

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“MODELACIÓN DEL FENÓMENO VIENTO PARACAS UTILIZANDO
EL MODELO WEATHER RESEARCH AND FORECASTING (WRF)”**

Presentado por:

Fiorella Judith Elizabeth Sierra Sotelo

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO METEORÓLOGO

Lima- Perú

2015

DEDICATORIA

Dedico este gran paso en mi vida profesional, a Dios quién supo guiar mis pasos y darme fuerzas para seguir adelante. A mi familia quien siempre me brindó su apoyo incondicional, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles. Gracias a mis padres que me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos.

AGRADECIMIENTO

Gracias a mi asesor, Mg. Sc. Jerónimo García, por su apoyo incondicional para realizar esta investigación y por sus sabias enseñanzas como educador. Agradezco el apoyo científico de mi co-asesor, Dr. Odón Sánchez, que gracias a su experiencia sirvió de gran soporte.

ÍNDICE

RESUMEN-----	xiii
ABSTRACT -----	xiv
I. INTRODUCCIÓN-----	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA -----	3
2.1. COSTA Y ZONA COSTERA -----	3
2.2. METEOROLOGÍA COSTERA EN LAS COSTAS DE ICA -----	3
2.3. VIENTO PARACAS-----	4
2.4. JET COSTERO DE BAJOS NIVELES -----	4
2.5. CAPA LIMITE PLANETARIA -----	5
2.6. CAÍDA DE LA TROPOPAUSA -----	5
2.7. ADVECCIÓN DE VORTICIDAD-----	7
2.8. DINÁMICA ATMOSFÉRICA -----	7
2.9. FUERZA DE CORIOLIS-----	8
2.10. ENERGÍA MECÁNICA-----	9
2.10.1. Conservación de la energía mecánica-----	9
2.11. MODELOS ATMOSFÉRICOS -----	9
2.11.1. Modelo WRF-----	10
III. MATERIALES Y MÉTODOS -----	17
3.1. MATERIALES-----	17
3.2. METODOLOGÍA-----	19
3.2.1. Identificación de la configuración adecuada del modelo WRF-----	19
3.2.2. Validación de la simulación del modelo -----	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN -----	26
4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ADECUADA DEL MODELO -----	26
4.1.1. Simulación con la configuración identificada-----	37
4.1.2. Análisis de la situación sinóptica del evento -----	75
4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO-----	87
4.2.1. Pruebas Estadísticas-----	87

V. CONCLUSIONES	99
VI. RECOMENDACIONES	101
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	102
VIII. ANEXOS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Estaciones meteorológicas de la zona de estudio.....	18
Tabla 2:	Periodos de estudio.....	19
Tabla 3:	Información de los dominios.....	26
Tabla 4:	Configuración de modelo para las variables dirección y velocidad del viento .	27
Tabla 5:	Configuración de modelo para las variables temperatura y humedad relativa .	27
Tabla 6:	Análisis estadístico de la velocidad del viento a 10 m de la superficie	90
Tabla 7:	Análisis estadístico del viento zonal a 10 m de la superficie	91
Tabla 8:	Análisis estadístico del viento meridional a 10 m de la superficie	92
Tabla 9:	Análisis estadístico de la dirección del viento a 10 m de la superficie	94
Tabla 10:	Análisis estadístico de la temperatura del aire a 2 m de la superficie.....	96
Tabla 11:	Análisis estadístico de la humedad relativa a 2 m de la superficie	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Ciclogénesis en altura (Hemisferio Sur)	6
Figura 2:	Corte transversal a latitud constante de 37°S. Vorticidad potencial (m ² ·K/s.kg), matiz de colores, magnitud del viento (kt, líneas negras) y temperatura potencial (°K, líneas azules)	6
Figura 3:	Composición vectorial de cualquier movimiento de traslación terrestre	8
Figura 4:	Diagrama de flujo del sistema de modelamiento WRF-ARW	13
Figura 6:	Pasos del sistema de modelamiento WRF-ARW	20
Figura 5:	Comparación de la velocidad del viento para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	31
Figura 6:	Comparación de la temperatura del aire para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	34
Figura 7:	Comparación de la humedad relativa para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	36
Figura 8:	Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.....	40
Figura 9:	Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.....	42
Figura 10:	Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.....	43
Figura 11:	Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del	

	periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.....	45
Figura 12:	Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.....	47
Figura 13:	Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.....	50
Figura 14:	Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	52
Figura 15:	Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.....	53
Figura 16:	Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b)09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	55
Figura 17:	Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	57
Figura 18:	Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 31/05/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	60
Figura 19:	Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	62
Figura 20:	Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.....	63
Figura 21:	Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	65

Figura 22: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.	67
Figura 23: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 02 al 04 de junio 2006 (Estación Aeropuerto Pisco).	68
Figura 24: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 11 al 13 de octubre 2008 (Estación Aeropuerto Pisco)	69
Figura 25: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Aeropuerto Pisco).	69
Figura 26: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Aeropuerto Pisco).	70
Figura 27: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Aeropuerto Pisco).	70
Figura 28: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 02 al 04 de junio 2006 (Estación Ocucaje).	71
Figura 29: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 11 al 13 de octubre 2008 (Estación Ocucaje).	71
Figura 30: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Ocucaje).	72
Figura 31: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Ocucaje).	72
Figura 32: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Ocucaje).	73
Figura 33: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Beta Santiago).	73
Figura 34: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Beta Santiago).	74
Figura 35: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Beta Santiago).	74
Figura 43: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (02 al 03 de junio del 2006)	77
Figura 44: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (02 al 03 de junio del 2006)	78
Figura 45: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (11 al 12 de octubre del 2008)...	79

Figura 46: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (11 al 12 de octubre del 2008)	80
Figura 47: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (20 de junio del 2012)	81
Figura 48: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (20 de junio del 2012)	82
Figura 49: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (23 de agosto del 2012)	83
Figura 50: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (23 de agosto del 2012)	84
Figura 51: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (26 de junio del 2014)	85
Figura 52: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (26 de junio del 2014)	86

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	Área de estudio	104
ANEXO 2	Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas	106
ANEXO 3	Visualización de los dominios	107
ANEXO 4	Resultados de comparación temporal del viento zonal y meridional de las simulaciones y los datos observados.....	108
ANEXO 5	Distribución de frecuencia de clases de viento	118
ANEXO 6	Distribución “t “Student.....	123

RESUMEN

El Viento Paracas es una tormenta de arena y polvo que ocurre en la región de Ica, el cual tiene como consecuencia la pérdida parcial o total de la visibilidad horizontal, lo que perjudica las actividades comerciales, turismo y la salud humana. Esta investigación tiene como objetivo el modelar el fenómeno Viento Paracas mediante una configuración local adecuada del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) estudiando eventos específicos, tales como, el día 3 de junio del 2006, 12 de octubre del 2008, 20 de junio del 2012, 23 de agosto del 2012 y 26 de junio del 2014, en los cuales se registró este evento; y así poder plantear posibles escenarios futuros, en materia de pronóstico. Las variables meteorológicas a nivel de superficie que se simularon fueron la dirección y velocidad del viento, la temperatura del aire y humedad relativa; estas variables fueron comparadas con los datos registrados por las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona, las cuales fueron validados mediante indicadores estadísticos.

Los resultados indican que el modelo fue capaz de simular coherentemente la variación horaria de los parámetros meteorológicos estudiados, pero no satisfacen el proceso de validación mediante todos los indicadores estadísticos. El modelo identifica los incrementos de la magnitud de la velocidad del viento y a su vez los sobreestima, pero cuando las velocidades del viento alcanzan valores superiores a los 10-12 m/s, el modelo subestima las magnitudes de la velocidad. En general se concluyó que el modelo no reproduce con precisión el comportamiento de las variables meteorológicas durante el evento Viento Paracas, por lo cual se rechazó la hipótesis planteada. Es de importancia resaltar que la topografía local juega un rol muy importante al alterar la magnitud del viento localmente, el viento costero se debilita a barlovento y se acelera a sotavento de un obstáculo topográfico.

Palabras claves: Viento Paracas, Weather Research and Forecasting, modelación, mesoescala.

ABSTRACT

The Paracas Wind (Viento Paracas) is a sand and dust storm occurring in the Ica region, which causes the total or partial loss of horizontal visibility, playing a detrimental role for local commercial activities, tourism and even human health. This investigation's purpose is to model the Paracas Wind phenomenon through an accurate input of local data in the configuration of the Weather Research and Forecasting Model, by the study of specific events, such as those dated June 3rd 2006, October 12th 2008, June 20th 2012, August 23rd 2012 and June 26th 2014 (Dates when this phenomenon took place); and this being able to forecast future events. Surface meteorological variables that were simulated were wind direction and velocity, air temperature and relative humidity. These variables were compared to data recorded by the area's meteorological stations, and validated by statistic indicators.

Result show that the model was capable of coherent simulation of the daily fluctuations of the analyzed meteorological parameters; however they do not satisfy the process of statistic indicators validation. The model identifies wind velocity increases due to the paracas wind event, and it overrates these velocity records, but when wind velocity reaches up to higher values than 10-12 m/s, the model underestimates these velocities. Hence, it was concluded that the model does not reproduce the meteorological variables when occur Paracas Winds, therefore negating the proposed hypothesis. It is important to mention that the local topography plays a relevant role modifying the wind magnitude locally; coastal wind weakens windwards and accelerates leewards of a topographic obstacle.

Words Key: Paracas Wind, Weather Research and Forecasting, modelation, mesoscale.

I. INTRODUCCIÓN

El viento es la variable de estado de movimiento del aire. En meteorología se define el viento como el aire en movimiento tanto horizontal como verticalmente. Escobar (1993), señala que el viento es un factor que afecta las actividades de la vida diaria, sobretodo, cuando está asociado a las tempestades de polvo y arena. En Pisco y en zonas aledañas, esto es conocido como 'Viento Paracas', que es un viento marino considerado un fenómeno de mesoescala. Además Escobar (1993) identificó eventos Viento Paracas como aquellos que son capaces de levantar arena y polvo del suelo alcanzando una visibilidad menor a 100 metros, según los reportes del aeropuerto de Pisco entre 1948 y 1990, la cual perjudica las actividades comerciales, turismo y la salud humana.

El modelo Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo meteorológico de última generación que permite obtener campos de viento, presión, temperatura y humedad con alta resolución espacio - temporal. (Fernández, 2011). Tiene la particularidad de poder ser configurado localmente para representar dominios espaciales en diferentes escalas de acuerdo al estudio que desee realizarse. Para ello deben seleccionarse de manera adecuada tanto las bases de datos como las condiciones iniciales y de contorno que mejor permitan describir los fenómenos deseados.

La presente investigación se basó en el estudio de eventos meteorológicos severos de mesoescala como es el Viento Paracas. Este fenómeno afecta a las provincias de Pisco, Ica y Nazca ubicadas en la Región de Ica con mayor frecuencia y magnitud durante los meses de Junio a Octubre. Además se detalla que para este estudio se analizaron cinco eventos del Viento Paracas ocurridos entre los años 2006 al 2014 que han sido representativos del comportamiento del fenómeno.

El trabajo de investigación contiene una descripción detallada de la configuración del modelo WRF y de las principales parametrizaciones y esquemas físicos utilizados para simular un evento de mesoescala como es el Viento Paracas. Para ello se seleccionaron

condiciones atmosféricas de contorno que permitieron reproducir la generación del evento, y se compararon las simulaciones con las mediciones provistas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la información obtenida del METAR.

Se analizó la evolución espacio-temporal de las principales variables meteorológicas que permiten caracterizar el viento Paracas, tales como dirección y velocidad del viento, la temperatura del aire y humedad relativa.

En nuestro país, el viento Paracas es un evento poco estudiado por lo que se desconoce con precisión su origen, dinámica y el rol específico dentro del sistema en equilibrio. Este fenómeno tiene como principal consecuencia la pérdida parcial o total de la visibilidad horizontal) la cual perjudica las actividades comerciales, turismo y la salud humana.

La representación del fenómeno Viento Paracas utilizando la técnica de modelado numérico puede llegar a ser una herramienta de análisis muy importante para monitorear su evolución y plantear algunos posibles escenarios futuros, ya que el cambio climático podría modificar el comportamiento de este fenómeno en un futuro. Y posteriormente, podrá ser favorable para las poblaciones que son afectadas, ya que serían alertadas oportunamente pudiendo tomar las precauciones en sus actividades.

El objetivo general del presente estudio fue el modelar el Viento Paracas con el modelo WRF para algunos eventos representativos durante el periodo del año 2006-2014. Para poder alcanzar el objetivo principal, este se desarrollará con los objetivos específicos los cuales fueron: a) Identificar la configuración adecuada del modelo WRF para simular la evolución del fenómeno Viento Paracas. b) Validar el modelo WRF en la simulación del Viento Paracas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. COSTA Y ZONA COSTERA

Según Windevoxhel (1998), la costa está delimitada por la interfase entre el océano y la tierra, mientras que el concepto de "zona costera" indica el espacio que delimita tal interfase.

La definición más básica de "zona costera" indica que es la parte de la tierra afectada por su proximidad al océano y aquella parte del océano afectada por su proximidad a la tierra (US Commissionon Marine Sciences, 1969).

2.2. METEOROLOGÍA COSTERA EN LAS COSTAS DE ICA

Dado que la meteorología es el estudio de los fenómenos de la atmósfera, la meteorología costera se puede definir como aquella parte del estudio de la atmósfera que se ocupa principalmente de los fenómenos que ocurren en la zona costera. El comportamiento de la atmósfera puede ser analizado y entendido en términos de las leyes básicas y conceptos de la física. Los tres campos de la física que son más aplicables a la atmósfera son la transferencia radiactiva, la termodinámica y la hidrodinámica.

La meteorología de la costa peruana está fuertemente influenciada por la configuración del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) que modula la intensidad de los vientos alisios, mientras que la Cordillera de los Andes es una barrera topográfica que mantiene las condiciones atmosféricas de la costa oeste de Perú muy diferentes a las de la Amazonía. Los Andes desvían la trayectoria de los vientos zonales y se genera una subsidencia de aire seco sobre la costa oeste de Sudamérica, lo cual resulta en la aridez de nuestra costa y en la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) preferencial en el hemisferio norte. El Jet Costero de Ica, es una corriente de máxima velocidad del viento superficial (**entre el nivel del mar y 950 hPa**) que se desarrolla sobre el océano y muy cerca de la costa (dentro de los primeros 50 Km desde la costa hacia mar adentro). Su velocidad se ha observado entre 12 y

16 m/s, y la ubicación de su núcleo aproximadamente a 250 metros de altura sobre la superficie del mar y con una dirección predominante del sureste. Por otro lado, la temperatura superficial del mar (TSM) frente a Ica oscila entre 15 y 16°C, es la temperatura más baja en toda la costa, que, se encuentra directamente influenciado por el intenso afloramiento del agua sub-superficial fría, que a su vez se encuentra asociado a la alta variabilidad intraestacional de la fuerza del viento frente a Pisco (~15°S) con respecto al resto de regiones costeras. Existen remolinos de arena y polvo que se forman sobre el desierto, algunos inclusive cerca a las playas; este fenómeno también ocurre en otras regiones sudamericanas. La tormenta de polvo y arena o Viento Paracas es el fenómeno más conocido que ocurre en esta región considerada para muchos pobladores locales como parte de su vida diaria, principalmente en la ciudad de Pisco y Paracas. (Quijano, 2013)

2.3. VIENTO PARACAS

El Viento Paracas es un fenómeno a escala local que eleva grandes cantidades de polvo y arena sobre el desierto de Ica, y describe una nube de polvo acompañado de una intensificación del viento en superficie sobre el continente. Escobar (1993) identificó eventos Viento Paracas como aquellos que son capaces de levantar arena y polvo del suelo alcanzando una visibilidad menor a 100 metros, según los reportes del aeropuerto de Pisco entre 1948 y 1990, con una velocidad promedio que oscila entre 15 y 35 nudos.

La tormenta de arena y polvo ocurre en casi todos los desiertos del mundo, principalmente al norte de África, la única diferencia, aparte de la posición geográfica, es el área disponible para la erosión eólica y la costa del Perú es considerado como parte de los grandes desiertos del mundo. En una tormenta de esta naturaleza el viento superficial se intensifica y las partículas del suelo de diferentes tamaños adoptan distintos tipos de movimiento de los cuales se puede distinguir tres categorías: a) arrastre, b) saltación y c) suspensión. Estos procesos dependen del diámetro de la partícula. (Quijano, 2013)

2.4. JET COSTERO DE BAJOS NIVELES

Muñoz y Garreaud (2005) afirman que la costa occidental subtropical de Sudamérica está bajo la influencia del anticiclón del Pacífico Sur durante todo el año, lo que induce vientos

persistentes del sur a lo largo de la costa de Chile del norte central. Estos vientos a menudo toman la forma de un jet costero de bajo nivel, similar al Jet Costero de Ica, y en muchos aspectos similar al jet costero que existe de la costa de California. El jet parece ocurrir cuando las condiciones sinópticas de latitudes medias inducen una fuerza de gradiente de presión dirigida de norte a lo largo de la costa de Chile del norte central. La topografía costera excluye el desarrollo de un viento significativo proveniente del este de bajo nivel que al parecer mantiene un equilibrio geostrofico. En cambio, el flujo meridional se acelera hasta que la fricción turbulenta en la capa marítima divisoria equilibra el gradiente de presión meridional. El equilibrio de fuerza resultante es semigeostrofico, con geostrofia válida sólo para la componente meridional del viento cerca de la costa. En niveles más altos, la inhibición topográfica disminuye, y un pequeño flujo del “Este” se hace más notorio, que resulta ser muy importante en la temperatura y en la estabilidad promedio de la capa límite marítima.

2.5. CAPA LIMITE PLANETARIA

Es importante conocer previamente la estabilidad atmosférica dentro Capa Límite Planetaria (CLP), ya que por debajo de esta ocurren los principales procesos que interactúan con el transporte de partículas como los remolinos turbulentos o simplemente turbulencia. Se puede definir la CLP como la parte de la tropósfera que está directamente influenciada por la presencia de la superficie terrestre y responde a los forzamientos superficiales en escalas de tiempo de una hora o menos. La turbulencia ocurre por transferencia de momento (energía) entre las capas adyacentes de la atmosfera. Se puede generar de dos formas. a) Por convección térmica, y, b) por cillazadura.

2.6. CAÍDA DE LA TROPOPAUSA

Las franjas oscuras que aparecen en las imágenes del canal infrarrojo son indicativas de anomalías positivas de vorticidad potencial, asociadas con procesos convectivos. Estas anomalías se deben al hundimiento de la tropopausa en la parte trasera de los vórtices que arrastra hacia abajo aire seco de la estratósfera y hace aumentar la vorticidad potencial.

Los aumentos de la vorticidad potencial en las capas altas inducen procesos de ciclogénesis que se propagan hacia abajo llegando en ocasiones hasta la misma superficie terrestre, y originando un proceso en sentido inverso de reforzamiento de tales corrientes ciclónicas. (Figura 2)

Estos procesos de ciclogénesis en altura pueden tener lugar hasta 1500-2000 km corriente arriba, y ser detectados habitualmente con varias horas de antelación. Desempeñan normalmente un papel muy importante en episodios convectivos intensos y de desarrollo rápido y explosivo.

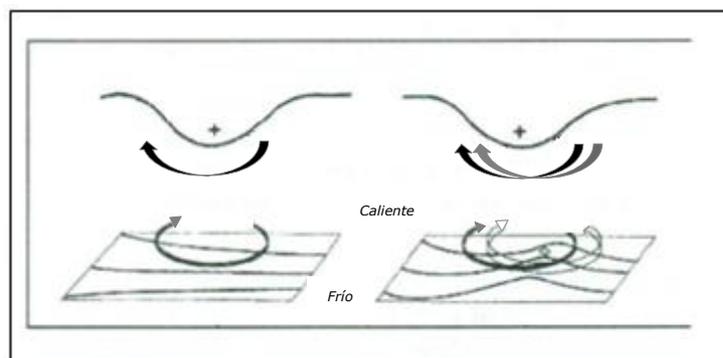


Figura 1: Ciclogénesis en altura (Hemisferio Sur)

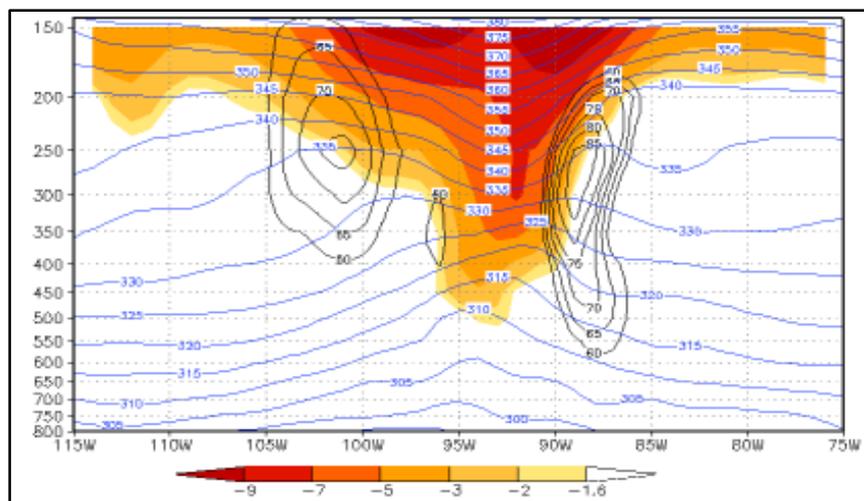


Figura 2: Corte transversal a latitud constante de 37°S. Vorticidad potencial ($m^2K/s.kg$), matiz de colores, magnitud del viento (kt, líneas negras) y temperatura potencial ($^{\circ}K$, líneas azules)

2.7. ADVECCIÓN DE VORTICIDAD

$$\frac{f_p}{R} \frac{\partial}{\partial p} [-\vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p (\zeta + f)]$$

f: vorticidad planetaria ζ: vorticidad relativa p: presión atmosférica R: constante universal de los gases V: velocidad del Viento
--

Este término representa la variación vertical de la advección de vorticidad.

Dado que hay una derivada vertical en este término, esto significa que la advección en sí no es importante, pero sí su variación con la altura (presión).

Para entender el efecto de este término, hacemos una simplificación. Con mucha frecuencia los niveles altos de la tropósfera muestran una configuración de tipo ondulatorio, mientras que las configuraciones en los niveles bajos muestran muy frecuentemente contornos cerrados, que son aproximadamente circulares. La vorticidad está relacionada con el laplaciano del campo de altura geopotencial y se transporta vorticidad por el viento (geostrófico). Para contornos cerrados la advección es bastante pequeña, mientras que la advección es mucho mayor para configuraciones de tipo ondulatorio. Por lo tanto, en el término de la vertical de la advección de vorticidad, la advección en los niveles bajos puede ser despreciada frecuentemente, como hacemos en la siguiente simplificación.

$$\omega \cdot [-\vec{V} \cdot \vec{\nabla}_p (\zeta + f)]_{500}$$

ω: velocidad angular vertical V: vector viento ζ: vorticidad relativa f: vorticidad planetaria

Entonces la contribución al campo de omega, debida a la variación de la advección de vorticidad, es proporcional a la advección de vorticidad con signo opuesto (Meted).

2.8. DINÁMICA ATMOSFÉRICA

Las fuerzas causan que las parcelas de aire se aceleren o desaceleren, es decir crean o alteran el viento. La relación entre las fuerzas y el viento se llama dinámica atmosférica. Las leyes de Newton describen muy bien esta dinámica. Fuerzas atmosféricas como la presión y la fricción actúan en el plano horizontal, existe otras fuerzas como la ocasionada

por la rotación de la tierra o por el giro del viento alrededor de una curva, estas son llamadas fuerzas aparentes. La fuerza horizontal más importante para la formación del viento es el de gradiente de presión.

2.9. FUERZA DE CORIOLIS

La denominada fuerza de Coriolis influye en todos los fenómenos de traslación que se realizan sobre la superficie de la Tierra.

Debido a la rotación de la Tierra, se genera una fuerza que, en el hemisferio Sur, desvía hacia el este toda partícula en movimiento de norte a sur y hacia el oeste a las que lo hacen de sur a norte.



Figura 3: Composición vectorial de cualquier movimiento de traslación terrestre

La rotación terrestre genera la denominada fuerza de Coriolis que se produce de forma perpendicular a la dirección del movimiento. En el hemisferio sur, el aire procedente de los anticiclones es desviado hacia la izquierda, girando en el sentido contrario de las agujas del reloj. En las depresiones, el viento gira en sentido de las agujas del reloj. En el hemisferio norte se produce el efecto marino, lo que explica que el viento de las borrascas y los anticiclones gire en sentido inverso.

2.10. ENERGÍA MECÁNICA

En los procesos físicos, la energía suele almacenarse en los cuerpos en forma combinada de tipo cinético y potencial. Esta suma de energías se denomina energía mecánica, y se escribe genéricamente como:

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2}mv^2 + mgh$$

Ec: Energía cinética
Ep: Energía potencial
m: masa
v: velocidad
h: altura
g: aceleración de la gravedad

Fuerzas que intervienen en un cuerpo lanzado hacia arriba: una genera movimiento (energía cinética) y la otra, el peso, va acumulando energía potencial gravitatoria hasta el punto más elevado de la trayectoria.

2.10.1. Conservación de la energía mecánica

Uno de los principios básicos de la física sostiene que la energía no se crea ni se destruye, sino que sólo se transforma de unos estados a otros. Este principio se extiende también a la energía mecánica. Así, en un sistema aislado, la suma de energías cinética y potencial entre dos instantes de tiempo se mantiene constante.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2$$

De este modo, la energía cinética se transforma en potencial, y a la inversa, pero la suma de ambas siempre se conserva (cuando el sistema está aislado y no se aplican fuerzas disipativas).

2.11. MODELOS ATMOSFÉRICOS

Un modelo de mesoescala es un modelo de predicción numérica del tiempo (PNT) cuya resolución horizontal y vertical es suficiente para pronosticar o representar fenómenos meteorológicos de mesoescala. Dichos fenómenos, que a menudo son producto del forzamiento de la topografía o de los litorales, o están relacionados con la convección, presentan algunos de los mayores retos a la hora de hacer el pronóstico. Los fenómenos meteorológicos severos, incluidos los tornados y los sistemas convectivos de mesoescala,

ocurren principalmente a nivel de mesoescala. La visibilidad, la turbulencia, el tiempo que percibimos y el estado del mar pueden variar enormemente en distancias de pocos kilómetros y sus repercusiones pueden ser enormes. Se depende con frecuencia de la orientación que brindan los modelos de mesoescala, especialmente en situaciones tácticas en las que las observaciones meteorológicas en tiempo real son escasas o inexistentes. Todo esto significa que la comprensión del funcionamiento de los modelos de mesoescala puede ayudar a usar dichos modelos de forma más eficiente y, por tanto, contribuir a mejorar sus pronósticos.

Jacobson (2005) presenta una definición más completa. Señala que un modelo atmosférico computacional (que viene a ser un modelo numérico) es una representación codificada a lenguaje de ordenador de la dinámica, física, química de los procesos radiactivos de la atmósfera. En los modelos atmosféricos, los procesos que dependen del tiempo son descritos matemáticamente por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias; los procesos que dependen tanto del tiempo como del espacio son representados a través de ecuaciones diferenciales parciales. Estas ecuaciones son sustituidas por medio de diferencias finitas u otra aproximación; se codifican a un lenguaje de ordenador y son resueltas.

Los modelos meteorológicos de mesoescala tienen varias aplicaciones Pielke (2002) apunta a las siguientes: evaluaciones de diagnóstico, estudio de procesos y predicciones. En el primer caso, estos modelos utilizan las ecuaciones de conservación combinadas con cualquier observación para interpolar los datos por toda la región de estudio. Los modelos de procesos utilizan las ecuaciones de conservación para mejorar el entendimiento de la dinámica y termodinámica de la atmósfera. Los modelos para predicción están diseñados para generar pronósticos.

2.11.1. Modelo WRF

The Weather Research and Forecasting (WRF) es una nueva generación de sistema de mesoescala para la predicción numérica del tiempo diseñado para servir tanto a la predicción operativa y las necesidades de investigación atmosférica. Cuenta con múltiples núcleos dinámicos, una variación en 3-dimensiones (3DVAR) del sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software que permite paralelismo computacional y capacidad de ampliación del sistema. WRF es adecuado para una amplia gama de aplicaciones en escalas que van desde metros hasta miles de kilómetros, incluyendo:

- Simulaciones idealizadas
- Investigación de parametrizaciones.
- Investigación de los datos asimilación.
- Investigación de Pronóstico
- En tiempo real NWP
- Aplicaciones del modelo acoplado
- Enseñanza

- Variables y coordenada vertical

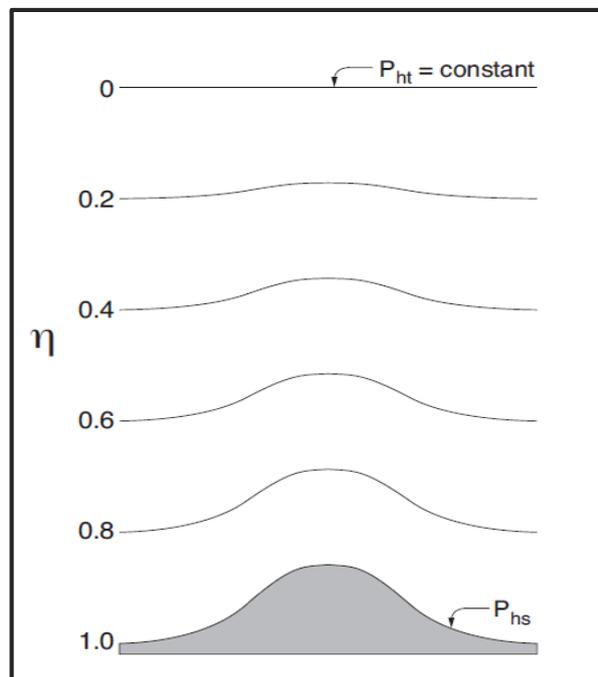
$$\eta = (P_h - P_{ht})/\mu$$

Donde la constante:

$$\mu = P_{hs} - P_{ht}$$

η : coordenada vertical de la presión hidrostática (eta)

P_h es la componente hidrostática de la presión, P_{hs} y P_{ht} se refieren a los valores de presión a lo largo de la superficie y el límite superior, respectivamente.



Dado que $\mu(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ representa la masa de aire en la columna ubicada sobre el punto de referencia (x, y) . Se definen además **variables de estado** (U, V, W) , ecuación (a), como el producto entre μ y la velocidad en el punto (u, v, w) , siendo η la altura geopotencial. Se presentan en las ecuaciones (c) y (b), las variables que se construyen a partir de producto de las componentes de velocidad y temperatura geopotencial, por la densidad. (Gutiérrez 2011)

$$\mathbf{V} = \mu \mathbf{v} = (U, V, W), \quad (a)$$

$$\Omega = \mu \dot{\eta}, \quad (b)$$

$$\Theta = \mu \theta. \quad (c)$$

$w = \eta$: es la velocidad vertical	p : presión atmosférica
θ : temperatura potencial	ρ : densidad del fluido
ϕ : gz (geopotencial)	$\alpha = 1 / \rho$: volumen específico
g : aceleración de la gravedad	Ω : Velocidad angular de rotación de la Tierra

- Sistemas de ecuaciones

Usando las variables definidas anteriormente, el flujo de forma de las ecuaciones de Euler pueden escribirse como:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V}_u) - \partial_x(p \partial_n \phi) + \partial_\eta(p \partial_x \phi) = F_U$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V}_v) - \partial_y(p \partial_n \phi) + \partial_\eta(p \partial_y \phi) = F_V$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V}_w) - g(\partial_n p - \mu) = F_W$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V}_\theta) = F_\Theta$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla_\phi) - gW] = 0$$

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa.

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu$$

y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma$$

$\gamma = c_p / c_v = 1.4$ es la proporción de la capacidad de calor para aire seco, R_d es la constante de los gases para el aire seco, y p_0 es una presión de referencia (normalmente 105 pascales).

Los términos F_u , F_v , F_w y F_θ representan los términos derivados de forzar la física del modelo.

- Los componentes del sistema de modelado WRF

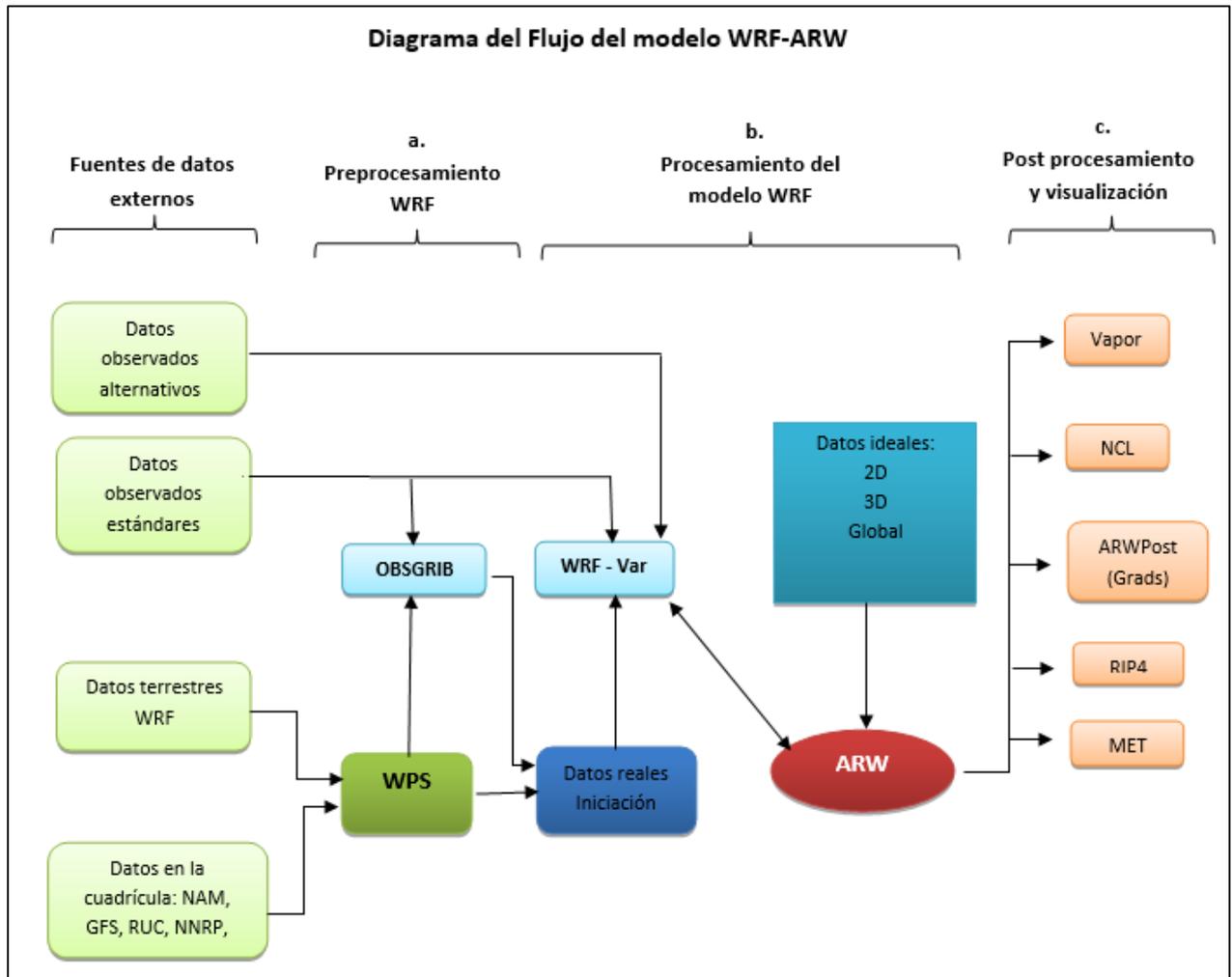


Figura 4: Diagrama de flujo del sistema de modelamiento WRF-ARW

Como se muestra en la figura 4, el sistema de modelado WRF consiste de estos programas principales:

- El Sistema de Pre - procesamiento WRF (WPS)
- WRF-Var
- ARW solver
- Post-procesamiento y visualización de los datos simulados.

a. Sistema de Pre procesamiento WRF (WPS)

El Sistema de Procesamiento previo WRF (WPS) es un conjunto de tres programas cuya función es colectivo a elaborar elementos para el programa. Cada uno de los programas realiza una etapa de la preparación: **geogrid** define los dominios del modelo e interpola estáticas de los datos geográficos a las grillas; **ungrib** extrae de los campos meteorológicos archivos con formato GRIB; y **metgrid**, interpola horizontalmente los campos meteorológicos extraídos por ungrib a las grillas del modelo definidas por geogrid. El trabajo de la interpolación vertical de campos meteorológicos en WRF a niveles ETA se lleva a cabo dentro del programa *real*.

b. Sistema de procesamiento del modelo WRF

El modelo WRF es compresible por completo, y es un modelo no hidrostático (con un tiempo de ejecución opción hidrostática). Su coordenada vertical es de presión hidrostática de seguimiento del terreno. La grilla es la asombrosa Arakawa C-grid. El modelo utiliza el método de Runge-Kutta de segundo y tercer orden en esquemas de integración de tiempo, y segundo a sexto orden en esquemas de advección, tanto horizontal como vertical. Se utiliza un paso de tiempo de división pequeña para acústica y modos de ondas de gravedad. La dinámica conserva las variables escalares.

Física del modelo

El modelo cuenta fundamentalmente con 5 parametrizaciones, las cuales se detallan a continuación (Skamarock et al. 2008):

- **Microfísica:** incluye explícitamente procesos de cambio de estado como: vapor de agua, formación de nubes y precipitación.
- **Capa límite planetario (PBL):** es responsable de los flujos verticales a escala sub grilla generados por el transporte de fluido dinámico (eddies) en toda la columna de atmósfera, no sólo en la capa límite. De esta forma, cuando un esquema de PBL es activado, la explícita difusión vertical es desactivada asumiendo que el esquema se encargará de este proceso.
- **Radiación atmosférica:** estos esquemas proveen el calentamiento atmosférico a causa de los flujos radiativos divergentes y la radiación de onda larga y corta incidente del

balance de radiación de la superficie. La radiación de onda larga incluye la radiación infrarroja o termal absorbida y emitida por gases y superficies. El flujo de radiación de onda larga saliente del suelo es determinado por la emisividad de la superficie que a su vez dependen del tipo de uso de suelo, como también de la temperatura del suelo. La radiación de onda corta incluye longitudes de onda visible y alrededores de su espectro que componen el espectro solar. Todos los esquemas de radiación del WRF son esquemas de una columna (unidimensionales), por tal motivo cada columna es tratada de manera independiente y los flujos corresponden a aquellos planos horizontales uniformes infinitos, que son una buena aproximación si el grosor vertical de las capas de modelo es menor que el largo horizontal de la grilla.

- **Parametrizaciones de cúmulos:** estos esquemas son responsables de los efectos a escala de sub grilla de nubes convectivas y/o superficiales. Están diseñados para representar flujos verticales generados por movimientos ascendentes o descendentes y para compensar el movimiento fuera de las nubes. Operan solamente en columnas individuales donde el esquema ha sido activado y provee perfiles verticales de humedad y de calor (calentamiento). Todos los esquemas proveen un componente convectivo de la precipitación superficial.

Teóricamente estas parametrizaciones son válidas para grillas de tamaño grueso (Coarse domains), un tamaño mayor a los 10 km, donde son necesarias para liberar calor latente propiamente en una escala de tiempo realista en las columnas convectivas.

- **Tratamiento de capa superficial:** los esquemas de este grupo calculan las velocidades de fricción y los coeficientes de intercambio que permiten el cálculo del calor superficial y los flujos de humedad por medio de los modelo de suelo (land surface) y tensión superficial en los esquemas de capa límite planetaria.
- **Modelos de suelo:** usa la información atmosférica de los esquemas de tratamiento de la capa superficial, el forzamiento radiativo de los esquemas de radiación, el forzamiento de precipitación de los esquemas de microfísica y esquemas convectivos, junto con la información interna sobre las variables del estado de la superficie y las propiedades de la capa superficial, para proveer flujos de calor y humedad sobre los puntos de suelo y los puntos mar-hielo.

c. Sistema de Post procesamiento

Existen un gran número de herramientas de visualización para mostrar la información del modelo (salidas, archivos temporales, información de entrada, etc.). La data obtenida del proceso anterior se encuentra en formato netCDF; por lo tanto, puede ser visualizada con cualquier herramienta capaz de leer dicho formato (NCAR-MMM, 2009).

Actualmente tienen soporte las siguientes herramientas de post procesamiento: NCL (NCAR Command Language), RIP4 (Read/Interpolate/Plot), ARWpost (convierte a GrADS y Vis5D), WPP (WRF Post Processor) y VAPOR (Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Research) NCL, RIP4 y VAPOR sólo leen información en formato netCDF, mientras que ARWpost puede leer en formato netCDF y GRIB1, finalmente el WPP puede leer la información en formato binario y netCDF.

En tal sentido para poder visualizar las salidas sólo se requiere la librería del paquete netCDF y la librería de los paquetes de las diversas herramientas de visualización.

Cabe recalcar, que para este trabajo de investigación se utilizó el software de post procesamiento llamado ARWpost que convierte directamente la salida del modelo WRF que se encuentra en netCDF al formato GrADS (ctl. y dat.).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

Se detalla la lista de materiales:

- Maquina Lenovo Intel Core i5 de 0.5TB de Disco Duro, con 6 procesadores, con 4Gb de RAMS.
- Sistema operativo Linux Kubuntu 12.02
- Modelo WRF versión 3.4.
- Visualizador Grads v2.0.1
- Cliente SSH Putty
- Programa Xming
- Datos operacionales provenientes de CISL Research Data Archive <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2> mantenido por la sección de soporte del NCAR con una resolución espacial de 1.0°x1.0° y una resolución temporal de 6 horas.
- Datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento) de las estaciones ubicadas dentro del área de estudio obtenidas de SENAMHI y METAR.

En el Anexo 01 se hace una breve descripción del área de estudio.

Posteriormente se describen los datos de entrada para el modelo WRF y la información meteorológica obtenida de estaciones.

Datos de entrada utilizados para el modelo WRF

Estos datos operativos del Análisis Global NCEP (FNL) son de un (01) grado por un (01) grado de resolución espacial y cada seis horas de resolución temporal. Este producto es del Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS), que recoge continuamente datos de observación del Sistema Global de Telecomunicaciones (GTS), y de otras fuentes, para muchos análisis. Los FNLs son generados con el mismo modelo que NCEP usa en el Sistema Global de Pronostico (GFS), pero los FNLs son preparados alrededor de una hora

más o menos después que GFS se inicia. Los FNLs son retrasados para que más datos observacionales se puedan utilizar. Los GFS se ejecutan anteriormente con apoyo de las necesidades de pronóstico de tiempo crítico, y utiliza los FNL desde 6 horas anterior del ciclo como parte de su iniciación.

Los análisis están disponibles en la superficie, en 26 niveles obligatorios desde 1000 milibares hasta 10 milibares, en la capa límite de la superficie y en algunas capas sigma, la tropopausa y unos pocos otros. Los parámetros incluyen presión a nivel de superficie, la presión del nivel del mar, altura geopotencial, temperatura del aire, temperatura superficial del mar, temperatura del suelo, humedad del suelo, temperatura potencial, agua precipitable, cubierta de hielo, humedad relativa, componentes de la velocidad del viento, movimiento vertical, vorticidad, evaporación y convección.

Datos de las estaciones meteorológicas

Se utilizó la información meteorológica de las estaciones ubicadas dentro del área de estudio (región Ica); las variables meteorológicas consideradas fueron: la velocidad viento, dirección del viento, temperatura del aire y humedad relativa.

Tabla 1: Estaciones meteorológicas de la zona de estudio

Estación	Tipo	Ubicación (Provincia)	Coordenadas		Altitud (m)
			Latitud	Longitud	
Copara	Convencional	Nazca	14° 58' 58"	74° 54' 54"	600
Ocucaje	Automática	Ica	14° 22' 56.8"	75° 40' 52.6"	313
Beta Santiago	Automática	Ica	14° 14' 14.6"	75° 40' 12.8"	386
Tacama	Convencional	Ica	13° 59' 1"	75° 45' 1"	432
Aeropuerto militar de Pisco	Automática	Pisco	13° 44' 42"	76° 13' 13"	8

Fuente: Elaboración propia.

En el Anexo 02 se presenta el mapa con la ubicación de las estaciones meteorológicas que se utilizaron para la presente investigación.

Descripción de los periodos de estudio

Se descargó información meteorológica, que proviene del NCEP FNLOperational/Model Global Tropospheric Analyses (FNL), para días antes y días después de ocurrido el evento

Paracas para las fechas seleccionadas. Estos datos se utilizaron como datos de entrada para el modelo WRF.

Según estudio realizado por SENAMHI, Tormenta de Polvo y Arena (Escobar 2004), se registró anomalías de las variables meteorológicas en la región Ica, el día 7 de Octubre del 2004, considerándose como un evento de Viento Paracas. En la presente investigación se tomó este evento como referencial para considerar los otros periodos de estudio, de forma que cumplan con las características similares donde haya ocurrido el evento de Viento Paracas, según esas características escogimos los siguientes periodos de estudio:

Tabla 2: Periodos de estudio

Nº Período	Inicio	Central *	Fin
1	01/Junio/2006**	03/Junio/2006	06/Junio/2006
2	09/Octubre/2008	12/Octubre/2008	15/Octubre/2008
3	17/Junio/2012	20/Junio/2012	23/Junio/2012
4	20/Agosto/2012	23/Agosto/2012	26/Agosto/2012
5	23/Junio/2014	26/Junio/2014	29/Junio/2014

*Central: es la fecha en la cual se detectó la ocurrencia del evento Viento Paracas.

** Para la estación Aeropuerto Pisco, se considera desde el 31 de mayo del 2006 a las 00:00.

Fuente: Elaboración propia

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Identificación de la configuración adecuada del modelo WRF

a. Simulación de las variables meteorológicas

Los pasos que requiere el modelo WRF para la simulación de las variables meteorológicas, se presentan en el siguiente esquema:

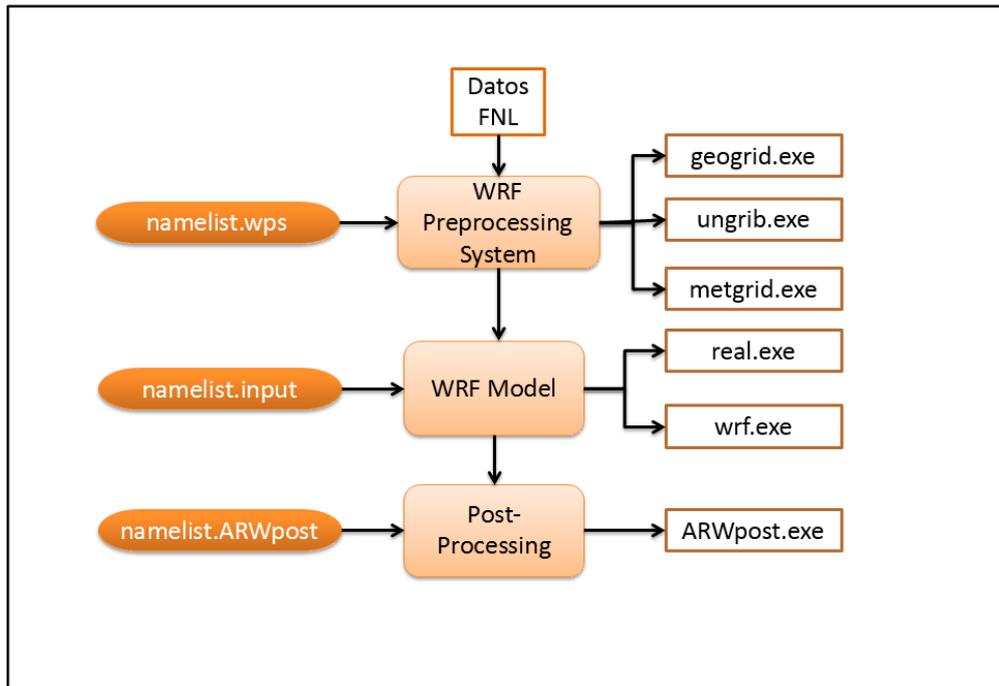


Figura 6: Pasos del sistema de modelamiento WRF-ARW

Cuando se habla de mesoescala, se hace referencia a una escala temporal que va de una (01) a seis (06) horas, espacialmente a fenómenos que ocurren en el orden de 10 km hasta 100 km o de altura de 1 a 10 km. Debido a que el fenómeno en estudio (Viento Paracas) es un evento a mesoescala se trabajó con grillas anidadas, precisamente con tres dominios, para su mejor representación.

Se ensayaron distintas configuraciones del modelo tomando como referencia las utilizadas en los estudios de investigación por los autores Gavidia (2011), Fernández (2011) y López (2009).

Una vez identificada la configuración de dominios y parametrizaciones físicas y dinámicas para representar el evento Viento Paracas, se corrió el modelo WRF para cada uno de los periodos en estudio seleccionados. Una vez simulado se comparó los datos observados con las simulaciones para los tres dominios, y el dominio que se aproximó más a los datos observados fue considerado la configuración adecuada del modelo. Este proceso se repitió para cada una de las estaciones meteorológicas utilizadas en la presente investigación.

b. Adecuación de la salida del modelo

Se utilizó la herramienta de ARWpost para cambiar las salidas del modelo que se encontraba en formato netCDF a formato GrADS, luego se utilizó una serie de scripts para obtener los datos en formato *.txt, los cuales pueden ser visualizados y editados en Microsoft Excel.

3.2.2. Validación de la simulación del modelo

El desarrollo de un modelo numérico refleja un intento por conocer las condiciones que generará un evento en particular, en lugar de permanecer en un total desconocimiento acerca de su evolución. Sin embargo, el uso de los modelos requiere conocer cuáles son las capacidades que tienen para reproducir un fenómeno, cuáles son sus desventajas y limitaciones, y cuáles son los valores que se les pueden adjudicar a los resultados obtenidos. A través de estas preguntas surge la idea de evaluar a los modelos, con el objetivo de saber si proporcionan información adecuada para las necesidades y decisiones de un usuario.

Para la validación del modelo se utilizaron técnicas estadísticas que han sido empleadas por diversos autores, entre ellos Pielke (2001) y Wilks (2006). Los estadísticos utilizados fueron: coeficiente de correlación de Pearson, el error cuadrático medio y el sesgo. A continuación se describe cada uno de ellos.

a. Coeficiente de correlación de Pearson

Para analizar los resultados cuantitativos del modelo WRF se utilizó el coeficiente lineal de Pearson, que se define como la relación de la covarianza de las dos variables sobre el producto de sus desviaciones estándar.

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}(x,y)}{S_x S_y}$$

Este r es un indicador que se utiliza para medir el grado de asociación entre los datos simulados y los observados. Si las variaciones ocurren en un mismo sentido, los valores simulados están asociados a los valores observados. El coeficiente va desde -1 a 1, siendo 1 la correlación perfecta, el 0 indica que las simulaciones son independientes de las observaciones y -1 una correlación alta en sentido opuesto.

$$r = \frac{\overline{(X_o - \bar{X}_o) \times (X_p - \bar{X}_p)}}{\sqrt{\overline{(X_o - \bar{X}_o)^2} \times \overline{(X_p - \bar{X}_p)^2}}}$$

X_o : datos observados X_p : datos simulados

Se aplicó un análisis estadístico que sigue la distribución “t” Student con n-2 grados de libertad, para conocer si las correlaciones son significativas:

$$H_0 = 0$$

$$H_1 \neq 0$$

$$t = r \sqrt{\frac{n - 2}{1 - r^2}}$$

H_0 : Hipótesis nula, el modelo WRF no tiene la capacidad de simular coherentemente la variación temporal y espacial de los parámetros meteorológicos durante el fenómeno viento Paracas.

H_1 : Hipótesis alterna, el modelo WRF tiene la capacidad de simular coherentemente la variación temporal y espacial de los parámetros meteorológicos durante el fenómeno viento Paracas.

t : t calculado

n : tamaño de la muestra

r : coeficiente de correlación de Pearson

r^2 : coeficiente de determinación

El valor del t tabular, bajo la distribución $t(n-2, \alpha/2)$ de dos colas, con n-2 grados de libertad y $\alpha = 0.05$, se calculó con ayuda de la tabla estadística.

En tal sentido, si la t calculada es mayor que la t tabular se rechaza la hipótesis nula y por lo tanto las variables están relacionadas. En caso contrario, si t calculada es menor a la tabular, ambas variables no están relacionadas. La relación será no significativa cuando la t calculada es menor a la t tabular por tanto se acepta la hipótesis nula.

b. Sesgo (Mean Error o BIAS)

Proporciona información sobre la tendencia que tiene el modelo al pronosticar una variable, es decir, sobrestimar o subestimar una variable, nos cuantifica el error sistemático del modelo Pielke (1984) define BIAS según:

$$\text{BIAS} = \sum_{t=1}^N \frac{(X_p - X_o)}{N}$$

X_o : datos observados X_p : datos simulados

Para el caso de la dirección del viento se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{BIASD} = \sum_{t=1}^N \frac{D}{N}$$

$$D = d_p - d_o \quad , \quad \text{si } (d_p - d_o) < (d_o - d_p)$$

$$D = d_o - d_p \quad , \quad \text{si } (d_p - d_o) > (d_o - d_p)$$

d_o : dirección del viento observada d_p : dirección del viento simulada N : número de valores analizados

También se calculó el sesgo fraccional (FB), cuya fórmula es la siguiente:

$$\text{FB} = \frac{\bar{X}_o - \bar{X}_p}{0.5x(\bar{X}_o + \bar{X}_p)}$$

\bar{X}_o : valor promedio observado \bar{X}_p : valor promedio simulado

Este cálculo es válido para comparar de forma global la media de la predicción y la media del valor real. Los valores negativos indican una sobreestimación por parte del valor simulado, caso contrario indica subestimación. Cuando este valor se aproxima más a cero, los valores simulados se acercan más a lo observado.

c. Error medio cuadrático

Es la media cuadrática de las diferencias entre las simulaciones y las observaciones; los valores altos del error cuadrático (MSE) indican el alto nivel de discrepancia entre las simulaciones y las observaciones. La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) tiene

las mismas dimensiones de las simulaciones y observaciones, por lo tanto puede ser considerada como la magnitud típica de los errores de las simulaciones.

Pielke (2002) usa una técnica donde al comparar la desviación estándar de las observaciones (σ_{obs}) con los siguientes estadísticos de las simulaciones: la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el RMSE centrado (E_{UB}) y la desviación estándar de lo observado (σ_{obs}) y simulado (σ); se puede evaluar cuantitativamente la performance del modelo, si cumple que (1) $\sigma \approx \sigma_{obs}$, (2) $RMSE < \sigma_{obs}$ y (3) $E_{UB} < \sigma_{obs}$. Es decir si se cumple las tres condiciones anteriores, se puede decir que el modelo simula bien el evento Paracas.

$$RMSE = \left\{ \sum_{t=1}^N (X_p - X_o)^2 / N \right\}^{1/2}$$

$$E_{UB} = \left\{ \sum_{t=1}^N [(X_p - \bar{X}_p) - (X_o - \bar{X}_o)]^2 / N \right\}^{1/2}$$

$$\sigma_{obs} = \left\{ \sum_{t=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2 / N \right\}^{1/2}$$

$$\sigma = \left\{ \sum_{t=1}^N (X_p - \bar{X}_p)^2 / N \right\}^{1/2}$$

X_o : valor observado
 X_p : valor simulado
 N : número de valores analizados

Los estadísticos anteriores funcionan para el caso de variables escalares, sin embargo el caso del viento merece especial atención por ser un vector. Jorba et al. (2005) utilizó una variante del error cuadrático medio para la magnitud del viento (RMSVE), mientras que para describir las simulaciones de la dirección se utiliza el RMSED.

Para el caso de la velocidad del viento se utilizó una variación del RMSVE teniendo en cuenta las dos componentes del mismo. Así se define el error cuadrático medio del vector horizontal del viento como (Pielke, 1984):

$$\text{RMSVE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (u_p - u_o)^2 + (v_p - v_o)^2}$$

u_o : valor observado de la componente u del viento
 u_p : valor simulado de la componente u del viento
 v_o : valor observado de la componente v del viento
 v_p : valor simulado de la componente v del viento
 N : número de valores analizados

Otro caso particular es la dirección del viento, ya que al tratarse de una variable cíclica se deben calcular los estadísticos con precaución. Para analizar por separado la dirección del viento se determina la RMSED. Entonces se utiliza la diferencia entre la dirección del viento simulada y la observada mínima, ya que se pueden tener dos valores, uno positivo y otro negativo. Al trabajar con el valor mínimo, los resultados al promediar los estadísticos no incluirán una desviación por método de cálculo que no represente la diferencia real entre las medidas. Así el RMSE de la dirección del viento se calculará como:

$$\text{RMSED} = \sqrt{\sum_{t=1}^N \frac{D^2}{N}}, \quad D = |d_o - d_p|$$

d_o : dirección del viento observada
 d_p : dirección del viento simulada
 N : número de valores analizados

Cuando la mayoría de indicadores estadísticos (r , BIAS, RMSE, RMSED, RMSVE y E_{UB}) sean favorables, es decir, que demuestren que lo simulado se acerca al valor observado (por encima de 50% del valor observado) y además se cumplan en más de la mitad de los casos evaluados, podremos concluir que la simulación brinda datos representativos y que el modelo es capaz de simular las condiciones atmosféricas para el fenómeno del Viento Paracas.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. IDENTIFICACIÓN DE LA CONFIGURACIÓN ADECUADA DEL MODELO

Después de haber realizado una serie de corridas probando distintas configuraciones del modelo WRF, se identificó la configuración adecuada para la representación de las variables meteorológicas durante ocurrencia del Viento Paracas.

La configuración identificada fue la siguiente:

Tabla 3: Información de los dominios

Característica	Nomenclatura en WRF	Dominios		
		1er	2do	3er
Identificación de la grilla	grid_id	1	2	3
Identificación de la grilla madre	parent_id	1	1	2
Razón de la grilla madre	parent_grid_ratio	1	3	3
Núm. de puntos entre la grilla madre y la anidada (eje x)	i_parent_start	1	25	30
Núm. de puntos entre la grilla madre y la anidada (eje y)	j_parent_start	1	20	45
Número de puntos en el eje x	e_we	69	91	70
Número de puntos en el eje y	e_sn	78	100	76
Resolución espacial	dx,dy	27	9	3
Mapa de proyección	map_proj	Mercator		
Número de puntos de la grilla	--			
Latitud del centro de la grilla	ref_lat	-14.2	-14.2	-14
Longitud del centro de la grilla	ref_lon	-76.3	-76.3	-76

Fuente: Elaboración propia

El modelo se trabajó con una grilla anidada de tres dominios, los cuales tuvieron resoluciones espaciales de 27 km, 9km y 3km para el primer, segundo y tercer dominio respectivamente.

A continuación se describe los dominios, parametrizaciones físicas y dinámicas que mejor representaron las variables meteorológicas: velocidad y dirección del viento.

Tabla 4: Configuración de modelo para las variables dirección y velocidad del viento

Característica	Esquema utilizado	Nomenclatura en WRF	Dominios		
			1er	2do	3er
> Dominios					
Resolución temporal	Δt (seg)	time_step	60		
Resolución espacial	$\Delta x, \Delta y$ (km)	dx,dy	27	9	3
Resolución vertical	Δz (ETA levels)	e_vert	1	3	3
Datos de entrada	Anidado	input_from_file	1	25	30
> Físicas					
Microfísica	WSM 3-class y Kessler scheme	mp_physics	3	1	1
Radiación Onda Larga	RRTM scheme	ra_lw_physics	1	1	1
Radiación Onda Corta	Goddard shortwave y Dudhia scheme	ra_sw_physics	2	1	1
Capa de superficie	MM5 similarity	sf_sfclay_physics	1	1	1
Superficie de suelo	Noah Land Surface Model	sf_surface_physics	2	2	2
Capa Limite planetaria	Yonsei University scheme	bl_pbl_physics	1	1	1
Parametrización de cúmulos	Kain-Fritsch scheme	cu_physics	1	1	0
> Dinámicas					
Integración	Runge-Kutta 3er orden	rk_ord	3		
Velocidad Vertical	Damping Inhabilitado	w_damping	0		
Turbulencia y mezclado	Difusión de 2do orden	diff_opt	1		
Coefficiente Eddy	Smagorinsky	km_opt	4		

Fuente: Elaboración propia

A continuación se describe los dominios, parametrizaciones físicas y dinámicas que mejor representaron las variables meteorológicas: temperatura del aire y humedad relativa.

Tabla 5: Configuración de modelo para las variables temperatura y humedad relativa

Característica	Esquema utilizado	Nomenclatura en WRF	Dominios		
			1er	2do	3er
> Dominios					
Resolución temporal	Δt (seg)	time_step	60		
Resolución espacial	$\Delta x, \Delta y$ (km)	dx,dy	27	9	3
Resolución vertical	Δz (ETA levels)	e_vert	1	3	3
Datos de entrada	Anidado	input_from_file	1	25	30
> Físicas					
Microfísica	WSM 5-class y Kessler scheme	mp_physics	4	2	2
Radiación Onda Larga	RRTM scheme	ra_lw_physics	1	1	1
Radiación Onda Corta	Goddard shortwave y Dudhia scheme	ra_sw_physics	2	1	1
Capa de superficie	MM5 similarity	sf_sfclay_physics	1	1	1
Superficie de suelo	Noah Land Surface Model	sf_surface_physics	2	2	2
Capa Limite planetaria	Yonsei University scheme	bl_pbl_physics	1	1	1

Parametrización de cúmulos	Grell G3 ensemble cumulus scheme	cu_physics	5	5	0
> Dinámicas					
Integración	Runge-Kutta 3er orden	rk_ord	3		
Velocidad Vertical	Damping Inhabilitado	w_damping	0		
Turbulencia y mezclado	Difusión de 2do orden	diff_opt	1		
Coefficiente Eddy	Smagorinsky	km_opt	4		

Fuente: Elaboración propia.

En las Tablas 4 y 5 se muestran las opciones que definen la mejor configuración local de WRF obtenida para la región de Ica. A continuación se presenta una breve descripción de los fundamentos físicos de los esquemas más relevantes.

- **Microfísica (mp_physics)**

WRF Single-Moment 3-class scheme, esquema sencillo y eficiente en los procesos de formación nubosa adecuados para tamaños de cuadrícula de mesoescala. WRF Single-Moment 5-class scheme, es un esquema más complejo al 3-class y de mayor eficiencia para eventos de mesoescala.

- **Radiación onda larga (ra_lw_physics)**

RRTM scheme, está basado en el utilizado modelo MM5, y posee un esquema de banda espectral que utiliza el método de correlación-k.

- **Radiación onda corta (ra_sw_physics)**

Dudhia scheme, descendente integración simple representa eficientemente las nubes, cielo despejado y la dispersión. Cuando se utiliza en simulaciones de alta resolución, la inclinación y los efectos de sombra pueden ser considerados.

- **Capa de superficie (sf_sfclay_physics)**

MM5 similarity, sobre la base de Monin-Obukhov con Carslon-Boland se presenta funciones de sub-capa y similitud estándar desde las tablas de consulta.

- **Física superficial (sf_surface_physics)**

El esquema *Noah* incluye 4 niveles superficiales, considera temperatura y humedad del suelo, evapotranspiración, drenaje, rugosidad del suelo y fracción total cubierta por nieve y hielo.

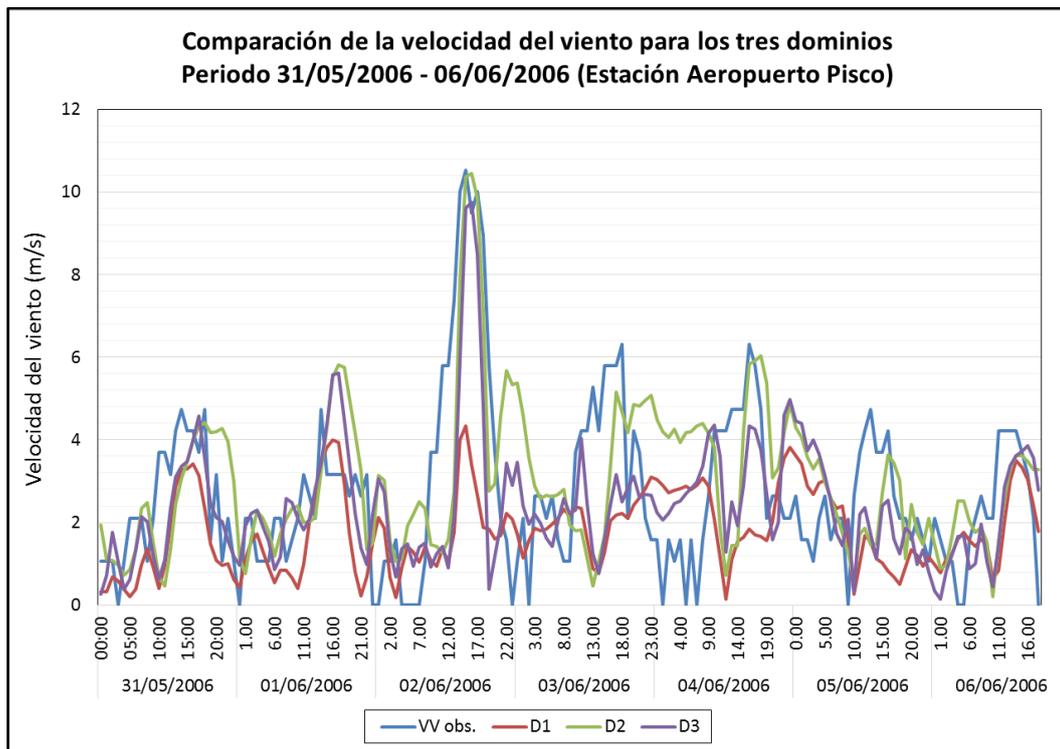
- **Capa límite planetaria (bl_pbl_physics)**

Yonsei University (YSU) sucede al esquema MRF y utiliza los calores latentes y sensibles superficiales para determinar los flujos y difusión verticales de manera independiente de los horizontales.

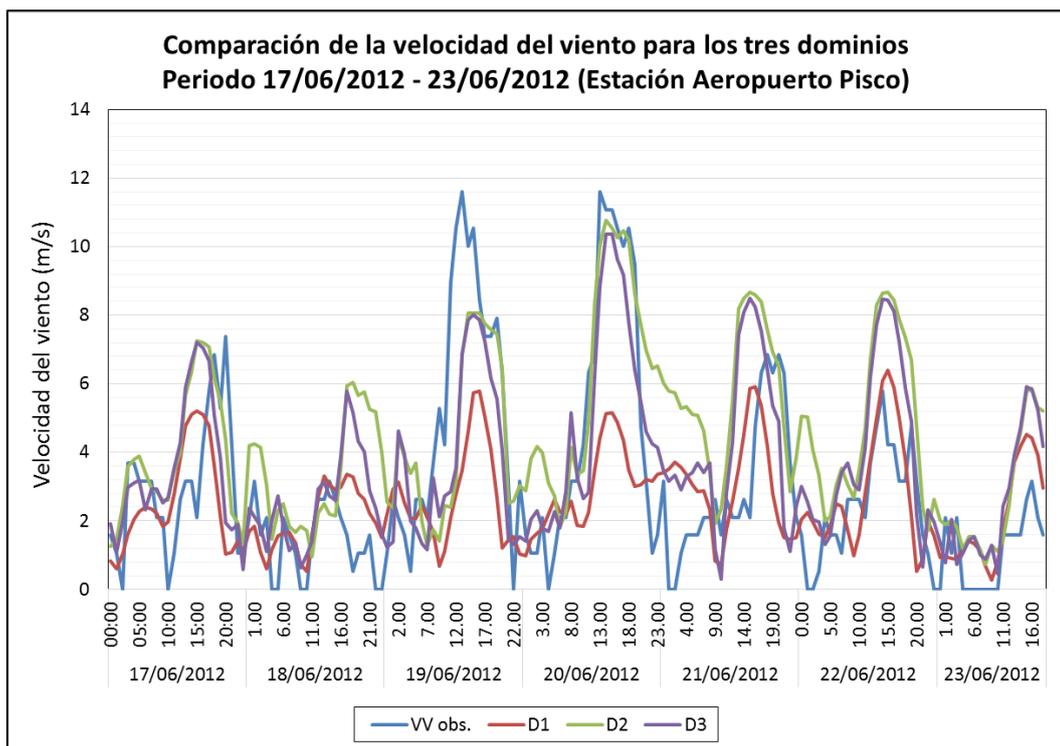
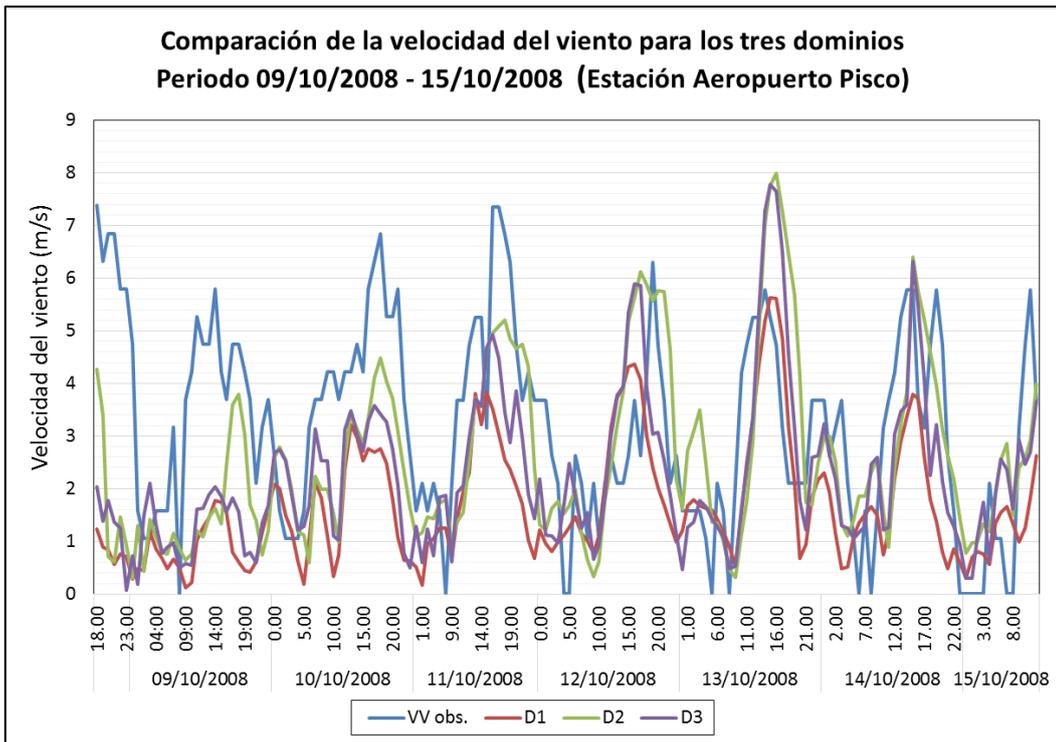
- **Parametrización de cúmulos (cu_physics)**

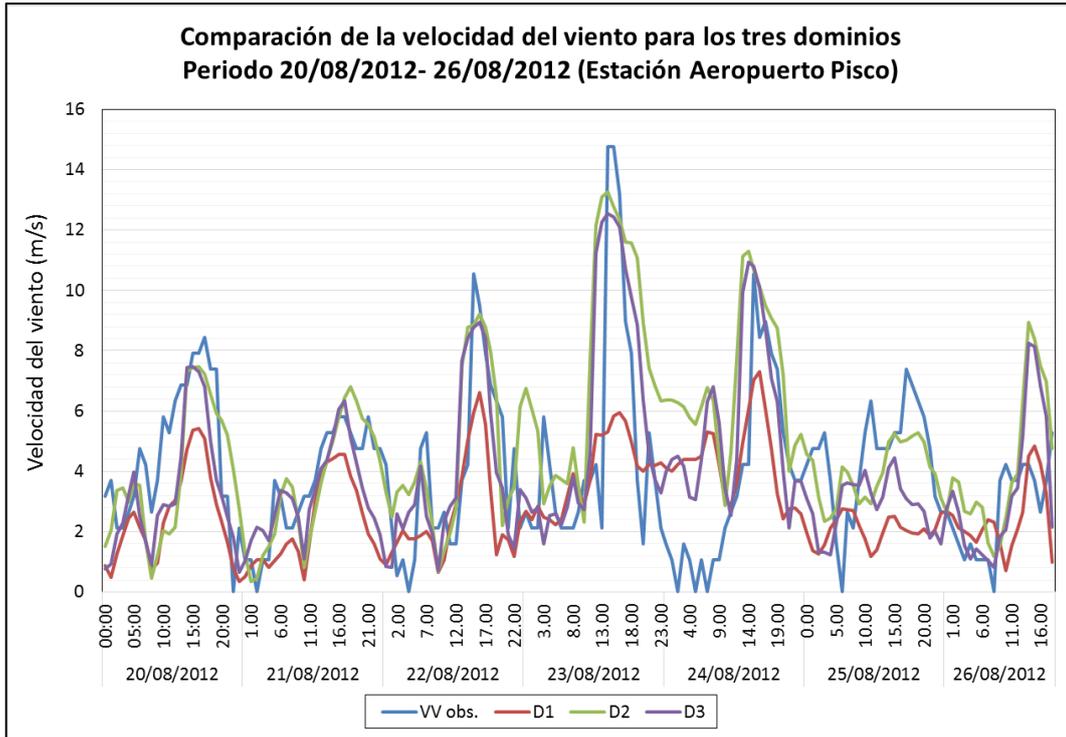
Kain-Fritsch scheme, esquema de sub-cuadrícula de convección profunda y superficial utilizando un enfoque de flujos de masa con las corrientes descendentes y disipación de CAPE a escala de tiempo.

Una vez identificada la configuración de dominios y parametrizaciones, presentadas en las tablas anteriores, se realizó la comparación de los tres dominios para cada uno de los periodos en estudio en las 5 estaciones meteorológicas, a continuación se presenta dicha comparación para la estación Aeropuerto Pisco.

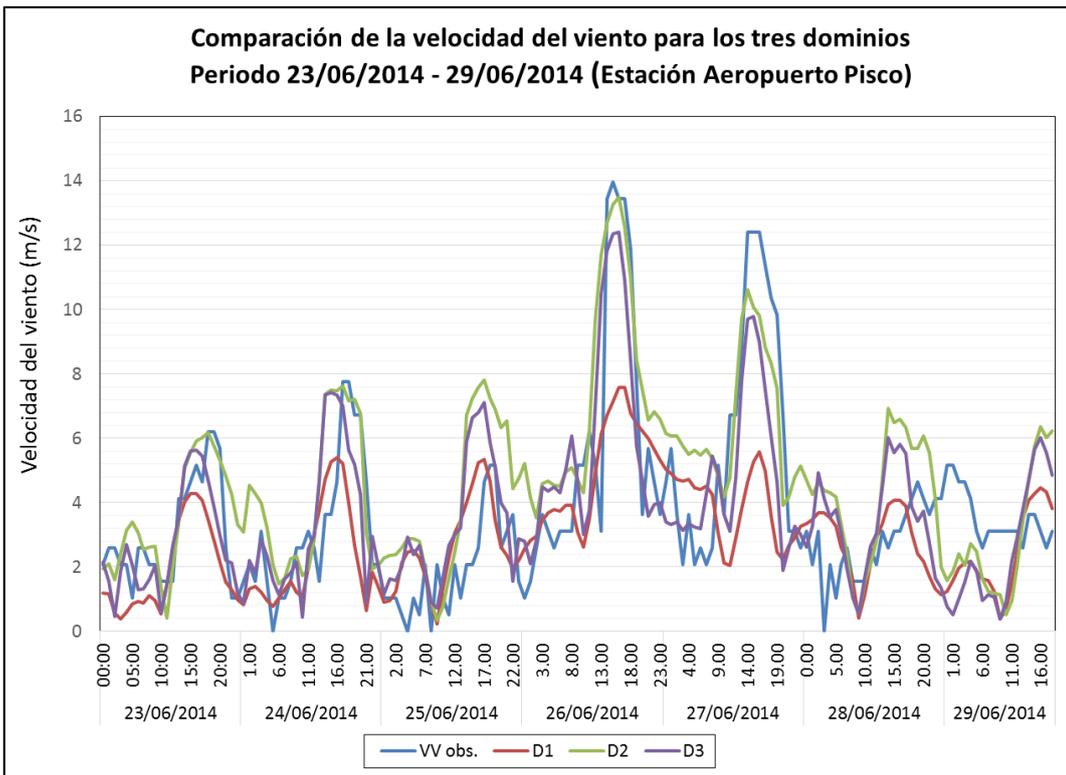


(a)



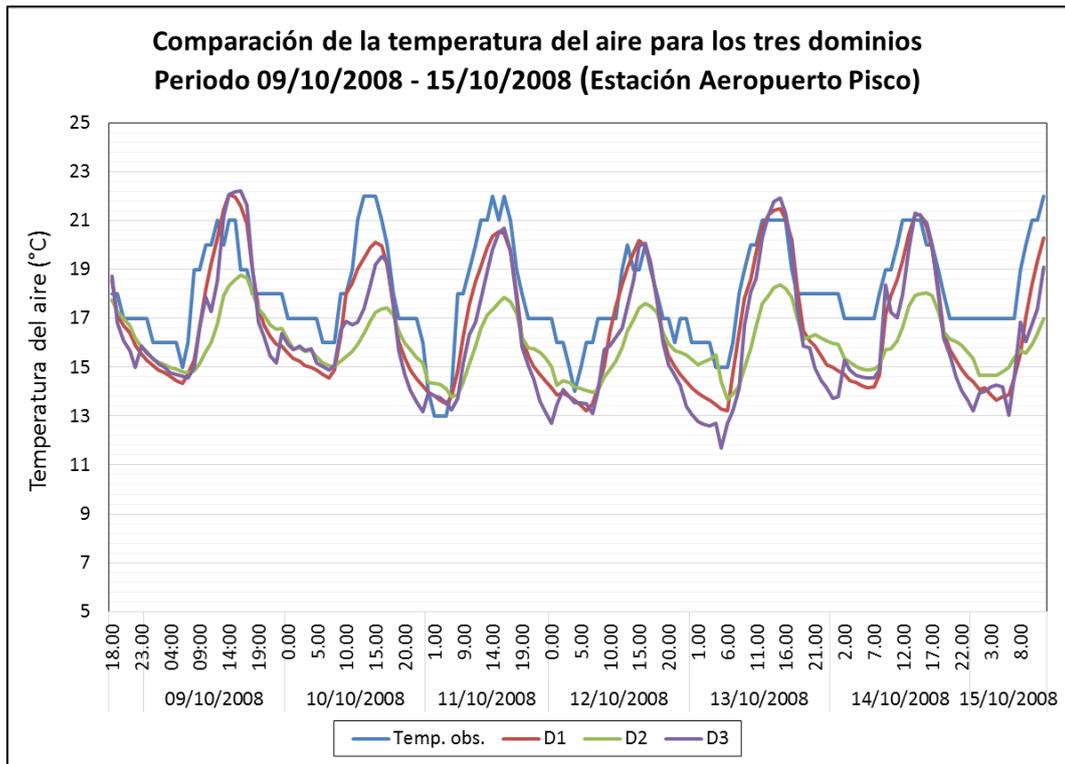
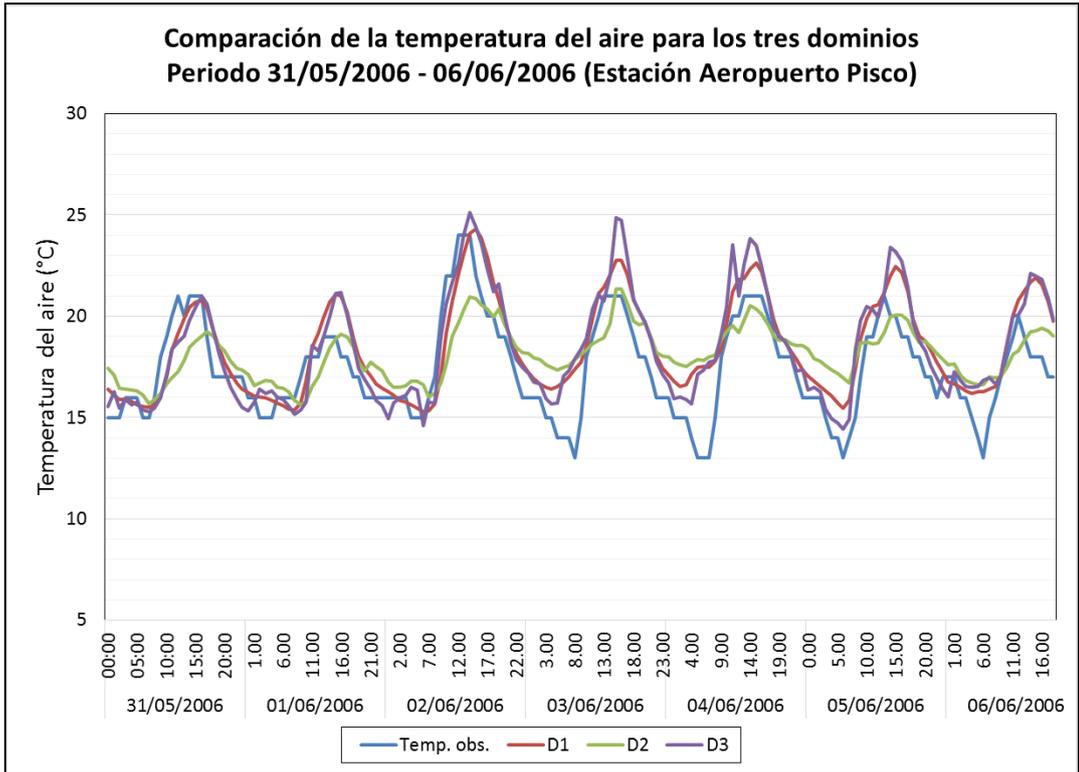


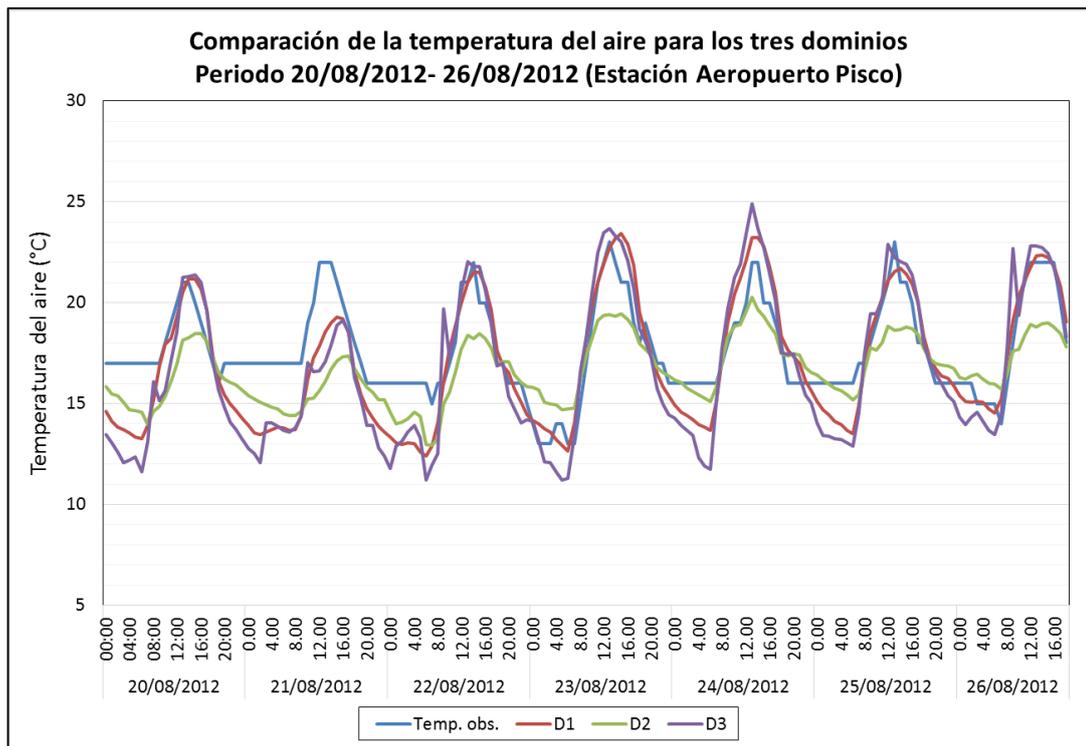
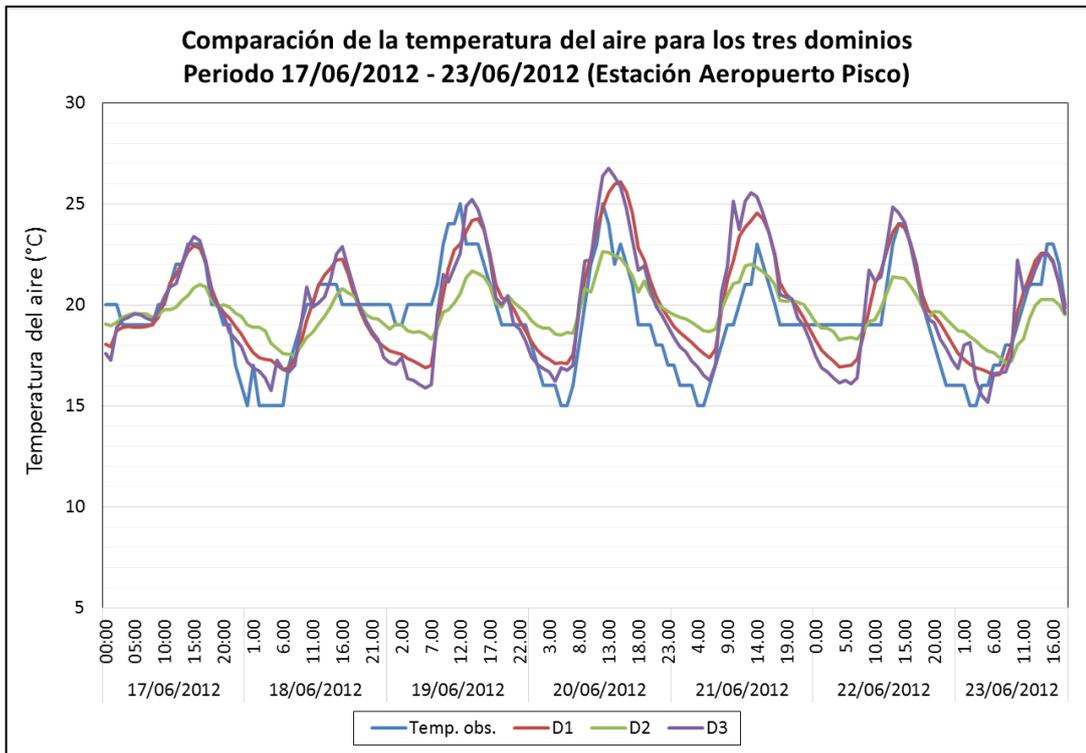
(d)

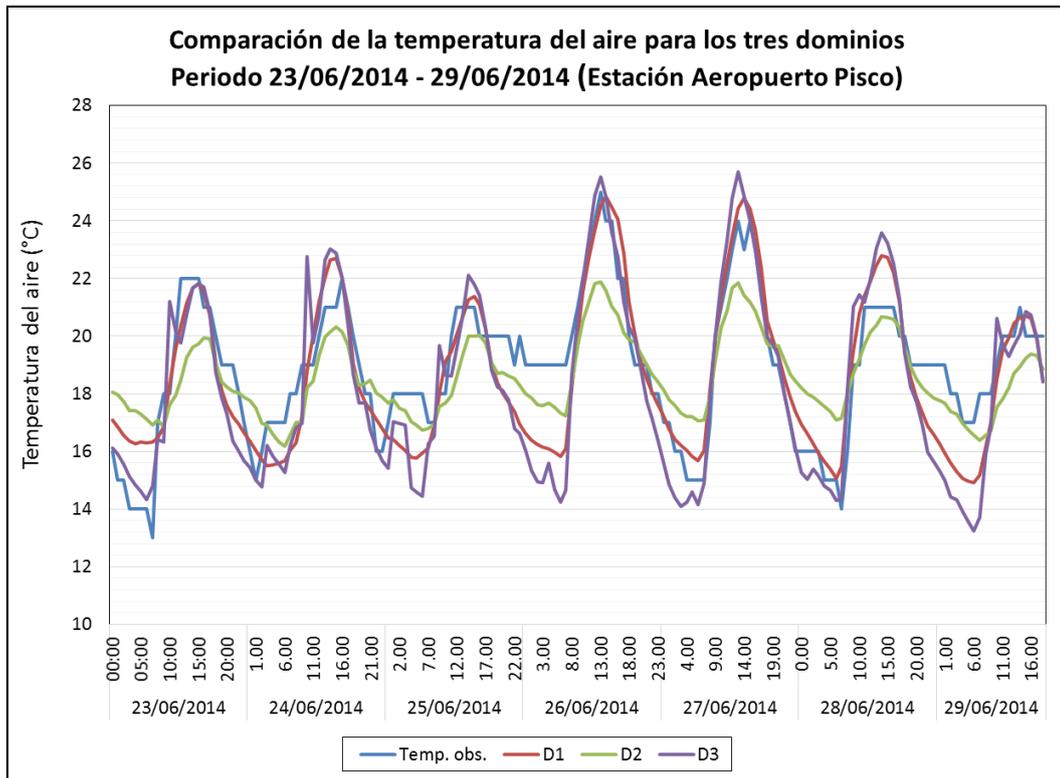


(e)

Figura 5: Comparación de la velocidad del viento para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

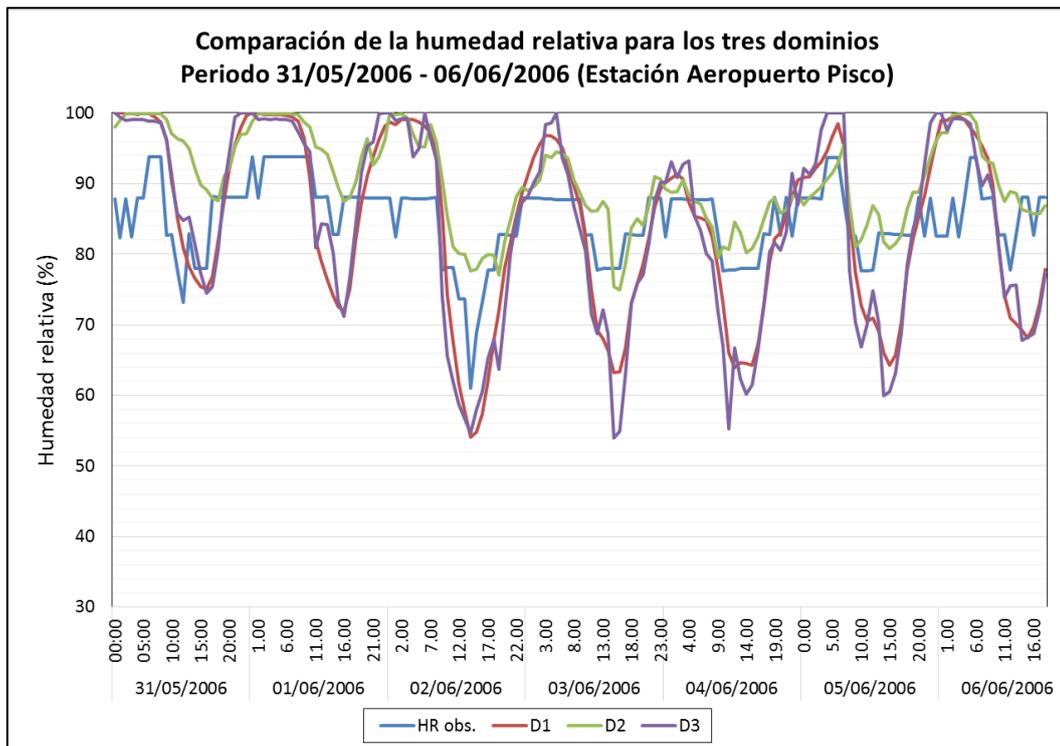




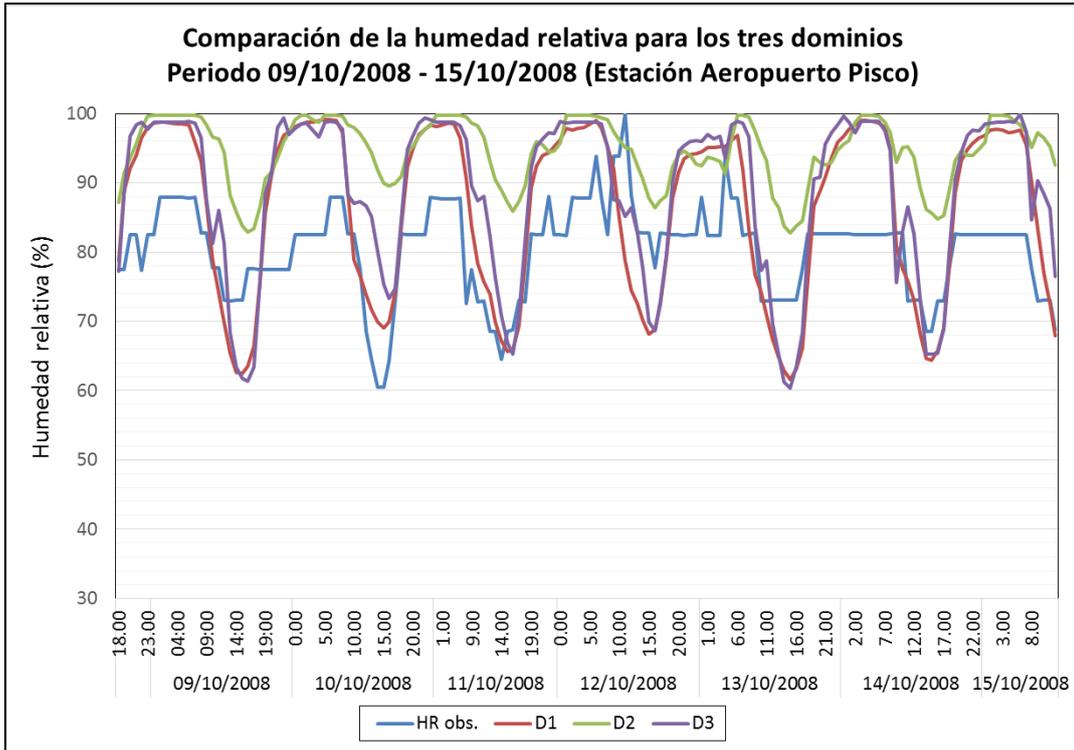


(e)

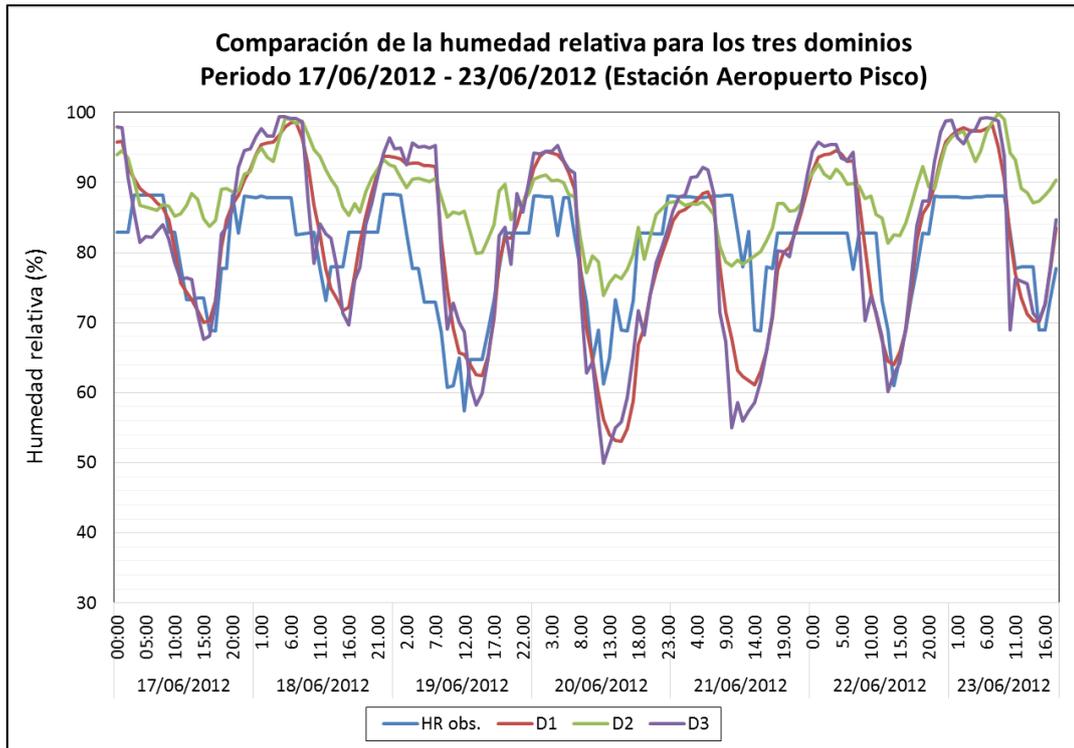
Figura 6: Comparación de la temperatura del aire para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.



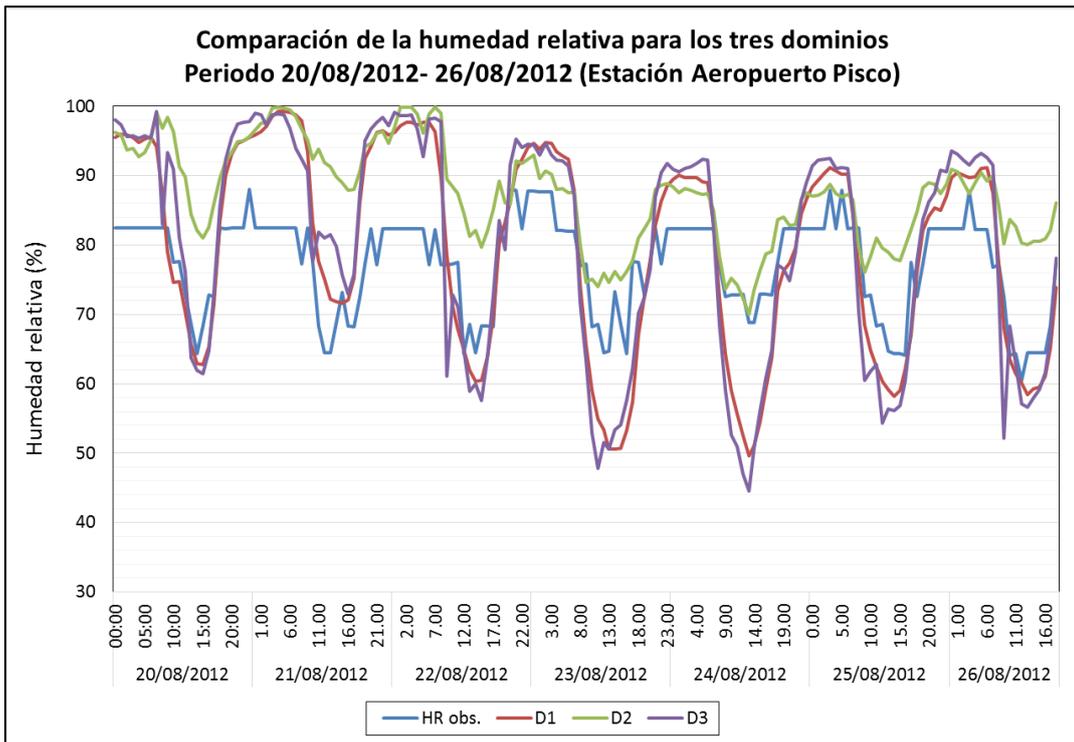
(a)



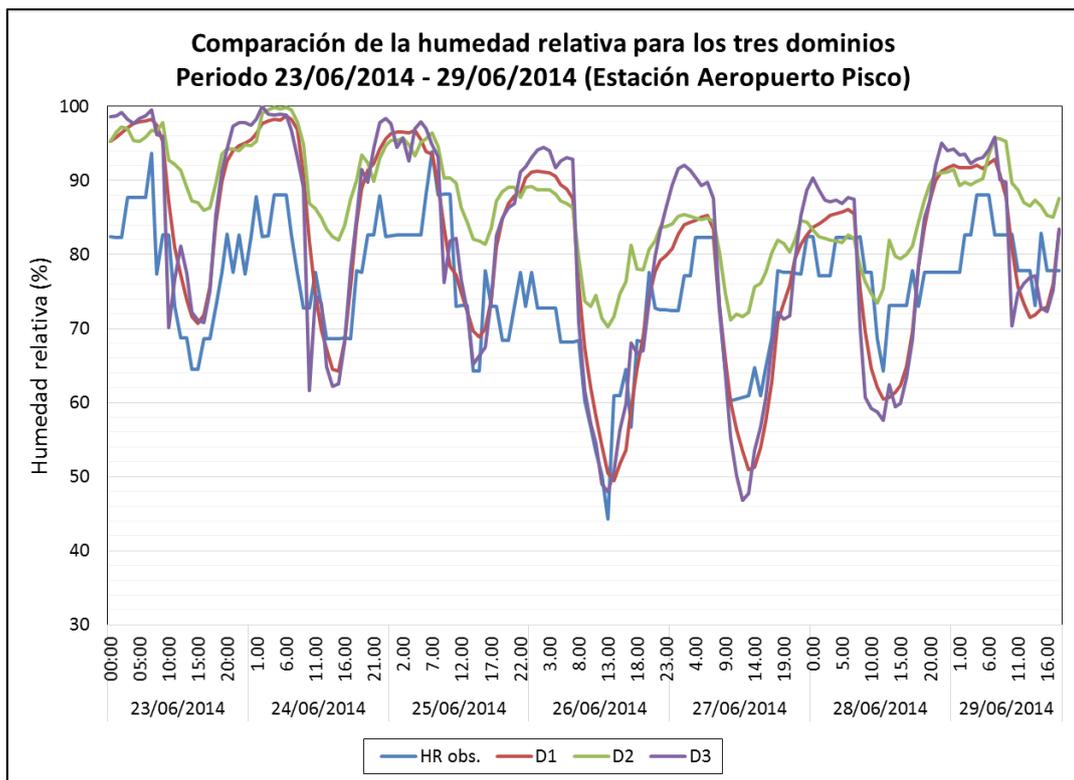
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7: Comparación de la humedad relativa para los tres dominios (D1:dominio 1, D2:dominio 2, D3:dominio 3) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

La misma comparación se realizó para el resto de estaciones meteorológicas en estudio; y a través de sus análisis respectivos se identificó que el dominio de mayor resolución (tercer dominio) es el que mejor se adecua a la variabilidad temporal de las variables meteorológicas durante la ocurrencia del Viento Paracas.

Cabe resaltar que sólo se presenta la comparación de las variables meteorológicas para la estación Aeropuerto Pisco, por estar ubicada en una zona donde ocurre el viento paracas con mayor intensidad.

4.1.1. Simulación con la configuración identificada

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la corrida del modelo WRF con la configuración física y dinámica adecuada para el modelamiento del Viento Paracas, y su respectiva comparación con los datos registrados en las estaciones meteorológicas tanto automáticas como las convencionales ubicadas dentro del área de estudio.

a. Velocidad del Viento a 10 m de la superficie

En la figura 8, se presentan las series temporales de las velocidades del viento observadas y simuladas en la estación meteorológica del Aeropuerto Pisco para los cinco periodos de estudio (31 mayo al 05 de junio del 2006, 09 al 15 de octubre del 2008, 17 al 23 de junio del 2012, 20 al 26 de agosto del 2012, 23 al 29 de junio del 2014); de esta figura se puede mencionar que las velocidades del viento simuladas por WRF se encontraron, en su mayoría, ligeramente por debajo de las velocidades del viento observadas en dicha estación acercándose a los picos máximos de velocidad por la ocurrencia del Viento Paracas; pero es importante mencionar que existe una similitud de la variabilidad temporal de los datos observados y simulados.

En la Figura 9, se presenta las series temporales de las velocidades del viento observadas y las velocidades del viento simuladas para la estación meteorológica Ocucaje; se destaca que las velocidades del viento fueron sobreestimadas por el modelo, a excepción del periodo de 31 mayo al 05 de junio del 2006 donde los datos simulados se encontraron por debajo de los datos observados. Los valores simulados detectaron los picos máximos de las velocidades del viento registrados en la estación para los cinco periodos en estudio.

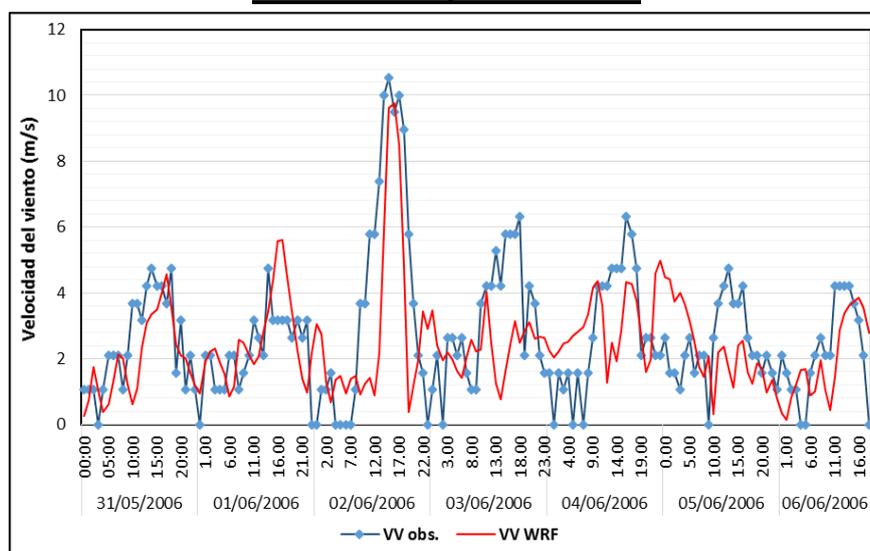
En la estación Beta Santiago, los valores simulados identificaron y superaron los picos máximos de la velocidad del viento (a excepción del periodo 20 - 26 de agosto del 2012), y a su vez sobreestimaron a los valores observados en dicha estación, esto último puede ser debido a la subestimación de la rugosidad del terreno, lo que estuvo ampliamente relacionado con la información geográfica de entrada del modelo.

Para la estación Tacama, Figura 11, las velocidades del viento simuladas por el modelo no superaron los 6 m/s, ni detectaron los picos de máximos de la velocidad del viento. Además no se observa una relación definida en la variabilidad temporal entre las velocidades del viento simuladas y observadas. En la estación Copara (Figura 12), las simulaciones se encontraron por debajo de los datos observados para los dos primeros periodos (a y b), mientras para el resto de periodos el modelo mostró picos que no fueron observados en la estación. Este problema para ambas estaciones, fue producto de la falta de datos horarios ya que solo se contó con tres registros diarios.

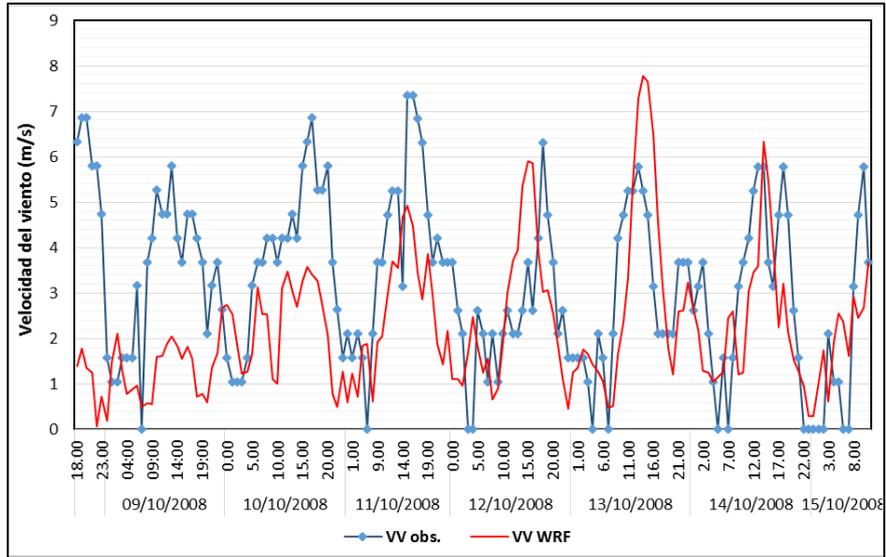
Si bien es cierto que el modelo WRF estima mejor el viento en estaciones donde el viento promedio es relativamente alto, eso puede ser claramente apreciado en la estación Aeropuerto Pisco, ya que al ser la estación más afectada por los fuertes vientos (Viento Paracas) el modelo estima mejor los picos elevados de las velocidades del viento.

En el Anexo 4 se presentan los de comparación temporal del viento zonal y meridional.

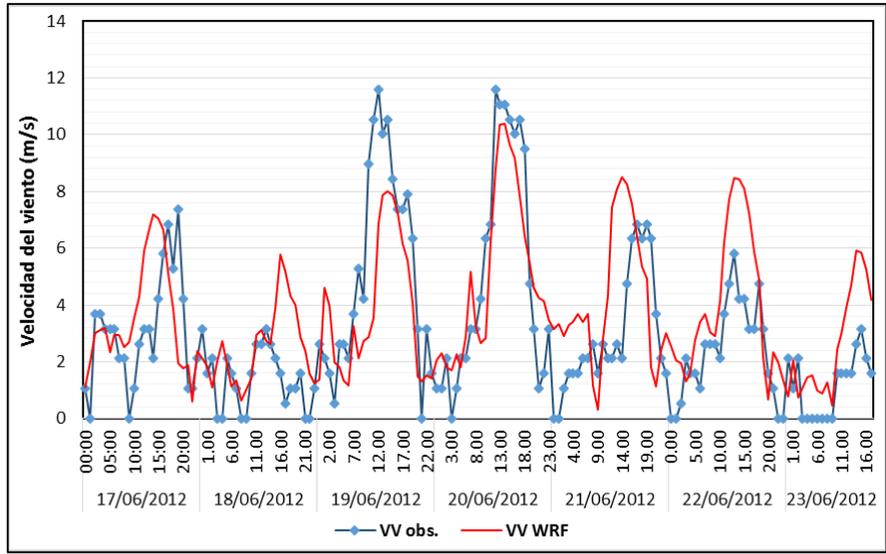
Comparación temporal de la velocidad del viento en la Estación Aeropuerto – Pisco



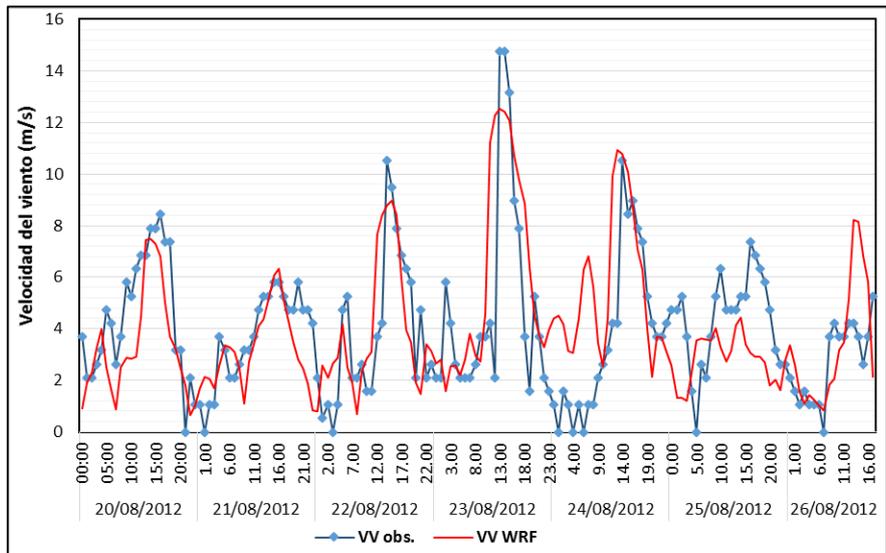
(a)



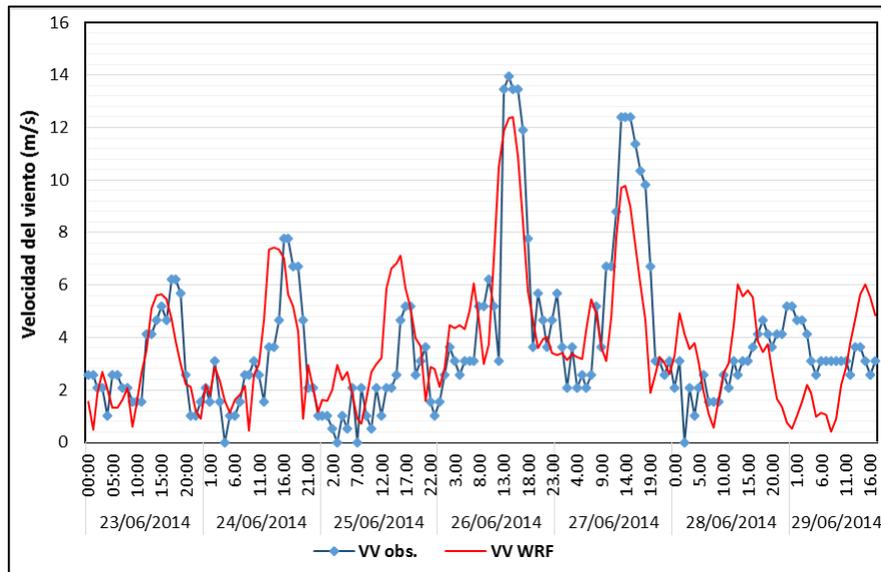
(b)



(c)



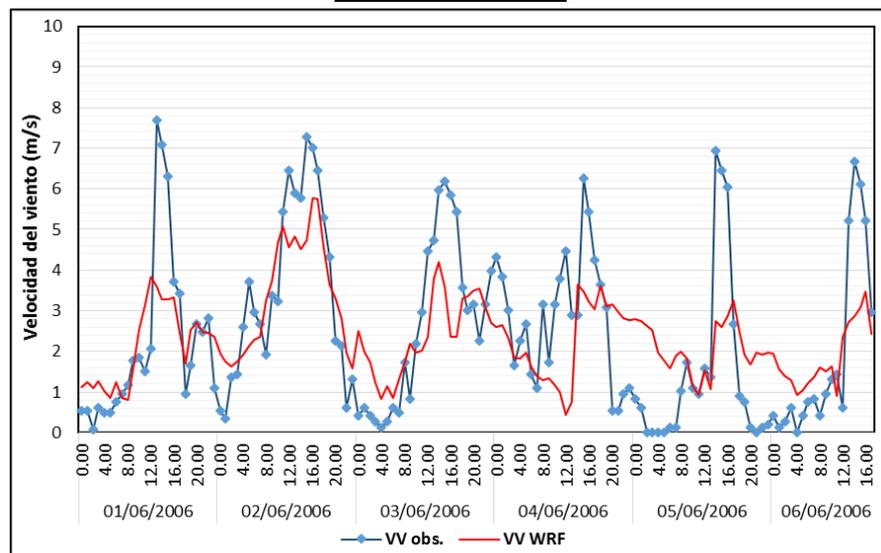
(d)



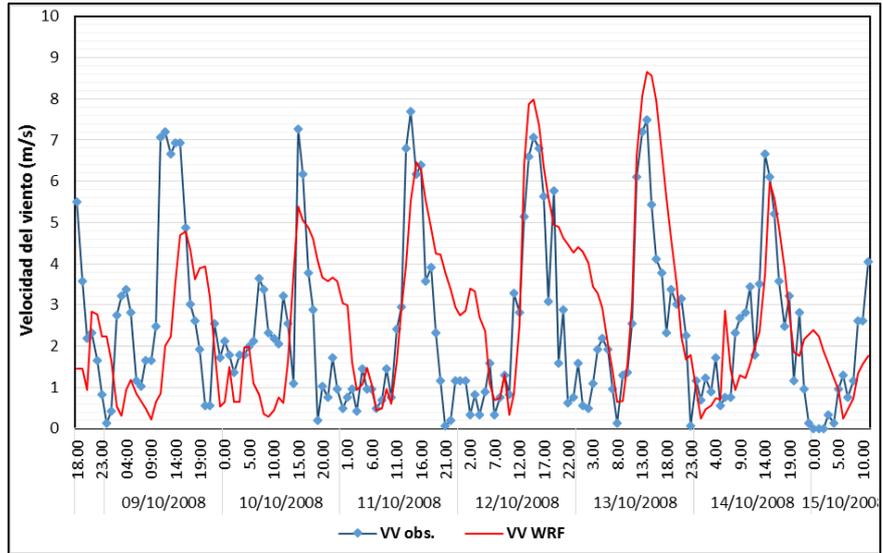
(e)

Figura 8: Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

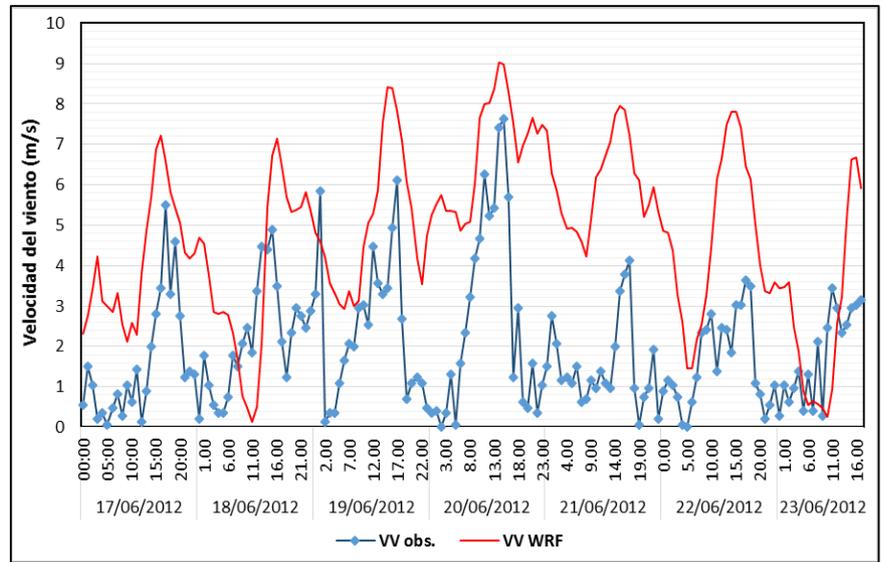
Comparación temporal de la velocidad del viento en la estación Ocucaje



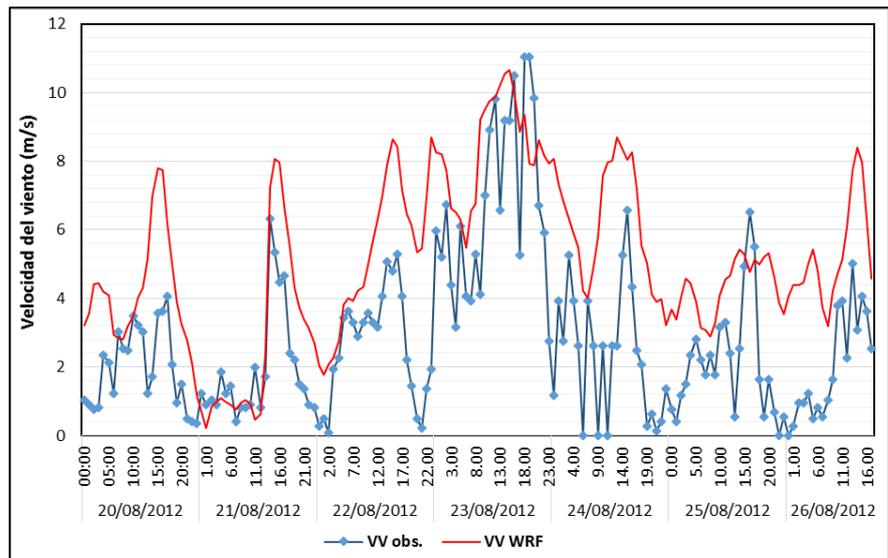
(a)



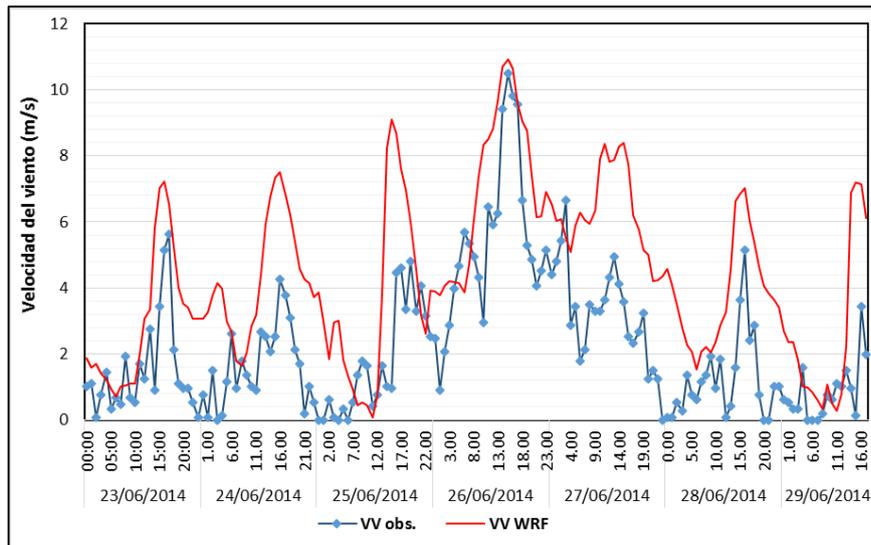
(b)



(c)



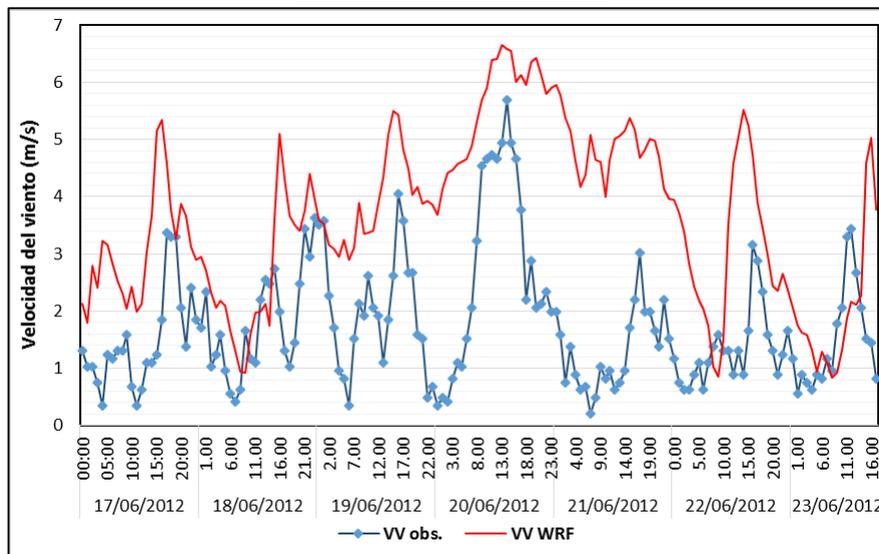
(d)



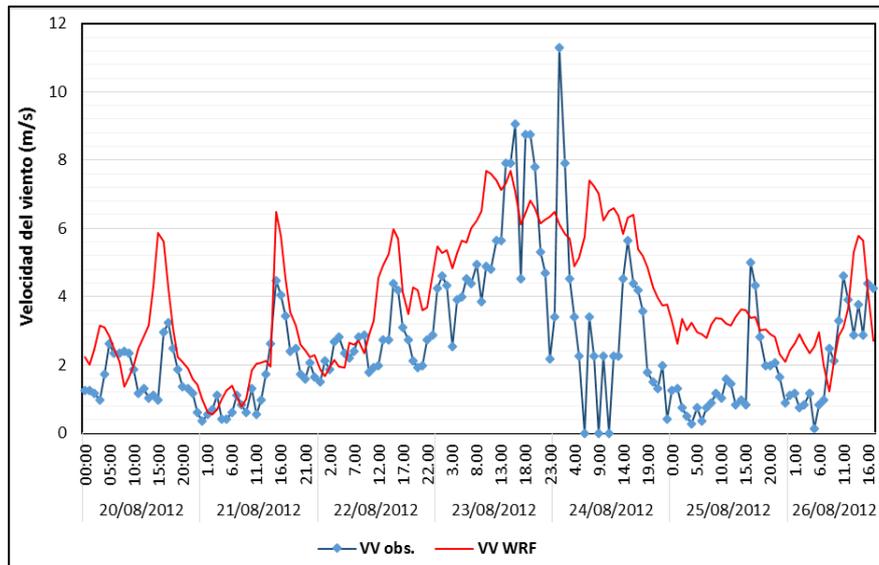
(e)

Figura 9: Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

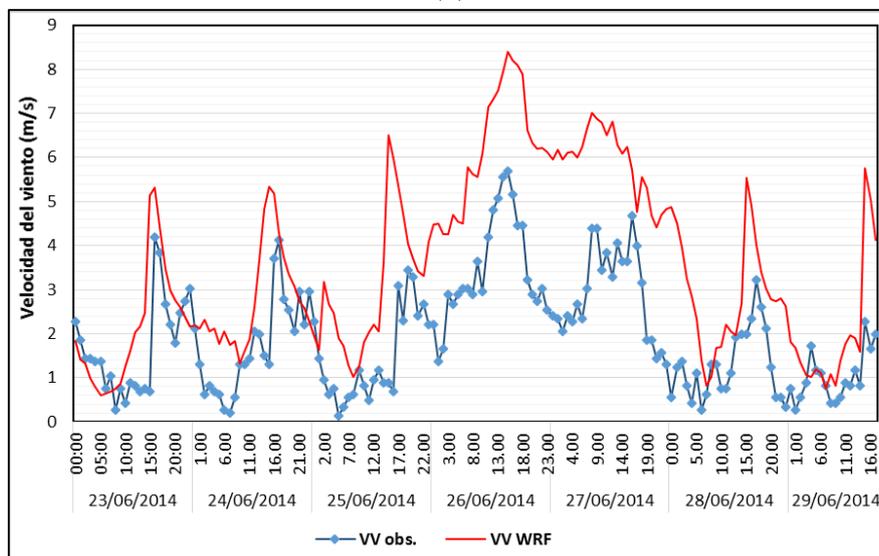
Comparación temporal de la velocidad del viento en la estación Beta Santiago



(a)



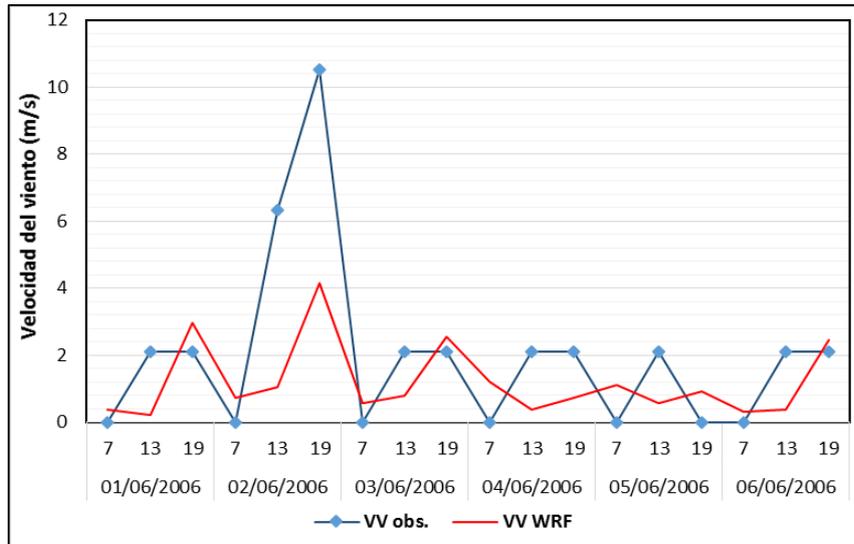
(b)



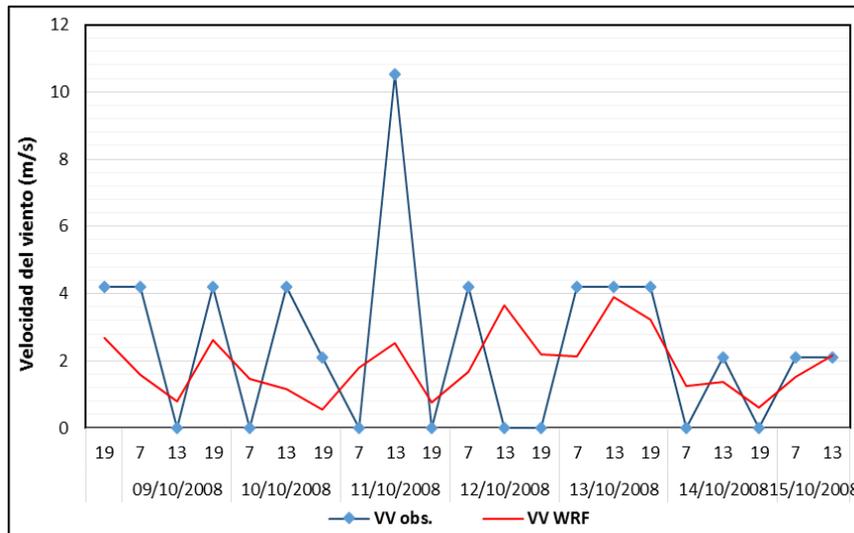
(c)

Figura 10: Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.

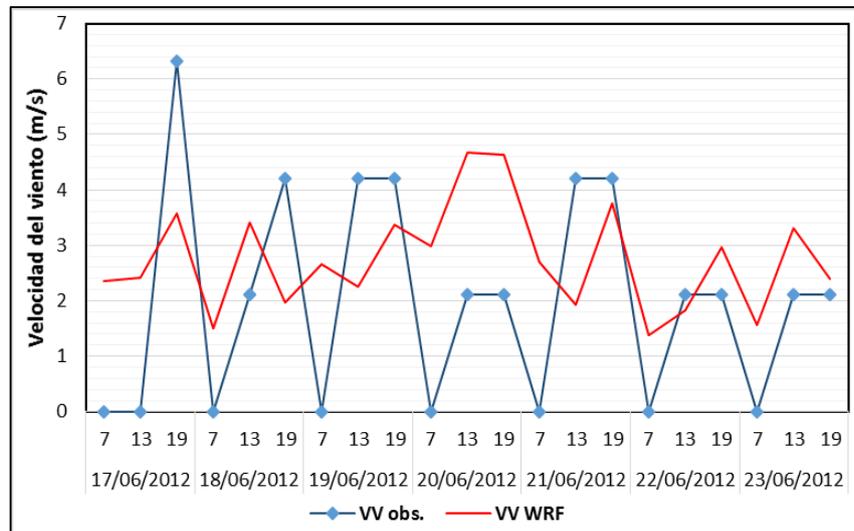
Comparación temporal de la velocidad del viento en la estación Tacama



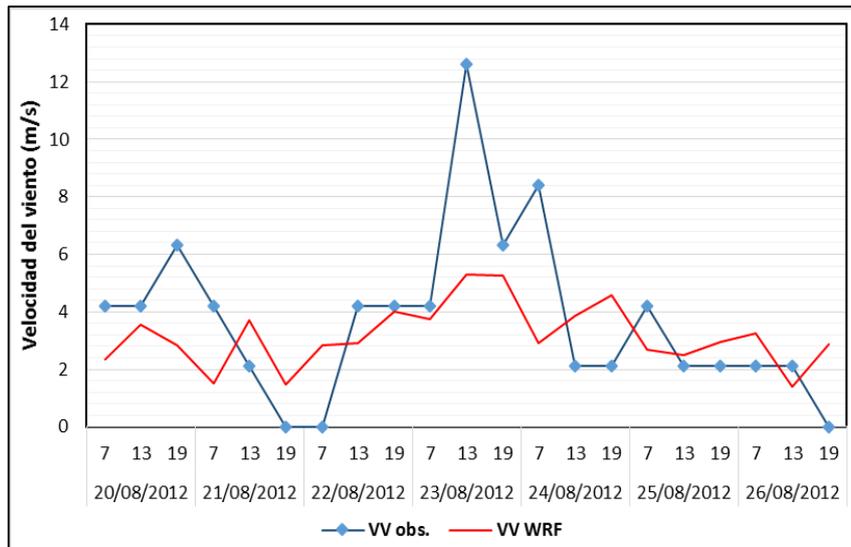
(a)



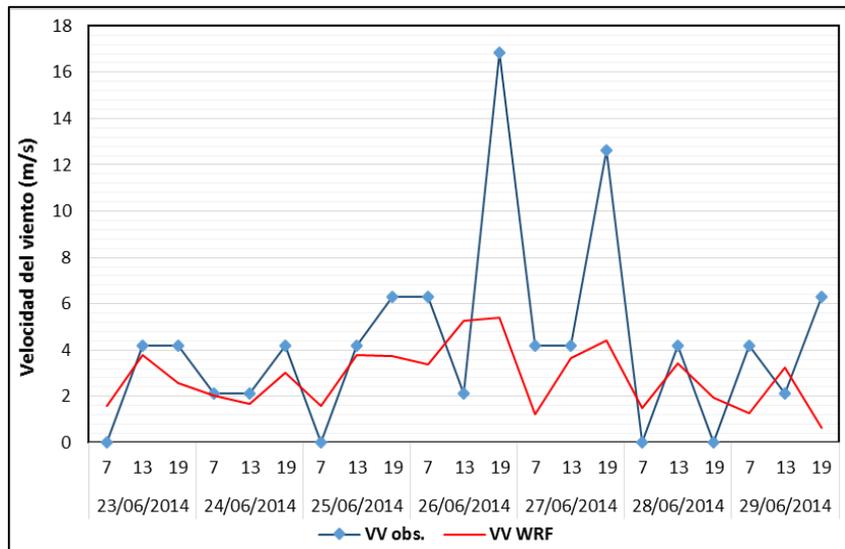
(b)



(c)



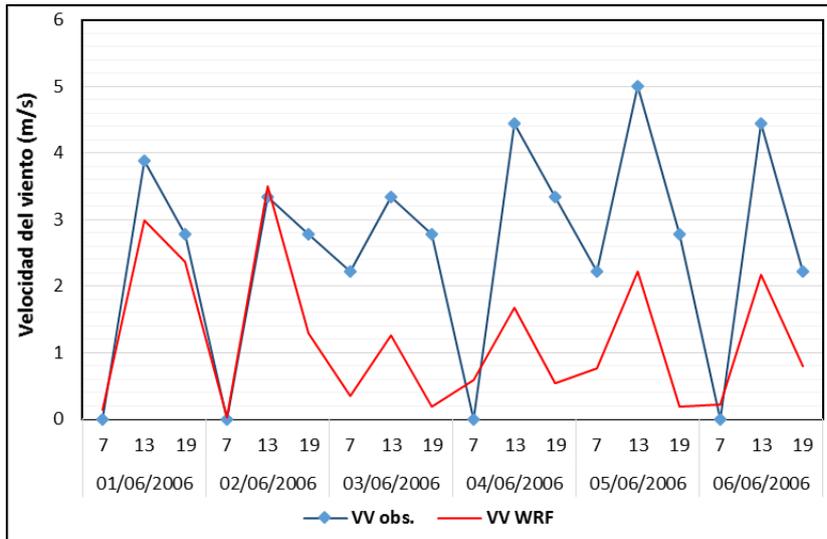
(d)



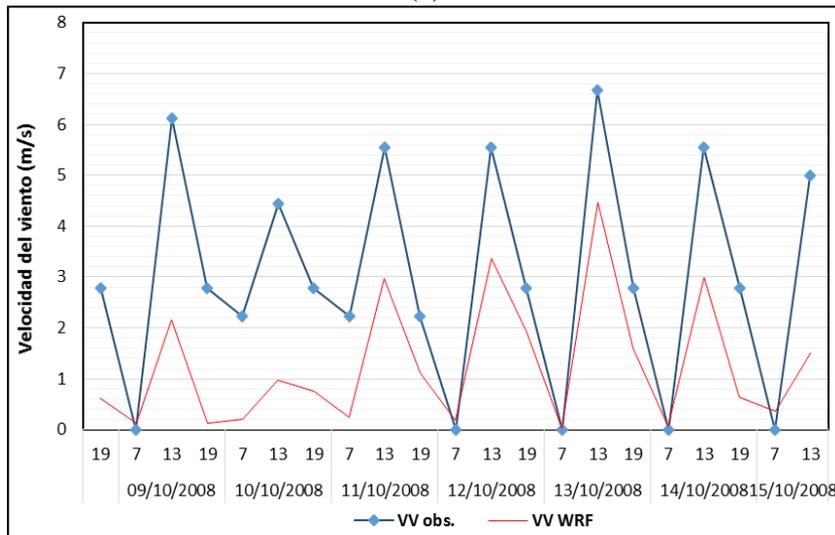
(e)

Figura 11: Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

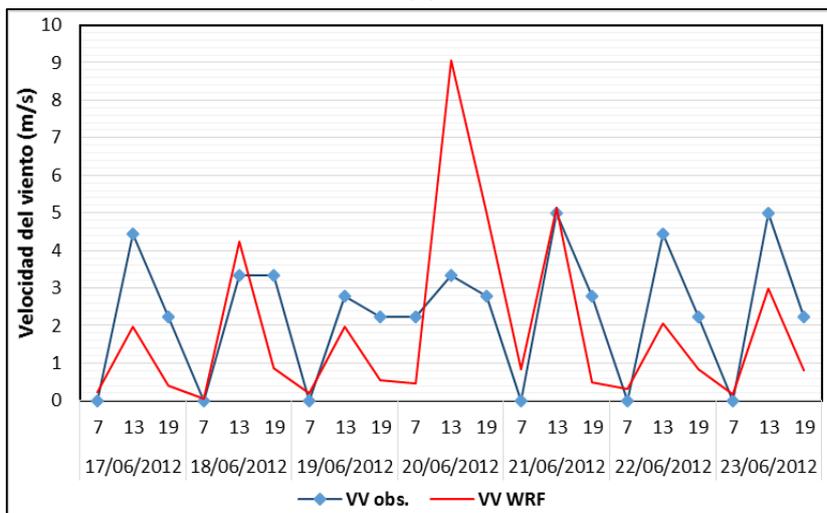
Comparación temporal de la velocidad del viento en la estación Copara



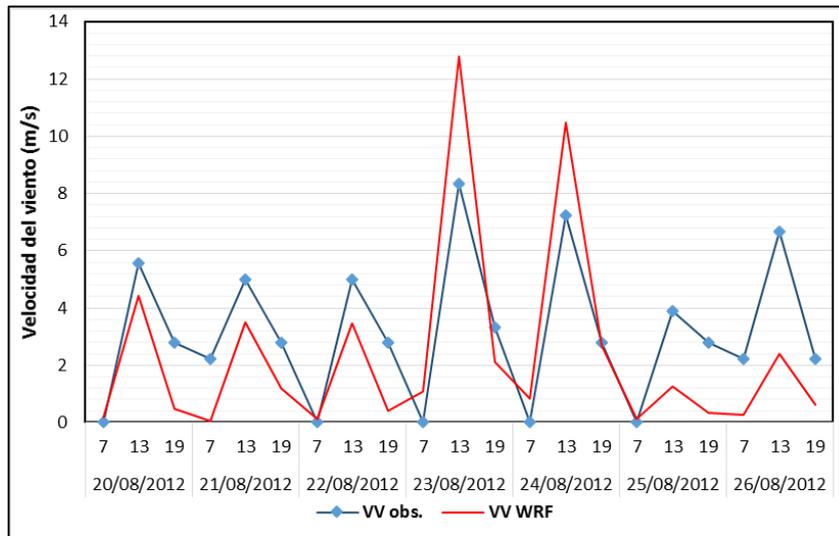
(a)



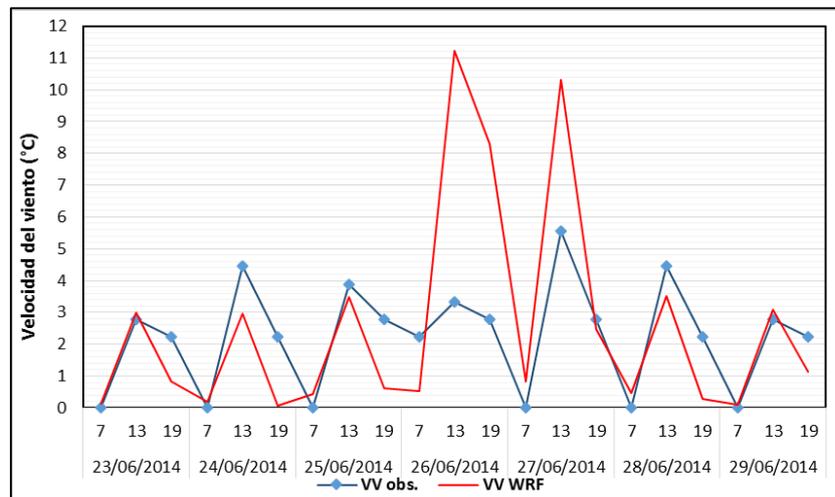
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 12: Comparación temporal de la velocidad del viento a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

b. Temperatura del aire a 2 m de la superficie

En las figuras 13 a la 17 se presentan las series temporales de la temperatura del aire a 2m de la superficie medidas por las cinco estaciones meteorológicas y simuladas por el WRF para los cinco periodos de estudio.

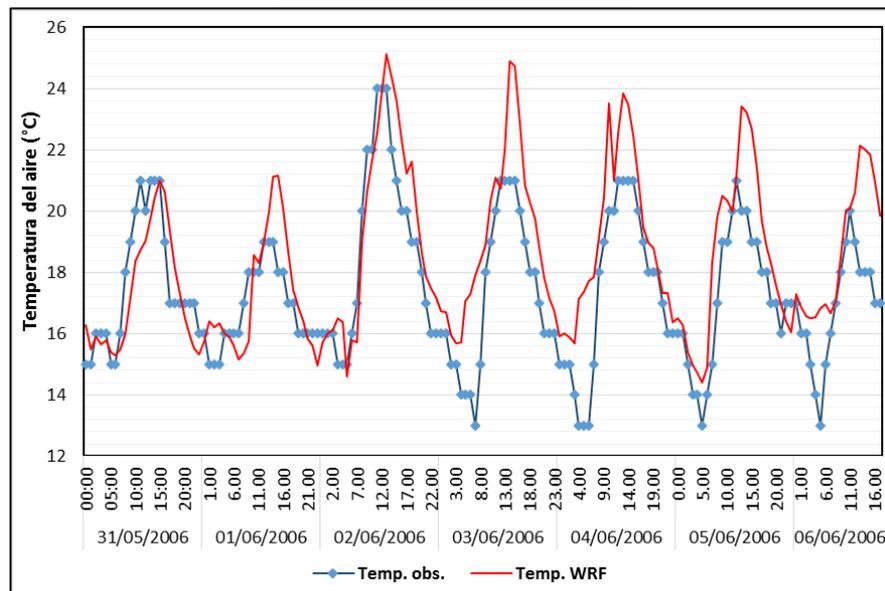
En la Figura 13, estación Aeropuerto Pisco, puede verse como la simulación representó la variación de los máximos y mínimos diarios de la temperatura, con amplitudes térmicas

simuladas similares a las observadas. Además se puede observar que el modelo detectó caídas de temperatura que no fueron registradas en la estación Aeropuerto.

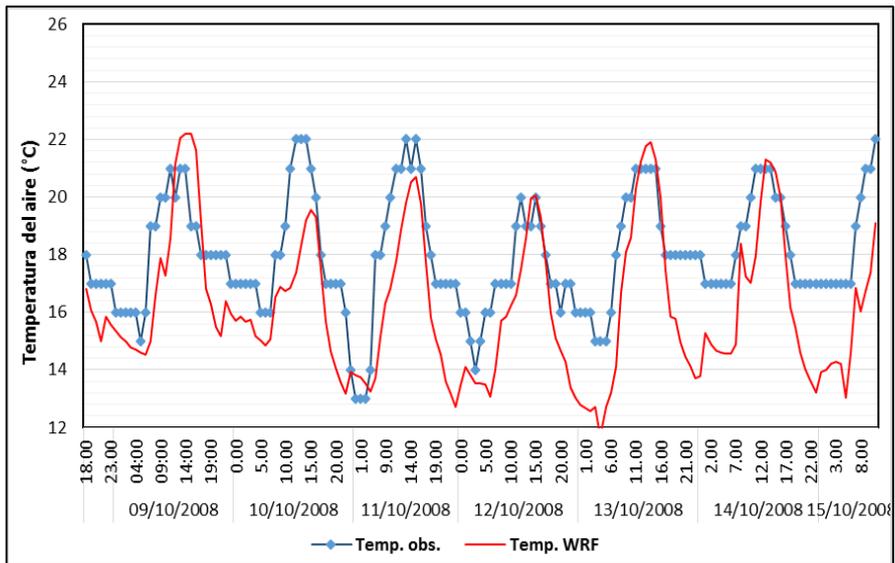
Para las estaciones Ocucaje y Beta Santiago, Figuras 14 y 15, la simulación del modelo representó las oscilaciones observadas en el ciclo diurno registrados en ambas estaciones meteorológicas, además ocurre que las amplitudes térmicas simuladas son menores a las observadas, es decir, que el comportamiento diario simulado no alcanza los picos máximos ni mínimos.

En las estaciones Tacama y Copara, el modelo representa coherentemente el ciclo diurno de la temperatura como se puede observar en las figuras 16 y 17 a pesar que solo se cuenta con tres mediciones diarias registradas en ambas estaciones convencionales. Es importante mencionar que el modelo sobreestimó ligeramente la temperatura en la estación Tacama, y subestimó los picos altos de temperatura y sobreestimó los picos mínimos en la estación Copara.

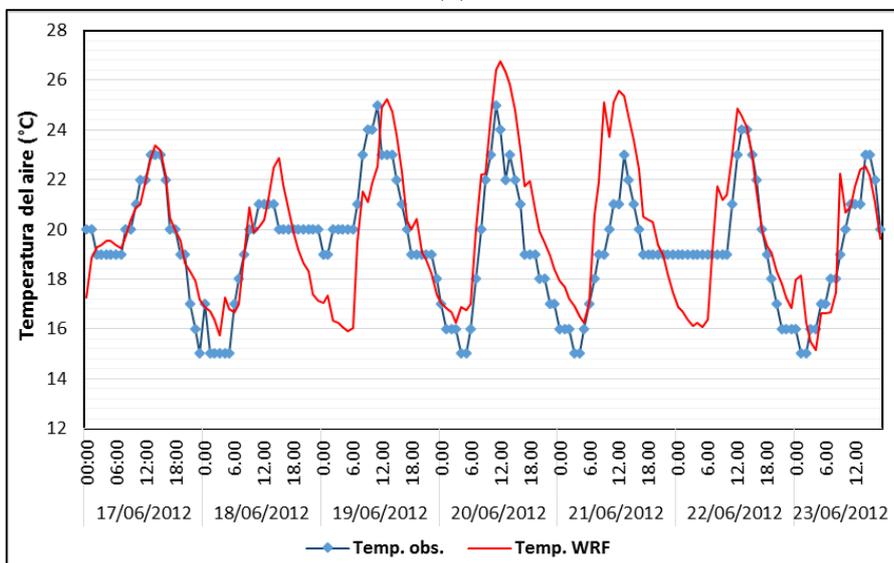
Comparación temporal de la temperatura del aire en la estación Aeropuerto Pisco



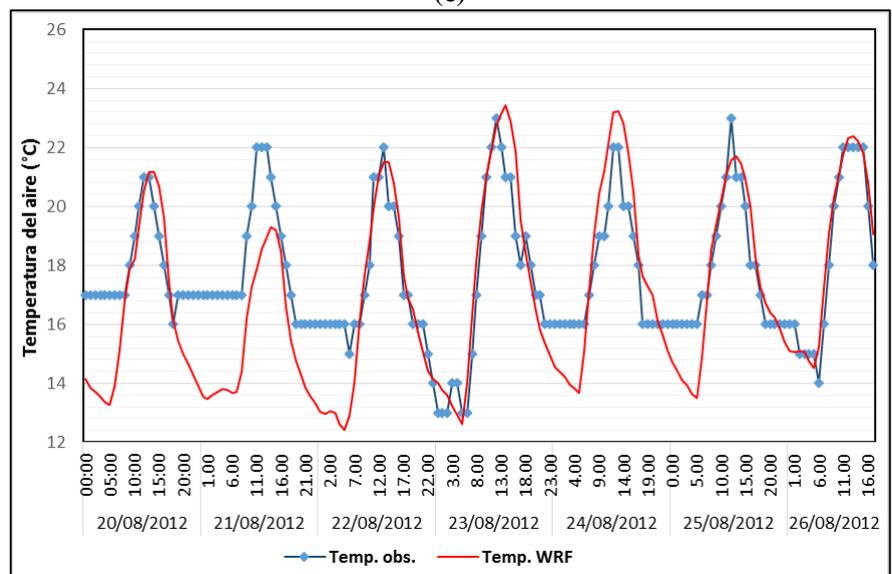
(a)



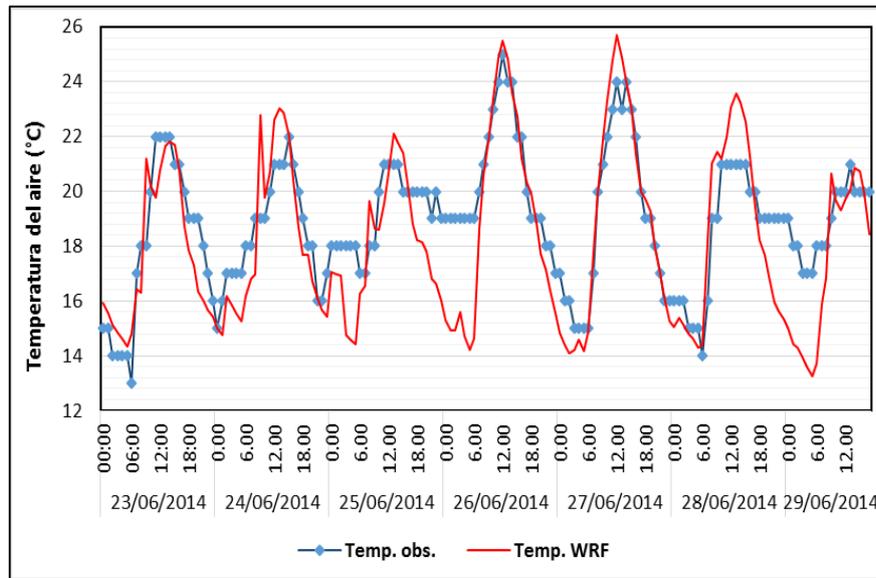
(b)



(c)



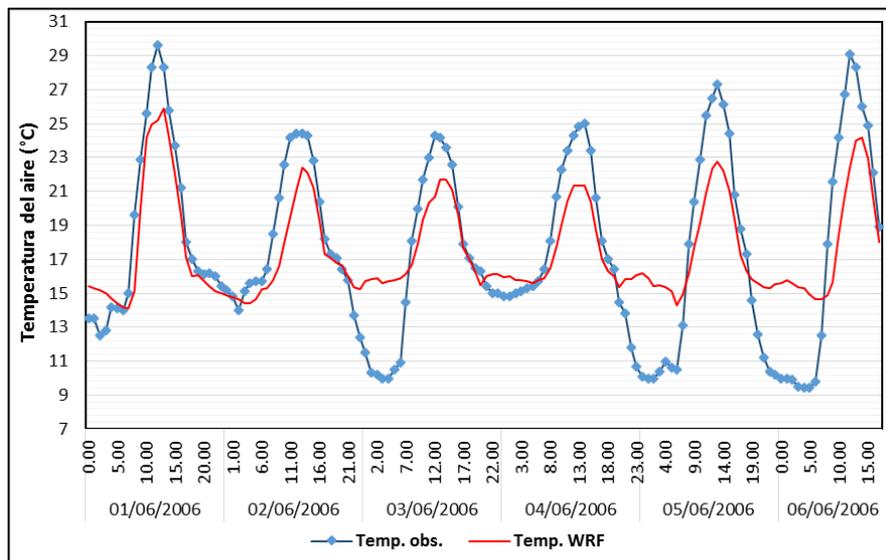
(d)



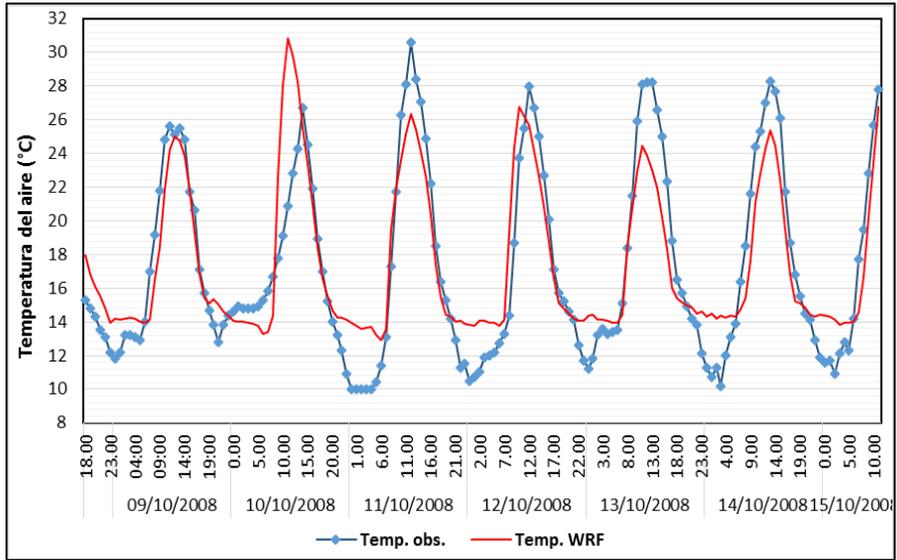
(e)

Figura 13: Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

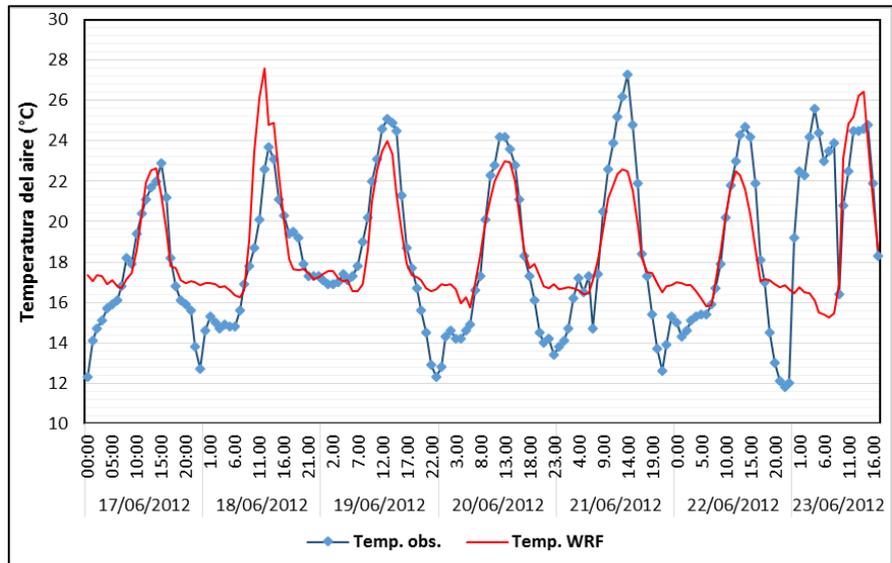
Comparación temporal de la temperatura del aire en la estación Ocucaje



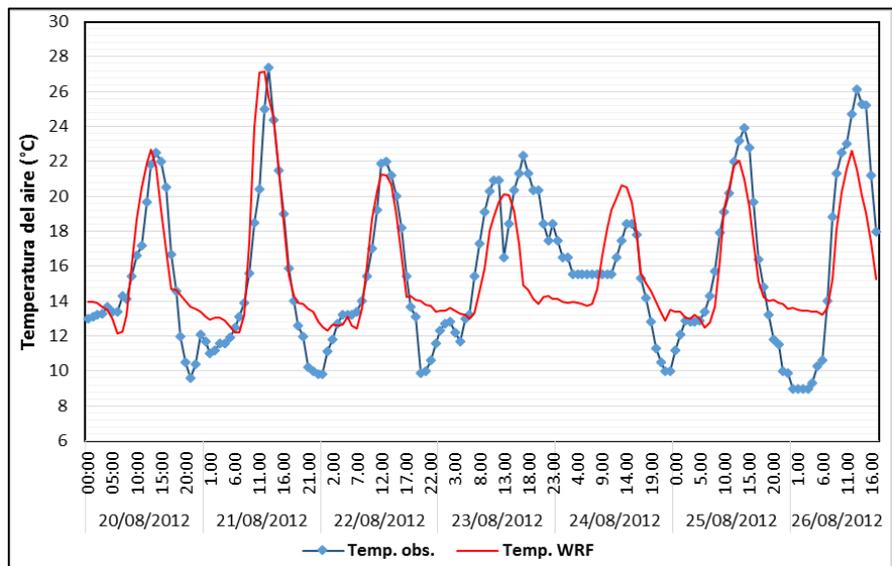
(a)



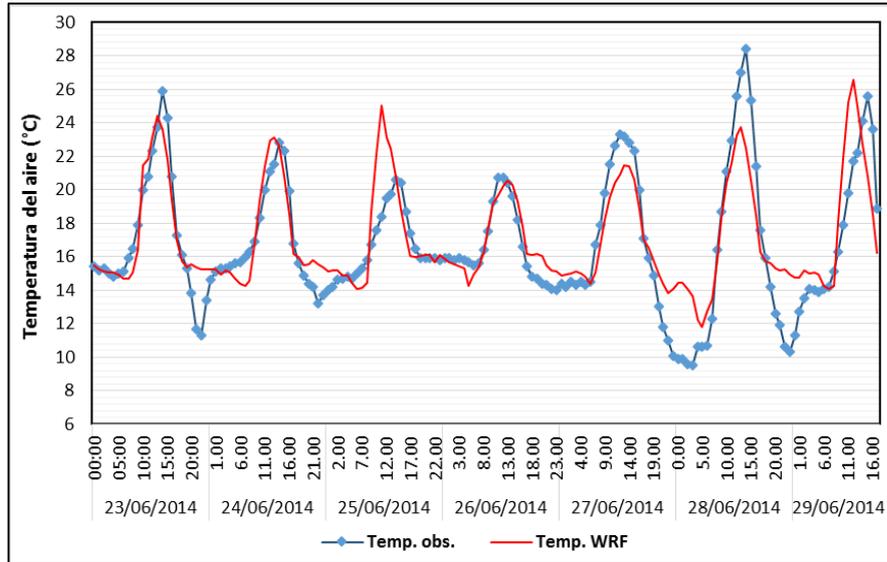
(b)



(c)



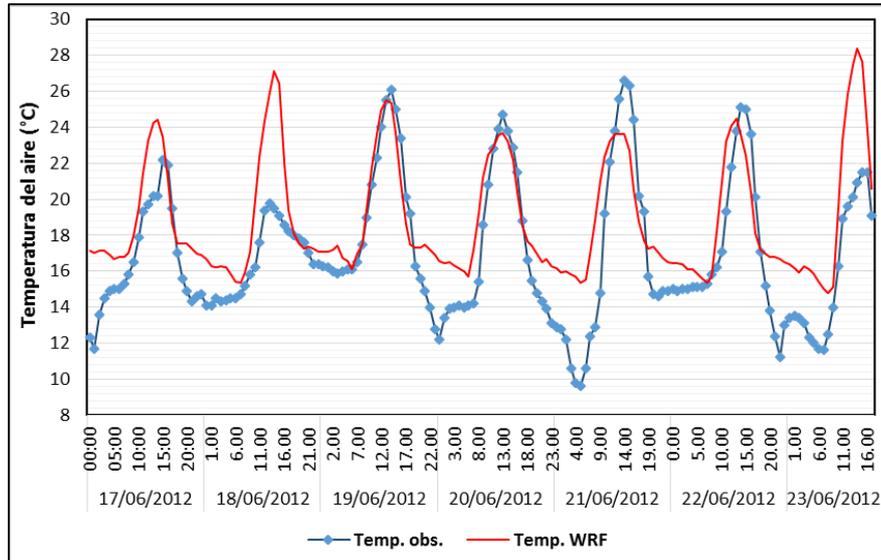
(d)



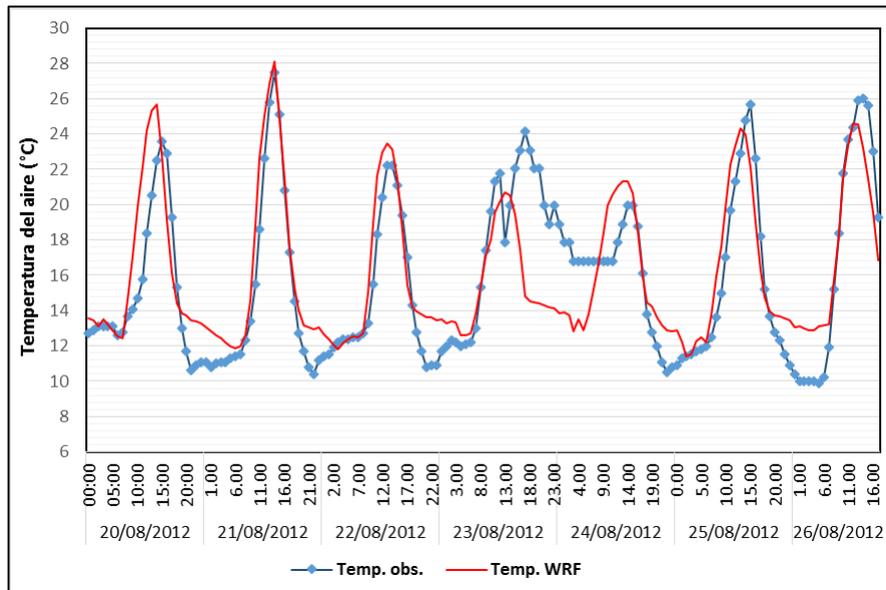
(e)

Figura 14: Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

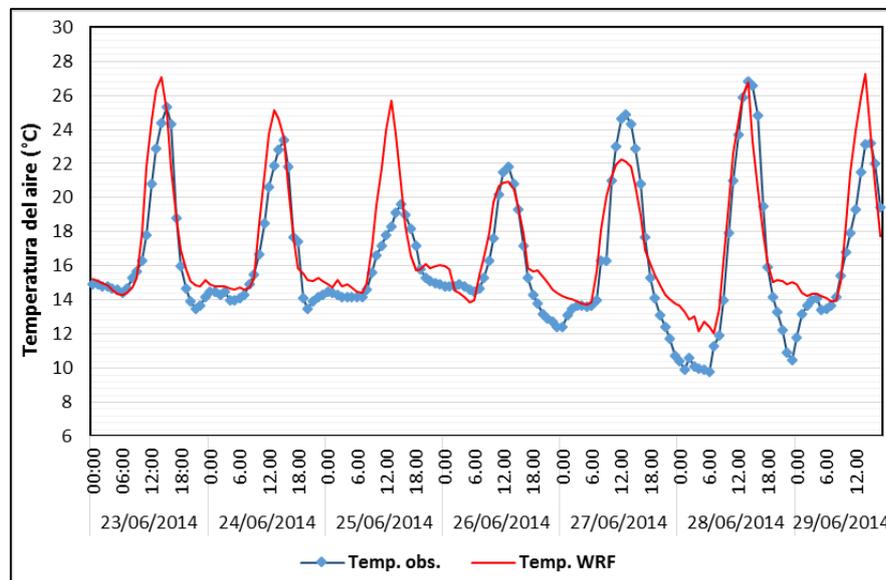
Comparación temporal de la temperatura del aire en la estación Beta Santiago



(a)



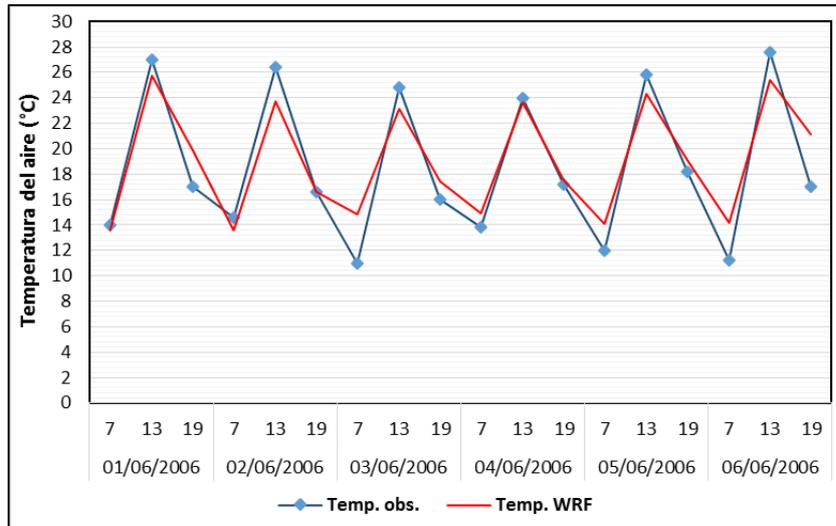
(b)



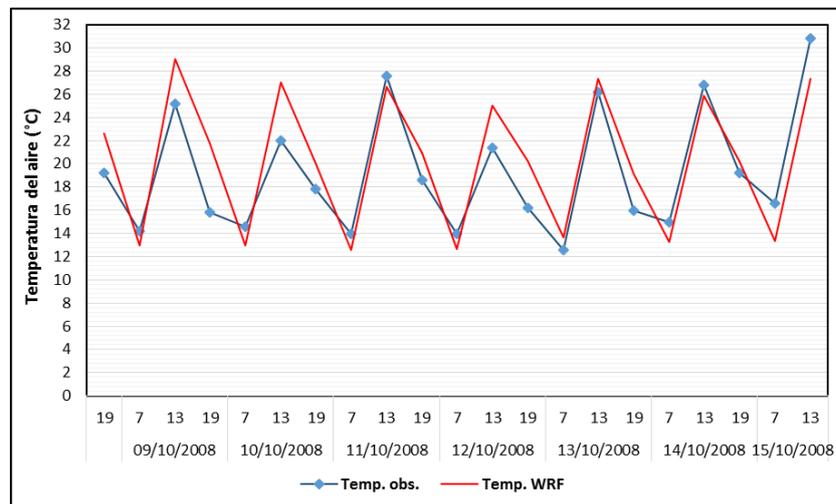
(c)

Figura 15: Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.

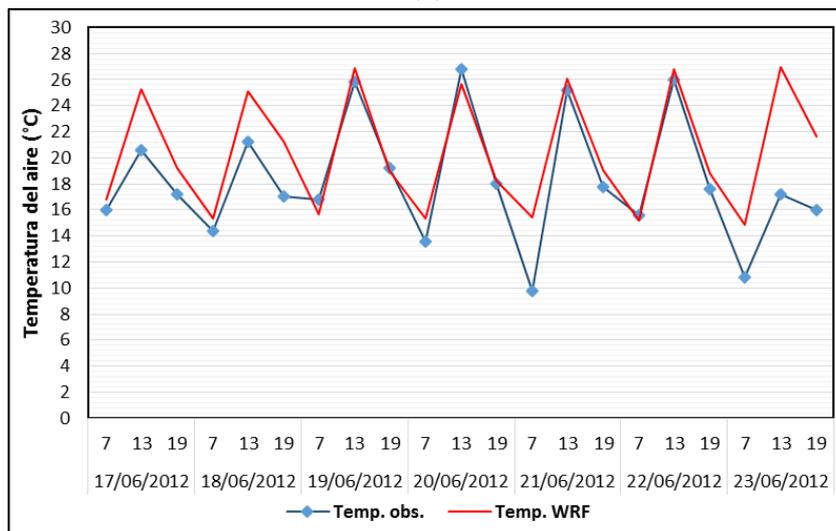
Comparación temporal de la temperatura del aire en la estación Tacama



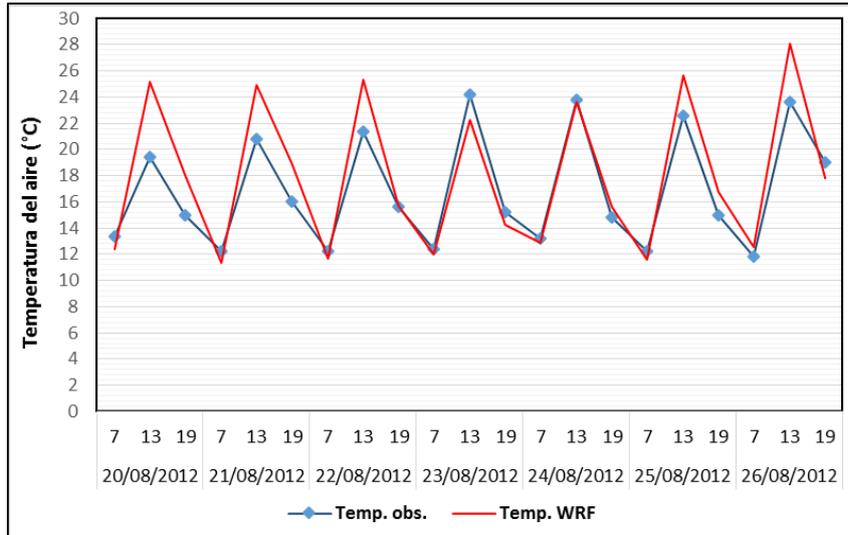
(a)



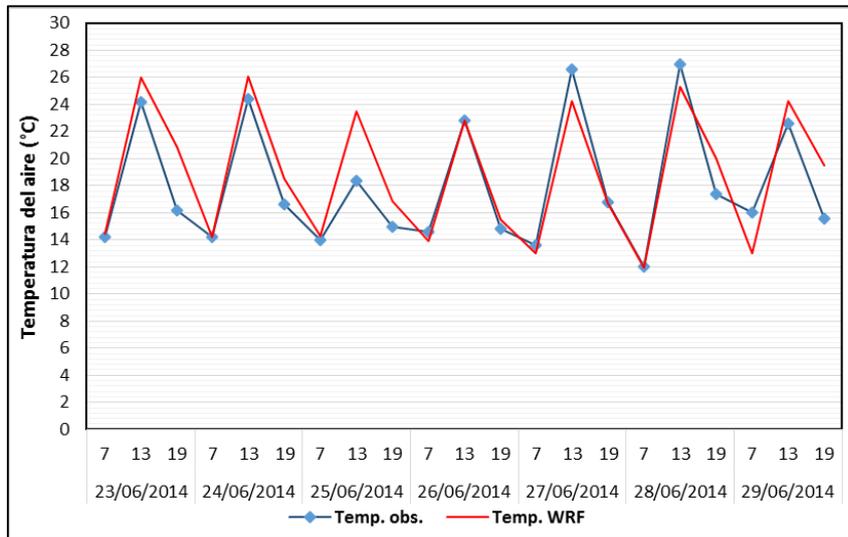
(b)



(c)



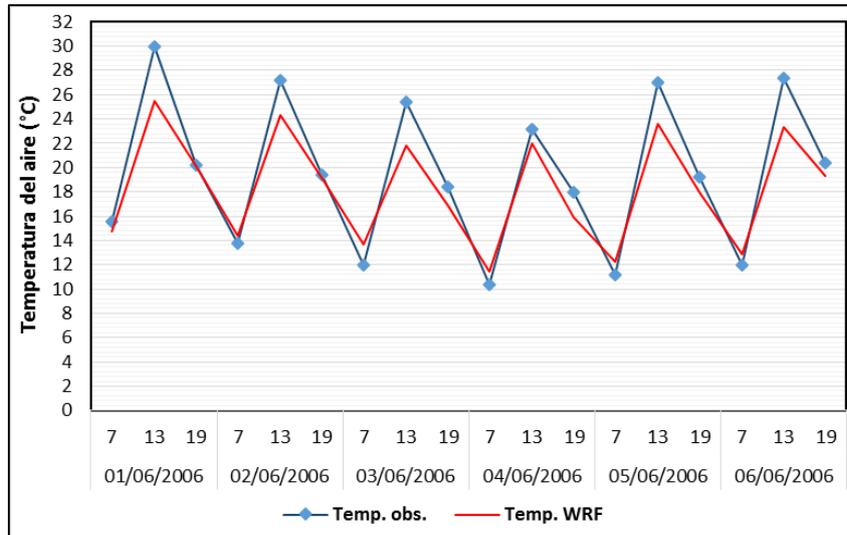
(d)



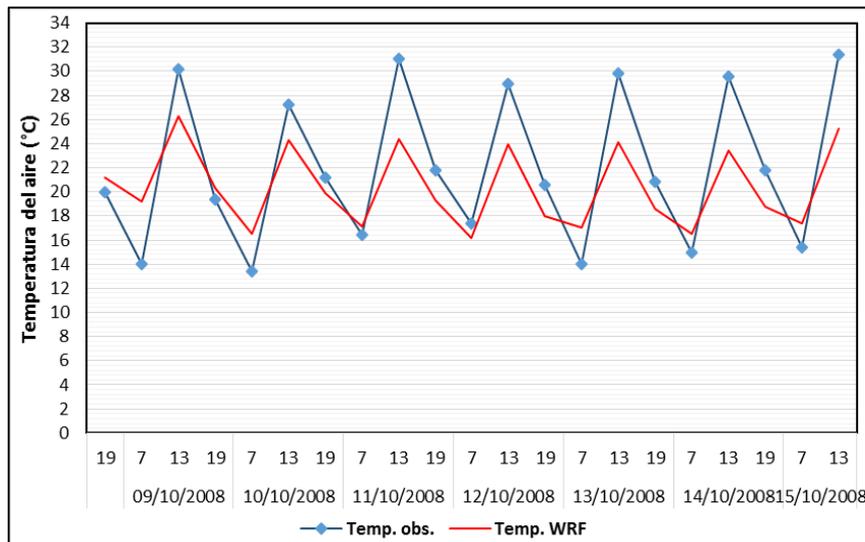
(e)

Figura 16: Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

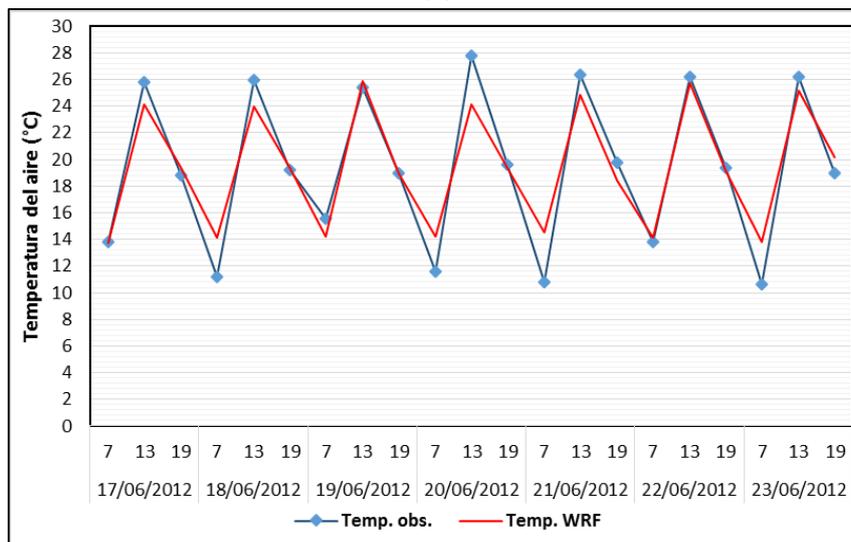
Comparación temporal de la temperatura del aire en la estación Copara



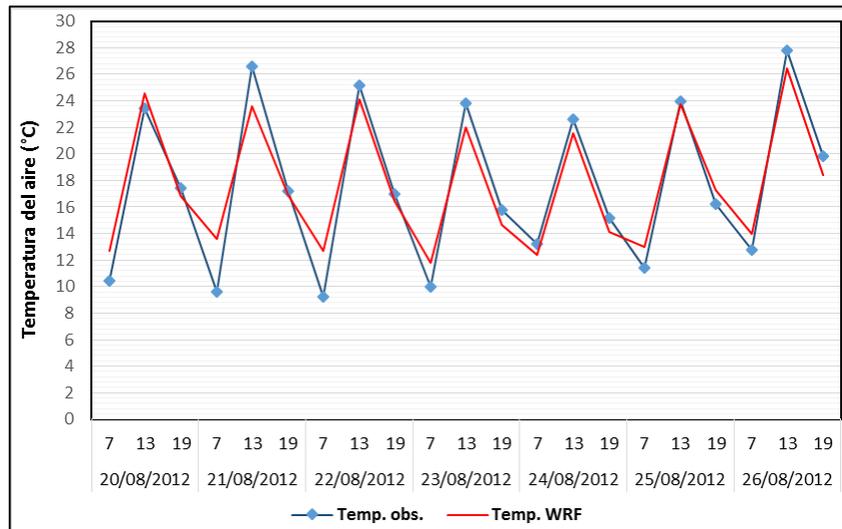
(a)



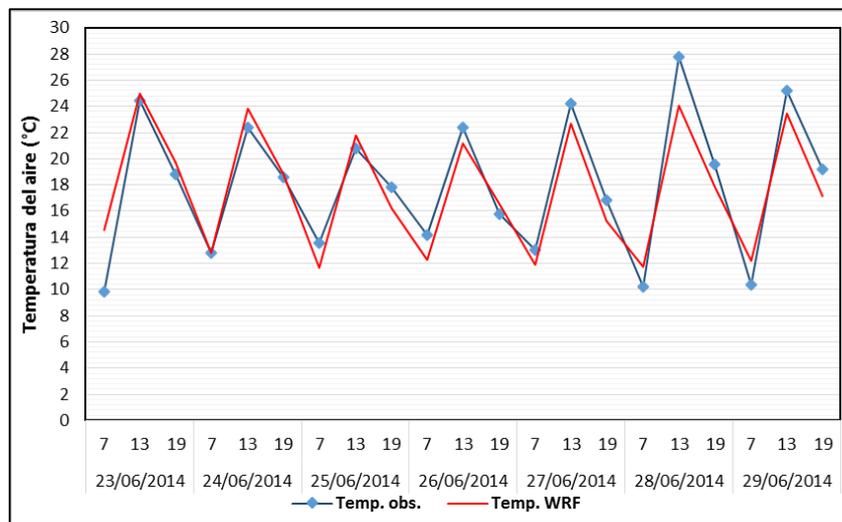
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 17: Comparación de la temperatura del aire a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

c. Humedad Relativa a 2 m de la superficie

La humedad relativa simulada por WRF en la estación Aeropuerto Pisco detectó las oscilaciones diurnas, y a su vez estas sobreestimaron los picos máximos y subestimaron los picos mínimos de humedad respecto a los valores observados en la estación; esto ocurre para todos los periodos de estudio.

Por otra parte, los resultados obtenidos de la simulación, en las estaciones Ocucaje y Beta Santiago, identificaron las oscilaciones diurnas; si bien es cierto en ambas estaciones existe

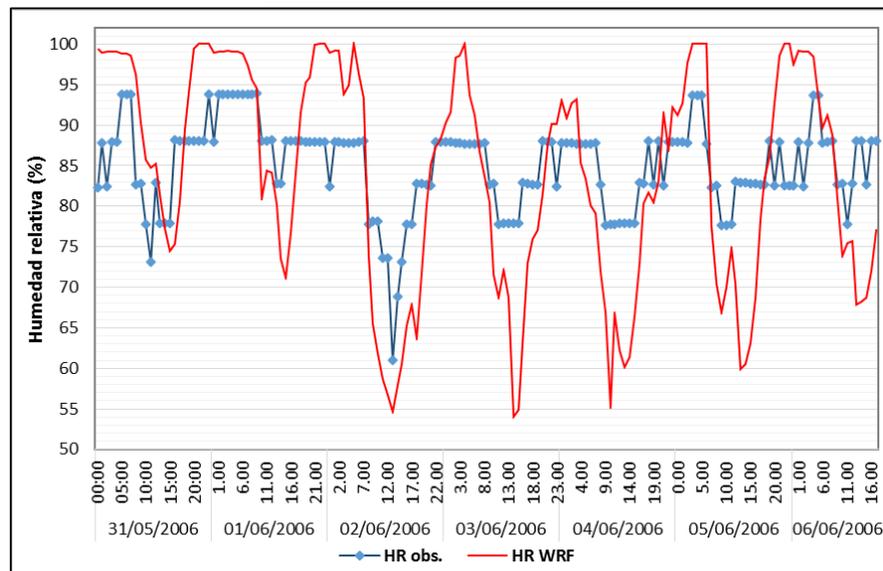
un comportamiento similar entre lo simulado y lo observado, el modelo sobreestimó ligeramente los valores máximos y mínimos respecto a la humedad relativa observada.

En la estación Tacama, las humedades relativas simuladas se encontraron por debajo de las humedades relativas registradas en dicha estación (Figura 21), de la misma forma ocurre para la estación Copara.

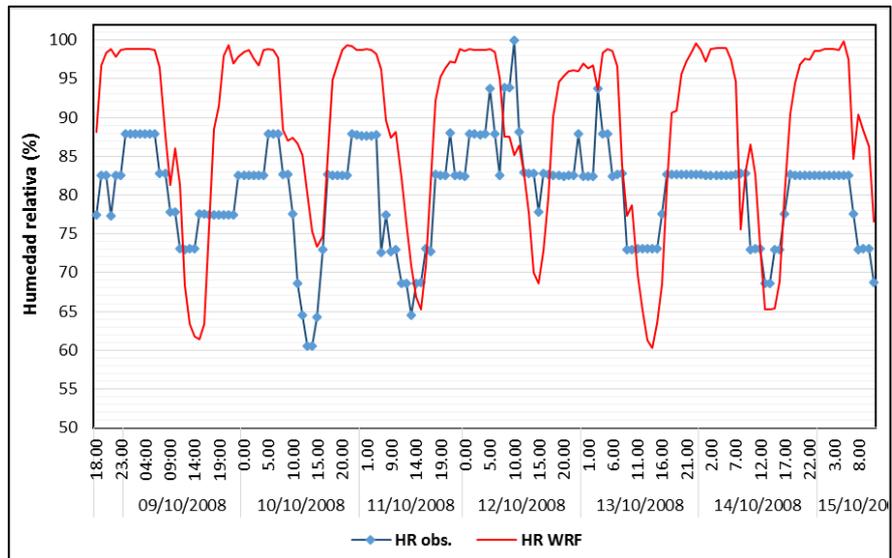
La estación que tiene las simulaciones menos favorables es la estación Tacama, mientras que las simulaciones obtenidas para las estaciones Beta Santiago y Ocucaje fueron muy cercanas a las observadas.

Este comportamiento de las simulaciones obtenidas puede deberse a la influencia de los datos de entrada la cual sugiere que la cubierta de suelo puede ser incorrectamente representada o también el suministro de agua en la atmósfera puede ser sobreestimado. (Gavidia, 2011)

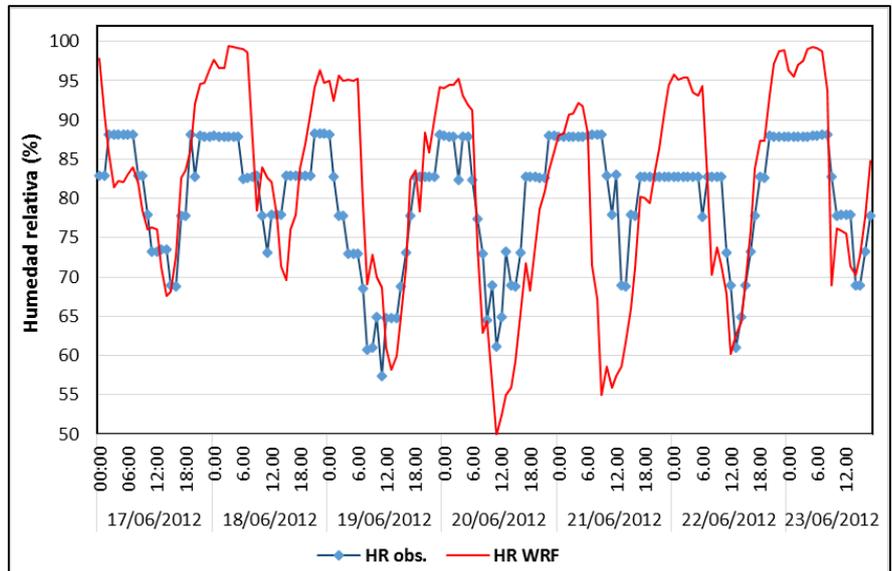
Comparación temporal de la humedad relativa en la estación Aeropuerto - Pisco



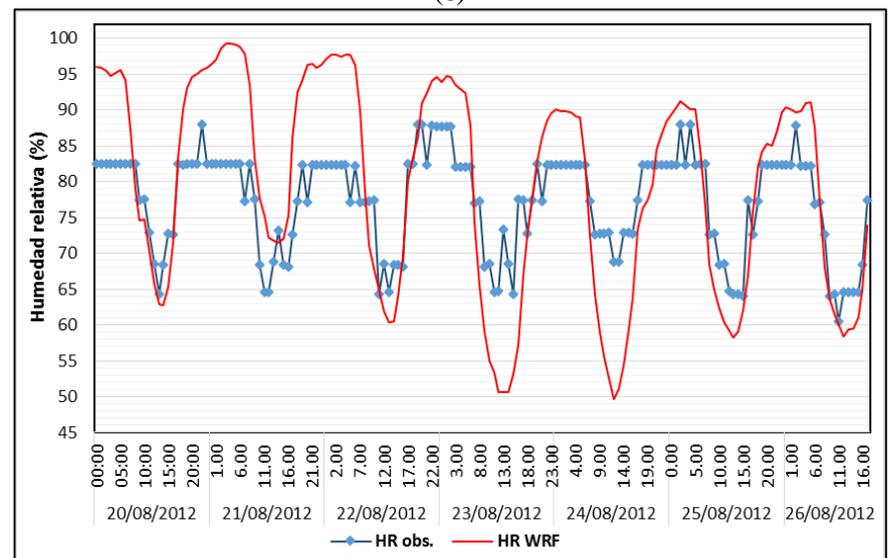
(a)



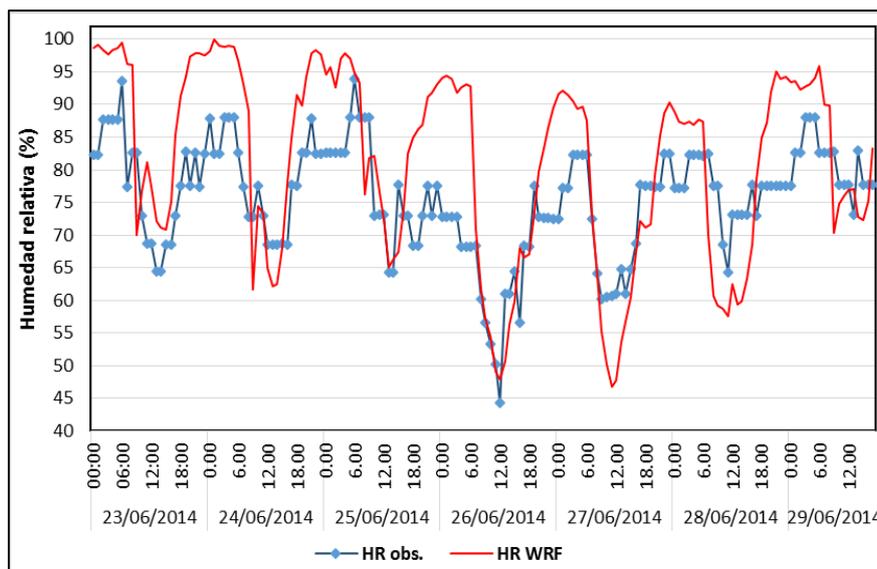
(b)



(c)



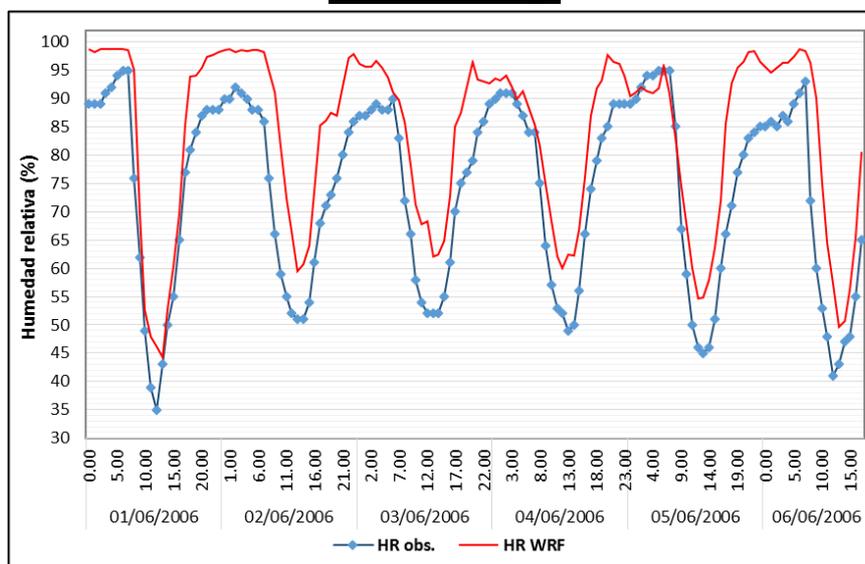
(d)



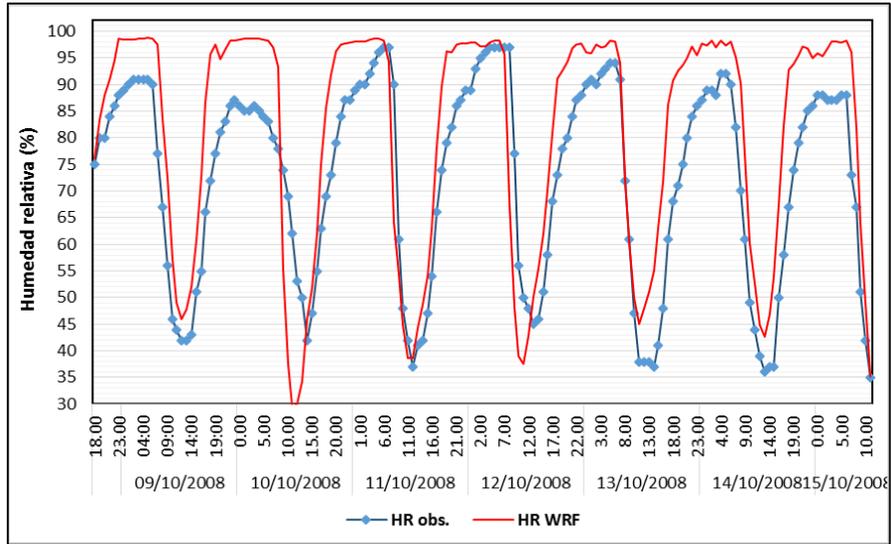
(e)

Figura 18: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Aeropuerto Pisco del periodo: a) 31/05/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

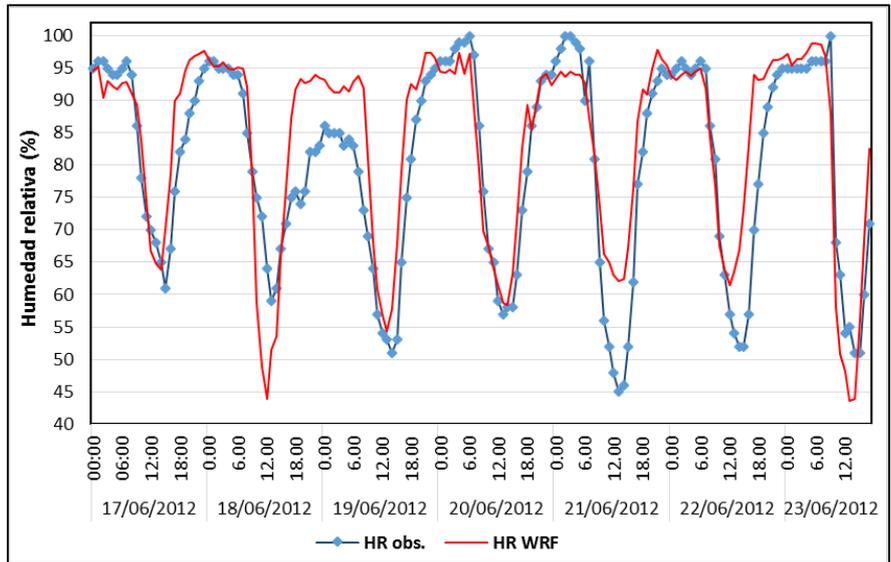
Comparación temporal de la humedad relativa en la estación Ocucaje



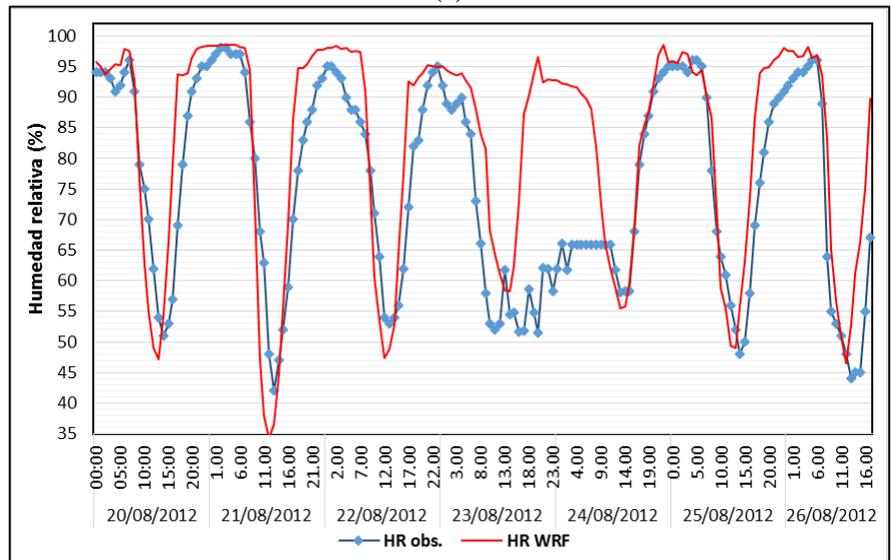
(a)



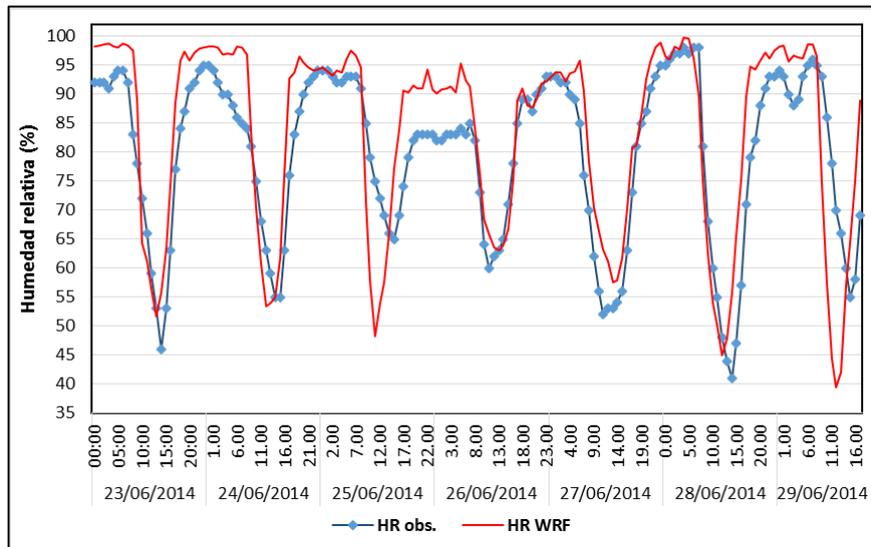
(b)



(c)



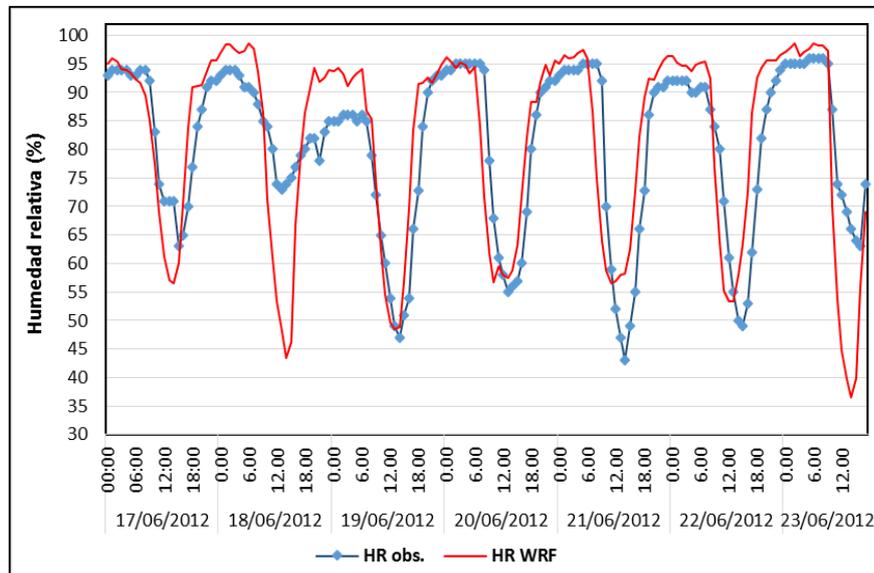
(d)



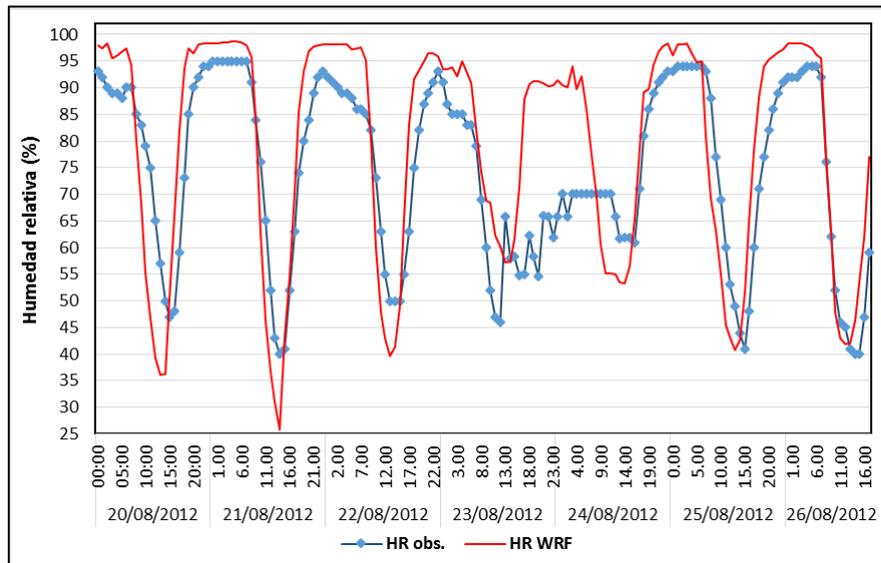
(e)

Figura 19: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

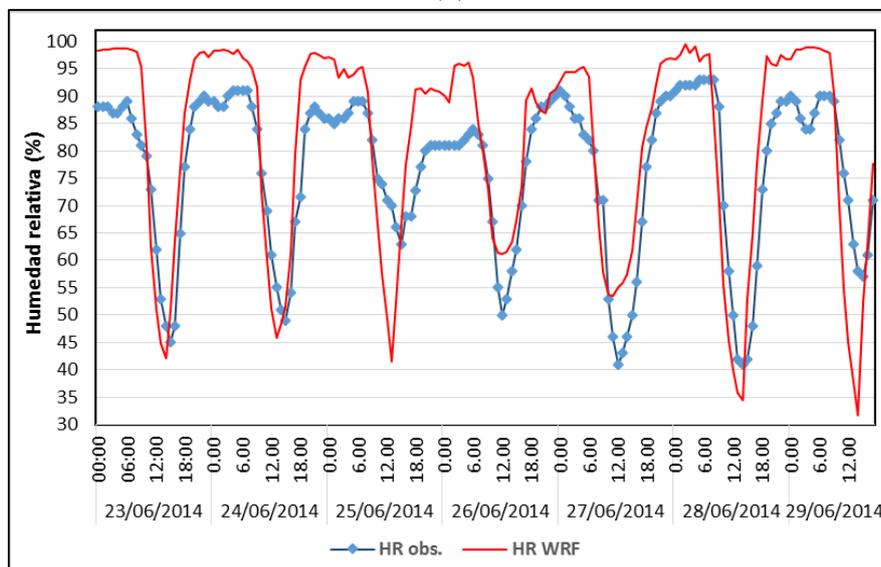
Comparación temporal de la humedad relativa en la estación Beta Santiago



(a)



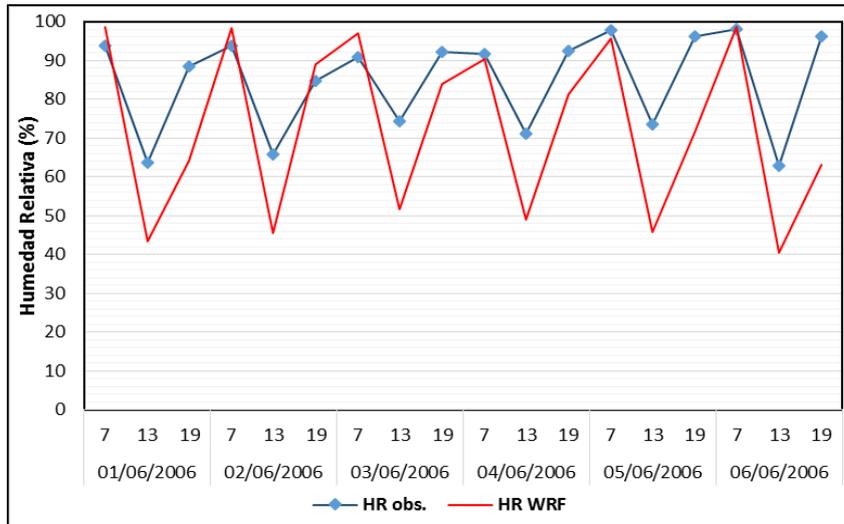
(b)



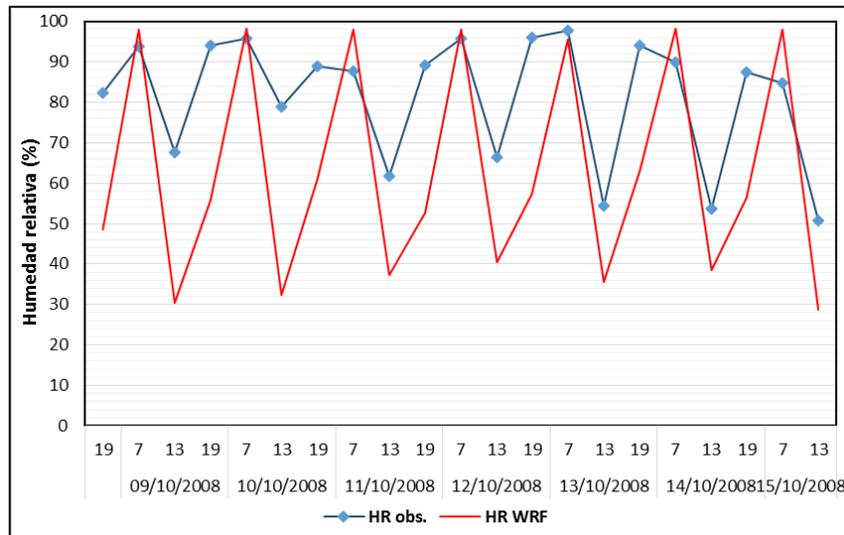
(c)

Figura 20: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.

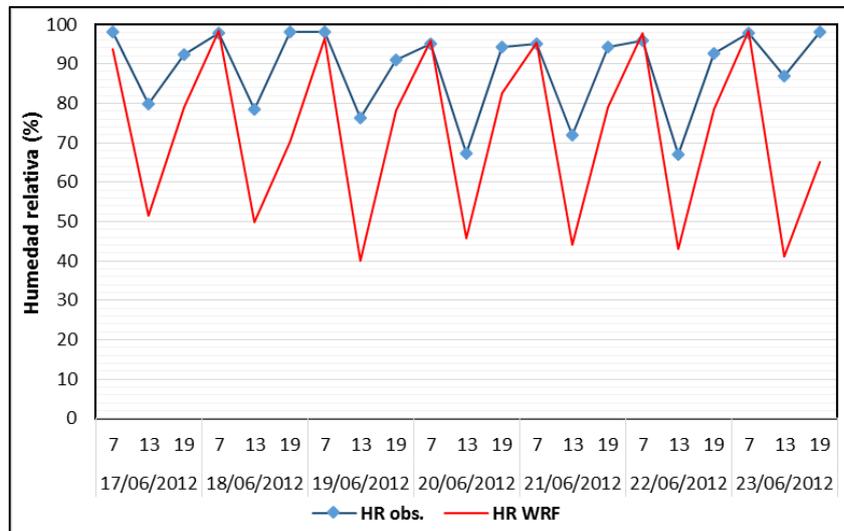
Comparación temporal de la humedad relativa en la estación Tacama



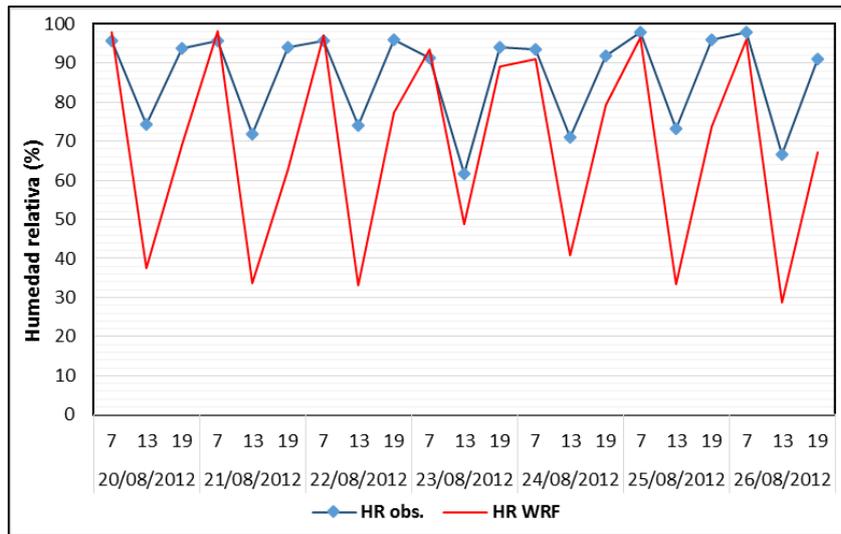
(a)



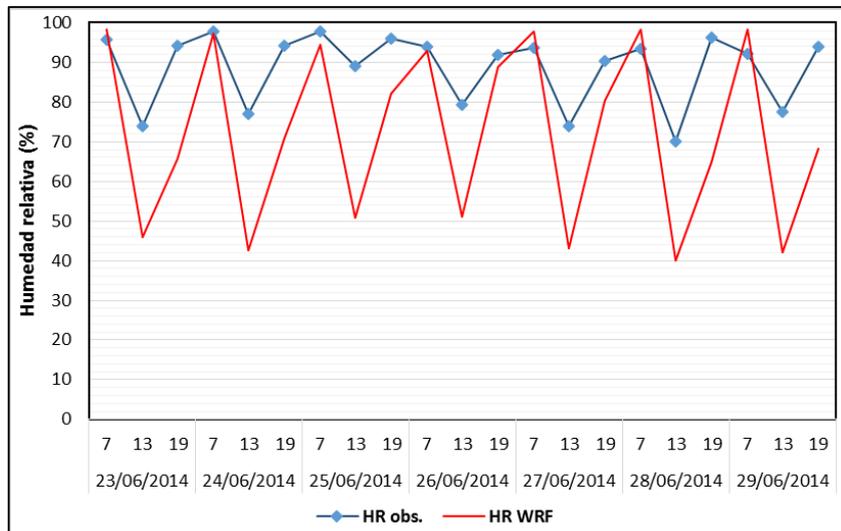
(b)



(c)



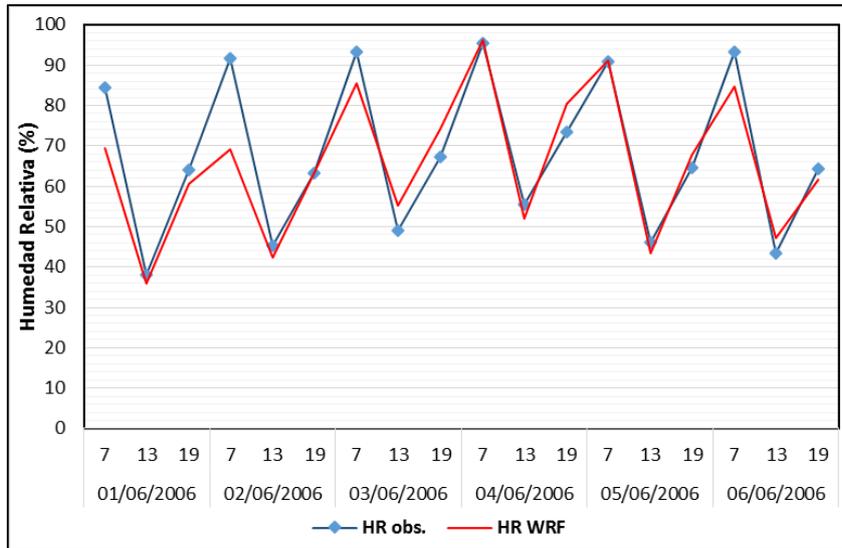
(d)



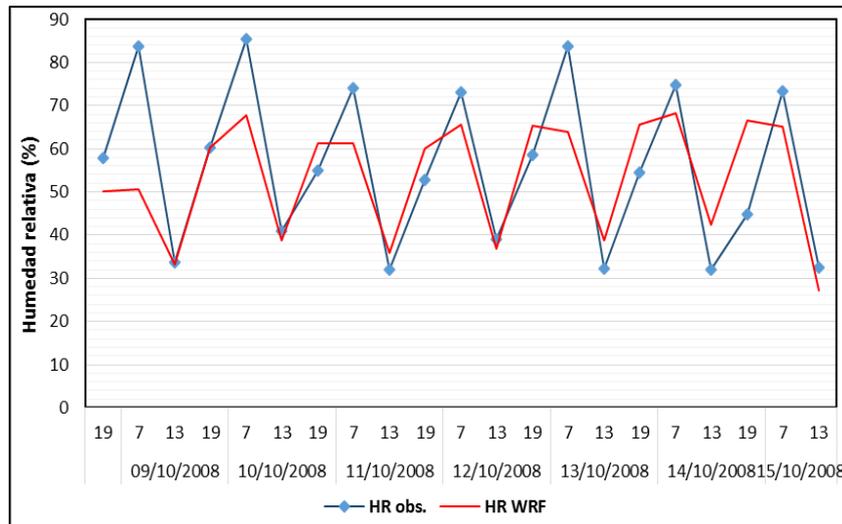
(e)

Figura 21: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Tacama del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

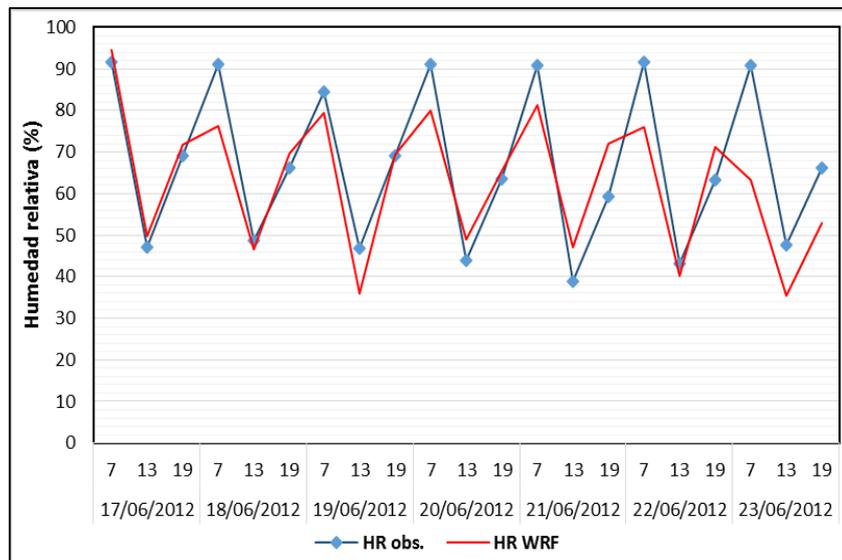
Comparación temporal de la humedad relativa en la estación Copara



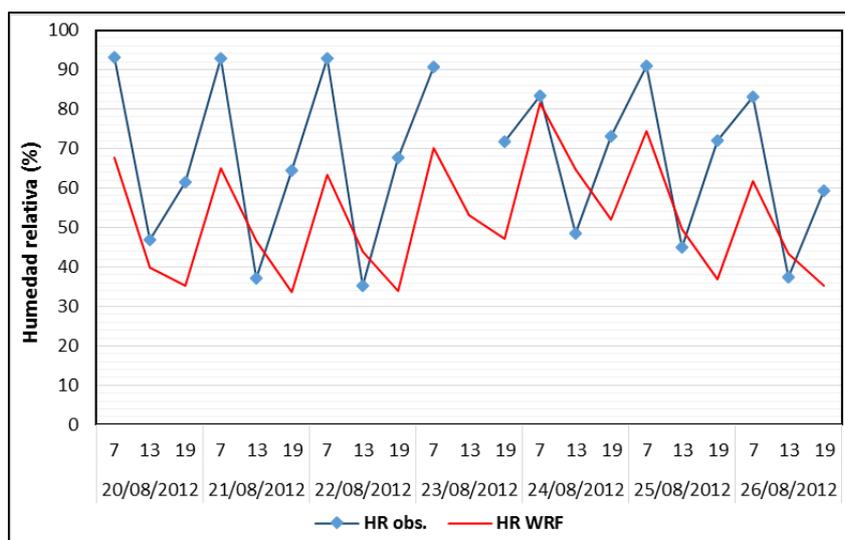
(a)



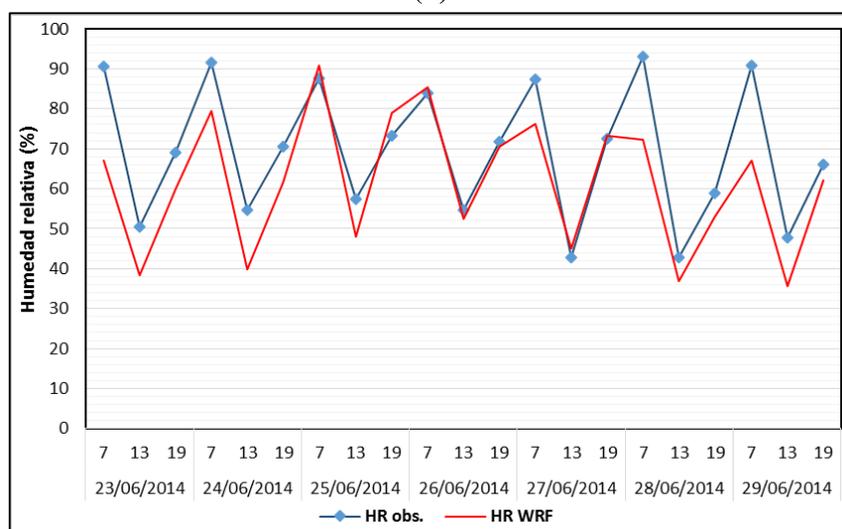
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 22: Comparación de la humedad relativa a 2 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) en la estación Copara del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

d. Dirección del viento

La dirección de viento es una variable meteorológica que los modelos atmosféricos tienen mayor dificultad para simular, debido a que esta se ve afectada por un conjunto de factores, destacando entre ellos el relieve topográfico, característica que el modelo no reconoce como tal y simplemente no lo representa.

Para las estaciones Aeropuerto Pisco, Beta Santiago, Tacama y Copara la dirección del viento no fue bien representada debido a las causas antes mencionadas. En la estación

Aeropuerto se observó que mientras la dirección del viento predominante observada fue suroeste, el modelo estimó dirección predominante proveniente del sur. En la estación Beta Santiago se observó que mientras la dirección del viento predominante observada fue del este el modelo estimó dirección predominante proveniente del sur. Sin embargo existió mayor concordancia entre la dirección del viento observado y simulado para la estación Ocucaje, en los cuales el viento predominante fue de procedencia sur y sureste durante los periodos de estudio, como se puede observar en las Figuras 28, 29, 30, 31 y 32.

Es importante resaltar, que en las rosas de viento, se observó que las magnitudes de la velocidad del viento fueron subestimadas por el modelo, en la gran mayoría de los casos. De forma general las rosas de viento simuladas y observadas no presentaron una relación coherente apreciable. En las figuras a continuación se presentan las rosas de viento de la información de las estaciones meteorológicas y las obtenidas mediante el modelo WRF.

Estación Aeropuerto Pisco

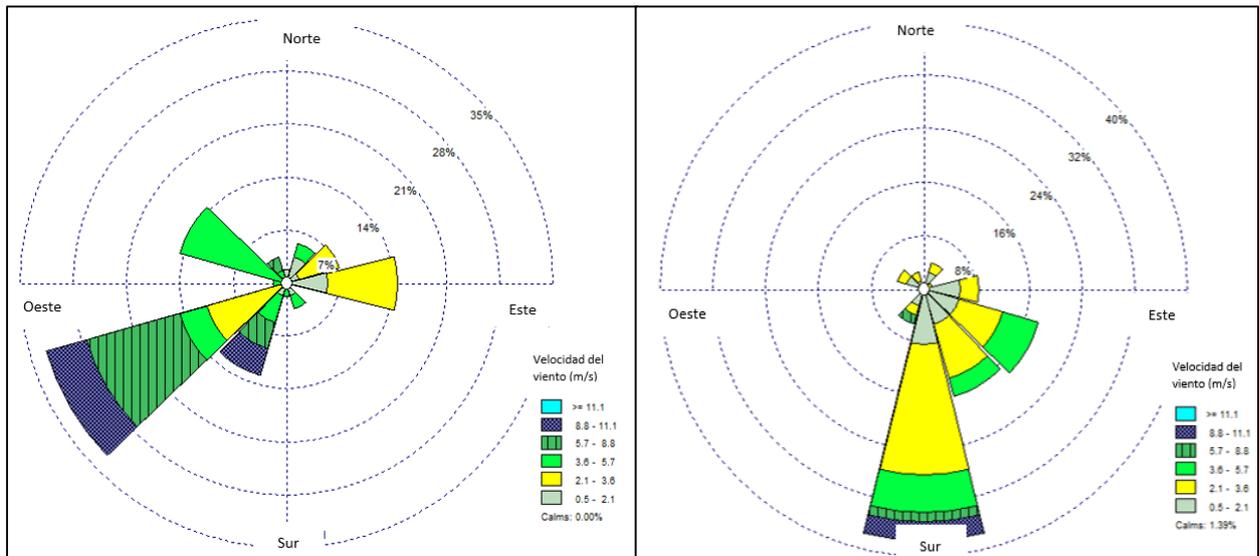


Figura 23: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 02 al 04 de junio 2006 (Estación Aeropuerto Pisco).

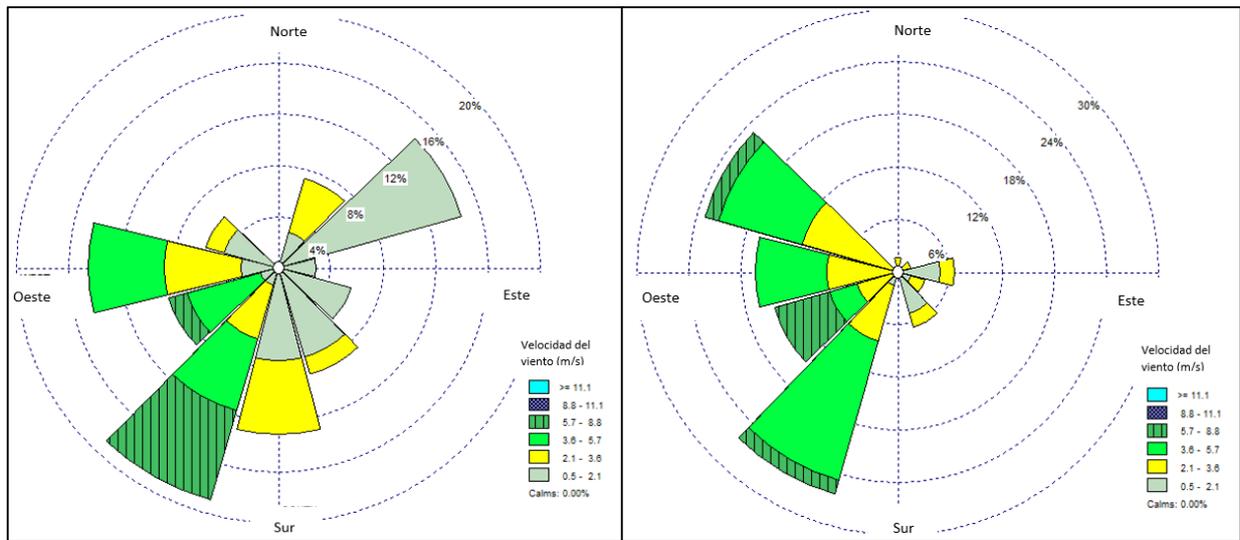


Figura 24: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 11 al 13 de octubre 2008 (Estación Aeropuerto Pisco).

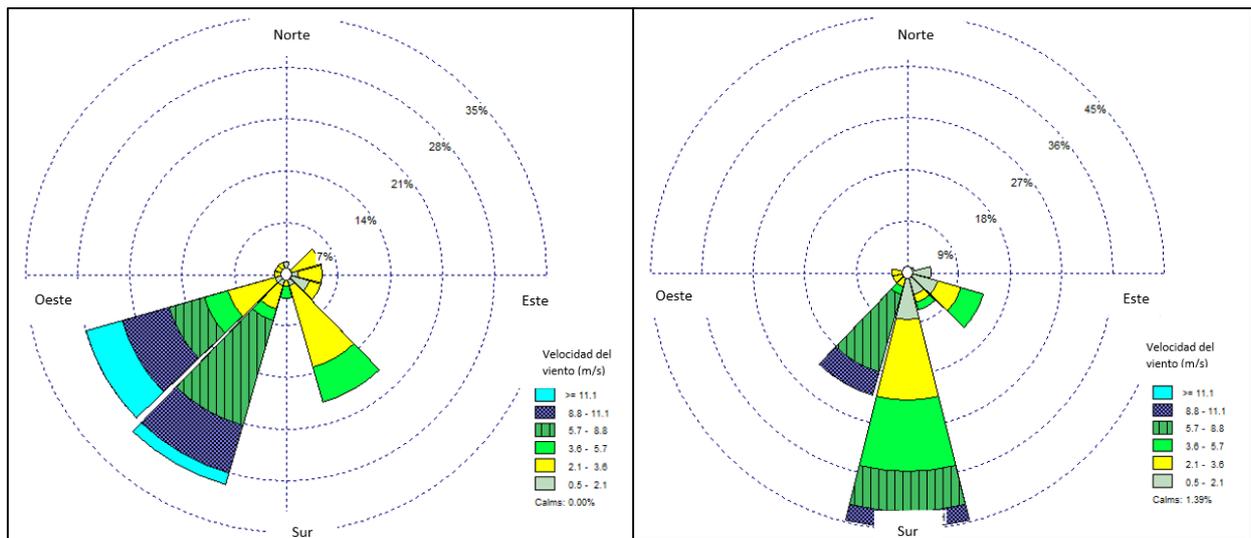


Figura 25: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Aeropuerto Pisco).

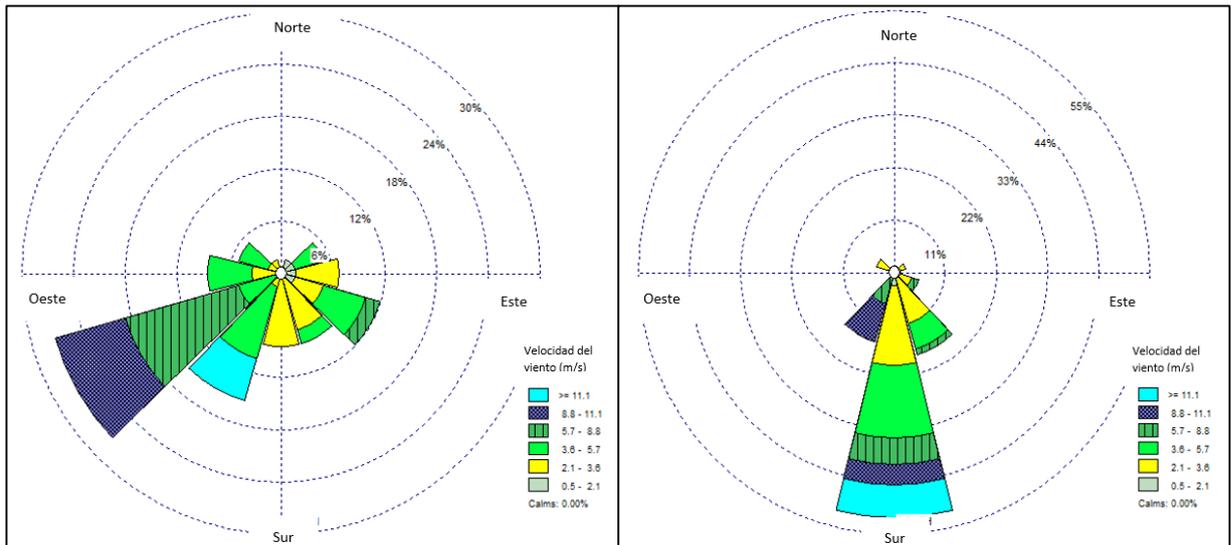


Figura 26: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Aeropuerto Pisco).

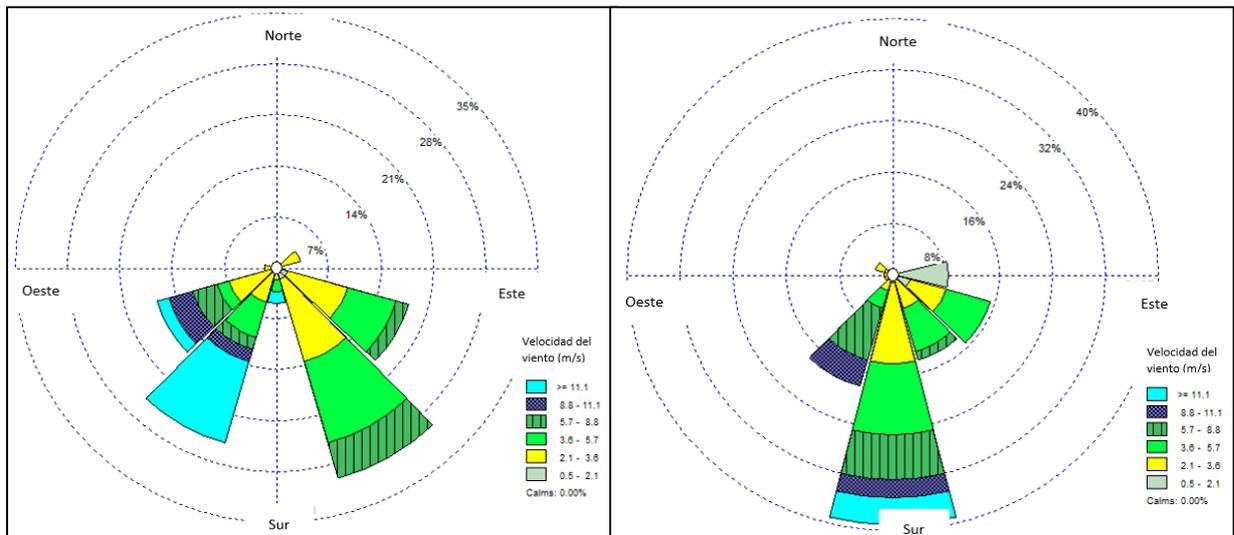


Figura 27: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Aeropuerto Pisco).

Estación Ocucaje

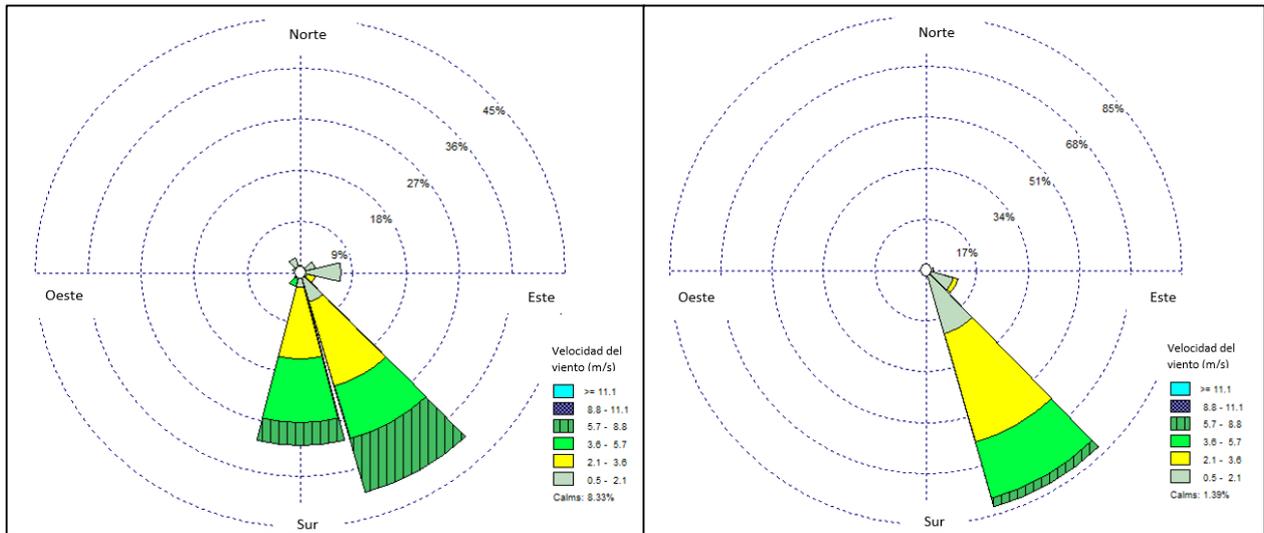


Figura 28: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 02 al 04 de junio 2006 (Estación Ocucaje).

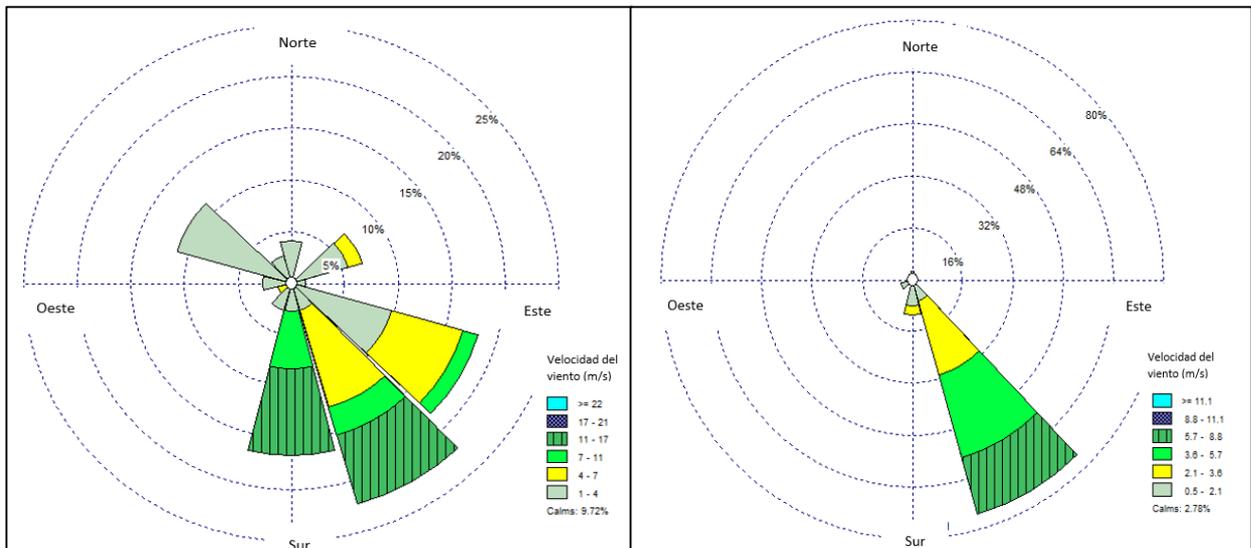


Figura 29: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 11 al 13 de octubre 2008 (Estación Ocucaje).

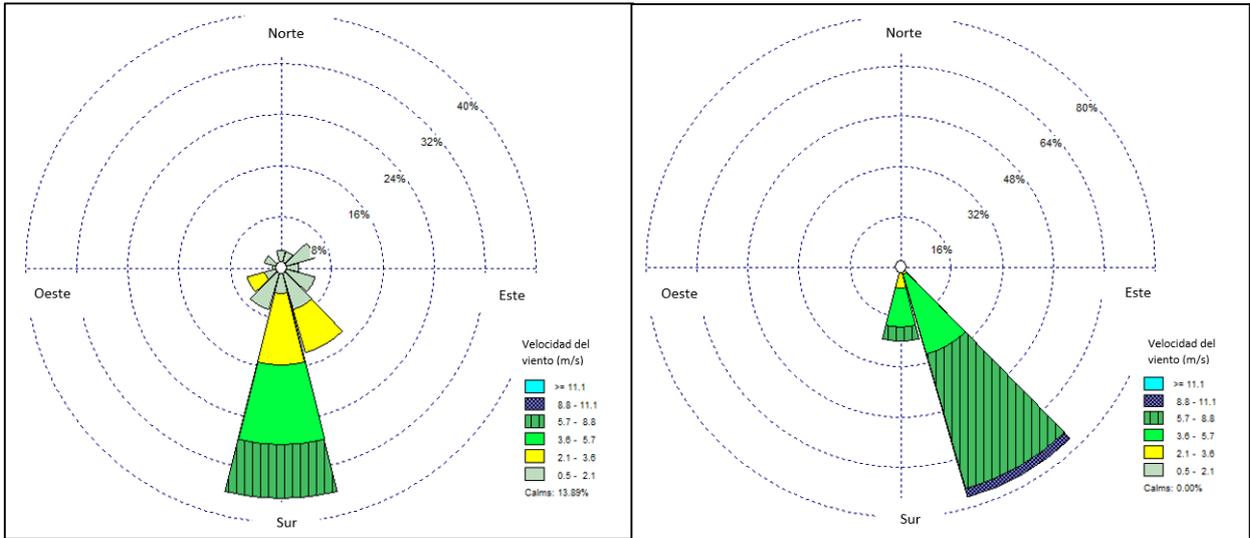


Figura 30: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Ocucaje).

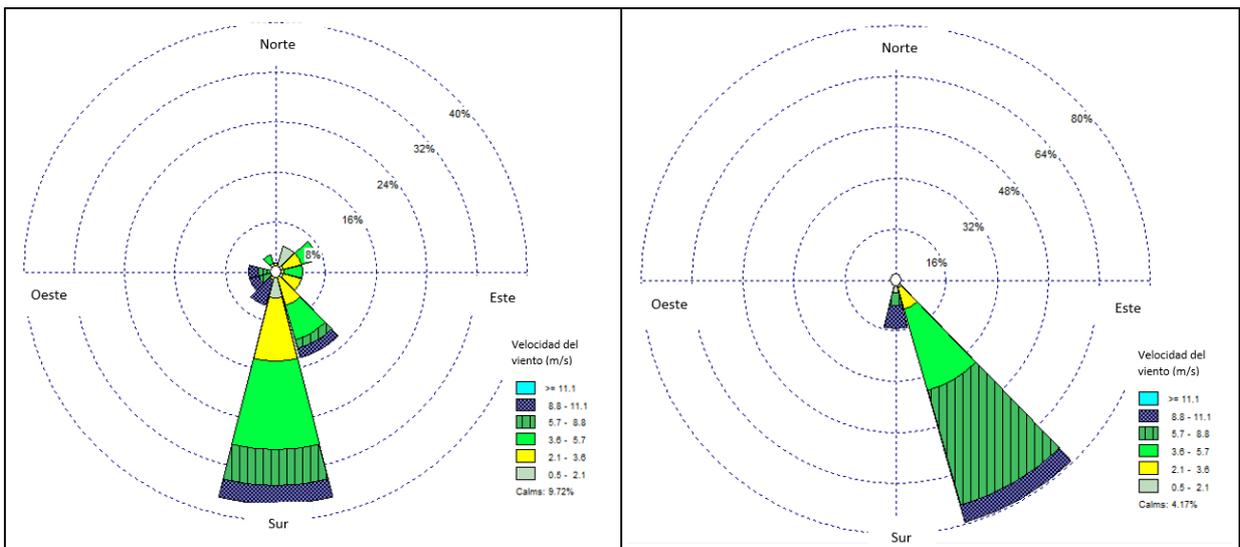


Figura 31: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Ocucaje).

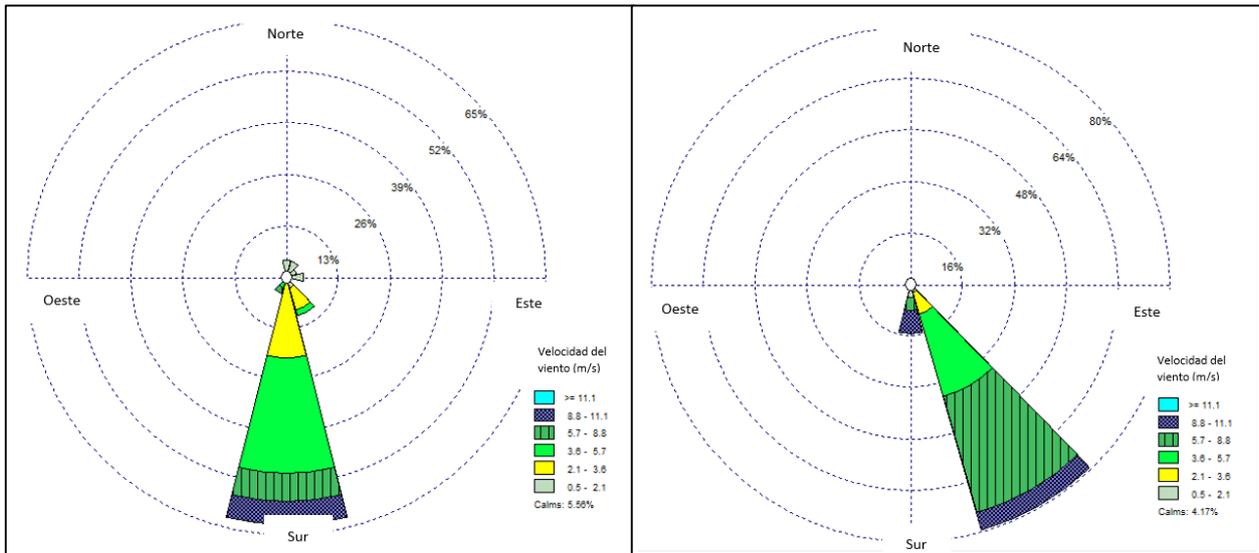


Figura 32: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Ocucaje).

Estación Beta Santiago

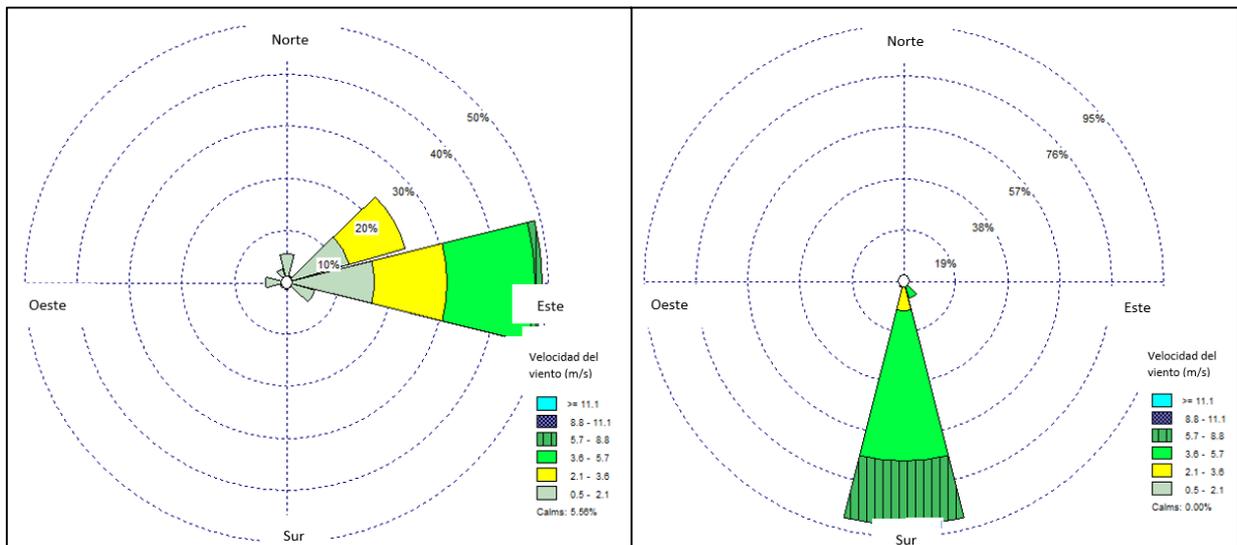


Figura 33: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 19 al 21 de junio 2012 (Estación Beta Santiago).

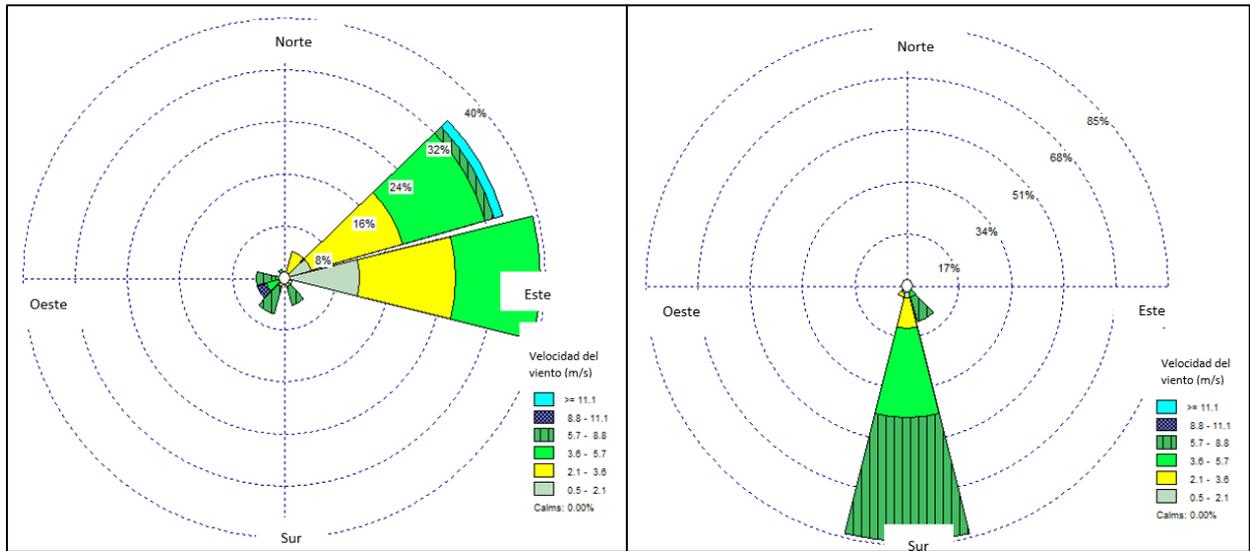


Figura 34: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 22 al 24 de agosto 2012 (Estación Beta Santiago).

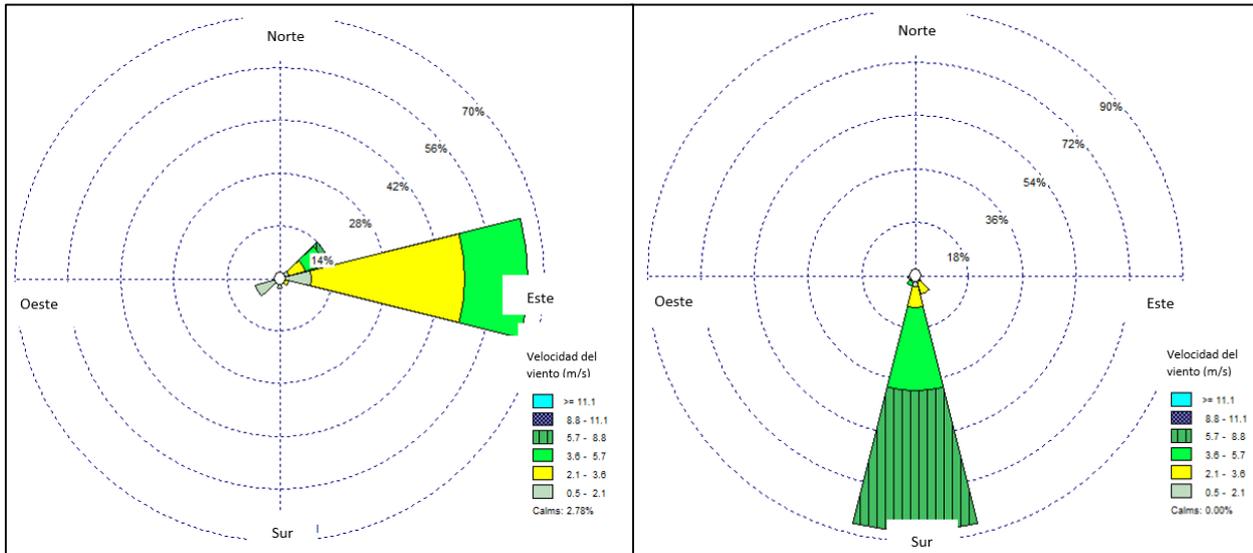


Figura 35: Rosas de Viento de datos observados (izquierda) y simulados (derecha) del 25 al 27 de junio 2014 (Estación Beta Santiago).

4.1.2. Análisis de la situación sinóptica del evento

Evolución Temporal del Viento Paracas en Superficie

En las Figuras 47, 49 y 51, para los periodos de estudio 17-23 de junio 2012, 20-26 de agosto 2012 y 23-29 de junio 2014, se observó que el núcleo del anticiclón del Pacífico se encontró bien formado (1028 hPa) y desplazado hacia menores latitudes (cerca al 22.5°); con menor intensidad se observó al anticiclón del Pacífico en el periodo de 01 al 06 de junio del 2006 y por otro lado en el periodo de 09 al 15 de Octubre del 2008 no evidenció la presencia del anticiclón desplazado hacia latitudes menores.

Esta alta presión se amplificó durante los días de ocurrencia de los Vientos Paracas y las isobaras de menor intensidad se acercaron a las costas peruanas, generando un mayor gradiente de presión que intensificó la circulación anticiclónica cerca Sudamérica. Las isobaras de 1016hPa, se acercan a la costa sudamericana entre Ica y el norte de Chile. La región asociada al transporte de isobaras de 1016hPa coincide con la zona de intensificación del viento a 1000hPa sobre el mar frente a la costa sur de Perú los cuales se intensifican, aún más, durante los eventos Vientos Paracas como se observa en las Figuras 43, 47, 49 y 51.

En la Figura 45, se observó el incremento de los niveles de velocidad del viento en las costas de la región Ica, intensificándose a partir de las 17:00 horas del 02 de junio del 2006 con una duración aproximadamente de 6 horas. Asimismo el 20 de junio del 2012 a las 14:00 hora local se incrementó la velocidad del viento proveniente del sur y el incremento de la humedad relativa. De forma similar ocurrió el 23 de agosto del 2012 a partir de las 15:00 horas y el 26 de junio del 2014 a partir de las 16:00. Esto coincide con lo mencionado por Escobar (1993), en la que señala que la máxima ocurrencia del evento Paracas se da entre Junio y Setiembre entre las 12:00 y 17:00 horas, con velocidades superficiales 15 m/s aproximadamente.

Es importante notar que a partir de las horas señaladas empiezan a aumentar los niveles de velocidad del viento con viento predominante proveniente del sur y con un alto contenido de humedad, la magnitud del viento se intensifica a medida que pasan las horas. Los parámetros atmosféricos evolucionan hasta alcanzar los valores típicos existentes en la región.

En la Figuras 44,46,48,50 y 52 se muestran los valores de humedad relativa para los instantes más relevantes de la ocurrencia del evento Viento Paracas.

El factor que controla la ocurrencia del fenómeno Paracas a escala estacional es el mismo factor que controla el fenómeno a escala sinóptica (Quijano, 2013), el gradiente de presión en la región 15S-20S en 75W, el gradiente de presión en dicha región se intensifica inclusive desde 3 días antes. Durante un día sin Viento Paracas hay un mayor porcentaje de la dirección favorable a la advección de humedad del océano (dirección $> 270^\circ$) que cuando ocurre un evento Viento Paracas, con una procedencia de advección de humedad desde zonas ecuatoriales.

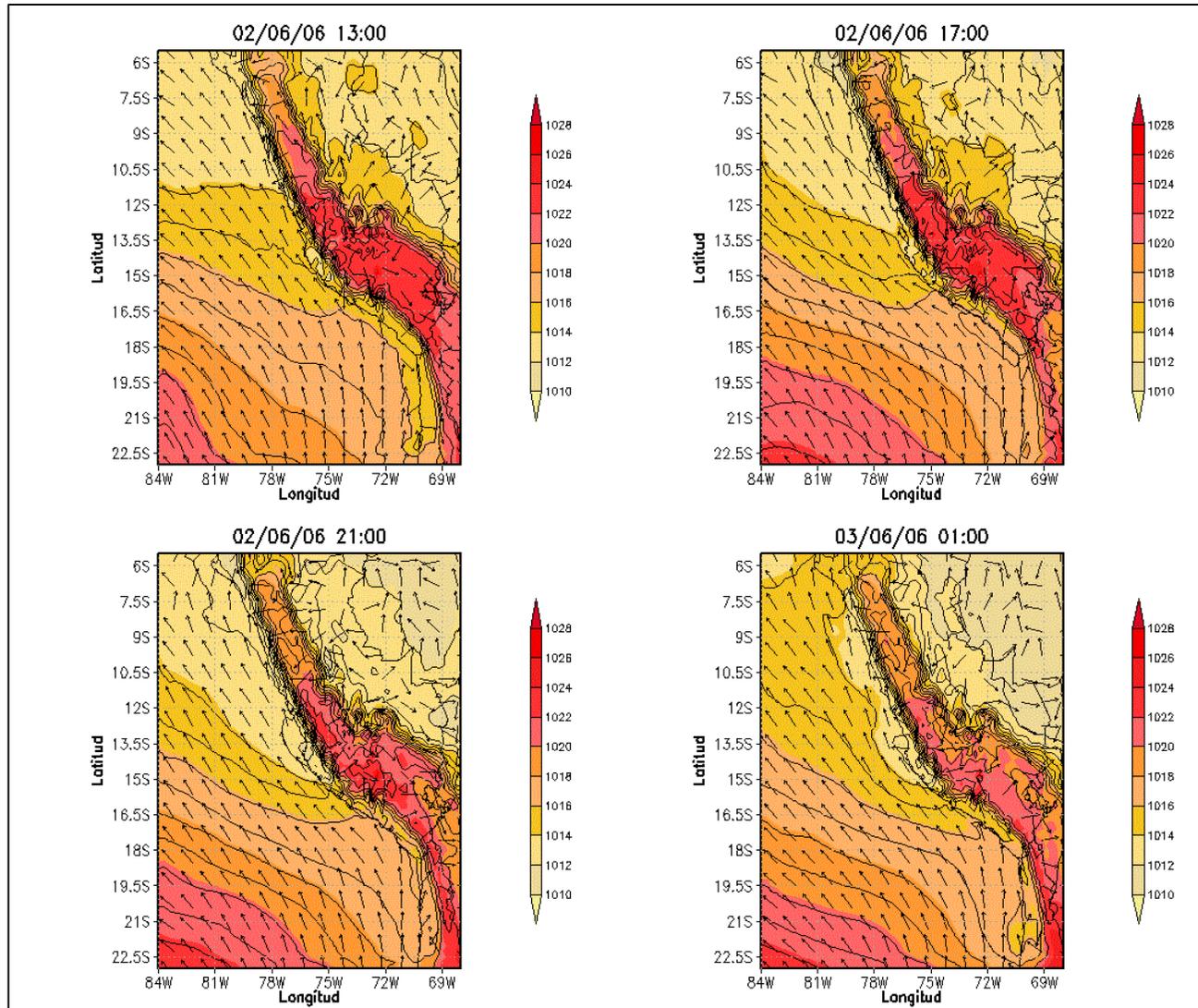


Figura 43: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (02 al 03 de junio del 2006)

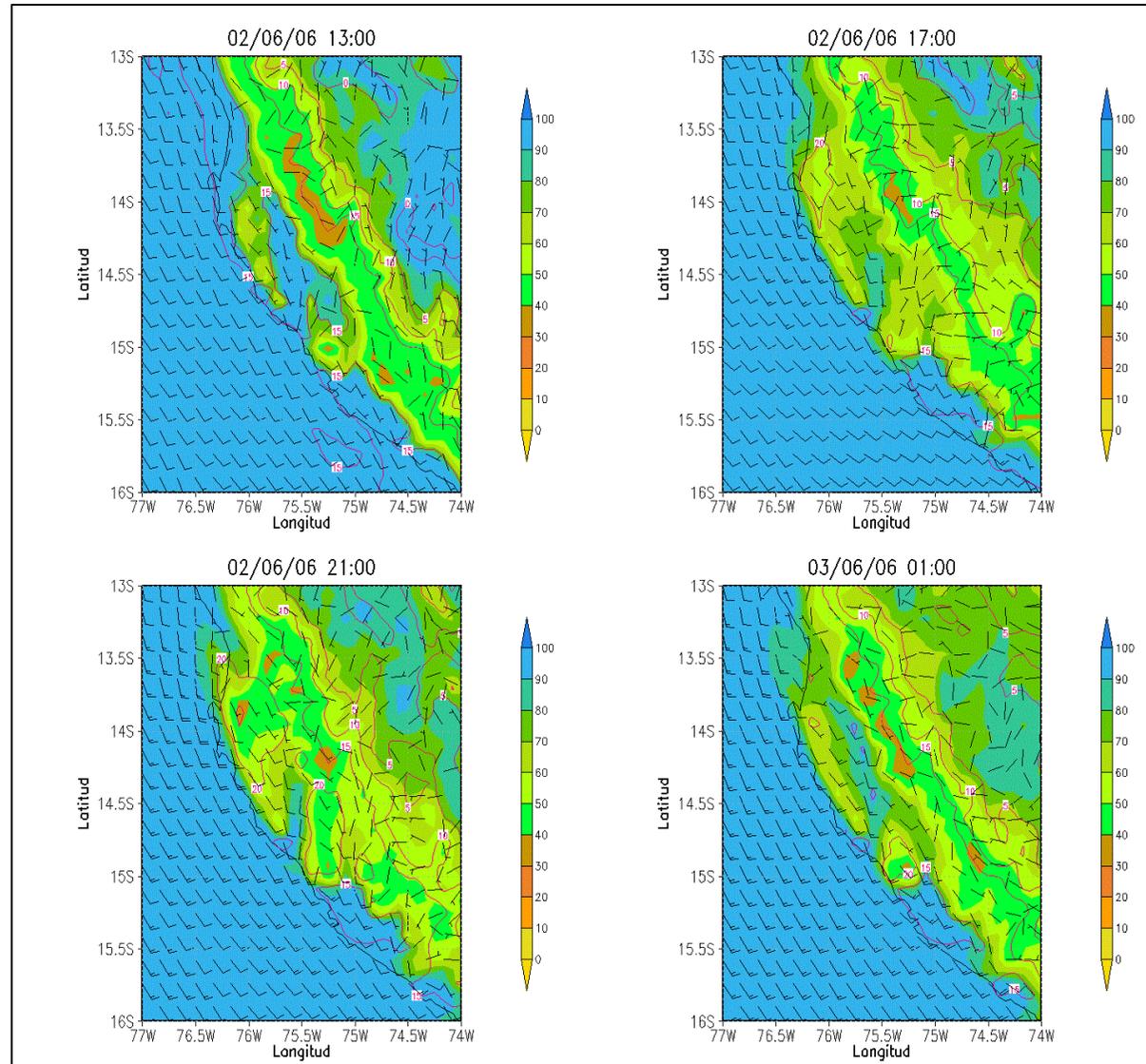


Figura 44: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (02 al 03 de junio del 2006)

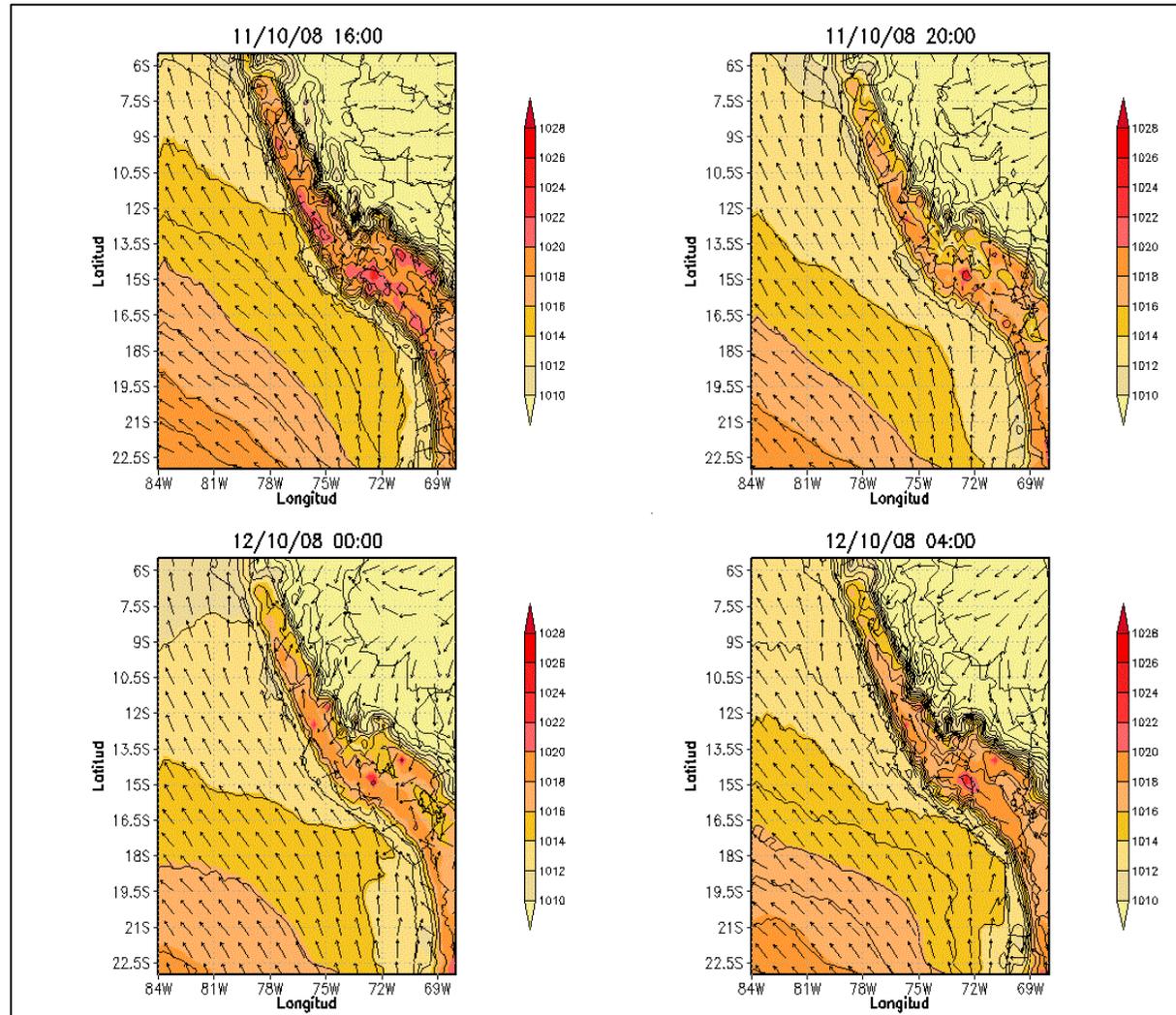


Figura 45: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (11 al 12 de octubre del 2008)

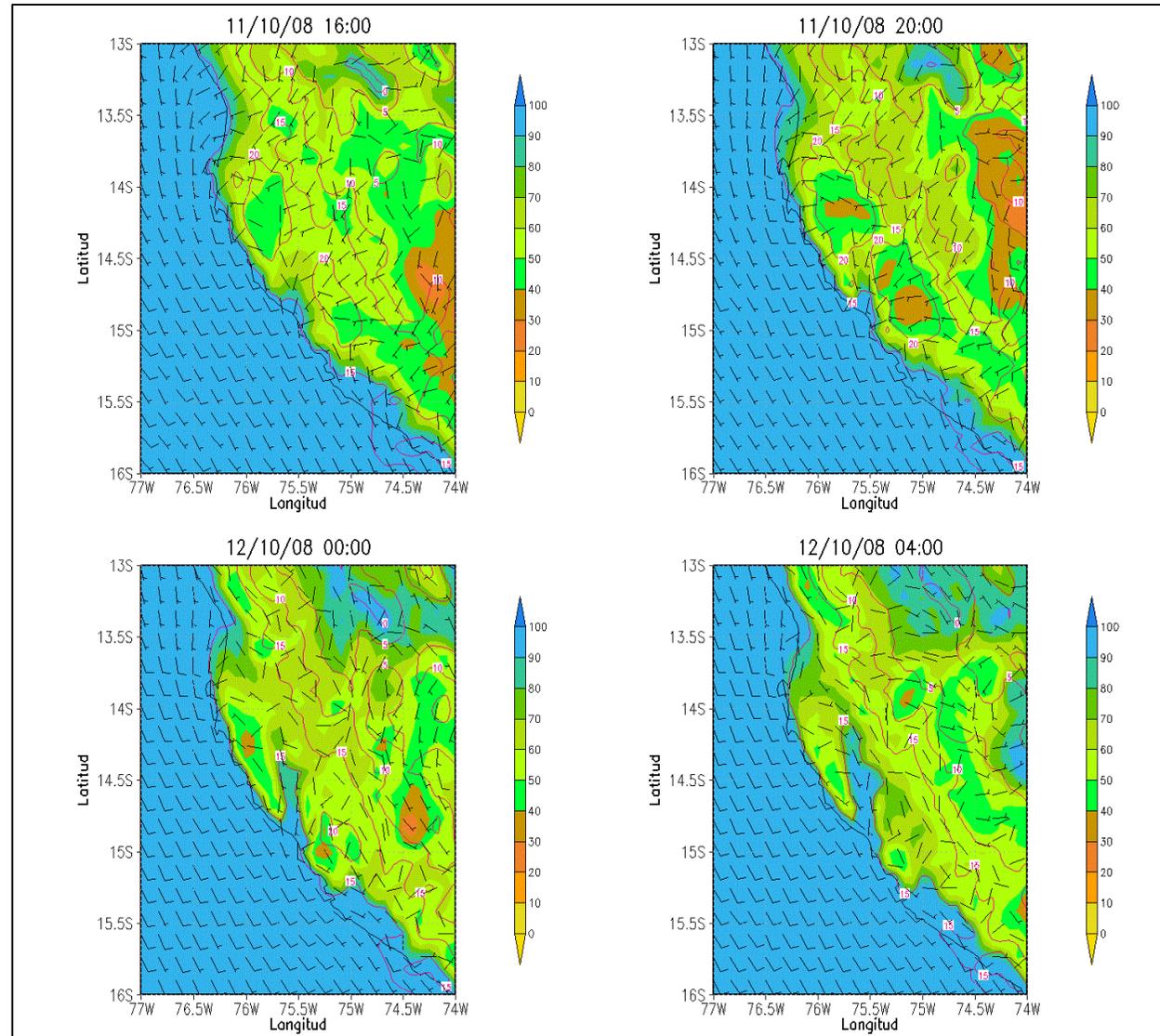


Figura 46: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (11 al 12 de octubre del 2008)

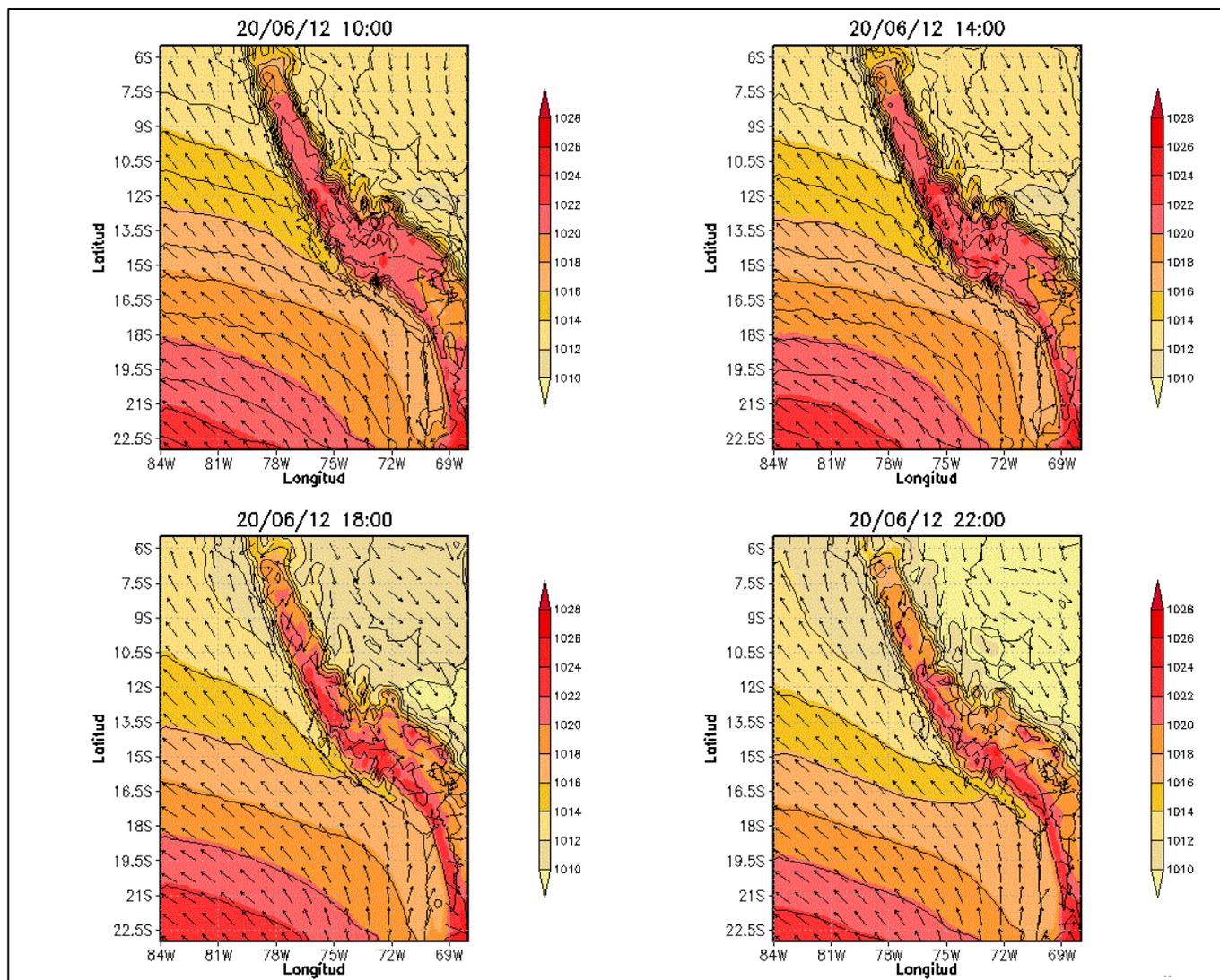


Figura 47: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (20 de junio del 2012)

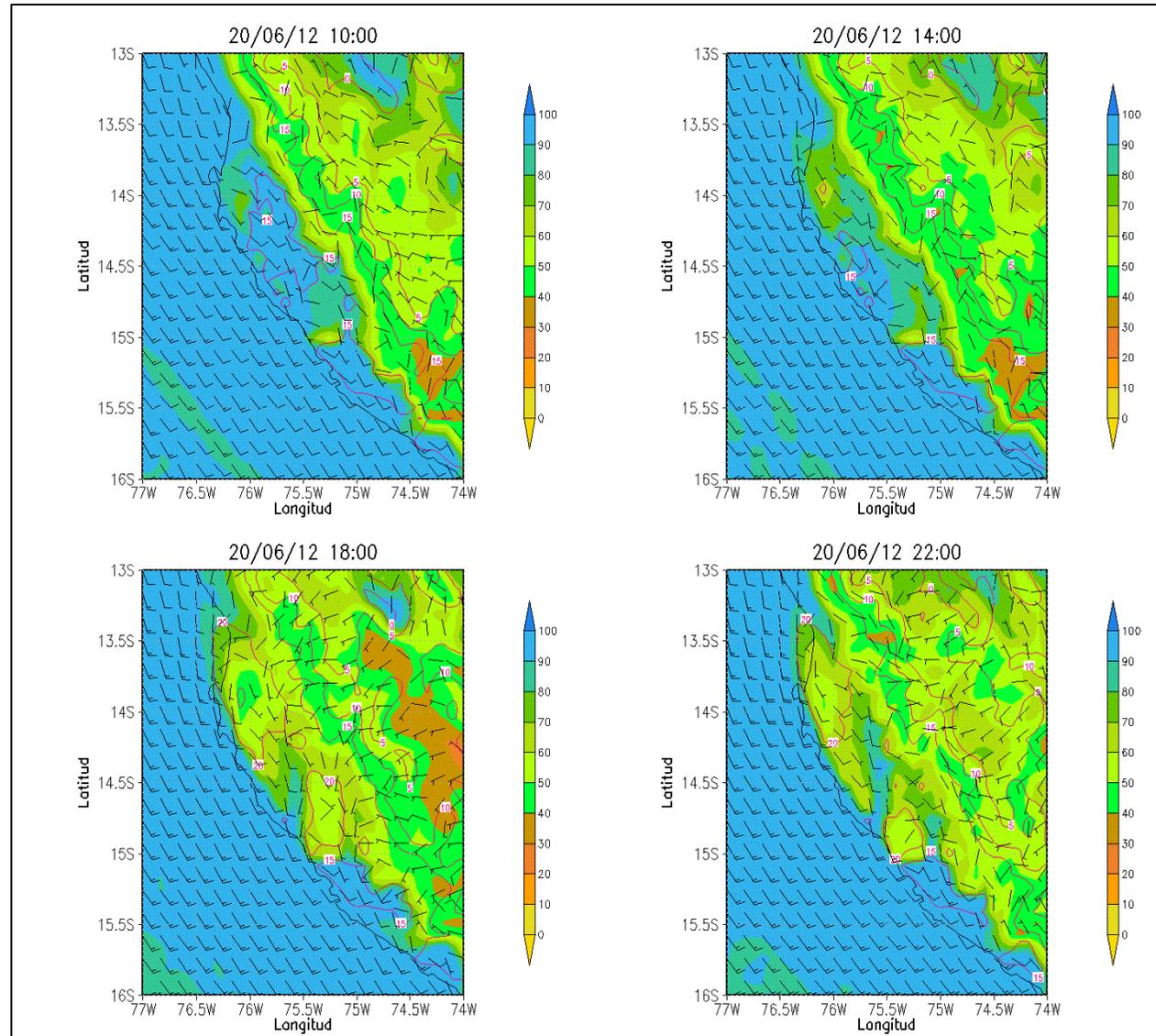


Figura 48: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (20 de junio del 2012)

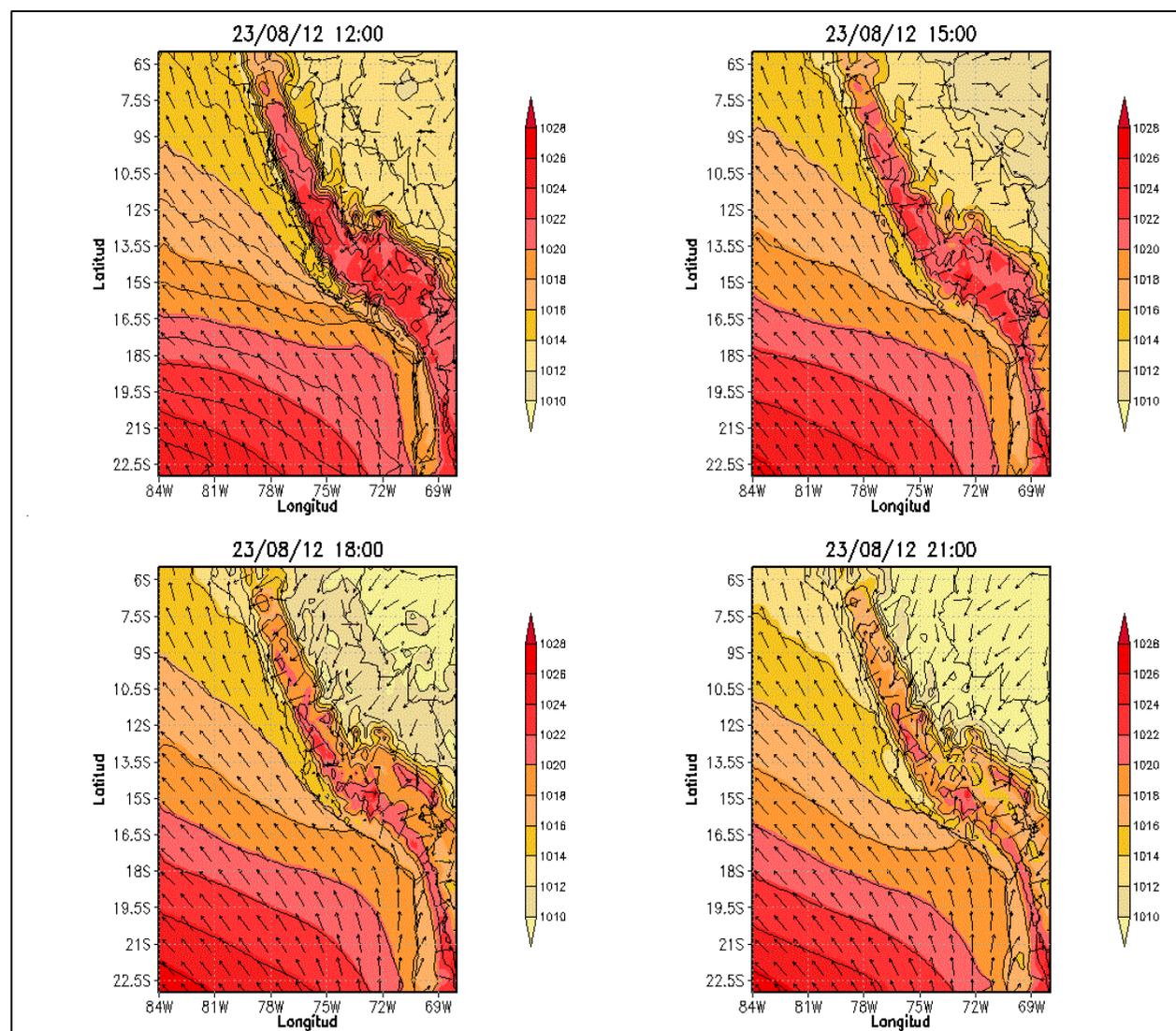


Figura 49: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (23 de agosto del 2012)

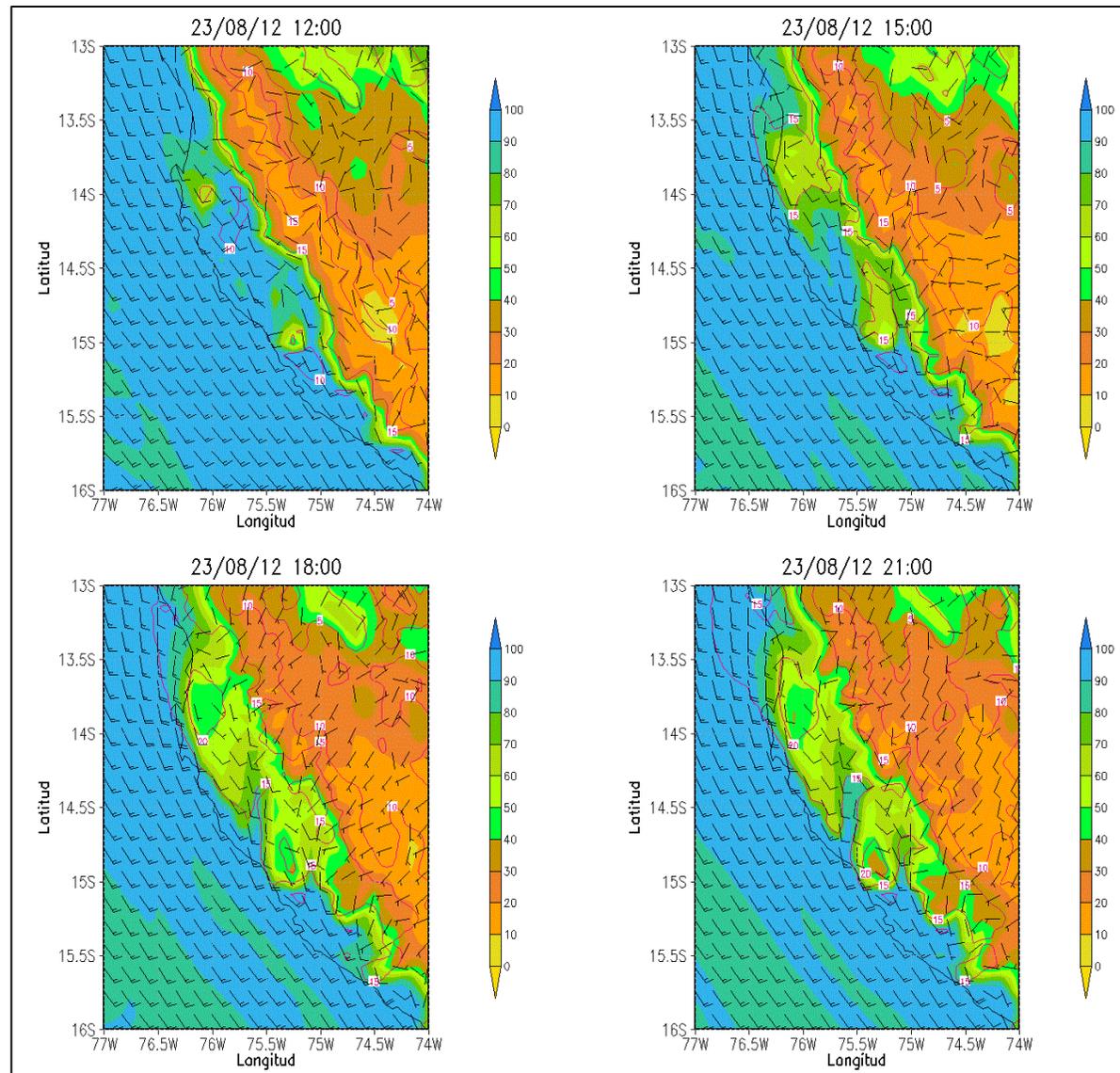


Figura 50: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (23 de agosto del 2012)

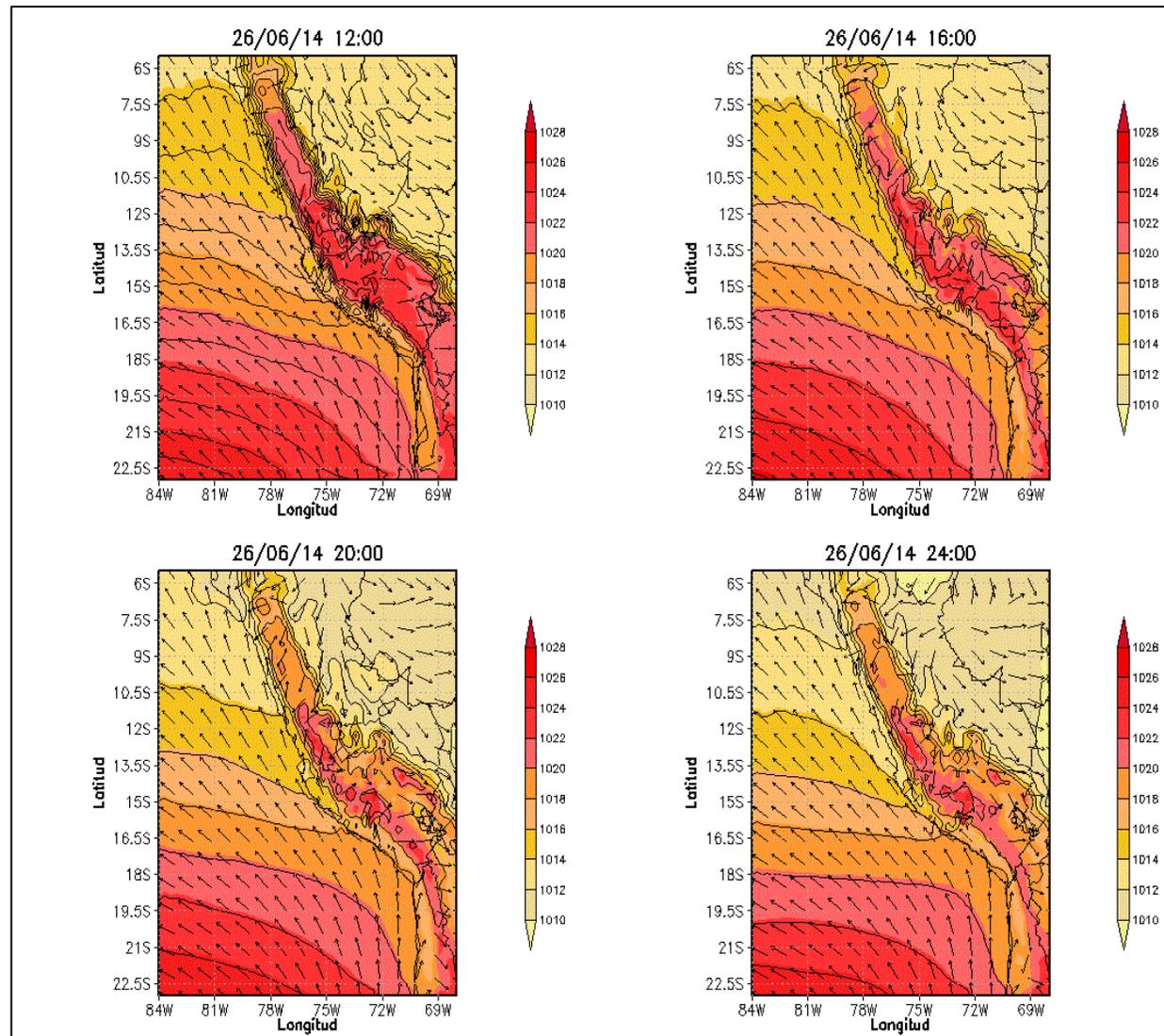


Figura 51: Mapas de perturbación de la presión (P), presión a nivel del mar (SLP) y campos de viento en superficie cada 4 horas (26 de junio del 2014)

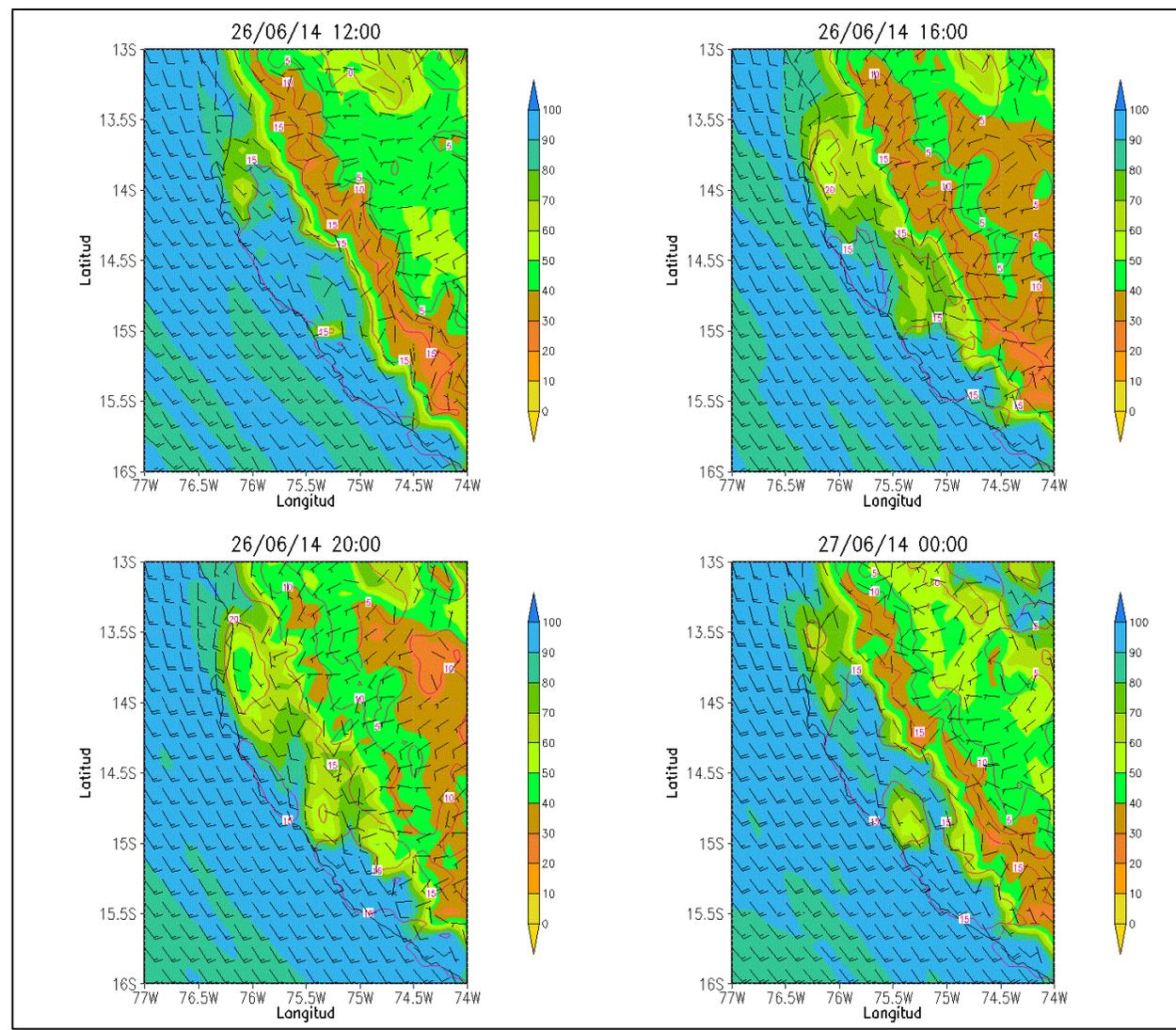


Figura 52: Mapas de humedad relativa (RH), temperatura del aire (T) y campos de viento cada 4 horas a 950hPa (26 de junio del 2014)

Luego de haber presentado los resultados de la corrida del modelo con la configuración adecuada para representar las variables meteorológicas durante la ocurrencia del Viento Paracas, procedemos a validar los resultados mediante las pruebas estadísticas.

4.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

4.2.1. Pruebas Estadísticas

La evaluación de las variables meteorológicas se realizó en base a las observaciones realizadas en cinco estaciones meteorológicas ubicadas en la región de Ica (Estación Aeropuerto Pisco, Ocucaje, Beta Santiago, Tacama y Copara) y la información obtenida por el modelo WRF para los cinco periodos de estudio en las cuales ocurrió el evento Paracas. De esta información fueron evaluados cuatro parámetros meteorológicos: Velocidad del viento a 10 m de la superficie, dirección del viento a 10 m de la superficie, temperatura a 2m de la superficie y humedad relativa a 2 m de la superficie. Los estadísticos utilizados fueron: coeficiente de correlación, BIAS, RMSE, EUB, desviación estándar (Pielke 2002) y FB (Gross 1994).

Velocidad del viento a 10 m de la superficie

El coeficiente de Pearson (r) es un indicador que se utiliza para medir el grado de asociación, entre los datos simulados y los observados, de forma general se puede decir que se encontró una asociación promedio superior a 0.6 entre las velocidades del viento simuladas y observadas, lo que indicó que el modelo representó en un 60% los valores observados. La estación con los coeficientes más elevados fue Copara, con un máximo de 0.85 y con una muestra de 21 observaciones.

Según la prueba t , se puede decir que para la velocidad del viento a 10 m de la superficie, en todas las estaciones rechazaron la hipótesis nula, lo que significa que las velocidades simuladas y observadas están relacionadas; a excepción de la estación Tacama para los casos 08 al 15 de octubre del 2008 y 17 al 23 de junio del 2012 (ver el anexo 6)

Es apreciable la buena representación tendencial entre las velocidades del viento simuladas y observadas, denotada por la diferencia mínima entre las desviaciones estándar de las mismas. El Bias y FB comprueban la subestimación de la velocidad del viento para

las estaciones Aeropuerto, Tacama y Copara, mientras que se sobreestima la velocidad del viento en las estaciones Ocucaje y Beta Santiago. Los valores de FB, para la estación Aeropuerto, son cercanos a 0, lo que indica que los valores simulados se acercan a los valores observados en dicha estación.

Los errores (EUB), en la mayoría de casos, fueron menores a la desviación estándar observada, lo que cumple con el tercer enunciado de Pielke; sin embargo RMSEV fueron mayores a la desviación estándar observada en la mayoría de periodos de estudio, no cumpliendo así, el segundo enunciado de Pielke donde manifiesta que la desviación estándar debe ser mayor al RMSE para tener una performance óptima del modelo. En promedio los errores medios cuadráticos (RMSEV) variaron entre 2.46 m/s y 5.46 m/s.

Como se observó en los resultados de esta investigación, la topografía local juega un rol muy relevante en la intensificación del viento, pero no cualquier topografía sino las que encuentran ubicadas en la línea de costa que oscilan entre 50 -200 metros de altitud.

En tablas 7 y 8, se puede apreciar, que el viento zonal fue subestimado en todas las estaciones meteorológicas a excepción de la estación Ocucaje, mientras que el viento meridional fue sobreestimado en la mayoría de los periodos en estudio. Por otro lado los errores medios son menores para el viento zonal. Los coeficientes de correlación fueron mayores para el viento meridional, que en promedio resultó un valor de 0.44. Por lo que se deduce una mejor representación del viento meridional.

Tanto el viento zonal como el viento meridional no cumplieron con el segundo y tercer enunciado de Pielke, ya que RMSE y EUB fueron mayores a la desviación estándar observada. Sin embargo las desviaciones estándar observadas y simuladas, para el viento zonal y meridional, fueron bastante parecidas con una diferencia promedio de 0.53 y 0.13 respectivamente.

Se aprecia que en ambas rosas entre lo simulado y observado, la mayoría de los vientos vienen del sur y suroeste, sin embargo los vientos simulados indican que vienen del sur y sureste.

Para el viento zonal a 10 m de la superficie, se puede decir que las estaciones Aeropuerto Pisco, Ocucaje, Copara y Beta Santiago en la mayoría de los periodos de estudio rechazaron la hipótesis nula, por el contrario ocurrió en la estación Tacama donde se aceptó la hipótesis nula. Para el viento meridional, en la mayoría de periodos, rechazaron la hipótesis nula lo que significa que los vientos meridionales simulados y observados están relacionados.

Tabla 6: Análisis estadístico de la velocidad del viento a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIAS	FB	RMSEV	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.51	-0.32	0.12	3.61	1.81	2.04	1.52
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.40	-0.97	0.35	3.60	1.88	1.90	1.49
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.66	0.59	-0.18	3.83	2.17	2.83	2.36
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.59	0.04	-0.01	4.65	2.43	2.67	2.71
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.71	-0.02	0.01	3.28	2.07	2.86	2.44
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.67	-0.07	0.03	2.99	1.59	2.10	1.08
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.56	0.27	-0.10	2.46	1.91	2.03	2.03
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.46	2.81	-0.83	4.56	1.96	1.58	2.11
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.70	2.32	-0.58	4.77	1.87	2.39	2.42
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.73	2.15	-0.65	3.49	1.78	2.12	2.58
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.44	1.90	-0.70	4.48	1.42	1.11	1.50
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.65	1.24	-0.39	5.46	1.61	1.97	1.86
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.76	1.64	-0.59	4.93	1.37	1.28	2.05
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.62	-0.79	0.50	2.78	2.09	2.58	1.07
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.38	-0.62	0.28	2.99	2.38	2.57	0.93
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.32	0.74	-0.31	2.84	1.82	1.89	0.92
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.47	-0.54	0.16	3.35	2.58	2.90	1.06
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.57	-1.49	0.42	5.09	3.41	3.98	1.33
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.66	-1.35	0.73	2.61	1.17	1.55	1.04
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.85	-1.70	0.81	3.05	1.26	2.14	1.25
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.56	-0.46	0.22	3.83	1.90	1.68	2.24
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.80	-0.79	0.29	5.01	1.98	2.41	3.29
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.64	0.35	-0.15	5.20	2.55	1.64	3.27

Tabla 7: Análisis estadístico del viento zonal a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIAS	FB	RMSE	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.51	-1.10	3.03	2.46	2.20	2.49	1.75
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.64	-1.60	1.30	2.29	2.27	2.00	1.80
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.55	-0.86	0.84	2.40	2.25	2.58	2.02
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.56	-1.77	1.52	3.00	2.42	2.87	2.06
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.57	-0.48	0.89	2.35	2.30	2.70	2.15
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.19	-0.05	-0.07	1.76	1.76	0.91	1.35
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.29	-0.09	-0.10	1.27	1.27	1.19	0.91
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.01	-1.75	-1.82	2.19	1.31	0.83	1.02
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.16	-1.77	-1.88	2.97	2.38	1.97	1.06
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.04	-1.45	-1.57	1.99	1.36	0.77	1.09
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.25	0.74	1.14	1.78	1.62	1.67	0.57
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.22	1.14	1.23	2.83	2.59	2.35	0.69
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.22	1.30	1.50	2.07	1.62	1.64	0.58
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.25	-0.74	2.20	2.02	1.88	1.86	1.03
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.41	-0.63	1.40	2.36	2.27	2.45	1.43
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.27	-0.26	7.79	2.19	2.17	1.85	1.75
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.56	-0.17	-0.18	1.59	1.58	1.79	1.54
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.16	1.21	1.37	3.25	3.02	2.69	1.85
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.59	-1.37	1.66	2.14	1.65	2.03	1.02
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.79	-1.52	1.04	2.03	1.34	2.11	1.38
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.50	-1.14	1.37	1.70	1.26	1.32	1.20
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.29	-1.80	1.46	2.72	2.04	1.96	1.37
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.27	-1.41	1.41	2.26	1.76	1.31	1.59

Tabla 8: Análisis estadístico del viento meridional a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIAS	FB	RMSE	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.45	1.56	-3.50	2.64	2.13	2.13	1.89
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.05	-0.04	0.05	2.78	2.91	2.23	1.77
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.48	1.34	-0.63	2.98	2.66	2.57	2.62
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.32	1.21	-0.48	3.55	3.34	2.62	3.07
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.70	0.47	-0.18	2.29	2.24	3.00	2.73
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.24	-0.42	2.31	2.41	2.37	2.27	1.42
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.54	0.59	-0.28	2.10	2.02	2.19	2.02
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.55	3.47	-1.32	4.00	1.99	2.21	1.95
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.54	2.86	-0.87	3.74	2.41	2.56	2.46
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.74	2.26	-0.79	2.86	1.75	2.42	2.46
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.33	3.68	-2.10	4.11	1.84	0.69	1.50
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.08	4.02	-2.32	4.67	2.39	1.65	1.87
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.18	3.86	-2.42	4.47	2.26	0.61	2.07
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.75	0.15	-0.22	1.90	1.90	2.50	0.95
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.60	-0.19	0.19	1.84	1.83	2.27	1.26
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.54	0.56	-0.47	1.81	1.72	1.82	1.79
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.52	-0.22	0.09	2.96	2.95	3.45	1.57
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.37	-2.05	0.81	3.92	3.34	3.51	1.98
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.48	-0.53	3.20	1.48	1.39	1.50	1.18
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.00	-1.01	-46.22	2.28	2.04	1.92	0.69
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.16	-0.73	0.94	3.43	3.35	1.76	2.59
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.17	0.55	-1.07	4.20	4.17	2.67	3.69
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.51	0.46	-0.51	4.69	4.66	1.59	3.66

Dirección del viento a 10 m de la superficie

La dirección del viento fue la variable con más dificultad de simular, debido a que es influenciada por una serie de factores, siendo uno de los principales la topografía de la región.

Los coeficientes de correlación resultaron bastante bajos los cuales no fueron superiores al valor de 0.57, encontrándose las correlaciones más elevadas en la estación Aeropuerto (promedio 0.48) y las más bajas en las estaciones Ocucaje y Beta Santiago con un promedio de 0.10 y 0.06. Según a prueba t, la estación Aeropuerto Pisco fue la única estación que presentó relación significativa entre la dirección del viento simulado y observado para los cinco periodos de estudio, ya que el resto de estaciones no se rechazó la hipótesis nula.

No existe similitud entre la desviación estándar de la dirección del viento simulada y observada, en la cual existe una diferencia promedio aproximada de 36° . El RMSED es mayor a 50° , sin preferencia a mostrar una desviación a la derecha o izquierda respecto al vector observado. De acuerdo a los resultados de sesgo fraccional (FB), se puede decir de manera general, que la dirección del viento fue subestimada por el modelo para las cinco estaciones en estudio.

Además es importante mencionar que no se cumple ninguno de los enunciados de Pielke, por lo que el modelo no resulta eficiente para simular esta variable meteorológica.

Tabla 9: Análisis estadístico de la dirección del viento a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIASD	FB	RMSD	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.50	76.44	0.11	100.10	98.13	111.26	72.02
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.50	73.14	0.30	94.77	74.12	62.90	82.00
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.57	51.42	0.14	62.37	55.57	65.38	50.35
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.27	58.85	0.15	73.24	67.09	59.37	50.83
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.57	40.38	0.04	52.28	51.86	58.50	53.39
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.12	70.27	0.01	96.72	94.94	74.36	50.65
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.02	60.25	-0.01	86.35	85.00	69.21	50.45
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.22	71.28	0.14	92.42	87.92	89.92	13.01
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.13	61.96	0.02	86.21	84.27	80.79	37.06
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.01	57.83	-0.01	77.00	75.77	169.77	155.81
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.02	90.28	-0.31	96.52	84.07	83.59	11.06
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.07	96.79	-0.52	102.97	73.77	71.14	14.90
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.08	99.24	-0.43	104.79	84.11	81.77	14.26
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.09	76.61	0.21	97.84	88.88	76.72	52.74
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.47	45.69	0.08	63.10	63.10	219.23	202.96
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.62	43.98	-0.08	58.73	56.45	62.93	66.13
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.49	32.10	0.06	50.35	49.14	49.93	47.66
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.17	64.83	-0.15	85.44	81.02	39.29	64.49
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.41	88.93	0.27	116.41	102.16	61.83	110.67
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.42	84.98	0.13	107.32	102.91	44.71	113.50
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.15	116.75	0.11	132.30	130.14	38.63	118.65
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.31	99.86	0.58	123.95	100.11	50.39	103.42
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.18	118.47	0.36	135.26	112.14	32.96	101.37

Temperatura del aire a 2m de la superficie

Los valores de la Tabla 10, para los casos Vientos Paracas, mostraron coeficientes de correlación de Pearson de signo positivo con valores, en promedio, superior a 0.70, mostrando que el modelo reproduce satisfactoriamente la variabilidad de la temperatura en todos los periodos de estudio. Esta reproducción óptima del modelo, para la variable temperatura del aire, se comprobó mediante la prueba t donde se rechazó la hipótesis nula, lo que quiere decir que las correlaciones son significativas.

El BIAS mostró que el modelo tiene una tendencia a sobrestimar ligeramente la temperatura, cuyos resultados se pueden observar en todos los periodos de estudio, en promedio en 0.72°C ; sin embargo es importante destacar que los valores de FB fueron cercanos a cero, lo que indica la cercanía de los datos simulados y observados para esta variable. El modelo logró reproducir el ciclo diurno, sin embargo, el descenso de temperatura se mostró más elevado de lo que indicaron las observaciones, esto puede ser debido a que la resolución del modelo fue suficiente para reproducir los sistemas de mesoescala y su influencia en la temperatura, pero no muy eficaz para reproducir fenómenos atmosféricos de menor escala que influyen en tal variación.

Se cumple, para todas las estaciones (excepto la estación Tacama), que las desviaciones estándar de los datos simulados y observados fueron muy similares con una diferencia de 0.35, por lo que se cumple la primera condición de Pielke, que el patrón de variación tiene la misma amplitud tanto en lo simulado como en lo observado. Asimismo también se cumple la segunda y la tercera condición de Pielke, ya que los valores RSME y EUB fueron menores a las desviaciones estándar observadas. Los errores que se encontraron al evaluar la temperatura variaron de 1.8°C a 3.7°C para el RMSE.

Tabla 10: Análisis estadístico de la temperatura del aire a 2 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIAS	FB	RMSE	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.83	1.03	-0.06	1.81	1.49	2.38	2.62
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.81	-1.77	0.10	2.31	1.48	2.01	2.52
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.77	0.46	-0.02	1.88	1.82	2.42	2.83
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.20	-0.54	0.03	3.50	3.46	2.25	3.13
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.85	-0.64	0.03	1.81	1.69	2.40	3.14
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.88	-0.08	0.00	3.15	3.15	5.39	2.88
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.89	0.23	-0.01	2.59	2.58	5.56	4.43
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.72	0.27	-0.01	2.72	2.70	3.88	2.75
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.81	0.13	-0.01	2.57	2.57	4.37	3.41
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.85	0.36	-0.02	2.05	2.02	3.85	3.11
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.82	1.92	-0.11	2.96	2.25	3.89	3.30
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.83	0.38	-0.02	2.64	2.61	4.65	4.11
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.89	0.94	-0.06	1.97	1.73	3.89	3.74
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.95	0.47	-0.02	2.06	2.01	5.61	4.30
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.88	0.99	-0.05	2.89	2.72	5.17	5.73
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.83	2.19	-0.11	3.43	2.64	4.58	4.46
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.93	1.08	-0.06	2.44	2.19	4.25	5.51
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.90	0.86	-0.05	2.24	2.07	4.51	4.73
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.99	-1.19	0.06	2.20	1.85	6.03	4.36
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.93	-1.52	0.07	3.70	3.37	6.14	3.23
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.97	0.07	0.00	1.83	1.83	5.73	4.41
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.97	0.09	-0.01	1.76	1.76	5.86	4.69
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.94	-0.34	0.02	1.87	1.84	5.15	4.54

Humedad relativa a 2 m de la superficie

Se puede decir que las simulaciones de la humedad relativa a 2 m de la superficie mostraron que las desviaciones estándares simulados y observadas, en promedio, tienen una diferencia de 5.38%, la raíz del error medio cuadrático medio (RMSE) y el RMSE centrado (EUB) fueron mayores a las desviaciones estándares de las observaciones, por lo que no cumple con ninguna de las condiciones de Pielke, señalando así que el modelo no tiene una performance óptima para este tipo de eventos. Sin embargo, el modelo reproduce buena parte de la variabilidad

Los coeficientes de correlación tuvieron valores por encima a 0.60 para los casos estudiados en las estaciones Aeropuerto, Ocucaje, Beta Santiago, Tacama y Copara, por lo que existe grado significativo de asociación entre ambas variables. Según la prueba t, existen relaciones significativas entre los valores de humedad relativa simulados y observados para todas las estaciones en estudio, en todos los periodos de estudio.

Según BIAS y FB, el modelo sobreestimó los valores de humedad relativa para las estaciones automáticas (Aeropuerto, Ocucaje y Beta Santiago), mientras que subestimó los valores para las estaciones Tacama y Copara.

Tabla 11: Análisis estadístico de la humedad relativa a 2 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	r	BIAS	FB	RMSE	EUB	σ obs	σ sim
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.72	-0.85	0.01	10.30	10.27	5.48	13.51
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.64	8.47	-0.10	12.29	8.91	6.65	11.56
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.68	1.55	-0.02	9.72	9.60	7.68	13.01
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.23	1.98	-0.03	14.80	14.67	6.87	14.63
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.75	5.63	-0.07	11.37	9.88	8.56	14.50
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	0.94	9.68	-0.12	11.27	5.76	16.68	15.50
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.88	8.06	-0.10	13.12	10.35	18.89	21.47
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.87	3.08	-0.04	8.48	17.76	15.71	14.94
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.80	6.78	-0.09	13.03	20.23	17.01	17.82
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.84	3.34	-0.04	9.53	17.42	14.43	16.56
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.80	0.66	-0.01	10.52	17.77	14.37	17.33
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.83	4.58	-0.06	12.58	21.87	17.06	20.90
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.87	4.78	-0.06	10.72	20.04	14.50	19.01
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.85	-12.20	0.15	17.73	25.48	12.20	21.60
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.73	-18.52	0.26	26.18	32.05	15.27	26.35
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.84	-16.25	0.20	21.38	27.41	10.48	21.56
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.88	-17.68	0.23	23.67	33.44	11.83	25.18
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.83	-16.59	0.21	22.61	30.74	8.84	21.90
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.92	-2.42	0.04	7.76	16.72	19.00	17.11
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.76	-2.37	0.04	12.21	19.78	18.44	13.33
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.85	-3.68	0.06	10.38	14.24	18.68	16.29
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.60	-14.19	0.24	21.42	20.78	19.72	14.29
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.87	-7.81	0.12	11.39	18.92	16.59	16.25

V. CONCLUSIONES

El análisis y discusión de los resultados permiten concluir lo siguiente:

Se identificaron dos configuraciones adecuadas para representar el Viento Paracas. La primera para la simulación de la dirección y la velocidad del viento y la segunda para simulación de la temperatura del aire y la humedad relativa, teniendo en cuenta que la diferencias entre ambas se debe sólo a dos parámetros físicos (microfísica y parametrización de cúmulos). Tales configuraciones permitieron simular las variables meteorológicas en estudio para los 5 periodos (durante el Viento Paracas), con una resolución espacial de 3 km (tercer dominio) y con una resolución temporal horaria:

- a) Los resultados obtenidos permiten, por un lado, validar la configuración local de WRF con datos superficiales, mientras que por otro, permite obtener una descripción global de la evolución espacial y temporal de un viento Paracas que afecta a la Región Ica.

Según el proceso de validación para las 4 variables meteorológicas en estudio, las simulaciones se encontraron asociadas significativamente a las observaciones. Además el modelo fue capaz de reproducir la variabilidad asociada a la escala sinóptica de las variables en estudio. Las características resaltantes del proceso de validación son los siguientes:

- a) Para el caso del viento, de forma general, se concluyó que el modelo sobreestimó la magnitud de la velocidad del viento. Además, el modelo identificó los cambios bruscos de la velocidad del viento, cuando estas velocidades superaron los 10-12 m/s, el modelo se volvió incapaz de detectar estas magnitudes, por lo que fueron subestimadas. En condiciones de viento menores a 6 m/s, el modelo subestima la magnitud mientras que al superar los 6m/s sobreestima los valores. Los resultados de la validación no fueron favorables para la dirección del viento ni para las componentes del vector velocidad.

- b) El modelo fue capaz de reproducir gran parte del ciclo diurno de temperatura y humedad relativa. Los máximos de temperatura fueron ligeramente subestimados, mientras que los mínimos de temperatura fueron sobrestimados. La temperatura fue la variable mejor simulada por el modelo y la única que cumplió todos los enunciados de Pielke. El modelo tiene una tendencia a sobrestimar los máximos diurnos y sobrestimar los mínimos diurnos.

- c) Las pruebas desarrolladas en esta investigación no confirman lo expuesto en la hipótesis, ya que la performance del modelo WRF para simular las condiciones atmosféricas durante la ocurrencia del evento Viento Paracas, con las configuraciones presentadas, no se cumplió para todas las variables en estudio, por lo que aún no se encuentra listo para poder ser utilizado como fuente predictora de próximos eventos de similar magnitud.

VI. RECOMENDACIONES

Para mejorar las capacidades del modelo WRF durante la ocurrencia del Viento Paracas, se recomienda realizar cambios a la configuración del modelo a través de pruebas de sensibilidad, con el fin de calibrar el modelo al seleccionar los esquemas. Se sugiere el uso de datos de relieve de mayor resolución para los datos de entrada del modelo.

Además se recomienda probar otras resoluciones espaciales, las cuales hayan sido utilizadas para eventos de similar magnitud y en la misma escala, que permitan obtener mejores resultados.

Asimismo, se recomienda realizar el mismo análisis, con la metodología propuesta utilizando el modelo WRF, para eventos ocurridos en los meses de verano, los cuales no fueron analizados en la presente investigación.

Realizar la verificación del modelo, utilizando criterios técnicos y apropiados, para una calificación cualitativa de los resultados obtenidos con el modelo WRF durante la ocurrencia del Viento Paracas.

Continuar el estudio de la dinámica y origen de los vientos superficiales en las zonas de mayor potencial eólico, como lo son las localizadas en la costa central del Perú (Región Ica).

Por otra parte, el conjunto de los resultados obtenidos con la aplicación del modelo WRF a la región de Ica, podría inferir que el modelo represente en tiempo real mediante una implementación de manera operativa por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Lo que será capaz de reproducir con bastante exactitud las condiciones atmosféricas asociadas al evento Viento Paracas, por lo que su implementación de manera operativa ofrece grandes ventajas para el pronóstico del tiempo.

VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Escobar, D. 1993. Evaluación Climatológica y Sinóptica del Fenómeno de Viento Paracas. Tesis Lic. Ing. Meteorólogo. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina.
- Fernández, R.; Lakkis, G.; Allende, D.; Santos, R.; Cremades, P.; Puliafito, E. 2011. Modelización de un evento meteorológico de mesoescala utilizando el modelo WRF. Mendoza, Argentina, Universidad Tecnológica Nacional. p. 289-298.
- Garreaud, R. and Muñoz R., 2005. The Low-Level Jet off the West Coast of subtropical South America Structure and Variability. *Monthly Weather Review*, Vol. 133, p. 2246–2261.
- Gavidia, M. 2011. Simulación de las variables meteorológicas en la ciudad de Lima para el verano e invierno de 2009 con el modelo Weather Research and Forecasting. (WRF). Tesis Lic. Ing. Ambiental. Lima, Perú, Universidad Agraria La Molina. 116 p.
- Gutiérrez, A. 2011. Herramientas de Predicción de muy corta y corta duración de la Energía Eólica. Tesis Mag. Sc. Montevideo, Uruguay, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Universidad de la República. p. 75 – 80.
- Hernández, R. 2010. Metodología de la investigación. Universidad de Celaya. 5 ed. Mc Graw Hill. 656 p.
- Hu, X.; Nielsen-Gammon, J.; Zhang, F. 2010. Evaluation of three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model. Texas, USA, Department of Atmospheric Sciences, Texas A&M University, College Station.
- Jacobson, M. Z. 2005. *Fundamentals of Atmospheric Modeling (Second.)*. New York: Cambridge University Press. 813p
- MetEd. 2010. Funcionamiento de los modelos de mesoescala. COMET. Consultado 05 abril 2014. Disponible en www.meted.ucar.edu.

- NCAR.2008. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, A description of the Advanced Research WRF. v 3.
- Pielke, R. 2002. Mesoscale Meteorological Modeling. International Geophysics Series. 2 ed. 676 p.
- Quijano, J. 2013. Estudio numérico y observacional de la dinámica de Viento Parcas, asociado al transporte eólico hacia el océano frente a la costa de Ica- Perú. Tesis Mag. Sc. Lima, Perú, Escuela de Postgrado Víctor Alzamora Castro de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. 135 p.
- Quijano, J. 2011. Simulación de la dinámica del viento superficial sobre la costa de Ica utilizando el modelo numérico de la atmósfera de mesoescala MM5. Tesis Lic. Ing. Mecánica. Lima, Perú, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 150 p.
- Quispe, N. 2009. Estructura dinámica de una baja fría. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Perú. p. 131-132.
- López, J. 2009. Análisis del evento meteorológico del 2007 relacionado con la inundación de Tabasco. Tesis Mag. Sc. Física de la Atmósfera. México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., et al. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Atmospheric Research. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research: Boulder,CO.
- Thompson, G.; Field, P.; Hall, W. & Rasmussen, R. 2006. A New Microphysical Parameterization for WRF (& MM5). National Center for Atmospheric Research.
- Wilks, D. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences. San Diego, US, Cornell University. 2 ed. 630 p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1 Área de estudio

La región de Ica, representada en la Figura a, se encuentra localizada en la costa central del Perú, entre los 12°59'S - 15°26'S y los 75°03'W – 76°26'W. Posee un área de 21 327.83 km² con una población de 2 822 076 millones de habitantes. El clima de la región Ica es templado y desértico. La humedad atmosférica es alta en el litoral y disminuye hacia el interior. Su temperatura media en verano es de 27°C y en invierno de 18°C. Normalmente, la temperatura máxima no excede de 30°C y la mínima no desciende a menos de 8°C. Una característica de su clima son los fuertes vientos denominados "paracas", que suelen levantar grandes nubes de arena. El litoral de la provincia de Ica es reducido; pero forma parte del flanco occidental de la Cordillera de los Andes, con un relieve muy accidentado, en el que destacan las quebradas profundas, erosionadas por los ríos; estribaciones andinas, formadas por cadenas de montañas que van perdiendo elevación hacia la costa.

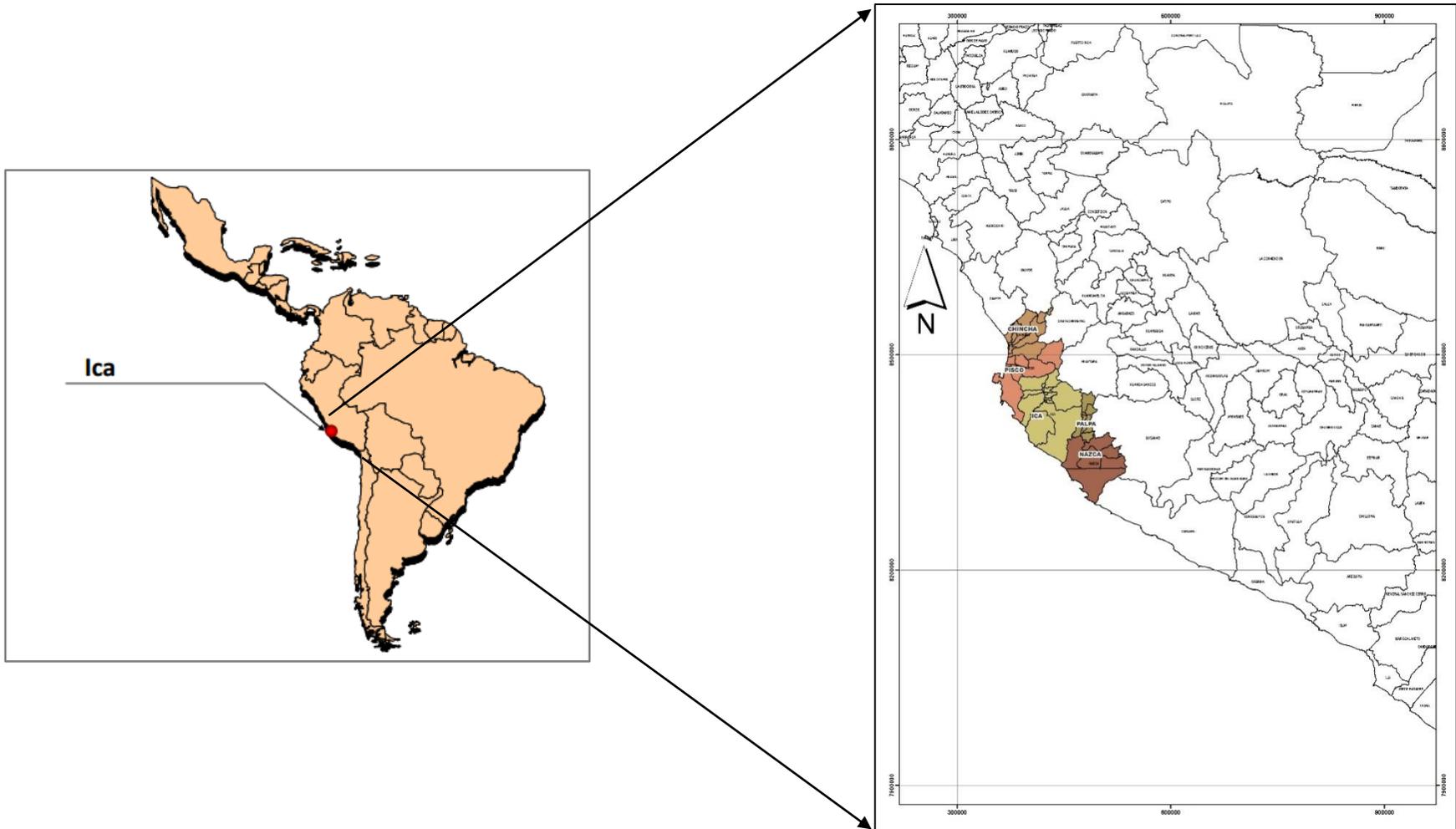


Figura a: Ubicación del área de estudio

ANEXO 2 Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas

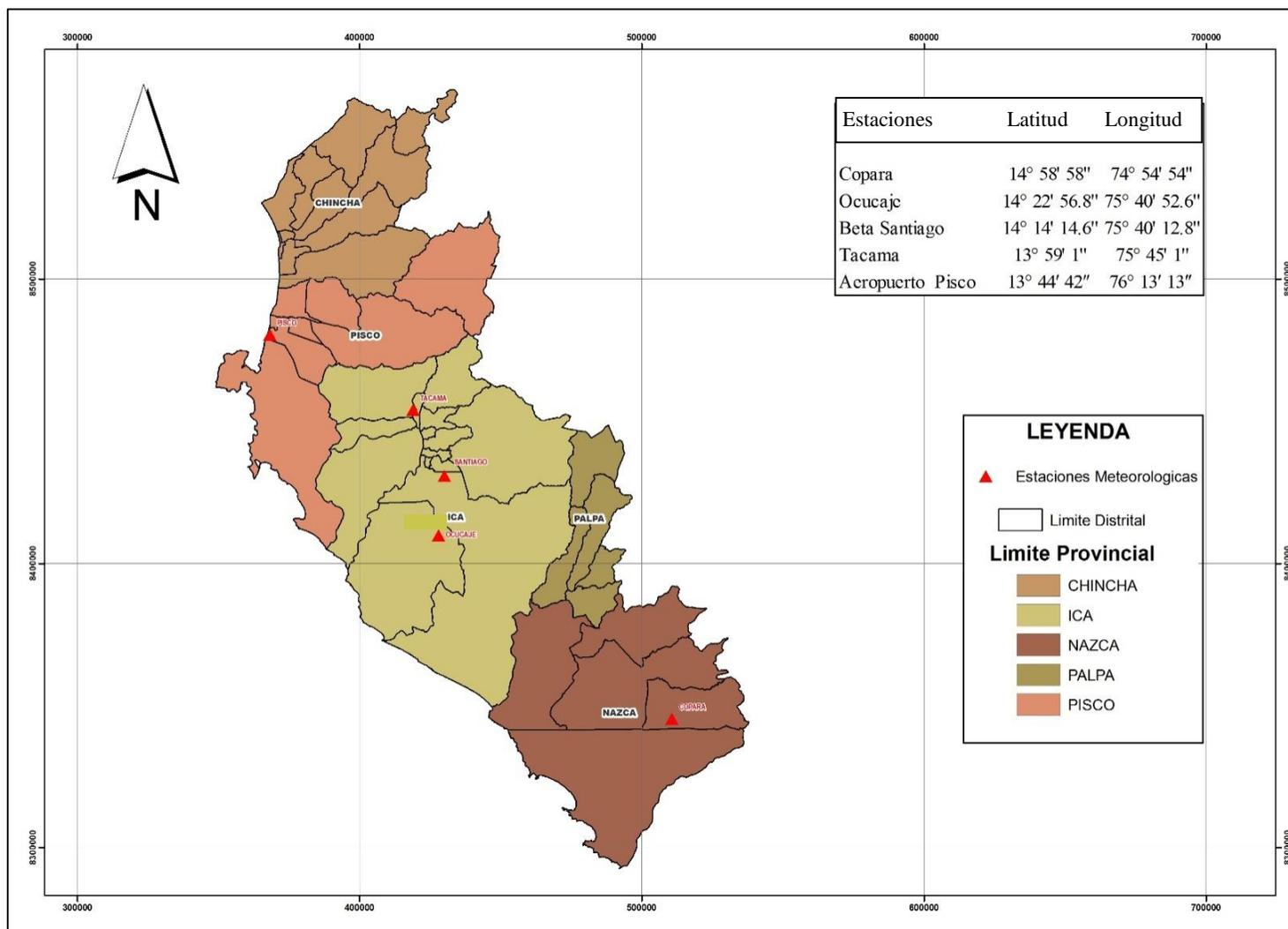


Figura b: Ubicación de las estaciones meteorológicas

ANEXO 3 Visualización de los dominios

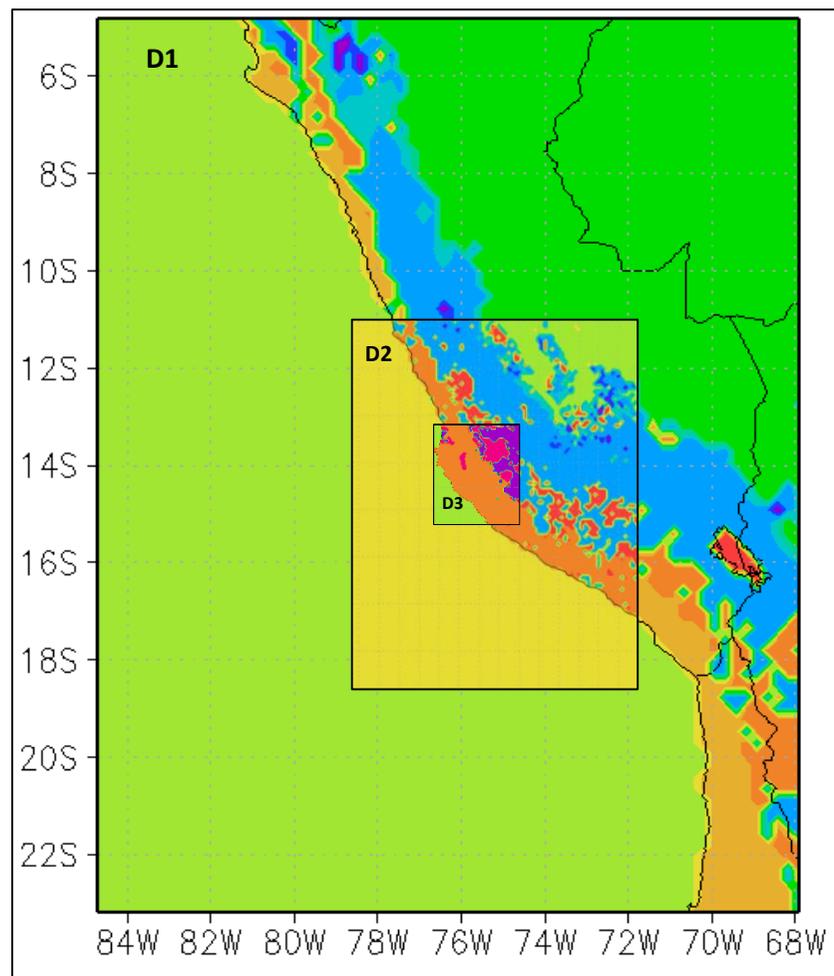
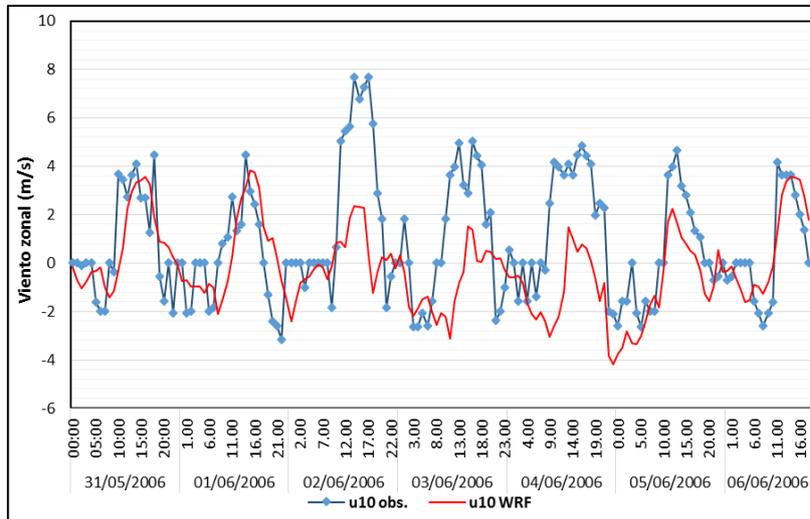


Figura c: Visualización de los dominios usados por el modelo WRF

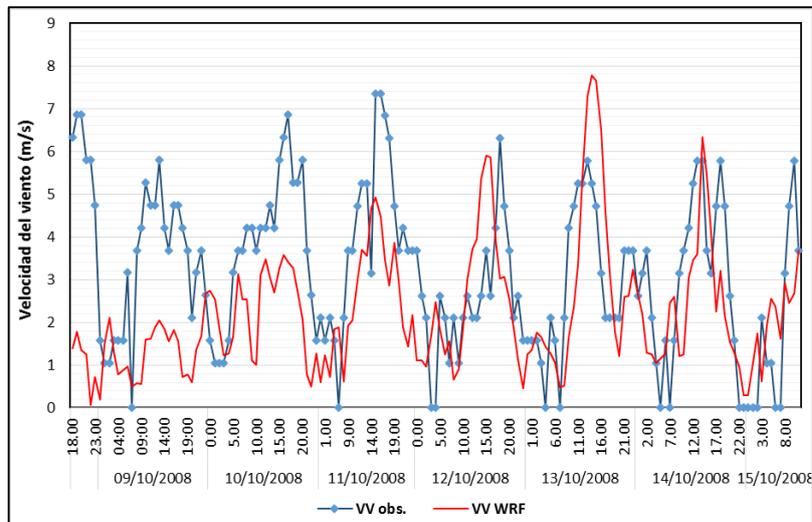
ANEXO 4 Resultados de comparación temporal del viento zonal y meridional de las simulaciones y los datos observados

a. Viento zonal a 10 de la superficie

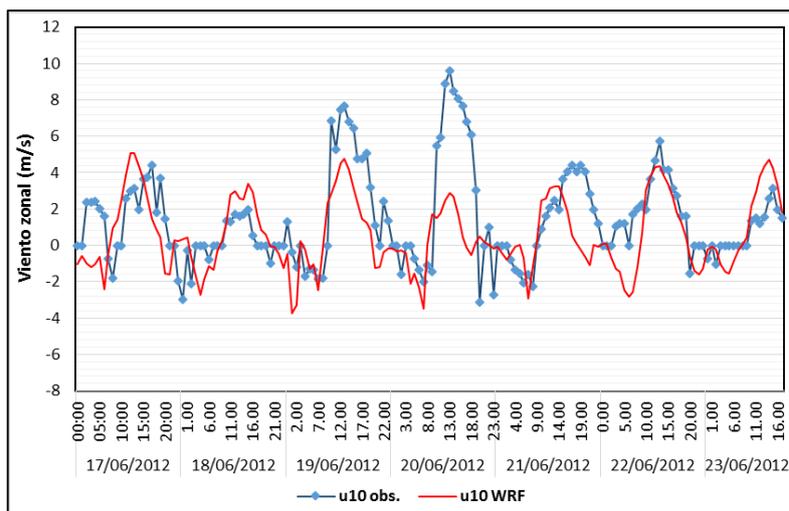
Comparación temporal del viento zonal para la Estación Aeropuerto - Pisco



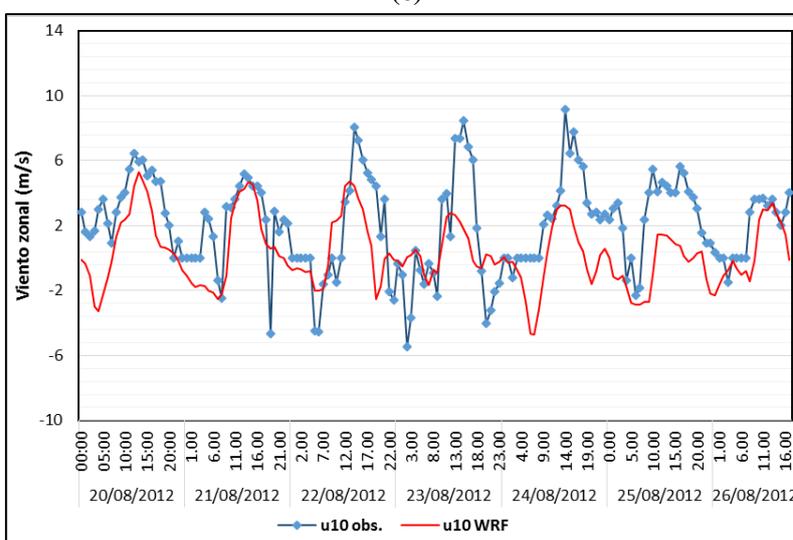
(a)



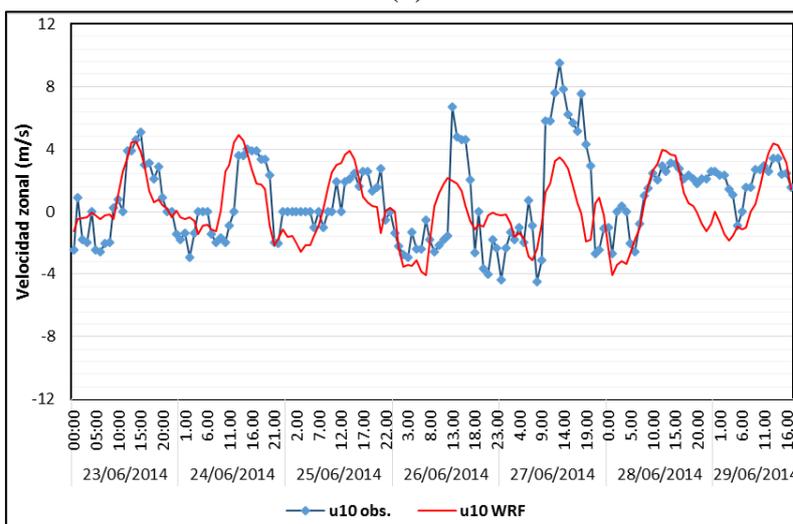
(b)



(c)



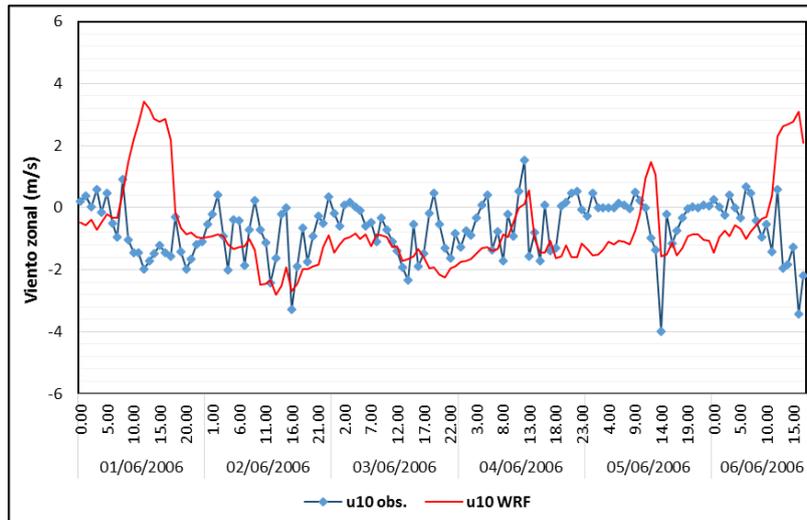
(d)



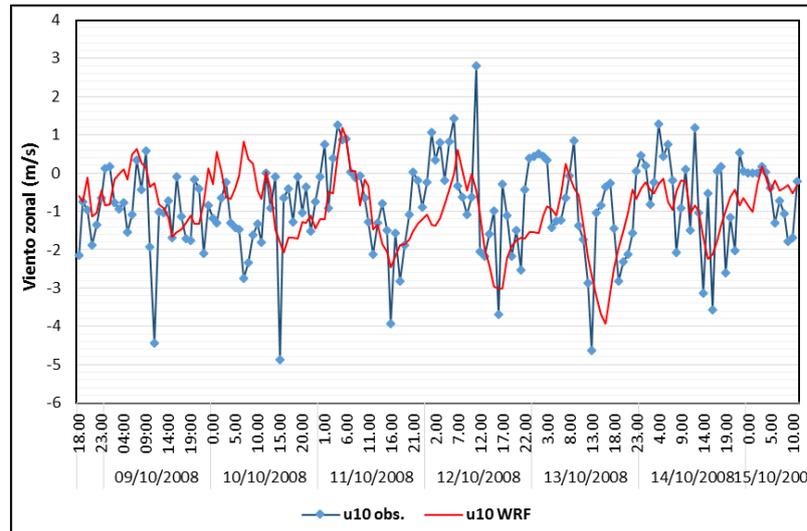
(e)

Figura d: Comparación temporal del viento zonal a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Aeropuerto del periodo: a) 31/05/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

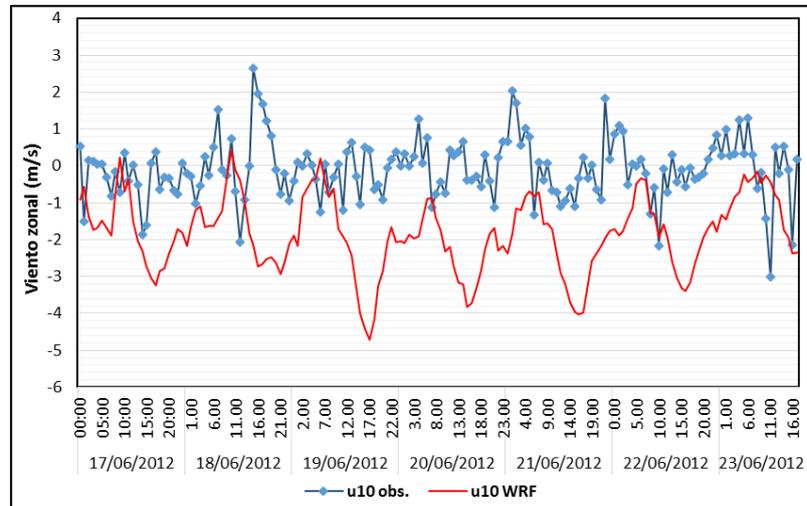
Comparación temporal del viento zonal para la Estación Ocucaje



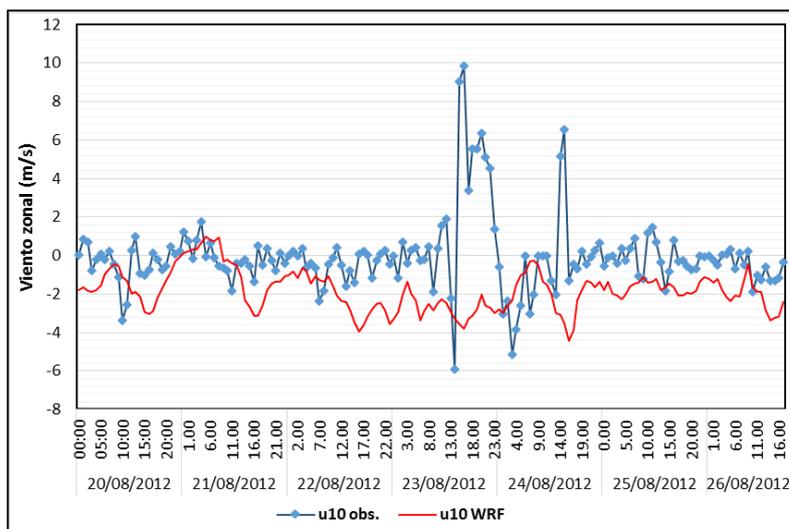
(a)



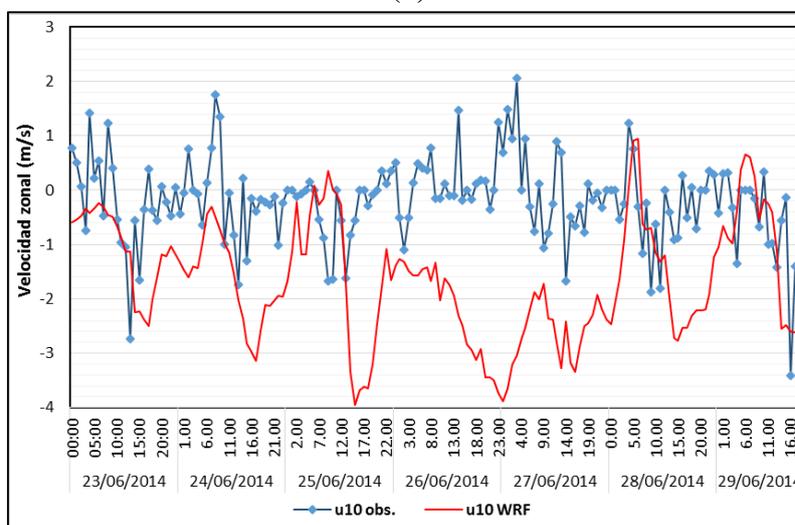
(b)



(c)



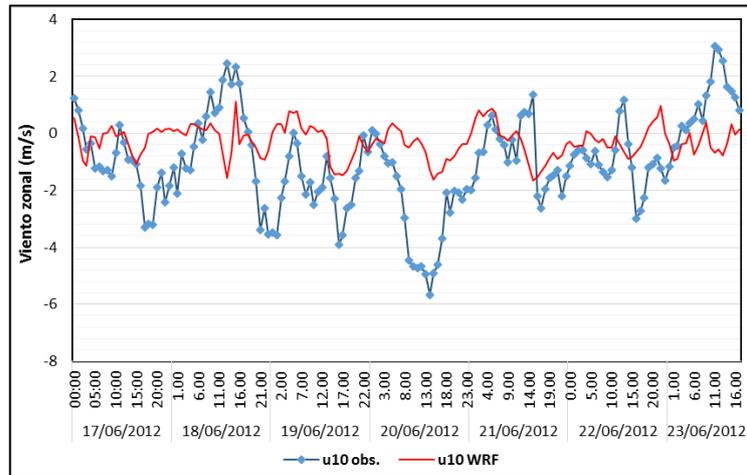
(d)



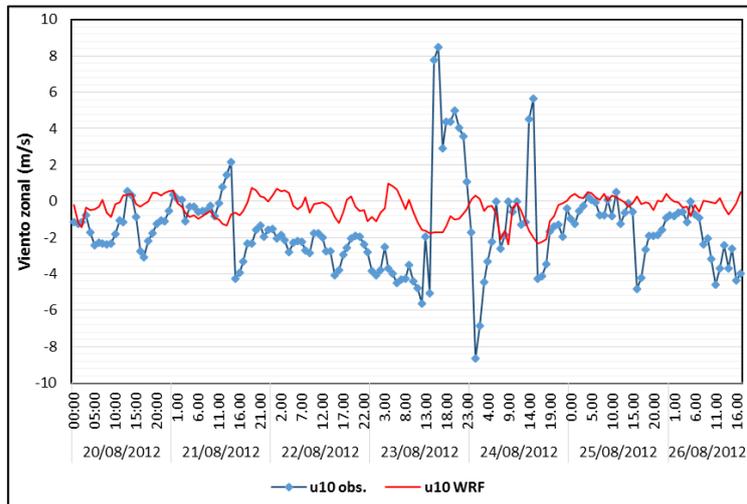
(e)

Figura e: Comparación temporal del viento zonal a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

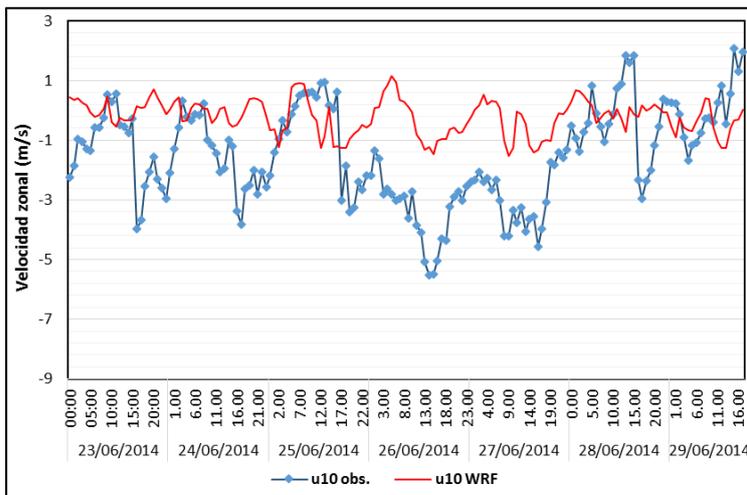
Comparación temporal del viento zonal para la Estación Beta Santiago



(a)



(b)

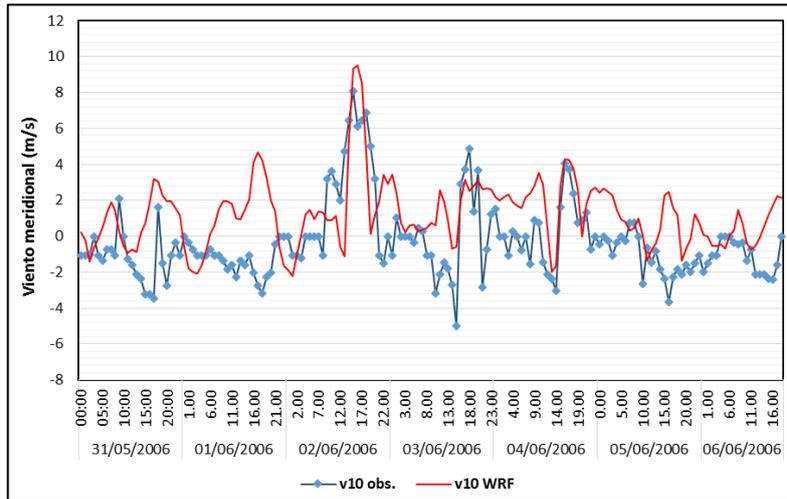


(c)

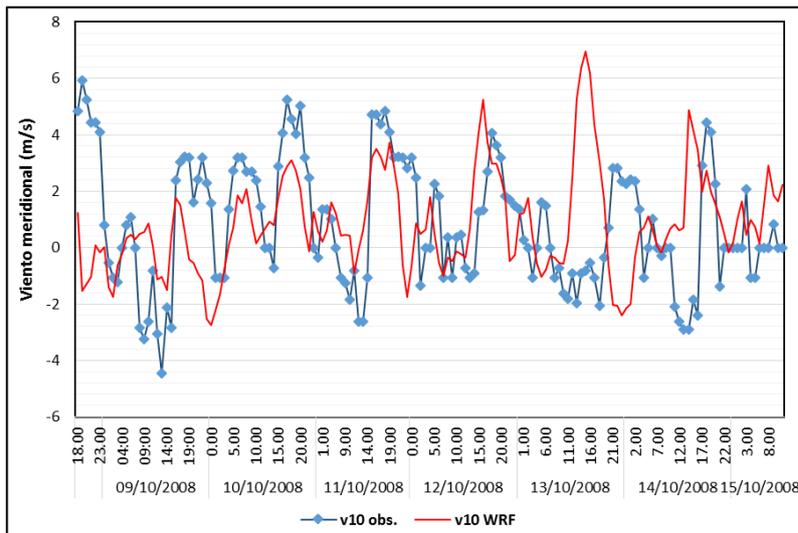
Figura f: Comparación temporal del viento zonal a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.

b. Viento meridional a 10 m de la superficie

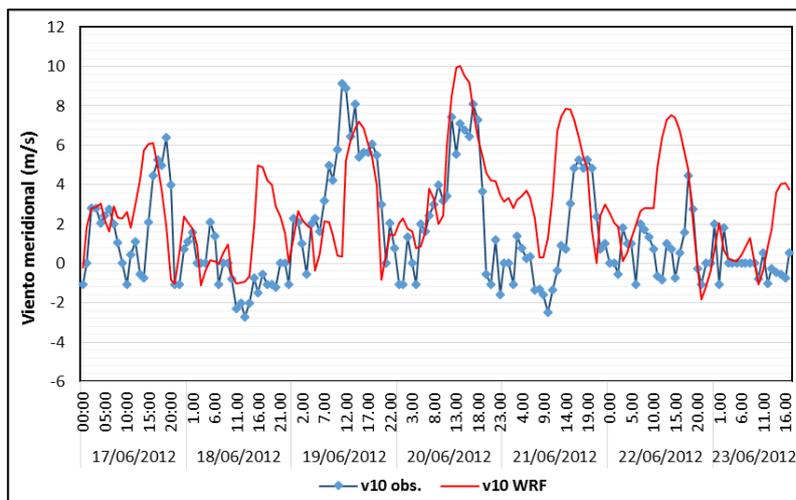
Comparación temporal del viento meridional para la Estación Aeropuerto Pisco



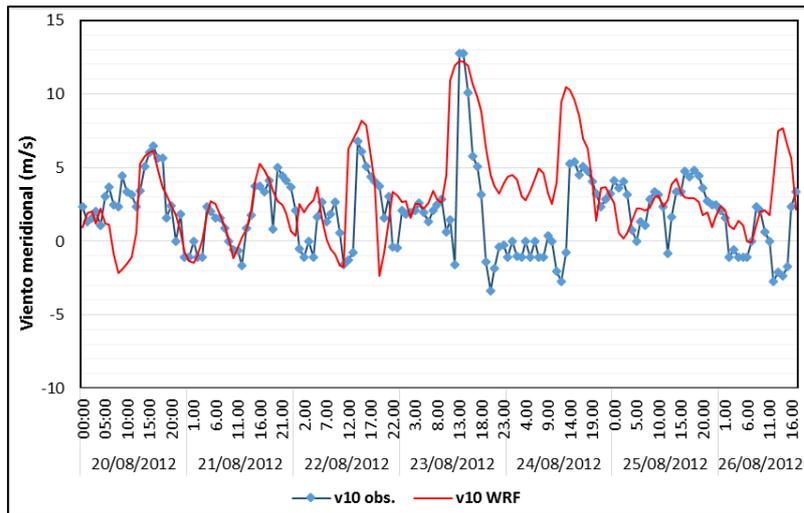
(a)



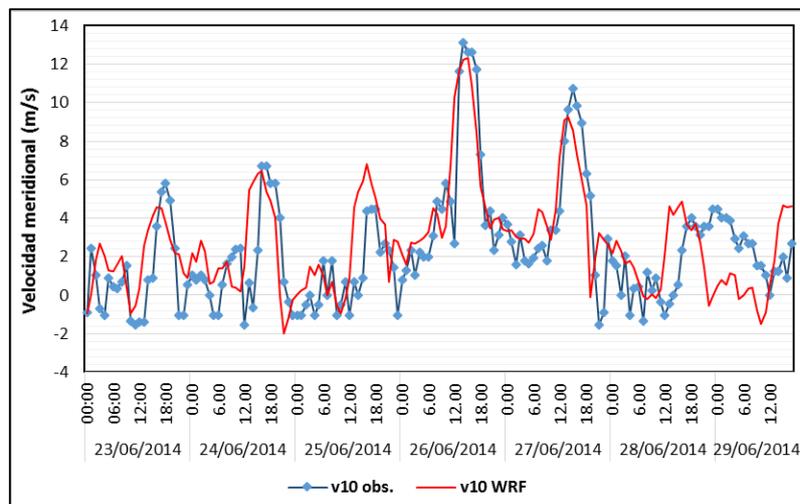
(b)



(c)



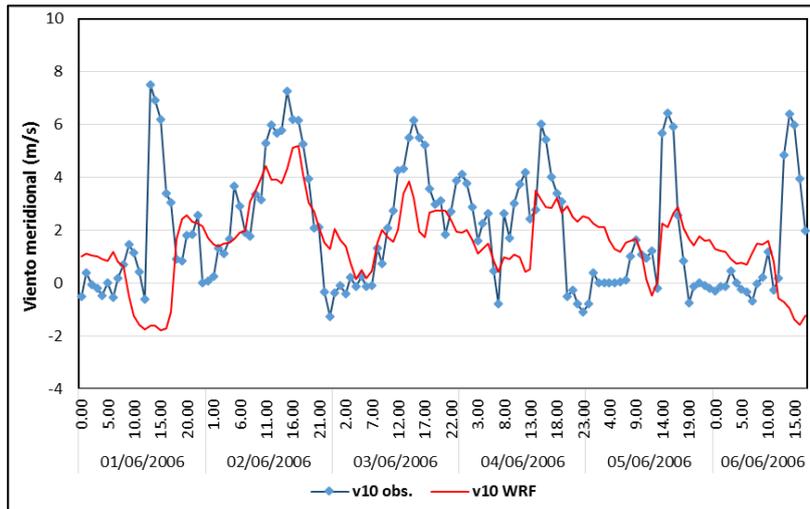
(d)



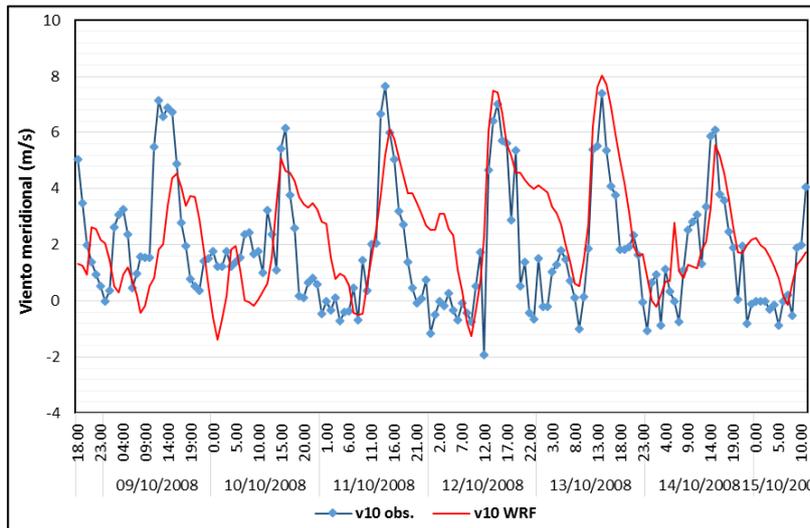
(e)

Figura g: Comparación temporal del viento meridional a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Aeropuerto del periodo: a) 31/05/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

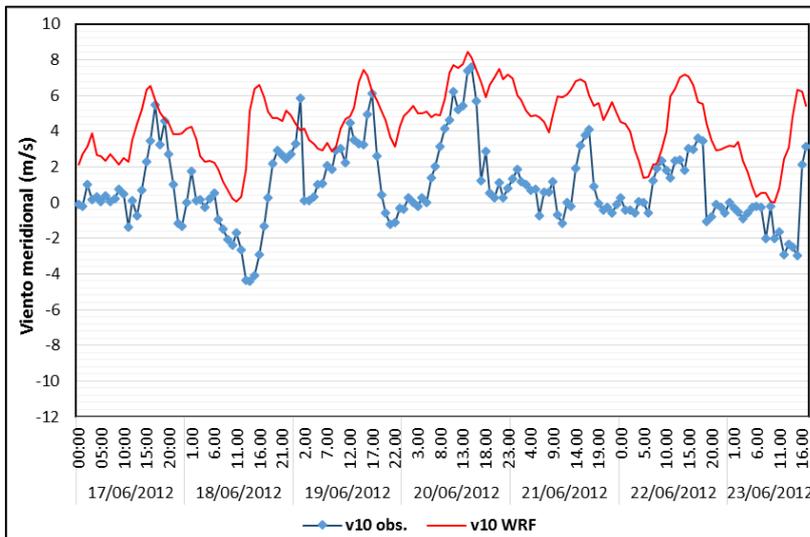
Comparación temporal del viento meridional para la Estación Ocucaje



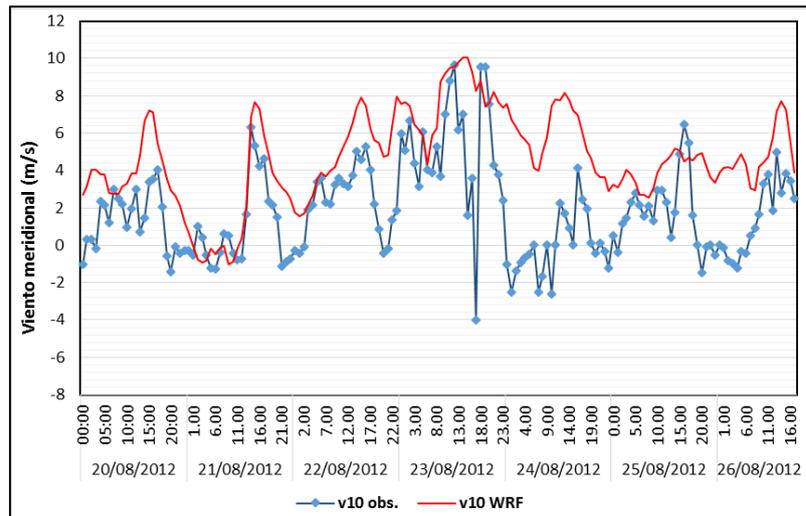
(a)



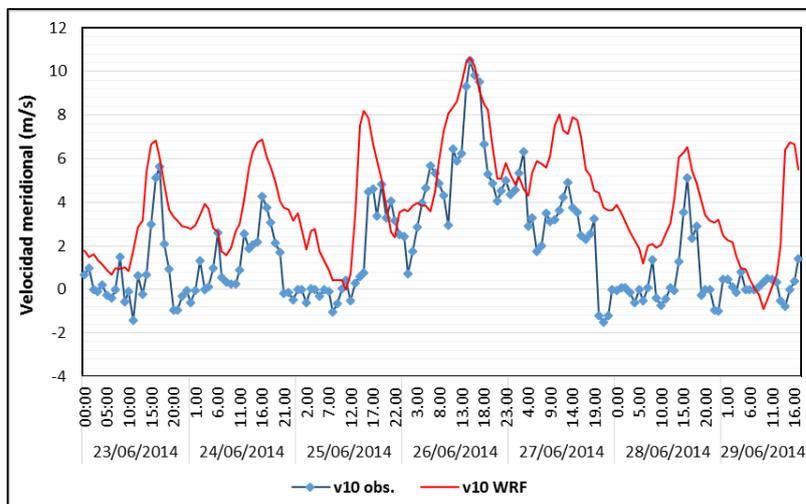
(b)



(c)



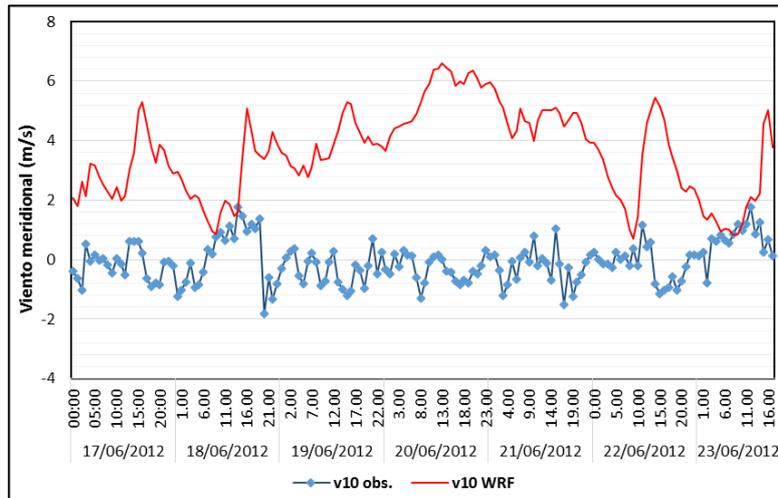
(d)



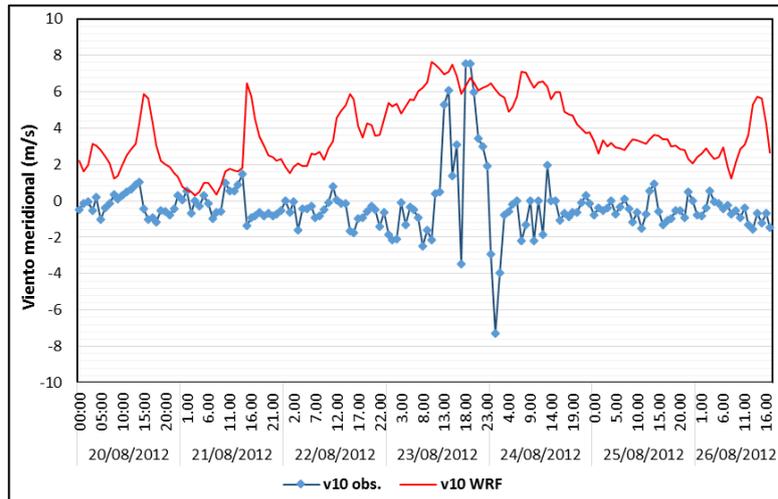
(e)

Figura h: Comparación temporal del viento meridional a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Ocucaje del periodo: a) 01/06/06 al 06/06/06; b) 09/10/08 al 15/10/08; c) 17/06/12 al 23/06/12; d) 20/08/12 al 26/08/12; e) 23/06/14 al 29/06/14.

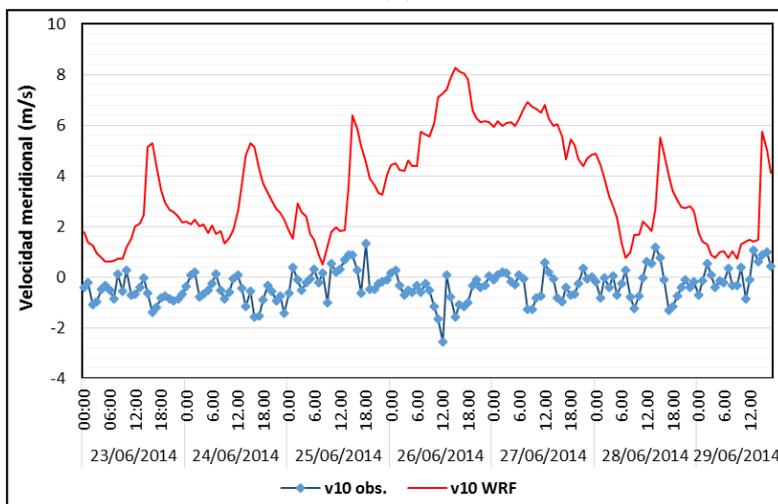
Comparación temporal del viento meridional para la Estación Beta Santiago



(a)



(b)



(c)

Figura i: Comparación temporal del viento meridional a 10 m de la superficie simuladas por WRF (rojo) con las observadas (azul) de la estación Beta Santiago del periodo: a) 17/06/12 al 23/06/12; b) 20/08/12 al 26/08/12; c) 23/06/14 al 29/06/14.

ANEXO 5 Distribución de frecuencia de clases de viento

Estación Aeropuerto

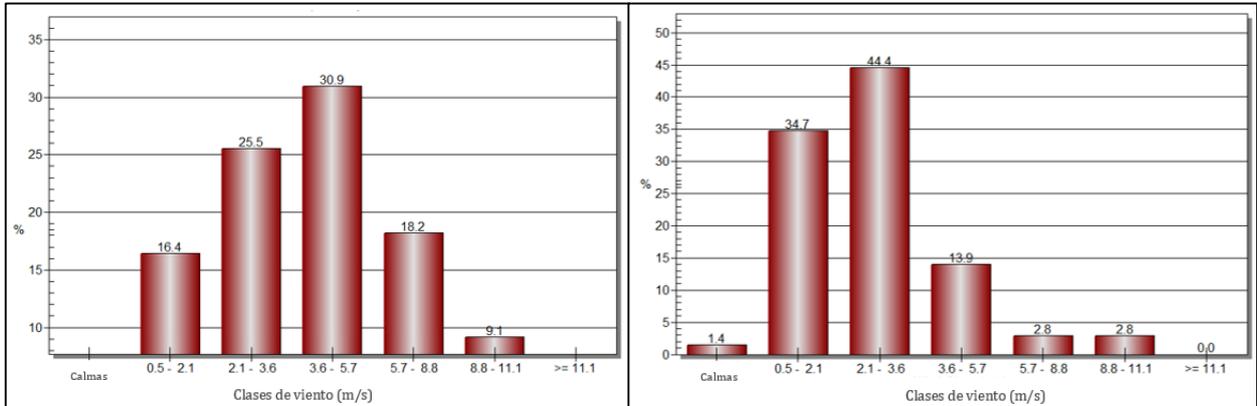


Figura j: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 2 al 4 de junio del 2006 en la estación Aeropuerto Pisco.

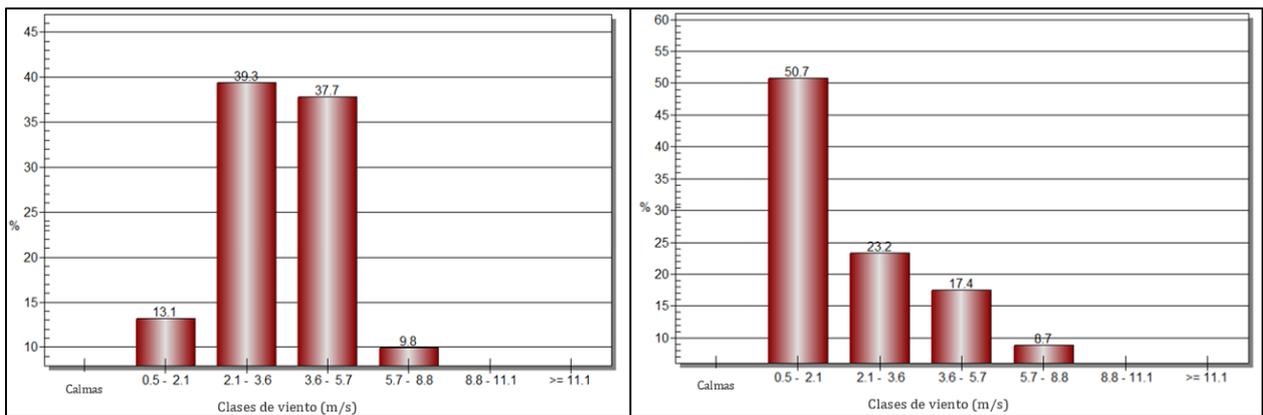


Figura k: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 11 al 13 de octubre del 2008 en la Estación Aeropuerto Pisco.

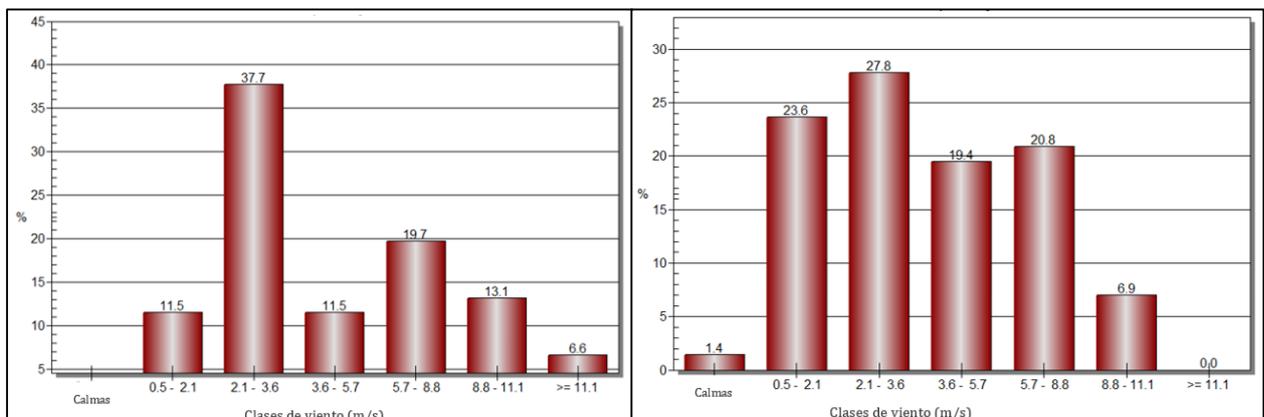


Figura l: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 19 al 21 de junio del 2012 en la estación Aeropuerto Pisco.

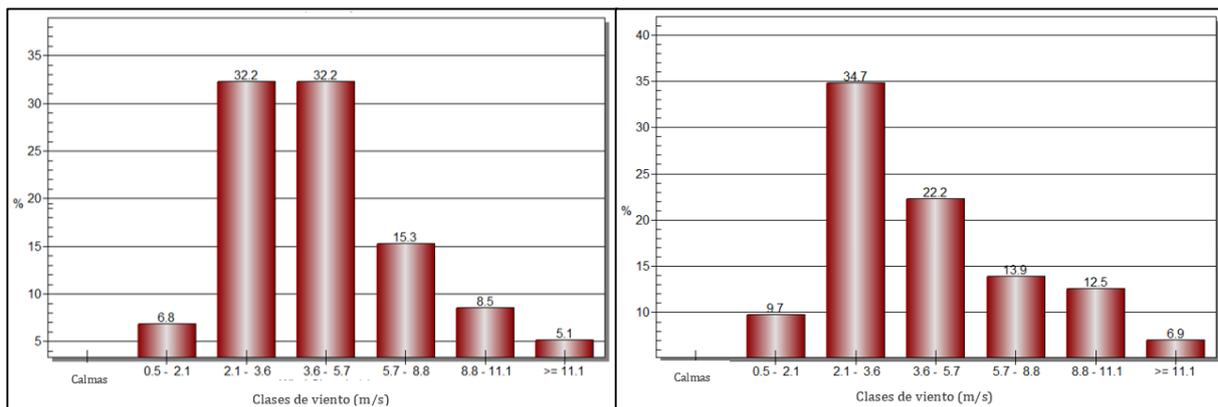


Figura m: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 22 al 24 de agosto del 2012 en la Estación Aeropuerto Pisco.

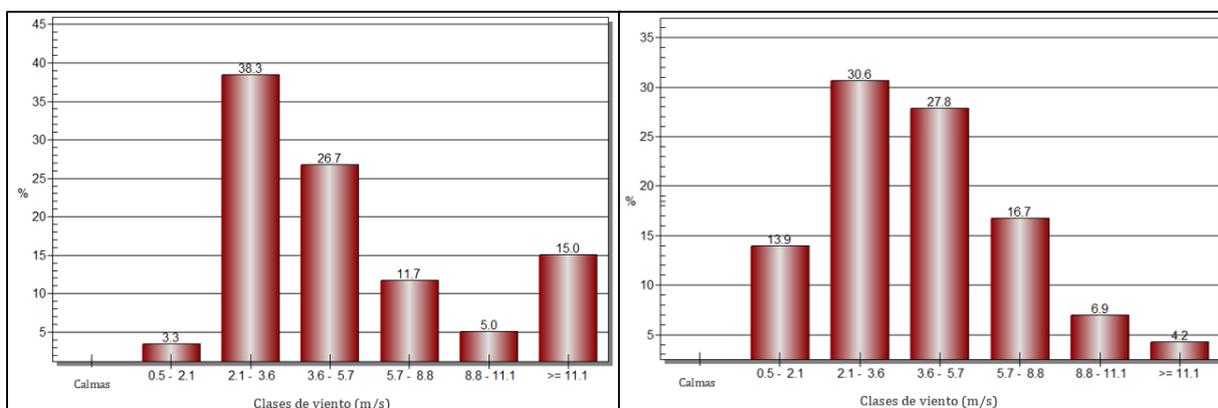


Figura n: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 25 al 27 de junio del 2014 en la estación Aeropuerto Pisco.

Estación Ocucaje

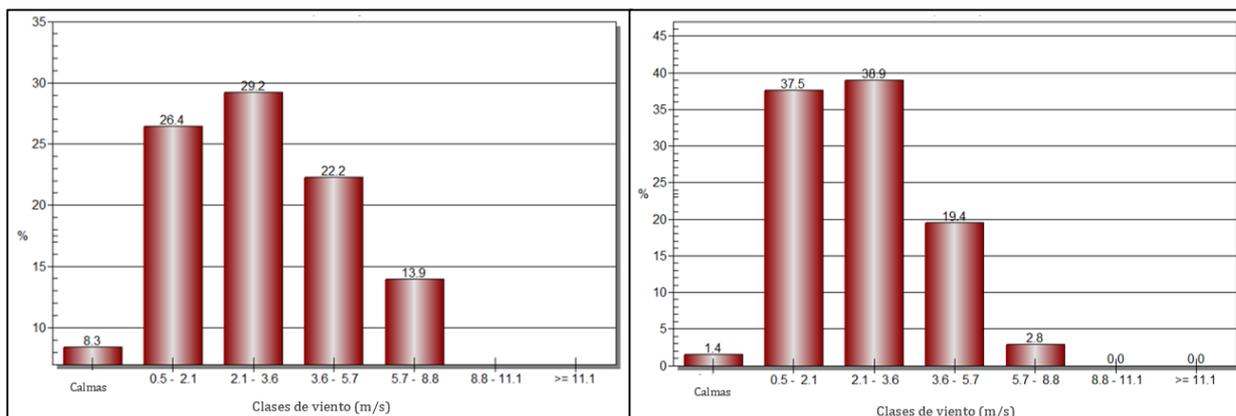


Figura o: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 2 al 4 de junio del 2006 en la estación Ocucaje.

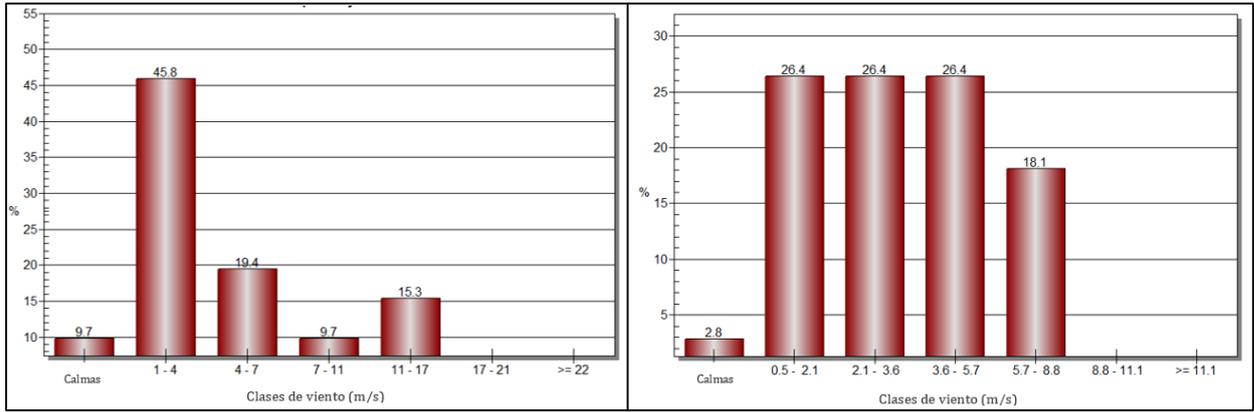


Figura p: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 11 al 13 de octubre del 2008 en la estación Ocucaje.

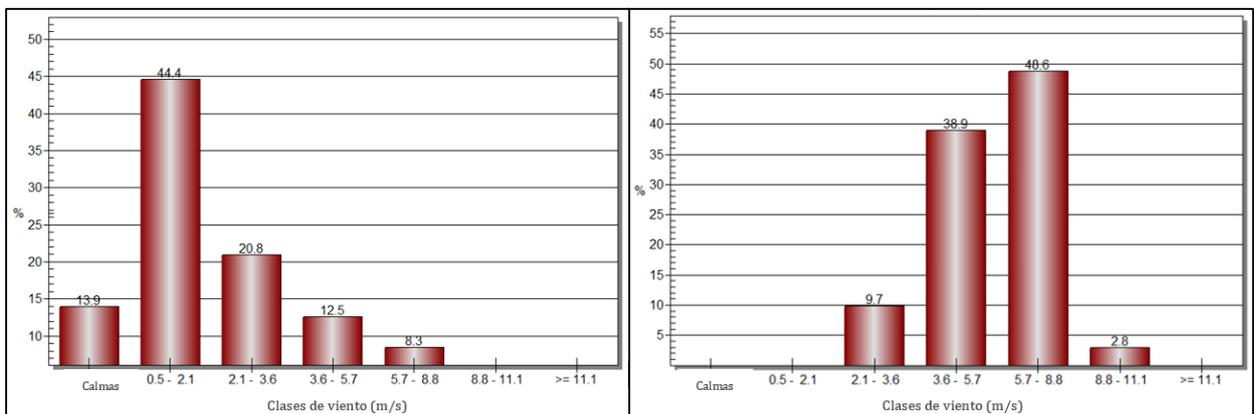


Figura q: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 19 al 21 de junio del 2012 en la Estación Ocucaje.

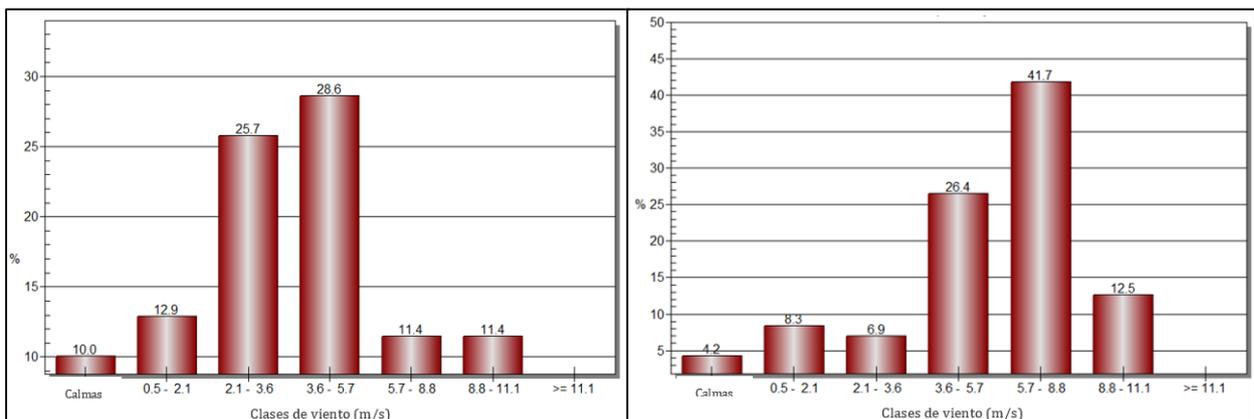


Figura r: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 22 al 24 de agosto del 2012 en la Estación Ocucaje.

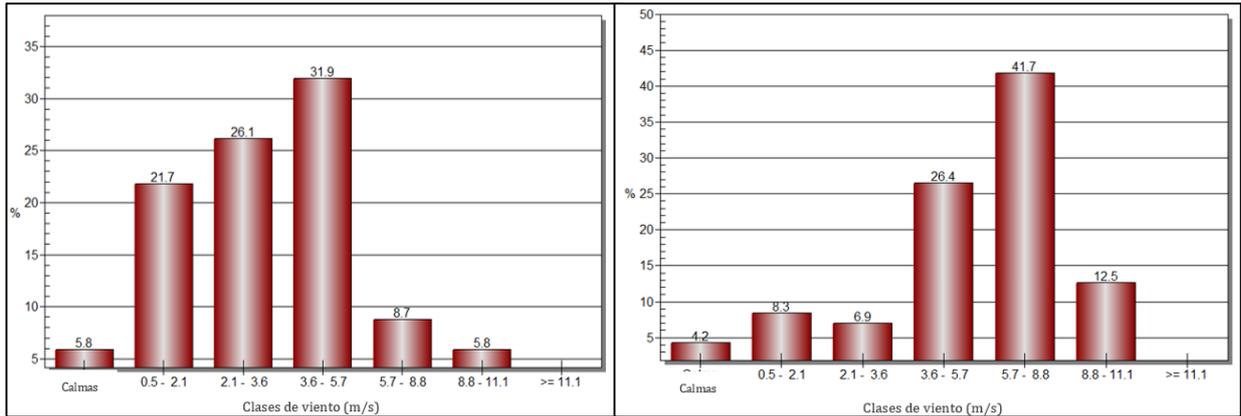


Figura s: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 25 al 27 de junio del 2014 en la estación Ocucaje.

Estación Beta Santiago

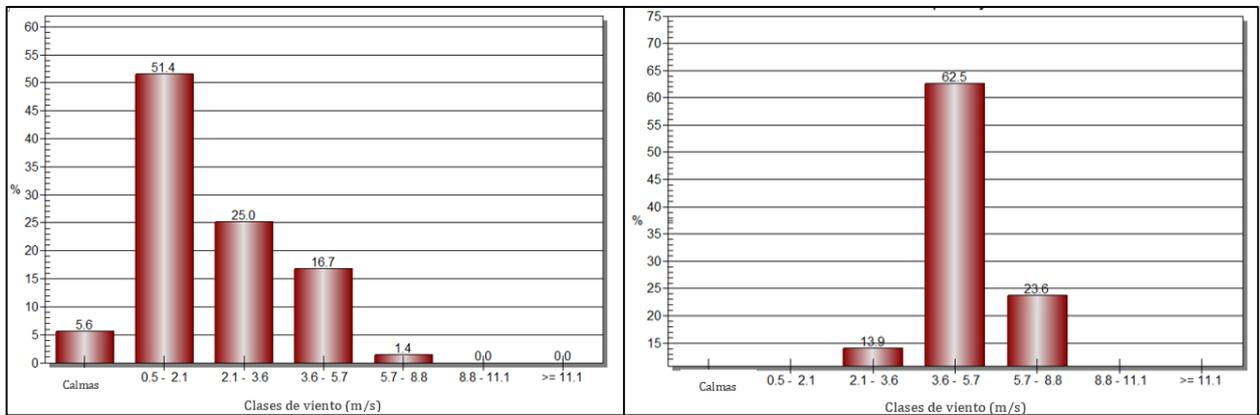


Figura t: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 19 al 21 de junio del 2012 en la estación Beta Santiago.

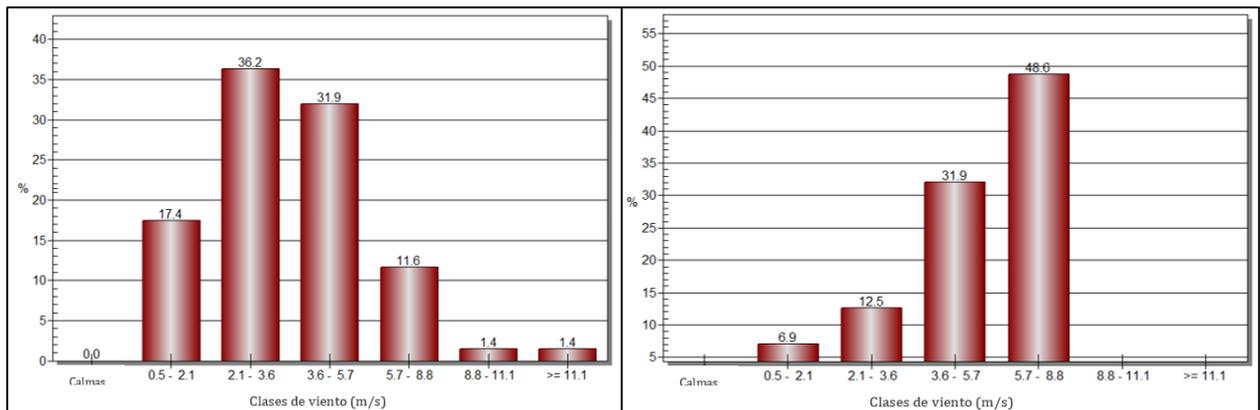


Figura u: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 22 al 24 de agosto del 2012 en la estación Beta Santiago.

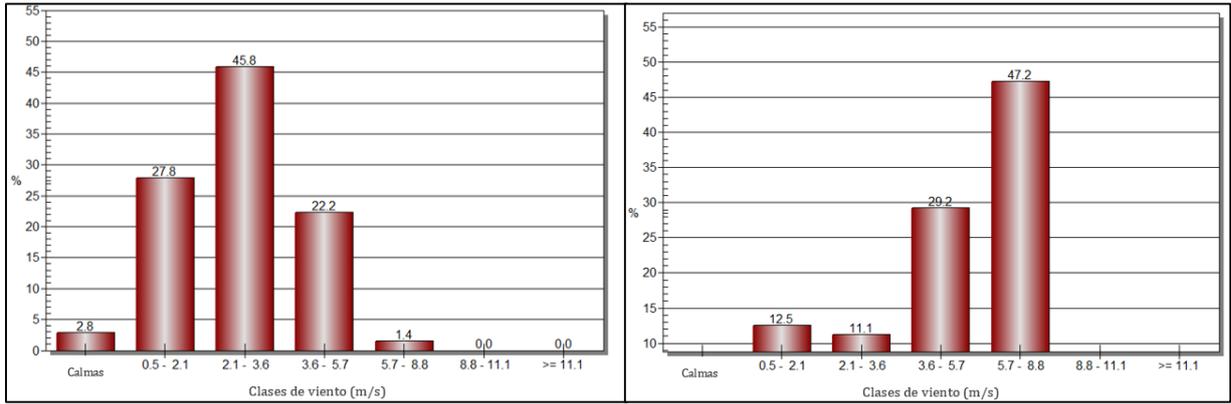


Figura v: Distribución de frecuencia de clases de viento observados (izquierda) y simulados (derecha) del periodo del 25 al 27 de junio del 2014 en la estación Beta Santiago.

ANEXO 6 Distribución “t “Student

A continuación se presentan los cuadros resumen de la aplicación de la distribución t student para las variables meteorológicas en estudio:

Tabla a: Distribución estadística t student de la velocidad del viento a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	7.565	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	5.547	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	11.273	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	9.321	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	12.671	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	10.564	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	8.483	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	6.618	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	12.369	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	13.570	1.976	Se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	6.202	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	10.758	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	14.663	1.976	Se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	3.489	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	6.963	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	2.951	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	5.851	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	3.636	2.093	Se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	3.181	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	1.772	2.093	No se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	1.481	2.093	No se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	2.317	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	2.988	2.093	Se rechaza Ho

Tabla b: Distribución estadística t student del viento zonal a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	7.480	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	10.361	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	8.260	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	8.562	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	8.791	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	2.226	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	3.789	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.089	1.976	No se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	2.062	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.463	1.976	No se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	3.226	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	2.896	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	2.801	1.976	Se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	2.901	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	5.537	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	2.549	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	1.304	2.093	No se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	1.239	2.093	No se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	1.045	2.120	No se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	1.950	2.093	No se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	1.237	2.093	No se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	2.937	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.694	2.093	No se rechaza Ho

Tabla c: Prueba estadística t student del viento meridional a 10 m de la superficie terrestre

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	6.315	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.673	1.976	No se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	6.852	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	4.258	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	12.414	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	2.881	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	8.213	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	8.286	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	8.120	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	14.072	1.976	Se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	4.381	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	1.059	1.976	No se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	2.284	1.976	Se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	2.214	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	0.009	2.093	No se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.699	2.093	No se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	0.758	2.093	No se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	2.609	2.093	Se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	4.510	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	3.228	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	2.823	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	2.686	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	1.724	2.093	No se rechaza Ho

Tabla d: Distribución estadística t student de la dirección del viento a 10 m de la superficie

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	6.349	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	6.708	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	7.474	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	3.224	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	8.255	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	1.431	1.976	No se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	0.202	1.976	No se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	2.961	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	1.707	1.976	No se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	0.181	1.976	No se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	0.286	1.976	No se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	0.868	1.976	No se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	1.012	1.976	No se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	1.565	2.179	No se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	1.745	2.145	No se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	0.544	2.160	No se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	1.212	2.145	No se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.665	2.160	No se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	0.286	2.262	No se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	1.760	2.201	No se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	2.726	2.179	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	2.199	2.131	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	0.668	2.131	No se rechaza Ho

Tabla e: Distribución estadística t student de la temperatura del aire a 2 m de la superficie terrestre

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	18.730	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	17.394	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	15.332	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	2.614	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	20.169	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	22.203	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	24.881	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	13.060	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	17.488	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	20.752	1.976	Se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	17.939	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	18.709	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	25.415	1.976	Se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	25.120	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	10.799	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	17.005	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	17.090	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	11.518	2.093	Se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	12.439	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	8.102	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	6.469	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	11.158	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	9.046	2.093	Se rechaza Ho

Tabla f: Distribución estadística t student de la humedad relativa a 2 m de la superficie terrestre

Estación meteorológica	Periodo	T calculado	T tabular	Conclusión
Estación Aeropuerto - Pisco	31/05/06 00:00 - 06/06/06 18:00	13.312	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	10.463	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	11.812	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	2.997	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	14.344	1.976	Se rechaza Ho
Estación Ocucaje	01/06/06 00:00 - 06/06/06 18:00	31.836	1.976	Se rechaza Ho
	08/10/08 18:00 - 15/10/08 12:00	23.042	1.976	Se rechaza Ho
	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	22.189	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	16.732	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	19.857	1.976	Se rechaza Ho
Estación Beta Santiago	17/06/12 00:00 - 23/06/12 18:00	16.700	1.976	Se rechaza Ho
	20/08/12 00:00 - 26/08/12 18:00	18.746	1.976	Se rechaza Ho
	23/06/14 00:00 - 29/06/14 18:00	22.372	1.976	Se rechaza Ho
Estación Copara	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	9.516	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	5.117	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	7.178	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	3.233	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	7.800	2.093	Se rechaza Ho
Estación Tacama	01/06/06 07:00 - 06/06/06 19:00	6.543	2.120	Se rechaza Ho
	08/10/08 19:00 - 15/10/08 13:00	4.614	2.093	Se rechaza Ho
	17/06/12 07:00 - 23/06/12 19:00	6.871	2.093	Se rechaza Ho
	20/08/12 07:00 - 26/08/12 19:00	8.231	2.093	Se rechaza Ho
	23/06/14 07:00 - 29/06/14 19:00	6.519	2.093	Se rechaza Ho