79 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 17-Nov-2014 - Capa Promedio

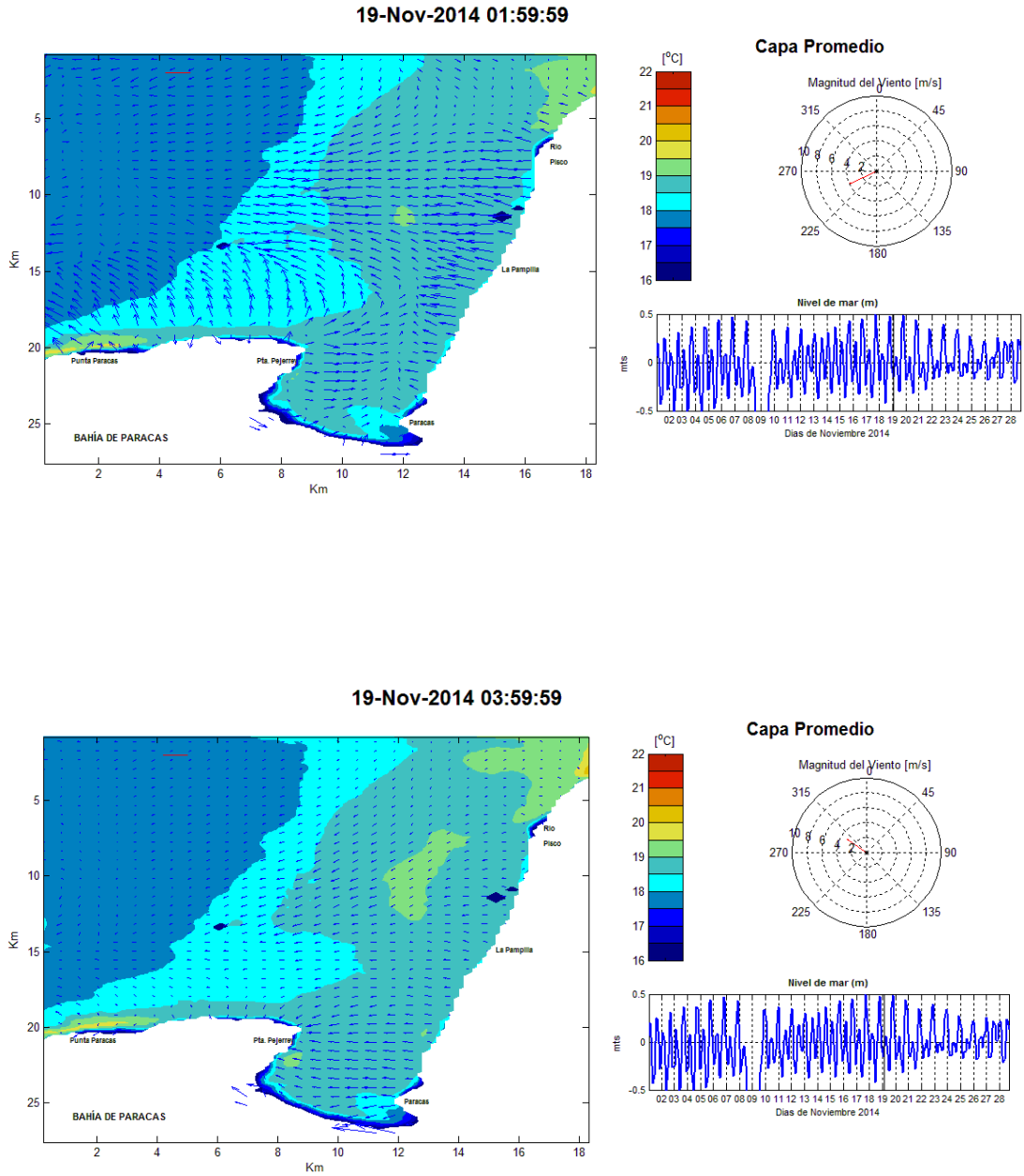


Figura 80 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 19-Nov-2014 - Capa Promedio

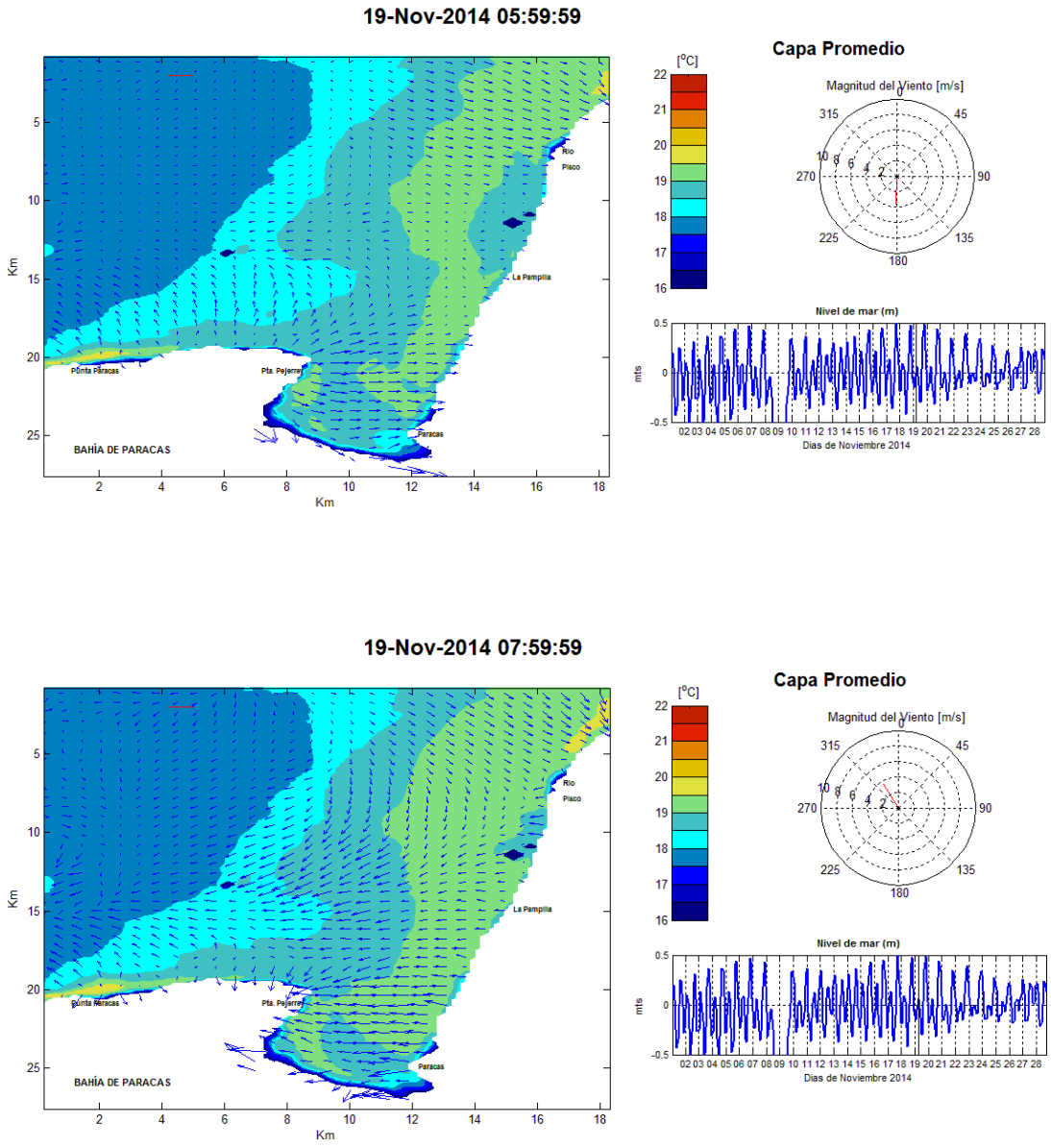


Figura 81 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 6:00 a 8:00 horas, 19-Nov-2014 - Capa Promedio



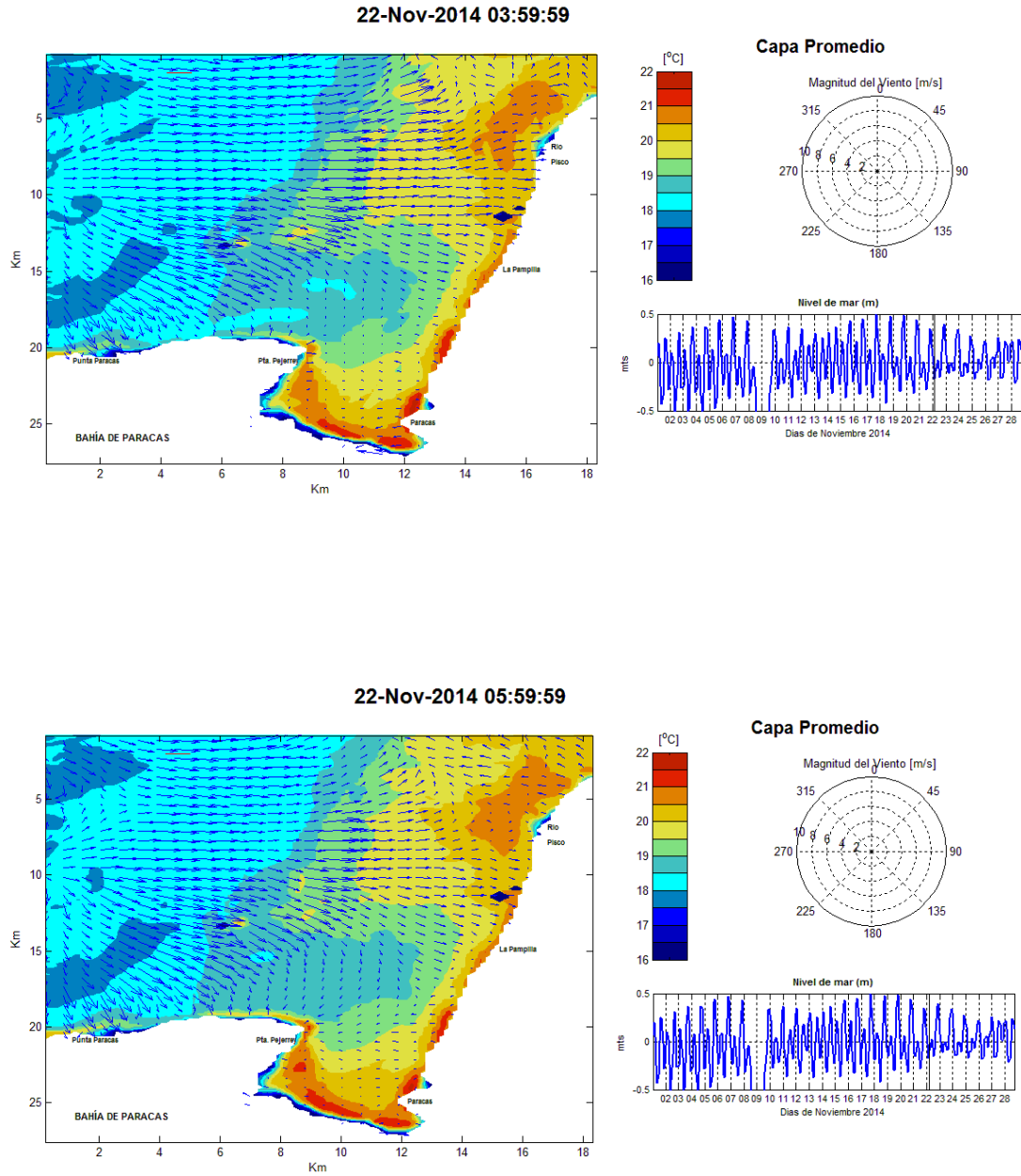


Figura 82 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 4:00 a 6:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa Promedio

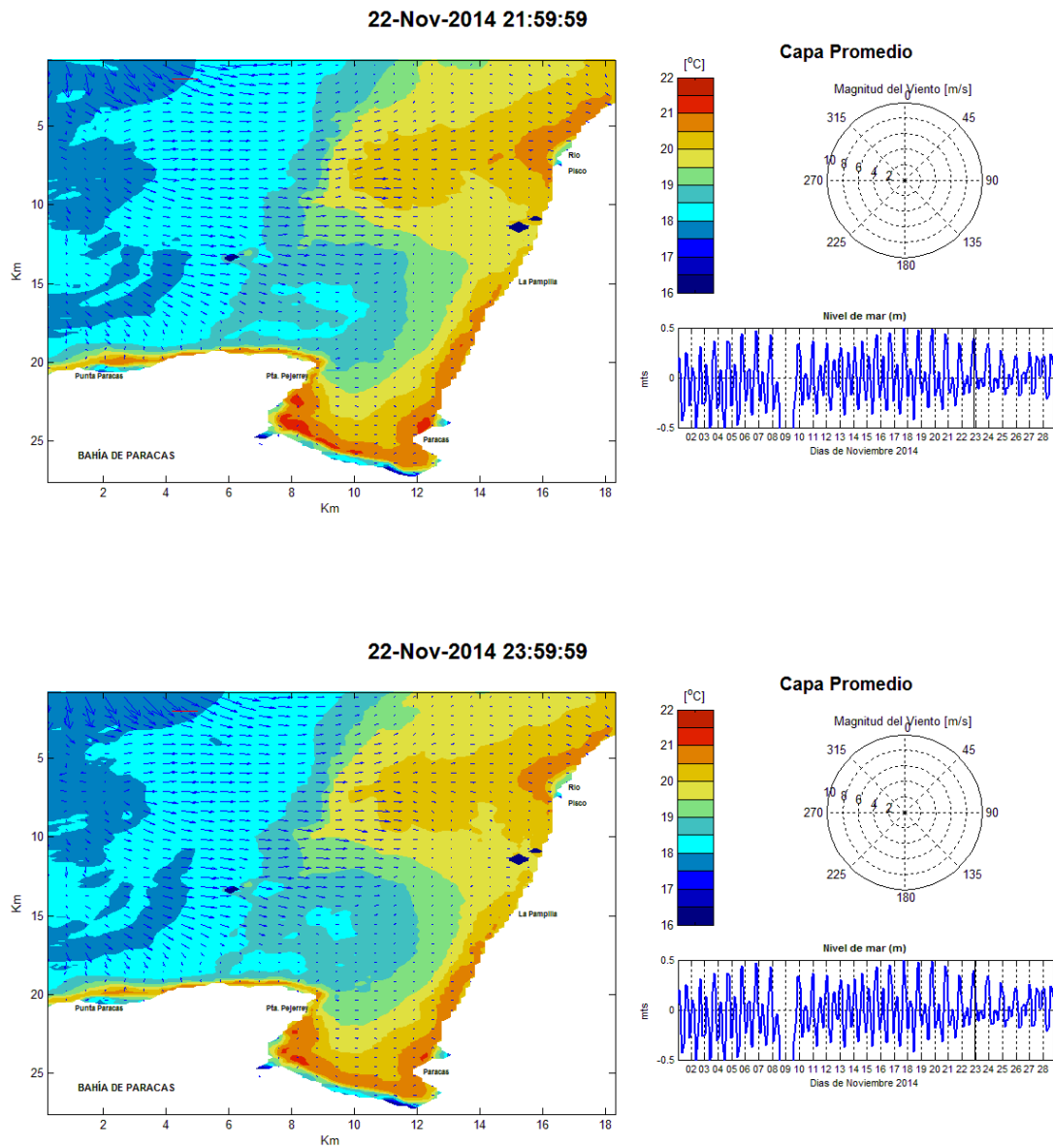


Figura 83 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 22-Nov-2014 - Capa Promedio

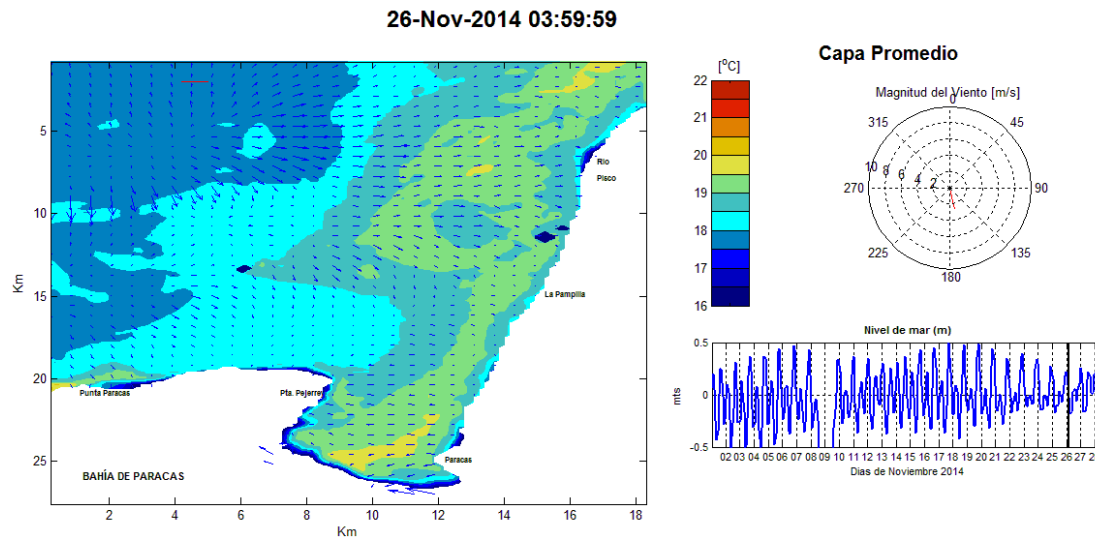
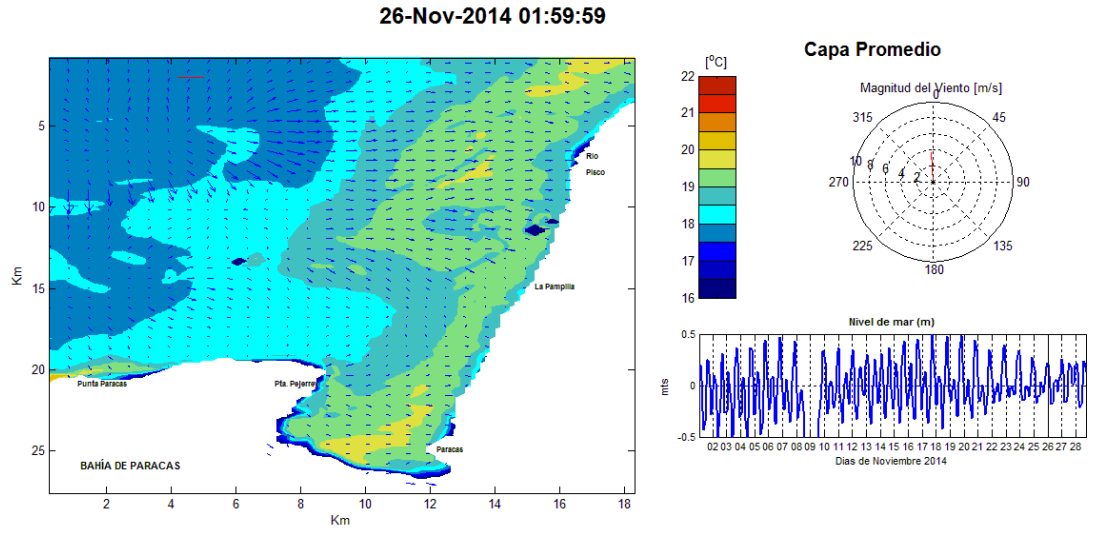


Figura 84 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 2:00 a 4:00 horas, 26-Nov-2014 - Capa Promedio

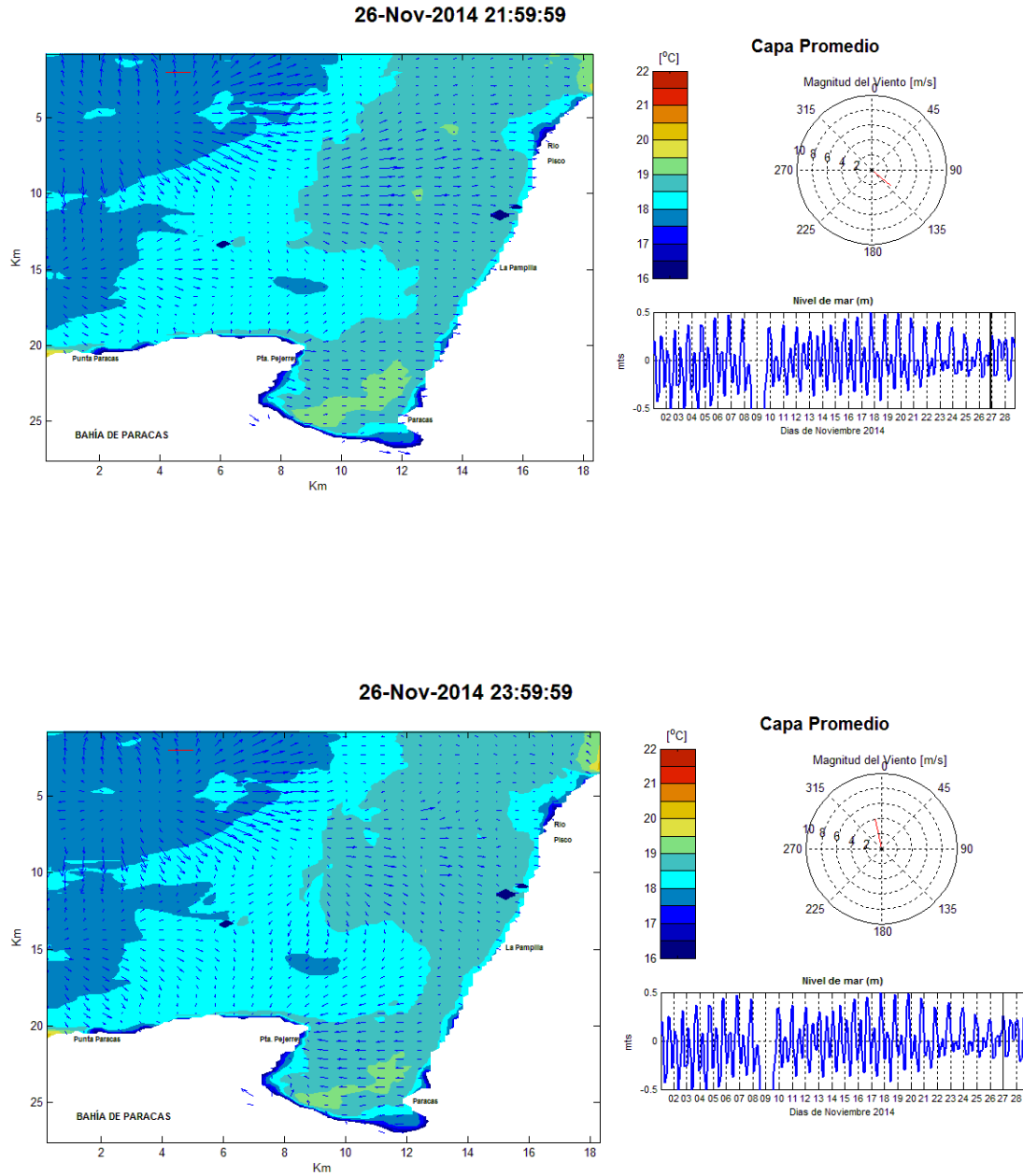


Figura 85 - Distribución de temperatura superficial y velocidad de viento entre las 22:00 a 24:00 horas, 26-Nov-2014 - Capa Promedio

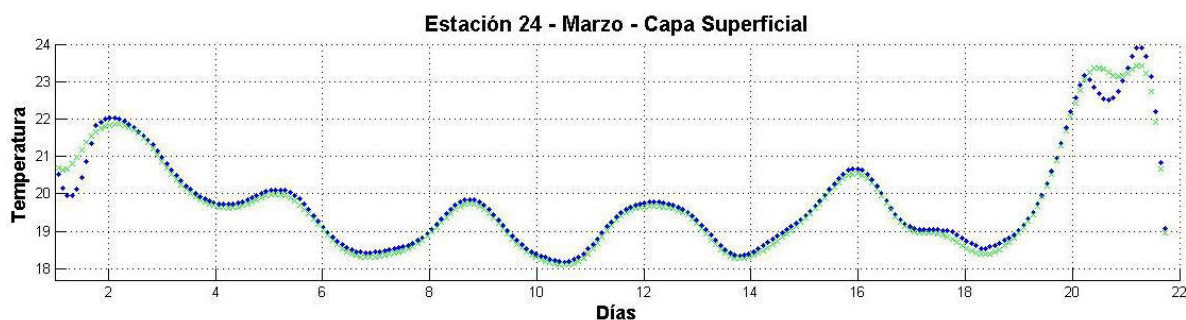
## 4.2 Validación

La validación de un modelo es en realidad, una extensión de la etapa de la calibración. El propósito fundamental en esta etapa es asegurarse que la calibración del modelo estableció de manera correcta todas las variables y condiciones que afectaran los resultados del modelo y por tanto, demostrar la habilidad que tiene éste de predecir observaciones de campo en períodos alejados al de la calibración.

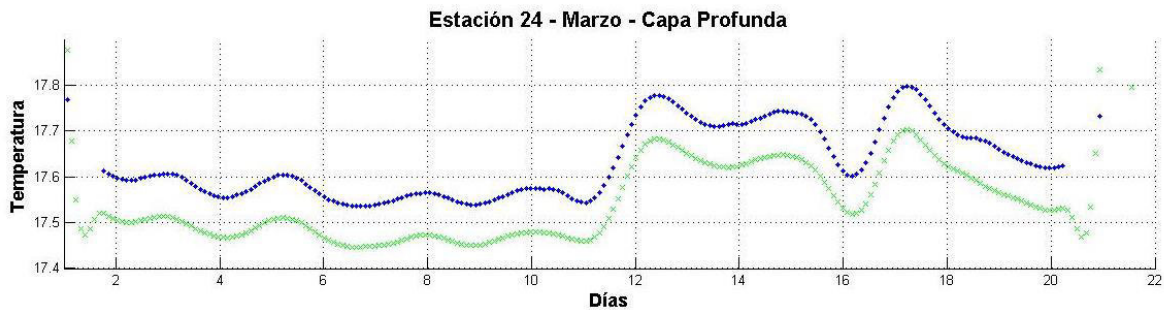
En esta etapa de la validación, se tomaron 3 puntos referentes, del área de estudio – Punta Pejerrey, Estación 24, Río Pisco.

Se obtuvieron para cada uno de los puntos referentes, series de tiempo para los días simulados de marzo y noviembre para la capa superficial, capa promedio y capa profundidad.

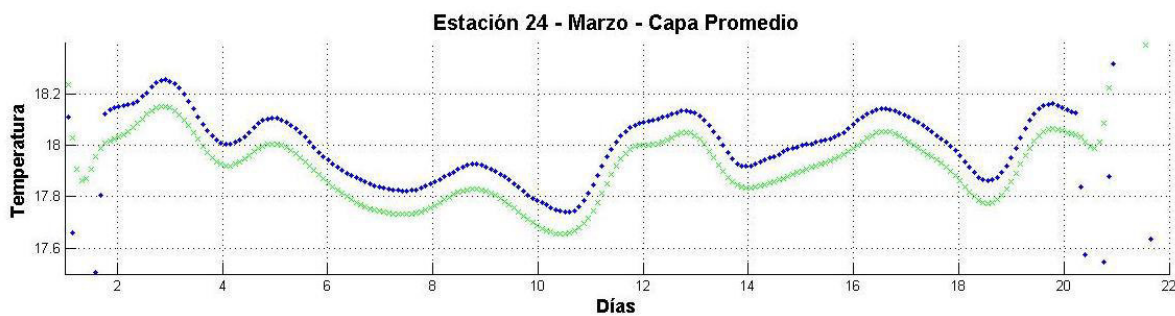
En las siguientes figuras, se presenta la variabilidad de la temperatura en las siguientes series de tiempo, en los puntos mencionados.



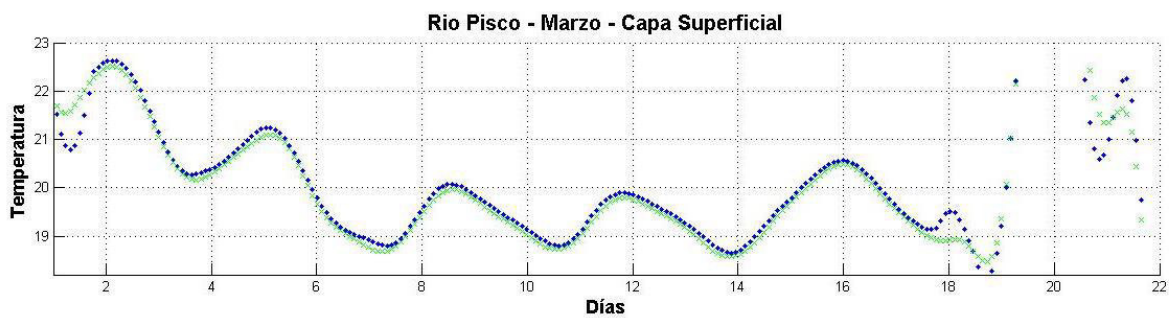
**Figura 86** - Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa Superficial



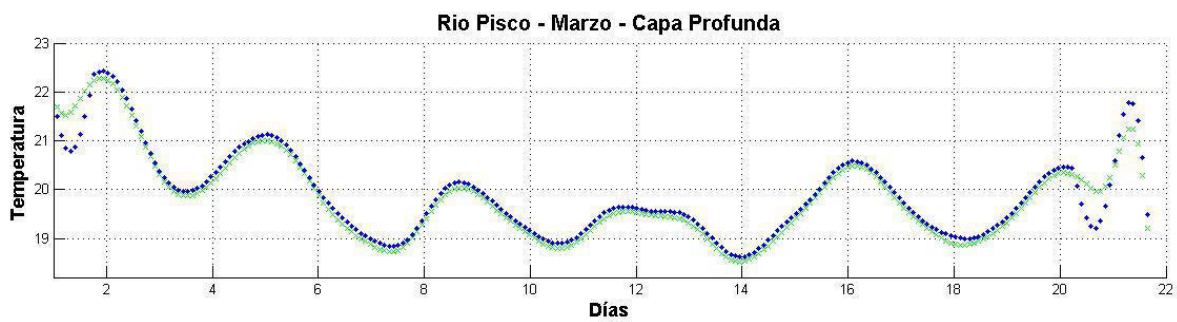
**Figura 87** - Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa de Fondo



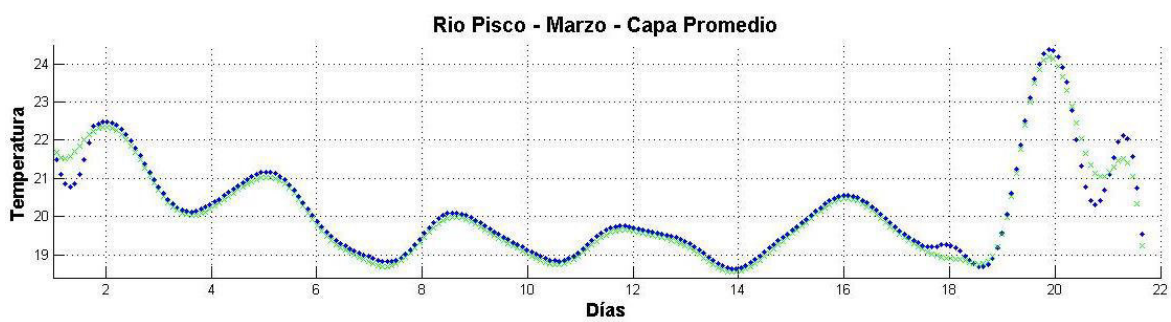
**Figura 88** - Serie temporal de datos Estación 24 – Marzo - Capa Promedio



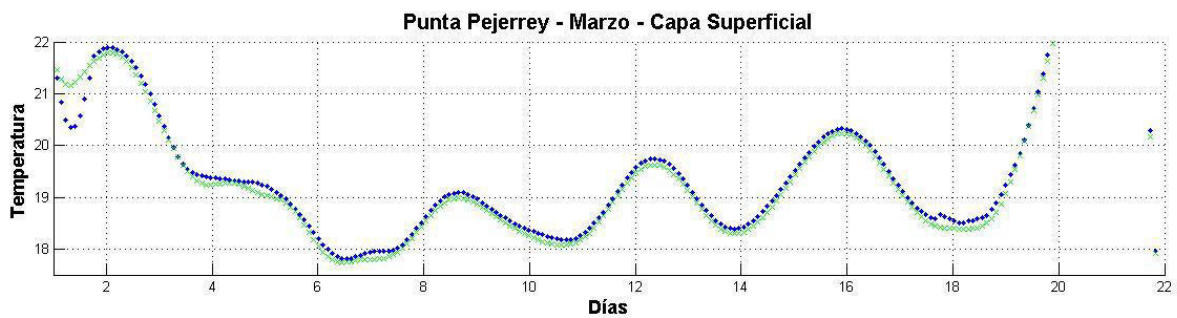
**Figura 89** - Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa Superficial



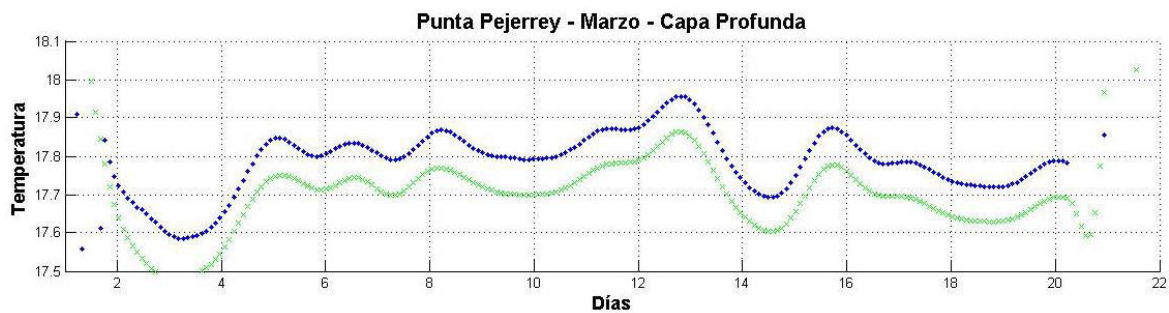
**Figura 90** - Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa de Fondo



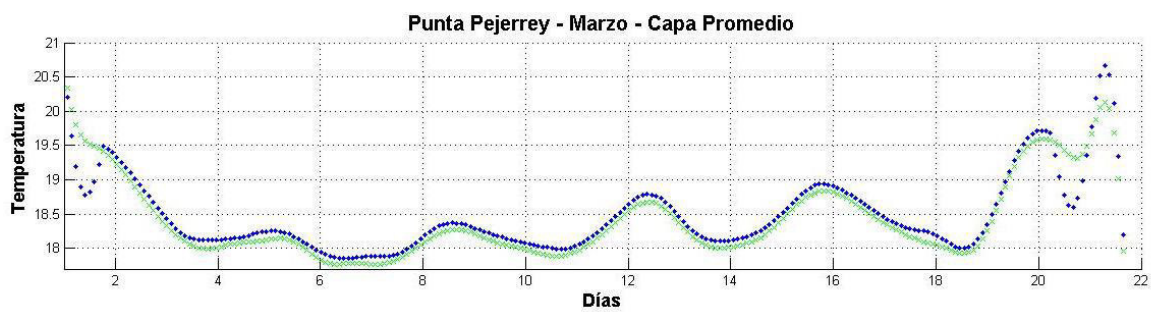
**Figura 91** - Serie temporal de datos Río Pisco – Marzo - Capa de Promedio



**Figura 92** - Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa Superficial



**Figura 93** - Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa de Fondo



**Figura 94** - Serie temporal de datos Punta Pejerrey – Marzo - Capa Promedio



Cuadro IV. Descripción series temporales

<b>Ubicación</b>	<b>Grupo</b>	<b>Mes de Marzo</b>
<b>Estación 24</b>	Capa Superficial	Se tiene una tendencia sinusoidal, a partir del día 19 la temperatura se eleva considerablemente.
	Capa de Fondo	La temperatura se mantiene en el día 12 aumenta manteniéndose en general constante, excepto el día 16 con una leve disminución de temperatura.
	Capa Promedio	La serie temporal es irregular manteniéndose la temperatura con un rango mínimo de variabilidad.
<b>Río Pisco</b>	Capa Superficial	Existe una tendencia sinusoidal decreciente
	Capa de Fondo	Existe una tendencia sinusoidal decreciente
	Capa Promedio	La tendencia es la misma.
<b>Punta Pejerrey</b>	Capa Superficial	La temperatura cae abruptamente en 6 días, en el día 8 tiene un asenso sinusoidal.
	Capa de Fondo	Existe variabilidad de la temperatura manteniéndose en un rango mínimo, excepto el día 15 que cae la temperatura.
	Capa Promedio	La temperatura disminuye hasta el día 4, manteniéndose en un rango mínimo, en el día 9 asciende de forma irregular.

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES

#### 5.1 Factor de Correlación:

Se presenta la correlación de datos de temperatura, para la posición de Punta Pejerrey. Teniendo como resultado una correlación de 0.7.

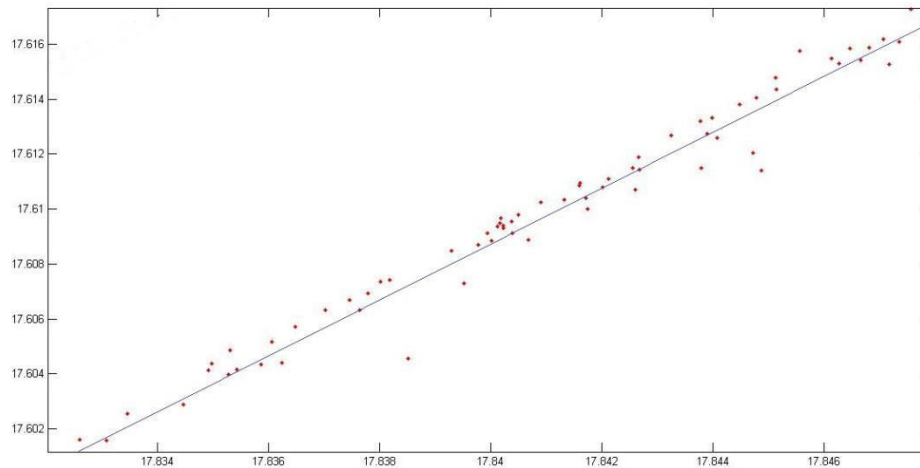


Figura 95 - Correlación de datos Temperatura

En el presente trabajo se analizó la hidrodinámica en la Bahía de Paracas y los exteriores por medio de simulaciones numéricas. El análisis se realizó identificando los factores dominantes que actúan en el sistema y su variabilidad obtenida de las mediciones. La aplicación del modelo numérico en la Bahía de Paracas permite formular las siguientes conclusiones:

## **5.2 Apreciaciones**

1. Las simulaciones numéricas obtenidas con el modelo muestran una tendencia a generar efectos hidrodinámicos de la circulación en la Bahía de Paracas; esto se atribuye a la complejidad dinámica de esta zona.
2. En general la circulación marina presentó distribución irregular de velocidades dentro y fuera de la bahía, intensificándose en promedio en las capas inferiores. El campo de flujo presentó intercambio de flujo por la generación de convergencia y divergencia debido a la irregularidad que presenta la topografía de fondo.
3. La dinámica en la Bahía de Paracas es el resultado de la interacción de diferentes agentes como la batimetría, los vientos, las corrientes costeras, la marea, las condiciones climáticas.
4. Se realizó una descripción del patrón de circulación oceánico al interior del golfo mediante la utilización de modelos numéricos, los cuales fueron validados. Como resultado se obtuvieron los patrones de circulación de la Bahía de Paracas.

La contribución de la tesis,

Muy pocos son los estudios que se han hecho en la Bahía de Paracas y los existentes se han concentrado en un análisis interno de la Bahía, limitando un análisis completo de la hidrodinámica de la circulación en la Bahía de Paracas.

En esta tesis se analizó la hidrodinámica en la Bahía de Paracas mediante la implementación de un modelo físico hidrodinámico además se describe la circulación en la Bahía de Paracas mediante la implementación del modelo físico hidrodinámico.

## **Referencias Bibliográficas**

- Arakawa, A. y Lamb, V. 1977. Computational design of the basic dynamic processes of the UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, 17, 173–263.
- Casulli, V. y Cheng, R. T. 1992. Semi-implicit finite difference methods for three dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15, 629–648.
- Carbonel, C. A. A. 2013. Un modelo de gravedad reducida de la hidrodinámica y termodinámica en la zona costera. Caso de estudio: Bahías de Pisco y Paracas. Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., y Brooks, N. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc.
- Flores, X. 2005. Proceso de mezcla y circulación en el puerto de Ensenada, B.C. México. Programa de Posgrado en Ciencias en Oceanografía Física. CISESE.
- García, F y Palacio, C. 2010. Constituyentes de marea en la Bahía de Santa Marta. Universidad de Magdalena.
- Hodges, B. 2000. *Numerical Techniques in CWR-ELCOM*. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Instituto del Mar del Perú, 2010. Bases técnicas para el ordenamiento pesquero y acuícola de la bahía de Paracas. Laboratorio de Pisco.
- Quispe, J., García, W., Lorenzo A., Becerra, W. 2014. Condiciones oceanográficas en la Bahía de Paracas. Instituto del mar del Perú.
- Quispe, J., 2007. Simulación de la hidrodinámica en la Bahía de Paracas, Pisco-Perú; utilizando forzantes físicos. Universidad Nacional mayor de San Marcos.
- Pluspetrol Peru Corporation, 2003. Modelación matemática del campo de Corrientes en la Bahía de Pisco y Paracas, Peru. ERM Peru S.A.
- Ramírez, I. 1999. *Hydrodynamics of a Shallow Lagoon*. Tesis de doctorado, Centre for Water Research. University of Western Australia.
- Ramírez, I. y Imberger, J. 2000. The simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon. University of Western Australia.

Roldán, P. 2008. Modelamiento del Patrón de Circulación de la Bahía Colombia, Golfo Urabá. Implicación para el transporte de sedimentos. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Yzocupe, V. A. 2001. 2D Hydrodynamic Modelling in Paracas Bay, Peru. M.Sc. Thesis H. H. 402, IHE-Delft, 74 pp.