

MODELADO DE LA CIRCULACIÓN MARINA Y DESCARGAS HIPOTÉTICAS EN LA BAHÍA DEL CALLAO, PERÚ

MODELLING MARINE CIRCULATION AND HYPOTHETICAL DISCHARGES IN CALLAO BAY, PERÚ

David Correa¹ Jorge Tam¹ José Pasapera¹
Miguel Saavedra¹ Augusto Ingunza¹

RESUMEN

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.*- El objetivo fue simular la circulación marina y las descargas hipotéticas en la bahía del Callao, teniendo en cuenta las variaciones estacionales climatológicas y considerando la dirección e intensidad de los forzantes de viento. Se usó el modelo ROMS (Regional Oceanic Model System) con la herramienta de anidamiento AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran). Se usó una batimetría híbrida calculada a partir de las bases de datos de ETOPO2, GEBCO, DHN e IMARPE; vientos de MWF-Quikscat, mareas de TPXO6.2, condiciones iniciales de WOA, condiciones de frontera de COADS, e información de ríos, calidad acuática y efluentes domésticos. El modelo representó adecuadamente los patrones de temperatura, salinidad, circulación de gran escala, y la circulación local en la bahía del Callao. Las descargas hipotéticas de efluentes domésticos fueron transportadas predominantemente hacia el norte, con variaciones estacionales (hacia el noroeste en verano, por la descarga de los ríos). Las simulaciones con escenarios de viento norte, mostraron el transporte de las descargas hipotéticas hasta la bahía de Miraflores. Durante el periodo de este estudio, la concentración observada de contaminantes en la bahía del Callao superó los estándares de calidad ambiental de la Ley de Aguas, por lo que se debe evitar introducir más efluentes, y más bien implementar sistemas adecuados de tratamiento y disposición de efluentes (i.e. planta de tratamiento y emisario submarino).

PALABRAS CLAVE: modelo, contaminación marina, efluentes domésticos, Callao, Perú.

ABSTRACT

Correa D, Tam J, Pasapera J, Saavedra M, Ingunza A. 2008. *Modelling marine circulation and hypothetical discharges in Callao Bay, Perú. Inf. Inst. Mar Perú 35(3): 181-192.*-The objective was to simulate the marine circulation and hypothetical discharges in Callao bay, taking into account climatological seasonal variations and considering the direction and intensity of wind forcings. ROMS (Regional Oceanic Model System) model with the nesting tool AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran) were used. An hybrid bathymetry was used from ETOPO2, GEBCO, DHN and IMARPE; winds from MWF-Quikscat, tides from TPXO6.2, initial conditions from WOA, boundary conditions from COADS, and information of rivers, aquatic quality and domestic effluents. The model represented adequately the patterns of temperature, salinity and circulation at large scale and small scale in Callao bay. The hypothetical domestic effluent discharges were transported predominately towards north, with seasonal variations (to northwest in summer, due to rivers discharges). Simulations with northern winds scenarios, showed a transport of hypothetical discharges to Miraflores bay. During this study period, observed pollutants concentration in Callao bay exceeded the environmental quality standards of the Water Law, so the introduction of additional effluents should be avoided, and an adequate treatment and disposal system (i.e. treatment plant and submarine emissary) should be implemented.

KEYWORDS: model, marine pollution, domestic effluents, Callao, Perú.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de las corrientes marinas en el Perú se incrementó desde la publicación de ZUTA & GUILLÉN (1970). Este progreso se logró con el uso de correntómetros

más precisos, con observaciones satelitales y con simulaciones utilizando modelos oceánicos. Las investigaciones sobre el modelado de la zona norte del Ecosistema de la Corriente de Humboldt (PEN- VEN et al. 2005) han permitido usar

técnicas de anidamiento para modelar la circulación en zonas costeras, reproduciendo patrones de circulación a pequeña escala como áreas de afloramiento y bahías (MENARD 2005).

¹ Investigador científico, Centro de Investigaciones en Modelado Oceanográfico y Biológico Pesquero (CIMOBP), Instituto del Mar del Perú, Apdo. 22, Lima, Perú. E-mail: dcorrea@imarpe.gob.pe; jtam@imarpe.gob.pe.

La bahía del Callao está situada en la costa central del Perú, al norte de La Punta, e incluye el puerto del Callao, y la desembocadura de los ríos Rímac y Chillón.

La conformación geomorfológica de La Punta y la presencia de las islas San Lorenzo y El Frontón, dan una característica semiprotectida a esta bahía, que está protegida de los efectos del oleaje remoto y de la acción de los vientos de gran escala. Entre La Punta y la isla San Lorenzo existe un canal poco profundo de unos 4,5 km de ancho, conocido como El Boquerón por el cual la bahía del Callao se comunica con la bahía de Miraflores. El fondo marino de la bahía del Callao es muy complejo, que presenta un cañón hacia el talud y prominentes elevaciones en las puntas (DHN 1999).

Existen algunos antecedentes sobre modelado de zonas costeras en el Perú, provenientes de estudios de impacto ambiental.

CCC (2002) usó el modelo STWAVE (steady state spectral wave) para determinar la altura significativa de ola y la dirección de ola. En la zona de Taboada (con una altura de ola $H_{mo} = 6$ m y un período $T_p = 20$ s, dirección SW), el modelo mostró una dirección de olas hacia el noreste, pero al pasar la isla San Lorenzo, las olas cambiaron de dirección hacia el este.

JICA (1990) usó un modelo de cajas ("box mixing") basado en fórmulas de balance de volumen de flujos para simular la contaminación de los desagües del colector Surco. El modelo permitió concluir que la contaminación por coliformes fecales causada por la descarga de desagües crudos del colector Surco se dirigiría al norte, llegando hasta el Club Regatas de Chorrillos, tanto en la simulación base de 1990, como en la simulación proyectada para el 2000. En caso de no reducir los efluentes, la contaminación se extendería aún más al norte, hasta la playa Agua Dulce, en los años siguientes.

PESI (2000) evaluó alternativas de disposición de efluentes domésticos de Lima norte. Usaron los modelos RSB para la dilución inicial, RMA2 para la hidrodinámica de las descargas, y RMA11 para la calidad de agua, concluyendo que la mejor alternativa era el tratamiento primario con emisor submarino de 8 km. Los resultados de los monitoreos ambientales de la bahía del Callao realizados durante 2006, para evaluar el estado del ambiente marino costero ya han sido presentados (SÁNCHEZ et al. 2007).

El objetivo del presente trabajo es simular la circulación marina y descargas hipotéticas en la bahía del Callao, teniendo en cuenta las variaciones estacionales climatológicas y considerando la dirección e intensidad de los forzantes de viento, con el fin de contar con bases científicas previas a la toma de decisiones respecto al tratamiento y disposición de descargas domésticas en la bahía del Callao.

MATERIAL Y MÉTODOS

El dominio espacial del modelo se encuentra entre las latitudes $11^{\circ}50'S$ y $12^{\circ}10'S$, y las longitudes $77^{\circ}W$ y $77^{\circ}20'W$ (Figura 1). La información de entrada para el modelo se obtuvo de bases de datos internacionales, satelitales y observaciones in situ de la zona de estudio. La información sobre los ríos fue obtenida de INRENA (2008), la calidad acuática de IMARPE (2006) y efluentes domésticos de SEDAPAL (1998) e IMARPE (2006).

LAS CONDICIONES INICIALES se refirieron a campos de temperatura superficial del mar (TSM) y salinidad superficial del mar (SSS), extraídos de la base de datos WOA (2007).

LAS CONDICIONES DE FRONTERA se recopilaron y procesaron para las tres fronteras abiertas (Norte, Este y Sur), obtenidas de la base de datos de COADS (2006).

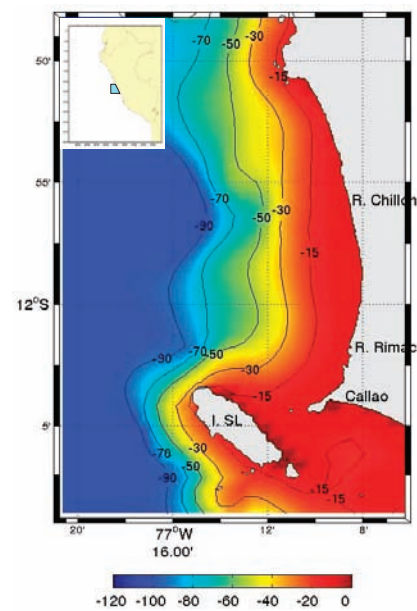


Figura 1.- Dominio y batimetría (m) del modelo en dos dimensiones

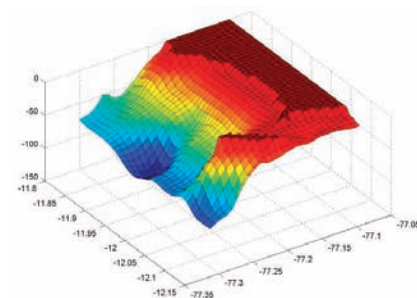


Figura 2.- Dominio y batimetría (m) del modelo en tres dimensiones

LA BATIMETRÍA REALISTA incluyó la línea de costa y el fondo marino, combinando las batimetrías de bases de datos internacionales como: ETOPO2 (2008) con resolución de 2 minutos, General Bathymetric Chart of the Oceans (IOC et al. 2003) con resolución de 1,0 minuto, DHNM (1993) e IMARPE obtenida mediante sondeos de alta resolución realizados con embarcaciones costeras (VELASCO com. pers.). La batimetría híbrida se obtuvo combinando los datos mediante técnicas de Análisis Objetivo (AO) que permitieron crear una grilla regular de 150 m de resolución (Figura 2). La batimetría híbrida sirvió como patrón para obtener las grillas de los anidamientos sucesivos

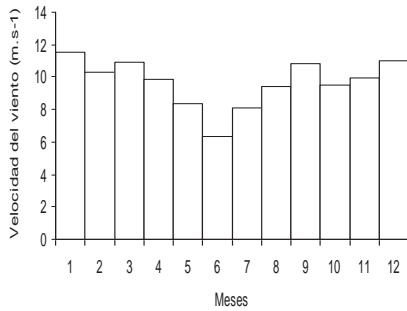


Figura 3.- Variación mensual climatológica del viento en la bahía del Callao (datos de IMARPE entre 2006-2007)

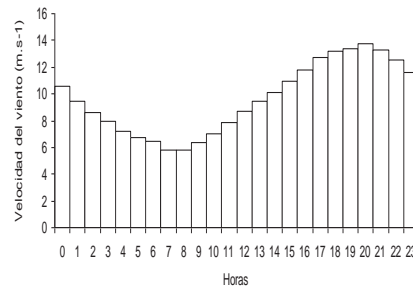


Figura 4.- Variación horaria climatológica del viento en la bahía del Callao (datos de IMARPE entre 2006-2007).

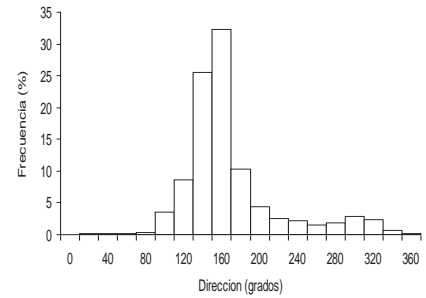


Figura 5.- Distribución de frecuencias de los vientos horarios en la bahía del Callao (datos de IMARPE entre 2006-2007).

a utilizarse en las ejecuciones del modelo ROMS.

LA CLIMATOLOGÍA DE VIENTOS para forzar el modelo se calculo de la base de datos MWF-QuikSCAT (CERSAT IFREMER 2005), y los flujos de calor, agua fresca, radiación de onda corta, calor neto y humedad específica de la base de datos de COADS (2006). En la bahía del Callao existe un forzante local (vientos locales) y un forzante inducido por la circulación atmosférica superficial de gran escala (vientos alisios) gobernada por el Anticiclón del Pacífico Sur (APS), cuya componente geostrofica es modificada por fricción con el continente, dando lugar a vientos predominantemente del sur y sureste, responsables del afloramiento costero. El APS se centra entre los 25°-30°S y los 90°-105°W, oscilando entre los 38°S y 12°S. En invierno, la aproximación del APS al continente genera fuertes gradientes de presión que intensifican los vientos. En verano, el APS se aleja de la costa, debilitando los vientos (FUENZALIDA 1971). En la bahía del Callao la presencia de cerros costeros y la isla San Lorenzo, constituyen una importante restricción topográfica que modifica la dirección del campo de vientos, canalizando el viento en dirección sur-norte. El cambio de dirección de la línea de costa al norte de la bahía, produce un cambio de dirección y reducción de la intensidad de los vientos (BAKUN & NELSON 1992).

El análisis de datos de vientos del Callao entre 2006 y 2007, de la estación meteorológica del IMARPE,

mostró una predominancia de los vientos del sureste, presentándose un ciclo anual con valores mínimos en invierno y máximos en verano, y con dirección paralela a la línea de costa (Figura 3). La variación horaria mostró mayor intensidad del viento en las tardes y menor intensidad en las mañanas (Figura 4). La distribución de frecuencias del viento presentó un porcentaje promedio de viento del norte de 6,7%, asociado a eventos de vientos proveniente del norte y/o a periodos de relajamiento de los vientos alisios (Figura 5).

PARA SIMULAR LAS MAREAS se analizaron los parámetros obtenidos del modelo global de mareas barotrópicas TPXO6.2 (2002), el cual tiene una resolución horizontal de 0,25° y usa la técnica del modelado inverso a partir de datos de altimetría obtenidos de TOPEX (EGBERT & EROFEEVA 2002). Se consideraron 8 constituyentes de marea de frecuencia diaria y semidiurna (M2, K1, O1, S2, N2, P1, K2, Q1). En la bahía del Callao la intensidad (líneas co-rango) y fase (líneas co-mareales) de la componente M2 mostraron una amplitud de mareas de aproximadamente 21 cm y una fase de 226° (Figura 6).

PARA SIMULAR LOS RÍOS RÍMAC Y CHILLÓN se analizaron los datos de caudales y se observó mayor flujo en los meses correspondientes a la estación de verano, cuando ocurren las precipitaciones de la parte central de la sierra de la provincia de Lima. Entre abril y diciembre las precipitaciones

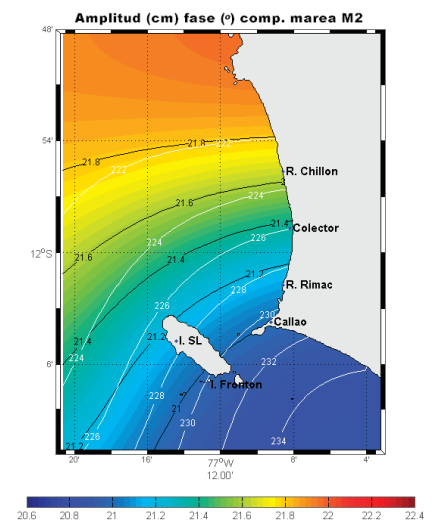


Figura 6.- Amplitud y fase del componente M2 de las mareas incluidas en el modelo.

son escasas y el caudal se reduce sustancialmente. El aporte fluvial promedio de ambos ríos en los meses de verano fue de 39 m³.s⁻¹

PARA SIMULAR DESCARGAS HIPOTÉTICAS de efluentes domésticos se analizaron los datos de caudales y se calculó la concentración promedio ponderado de los efluentes de los colectores del interceptor norte, proyectados a descargar en la zona de Taboada. El caudal promedio de las descargas hipotéticas fue de 12 m³.s⁻¹.

EL EQUIPO COMPUTACIONAL usado para la ejecución del modelo comprendió Workstations de 2 (Sun) y 4 (Dell) procesadores Opteron, bajo plataforma Linux. La eficiencia computacional del equipo usando el modelo anidado

resultó en 1,5 días/año simulado (grilla padre con resolución espacial de 1/40°) y 3 días/año de simulado (grilla hija con resolución espacial de 1/120°).

EL MODELO usado fue el ROMS (Regional Oceanic Model System) (SHCHEPETKIN & McWILLIAMS 2005) con la herramienta de anidamiento AGRIF (Adaptive Grid Refinement in Fortran) desarrollada en Fortran 90 (PENVEN et al. 2006). La subrutina AGRIF permite incluir las características de una malla refinada dentro de un modelo numérico de diferencias finitas. La principal ventaja de AGRIF en grillas anidadas estáticas, es que tiene la capacidad de manejar un variado número de grillas fijas mediante números arbitrarios de niveles de anidamiento. El proceso de anidamiento es implementado para preservar la eficiencia del modelo ROMS sobre cálculos en simultáneo en computadoras de alto rendimiento. Ambas grillas intercambian información a través de las fronteras en ambos sentidos, las condiciones de frontera laterales de la grilla fina es alimentada con información de la grilla gruesa, para luego actualizarla con las soluciones de la grilla fina. El modelo ROMS ha sido usado exitosamente en estudios de calidad acuática (CCUCLAIE 2003), resuelve ecuaciones primitivas en un sistema rotacional, de superficie libre, usando la aproximación de BOUSSINESQ, aproximación hidrostática y balance de momento vertical. Las ecuaciones básicas que el modelo utiliza son:

El balance de momento en dirección x e y :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - fv = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u + D_u$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v - fu = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v + D_v$$

donde:

- x, y son las coordenadas horizontales,
- z es la coordenada vertical,
- t es el tiempo, u, v,
- w son los componentes del vector velocidad
- \vec{v} , u' , v' , w' son los componentes fluctuantes de la velocidad,
- f es el parámetro de Coriolis,

- ϕ es la presión dinámica,
- F_u , F_v son los términos forzantes,
- D_u , D_v son los términos difusivos.

La ecuación de continuidad para un fluido incompresible:

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

donde:

- x, y, z son las coordenadas espaciales,
- u, v, w son las velocidades de corrientes.

El modelo es discretizado horizontalmente sobre una grilla rectangular estructurada e isotrópica de tipo ARAKAWA C, verticalmente es discretizado en un sistema de coordenadas curvilíneas sigma que siguen la forma del fondo y la línea de costa (SONG & HAIDVOGEL 1994). Utiliza rigurosos esquemas numéricos compatibles con el método de diferencias finitas para aproximar con un enfoque Euleriano, las ecuaciones primitivas para el momento y el transporte de la salinidad y la temperatura. Usa dos pasos de tiempo, uno para el modo de oscilación externo barotrópico (con un intervalo de tiempo menor) que satisface la ecuación de continuidad y el otro interno baroclínico (con un intervalo de tiempo mayor), ambos cumpliendo la condición de convergencia de CFL (Courant Friedrichs Lewy).

El sistema de ecuaciones es discretizado temporalmente usando dos algoritmos, uno predictor de tercer orden de aproximación (Leap Frog), y un corrector multipaso (Adam Molton) haciéndolo robusto y estable. El modelo incluye un esquema de turbulencia KPP (K Profile Planetary) para parametrizar la turbulencia vertical, por medio de un submodelo que resuelve los procesos del orden de la subgrilla y permite también resolver las ecuaciones de cierre de la turbulencia (LARGE et al. 1994). Se utiliza la condición de frontera radiativa de FLATHER, implementada en el código del modelo para las componentes barotrópicas de las velocidades perpendiculares a las fronteras, la formulación de dicha condición

obedece a una combinación de las ecuaciones de SOMMERFELD y la ecuación de continuidad unidimensional. Para las velocidades baroclínicas se utilizó la ecuación de radiación de ORLANSKY (MARCHESIELLO et al. 2001).

El modelo fue configurado con las siguientes características: resolución espacial horizontal grilla padre de 1/40°, resolución espacial horizontal grilla hija de 1/120° (<1 km), resolución espacial vertical con 20 niveles sigma, resolución temporal de 135 s, y esquema numérico anidado con 3 iteraciones de la grilla hija por cada iteración de la grilla padre.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EJECUCIÓN DEL MODELO

El modelo se inició desde un estado en reposo, para determinar la etapa de estabilización (en inglés "spin-up") y obtener un estado de reinicio (en inglés "re-start"). La etapa de estabilización duró 5 años de simulación, logrando una estabilidad en la energía cinética total. La técnica de anidamiento se realizó de manera secuencial, realizando pruebas primero con la grilla padre y luego anidando la grilla hija. Se realizaron las simulaciones climatológicas del modelo anidado, representando campos de temperatura, salinidad y corrientes de la bahía del Callao a partir del estado de reinicio.

SIMULACIÓN DE TEMPERATURA

La influencia de la circulación a gran escala se analizó con las simulaciones de la grilla padre (Figura 7). La presencia de remolinos anticiclónicos al norte de la Bahía del Callao podrían orientar corrientes hacia la costa como un mecanismo de retención. Otros remolinos anticiclónicos al sur de la bahía podrían orientar corrientes lejos de la costa, reforzando la intensidad de las corrientes hacia el norte. PESI (2000) también observaron la presencia de remolinos en la Bahía

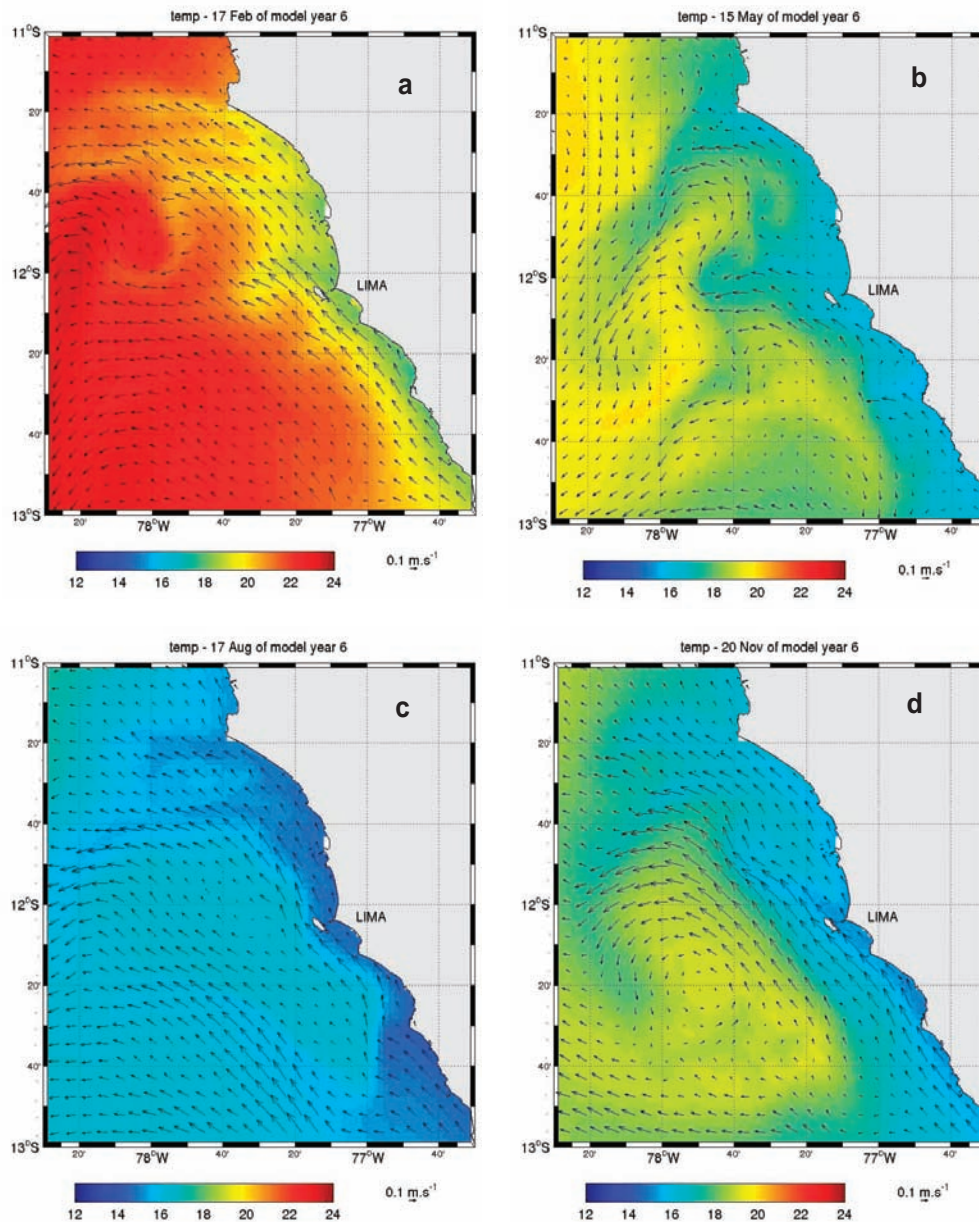


Figura 7.- Variación espacial climatológica de la temperatura y corrientes frente a Lima durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

del Callao durante invierno de 1995, uno ciclónico al norte de la isla San Lorenzo, impulsado probablemente por el flujo neto hacia la tierra de la corriente costera que pasa por el litoral, y uno anticiclónico en la región costera, tal vez impulsado por el remolino existente más afuera en el litoral. La simulación en la grilla hija representó el ciclo estacional de temperatura, con presencia de afloramiento y transporte Ekman

fuera de la costa, como respuesta a la acción del viento sureste durante los meses de julio a octubre (Figura 8c). El modelo también representó temperaturas más altas en la bahía Miraflores que en la del Callao (Figura 8a).

El modelo también reprodujo la actividad de mesoescala asociada al afloramiento, con ocurrencia de filamentos muy intensos que transportan agua fría desde la costa

hacia el océano. Esta marcada actividad de mesoescala ocurrió como producto de la inestabilidad baroclínica producida por la interacción de masas de agua con propiedades diferentes (aguas frías provenientes del afloramiento y aguas cálidas provenientes de aguas oceánicas) que dan lugar a fuertes gradientes de temperatura. En verano la estructura vertical de temperatura mostró una capa de mezcla en los primeros 20 m de profundidad, y

por debajo una estratificación en la estructura térmica y halina. En junio, bajo el forzante de campos de vientos intensos y con flujos de calor relajados, ocurrió la destrucción de la estructura estratificada, seguida de una mezcla de la columna de agua. En los meses de invierno la mezcla fue notable en toda la columna de agua, con ocurrencia de afloramientos.

SIMULACIÓN DE SALINIDAD

La salinidad mostró el efecto de los ríos Rímac y Chillón durante los meses de verano, formando una pluma de baja salinidad (<34 ups) dirigiéndose hacia el norte (Figura 9a). VÁSQUEZ & CAMPOS (1996) mencionan la presencia de un remolino anticiclónico en el fondo frente al río Rímac. Por otro lado, también se observó la presencia de ASS de mayor salinidad acercándose a la costa en los meses cálidos, así como la presencia en los meses fríos de aguas de menor salinidad provenientes de afloramientos del sur (Figura 9c,d).

SIMULACIÓN DE CORRIENTES

La grilla padre simuló la circulación a gran escala, que proporcionó información a las fronteras de la grilla hija. La Bahía del Callao es una área costera que se encuentra fuertemente influenciada por la dinámica de la región, donde hay gradientes muy intensos de salinidad y temperatura con características de patrones espaciales muy complejos. La simulación representó adecuadamente la Corriente Costera Peruana (CCP) con dirección al norte, próxima a la costa e interactuando con el dominio de la bahía (ZUTA & GUILLÉN 1970).

La topografía compleja semi-protegida de la bahía, con la interacción de la Isla San Lorenzo y la orientación de La Punta, generaron una serie de efectos sobre las corrientes. En superficie, ingresaron flujos por el sur, y posteriormente debido al obstáculo de la isla San Lorenzo, se separaron en dos flujos, un flujo pasó por el estrecho geomorfológico de 4,5 km entre la isla y La Punta,

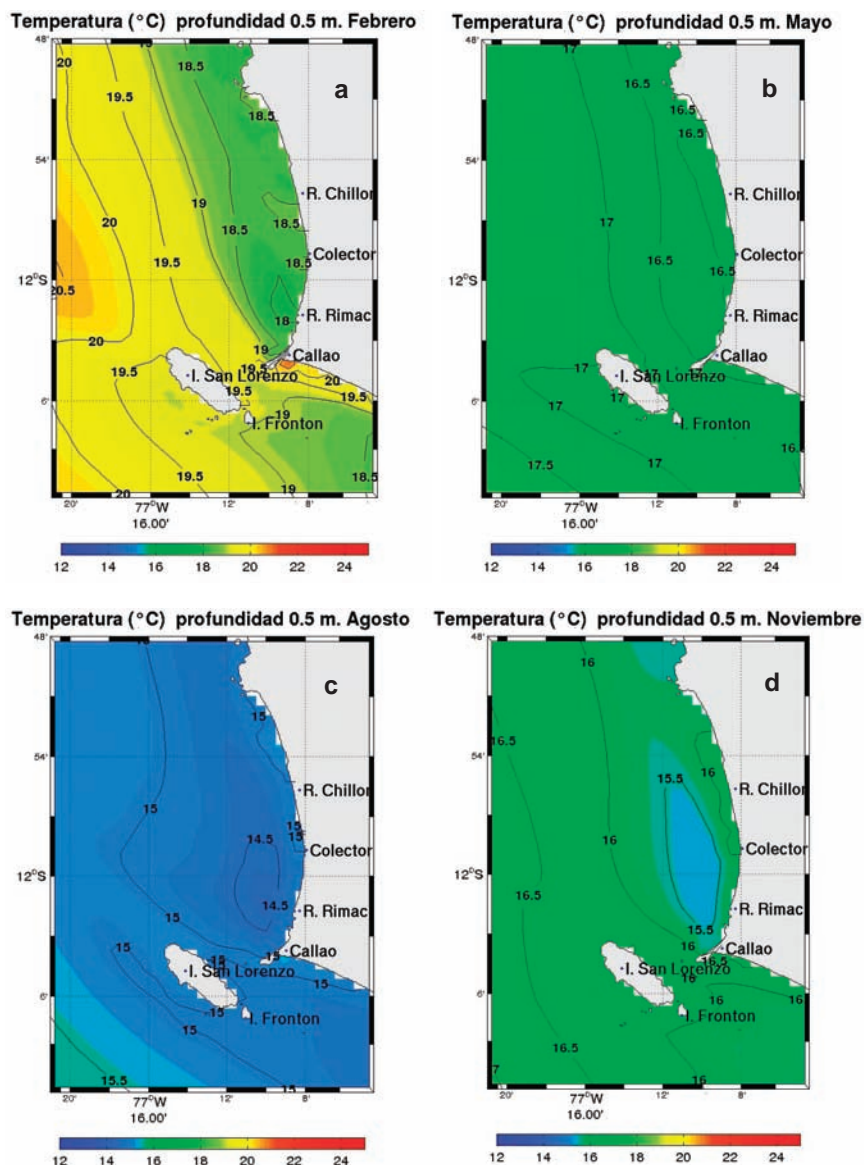


Figura 8.- Variación espacial climatológica de la temperatura a 0,5 m de profundidad en la bahía del Callao durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

que produjo una intensificación de las corrientes, para luego bordear La Punta hacia dentro de la bahía, originando una circulación ciclónica; el otro flujo pasó con dirección noroeste. Detrás de la isla, los flujos convergieron dejando una región de calma. De esta manera, se puede reconocer el efecto “península” (LETH & MIDDLETON 2004) por fricción con la topografía de La Punta que produjo una circulación ciclónica dentro de la bahía, generando una potencial zona de retención de contaminantes. Por otro lado, el efecto “canal” produjo una intensificación de la velocidad de las co-

rrientes en el estrecho entre La Punta y la isla San Lorenzo (Figura 10). Finalmente, el efecto “isla” produjo una disminución en la velocidad de las corrientes, detrás de la isla San Lorenzo, generando otra potencial zona de retención de contaminantes. La dirección del flujo predominante siguió la dirección en que actúan los vientos. Cerca a la costa, las corrientes fueron débiles, a profundidades mayores las corrientes siguieron las isóbatas a mayor velocidad. A nivel subsuperficial, a profundidades de 35 m se encontró un flujo hacia el sur, correspondiente a la Contracorriente Subsuperficial

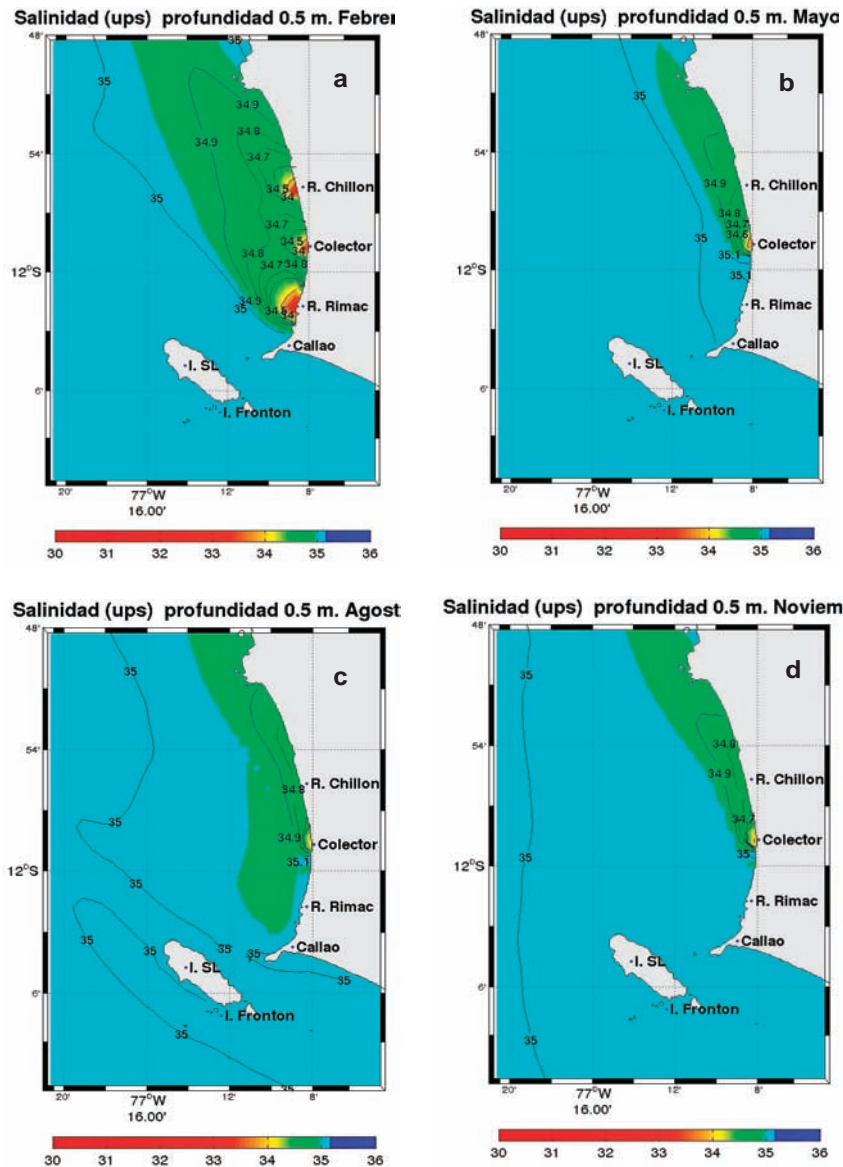


Figura 9.- Variación espacial climatológica de la salinidad a 0.5 m de profundidad en la Bahía del Callao durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

Peruano Chilena (CSPCH) (ZUTA & GUILLÉN 1970).

VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación del modelo anidado se realizó con la simulación sin descargas de efluentes domésticos. La temperatura simulada representó la variación estacional climatológica de la temperatura con un coeficiente de correlación significativo ($r = 0,743$; $p < 0,01$) (Figura 11). El patrón espacial de temperatura simulado mostró concordancia con el patrón observado

durante Marzo 2006 (Figura 12a), con la isolínea de 25 °C ubicada aproximadamente a unos 12 km de la costa (Figura 12b). El patrón espacial de salinidad simulado mostró concordancia con la isolínea de 35 ups, ubicada a unos 15 km de la costa (Figura 13a,b). Los patrones de circulación mostraron concordancia con flujos observados hacia el norte, especialmente bordeando la línea de costa (Figura 14a). Lejos de la costa, se encontraron diferencias en la dirección de corrientes, con corrientes observadas hacia el oeste y corrientes simuladas hacia

el noroeste (Figura 14b), lo cual podría deberse a que el patrón observado es una combinación de medidas de corrientes tomadas a diferentes horas del día. El modelo padre usado en las fronteras del modelo anidado ha sido validado por PENVEN et al. (2005) quienes encontraron una buena concordancia entre las simulaciones y las observaciones de temperatura y nivel del mar.

La disponibilidad de información in situ sobre monitoreos retrospectivos de IMARPE en la Bahía del Callao, permitió realizar comparaciones con otros patrones de circulación. La predominancia de corrientes hacia el norte, especialmente cerca a la línea de costa, coincidió en las simulaciones y en las observaciones de abril de 1997 (MORÓN & CRISPÍN 1997). La intensificación de las velocidades por efecto “canal” entre la isla San Lorenzo y La Punta coincidió en las simulaciones y en las observaciones de diciembre de 1996 (VÁSQUEZ & CAMPOS 1996) y mayo 2000 (VÁSQUEZ et al. 2000). La generación de un remolino ciclónico por efecto “península” coincidió en las simulaciones y en las observaciones subsuperficiales de febrero de 1995 (MORÓN 1995).

SIMULACIÓN DE DESCARGAS HIPOTÉTICAS

El submodelo físico fue acoplado a un submodelo de dispersión de descargas, basado en una ecuación de advección-difusión; dicha ecuación no incluyó fuentes ni sumideros adicionales. Se simuló una descarga de efluentes domésticos de 12 m³.s⁻¹. El submodelo de dispersión fue parametrizado con los datos de caudales, y los resultados se expresaron en porcentaje de efluente. La región con concentraciones de efluentes mayores a 0,5 %, representaba niveles de efluentes significativamente elevados (SIGNELL et al. 2000). El modelo simuló la dirección de las descargas dirigiéndose principal-

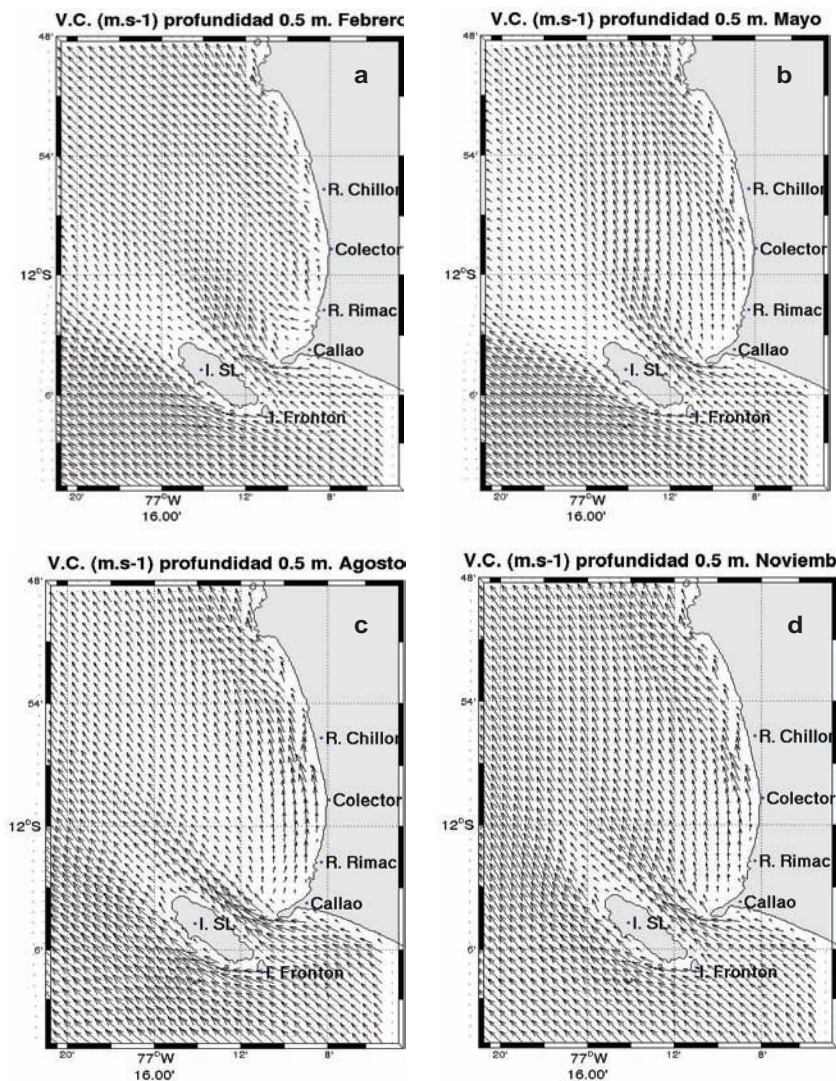


Figura 10.- Variación espacial climatológica de las corrientes a 0,5 m de profundidad en la Bahía del Callao durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

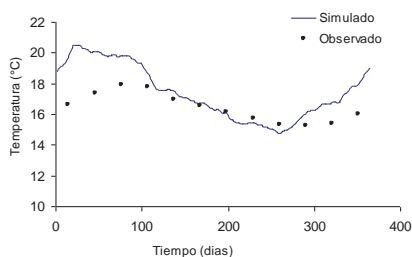


Figura 11.- Comparación entre la temperatura superficial del mar observada y simulada durante un año climatológico, en la Bahía del Callao ($r = 0,743$, $p < 0,01$).

mente hacia el norte (Figura 15), debido a la dirección predominante de los vientos desde el sureste, y a la circulación de gran escala influenciada por la CCP. La varia-

ción estacional climatológica de la circulación y del caudal de los ríos, produce cambios en la dirección y extensión de las descargas simuladas. Durante los meses de verano, el mayor caudal de los ríos Rímac y Chillón, desvía las descargas hacia el noroeste alejándolas de la costa, aproximadamente a un ángulo de 30° con respecto de la línea de costa (Figura 15a). Sin embargo, el resto del año, las descargas se dirigen al norte, pegándose a la costa a lo largo de más de 10 km, llegando hasta el río Chillón y a la playa Ventanilla (Figura 15b). El ancho de la región costera impactada por las descargas, con niveles de efluentes significativamente elevados, es de aproximadamente 2

km. De esta manera, la CCP actúa como una frontera que canaliza y confina los efluentes cerca a la costa. Adicionalmente, el análisis de las estructuras de mesoescala mostró la presencia de remolinos anticiclónicos que producen corrientes hacia la bahía del Callao (Figura 7), este mecanismo puede llevar cantidades de efluentes significativamente elevados hacia la costa. A mayor profundidad, el efluente se dispersa en una extensión espacial similar a la superficial, indicando que el efluente es advechado como una masa de agua con concentraciones elevadas de efluentes a más de 5 m de profundidad.

Las descargas simuladas mostraron niveles de efluentes significativamente elevados extendiéndose hasta aproximadamente 10 km del punto de origen (Figura 16). Esta extensión, es considerablemente mayor a la extensión espacial aceptable (2-3 km) de descargas vertidas a través de emisarios submarinos (SIGNELL et al. 2000). Usando los datos observados durante monitoreos ambientales realizados en la bahía del Callao en el 2006 (IMARPE 2006), se calculó el porcentaje actual de contaminantes vertidos desde el Colector Callao (Centenario), observándose una tendencia concordante con los datos simulados, con una menor retención de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), y mayor retención de material orgánico extraíble en hexano (MOEH) y sólidos suspendidos totales (SST) (Figura 17).

Diversos estudios indican que la descarga a la bahía del Callao de grandes volúmenes de efluentes domésticos sin tratamiento, sería perjudicial para los pobladores de la zona costera. La bahía del Callao ha sido clasificada como Clase VI (zona de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial) (DIGESA 2005). Evaluaciones de calidad ambiental realizadas durante monitoreos en la bahía del Callao (IMARPE 2006), han mostrado valores de contaminantes mayores a los Estánda-

res de Calidad Ambiental (ECA) de la Ley de Aguas (El Peruano 1969). En este caso es aplicable la recomendación de WSDE (2003), donde se señala que, si un cuerpo acuático receptor ya excede los criterios ambientales, se debe negar la autorización a nuevas descargas.

El estudio de impacto ambiental realizado para SEDAPAL por la consultora PMI (2003), concluyó que: "mientras no se desarrollen las obras (planta de tratamiento y emisor submarino) el impacto será negativo, ya que el mar en esta zona está muy impactado es decir tiene muchos pasivos ambientales". Estudios previos han sugerido conducir mar adentro las aguas tratadas a través de un emisor de 8 km de longitud (SEDAPAL 1998). Diversas actividades fueron propuestas para desarrollar al norte de la bahía del Callao, tales como (CTPDC 2006): i) descontaminación de la bahía de Ventanilla, ii) control y monitoreo de la calidad del agua en la bahía de Ventanilla, iii) manejo bioecológico y desarrollo ecoturístico del humedal de Ventanilla, iv) protección del paisaje y uso ecoturístico de los acantilados, v) descontaminación del río y valle Chillón entre Puente Inca y Víctor Raúl, vi) adecuación ecológica de las lagunas de residuos de hidrocarburos de la refinería de La Pampilla.

Debido a que el mar de Ventanilla es uno de los ecosistemas que alberga diversas especies hidrobiológicas, la CTPDC (2006) ha planeado promover el desarrollo pesquero, para lo cual es imprescindible contar con una buena calidad acuática en dicha zona. Ludwig (1988) indicó que la eutrofización puede ser un factor importante, cuando la descarga de efluentes domésticos se realiza en aguas marinas con circulación restringida, como en las bahías, por lo que es necesario realizar un monitoreo permanente de largo plazo, con el fin de evaluar el proceso de eutrofización antropogénica, antes y durante las descargas.

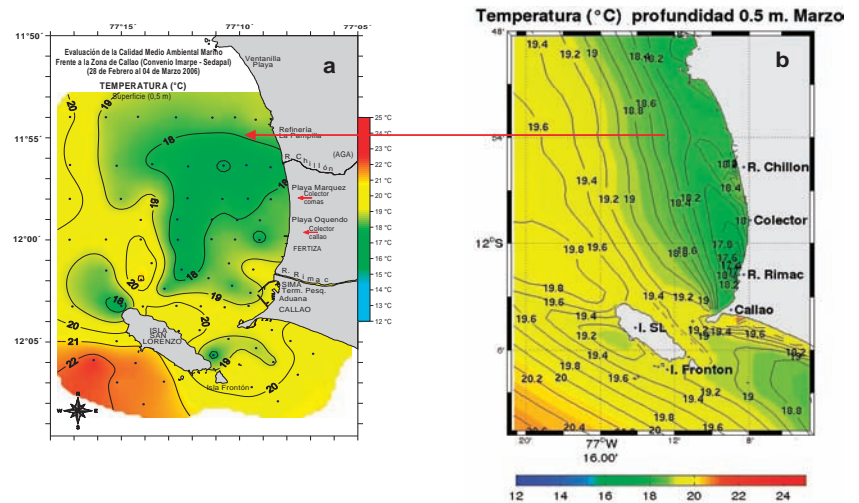


Figura 12. Comparación entre la temperatura observada (IMARPE 2006) en marzo 2006 (a) y la temperatura simulada en marzo climatológico (b) en superficie, en la Bahía del Callao

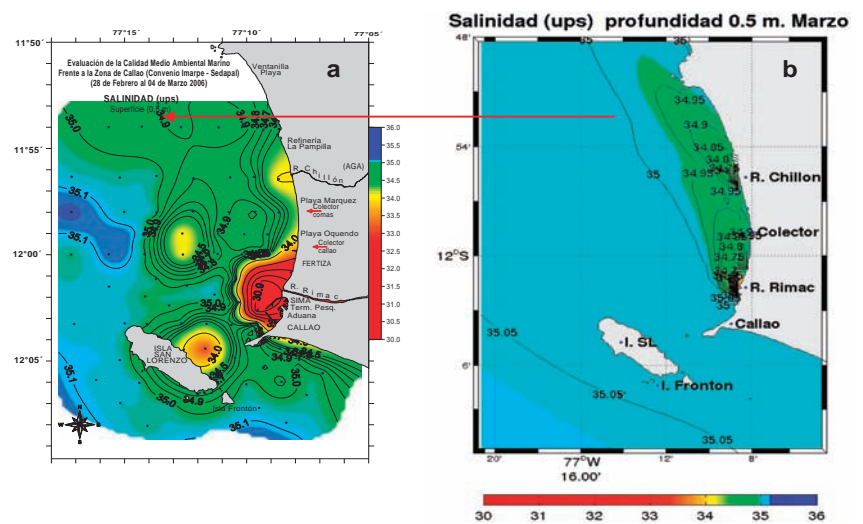


Figura 13.- Comparación entre la salinidad observada (IMARPE 2006) en marzo 2006 (a) y la salinidad simulada en marzo climatológico (b) en superficie, en la Bahía del Callao.

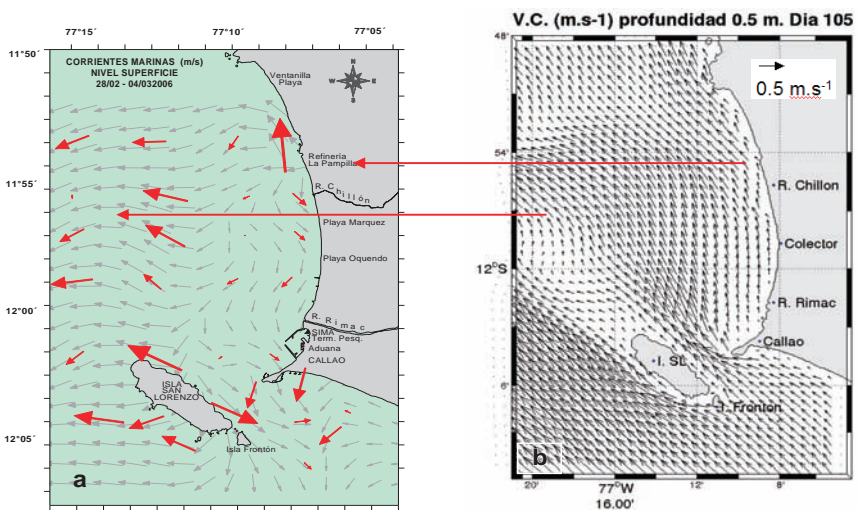


Figura 14. Comparación entre las corrientes observadas (IMARPE 2006) en marzo 2006 (a) y las corrientes simuladas en marzo climatológico (b) en superficie, en la Bahía del Callao.

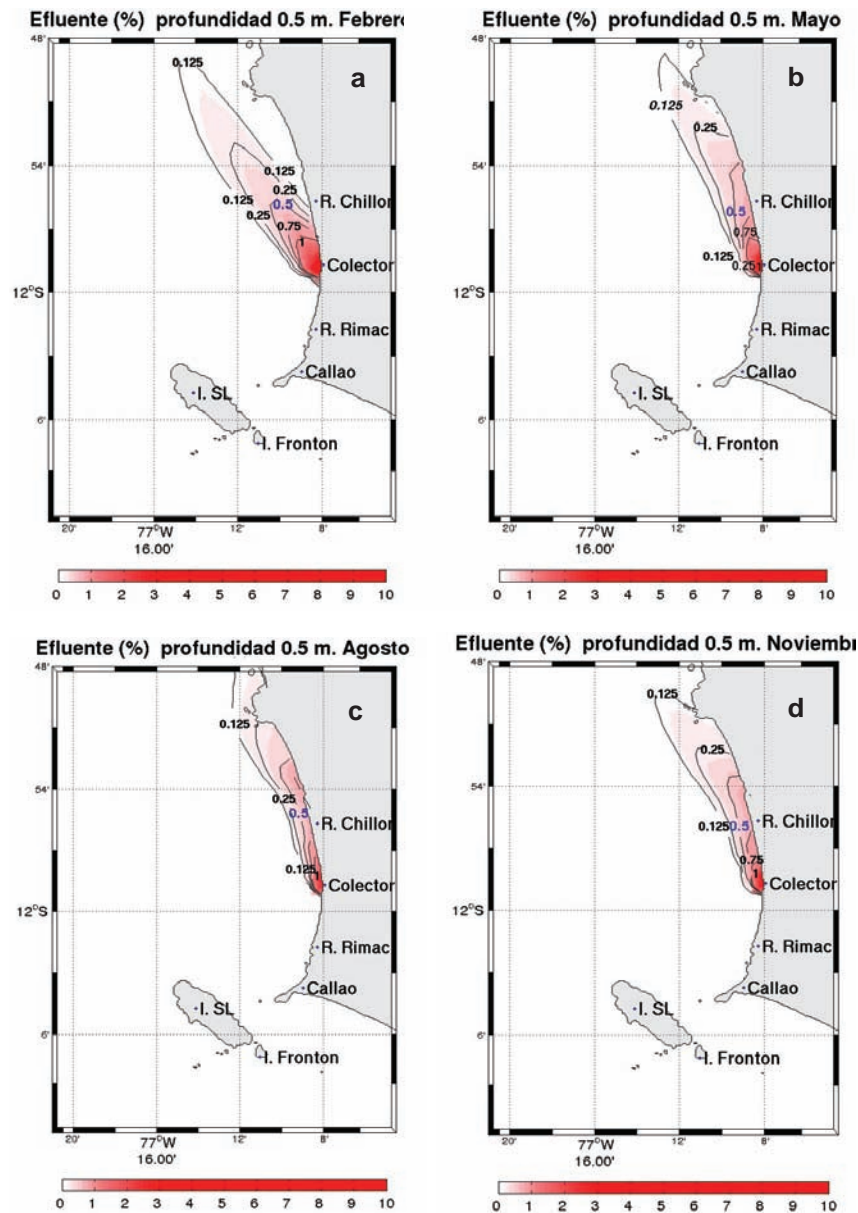


Figura 15.- Variación espacial climatológica del efluente a 0,5 m de profundidad en la bahía del Callao durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

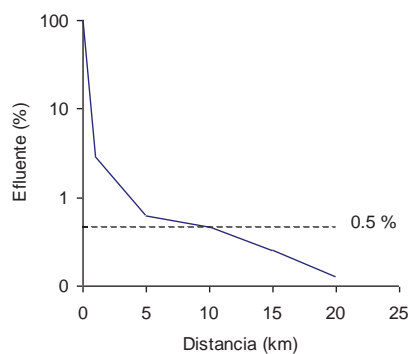


Figura 16.- Variación espacial de la concentración de efluente promedio simulado desde el punto de vertido.

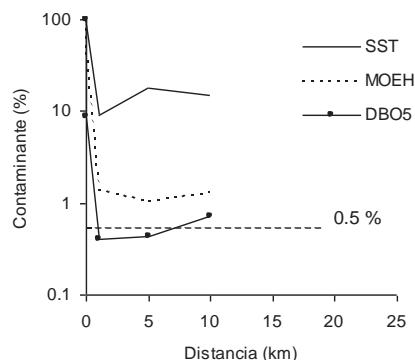


Figura 17.- Variación espacial de la concentración de efluente observado desde el Colector Callao.

SIMULACIÓN CON ESCENARIO DE VIENTOS DEL NORTE

El análisis de series de tiempo del viento mostró que en algunos días predominaron los vientos del norte en la bahía del Callao, e incluso se han medido corrientes con flujos hacia el sur en la bahía; por tal motivo fue necesario simular el impacto de este escenario en las descargas hipotéticas de efluentes domésticos. Las simulaciones con vientos analíticos del norte mostraron que los vientos del norte transportarían las descargas hipotéticas hacia el sur, con niveles significativamente elevados de efluentes, rodeando La Punta a través del estrecho, y llegando hasta la bahía de Miraflores (Figura 18). Este escenario también permite inducir que, en la bahía del Callao, la circulación es gobernada principalmente por los vientos y en menor grado por las mareas. De este modo, existe el riesgo de que eventos de vientos del norte, puedan causar impactos sobre áreas de balnearios recreacionales (Cantolao, La Punta, Arenilla, etc.).

CONCLUSIONES

- 1) El modelo representó adecuadamente los patrones de temperatura, salinidad, circulación de gran escala, y circulación local de la bahía del Callao.
- 2) Las descargas hipotéticas simuladas fueron transportadas predominantemente hacia el norte, con variaciones estacionales (hacia el noroeste en verano por la descarga de los ríos).
- 3) El impacto espacial de las descargas hipotéticas se extendió aproximadamente a más de 10 km a lo largo de la costa, 2 km de ancho y 5 m de profundidad.
- 4) Las estructuras de mesoescala y la topografía incrementaron la retención en la bahía del Callao.
- 5) Las simulaciones con escenarios de viento norte, mostraron el transporte de las descargas hipotéticas hasta la bahía de Miraflores.

RECOMENDACIONES

- 1) Durante el periodo de los monitoreos ambientales, las concentraciones observadas de contaminantes en la bahía del Callao superaban los estándares de calidad ambiental de la Ley de Aguas (IMARPE 2006), debiendo evitarse nuevos vertimientos, lo cual concordaría con las propuestas de descontaminación de la bahía de Ventanilla (CTPDC 2006 y WSDE 2003).
- 2) Se recomienda limitar el impacto de futuras descargas, mediante un sistema de tratamiento que reduzca las concentraciones de contaminantes de los efluentes, y un vertido de las descargas a través de un emisario submarino que reduzca la extensión espacial de las futuras descargas (PMI 2003).

Agradecimientos.- A los modeladores del Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD): doctores PATRICK MARCHESIELLO, VINCENT ECHEVIN, TIMOTHÉE BROCHIER y FRANCOIS COLAS por las sugerencias científico-técnicas. A la Dra. GUADALUPE SÁNCHEZ y a SEDAPAL por el apoyo proporcionado. Al Ing. OCTAVIO MORÓN por la información retrospectiva de oceanografía física de la bahía del Callao y al Ing. LUIS PIZARRO por los datos sobre vientos. A la Dra. SARA PURCA y al estadístico CARLOS QUISPE por sus valiosos comentarios, y a la Sra. GLORIA GOMERO y a la Srta. MYLENA VILLAFANE por el apoyo administrativo e informático.

REFERENCIAS

BAKUN A, NELSON C S. 1991. The seasonal cycle of wind stress curl in sub-tropical eastern boundary current regions. *Journal of Physical Oceanography*. 21:1815-1834.
 CCC (Canadian Commercial Corporation). 2002. Propuesta proyecto saneamiento integral para Lima Metropolitana. 45 pp.

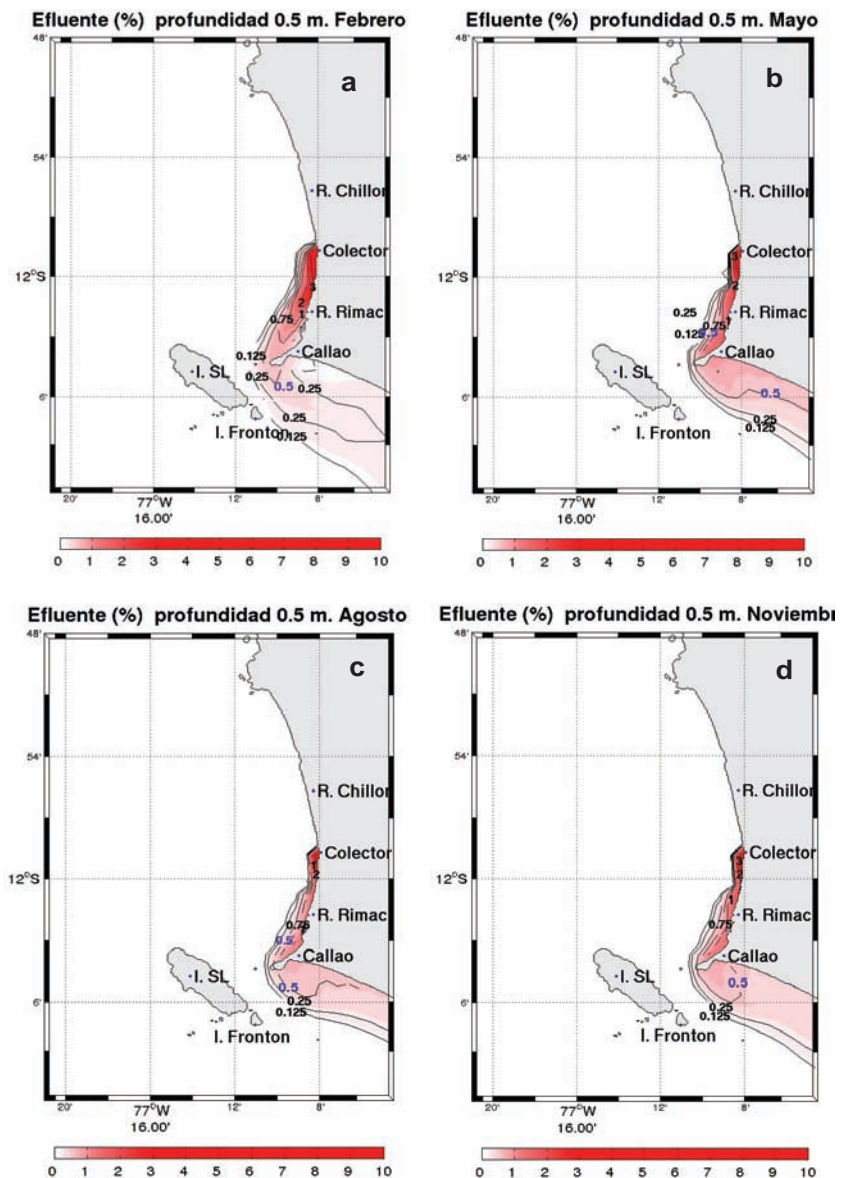


Figura 18. Variación espacial del efluente en un escenario con viento norte, a 0,5 m de profundidad en la bahía del Callao durante los meses de (a) febrero, (b) mayo, (c) agosto y (d) noviembre.

CCUCLAIE (Coastal Center of the UCLA Institute of the Environment). 2003. Application of the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to Water and Sediment Quality Issues in the Southern California Bight.
 CERSAT IFREMER. 2005. Mean Wind Fields QuikSCAT. On-line: <http://cersat.ifremer.fr/data/extraction/form/7>
 COADS. 2006. Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set. On-line: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/COADS>.
 CTPDC (Comisión Técnica del Plan de Desarrollo Concertado). 2006.

Plan de desarrollo concertado del Distrito de Ventanilla 2006-2015. En línea: www.muniventanilla.gob.pe/PDC%20FINAL%20Ventanilla.htm
 DHNM (Dirección de Hidrografía y Navegación). 1993. Atlas Hidrografico del Perú, 265 pp.
 DHN (Dirección de Hidrografía y Navegación). 1999. Derrotero de la costa del Perú. Vol. I.
 DIGESA. 1969. Ley General de Aguas. D. L. 17752. El Peruano.
 DIGESA. 2005. Clasificación de bahías y otros en el mar. R.D. 1152/2005/DIGESA/SA.
 EGBERT G D, EROFEEVA S Y, 2002. Ef-

- ficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 19:N2.
- ETOPO2. 2008. 2-Minute Gridded Global Relief Data. On-line: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/fliers/06mgg01.html>.
- FUENZALIDA, H. 1971. Climatología de Chile, Publicación interna, Departamento de Geofísica, Univ. de Chile, 73 pp.
- IMARPE. 2006. Evaluación del ambiente marino-costero de la Bahía del Callao. Monitoreo Verano 2006. Informe Interno.
- INRENA. 2008. Caudales de ríos. Vertiente Pacífico. En línea: http://www.inrena.gob.pe/irh/irh_infointeres_caudales.htm.
- IOC, IHO and BODC. 2003. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.
- JICA. 1990. The feasibility study on the improvement of sewerage system in southern part of Lima. Final Report. Vol. I. Summary.
- LARGE W G, McWILLIAMS J C, DONEY S C. 1994. Oceanic vertical mixing: A review and a model with a non local boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.* 32:363-403.
- LETH O, MIDDLETON J F. 2004. A mechanism for enhanced upwelling off central Chile: Eddy advection. *J. Geophys. Res.* 109: C12020. doi:10.1029/2003JC002129.
- LUDWIG R G. 1988. Evaluación del impacto ambiental. Ubicación y diseño de emisarios submarinos. CEPIS. 46 p.
- MARCHESIELLO P, McWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A. 2001. Open boundary condition for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modell.* 3:1-21.
- MORÓN O, CRISPÍN A. 1997. Componente física. Evaluación de los efectos de contaminación marina en la Bahía de Callao - Ventanilla (23 - 25 Abril 1997). Inf. Interno IMARPE.
- MORÓN O. 1995. Estudio de la calidad bacteriológica y aislamiento de *Vibrio cholerae* en el agua de mar y organismos marinos de la zona de Callao - Ventanilla. Convenio IMARPE - CORDECALLAO (13 - 15 Febrero 1995). Inf. Interno IMARPE.
- PESI (Parsons Engineering Science International). 2000. Estudio de factibilidad de planta de tratamiento de aguas residuales y emisor de Lima norte. Informe final.
- PENVEN P, ECHEVIN V, PASAPERA J, COLAS F, TAM J. 2005. Average circulation, seasonal cycle, and meso-scale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *J. Geophys. Res.*, Vol. 110, No. C10, C10021. 10.1029/2005JC002945
- PENVEN P, DEBREU L, MARCHESIELLO P, McWILLIAMS J C. 2006. Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*, Vol 12, Issues 1-2, 157-187.
- PIZARRO L. 1987. Variaciones estacionales del viento superficial frente al Perú entre Enero 1982 y Junio 1987. p. 17-23. En: Salzwedel, H. y A.Landa (eds.). Recursos y dinámica del ecosistema de afloramiento peruano. Bol. Vol. Ext. Inst. Mar Perú. 382 p.
- PMI (Ponce y Montes Ingenieros S.R.L.) 2003. Obra: Interceptor norte. Estudio de impacto ambiental. L.P.N. N° 0002 - 2003 - Concurso oferta - SEDAPAL.
- SÁNCHEZ G, OROZCO R, VÁSQUEZ L, CABELLO R, GUZMÁN M, LEDESMA J, AYÓN P, ENRIQUEZ E. 2007. Evaluación del estado del ambiente marino costero de la bahía del Callao en el año 2006. p. 345-347. Libro de Resúmenes Ampliados. I Congreso de Ciencias del Mar del Perú. Lambayeque. UPRG. 361 p.
- SHCHEPETKIN A F, McWILLIAMS J C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography following-coordinate oceanic model. *Ocean. Modell.* 9:347-404.
- SEDAPAL. 1998. Plan maestro de los sistemas de agua potable y alcantarillado para Lima y Callao. Min. Presidencia. Vol. V. Tomo 2.
- SIGNELL R P, JENTER HL, BLUMBERG A F. 2000. Predicting the physical effects of relocating Boston's sewage outfall. *J. Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 50:59-72.
- SONG Y, HAIKVOGEL D. 1994. A semi-implicit ocean circulation using a generalized topography following coordinate system. *J. Comp. Phys.* 115:228-244.
- TPXO6.2. 2002. Global model to tidal harmonic constants and/or predict tide on TOPEX/POSEIDON. On-line: <http://www.coas.oregonstate.edu/research/po/research/tide/index.html>.
- VÁSQUEZ L, CAMPOS M. 1996. Evaluación de los efectos de la calidad microbiológica en la Bahía de Callao - Ventanilla (26-28 Diciembre 1996). Inf. Interno IMARPE.
- VÁSQUEZ L, CRISPÍN A, TENORIO J. 2000. Monitoreo de Bancos naturales de los Principales Invertebrados en el Área de la Bahía del Callao (31 Mayo 2000). Inf. Interno IMARPE.
- WOA. 2007. World Ocean Atlas 2001. On-line: http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/pr_woa01.html.
- WSDE (Washington State Department of Ecology). 2003. Focus on mixing zones for wastewater discharges.
- ZUTA S, GUILLÉN O. 1970. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Boletín Inst. Mar Perú*. 2:322 pp.