

MODELADO DE LA CIRCULACIÓN CLIMATOLÓGICA EN LA BAHÍA DE PISCO

MODELLING OF THE CLIMATOLOGICAL CIRCULATION IN PISCO BAY

Carlos Yvan Romero¹

Jorge Tam¹

<https://doi.org/10.53554/boletin.v37i1.365>

RESUMEN

ROMERO, C., TAM, J. (2022). *Modelado de la circulación climatológica en la bahía de Pisco*. *Bol Inst Mar Perú*. 37(1): 175-190.- La bahía de Pisco se encuentra en una zona en la cual el afloramiento se manifiesta persistentemente durante todo el año debido a la magnitud del viento cerca de sus costas, con mayor intensidad en invierno y primavera, lo cual hace posible la existencia de una amplia zona costera muy productiva y rica en nutrientes. Esta zona y sus islas adyacentes presentan gran diversidad de recursos pesqueros para el consumo humano directo, motivo por el cual tiene importancia para la pesquería artesanal del Perú. En este trabajo, se realizó el modelado de la bahía de Pisco utilizando el modelo oceánico regional ROMS y la herramienta ROMS2ROMS con el fin de conocer la circulación marina y la distribución espacial de las principales variables oceanográficas a pequeña escala en la bahía seleccionada. Para lograr esto, se utilizaron los resultados de una simulación del sistema de corrientes de Humboldt a escala regional (~12 km), como condiciones de frontera para realizar un *downscaling* dinámico utilizando la herramienta ROMS2ROMS para obtener la resolución espacial requerida (~1 km). El modelo reprodujo el ciclo estacional de la TSM en la bahía, con algunas diferencias en la intensidad de la TSM simulada y observada. Se encontró que la velocidad de las corrientes va en dirección noroeste con mayor intensidad al sur y al oeste de la península, alcanzando sus valores más altos en primavera (22,5 cm/s) y los más bajos en verano (7,5 cm/s).

PALABRAS CLAVE: modelado, ROMS, ROMS2ROMS, anidamiento, bahía, Pisco

ABSTRACT

ROMERO, C., TAM, J. (2022). *Modelling of the climatological circulation in Pisco Bay*. *Bol Inst Mar Perú*. 37(1): 175-190.- Pisco Bay is located in an area in which the upwelling persistently manifests throughout the year due to the magnitude of the wind near its coast, with greater intensity in winter and spring, which makes it possible the existence of a wide coastal area that is very productive and rich in nutrients. This area and its adjacent islands present a great diversity of fishing resources for direct human consumption, thus has a great importance for the artisanal fishery of Peru. In this work, the modeling of Pisco Bay was performed by using the Regional Ocean Model (ROMS) and the ROMS2ROMS tool in order to simulate the marine circulation and spatial distribution of the main sub-mesoscale oceanographic variables in the selected bay. To achieve this, the results of a simulation of the Humboldt Current System at a regional scale (~12 km) were used as boundary conditions to perform a dynamic downscaling using the ROMS2ROMS tool to obtain the required spatial resolution (~1 km). The model reproduced the seasonal cycle of SST in the bay, with some differences between the intensity of the simulated and observed SST. In addition, it was found that the speed of the currents goes in a north-west direction with greater intensity to the south and west of the Paracas peninsula, reaching its highest values in spring (22.5 cm/s) and the lowest in summer (7.5 cm/s).

KEYWORDS: modelling, ROMS, ROMS2ROMS, nesting, bay, Pisco

1. INTRODUCCIÓN

El área frente a Pisco está sujeta a los vientos más intensos que pueden manifestarse en toda la costa del Perú, por lo cual el afloramiento costero en esta zona, siendo permanente durante todo el año, muestra una intensificación notable en el periodo invierno/primavera. Por otro lado, la productividad primaria es mayor en el periodo

1. INTRODUCTION

Off Pisco, we can observe the occurrence of the most intense winds on the entire Peruvian coast, which is why coastal upwelling in this area, although permanent throughout the year, shows a noticeable intensification in winter and spring. While, primary productivity is higher in the spring/summer period due to

¹ Investigador científico, Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y del Cambio Climático (LMOECC), Instituto del Mar del Perú, Apdo. 22, Lima, Perú. E-mail: cromero@imarpe.gob.pe; jtam@imarpe.gob.pe

primavera/verano debido a la estratificación de las aguas más superficiales, disminuyendo en invierno. De primavera a verano, se manifiesta un gradiente térmico perpendicular a la costa, bien pronunciado, el cual da lugar a una “lengua de agua fría” que indicaría la persistencia de una celda de afloramiento durante el periodo de máxima productividad acompañado de aguas más estratificadas (GUTIÉRREZ *et al.*, 2011).

A diferencia de otros Sistemas de Afloramiento de Borde Oriental (EBUS, por sus siglas en inglés), el afloramiento en Pisco no es afectado por el efecto del flujo geostrofico hacia la costa como en otras partes del litoral peruano, debido a que el mayor espesor de la capa de Ekman en esta zona mantiene la intensidad del afloramiento bastante fuerte (MARCHESIELLO & ESTRADA, 2010). Esta es una zona de intensa actividad de mesoescala, puesto que, se encuentra cerca de un “hot spot” en el cual se forma gran cantidad de remolinos (CHAIGNEAU *et al.*, 2009).

Por otra parte, la zona de Pisco presenta intensa actividad industrial pesquera, en la que destacan la producción de aceite y harina de pescado, además de gran variedad de recursos de importancia comercial como son moluscos, crustáceos, macroalgas y otros peces utilizados para el consumo humano directo, motivo por el cual tiene importante participación en la pesquería artesanal del Perú, la cual sale a través de los desembarcaderos pesqueros artesanales (DPA's) de San Andrés, El Chaco y La Puntilla (FLORES *et al.*, 2019). Todo esto trajo como consecuencia, gran cantidad de materia orgánica en suspensión y otros residuos que fueron arrojados directamente al ambiente marino (GUZMÁN *et al.*, 1997), lo cual impactó en la calidad del agua de la bahía y costas adyacentes (VELAZCO & SOLÍS, 2000; CABELLO *et al.*, 2002). En respuesta a ello, se estableció un nuevo sistema de tratamiento de residuos para estas industrias y se construyó un emisario submarino que descarga fuera de la bahía, en aguas de 50 m de profundidad. Además, desde 2004, el envío de productos de gas también se realiza en un muelle ubicado al norte de la bahía.

Los escenarios del cambio climático predicen un aumento promedio del 6% en las precipitaciones aguas arriba del río Pisco para el 2030, alcanzando un incremento del 16% en verano (SENAMHI,

the stratification of the shallowest waters, decreasing in winter. From spring to summer, a steep thermal gradient perpendicular to the coast is evident, which gives rise to a “cold-water tongue” that would indicate the persistence of an upwelling cell during the period of maximum productivity accompanied by more stratified waters (GUTIÉRREZ *et al.*, 2011).

Unlike other Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS), the upwelling in Pisco is not affected by shoreward geostrophic flow as in other parts of the Peruvian coast, because the greater thickness of the Ekman layer in this area keeps the intensity of the upwelling quite strong (MARCHESIELLO & ESTRADA, 2010). This is an area of intense mesoscale activity since it is located near a hot spot in which a large number of eddies are formed (CHAIGNEAU *et al.*, 2009).

Also, there is an intense industrial fishing activity in the Pisco area, including the production of fish oil and fishmeal, as well as a wide variety of commercially important resources such as mollusks, crustaceans, macroalgae, and other fish used for direct human consumption, which is why it is important for the Peruvian artisanal fisheries, which operates from the landing sites (LSs) of San Andrés, El Chaco, and La Puntilla (FLORES *et al.*, 2019). This resulted in a large amount of suspended organic matter and other wastes being dumped directly into the marine environment (GUZMÁN *et al.*, 1997), impacting the water quality of the bay and adjacent coasts (VELAZCO & SOLÍS, 2000; CABELLO *et al.*, 2002). This led to the establishment of a new waste treatment system for these industries and the construction of a submarine outfall that discharges out of the bay, into 50 m deep water. Since 2004, the shipment of gas products has also occurred at a dock located north of the bay.

By 2030, climate change scenarios predict an average 6% increase in precipitation upstream of the Pisco River, reaching a 16% increase in summer (SENAMHI, 2013; MINAM, 2016). The

2013; MINAM, 2016). El aumento de la descarga del río contribuiría directamente a intensificar la estratificación de la bahía en verano, y puede también contribuir a incrementar el aporte de nutrientes y materia orgánica.

Por todo lo mencionado, es necesario tener un mejor conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de la zona, para lo cual el modelado es un herramienta de gran utilidad en ese sentido, a la par de un monitoreo constante de esta zona y su reserva natural.

Por su ubicación geográfica y las condiciones atmosféricas que ejercen influencia sobre este, el mar peruano posee características dinámicas en un amplio rango de escalas espaciales y temporales. Particularmente, en la plataforma continental la dinámica costera es afectada por sus fronteras en el fondo marino y en la línea de costa adyacente (JANEKOVIC *et al.*, 2012). Debido al elevado costo computacional que implica resolver todas estas características con una sola grilla, lo cual implicaría un costo de procesamiento innecesario cuando se requiere estudiar un área en particular contenida dentro de esta, se han utilizado para el estudio de la dinámica superficial de la zona, modelos hidrodinámicos de aguas rasas (YZOCUPE, 2002) y de gravedad reducida (CARBONEL, 2013), en ambos casos, con aproximaciones bidimensionales y fronteras abiertas no reflectantes, modificando de manera artificial el forzante atmosférico y en periodos de tiempo cortos (mayo y agosto 1999, respectivamente).

En nuestro caso, para conservar la información de las fronteras abiertas y transferirlas a la simulación en cada paso de tiempo, hemos realizado anidamientos de grillas de mayor resolución (grilla hijo) con las de resolución más baja (grilla padre). Esta última, trasmite su información a la grilla hijo a través de las condiciones de frontera (BC) que se necesita para la simulación.

Para construir ambas grillas, las BC y realizar las simulaciones, se utilizó el modelo ROMS (SHCHEPETKIN & McWILLIAMS, 2005, 2009). ROMS ha probado ser capaz de reproducir una circulación realista en cada uno de los EBUS conocidos (MARCHESIELLO *et al.*, 2003; MARCHESIELLO & ESTRADÉ, 2007; ESTRADÉ *et al.*, 2008; CAPET *et al.*,

increase in river discharge would directly contribute to intensified stratification of the bay in summer, and may also contribute to increased nutrient and organic matter inputs.

Thus, it is necessary to have a better knowledge of the physical, chemical, and biological characteristics of the area, for which modeling is a very useful tool, along with constant monitoring of this area and its natural reserve.

The Peruvian Sea has dynamic characteristics on a wide range of spatial and temporal scales given its geographic location and the atmospheric conditions that influence it. Coastal dynamics on the continental shelf are particularly affected by its boundaries on the seafloor and the adjacent coastline (JANEKOVIC *et al.*, 2012). Since the high computational cost of resolving all these features with a single grid, which would imply an unnecessary processing cost when a particular area contained within this is required to be studied, hydrodynamic models of shallow waters (YZOCUPE, 2002) and reduced gravity (CARBONEL, 2013) have been used to study the surface dynamics of the area, in both cases, with two-dimensional approximations and non-reflecting open boundaries, artificially modifying the atmospheric forcing and in short periods (May and August 1999, respectively).

So, we nested higher resolution grids (child grid) with lower resolution grids (parent grid) to keep the information of the open boundaries and transfer them to the simulation at each time step. The parent grid transmits its information to the child grid through the boundary conditions (BC) needed for the simulation.

The ROMS model (SHCHEPETKIN & McWILLIAMS, 2005, 2009) was used to construct both the BC grids and perform the simulations. It is proven to reproduce a realistic circulation in each of the known EBUS (MARCHESIELLO *et al.*, 2003; MARCHESIELLO & ESTRADÉ, 2007; ESTRADÉ *et al.*, 2008; CAPET *et al.*, 2008; MASON *et al.*, 2010). Uncoupled nesting was performed with the ROMS2ROMS tool, which allows

2008; MASON *et al.*, 2010). Para estudiar las zonas más cercanas a la costa con mayor detalle, se realizaron anidamientos no acoplados con la ayuda de la herramienta ROMS2ROMS, que permite el uso de la información de entrada de los datos de las fronteras, así como la evolución libre en el flujo simulado (MASON *et al.*, 2010). Para lograr esto, se utiliza los resultados de la simulación padre como condiciones de borde de la simulación hijo; este procedimiento ha sido usado para estudiar la interacción de las ondas y las corrientes en cuencas semicerradas (BENETAZZO *et al.*, 2013), la variabilidad semidiurna de las mareas en ensenadas (BUIJSMAN *et al.*, 2012), la interacción océano-atmósfera en zonas de afloramiento costero (BOE *et al.*, 2011), la generación de filamentos en cabos (TROUPIN *et al.*, 2012), la circulación en cañones submarinos (AHUMADA-SEMPOAL *et al.*, 2013) el transporte de huevos y larvas entre la costa y las islas (BROCHIER *et al.*, 2011) y la dispersión de efluentes de aguas residuales en bahías (UCHIYAMA *et al.*, 2014). En todos los casos las resoluciones horizontales han sido menores a 5 km llegando en algunos casos hasta 75 m.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Modelado ROMS y ROMS2ROMS

Este método fue desarrollado por MASON *et al.* (2010), el cual consiste en realizar un anidamiento de un solo sentido (*one-way*), no acoplado, entre dos grillas de diferente resolución espacial, la simulación es secuencial, es decir, primero se utiliza el modelo ROMS sobre la grilla de menor resolución (padre) y luego se toman los resultados de esta simulación para construir las condiciones iniciales y de frontera que utilizará el modelo ROMS al ejecutarse sobre la grilla de mayor resolución (hijo), la cual a su vez se utiliza para realizar otro anidamiento de mayor resolución. La ventaja de este método es que mejora notablemente la estabilidad y precisión de las condiciones de frontera del modelo por medio de la reducción de efectos indeseables en las fronteras como son las corrientes espurias o la reflexión de ondas, así como asegura la conservación del volumen en las fronteras abiertas (MARCHESIELLO *et al.*, 2001; MASON *et al.*, 2010).

the use of the input information from the boundary data, as well as the free evolution in the simulated flow (MASON *et al.*, 2010) to study the nearshore areas in more detail. To do so, the results of the parent simulation are used as boundary conditions for the child simulation. This procedure has been used to study the interaction of waves and currents in semi-enclosed basins (BENETAZZO *et al.*, 2013), the semi-diurnal variability of tides in inlets (BUIJSMAN *et al.*, 2012), ocean-atmosphere interaction in coastal upwelling areas (BOE *et al.*, 2011), filament generation in capes (TROUPIN *et al.*, 2012), circulation in submarine canyons (AHUMADA-SEMPOAL *et al.*, 2013), the transport of eggs and larvae between the coast and islands (BROCHIER *et al.*, 2011), and the dispersion of sewage effluents in bays (UCHIYAMA *et al.*, 2014). Horizontal resolutions in all cases have been less than 5 km reaching in some cases up to 75 m.

2. MATERIAL AND METHODS

Modeling ROMS and ROMS2ROMS

MASON *et al.* (2010) developed this method. It consists of performing a one-way, uncoupled nesting between two grids of different spatial resolutions. The simulation is sequential, *i.e.*, first, the ROMS model is run on the lower resolution grid (parent), and then the results of this simulation are used to construct the initial and boundary conditions that the ROMS model will utilize when run on the higher resolution grid (child), which in turn is used to perform another higher resolution nesting. This method has the advantage of significantly improving the stability and accuracy of the model boundary conditions by reducing undesirable boundary effects such as spurious currents or wave reflection, as well as ensuring volume conservation at open boundaries (MARCHESIELLO *et al.*, 2001; MASON *et al.*, 2010).

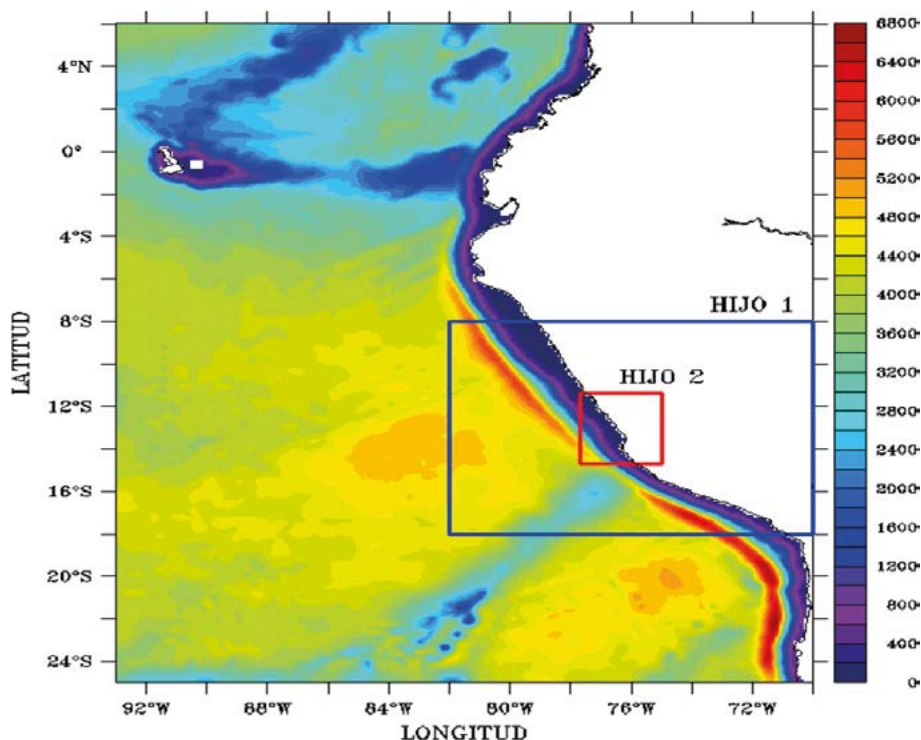


Figura 1.- Anidamientos sucesivos para el modelado ROMS2ROMS: 12,3 km de resolución horizontal (padre), en el rectángulo azul el primer anidamiento de 4,1 km (hijo 1) y en el rectángulo rojo el segundo anidamiento de 1,37 km (hijo 2)

Figure 1. Successive nestings for ROMS2ROMS modeling: 12.3 km horizontal resolution (parent), first nesting of 4.1 km (child 1) in the blue rectangle and second nesting of 1.37 km (child 2) in the red rectangle

Configuración del modelo

Para estudiar la variación climatológica de la temperatura y las corrientes en la bahía seleccionada, se realizó una simulación ROMS a 12,3 km de resolución horizontal (padre) y dos anidamientos sucesivos de 4,1 km (hijo 1) y de 1,37 km (hijo 2), los cuales están dentro del rango recomendado para la relación entre grillas padre/hijo cuando se utiliza la herramienta ROMS2ROMS (TROUPIN *et al.*, 2012). El área de estudio estuvo comprendida entre 78°W – 75°W y 15°S – 11°S, abarcando las bahías de Miraflores y de Paracas (Fig. 1).

Para obtener los forzantes atmosféricos necesarios para el modelo se utilizaron datos del satélite QUIKSCAT (vientos) y del modelo ECMWF (flujos de calor y precipitación), los cuales, para ser utilizados como forzantes en los anidamientos, fueron interpolados a la resolución de las grillas hijo 1 y 2. Para construir las condiciones de frontera del hijo 1 se utilizaron los resultados de la simulación padre y para las condiciones de frontera del hijo 2, se utilizaron los resultados de

Model configuration

We performed a ROMS simulation at 12.3 km horizontal resolution (parent) and two successive nestings of 4.1 km (child 1) and 1.37 km (child 2), which are within the recommended range for the parent/child grid ratio when using the ROMS2ROMS tool (TROUPIN *et al.*, 2012) to study the climatological variation of temperature and currents in the selected bay. The study area spanned 78°W - 75°W and 15°S - 11°S, encompassing the Miraflores and Paracas bays (Fig. 1).

To obtain the atmospheric forcing needed for the model, we used data from the QUIKSCAT satellite (winds) and the ECMWF model (heat fluxes and precipitation), which, to be applied as forcing in the nestings, were interpolated to the resolution of the child 1 and 2 grids. The results of the parent simulation were used to construct the boundary conditions of child 1, and the results of the child 1 simulation were employed for the boundary conditions

la simulación hijo 1. En ambos anidamientos se utilizó el procedimiento ROMS2ROMS.

Batimetría

Para su frontera inferior, el modelo necesitaba una batimetría de resolución mayor o igual a la que se pretendía simular, por este motivo, se utilizó la base de datos trabajada en el Proyecto “Batimetría Perú” realizado en el marco de la colaboración IMARPE-IRD (Yann Tremblay com. pers.) en el cual se construyó una grilla regular de la batimetría del Perú utilizando herramientas geoestadísticas y la información de cruceros de IMARPE, cartas de navegación y bases de datos internacionales de la NOAA, ETOPO y GEBCO para obtener una batimetría de alta resolución (50 m) cerca de la costa peruana. Este producto fue corregido para evitar diferencias en las profundidades que podrían existir entre las grillas padre e hijos aplicándole un filtro Hanning implementado en ROMS2ROMS. En la figura 2 se muestra la batimetría en el área de estudio correspondiente a la bahía seleccionada.

of child 2. ROMS2ROMS procedure was used in both nestings.

Bathymetry

For its lower boundary, the model needed a bathymetry of higher or equal resolution to the one it was intended to simulate. Therefore, we used the database worked on in the “Bathymetry Peru” project carried out during the IMARPE -IRD collaboration (Yann Tremblay, pers. comm.), in which a regular grid of the bathymetry of Peru was constructed using geostatistical tools and information from IMARPE cruises, navigation charts, and international databases from NOAA, ETOPO, and GEBCO to obtain a high resolution (50 m) bathymetry near the Peruvian coast. This product was corrected to avoid differences in depths that could exist between parent and child grids by applying a Hanning filter implemented in ROMS2ROMS. Figure 2 shows the bathymetry in the study area corresponding to the selected bay.

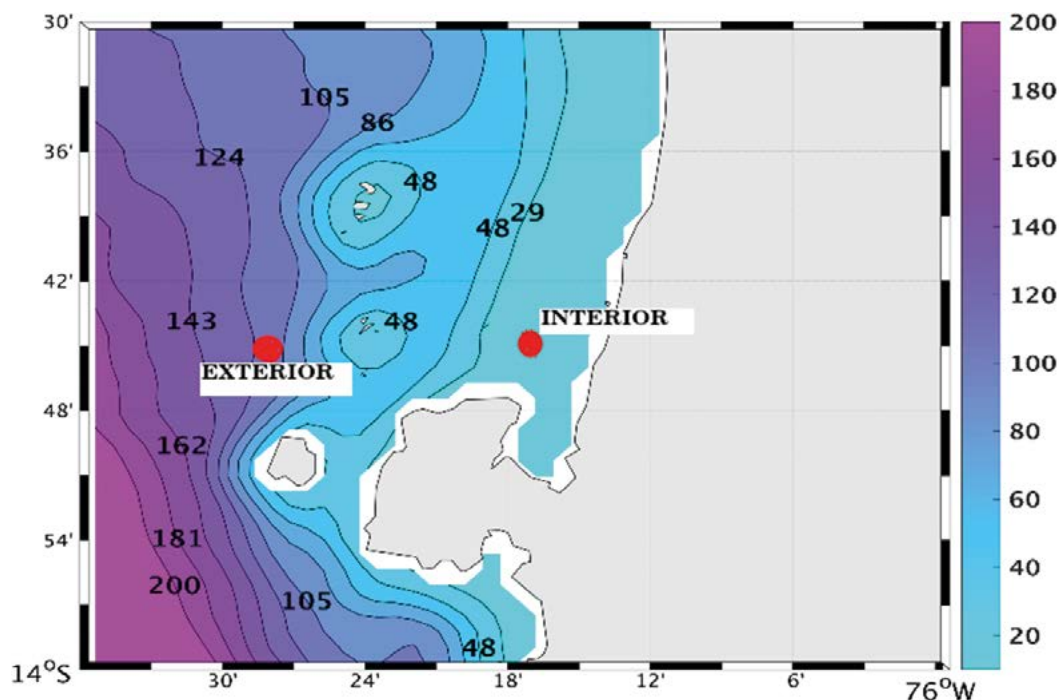


Figura 2.- Batimetría del área de estudio que comprende la bahía de Pisco, los valores están en metros. En rojo, dos puntos utilizados para validar la TSM, uno “exterior” (E) lejano a la bahía (76,6°W y 13,8°S) y el más cercano a ella “interior” (I) (76,3°W y 13,7°S)

Figure 2. Bathymetry of the study area covering the Pisco Bay, values are in meters. In red, two spots used to validate SST, one “exterior” (E) far from the bay (76.6°W and 13.8°S) and the closest “interior” (I) (76.3°W and 13.7°S)

Datos observados

Se utilizó una climatología desarrollada en el marco del convenio interinstitucional entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Instituto francés de Investigación para el Desarrollo (IRD), dentro del programa “Volontaire Civil International”, generada a partir del procesamiento de datos obtenidos del World Ocean Database (WOD, http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html) de la National Oceanographic Data Center (NODC) y cerca de 15000 perfiles verticales de temperatura colectados entre 1961 y 2008 del IMARPE, con los cuales se obtuvo un campo grillado de resolución espacial de $0,1^\circ$. Las herramientas estadísticas utilizadas se describen en BERTRAND *et al.* (2011)

A continuación, se compararon series de TSM de esta climatología con las series de TSM simuladas con el modelo de mayor resolución (hijo 2) en dos puntos comunes: el punto “E” ($76,6^\circ\text{W}$ y $13,8^\circ\text{S}$) fuera de la bahía y en el punto “I” ($76,3^\circ\text{W}$ y $13,7^\circ\text{S}$) dentro de la bahía.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución de temperatura y corrientes a diferente resolución espacial

A modo de comparación, en la figura 3 se muestra el impacto en la distribución de la temperatura y corrientes superficiales simuladas al aumentar la resolución espacial del modelo, en una zona que comprende la parte central del sistema de afloramiento peruano. En todos los casos, la temperatura es mayor en la frontera lateral oeste disminuyendo al acercarse a la costa, sin embargo, tanto en el primer como segundo anidamiento se observa la formación de filamentos, como resultado de la inestabilidad energética y los remolinos producidos por el flujo lateral y la re-estratificación que tiene lugar en cada anidamiento. Como puede verse, estas estructuras, así como la intensidad de las corrientes superficiales aumentan con la resolución del modelo (CAPET *et al.*, 2008b; COLAS *et al.*, 2012).

Observed data

We used a climatology developed under the inter-institutional agreement between the *Instituto del Mar del Perú* (IMARPE) and the French Research Institute for Development (IRD), within the “*Volontaire Civil International*” program, generated from the data processing obtained from the World Ocean Database (WOD, http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr_wod.html) of the National Oceanographic Data Center (NODC) and about 15000 vertical temperature profiles collected between 1961 and 2008 by IMARPE, with which a grid field of 0.1° spatial resolution was obtained. The statistical tools used are described in BERTRAND *et al.* (2011)

SST series from this climatology were then compared with SST series simulated with the higher resolution model (child 2) at two common spots: “E” (76.6°W and 13.8°S) outside the bay and “I” (76.3°W and 13.7°S) inside the bay.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Temperature and current distribution at different spatial resolution

For comparison, Figure 3 shows the impact on the distribution of simulated temperature and surface currents as the spatial resolution of the model increases, in an area including the central part of the Peruvian upwelling system. In all cases, the temperature is higher at the western lateral boundary and decreases as it approaches the coast, but both the first and second nestings show the filament formation as a result of the energy instability and eddies produced by the lateral flow and re-stratification that occurs in each nesting. These structures, as well as the intensity of the surface currents, increase with the resolution of the model (CAPET *et al.*, 2008b; COLAS *et al.*, 2012).

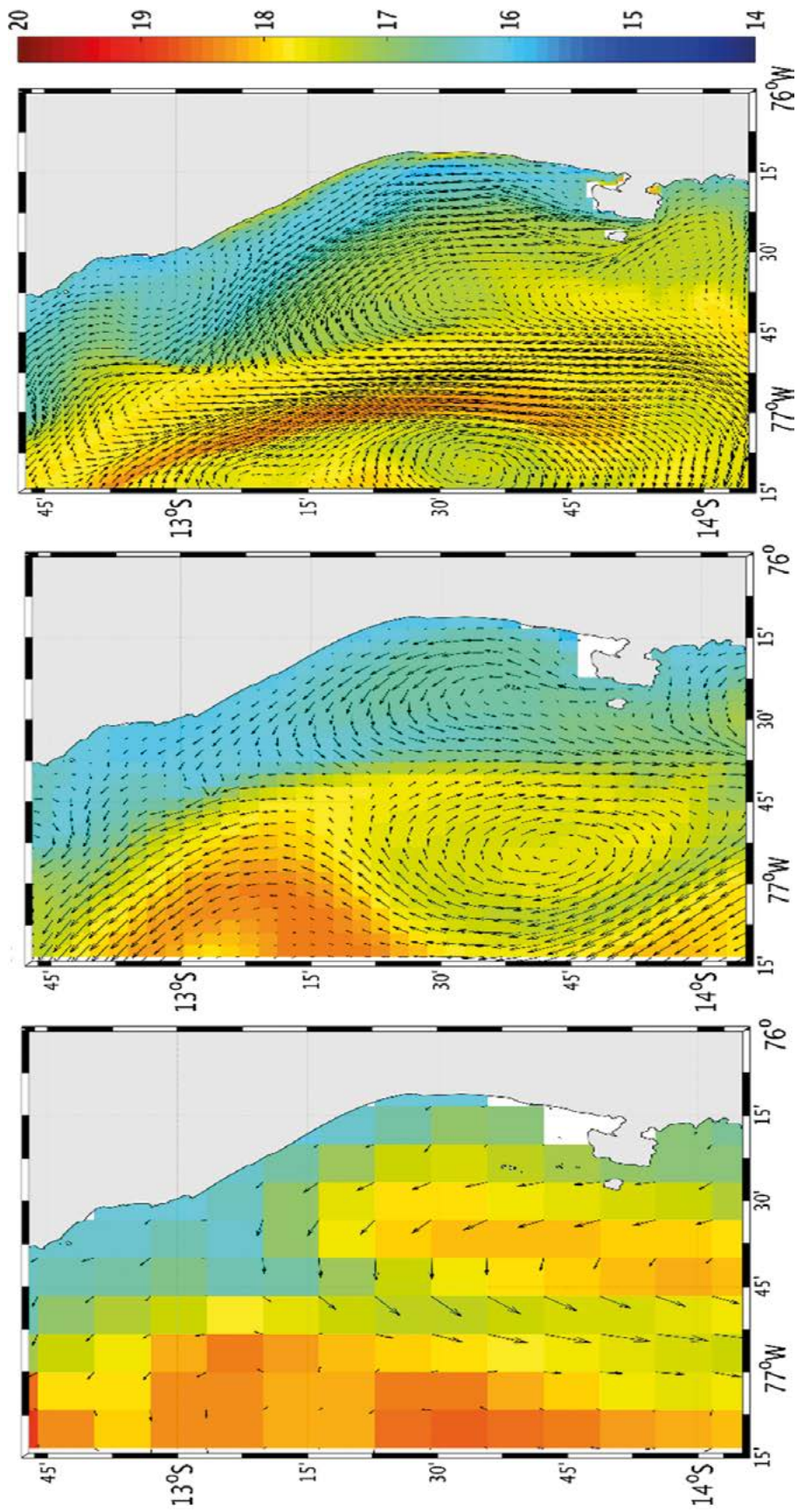


Figura 3.- Distribución espacial de la TSM obtenida. A la izquierda la simulación original de 12,3 km de resolución horizontal (padre), en el centro el primer anidamiento de 4,1 km (hijo 1) y a la derecha, el segundo anidamiento de 1,37 km (hijo 2). Sobre esta se han colocado los vectores de velocidad de corriente en superficie, en cada punto de grilla, para mostrar la diferencia entre las resoluciones horizontales de cada simulación

Figure 3. Spatial distribution of the SST obtained. On the left, the original simulation of 12.3 km horizontal resolution (parent), in the center the first nesting of 4.1 km (child 1) and on the right, the second nesting of 1.37 km (child 2). On top of this, the surface current velocity vectors have been placed at each grid point to show the difference between the horizontal resolutions of each simulation

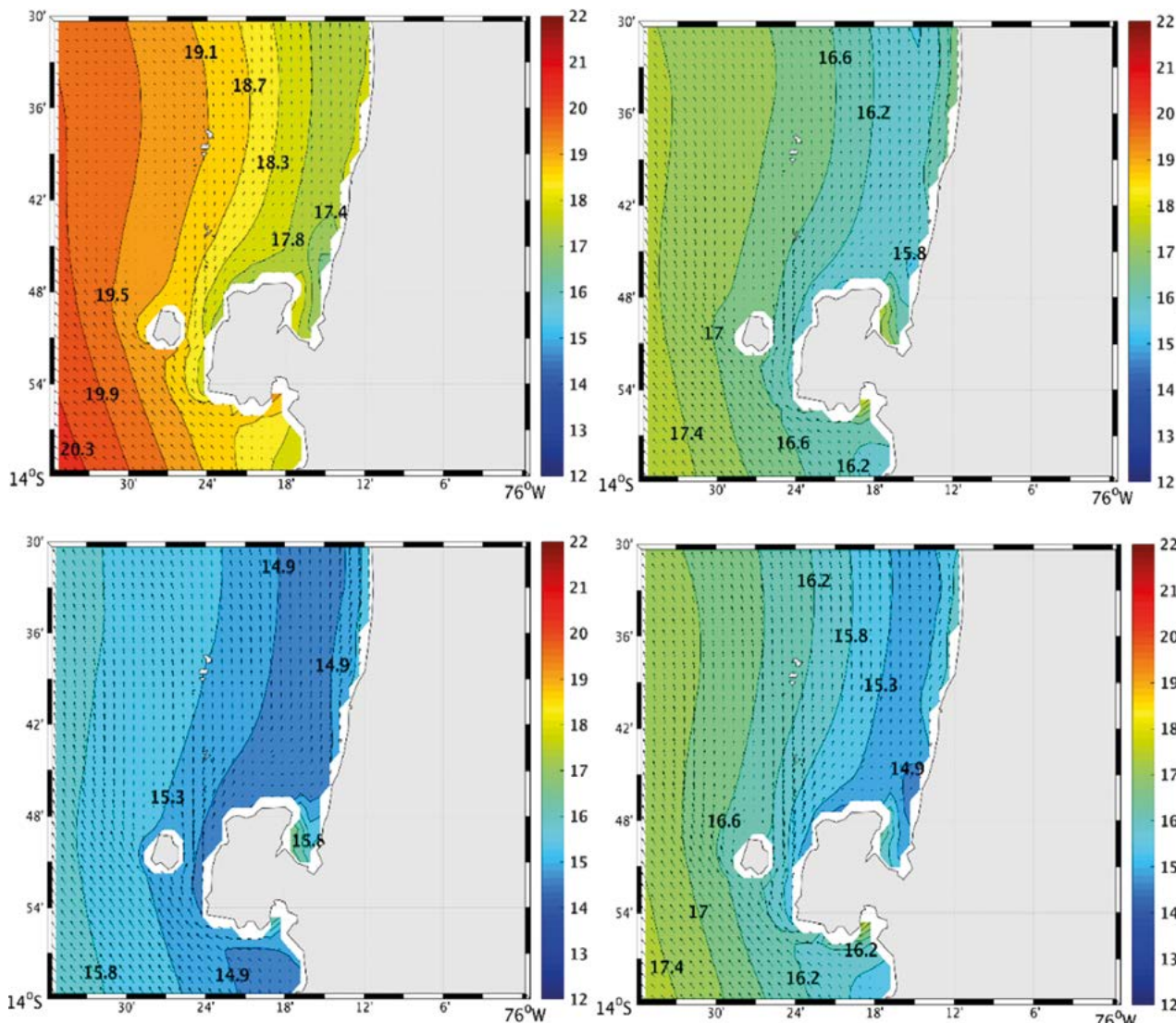


Figura 4.- Variación estacional de la TSM (°C) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo derecha). Las flechas indican la dirección de las corrientes, en colores, la intensidad de la temperatura

Figure 4. Seasonal variation of SST (°C) in the study area in summer (top left), autumn (top right), winter (bottom left), and spring (bottom right). Arrows indicate the direction of the currents, in colors, the temperature intensity

Variación estacional de la temperatura

En la figura 4 se muestra la distribución superficial de la temperatura del mar (en °C), así como la dirección de las corrientes marinas por medio de vectores. En ella podemos observar que durante el verano la TSM lejos de la bahía es alrededor de 20 °C y va disminuyendo al acercarse a la península de Paracas alcanzando los 19 °C en las proximidades de la isla San Gallán. En la zona comprendida entre la isla y la península la TSM alcanza 18,2 °C y disminuye al acercarse a la bahía de Pisco, llegando a 17,5 °C en la cercanías de la playa Lobería (donde se observa un núcleo más frío) y San Andrés.

Seasonal temperature variation

Figure 4 shows the surface distribution of sea temperature (in °C), as well as the direction of sea currents through vectors. We can note that in summer, the SST far from the bay is around 20 °C and decreases as we approach the Paracas Peninsula, reaching 19 °C in the vicinity of San Gallán Island. The SST in the area between the island and the peninsula reaches 18.2 °C and decreases when approaching the Pisco Bay, reaching 17.5 °C in the vicinity of Lobería beach (where a colder nucleus is observed) and San Andrés.

En otoño, la temperatura entre la isla San Gallán y la península alcanza 16,1 °C, aumentando, a 16,9 °C en el lado oeste de la isla y continuando este ascenso hasta los 17,5 °C a 76°33'W, alejándose de la península. Cerca de la bahía de Pisco, el valor de TSM llega a 15,8 °C frente a San Andrés, sin embargo, dentro de la bahía de Paracas se obtuvieron valores entre 17 y 17,5 °C. Estos valores son mucho menores al compararlos con las mediciones realizadas por IMARPE en otoño de 1996, en la cual la TSM cerca de la bahía de Pisco fue en promedio 19,9 °C (GUZMÁN *et al.*, 1997).

Durante el invierno, se obtuvo una TSM exterior (76°33'W) igual a 15,8 °C. Al acercarse a la bahía de Pisco, esta disminuye aún más, llegando a 14,75 °C entre la isla Sangayan y la península de Paracas. Sin embargo, aumenta cerca de San Andrés hasta 15,1 °C y dentro de la bahía de Paracas supera los 16 °C. Estos valores son más cercanos a los registrados *in situ* en el invierno de 2003, 2004 y 2005 por los cruceros de evaluación de IMARPE, en los cuales la TSM en la bahía de Pisco se mantuvo entre 15 y 16 °C (VÁSQUEZ 2008, 2008b, 2008c).

Finalmente, en primavera, la simulación generó un núcleo frío frente a playa Lobería, menor a 15 °C. En la parte norte de la península, la TSM fue de 15 °C aumentando dentro de la bahía de Paracas hasta 17 °C. En el extremo oeste de la isla Sangayan se obtuvo una temperatura de 16,5 °C y esta fue aumentando al alejarse de la costa hasta alcanzar los 17,5 °C a 76°33'W. Estos valores son comparables a los registrados en la primavera de 2013, con un núcleo frío de 15 °C cerca de la bahía (MORÓN *et al.*, 2017) y 16 °C fuera de la bahía (MORÓN *et al.*, 2011).

Las series de TSM observadas y simuladas, se muestran en la figura 5, las series dentro ($r = 0,99$, $p < 0,05$) y fuera ($r = 0,95$, $p < 0,05$) de la bahía tienen una buena correlación con la TSM *in situ*, indicando que el modelo reproduce adecuadamente la variación estacional de la TSM. La TSM muestra variación estacional, con los valores más altos en verano para ambos puntos. La TSM de IMARPE dentro de la bahía es mayor a la TSM simulada, en cambio, la TSM simulada es menor que la TSM observada fuera de la bahía.

In autumn, the temperature between San Gallán Island and the peninsula reaches 16.1 °C, increasing to 16.9 °C on the west side of the island, and continuing to rise to 17.5 °C at 76°33'W, moving away from the peninsula. The SST near Pisco Bay reaches 15.8 °C off San Andres, but within the Paracas Bay, values between 17 and 17.5 °C were obtained. These values are much lower when compared to the measurements made by IMARPE in autumn 1996, in which the SST near Pisco Bay averaged 19.9 °C (GUZMÁN *et al.*, 1997).

In winter, an outside SST (76°33'W) equal to 15.8 °C was obtained. When approaching Pisco Bay, it decreases, even more, reaching 14.75 °C between San Gallán Island and the Paracas Peninsula. Nevertheless, it increases near San Andres to 15.1 °C and within the Paracas Bay, it exceeds 16 °C. These values are closer to those recorded *in situ* in the winter of 2003, 2004, and 2005 by the IMARPE assessment cruises, in which the SST in the Pisco Bay remained between 15 and 16 °C (VÁSQUEZ 2008, 2008b, 2008c).

Finally, in spring, the simulation generated a cold nucleus off Lobería beach, less than 15 °C. In the northern part of the peninsula, the SST was 15 °C increasing within the Paracas Bay up to 17 °C. At the west end of San Gallán Island, a temperature of 16.5 °C was obtained and this increased away from the coast until it reached 17.5 °C at 76°33'W. These values are comparable to those recorded in the spring of 2013, with a cold nucleus of 15 °C near the bay (MORÓN *et al.*, 2017) and 16 °C off the bay (MORÓN *et al.*, 2011).

Figure 5 shows the observed and simulated SST series, the series inside ($r = 0.99$, $p < 0.05$) and outside ($r = 0.95$, $p < 0.05$) the bay have a good correlation with the *in situ* SST, indicating that the model is accurately reproducing the seasonal SST variation. SST shows seasonal variation, with the highest values in summer for both spots. The IMARPE SST inside the bay is higher than the simulated SST, while the simulated SST is lower than the observed SST outside the bay.

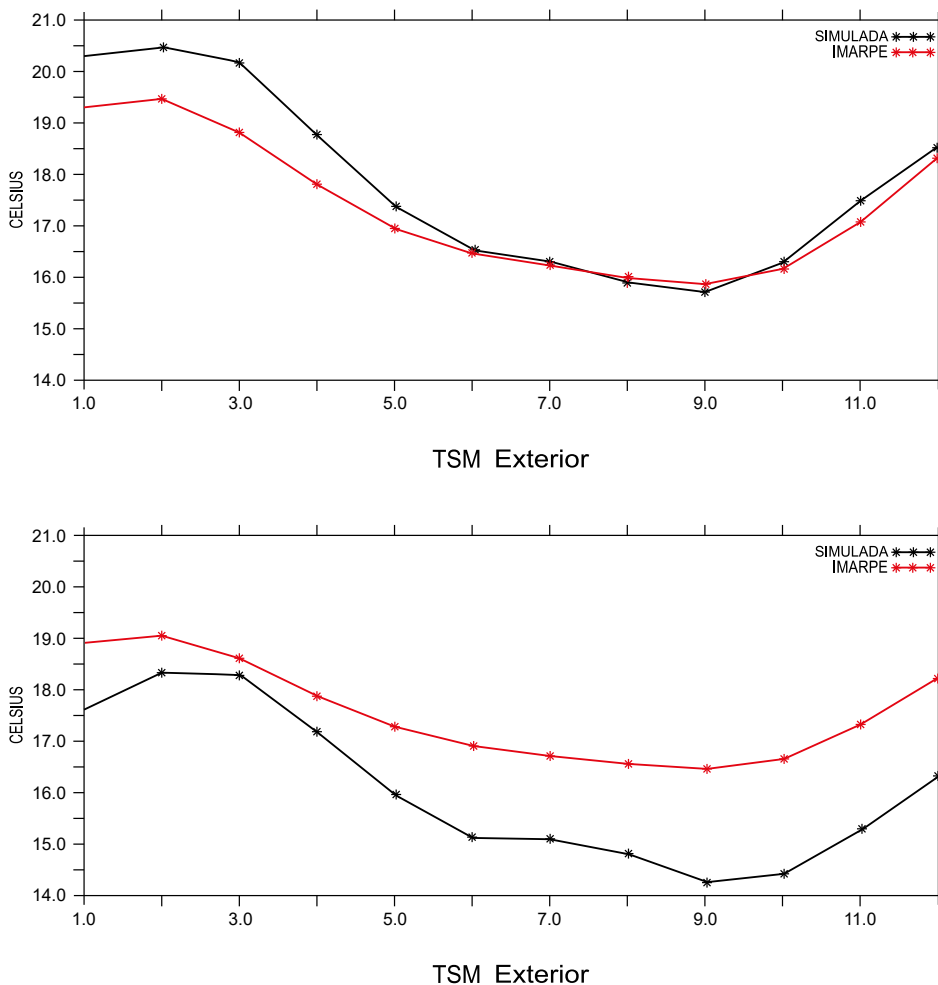


Figura 5.- Series temporales de TSM en la bahía de Paracas, simulada por ROMS (negro) y registradas por IMARPE (rojo) que muestran la variación estacional en dos puntos: uno exterior lejano a la bahía “E” (76,6°W y 13,8°S) en la parte de arriba y el otro, en la parte de abajo, frente a la boca de bahía Paracas “I”, según los datos obtenidos de IMARPE (76,3°W y 13,7°S), los valores están en °C

Figure 5. SST time series in Paracas Bay, simulated by ROMS (black) and recorded by IMARPE (red) showing the seasonal variation at two points: one far outside the bay “E” (76.6°W and 13.8°S) at the top and the other, at the bottom, off the mouth of Paracas Bay “I”, according to data obtained from IMARPE (76.3°W and 13.7°S), the values are in °C

En invierno se presentan los valores más bajos de TSM, y se observa que los valores fuera de la bahía coinciden con los datos *in situ* registrados por IMARPE, mientras que, dentro de la bahía los datos simulados llegan a ser hasta 2,5 °C menores a los datos observados. Estas diferencias pueden deberse al hecho de que, el viento superficial con el que se fuerza el dominio del modelo más pequeño viene de una interpolación matemática, que impone un “*dropoff*” del viento (RENAULT *et al.*, 2012) artificialmente más intenso, tal que un viento más intenso de lo normal, propicia un mayor afloramiento en la bahía, produciendo como consecuencia aguas más frías que lo observado en esa zona.

In winter, the lowest SST values occur, and it is observed that the values outside the bay coincide with the *in situ* data recorded by IMARPE, while inside the bay the simulated data are up to 2.5 °C lower than the observed data. Such differences were probably caused because the surface wind used to force the domain of the smaller model comes from a mathematical interpolation, which imposes an artificially more intense wind dropoff (RENAULT *et al.*, 2012), resulting in a more intense wind than normal, which leads to a greater upwelling in the bay, producing colder waters than those observed in that area.

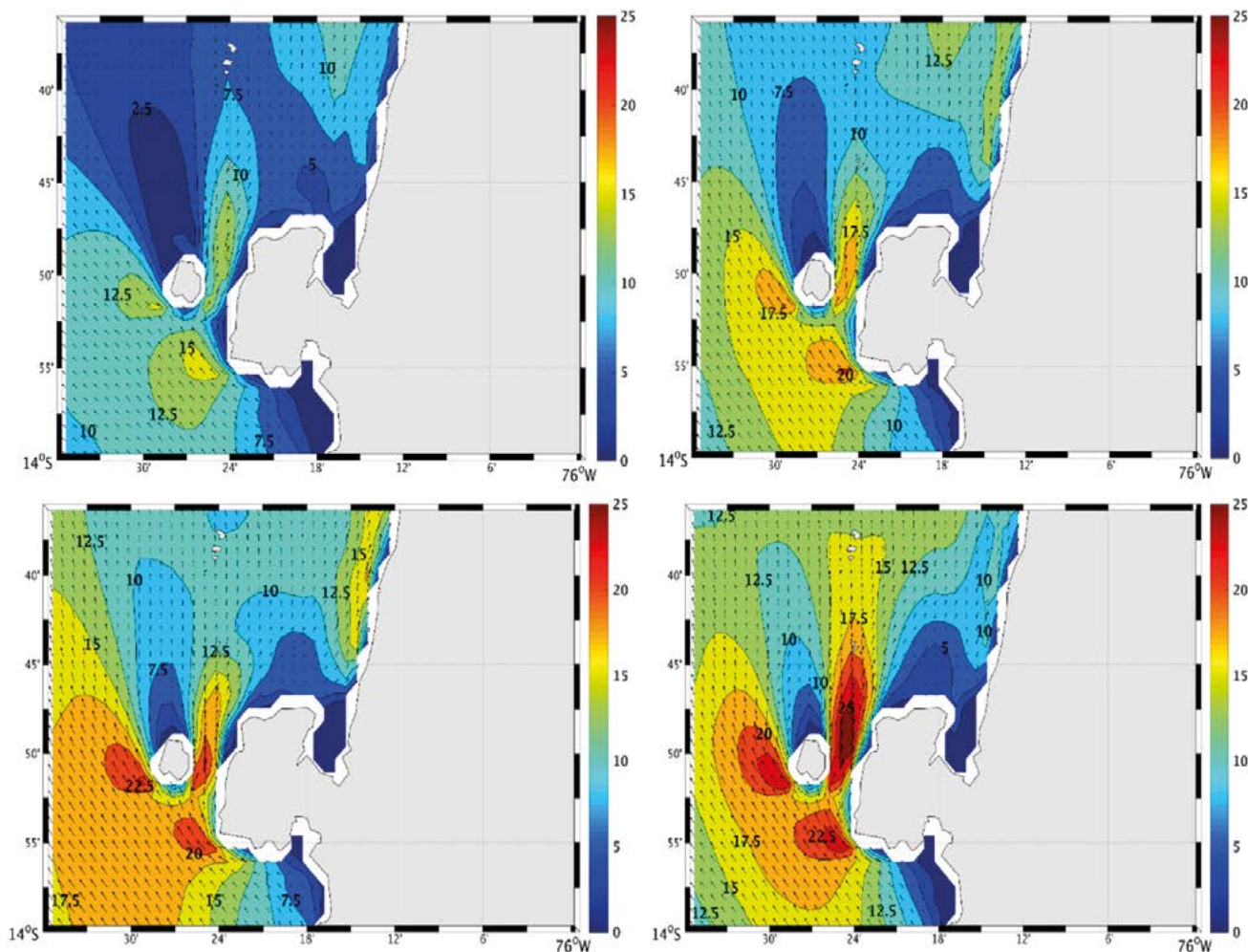


Figura 6.- Variación estacional de las corrientes marinas en superficie (cm/s) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo derecha). Las flechas indican la dirección de las corrientes, en colores, la intensidad de las mismas

Figure 6. Seasonal variation of surface ocean currents (cm/s) in the study area in summer (top left), autumn (top right), winter (bottom left), and spring (bottom right). Arrows indicate the current direction, color indicates the intensity of the currents

Variación estacional de las corrientes

En la figura 6 se muestra la distribución superficial de las corrientes marinas, así como la dirección de estas por medio de vectores. En ella, podemos observar que durante el verano la velocidad es mayor en las cercanías de la Península de Paracas y al norte de 13,4°S (7,5 cm/s en ambos casos) y disminuye al acercarse a la costa hasta 2,5 cm/s.

En otoño, la velocidad aumenta en la cercanías de la Península de Paracas llegando hasta 12,5 cm/s en la parte sur, también se encontró este valor cerca de la costa en 13,2°S, mientras que en las cercanías de la parte norte de la Península la corriente disminuye hasta 5 cm/s conforme nos acercamos a la bahía de Paracas, estos resultados están dentro del rango registrado en las cercanías de la bahía

Seasonal variation in currents

Figure 6 shows the surface distribution of the ocean currents, as well as their direction through vectors. We can see that the velocity is higher in summer near the Paracas Peninsula and north of 13.4°S (7.5 cm/s in both cases) and decreases as we approach the coast, down to 2.5 cm/s.

In autumn, the velocity increases in the vicinity of the Paracas Peninsula reaching up to 12.5 cm/s in the southern part. This value was also found near the coast at 13.2°S, while in the vicinity of the northern part of the Peninsula the current decreases to 5 cm/s as we approach the Paracas Bay. These results are within the range recorded in the vicinity of the bay in autumn 1995, in which slow flows of less than

durante el otoño 1995, en el cual se registraron flujos lentos menores a 9 cm/s (JACINTO *et al.*, 1996). En el área que abarca la bahía de Pisco (13°40' y 13°50') se obtuvieron valores cercanos a 12,5 cm/s, los cuales están acorde a las mediciones realizadas por el IMARPE en el otoño 1996 cuando los valores no superaban los 15 cm/s (GUZMÁN *et al.*, 1997).

Durante el invierno, se observa cerca al sur de la Península de Paracas que la velocidad aumenta hasta 15 cm/s, mientras que al norte de ella, disminuye hasta 2,5 cm/s, además se observan dos núcleos de 12,5 cm/s que se forman frente a la costa. Finalmente, en primavera la velocidad aumenta aún más y los dos núcleos detectados en invierno alcanzan velocidades de 22,5 cm/s, ambos incluidos en una corriente formada aproximadamente a 20 km de la costa y que circula a lo largo de ella a una velocidad de 20 cm/s en dirección noroeste.

En la figura 7, se muestran las series temporales de corriente superficial (en cm/s) para los puntos situados dentro y fuera de la bahía, en las cuales se observa que, la componente zonal de la corriente dentro de la bahía se mantiene en dirección al este (hacia la costa), durante todo el año, alcanzando sus máximos valores en primavera (diciembre - 5,7 cm/s), y mínimos en invierno, aunque es enero (3,8 cm/s) cuando se registra el mínimo anual. Fuera de la bahía, la dirección es al oeste durante todo el año (alejándose de la costa) con su máximo en invierno (9,8 cm/s en setiembre) y mínimo en verano (3,9 cm/s en marzo).

Para la componente meridional de la corriente, se observa que dentro de la bahía la dirección es hacia el norte durante todo el año, con su máximo en invierno (10 cm/s en agosto) y el mínimo en verano (1,7 cm/s en enero). Para el punto fuera de la bahía, solo se obtienen valores de corriente hacia el sur, durante marzo (0,3 cm/s), durante el resto del año, la dirección es hacia el norte, destacando el máximo en invierno (22 cm/s en setiembre).

9 cm/s were recorded (JACINTO *et al.*, 1996). In the surrounding area of Pisco Bay (13°40' and 13°50'), values close to 12.5 cm/s were obtained, which are consistent with the measurements made by IMARPE in autumn 1996, with values that did not exceed 15 cm/s (GUZMÁN *et al.*, 1997).

In winter, near the south of the Paracas Peninsula, we observed that the velocity increases up to 15 cm/s, while in the north, it decreases up to 2.5 cm/s; also, two nuclei of 12.5 cm/s are observed forming off the coast. Finally, in spring, the velocity increases even more, and the two nuclei detected in winter reach velocities of 22.5 cm/s, both included in a current formed approximately 20 km offshore and circulating along the coast at a velocity of 20 cm/s in a northwest direction.

Figure 7 shows the surface current time series (in cm/s) for the spots located inside and outside the bay, in which it is observed that the zonal current component inside the bay is maintained in an easterly direction (towards the coast) throughout the year, peaking in spring (December - 5.7 cm/s), and reaching minimum values in winter, although January (3.8 cm/s) is when the annual minimum is recorded. Outside the bay, the direction is westward throughout the year (away from the coast) with its maximum in winter (9.8 cm/s in September) and minimum in summer (3.9 cm/s in March).

For the meridional current component, we observed that inside the bay the direction is northward throughout the year, with a maximum in winter (10 cm/s in August) and a minimum in summer (1.7 cm/s in January). For the spot outside the bay, current values are only obtained towards the south, in March (0.3 cm/s), whereas the direction is towards the north during the rest of the year, with a maximum in winter (22 cm/s in September).

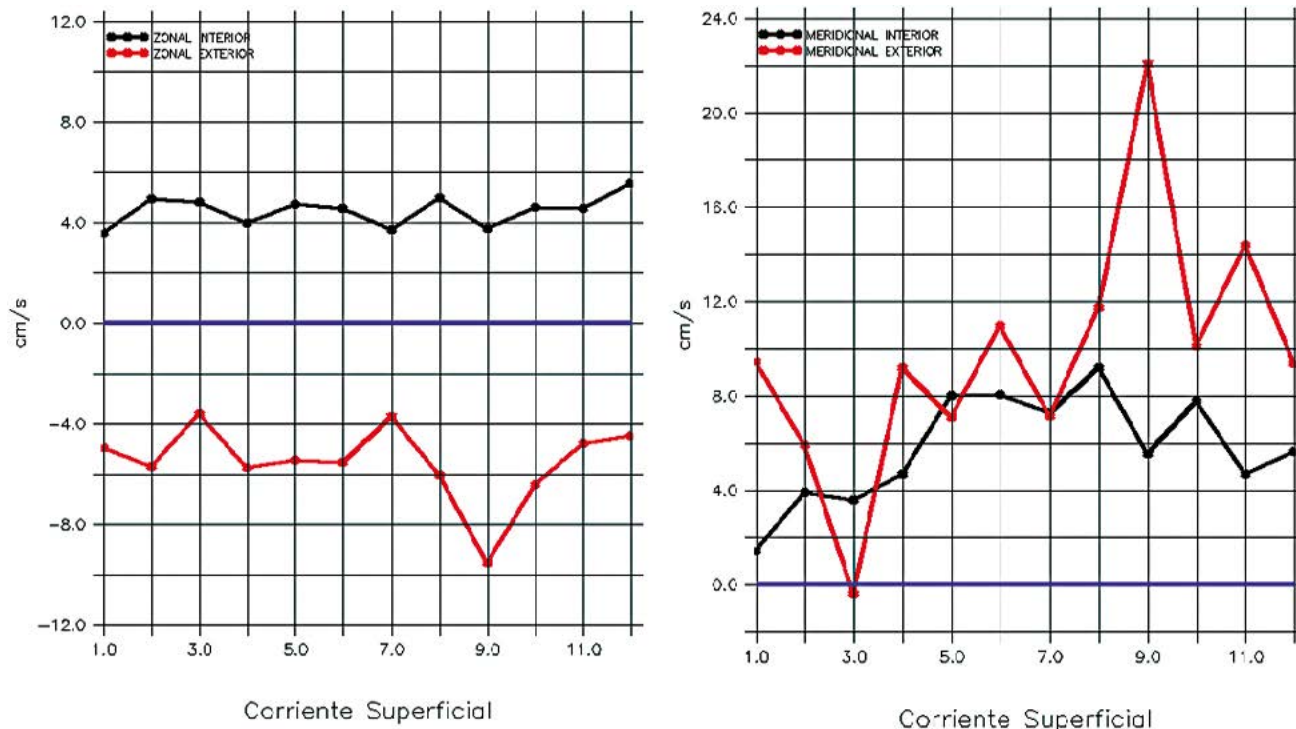


Figura 7.- Series temporales de corriente superficial simulada (en cm/s), zonal (izquierda) y meridional (derecha) en los puntos interior (negro) (76,3°W y 13,7°S) y exterior (rojo) (76,6°W y 13,8°S), de la bahía de Pisco
 Figure 7. Simulated surface current time series (in cm/s), zonal (left) and meridional (right) at the inner (black) (76.3°W and 13.7°S) and outer (red) (76.6°W and 13.8°S) spots in Pisco Bay

4. CONCLUSIONES

El modelo reprodujo el ciclo estacional de la TSM, dentro ($r = 0,99$) y fuera ($r = 0,95$) de la bahía de Pisco, con algunas diferencias en la intensidad de la TSM simulada y observada.

En el caso de la TSM fuera de la bahía, el modelo reprodujo de manera aceptable los resultados observados en invierno y primavera, mientras que para el punto dentro de la bahía en las mismas estaciones se obtiene una diferencia mayor a 2 °C. Durante el verano el modelo subestima la TSM dentro y fuera de la bahía.

En el área que incluye la Península de Paracas se observa que la velocidad de las corrientes va en dirección noroeste con mayor intensidad al sur y al oeste de la península, alcanzando sus valores más altos en primavera (22,5 cm/s) y los más bajos en verano (7,5 cm/s). La corriente detectada en primavera podría estar asociada a la Corriente Costera Peruana. Dentro de la bahía de Pisco la velocidad de las corrientes disminuye hasta 2,5 cm/s durante todo el año.

4. CONCLUSIONS

The model reproduced the seasonal cycle of SST inside ($r = 0.99$) and outside ($r = 0.95$) Pisco Bay, with some differences in simulated and observed SST intensity.

Regarding the SST outside the bay, the model acceptably reproduced the results observed in winter and spring, while for the spot inside the bay, for the same seasons, a difference of more than 2 °C is obtained. In summer, the model underestimates the SST inside and outside the bay.

In the area including the Paracas Peninsula, the current velocity runs in a northwesterly direction with greater intensity to the south and west of the peninsula, peaking in spring (22.5 cm/s) and reaching its lowest values in summer (7.5 cm/s). In spring, the current detected could be associated with the Peruvian Coastal Current. Within Pisco Bay, the current velocity decreases up to 2.5 cm/s throughout the year.

En vista que la simulación a esta escala brinda mejores resultados fuera de la bahía que dentro de ésta, se recomienda mejorar el forzamiento atmosférico antes de realizar una simulación aplicando el ROMS2ROMS a mayor resolución espacial (e.g. 300 m).

Since simulation at this scale gives better results outside the bay than inside the bay, we recommend improving the atmospheric forcing before performing a simulation applying ROMS2ROMS at higher spatial resolution (e.g., 300 m).

5. REFERENCIAS

- AHUMADA-SEMPOAL, M.A., FLEXAS, M., BERNARDELLO, R., BAHAMON, N., CRUZADO, A. (2013). Northern Current variability and its impact on the Blanes Canyon circulation: A numerical study. *Progress in Oceanography*, 118, 61-70.
- BENETAZZO, A., CARNIEL, S., SCLAVO, M., BERGAMASCO, A. (2013). Wave-current interaction: effect on the wave field in a semi-enclosed basin. *Ocean Model*, 70, 152-165.
- BERTRAND, A., CHAIGNEAU, A., PERALTILLA, S., LEDESMA, J., GRACO, M., *et al.* (2011). Oxygen: A Fundamental Property Regulating Pelagic Ecosystem Structure in the Coastal Southeastern Tropical Pacific. *PLoS ONE* 6(12), e29558. doi:10.1371/journal.pone.0029558.
- BOE, J., HALL, A., COLAS, F., McWILLIAMS, J., QU, X., KURIAN, J. (2011). What shapes mesoscale wind anomalies in coastal upwelling zones? *Climate Dynamics* 36, 871-877.
- BROCHIER, T., MASON, E., MOYANO, M., BERRAHO, A., COLAS, F., SANGRÀ, P., HERNÁNDEZ-LEÓN, S., ETTAHIRI, O., LETT, C. (2011). Ichthyoplankton transport from the African coast to the Canary Islands. *Journal of Marine Systems*, 87(2), 109-122.
- BUIJSMAN, M. C., UCHIYAMA, Y., McWILLIAMS, J. C., HILL-LINDSAY, C. R. (2012). Modeling semidiurnal internal tide variability in the Southern California bight. *J. Phys. Oceanogr.*, 42, 62-77.
- CABELLO, R., TAM, J., JACINTO, M. E. (2002). Procesos naturales y antropogénicos asociados al evento de mortalidad de conchas de abanico ocurrido en la bahía de Paracas (Pisco, Perú) en junio del 2000. *Revista peruana de Biología*, 9(2), 94-110.
- CAPET, X., COLAS, F., PENVEN, P., MARCHESIELLO, P., McWILLIAMS, J. C. (2008). Eddies in eastern boundary subtropical upwelling systems, in *Ocean Modeling in an Eddy Regime*. Washington, D. C., *Geophys. Monogr. Ser.*, vol. 177, pp. 131-147, AGU.
- CAPET, X., McWILLIAMS, J. C., MOLEMAKER, M. J., SHCHEPETKIN, A. F. (2008b). Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part I: Flow Structure, Eddy Flux, and Observational Tests. *J. Phys. Oceanogr.*, 38, 29-43, <https://doi.org/10.1175/2007JPO3671.1>.
- CARBONEL, C. A. A. (2013). Un modelo de gravedad reducida de la hidrodinámica y termodinámica en zona costera. Caso de estudio: Bahías de Pisco y Paracas. *Revista de Investigación de Física*, vol. 16, no. 1, p. 1-8. ISSN 1605-7724.
- CHAIGNEAU, A., EL-DIN, G., DEWITTE, B. (2009). Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992-2007). *Progress in Oceanography*, Volume 83, Issues 1-4, Pages 117-123, ISSN 0079-6611, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.012>.
- COLAS, F., McWILLIAMS, J. C., CAPET, X., *et al.* (2012). Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system. *Clim Dyn* 39, 509-529. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1170-6>
- ESTRADE, P., MARCHESIELLO, P., COLIN DE VERDIÈRE, A., ROY, C. (2008). Cross-shelf structure of coastal upwelling: A two-dimensional extension of Ekman's theory and a mechanism for inner shelf upwelling shut down. *J. Mar. Res.*, 66, 589-616.
- FLORES, D., TEJADA, A., ALARCÓN, J., SARMIENTO, H., MUÑOZ, R. (2019). Línea Base del Sitio Piloto Islas Ballestas: Recursos Pesqueros. *Inf Inst Mar Perú*. 46(1): 67-77.
- GUZMÁN, M., CHAVEZ, J., MORON, O., SÁNCHEZ, S., FLORES, G. (1997). Evaluación de la calidad del medio ambiente marino en la bahía de Pisco - Paracas, 22 a 24 mayo 1996. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú - Callao*, N°54.
- GUTIÉRREZ, D., *et al.* (2011). Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L07603, doi:10.1029/2010GL046324.
- JACINTO, M. E., MARTÍNEZ, C., SÁNCHEZ, S., FLORES, F., PIZARRO, L. (1996). Evaluación de la varazón y contaminación en la bahía Paracas - Pisco. *Inf. Prog. Inst. Mar Perú - Callao*, N°29.
- JANEKOVIĆ, I., POWELL, B. S. (2012). Analysis of imposing tidal dynamics to nested numerical models. *Cont. Shelf Res.*, 34, 30-40.
- MARCHESIELLO, P., ESTRADE, P. (2007). Eddy activity and mixing in upwelling systems: A comparative study of Northwest Africa and California regions. *International Journal of Earth Sciences*, DOI 10.1007/s00531-007-0235-6.
- MARCHESIELLO, P., ESTRADE, P. (2010). Upwelling limitation by onshore geostrophic flow. *Journal of Marine Research*, Volume 68, Number 1, pp. 37-62(26), <https://doi.org/10.1357/002224010793079004>.
- MARCHESIELLO, P., McWILLIAMS, J. C., SHCHEPETKIN, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3, 1-20.
- MARCHESIELLO, P., McWILLIAMS, J. C., SHCHEPETKIN, A. (2003). Equilibrium structure and dynamics of the California Current System. *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783.

- MASON, E., MOLEMAKER, J., SHCHEPETKIN, A. F., COLAS, F., McWILLIAMS, J. C., SANGRÀ, P. (2010). Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Modelling*, 35, 1–15.
- MINAM. (2016). Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. MINAM, 326 pp.
- MORÓN, O., CAMPOS, M. (2011). Condiciones oceanográficas en primavera 2005: Crucero BIC Olaya 0509-10. *Inf. Inst. Mar Perú*, 38(1): 127-133.
- MORÓN, O., QUISPE, J., LORENZO, A., FLORES, G., SÁNCHEZ, S., ARONÉS, K., SOLÍS, J., QUIPUZCOA, L. (2017). Caracterización de los procesos físicos, químicos, biológicos y sedimentológicos en las islas Ballestas y Chincha. 2013. *Inf Inst Mar Perú*, 44(4), 472 - 506.
- RENAULT, L., DEWITTE, B., MARCHESIELLO, P., ILLIG, S., ECHEVIN, V., CAMBON, G., RAMOS, M., ASTUDILLO, O., MINNIS, P., AYERS, J. K. (2012). Upwelling response to atmospheric coastal jets off central Chile: A modeling study of the October 2000 event. *J. Geophys. Res*, 117, C02030.
- SHCHEPETKIN, A. F., McWILLIAMS, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system: a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate ocean model. *Ocean Modelling*, 9, 347–404.
- SHCHEPETKIN, A. F., McWILLIAMS, J.C. (2009). Correction and commentary for ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system by Haidvogel et al. *J. Comput. Phys.* 227, pp. 3595–3624. *Journal of Computational Physics* 228, 8985–9000.
- TROUPIN, C., MASON, E., BECKERS, J. M., SANGRÀ, P. (2012). Generation of the Cape Ghir upwelling filament: A numerical study. *Ocean Modelling*, 41, 1-15.
- UCHIYAMA, Y., IDICA, E., McWILLIAMS, J. C., STOLZENBACH, K. D. (2014). Wastewater effluent dispersal in Southern California Bays, *Cont. Shelf Res*, No. 76, pp. 36-52.
- VÁSQUEZ, L. (2008). Condiciones oceanográficas físicas en invierno 2003. *Inf. Inst. Mar Perú*, 35, 2, 109-114.
- VÁSQUEZ L. (2008). Características oceanográficas físicas en invierno 2004. *Inf Inst Mar Perú*, 35(2), 123-128.
- VÁSQUEZ L. (2008). Condiciones ambientales físicas del mar peruano a finales del invierno 2005. *Inf Inst Mar Perú*. 35 (2), 173-180.
- VELAZCO, F., SOLÍS, J. (2000). Estudio sedimentológico de la bahía de Paracas. Informe Progresivo Instituto del Mar del Perú, 133, 3-22.
- YZOCUPE, V. A. (2002). Modelo numérico de flujo bidimensional de la bahía de Paracas. *Revista de Investigación de Física*, 5, 1-9.