

# MODELADO DE LA CIRCULACIÓN CLIMATOLÓGICA EN LA BAHÍA DE MIRAFLORES Y SUS ÁREAS ADYACENTES (LIMA, PERÚ)

## MODELING OF CLIMATOLOGICAL CIRCULATION IN THE MIRAFLORES BAY AND SURROUNDING AREAS (LIMA, PERU)

Carlos Yvan Romero<sup>1</sup>Jorge Tam<sup>1</sup>Noel Domínguez<sup>2</sup>

### RESUMEN

ROMERO C., TAM J., DOMÍNGUEZ N. 2022. *Modelado de la circulación climatológica en la bahía de Miraflores y sus áreas adyacentes (Lima, Perú)*. *Inf Inst Mar Perú*. 49(1): 137-146.- La Bahía de Miraflores (12°04'S a 12°13'S), ubicada en la parte central del sistema de afloramiento peruano y al sur de la bahía del Callao, se caracteriza por ser una zona con fuertes rompientes de olas y aguas agitadas, además de su cercanía a la zona de mayor densidad poblacional del país; es receptora del vertimiento continuo de desagües y desechos domésticos e industriales, si bien esto ha disminuido a raíz del cierre del colector costanero en el año 2008 y al tratamiento de las aguas servidas. Por ello es importante conocer las características de las corrientes marinas, puesto que influyen en la dispersión de efluentes y otras sustancias nocivas resultantes del tratamiento de los residuos sólidos y escombros de construcción en las playas del litoral. Se realizó el modelado de la bahía y sus áreas adyacentes utilizando el modelo oceánico regional ROMS junto con la herramienta ROMS2ROMS con el fin de conocer la circulación marina y la distribución espacial de las principales variables oceanográficas a pequeña escala (~ 1 km) en la bahía. Para lograr esto, se utilizaron los resultados de una simulación del sistema de corrientes de Humboldt a mayor escala (~12 km) como condición de frontera para realizar un *downscaling* dinámico utilizando la herramienta ROMS2ROMS y así obtener la resolución espacial requerida. Los resultados indicaron que en la bahía los flujos van de sur a norte, siendo más débiles al sur y más intensos entre la isla San Lorenzo y La Punta. Estacionalmente, los flujos son más débiles en verano y más intensos en invierno.

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

### ABSTRACT

ROMERO C., TAM J., DOMÍNGUEZ N. 2022. *Modeling of climatological circulation in the Miraflores Bay and surrounding areas (Lima, Peru)*. *Inf Inst Mar Peru*. 49(1): 137-146.- Miraflores Bay (12°04'S to 12°13'S), located in the central part of the Peruvian upwelling system and south of Callao Bay, is characterized by strong waves and rough waters, besides its proximity to the most densely populated area in the country. The bay receives the continuous discharge of sewers and domestic and industrial wastes, although this has decreased due to the closure of the coastal sewer in 2008 and the treatment of sewage waters. Therefore, since the characteristics of marine currents influence the dispersion of effluents and other harmful substances resulting from the treatment of solid waste and construction debris on the coastal beaches, it is important to know them. We modeled the bay and its surrounding areas using the ROMS regional ocean model together with the ROMS2ROMS tool to understand the marine circulation and the spatial distribution of the main oceanographic variables at a small scale (~ 1 km) in the bay. This was achieved by using the results of a larger scale (~12 km) simulation of the Humboldt current system as a boundary condition for dynamic downscaling using the ROMS2ROMS tool to obtain the required spatial resolution. Our results indicated that there are south-to-north flows in the bay, being weaker to the south and more intense between San Lorenzo Island and La Punta. Seasonally, the flows are weaker in summer and more intense in winter.

KEYWORDS: modeling, ROMS, ROMS2ROMS, nesting, bay, Miraflores

## 1. INTRODUCCIÓN

La Bahía de Miraflores se ubica en la parte central del sistema de afloramiento peruano, entre 12°03'58" – 12°12'55"S y 77°00'38" – 77°13'08"W. Comprende el litoral de la provincia de Lima y Callao, en la Región Lima, entre la península de La Punta y punta La Chira, abarcando los distritos de San Miguel, Magdalena, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos. La parte norte de la bahía,

que comprende el sur de la costa de los distritos de la Punta y Chucuito, se caracteriza por presentar una zona con fuertes rompientes de olas y aguas agitadas. Hacia el sur se tienen acantilados de regular altura, presentando en su base playas de arena y canto rodado (CPPS-PNUMA, 1997).

La importancia del área de estudio radica en su utilización como receptora del vertimiento continuo de desagües y desechos domésticos e

1 LMOECC, AFIOF, DGIOCC, Instituto del Mar del Perú. cromo@imarpe.gob.pe; jtam@imarpe.gob.pe

2 LHFMM, AFIOF, DGIOCC, Instituto del Mar del Perú

industriales, los cuales afectan principalmente a las zonas costeras (INDECI-PNUD, 2015). Si bien la contaminación marina debido al vertimiento del sistema de alcantarillado ha disminuido a raíz del cierre del colector costanero por SEDAPAL en el año 2008, estas aguas servidas vienen siendo derivadas y tratadas en la planta de Tratamiento de aguas residuales de Taboada – PTAR Taboada (IMARPE, 2010), es importante conocer las características de las corrientes marinas, puesto que influyen en la dispersión y bio-depuración de efluentes y otras sustancias nocivas resultantes del lavado y lixiviación de los residuos sólidos y escombros de construcción en las playas del litoral (INDECI-PNUD, 2015).

Es además una zona de interés, porque las playas de bahía podrían verse potencialmente impactadas con el cambio climático, ante la inundación por elevación del nivel del mar; llegando a cubrirse áreas correspondientes al 58% (entre San Miguel y Barranco) y 37% (Chorrillos) del área bajo los 5 m (que es la altitud donde comienzan los acantilados), acorde a los datos colectados a través de mareógrafos (CPPS-PNUMA, 1997).

Otro problema que se manifiesta es la erosión en la bahía, la cual, al no contar con protección adecuada, se hace más vulnerable a los oleajes que se presentan en la zona. Esta erosión del relleno ha originado el aumento del nivel del fondo marino, modificando la batimetría hasta en 2 m frente a las playas de Miraflores, San Isidro, Magdalena y San Miguel (DHN, 2009) colmatando el fondo rocoso por efecto de los sedimentos. Estas condiciones, afectan los recursos hidrobiológicos que habitan estas zonas, perturbando la provisión de pesca principalmente en Chorrillos, donde se encuentra un desembarcadero pesquero artesanal (DPA), cuya mayor actividad se manifiesta en enero con capturas de especies predominantemente costeras (MAJLUF, 2014).

Por lo expuesto, conocer la distribución de las corrientes marinas dentro de la bahía mejorará la manera en que se aborden los procesos antes mencionados. Para ello, estudiamos la circulación a partir de una simulación computacional de la bahía utilizando modelos numéricos. Se hipotetiza que los flujos en la bahía de Miraflores son más intensos en invierno.

Utilizamos el modelo tridimensional ROMS (SHCHEPETKIN & McWILLIAMS, 2005, 2009) con la herramienta AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*, BLAYO & DEBREU, 1999). Cabe indicar que ROMS ha probado ser capaz de reproducir una circulación realista en cada uno de los sistemas de afloramiento de borde oriental (EBUS) conocidos (MARCHESIELLO *et al.*, 2003; MARCHESIELLO & ESTRADÉ, 2007; ESTRADÉ *et al.*, 2008; CAPET *et al.*, 2008; MASON *et al.*, 2010).

Debido al elevado costo computacional que implica resolver todas las características de la dinámica de bahías con una sola grilla, lo cual implicaría un costo de procesamiento innecesario cuando se requiere estudiar un área en particular, se utilizan, modelos hidrodinámicos con aproximaciones bidimensionales y fronteras abiertas no reflectantes para aguas rasas (YZOCUPE, 2002) y gravedad reducida (CARBONEL, 2013).

En nuestro caso se realizaron tres simulaciones, las cuales incluyen dos anidamientos no acoplados utilizando la herramienta ROMS2ROMS, la cual permite conservar la información de las fronteras abiertas y transferirlas a la simulación en cada paso de tiempo, con lo cual es posible usar la información de entrada de los datos de las fronteras, así como la evolución libre en el flujo simulado (MASON *et al.*, 2010). Esto es posible, debido a que se usan los resultados de la primera simulación (padre) como condiciones de borde de las otras dos (hijos).

Este procedimiento ha sido utilizado 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 estos casos la resolución horizontal alcanzada fue menor a 5 km llegando en algunos casos hasta 75 m para estudiar la circulación marina en la bahía del Callao (CORREA *et al.*, 2008)

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### Modelado ROMS y ROMS2ROMS

Se aplicó el método utilizado desarrollado por MASON *et al.* (2010) que 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).

### Configuración del anidamiento

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 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° – 75°W y 15° – 11°S, abarcando la bahía de Miraflores (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 que, para ser utilizados como forzantes en los anidamientos, fueron interpolados a través de un proceso denominado Análisis Objetivo (OA por sus siglas en inglés) pasando de la grilla original de la bases de datos de resolución

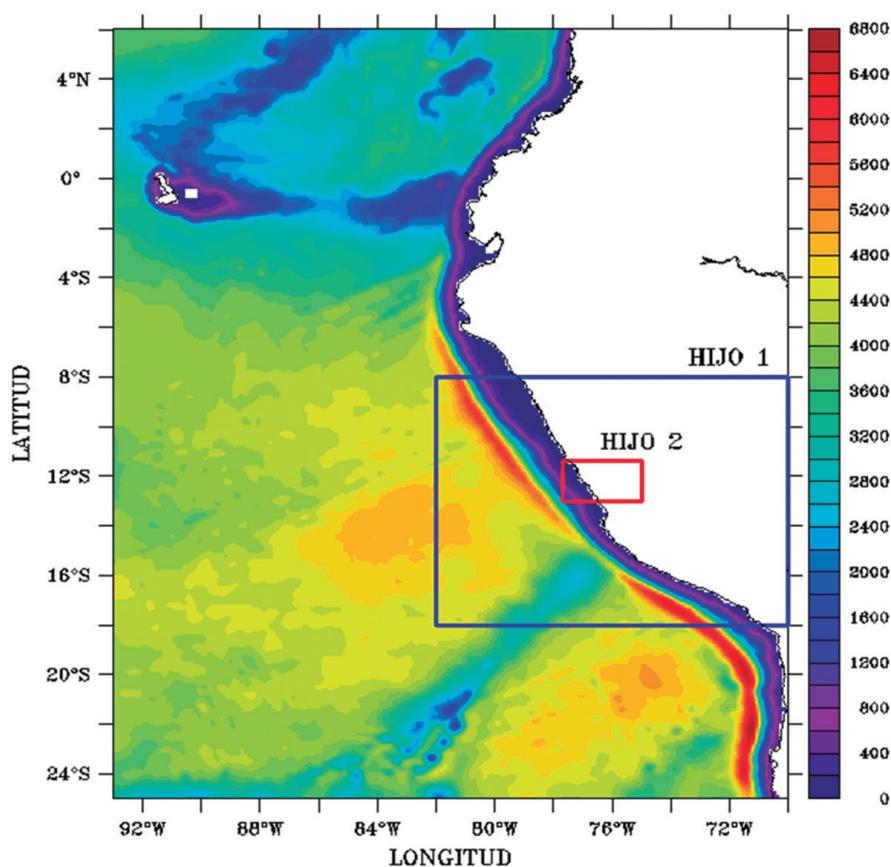


Figura 1.- Anidamientos sucesivos para el modelado ROMS2ROMS: 12,3 km de resolución horizontal (padre), en el rectángulo azul el primer anidamiento de 4,1 km (hijo 1) y en el rectángulo rojo el segundo anidamiento de 1,37 km (hijo 2)

espacial 50 km a una grilla de 4,1 km (hijo 1), repitiendo el procedimiento en una grilla de 1,37 km (hijo 2). En ambos casos el método de interpolación fue cúbico (KEYS, 1981), el cual viene implementado en las ROMSTOOLS utilizadas para construir los forzantes (función interp2 de MATLAB) (PENVEN *et al.*, 2008). 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 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 ese 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 geo-estadísticas 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 (CHACÓN, 2014). 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 y sus áreas adyacentes, como son la bahía del Callao y la isla San Lorenzo.

### Información de datos observados

Las salidas del modelo en temperatura superficial del mar y en la circulación fueron comparadas con productos climatológicos de temperatura superficial del mar (TSM) y de la circulación dentro y fuera de la bahía Miraflores.

### Temperatura superficial del mar (TSM)

Para comparar la TSM del modelo con las observaciones fuera de la bahía se utilizó una climatología de resolución espacial de 0,1°, desarrollada en el marco del convenio interinstitucional entre el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y el Instituto de la Investigación para el Desarrollo de Francia (IRD), dentro del programa "Volontaire Civil International", que fue generada a partir del procesamiento de datos obtenidos del World Ocean Database (WOD, [http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOD/pr\\_wod.html](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 de las estaciones costeras y sensores CTD (Conductivity-Temperature-Depth) del IMARPE. Las herramientas estadísticas utilizadas para construir el campo grillado se describen en GRADOS *et al.* (2018).

Para comparar la TSM del modelo con información de dentro de la bahía se utilizó un producto de TSM satelital con 1 km de resolución a nivel 4 (L4) denominado MUR (Multiscale UltraHigh Resolution), producido por el grupo GHRSSST en el Physical Oceanography DAAC del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, con un periodo de latencia de 1 día. Esta versión de MUR está basada en datos de nivel 2 (L2) proporcionados por el GHRSSST, los cuales fueron obtenidos a partir de un conjunto de datos observados de diferentes instrumentos, tales como los radiómetros de microondas: AMSR-E y TMI, los de infrarrojos: MODIS (plataformas terra y aqua), AVHRR y AATSR, Windsat y observaciones *in situ* del proyecto iQuam de la NOAA

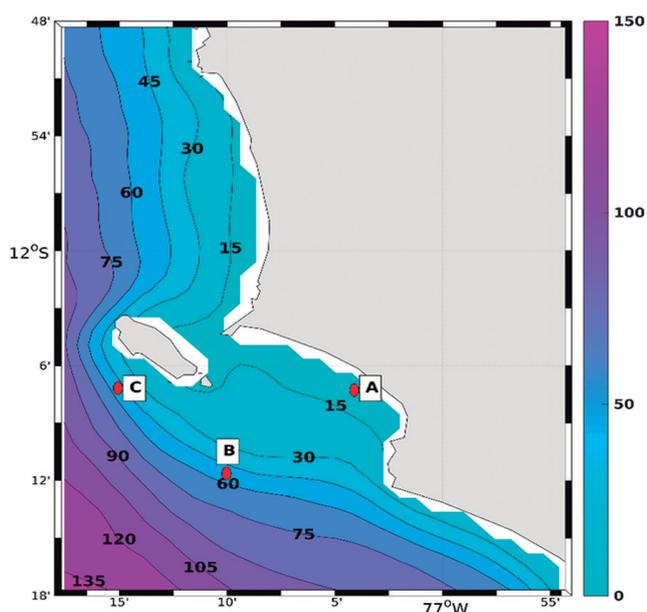


Figura 2.- Batimetría del área de estudio que comprende las bahías del Callao y Miraflores, los valores están en metros (m). Se indican los puntos rojos para la validación de temperaturas: A (77,08°W - 12,12°S), B (77,18°W - 12,20°S) y corrientes: C (77,25°W - 12,12°S)

## Circulación

*Geostrophic and Ekman Current Observatory* (GEKCO) - versión 2, es una base de datos de corriente marina zonal y meridional, en superficie, con  $1/4^\circ$  de resolución espacial y resolución temporal diaria, desde 1992 a 2018. Desarrollado por Joël Sudre (SUDRE *et al.*, 2013) a partir de datos satelitales de altimetría AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr>) y de esfuerzo de viento QuikSCAT, ASCAT (<http://cersat.ifremer.fr>) así como de la NOAA (<https://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html>).

## 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. A la izquierda la simulación original de 12,3 km de resolución horizontal, 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). 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).

### Variación estacional de la temperatura

La distribución simulada de la TSM se muestra en la figura 4. Podemos identificar que, durante el verano, la TSM es menor en la bahía del Callao en comparación con la de Miraflores, alcanzando un mínimo de  $18^\circ\text{C}$  en la zona adyacente a La Taboada. El mínimo en la bahía de Miraflores alcanza los  $18,3^\circ\text{C}$  en la zona cercana al Mirador de la Herradura y aumenta al alejarse de la costa llegando a  $19^\circ\text{C}$  cerca de la isla San Lorenzo.

En otoño se mantiene esa tendencia, pero la TSM disminuye hasta  $16,5^\circ\text{C}$  en la bahía del Callao y a  $16,6^\circ\text{C}$  en la parte sur de la bahía de Miraflores. Cerca de la costa, la TSM aumenta hasta casi  $17^\circ\text{C}$ , este valor se mantiene hacia el norte (La Punta) y aumenta mar adentro.

Durante el invierno, la TSM disminuye hasta  $15,2^\circ\text{C}$  en la bahía del Callao y alcanza máximos de  $15,4^\circ\text{C}$ . En la bahía de Miraflores, la TSM alcanza valores máximos de  $15,6^\circ\text{C}$  y mínimos de  $15,4^\circ\text{C}$  en la parte sur, siendo ligeramente mayor cerca de la costa ( $15,9^\circ\text{C}$ ).

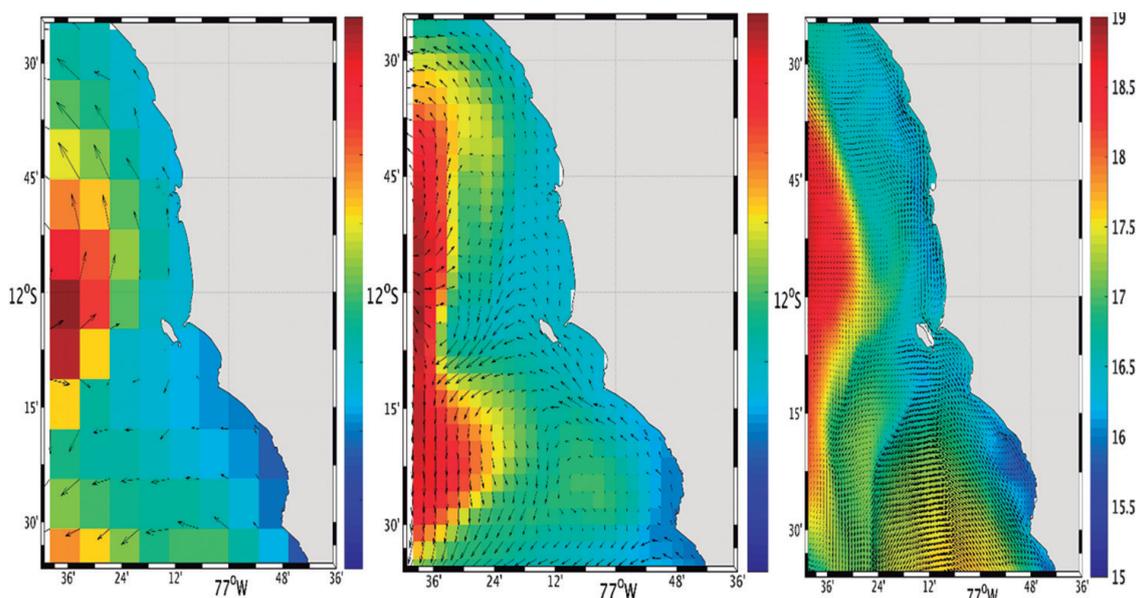


Figura 3.- Distribución espacial de la TSM obtenida para la simulación padre (izquierda), hijo 1 (centro) e hijo 2 (derecha). Sobre esta se han colocado los vectores de velocidad de corriente en superficie en cada punto de grilla para mostrar la diferencia entre las resoluciones horizontales de cada simulación

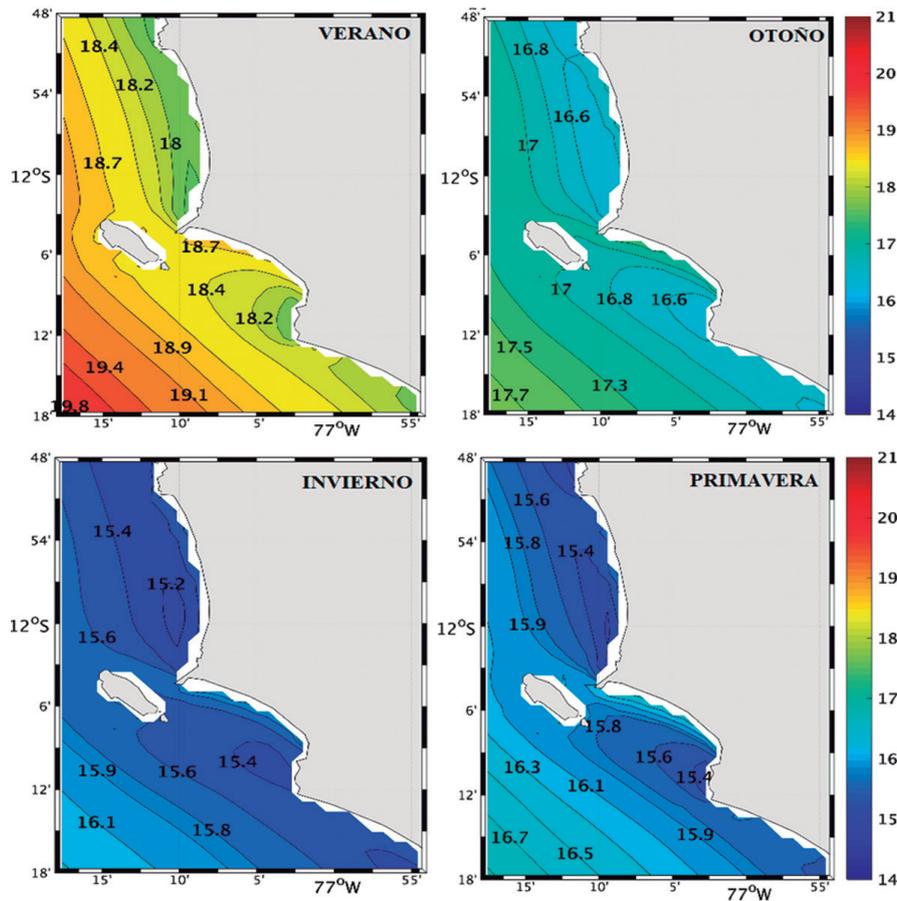


Figura 4.- Variación estacional de la TSM (°C) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo izquierda)

Finalmente, estos valores aumentan en primavera alcanzando máximos de 15,6 °C y mínimos de 15,4 °C en la bahía del Callao, mientras que, en la bahía de Miraflores la TSM alcanza máximos de 16 °C y mínimos de 15,6 °C, mostrándose nuevamente cerca de la costa un aumento que alcanza a 16,4 °C.

Se compararon los resultados de TSM del modelo de mayor resolución (hijo 2) en dos puntos (Fig. 2); uno “B”, exterior a la bahía de Miraflores (77,18°W y 12,20°S) que se comparó con los datos de IMARPE y otro “A”, dentro de la bahía (77,08°W y 12,12°S) que se comparó con datos satelitales de MUR.

Fuera de la bahía, los valores obtenidos son comparables en magnitud, con mayor diferencia en primavera. Dentro, los valores correspondientes a los datos satelitales son mayores en toda la serie. Esto se debería a que la simulación ha sido forzada por datos de viento superficial resultados de una interpolación matemática, la cual no toma en

cuenta el efecto “drop-off” del viento al acercarse a la costa (RENAULT *et al.*, 2012). En consecuencia, se simula un viento más intenso que lo normal, con lo cual se genera mayor afloramiento cerca de la costa trayendo como consecuencia aguas más frías en esa zona. Como se observa en la figura 5, ambas series tienen buena correlación (0,94 la exterior y 0,96 la interior) y muestran la variación estacional con los valores más altos en verano y más bajos en invierno.

**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. Durante el verano, la velocidad es mayor en la bahía del Callao (alcanzando valores de hasta 6 cm/s) en comparación con la bahía de Miraflores, donde la velocidad llega hasta 4 cm/s, disminuyendo al acercarse a la parte inferior de la bahía, cerca al Mirador de la Herradura (1 cm/s). La velocidad aumenta en dirección a la intersección entre la isla San Lorenzo y La Punta,

llegando a 15 cm/s, disminuyendo hacia el norte, frente a la bahía del Callao, alcanzando valores cercanos a 12 cm/s cerca de las islas Ventanillas.

En otoño la circulación aumenta en ambas bahías, llegando a máximos de 9 cm/s cerca de la bahía del

Callao y 8 cm/s en la bahía de Miraflores. La velocidad entre La Punta y la isla San Lorenzo también aumentó hasta 20 cm/s. Al norte de la isla San Lorenzo, se obtuvieron velocidades de hasta 5 cm/s mientras que a 12,2°S se encontraron los flujos más intensos, llegando a 22 cm/s cerca a punta La Chira.

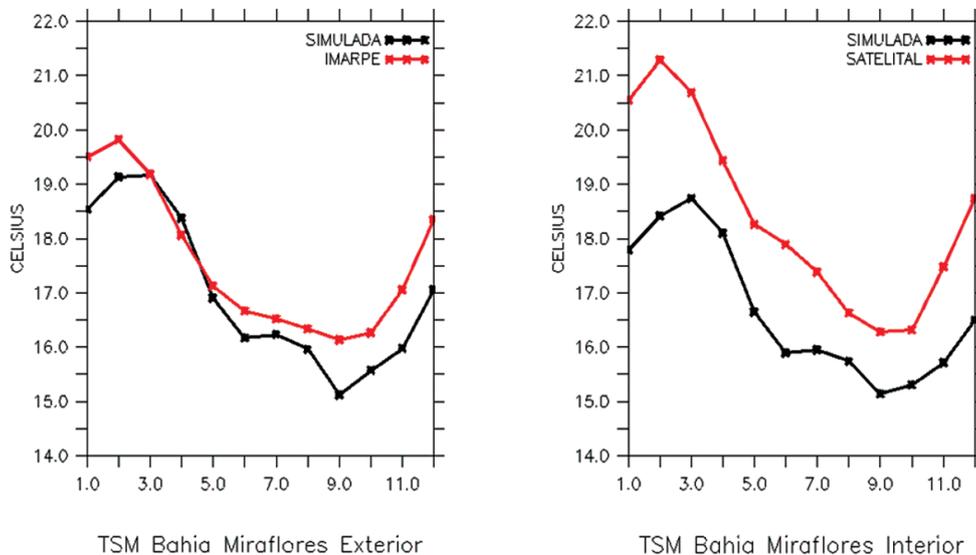


Figura 5.- Series temporales de TSM en la bahía de Miraflores, simulada por ROMS (negro) y registradas por IMARPE y MUR (rojo) que muestran la variación estacional en un punto exterior (izquierda) e interior (derecha) de la bahía, B y A en la figura 2

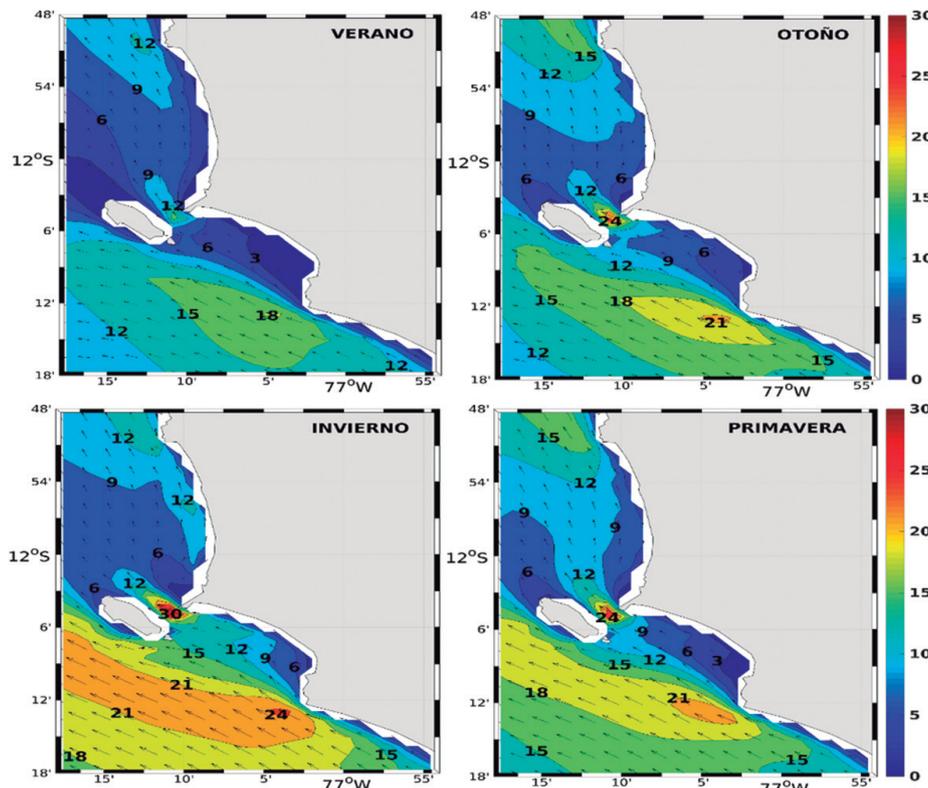


Figura 6.- Variación estacional de las corrientes marinas en superficie (cm/s) en el área de estudio durante el verano (arriba izquierda), otoño (arriba derecha), invierno (abajo izquierda) y primavera (abajo derecha). Las flechas indican la dirección de las corrientes, en colores, la intensidad de las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

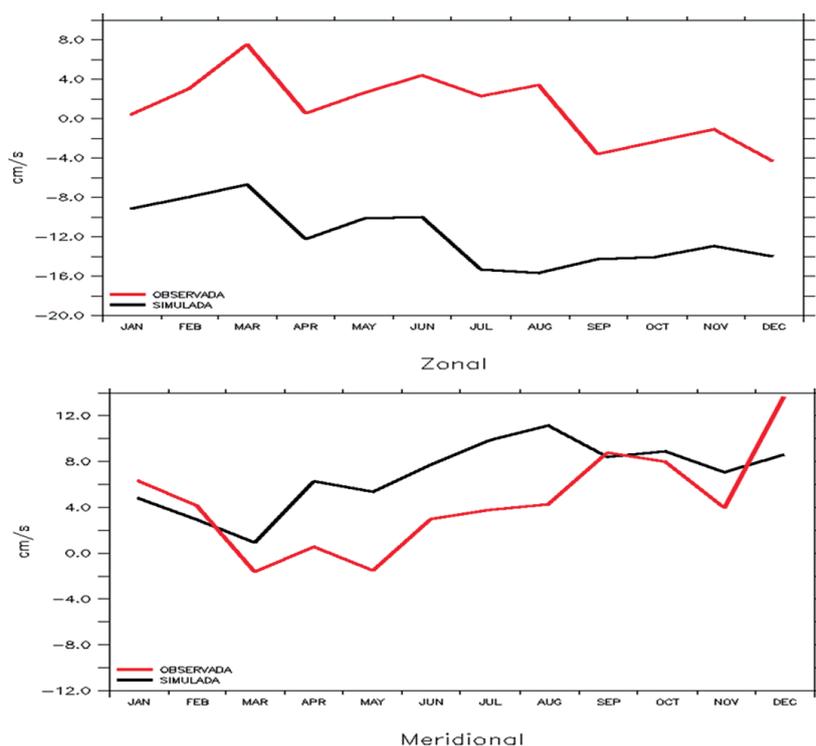


Figura 7.- Series temporales de la velocidad de la corriente superficial en la bahía de Miraflores simuladas por ROMS (negro) y generadas por GEKCO2 (rojo) que muestran la variación estacional en un punto cercano a la bahía (C en la figura 2)

En invierno se alcanzaron los flujos más intensos; cerca de la bahía del Callao, llega a 11 cm/s disminuyendo en la parte sur de la bahía hasta 3 cm/s. Al norte de la bahía de Miraflores, la corriente cerca de la costa alcanza 13 cm/s, al sur disminuye hasta 6 cm/s y aumenta hasta 14 cm/s en la entrada de la misma. Los valores más altos (25 cm/s) se alcanzan cerca a punta La Chira y entre la isla San Lorenzo y La Punta.

Durante la primavera, el flujo disminuye en la bahía del Callao en relación al invierno, alcanzando hasta 7 cm/s cerca de la costa; mientras que, en la bahía de Miraflores, alcanza máximo 10 cm/s en la parte superior, disminuyendo hacia el sur hasta llegar a 4 cm/s. Los núcleos de máxima intensidad se presentan también cerca a punta La Chira (23 cm/s) y entre la isla San Lorenzo y La Punta con 21 cm/s en promedio. Este último es comparable con los máximos de corriente registrados en la misma zona, durante la primavera de 2011 por IMARPE (ARGÜELLES *et al.*, 2012).

Se compararon dos series de corrientes marinas superficiales en un punto de observación "C" (Fig. 2), cercano a la bahía de Miraflores

(77,25°W y 12,12°S), una con los resultados del modelo de mayor resolución (hijo 2) y la otra correspondiente a los datos de GEKCO2. Para la componente zonal se obtuvo correlación positiva de 0,6 entre las dos series, los valores simulados superan en magnitud a GEKCO2, alcanzando el máximo en agosto, lo cual tiene sentido si consideramos que la simulación ha sido forzada por datos de viento superficial resultados de una interpolación matemática, la cual no toma en cuenta el efecto "drop-off" del viento al acercarse a la costa (RENAULT *et al.*, 2012) y trae como consecuencia que el viento superficial sea más intenso que lo normal y por ende aumenta la magnitud de la corriente superficial.

Para la componente meridional, la correlación obtenida fue de 0,5 con dirección predominantemente hacia el norte. Durante el verano, la corriente disminuye de enero a marzo, en otoño e invierno los valores simulados superan a GEKCO2, alcanzando el máximo en invierno, ambas series con tendencia positiva. Finalmente, la corriente disminuye en noviembre y vuelve a aumentar en diciembre (para ambas series). Las magnitudes, simulada y observada,

son comparables debido a que el efecto del *drop-off* es hacia la costa.

Finalmente, al comparar los resultados del modelo con las mediciones realizadas por IMARPE en la bahía, durante marzo y setiembre de 2014 (QUISPE *et al.*, 2022), en las cuales se indica que la intensidad promedio en superficie fue menor en verano (marzo) respecto a lo registrado en primavera (setiembre), observamos que esto fue reproducido por el modelo, así como el ingreso de los flujos a la bahía por la zona sur (Fig. 7).

En relación con los máximos y mínimos de intensidad, estos son menores en el modelo, lo cual puede deberse a que los flujos simulados consideran el aporte del viento superficial más no el efecto de las mareas, las cuales podrían cambiar la dirección e intensidad de los flujos cercanos a la costa, dependiendo de la etapa en que se encuentren (ascendente o descendente) (DHN, 2009b).

#### 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El modelo puede reproducir la variabilidad estacional de la TSM en la bahía de Miraflores, aunque con un sesgo negativo de 1 °C en los valores simulados, debido a las limitaciones en los productos atmosféricos para forzar el modelo a pequeña escala.

Durante todo el año, la circulación superficial es más intensa en la bahía del Callao que en la de Miraflores, con los flujos más débiles al sur de la bahía de Miraflores y los más intensos entre la isla San Lorenzo y La Punta.

En la bahía de Miraflores la circulación va de sur a norte aumentando de intensidad al acercarse a La Punta, cerca de la costa y durante el invierno.

Se recomienda usar datos de un modelo atmosférico a alta resolución (WRF) para forzar las simulaciones a escala de bahías.

Es necesario contar con mediciones continuas de corrientes marinas en algunos puntos dentro de la bahía del Callao, para poder realizar una calibración de la circulación en la misma.

#### 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.
- ARGÜELLES, J., QUISPE, J., LEDESMA, J., LEÓN, V., SARMIENTO, M., ROBLES, C., BERNALES, A., VILLANUEVA, P., SÁNCHEZ, S., VELAZCO, F., SOLÍS, J., QUIPÚZCOA, L., YUPANQUI, W., MARQUINA, R., HENOSTROZA, A., MARTÍNEZ, C., OROZCO, R., CARBAJAL, P., TAIPE, A., AGUILAR, S., SANJINEZ, M., MEDINA, A., CASTILLO, G. (2012). Estudio Línea Base – ELBA Callao, primavera 2011. *Inf Inst Mar Perú*. 39(3-4), 149-198.
- 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.
- BLAYO, E., DEBREU, L. (1999). Adaptive mesh refinement for finite-difference ocean models: First experiments. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1239-1250.
- 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.
- CAPET, X., COLAS, F., PENVEN, P., MARCHESIELLO, P., McWILLIAMS, J. (2008). Eddies in eastern boundary subtropical upwelling systems. *Ocean Modeling in an Eddy Regime*, Edit. M. Hecht and H. Hasumi, AGU, Washington, D. C. *Geophys. Monogr. Ser.*, 177: 131-147.
- 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.
- CHACÓN MONTALVÁN, E. A. (2014). Predicción de ambientes de deposición sedimentaria en base a características batimétricas, morfológicas y sedimentarias en el margen continental peruano mediante modelos de estadística espacial. Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería. Repositorio Institucional - Universidad Nacional de Ingeniería.
- CORREA, D., TAM, J., PASAPERA, J., SAAVEDRA, M., INGUNZA, A. (2008). Modelado de la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, Perú. *Inf Inst Mar Perú*, 35(3), 181-192.
- CPPS-PNUMA. (1997). Implicancias Socioeconómicas del Incremento del Nivel del Mar en Lima Metropolitana

- y el Callao como Consecuencia del Calentamiento Global. CPPS/PNUMA/PSE/IE, (97)10.
- DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN. (2009a). Estudio de la dinámica costera de la Playa Herradura, 162 pp.
- DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN (2009b). Estudio de la dinámica costera en la Costa Verde. 231 pp.
- 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.
- GRADOS, C., CHAIGNEAU, A., ECHEVIN, V., DOMINGUEZ, N. (2018). Upper ocean hydrology of the Northern Humboldt Current System at seasonal, interannual and interdecadal scales. *Prog. Oceanogr.* 165, 123–144.
- INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ (IMARPE). (2010). Informe Nacional sobre el estado del ambiente marino del Perú. Ministerio de la Producción – Instituto del Mar del Perú (en línea). Informe de consultoría. Convenio IMARPE – CPPS. Callao. Disponible en: [http://cpps.dyndns.info/cppsdocsweb/planaccion/docs2010/oct/XVII\\_AG\\_GC/18.Contaminacion.marina.Informe.final.Peru.pdf](http://cpps.dyndns.info/cppsdocsweb/planaccion/docs2010/oct/XVII_AG_GC/18.Contaminacion.marina.Informe.final.Peru.pdf)
- KEYS, R. (1981). Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 29(6), 1153–1160.
- MAJLUF, P. (2014). Identificación de Ecosistemas y Servicios Ecosistémicos dentro del ámbito de la Costa Verde. Centro para la Sostenibilidad Ambiental de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Lima, Perú.
- 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.
- 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.
- 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 Modell.* 35, 1–15.
- PENVEN, P., MARCHESIELLO, P., DEBREU, L., LEFÈVRE, J. (2008). Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling and Software*, 23 (5), pp.660-662.
- QUISPE J, VASQUEZ L, GARCIA W, MORON O, PIZARRO L, FLORES G, SANCHEZ S, FLORES R. (2022). Hidrografía y Estratificación en la Bahía de Miraflores, durante marzo y setiembre 2014. *Inf Inst Mar Perú*, 49(1): 122 - 136.
- 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.
- SUDRE, J., MAES, C., GARÇON, V. (2013). On the global estimates of geostrophic and Ekman surface currents, *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 3, pp 1–20.
- 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.
- YZOCUPE, V. A. (2002). Modelo numérico de flujo bidimensional de la bahía de Paracas. *Revista de Investigación de Física*. Lima, Vol. 5, p. 1-9