

CARACTERIZACIÓN DE LOS JETS COSTEROS SOBRE EL MAR PERUANO USANDO EL MODELO REGIONAL WRF

CHARACTERIZATION OF COASTAL JETS OVER THE PERUVIAN SEA USING THE WRF REGIONAL MODEL

Adolfo Chamorro-Gómez¹ Francois Colas² Vincent Echevin² Jorge Tam¹

<https://doi.org/10.53554/boletin.v37i2.372>

RESUMEN

CHAMORRO-GÓMEZ, A., COLAS, F., ECHEVIN, V., TAM, J. (2022). *Caracterización de los jets costeros sobre el mar peruano usando el modelo regional WRF. Bol Inst Mar Perú. 37(2): 271-284.*- Máximos de viento en niveles bajos de la atmósfera ocurren frecuentemente sobre el mar peruano frente a la costa, denominados chorros o jets costeros. Estos jets costeros tienen un papel importante en la dinámica oceánica e impactos significativos en el clima y la ecología regional, así como en una serie de actividades humanas, por lo que las investigaciones sobre ellos son de mucha importancia. Este estudio presenta las características (frecuencia de ocurrencia, altura, intensidad y dirección) de los jets costeros frente a la costa peruana, usando datos de simulación atmosférica a alta resolución (7 km) con el modelo regional WRF, para el periodo 1994-2003, siguiendo un conjunto de criterios basado en el análisis de perfiles verticales del viento y de temperatura. Los resultados del análisis muestran que los jets costeros sobre el mar peruano pueden ocurrir durante todos los meses del año, sin embargo, varían en frecuencia y localización espacial. Estos jets son más frecuentes en verano y se concentran muy cerca de la costa. Predominantemente, tienen intensidad entre 8 y 10 m.s⁻¹ y se presentan entre 200 y 300 m.s.n.m. Por otro lado, en invierno los jets costeros son menos frecuentes y tienen mayor extensión espacial; mayormente tienen intensidad entre 9 y 11 m.s⁻¹ y altura entre 400 y 500 m.s.n.m. Además, la dirección de los jets costeros es predominantemente sursureste (paralelo a la línea de costa) para todas las estaciones de año, excepto en invierno cuando el jet presenta también altas ocurrencias desde la dirección sureste.

PALABRAS CLAVE: jets costeros, mar peruano, modelo regional WRF

ABSTRACT

CHAMORRO-GÓMEZ, A., COLAS, F., ECHEVIN, V., TAM, J. (2022). *Characterization of coastal jets over the Peruvian sea using the WRF regional model. Bol Inst Mar Perú. 37(2): 271-284.*- Over the Peruvian sea, low-level atmospheric wind maxima occur frequently off the coast, known as coastal jets. These coastal jets are important in ocean dynamics and have significant impacts on climate and regional ecology, as well as on several human activities, so research on them is important. Our study presents the characteristics (frequency of occurrence, height, intensity, and direction) of coastal jets off the Peruvian coast, using high-resolution (7 km) atmospheric simulation data with the WRF regional model, for the period 1994-2003, following a set of criteria based on the analysis of vertical wind and temperature profiles. Based on the results of the analysis, we found that coastal jets over the Peruvian sea can occur all year round, albeit they vary in frequency and spatial location. In summer, these jets are more frequent and are concentrated very close to the coast, predominantly with an intensity between 8 and 10 m.s⁻¹ and a height between 200 and 300 m.a.s.l. In winter, coastal jets are less frequent and have a greater spatial extension, mostly with intensity between 9 and 11 m.s⁻¹ and a height between 400 and 500 m.a.s.l. The direction of coastal jets is predominantly south-southeast (parallel to the coastline) for all seasons, except in winter when the jet also has high occurrences from the southeast direction.

KEYWORDS: coastal jets, Peruvian sea, WRF regional model

1. INTRODUCCIÓN

El término chorro o jet costero es usado para describir la ocurrencia de un máximo del viento en la vertical, típicamente ubicado entre 100 y 1000 m sobre el nivel del mar (CHAO, 1985). Los jets costeros se presentan en el lado este de los cuasi-permanentes sistemas de alta presión oceánicos, a lo largo de los sistemas de afloramiento de borde este (RANJHA *et al.*, 2013) y tienen una

1. INTRODUCTION

The term coastal jet is used to describe the occurrence of a wind maximum in the vertical, typically located between 100 and 1000 m.a.s.l. (CHAO, 1985). Coastal jets occur on the eastern side of quasi-permanent oceanic high-pressure systems, along the Eastern Boundary Upwelling Systems - EBUS (RANJHA *et al.*, 2013) and have a horizontal extent that

1 Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Perú. Dirección General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático (DGIOCC). achamorro@imarpe.gob.pe

2 LOCEAN-IPSL, Sorbonne Université/IRD/CNRS/MNHN, Paris, France

extensión horizontal que puede exceder cientos de kilómetros mar adentro (BRIDGER *et al.*, 1992). Los jets costeros están fuertemente vinculados a la dinámica regional del océano, impactando en la atmósfera y el océano a través de un proceso de acoplamiento (BEARDSLEY *et al.*, 1987). La ocurrencia de un jet costero puede disminuir la temperatura del mar a través del afloramiento, mientras que la baja de la temperatura del mar en la costa refuerza el contraste térmico tierra-mar y puede retroalimentar positivamente el incremento del viento (PARISH, 2000).

RANJHA *et al.* (2013), mediante el uso de un algoritmo de filtrado basado en el análisis de la velocidad del viento y los perfiles de temperatura del reanálisis ERA-Interim, describieron las características climatológicas básicas de los jets costeros en las principales zonas de afloramiento del mundo. Los autores reportaron que la costa oeste de América del sur tiene ocurrencias de jets costeros durante verano e invierno. Sin embargo, en dicho estudio solo analizaron en detalle las características de los jets costeros en el área entre 20° y 30°S, sin considerar las ocurrencias de los jets en la costa peruana. Así, el conocimiento actual sobre los jets costeros frente al Perú es limitado y está principalmente basado en algunos análisis del viento en superficie (aunque el criterio básico para definir un jet costero se basa en examinar el perfil vertical del viento horizontal) con datos satelitales, reanálisis y estaciones meteorológicas costeras (DEWITTE *et al.*, 2011; FEBRE, 2018). Aún no se ha presentado una caracterización detallada de los jets costeros frente a la costa peruana, a pesar de su importancia para el clima costero regional.

El presente estudio presenta las características de los jets costeros frente a la costa de Perú, basado en datos de alta resolución (7 km) de una simulación atmosférica regional con el modelo WRF en el periodo 1994-2003, siguiendo criterios basados en análisis de los perfiles verticales de viento y temperatura. Se describen los datos de la simulación regional, las observaciones utilizadas para validar la simulación y la metodología del análisis. También, se presenta la evaluación del viento superficial modelado y las características de los jets costeros (frecuencia de ocurrencia, altura, intensidad y dirección).

can exceed hundreds of kilometers offshore (BRIDGER *et al.*, 1992). Coastal jets are strongly linked to regional ocean dynamics, impacting the atmosphere and ocean through a coupling process (BEARDSLEY *et al.*, 1987). The occurrence of a coastal jet can decrease sea temperature through upwelling, while the reduction in sea temperature at the coast reinforces the land-sea thermal contrast and can positively feedback increased wind (PARISH, 2000).

RANJHA *et al.* (2013) described the basic climatological characteristics of coastal jets in major upwelling areas of the world using a filtering algorithm based on the analysis of wind speed and temperature profiles from the ERA-Interim reanalysis. The authors reported that the west coast of South America has occurrences of coastal jets in summer and winter. Nevertheless, they only analyzed in detail the characteristics of coastal jets in the area between 20° and 30°S, without considering the occurrences of jets on the Peruvian coast. Thus, the current knowledge on coastal jets off Peru is limited and is mainly based on some surface wind analysis (although the basic criterion for defining a coastal jet is based on examining the vertical profile of the horizontal wind) with satellite data, reanalysis, and coastal weather stations (DEWITTE *et al.*, 2011; FEBRE, 2018). Until now, no detailed characterization of coastal jets off the Peruvian coast has been presented, despite their importance for the regional coastal climate.

Our study provides the characteristics of coastal jets off the Peruvian coast, based on high-resolution data (7 km) from a regional atmospheric simulation with the WRF model for the period 1994-2003, following criteria based on the analysis of vertical wind and temperature profiles. We describe the regional simulation data, the observations used to validate the simulation, and the analysis methodology, as well as the evaluation of the modeled surface wind and the characteristics of the coastal jets (frequency of occurrence, height, intensity, and direction).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Simulación atmosférica con el modelo regional WRF

El presente estudio usa resultados de una simulación realizada con el modelo atmosférico regional WRF (*Weather Research Forecast*) (SKAMAROCK & KLEMP, 2008) versión 3.7.1, cuyo dominio cubre casi toda la costa peruana (5° - 17° S) con resolución horizontal de 7 km y 60 niveles verticales (con 21 niveles en los primeros 1000 m.s.n.m.). Este dominio fue anidado a dos dominios más grandes y fue utilizado para estudiar las proyecciones del viento costero bajo un escenario de cambio climático. Una descripción completa de la configuración del modelo, incluyendo las parametrizaciones físicas, puede ser encontrada en CHAMORRO *et al.* (2021). La simulación se realizó para el periodo 1994-2003, con condiciones iniciales y fronteras que provienen del reanálisis NCEP2 (KANAMITSU *et al.*, 2002) y la temperatura superficial del mar de REYNOLDS *et al.* (2007) en la interfase aire-mar. Los datos de la simulación se grabaron cada 6 horas, con datos diarios a 0, 6, 12 y 18 UTC.

Observaciones del satélite QuikSCAT

Se utilizaron observaciones diarias del viento sobre la superficie del mar del satélite QuikSCAT (CERSAT, 2002) a 25 km de resolución para evaluar el realismo del viento modelado en el periodo 2000-2003. El producto fue descargado de <http://www.ifrem.fr/cersat>. Se interpolaron los datos del viento modelado a la grilla QuikSCAT, y luego para cada punto de grilla se calcularon los siguientes estadísticos: sesgo o bias en inglés, sesgo normalizado (bias%), error absoluto medio (MAE, por sus siglas en inglés), error porcentual absoluto medio (MAPE, por sus siglas en inglés), raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés), coeficiente de correlación (COOR) y desviación estándar (Std).

Métodos

Para la identificación de los jets costeros se utilizó el método propuesto por RANJHA *et al.* (2013), basado en el análisis de los perfiles verticales de la intensidad del viento y la temperatura del aire. Los datos tridimensionales de cada 6 horas de viento y temperatura de la simulación WRF fueron escaneados en cada punto de la grilla horizontal del modelo para identificar las ocurrencias

2. MATERIAL AND METHODS

Atmospheric simulation with the WRF regional model

Our study uses results from a simulation performed with the regional atmospheric model WRF (*Weather Research Forecast*) (SKAMAROCK & KLEMP, 2008) version 3.7.1, whose domain covers almost the entire Peruvian coast (5° - 17° S) with a horizontal resolution of 7 km and 60 vertical levels (with 21 levels in the first 1000 m.a.s.l.). This domain was nested into two larger domains and was used to study coastal wind projections under a climate change scenario. A complete description of the model setup, including the physical parameterizations, can be found in CHAMORRO *et al.* (2021). The simulation was performed for the period 1994-2003, with initial and boundary conditions coming from the NCEP2 reanalysis (KANAMITSU *et al.*, 2002) and sea surface temperature from REYNOLDS *et al.* (2007) at the air-sea interface. Simulation data were recorded every 6 hours, with daily data at 0, 6, 12, and 18 UTC.

Observations from the QuikSCAT satellite

Daily sea surface wind observations from the QuikSCAT satellite (CERSAT, 2002) at 25 km resolution were used to evaluate the realism of the modeled wind over the period 2000-2003. The modeled wind data were interpolated to the QuikSCAT grid, and then the following statistics were estimated for each grid point: bias, normalized bias (bias%), mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE), root-mean-square error (RMSE), correlation coefficient (CORR), and standard deviation (Std).

Methods

We applied the method proposed by RANJHA *et al.* (2013), based on the analysis of vertical profiles of wind intensity and air temperature, to identify the coastal jets. The three-dimensional 6-hourly wind and temperature data from the WRF simulation were scanned at each horizontal grid point of the model to identify the occurrences and locations of

y localizaciones de los jets costeros. De acuerdo con el método antes mencionado, un jet costero ocurre si se reúnen los siguientes criterios:

- La altura máxima del jet se encuentra por debajo de los 2 km.
- La intensidad del viento al nivel del jet es al menos 20% mayor que la intensidad del viento en superficie.
- La intensidad del viento sobre el jet decrece al menos al 80% de la intensidad del viento en superficie (i.e. una caída del 20%) en los primeros 5 km.
- El jet ocurre dentro de una inversión de la temperatura.

3. RESULTADOS

Evaluación del viento superficial modelado

Se evaluó el promedio anual y la variabilidad interdiaria del viento modelado. La Figura 1 muestra el viento promedio sobre la superficie del mar en el periodo 2000-2003 para el modelo y las observaciones QuikSCAT. El viento superficial observado, fluye hacia el noroeste en dirección aproximadamente paralela a la costa, siendo más fuerte mar adentro ($6 - 7,5 \text{ m s}^{-1}$) disminuyendo hacia la costa ($4,5 - 5 \text{ m s}^{-1}$). El patrón regional del viento promedio es bien reproducido por el modelo, con una ligera sobreestimación (1 m s^{-1}) del viento mar adentro.

coastal jets. According to the aforementioned method, a coastal jet occurs if the following criteria are met:

- The maximum height of the jet is below 2 km.
- Wind intensity at the jet level is at least 20% greater than surface wind intensity.
- The wind intensity over the jet decreases to at least 80% of the surface wind intensity (i.e., a 20% drop) in the first 5 km.
- The jet occurs within a temperature inversion.

3. RESULTS

Modeled surface wind assessment

We evaluated the annual average and inter-daily variability of the modeled wind. Figure 1 shows the average wind over the sea surface in the period 2000-2003 for the model and QuikSCAT observations. The observed surface wind flows northwestward in a direction approximately parallel to the coast, being stronger offshore ($6 - 7.5 \text{ m s}^{-1}$) and decreasing towards the coast ($4.5 - 5 \text{ m s}^{-1}$). The regional pattern of the average wind is well reproduced by the model, with a slight overestimation (1 m s^{-1}) of the offshore wind.

Figure 2 shows the spatial distribution of the statistical errors of the modeled daily wind

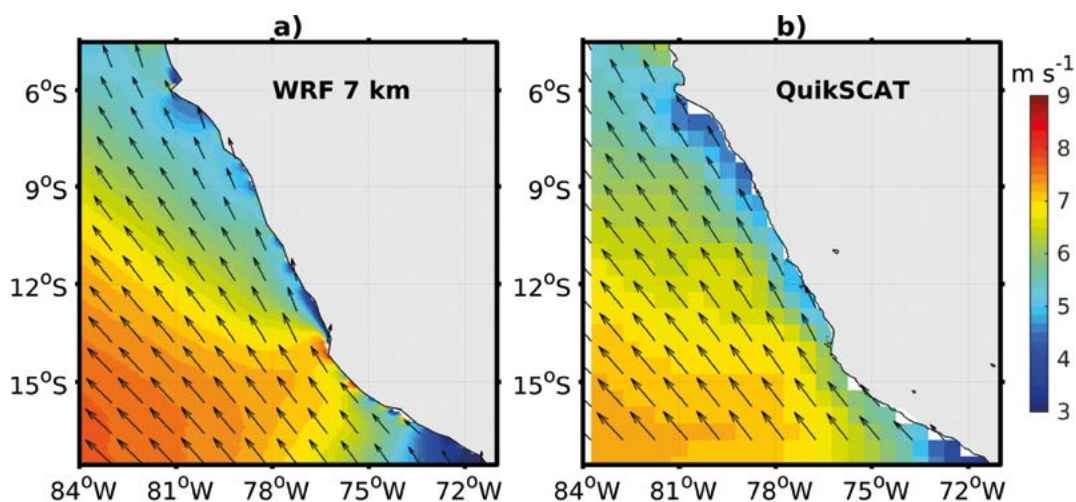


Figura 1.- Viento promedio sobre la superficie del mar para el periodo 2000-2003 de a) el modelo WRF y b) las observaciones del satélite QuikSCAT

Figure 1. Average wind over the sea surface for the period 2000-2003 from a) WRF model and b) QuikSCAT satellite observations

En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de los errores estadísticos de la intensidad del viento diario modelado respecto a las observaciones diarias del satélite QuikSCAT. En general, la intensidad y variabilidad del viento es bien reproducido por el modelo, con habilidad más reducida cerca de la línea de costa. Las diferencias entre la simulación y las observaciones cerca de la costa tienen que ser interpretadas con cuidado debido a la mayor resolución del modelo y la bien conocida dificultad del satélite en obtener medidas precisas del viento sobre el océano en las regiones costeras (TANG *et al.*, 2004). Cerca de la costa, el modelo sobreestima la intensidad del viento diario en el área costera de la península de Paracas entre 0,5 y 0,8 m.s⁻¹ (Fig. 2a), que es cerca del 10% de la intensidad del viento observado en esta área (Fig. 2b). En esta área, el MAE y el MAPE son 1,8 m s⁻¹ y 1,8%, respectivamente (Figs. 2c, d). Asimismo, el alto RMSE en esta zona destaca la ocurrencia de mayores desviaciones respecto a las observaciones (Fig. 2e). Por otro lado, se registra buena correlación entre el viento diario modelado y observado (>0,5) en todo el dominio (Fig. 2f), con excepción de las áreas cerca de la costa entre 6-12°S y al sur de 16°S, donde se reduce a 0,4. Además, las desviaciones estándar del viento diario modelado y observado presentadas en las Figs. 2g, h, muestran que el modelo reproduce de manera adecuada la variabilidad del viento diario.

Estudio de caso de un jet costero típico

La Figura 3 muestra perfiles verticales de la intensidad del viento y temperatura de un jet costero típico frente a la costa peruana en 14°S-77°W, detectado el 1 de agosto 2000, en la simulación WRF. La intensidad del viento aumenta desde la superficie hasta alcanzar su máximo de 15 m s⁻¹ a 600 m de altura, seguido de disminución en la intensidad sobre su máximo (Fig. 3a). El perfil de temperatura muestra disminución de la temperatura del aire de superficie hasta 500 m de altura, cerca de la altura del jet máximo, seguido de una inversión térmica entre 500 y 1000 m de altura (Fig. 3b). El jet ocurre en la parte baja de la inversión de temperatura.

En la Figura 4, se muestran los planos horizontales del viento a 10 m de altura y a la altura del jet (617 m.s.n.m), y una sección vertical este-oeste del viento meridional y la temperatura del aire cruzando

intensity compared to the daily QuikSCAT satellite observations. The wind intensity and variability are generally well reproduced by the model, with reduced skill near the coastline. Differences between the simulation and nearshore observations require careful interpretation due to the higher resolution of the model and the well-known difficulty of the satellite in obtaining accurate measurements of the wind over the ocean in coastal regions (TANG *et al.*, 2004). The model overestimates the daily wind intensity in the coastal area of the Paracas Peninsula by 0.5 to 0.8 m.s⁻¹ (Fig. 2a), which is about 10% of the observed wind intensity in this area (Fig. 2b). The MAE and MAPE in this area are 1.8 m s⁻¹ and 1.8%, respectively (Figs. 2c, d). Also, the high RMSE in this area highlights the occurrence of larger deviations from observations (Fig. 2e). Conversely, a good correlation between modeled and observed daily wind (>0.5) is recorded throughout the domain (Fig. 2f), except for the nearshore areas between 6-12°S and south of 16°S, where it is reduced to 0.4. The standard deviations of the modeled and observed daily wind presented in Figs. 2g, h, show that the model adequately reproduces the variability of the daily wind.

Case study of a typical coastal jet

Figure 3 shows vertical profiles of wind intensity and temperature of a typical coastal jet off the Peruvian coast at 14°S-77°W, which was detected on August 1, 2000, in the WRF simulation. The wind intensity increases from the surface to a maximum of 15 m s⁻¹ at 600 m height, followed by a decrease in intensity above its maximum (Fig. 3a). The temperature profile shows decreasing surface air temperature up to 500 m altitude, near the height of the maximum jet, followed by a thermal inversion between 500 and 1000 m altitude (Fig. 3b). The jet occurs at the bottom of the thermal inversion.

Figure 4 shows the horizontal wind planes at 10 m height and the height of the jet (617 m.a.s.l.), as well as a vertical east-west section of the meridional wind and air temperature crossing the typical coastal jet at 14°S-77°W. The surface

el jet costero típico en los 14°S-77°W. El patrón del viento superficial muestra un área de vientos relativamente intensos (~ 11 m s⁻¹) frente a la costa centro-sur. El viento a la altura del jet (617 m.s.n.m.) tiene un patrón similar, pero con vientos considerablemente más intensos frente a la costa centro-sur (mayores que ~ 15 m s⁻¹). La sección vertical este-oeste del viento meridional y la temperatura del aire cruzando el jet costero típico muestran que el núcleo del jet se encuentra sobre la línea de costa cerca de 76,4°W y dentro de una inversión térmica, a 250 m.s.n.m de altura promedio. El jet costero se extiende mar adentro hasta cerca de 150 km de la costa, mientras que la topografía costera empinada evita su intrusión hacia tierra.

wind pattern shows an area of relatively intense winds (~ 11 m s⁻¹) off the south-central coast. The wind at jet height (617 m a.s.l.) has a similar pattern, but with considerably more intense winds off the south-central coast (greater than ~ 15 m s⁻¹). The east-west vertical section of the meridional wind and air temperature across the typical coastal jet show that the jet core is located over the coastline near 76.4°W and within a thermal inversion, at 250 m.a.s.l. average height. The coastal jet extends offshore to about 150 km from the coast, while the steep coastal topography prevents its landward intrusion.

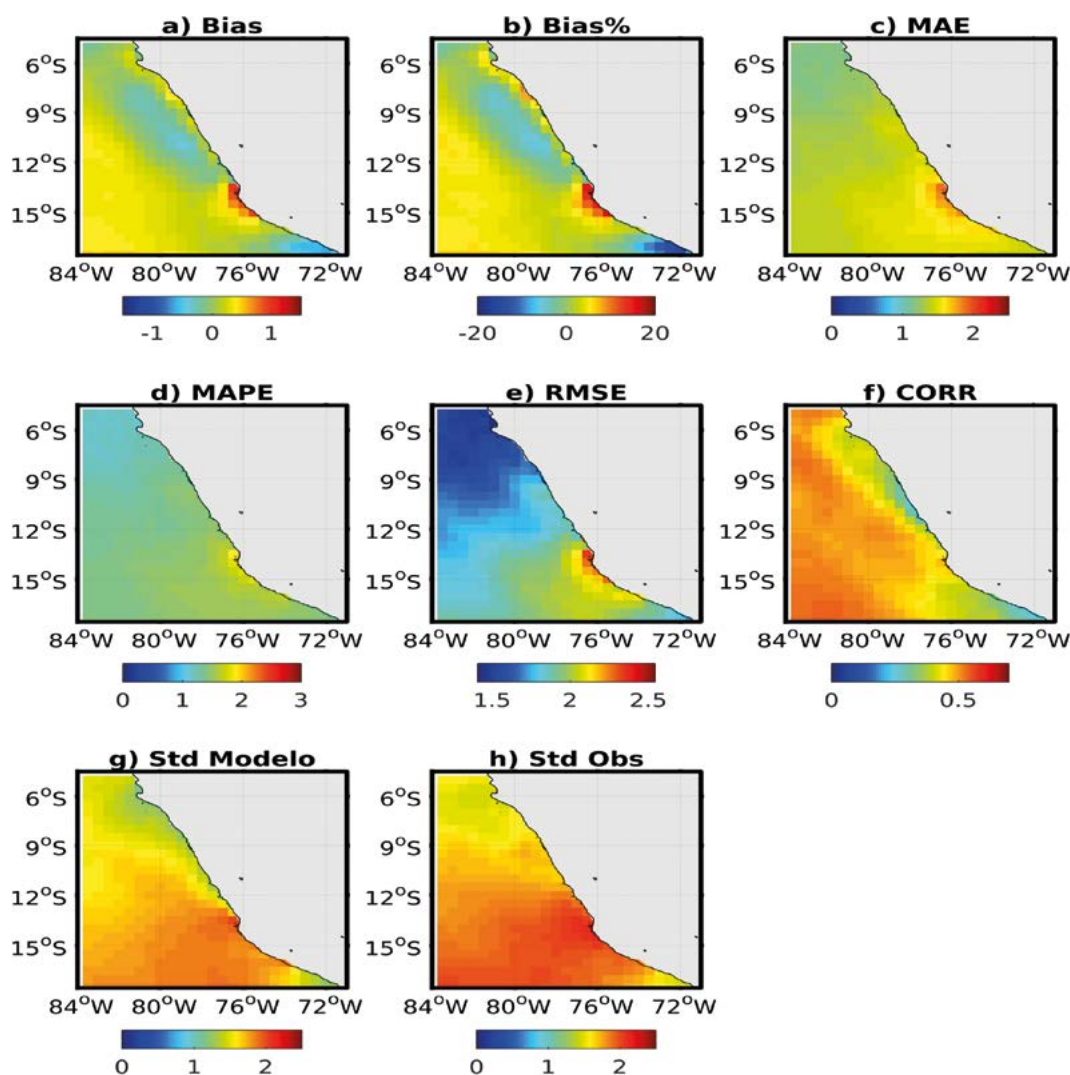


Figura 2.- Errores estadísticos modelo-observación del viento diario: a) sesgo o *Bias*, b) Sesgo normalizado (*Bias%*), c) error absoluto medio (MAE), d) error porcentual absoluto medio (MAPE), e) raíz del error cuadrático medio (RMSE), f) coeficiente de correlación (CORR), y desviación estándar (Std) del viento diario para g) el modelo y h) las observaciones del satélite QuikSCAT

Figure 2. Daily wind model-observation statistical errors: a) bias, b) normalized bias (*Bias%*), c) mean absolute error (MAE), d) mean absolute percentage error (MAPE), e) root-mean-square error (RMSE), f) correlation coefficient (CORR), and standard deviation (Std) of the daily wind for g) the model and h) the QuikSCAT satellite observations

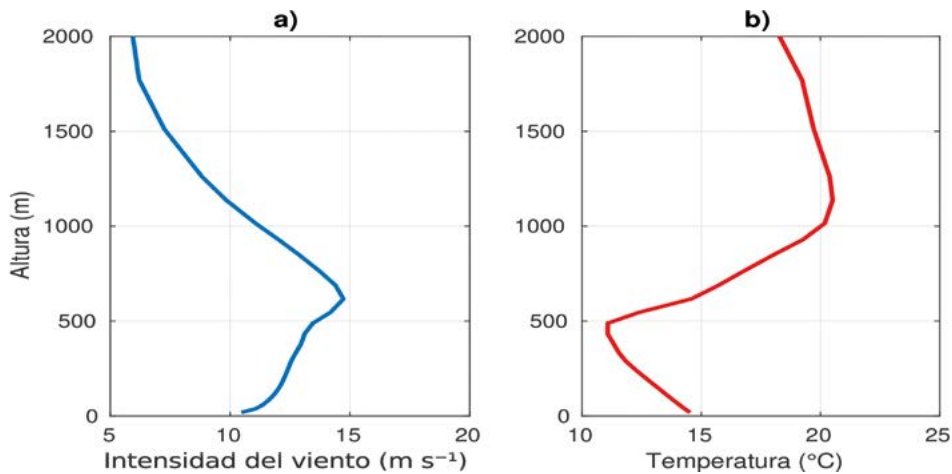


Figura 3.- Perfiles verticales de: a) la intensidad del viento y b) temperatura del aire para un jet costero frente a la costa peruana en 14°S – 77°W, detectado el 1 de agosto 2000 en la simulación WRF

Figure 3. Vertical profiles of a) wind intensity and b) air temperature for a coastal jet off the Peruvian coast at 14°S - 77°W, detected on August 1, 2000, in the WRF simulation

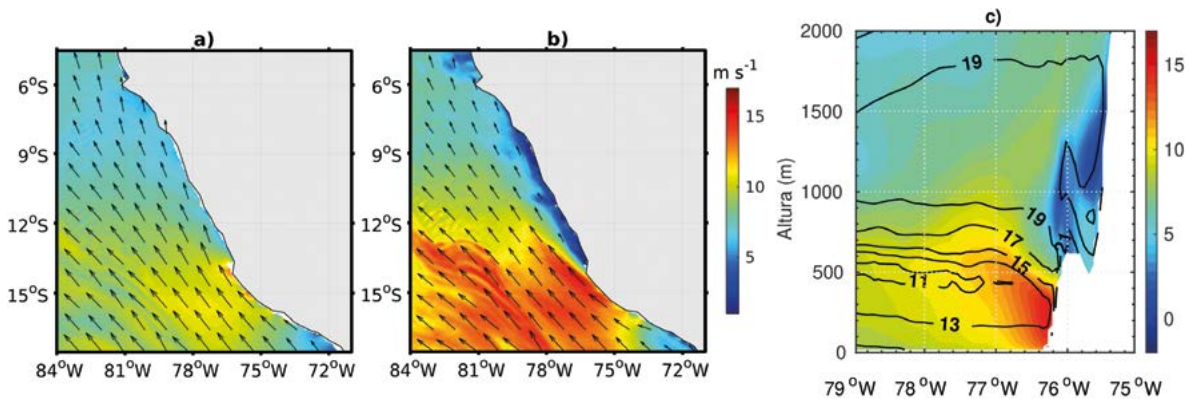


Figura 4.- a) Viento en superficie (10 m), b) viento a nivel del jet (617 m.s.n.m), c) sección vertical este-oeste del viento meridional (colores, en m s⁻¹) y temperatura del aire (contornos negros, en °C), para el jet costero del 1 de agosto 2000

Figure 4. a) Surface wind (10 m), b) wind at jet level (617 m.a.s.l.), c) east-west vertical section of the meridional wind (colors, in m s⁻¹), and air temperature (black contours, in °C), for the coastal jet of August 1, 2000

Frecuencia de ocurrencia de los jets costeros

La Figura 5 muestra mapas de la frecuencia climatológica de ocurrencia de los jets costeros (en porcentaje) para cada mes del año. Los jets costeros ocurren frente a la costa peruana durante todo el año, sin embargo, varían en frecuencia y localización espacial durante cada mes. En enero, febrero y marzo, los jets se concentraron muy cerca de la costa y al norte de 15°S, con frecuencia de ocurrencia que puede alcanzar 45% en marzo. En abril y mayo, los jets estuvieron más concentrados frente a la costa norte, alcanzando hasta 55% de frecuencia de ocurrencia en abril. En junio, la frecuencia de ocurrencia disminuyó

Frequency of occurrence of coastal jets

Figure 5 shows maps of the climatological frequency of occurrence of coastal jets (in percent) for each month of the year. Off the Peruvian coast, coastal jets occur throughout the year, although they vary in frequency and spatial location each month. In January, February, and March, jets were concentrated very close to the coast and north of 15°S, with the frequency of occurrence reaching 45% in March. In April and May, jets were more concentrated off the north coast, reaching up to 55% frequency of occurrence in April. In June, the frequency of occurrence decreased (<30%). In July, August,

(<30%). En julio, agosto y septiembre, los jets costeros se encontraron con mayor extensión horizontal a lo largo de la costa y fueron menos frecuentes (<35%) comparado a enero, febrero y marzo. Cabe notar que durante julio, agosto y septiembre la extensión horizontal de los jets ocurrió principalmente frente a la costa centro-sur. En octubre, noviembre y diciembre, los jets se concentraron nuevamente cerca de la costa, pero con baja frecuencia de ocurrencia (<30%).

and September, coastal jets were found with greater horizontal extent along the coast and were less frequent (<35%) compared to January, February, and March. It is noteworthy that in July, August, and September, the horizontal extent of jets occurred mainly off the south-central coast, while in October, November, and December, the jets were again concentrated near the coast, but with a low frequency of occurrence (<30%).

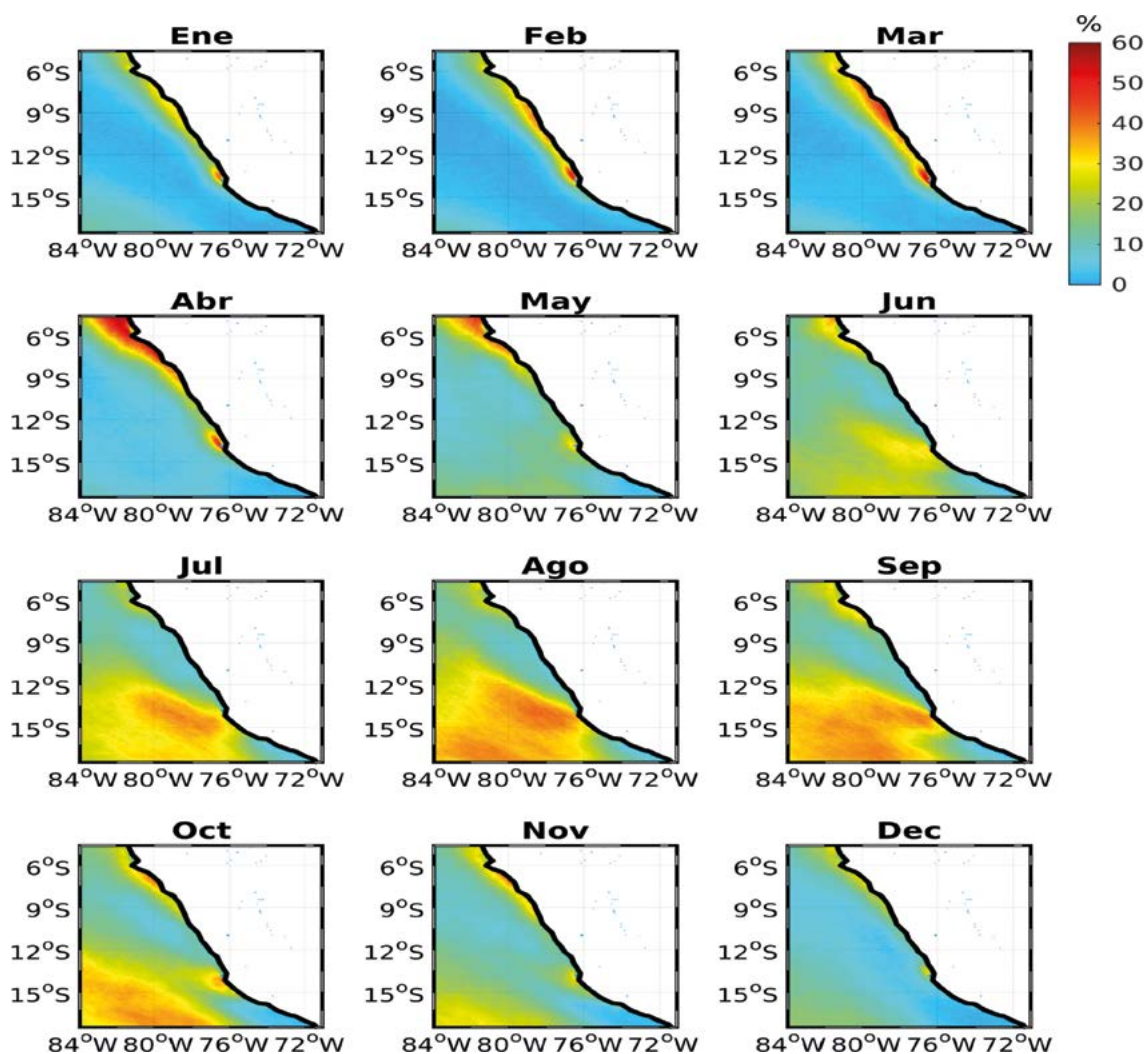


Figura 5.- Mapas de frecuencia de ocurrencia (%) de los jets costeros, periodo 1994-2003, para cada mes del año

Figure 5. Maps of the frequency of occurrence (%) of coastal jets for the period 1994-2003, for each month of the year

Altura de los jets costeros

La Figura 6 muestra los histogramas de la altura de los jets costeros en la costa norte (barras en celeste) y la costa centro-sur (barras en naranja), para cada mes del año. En enero, febrero y mar-

Height of coastal jets

Figure 6 shows the histograms of the height of coastal jets on the north coast (light blue bars) and south-central coast (orange bars) for each month of the year. In January, February, and

zo, los jets costeros se presentaron dentro de los primeros 500 m sobre el nivel del mar (s.n.m.) para la mayoría (85%) de las ocurrencias, con mayor probabilidad (cerca de 60%) entre 200 y 400 m.s.n.m. En abril, mayo y junio, los jets costeros estuvieron entre 300 y 700 m.s.n.m. alrededor del 65% del tiempo. En julio, agosto y septiembre, los jets costeros se encontraron a alturas relativamente más altas, entre 400 y 700 m.s.n.m. alrededor del 60% del tiempo, ocurriendo en la costa centro-sur arriba de 700 m.s.n.m alrededor del 10% del tiempo. En octubre, noviembre y diciembre, los jets se presentaron a alturas ligeramente más bajas, comparadas con julio-septiembre, entre 300 y 600 m.s.n.m. alrededor del 60% del tiempo.

March, coastal jets occurred within the first 500 m.a.s.l. for most (85%) of the occurrences, with the highest probability (about 60%) between 200 and 400 m.a.s.l. In April, May, and June, coastal jets were between 300 and 700 m.a.s.l. about 65% of the time, while in July, August and September, they were found at relatively higher altitudes, between 400 and 700 m.a.s.l. about 60% of the time, occurring on the south-central coast above 700 m.a.s.l. about 10% of the time. In October, November, and December, jets occurred at slightly lower altitudes, compared to July-September, between 300 and 600 m.a.s.l. about 60% of the time.

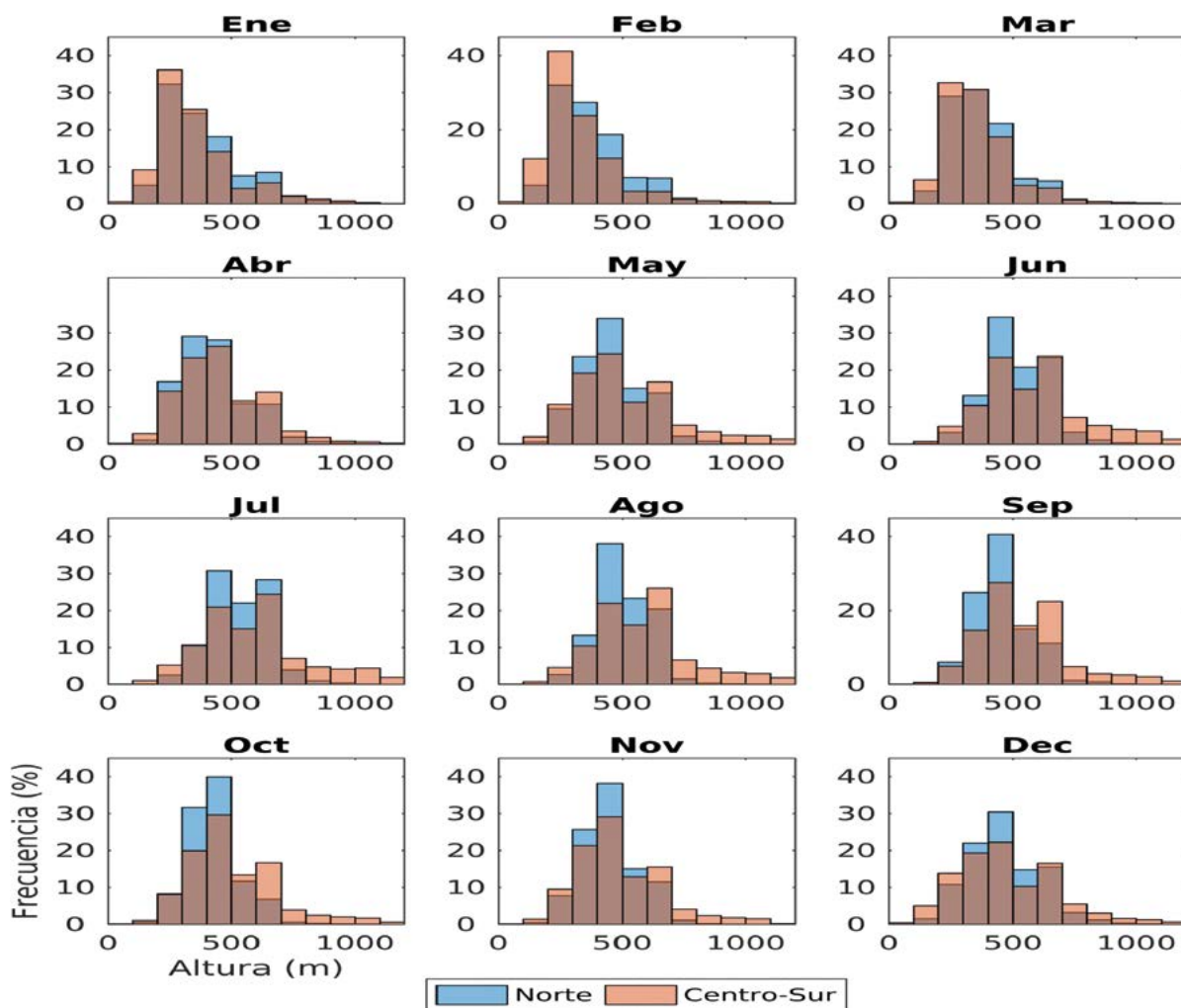


Figura 6.- Histogramas de la altura de los jets costeros para la costa norte (barras en celeste) y costa centro-sur (barras en naranja), para cada mes del año. Las áreas superpuestas de los histogramas se muestran en un color combinado celeste-naranja (marrón)

Figure 6. Histograms of the height of coastal jets for the north coast (light blue bars) and south-central coast (orange bars), for each month of the year. The overlapping areas of the histograms are shown in a brown color

Intensidad y dirección de los jets costeros

En enero, febrero, y marzo, los jets costeros presentaron intensidad entre 6 y 12 m.s⁻¹ el 70% del tiempo. En abril, mayo y junio, su distribución de intensidad fue muy similar a la de enero-marzo (6 y 12 m.s⁻¹) el 80% del tiempo, con algunas ocurrencias (alrededor del 10%) de jets con alta intensidad (>12 m.s⁻¹) en la costa centro-sur en junio. En julio, agosto y septiembre, la distribución de la intensidad de los jets en la costa norte también fue similar a enero-marzo, mientras que para la costa centro-sur se presentaron intensidades más altas, con valores arriba de 14 m.s⁻¹ alrededor del 15% del tiempo. En octubre, noviembre y diciembre, los jets presentaron intensidades entre 6 y 12 m.s⁻¹ cerca al 70% del tiempo en la costa norte y centro-sur (Fig. 7). La dirección de los jets costeros fue predominantemente sursureste (>40%) para todos los meses del año, tanto para la costa norte como para la costa centro-sur, excepto en julio, agosto y septiembre, cuando los jets presentaron ocurrencias (>30%) con dirección sureste (Fig. 8).

Intensity and direction of coastal jets

In January, February, and March, coastal jets showed intensity between 6 and 12 m.s⁻¹ 70% of the time. In April, May, and June, the intensity distribution of coastal jets was very similar to that of January-March, (6 and 12 m.s⁻¹) 80% of the time, with some occurrences (about 10%) of jets with high intensity (>12 m.s⁻¹) on the south-central coast in June. In July, August, and September, the distribution of jet intensity on the north coast was also similar to January-March, while higher intensities occurred for the south-central coast, with values above 14 m.s⁻¹ about 15% of the time. In October, November, and December, jets had intensities between 6 and 12 m.s⁻¹ about 70% of the time on the north and south-central coast (Fig. 7). The direction of coastal jets was predominantly south-southeast (>40%) for all months of the year, both for the north and south-central coast, except in July, August, and September, when jets occurred (>30%) in a southeast direction (Fig. 8).

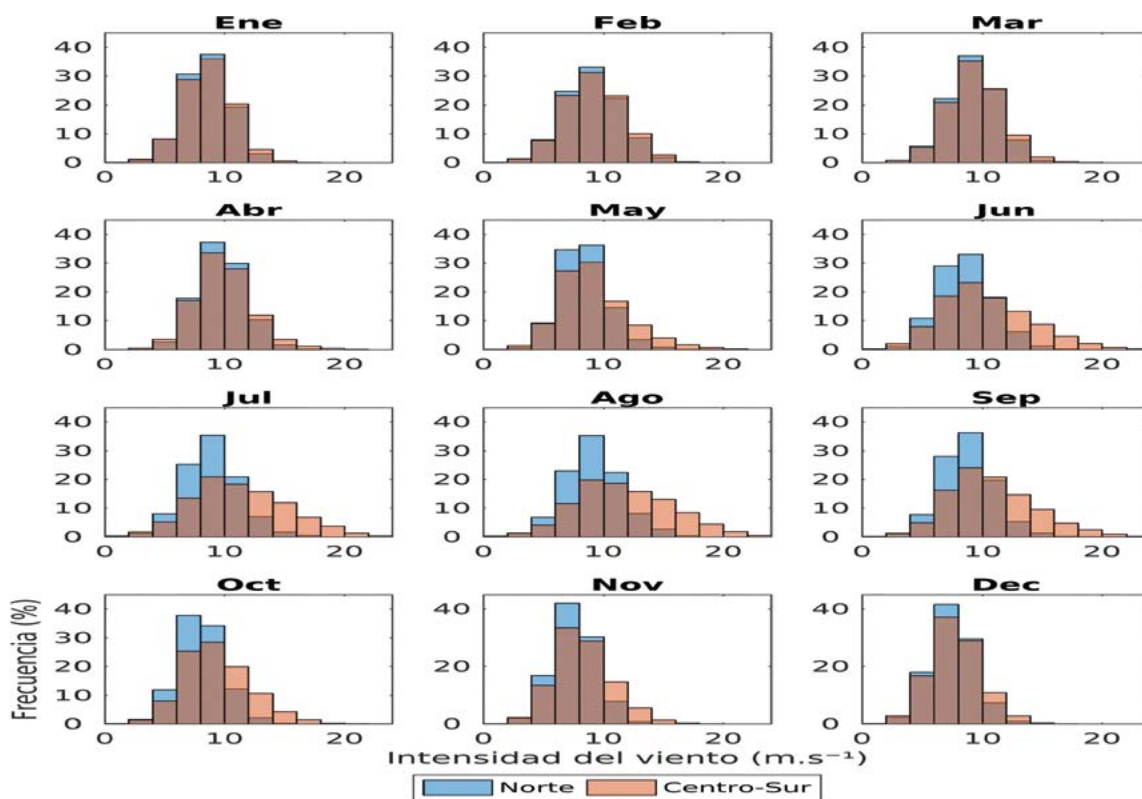


Figura 7.- Histogramas de la intensidad del viento al nivel de los jets costeros para la costa norte (barras en celeste) y costa centro-sur (barras en naranja), para cada mes del año. Las áreas superpuestas de los histogramas se muestran en un color combinado celeste-naranja (marrón)

Figure 7. Histograms of wind intensity at the coastal jet level for the north coast (light blue bars) and south-central coast (orange bars), for each month of the year. The overlapping areas of the histograms are shown in brown color

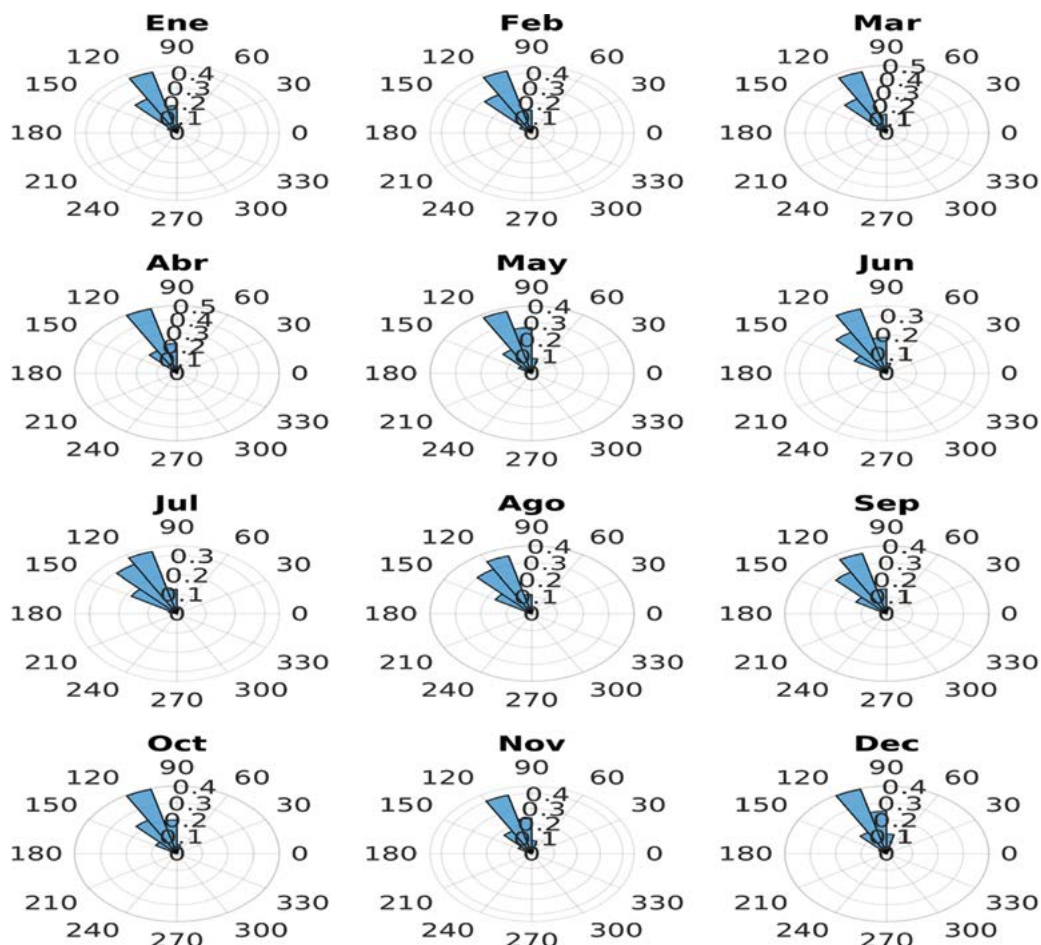


Figura 8.- Dirección (°) de los jets costeros para cada mes del año
 Figure 8. Direction (°) of coastal jets for each month of the year

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se han presentado las características de los jets costeros frente a la costa peruana, usando datos de una simulación atmosférica con el modelo regional WRF para el periodo 1994-2003. Las ocurrencias de los jets costeros fueron obtenidas escaneando los datos de la simulación con un algoritmo de identificación basado en el análisis de los perfiles verticales del viento y temperatura, siguiendo el algoritmo propuesto por RANJHA *et al.* (2013). La comparación del viento superficial modelado con las observaciones del satélite QuikSCAT mostró la habilidad del modelo WRF en reproducir realísticamente el viento sobre la superficie del mar. El análisis de un evento de jet costero frente a la costa peruana en 14°S-77°W (Fig. 3) mostró que el algoritmo desarrollado en el presente estudio filtra correctamente la ocurrencia de un jet frente a la costa.

4. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

We have presented the characteristics of coastal jets off the Peruvian coast, using data from an atmospheric simulation with the WRF regional model for the period 1994-2003. The occurrences of coastal jets were obtained by scanning the simulation data with an identification algorithm based on the analysis of vertical wind and temperature profiles, following the algorithm proposed by RANJHA *et al.* (2013). The ability of the WRF model to realistically reproduce the wind over the sea surface was shown by the comparison of the modeled surface wind with the QuikSCAT satellite observations. The analysis of a coastal jet event off the Peruvian coast at 14°S-77°W (Fig. 3) demonstrated that the algorithm developed in this study correctly filters out the occurrence of an offshore jet.

Las ocurrencias mensuales de los jets costeros mostraron que, frente a la costa peruana, pueden ocurrir durante todos los meses del año, con mayor frecuencia de ocurrencia en verano y otoño (hasta de 55%), concentrándose cerca de la costa, comparado con invierno y primavera, cuando los jets ocurren con menor frecuencia (<35%) y se presentan con mayor extensión horizontal, principalmente frente a la costa centro sur. Las variaciones estacionales y espaciales de los jet costeros a lo largo de la costa peruana parecen ser forzadas por el contraste térmico tierra-mar y la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur. La mayor probabilidad de ocurrencia de los jets costeros en verano que en invierno, está asociada a mayor contraste térmico tierra-mar en verano comparado al de invierno. Mientras que, la mayor extensión horizontal de los jets costeros en invierno que en verano, está relacionada a la mayor influencia del Anticiclón del Pacífico Sur sobre el viento frente a la costa peruana en invierno que en verano, que incrementa la interacción del flujo con la topografía costera y sus irregularidades (TJERNSTROM & GRISOGONO, 2000).

Las estadísticas de los jets costeros, tanto para la costa norte como la costa centro-sur, revelaron que los jets costeros se encuentran a alturas relativamente más bajas en verano, entre 200 y 400 m.s.n.m. para cerca del 60% de las ocurrencias, y a alturas relativamente más altas en invierno, entre 400 y 700 m.s.n.m. para cerca del 60% de las ocurrencias. Los jets costeros presentan intensidades entre 6 y 12 m.s⁻¹ cerca del 70% del tiempo en todas las estaciones del año, excepto en invierno para la costa centro-sur, cuando se observan intensidades arriba de los 14 m.s⁻¹ alrededor del 15% del tiempo. La dirección de los jets costeros es predominantemente (>40%) del sursureste (paralelo a la línea de costa) para todas las estaciones de año, excepto en invierno cuando los jets presentan también altas ocurrencias (>30%) desde dirección sureste. Los histogramas 2-D en la Fig. 9 muestran que, los jets predominantes en el verano tienen intensidad entre 8 y 10 m.s⁻¹ y se presentan entre 200 y 300 m s.n.m., mientras que, en invierno, con mayor dispersión, predominan los jets costeros con intensidad entre 9 y 11 m.s⁻¹ y a alturas entre 400 y 500 m s.n.m.

Los resultados de este estudio presentan una descripción estadística de los jets costeros frente a Perú que no fue abordado en el estudio de

Off the Peruvian coast, the monthly occurrences of coastal jets showed that they can occur throughout the year, with a higher frequency of occurrence in summer and autumn (up to 55%), concentrated near the coast, unlike in winter and spring, when the jets occur less frequently (<35%) and have a greater horizontal extension, mainly off the central-southern coast. The seasonal and spatial variations of coastal jets along the Peruvian coast seem to be driven by the land-sea thermal contrast and the presence of the South Pacific Anticyclone. The greater probability of occurrence of coastal jets in summer, as opposed to winter, is associated with the greater land-sea thermal contrast in summer. On the other hand, the greater horizontal extension of coastal jets in winter than in summer is related to the greater influence of the South Pacific Anticyclone on the wind off the Peruvian coast in winter, which increases the interaction of the flow with the coastal topography and its irregularities (TJERNSTROM & GRISOGONO, 2000).

Statistics for both the north and south-central coasts revealed that coastal jets are found at relatively lower altitudes in summer, between 200 and 400 m.a.s.l. for about 60% of the occurrences, and at relatively higher altitudes in winter, between 400 and 700 m.a.s.l. for about 60% of the occurrences. Coastal jets present intensities between 6 and 12 m.s⁻¹ about 70% of the time in all seasons of the year, except in winter for the south-central coast, when we observed intensities above 14 m.s⁻¹ about 15% of the time. The direction of coastal jets is predominantly (>40%) from the south-southeast (parallel to the coastline) for all seasons, except in winter when jets from the southeast direction also present high occurrences (>30%). The 2-D histograms in Fig. 9 show that the predominant jets in summer have intensity between 8 and 10 m.s⁻¹ and occur between 200 and 300 m.a.s.l., while in winter, coastal jets predominate with intensity between 9 and 11 m.s⁻¹ and at heights between 400 and 500 m.a.s.l. due to their greater dispersion.

Our results provide a statistical description of coastal jets off Peru that was not addressed in the study by RANJHA *et al.* (2013), which was limited to the statistical description of jets off

RANJHA *et al.* (2013), que se limitó a la descripción estadística de los jets frente a Chile. Sin embargo, estos estudios coinciden en señalar que, frente a la costa sudamericana, en verano las ocurrencias de los jets se concentran muy cerca de la costa y son más frecuentes que en invierno, cuando tienen mayor extensión espacial y son menos frecuentes. Por otro lado, la alta resolución horizontal y vertical de la simulación del modelo WRF permitió obtener una descripción detallada de los jets costeros frente a Perú comparado al análisis con los datos de reanálisis de baja resolución (100 km) utilizados por RANJHA *et al.* (2013). La conexión de las características del ciclo estacional de los jets costeros con la dinámica atmosférica y oceánica será abordada en futuras investigaciones. Además, dado que los jets costeros son parte del clima costero regional, es importante realizar un estudio del impacto del calentamiento global sobre los jets frente a la costa peruana.

Chile. Both studies agree in pointing out that the occurrence of jets off the South American coast is concentrated very close to the coast in summer and is more frequent than in winter when they have a greater spatial extent and are less frequent. On the other hand, the high horizontal and vertical resolution of the WRF model simulation allowed for obtaining a detailed description of the coastal jets off Peru compared to the analysis with the low resolution (100 km) reanalysis data used by RANJHA *et al.* (2013). Further research will address the linkage of the seasonal cycle characteristics of coastal jets with atmospheric and oceanic dynamics. Furthermore, since coastal jets are part of the regional coastal climate, it is important to conduct a study of the impact of global warming on jets off the Peruvian coast.

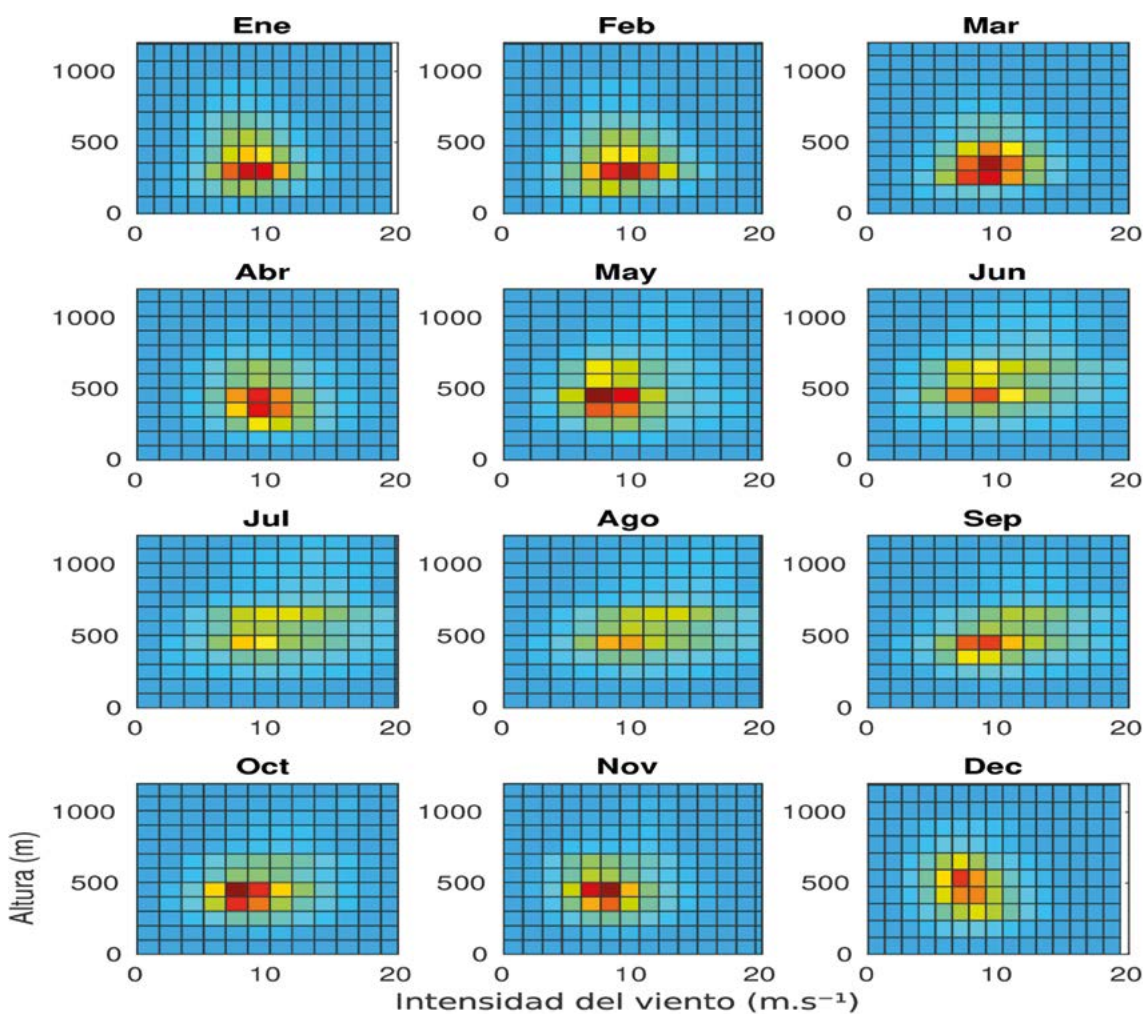


Figura 9.- Histogramas 2D intensidad-altura de los jets costeros, para cada mes del año

Figure 9. 2D intensity-height histograms of coastal jets for each month of the year

5. REFERENCIAS / REFERENCES

- BEARDSLEY, R. C., ROSENFELD, L. K., DORMAN, C. E., FRIEHE, C. A., WINANT, C. D. (1987). Local atmospheric forcing during the coastal ocean dynamics experiments 1. A description of the marine boundary layer and atmospheric conditions over a northern California upwelling region. *J. Geophys. Res.*, 92, 1467-1488.
- BRIDGER, A. F. C., BRICK, W. C., & LESTER, P. F. (1992). The structure of the marine inversion layer off the central California coast: mesoscale conditions. *Mon. Weather. Rev.*, 121, 335-351.
- CERSAT. (2002). Mean wind fields (MWF product) user manual volume 1: QuikSCAT. Rep C2-MUT-W-04-IF. CERSAT-IFR- EMER, Brest.
- CHAMORRO, A., ECHEVIN, V., DUTHEIL, C. *et al.* (2021). Projection of upwelling-favorable winds in the Peruvian upwelling system under the RCP8.5 scenario using a high-resolution regional model. *Clim Dyn* 57, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05689-w>
- CHAO, S. (1985). Coastal jets in the lower atmosphere. *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 361-371.
- DEWITTE, B., ILLIG, S., RENAULT, L., GOUBANOVA, K., TAKAHASHI, K., GUSHCHINA, D., MOSQUERA, K., PURCA, S. (2011). Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Peru from satellite observations (2000–2008). *J. Geophys. Res.*, 116, C04028, doi:10.1029/2010JC006495
- FEBRE, C. J. (2018). Estudio de la dinámica y patrones de circulación media del jet costero de bajos niveles en la Costa Central y Sur del Perú. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/479>
- KANAMITSU, M., EBISUZAKI, W., WOOLLEN, J., YANG, S-K., HNILO, J. J., FIORINO, M., POTTER, G. L. (2002). NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull Am Meteorol Soc.*, 83(11), 1631–1644.
- PARISH, T. (2000). Forcing of the summertime low-level jet along the California coast. *J. Appl. Meteorol.*, 39, 2421-2433.
- RANJHA, R., SVENSSON, G., TJERNSTRÖM, M., SEMEDO, A. (2013). Global distribution and seasonal variability of coastal low-level jets derived from ERA-Interim reanalysis. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 65, 1. DOI: [10.3402/tellusa.v65i0.20412](https://doi.org/10.3402/tellusa.v65i0.20412)
- REYNOLDS, R. W., SMITH, T. M., LIU, C., CHELTON, D. B., CASEY, K. S., SCHLAX, M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J Clim.*, 20, 5473–5496. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>
- SKAMAROCK, W., KLEMP, J. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J Comp. Phys.*, 227, 3465–3485, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- TANG, W. Q., LIU, W. T., STILES, B. W. (2004). Evaluations of high-resolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 42, 1762-1769.
- TJERNSTROM, M., GRISOGONO, B. (2000). Simulations of super-critical flow around points and capes in the coastal atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 57, 108-135.