

ESTIMACIÓN Y REPRESENTACIÓN DEL NIVEL DE LA SUPERFICIE DEL MAR: UNA APLICACIÓN DE LA GEOMÁTICA EN OCEANOLOGÍA

Guillermo Martínez Flores

Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional

gmflores@ieee.org

Resumen

Los cambios en la altura (relieve o topografía) de la superficie del mar son respuestas dinámicas a procesos físicos de diversa escala espacial y temporal, como las mareas, la temperatura, la presión barométrica y la circulación del océano. La máxima amplitud de esta topografía es de aproximadamente ± 1 m, relativa a un nivel de referencia particular, el geoide. Esta, también denominada topografía dinámica y sus corrientes oceánicas asociadas, tienen implicaciones importantes en el transporte de masa, calor, salinidad y otras propiedades químicas y biológicas, por lo que su estudio es un tópico relevante para la oceanología y la climatología, entre otras áreas. En este trabajo se implementan algoritmos para el tratamiento de datos diarios de altimetría y de vectores de velocidad de corrientes marinas, obtenidos a partir de sensores a bordo de satélites para la observación de la Tierra. La región del Pacífico mexicano fue seleccionada para representar y analizar estas variables durante el año 2014. Se generaron mapas y gráficas que muestran la variación espacio-temporal de la topografía dinámica, así como los vectores de velocidad de las corrientes asociadas a estas variaciones (geostróficas). El ámbito de este trabajo es el de la Informática aplicada al estudio de las Ciencias de la Tierra (Geomática), en particular a la oceanología.

Palabras Clave: Altimetría, geomática, percepción remota, procesamiento de imágenes.

Abstract

Changes in sea surface height (relief or topography) are dynamic responses to physical processes of several spatial and temporal scales, as tides, temperature, barometric pressure and ocean circulation. The maximum amplitude of this topography is about ± 1 m relative to a reference level, the geoid. This, also called dynamic topography and its associated ocean currents, have important implications in the transport of mass, heat, salinity and other chemical and biological ocean properties, so their study is a relevant topic for Oceanology and Climatology, among other areas. In this paper, algorithms to process daily altimetry and velocity vectors data of ocean currents were implemented. This data was obtained from sensors onboard Earth observation satellites. The region of the Mexican Pacific was selected to represent and analyze these variables during 2014. Maps and graphs showing the spatiotemporal dynamic topography variation, as well as the velocity vectors of currents associated with these variations (geostrophic), were generated. The scope of this work is the Computer Science applied to the study of Earth Sciences (Geomatics), particularly Oceanology.

Keywords: *Altimetry, geomatics, remote sensing, image processing.*

1. Introducción

El tratamiento de los datos obtenidos a partir de sensores a bordo de satélites artificiales, ha permitido observar la Tierra e interpretar diversos procesos en la atmósfera, la litósfera e hidrósfera. Esta labor se realiza de una forma sin precedentes, a partir del lanzamiento de los primeros satélites operacionales para la observación de la Tierra en la década de los setenta. Con el desarrollo de esta tecnología ha sido posible mejorar sustancialmente las resoluciones espaciales, temporales, radiométricas y espectrales de los datos adquiridos, representados comúnmente como imágenes.

Desde el punto de vista de la Informática, el objetivo es implementar algoritmos para almacenar, procesar y presentar los datos geoespaciales, de manera eficiente y apropiada para ayudar a simular, representar y explicar los fenómenos que ocurren en la superficie terrestre. En este contexto, la Geomática (término

propuesto por Michel Paradis), es la disciplina que incorpora técnicas informáticas para el estudio de las Ciencias de la Tierra, área en la que se circunscribe el presente trabajo, cuyo objeto de estudio es el océano y en particular las variaciones en su topografía dinámica (Paradis, 1981).

Las olas de escala planetaria son fenómenos de gran extensión cuya propagación se ve influenciada por la rotación y la forma esférica del planeta. Sus escalas espaciales y temporales son tan grandes que responden a la forma en la que el parámetro de Coriolis (asociado con la rotación de la Tierra) varía con la latitud. La comprensión de fenómenos de escala global, como este, habría sido imposible sin el advenimiento de los métodos de oceanografía satelital (Robinson, 2010) y el desarrollo de la Geomática.

La superficie del mar no es plana, tiene diferencias de altura de uno a dos metros, que se reflejan en la circulación de las corrientes superficiales. El agua que se acumula en el centro de los giros de corrientes produce elevaciones que pueden sobrepasar el metro. Las diferencias de altura de la superficie del mar (topografía dinámica), también dependen de las variaciones de la densidad del agua, así el agua más cálida y poco salina es más dilatada y más elevada en la superficie. Por otra parte, si el océano fuera homogéneo y se encontrara en reposo, el nivel del mar estaría sometido a una fuerza de gravedad constante. La superficie donde la fuerza de gravedad es de intensidad constante se conoce como geoide (nivel de la superficie del océano si estuviera en reposo). Esta superficie es una esfera, aplanada en los polos. Las anomalías del geoide son abultamientos y depresiones que constituyen la topografía dinámica. Así, la diferencia entre la superficie oceánica real y un geoide es la topografía dinámica (UCC, s. f.).

Con la finalidad de observar los movimientos de la topografía dinámica asociados a olas planetarias (de escalas espaciales de cientos a varios miles de kilómetros y temporales de semanas a varios años), es necesario adoptar un enfoque que no dependa de imágenes de satélite individuales, pues los fenómenos que se desean representar pueden no ser evidentes en una sola imagen. Además, puede ser que la magnitud de los procesos de mesoescala, la variabilidad estacional o las variaciones geográficas naturales sean mucho mayores que la amplitud de las

olas planetarias. Incluso el ruido aleatorio de la medición por satélite puede complicar la detección de las olas de gran escala (Robinson, 2010). Para superar esto, los conjuntos de datos globales necesitan estar preparados cuidadosamente, labor que desempeñan agencias espaciales como la europea y la estadounidense. El altímetro es un instrumento que permite medir la distancia entre el satélite y la superficie de la Tierra. El primer satélite equipado con altímetro para fines oceanográficos fue el GEOS-3 (1975-1978) y a partir de éste se han utilizado sensores de este tipo a bordo de satélites como el Seasat, Geosat, ERS-1, TOPEX-Poseidon, Jason-1, entre otros, mejorando cada vez la precisión de sus estimaciones (del orden de decenas de centímetros en los primeros satélites, hasta alrededor de 2 cm actualmente). Así, desde 1992 la Agencia Espacial Europea y la NASA han estado midiendo la topografía dinámica de la superficie del océano a nivel global, utilizando altímetros a bordo de satélites desde una órbita de 1,336 km por encima de la superficie del océano. Estos instrumentos miden con precisión de ~2 cm la distancia entre el satélite y la superficie del mar (Robinson, 2004).

La figura 1 muestra un ejemplo de la cobertura de un ciclo del satélite Jason-3 para medir la anomalía del nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés). Los datos utilizados en este trabajo fueron generados por una unidad de producción del CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales) en Toulouse, Francia, procesando datos de las misiones altimétricas disponibles: HY2, Saral/AltiKa, Cryosat-2, Jason-2, Jason-1, T/P, ENVISAT, GFO, ERS1/2. Para mayor información sobre estas misiones y los procedimientos para generar los datos de altimetría consultar las referencias CNES (2016), Mertz et al. (2016), Cheng et al. (2013) y Vignudelli et al. (2011). Los datos altimétricos obtenidos con múltiples satélites, son distribuidos por la agencia francesa AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data) en formato NetCDF (Networked Common Data Form).

El formato de archivos NetCDF fue diseñado por la Corporación Universitaria para la Investigación Atmosférica (UCAR), con la finalidad de manipular eficientemente datos científicos, particularmente en matrices multidimensionales. Los archivos en

este formato están auto-documentados, pues contienen la información básica necesaria para acceder a los datos (Bowman, 2006).

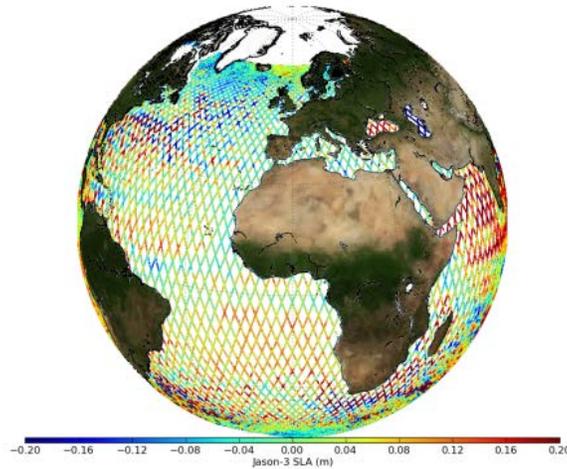


Figura 1 Ejemplo de la cobertura de mediciones se anomalías del nivel del mar.

2. Método

Una de las características de los fenómenos oceanográficos es la amplia gama de escalas (números de onda y frecuencias) de variación espacial y temporal (variabilidad de escala múltiple) en la que se presentan los campos observados. Los campos de interés primario tienen cuatro parámetros: una dimensión de tiempo y tres dimensiones de espacio. Ejemplos de tales campos variantes en el tiempo incluyen la velocidad del fluido, la presión, la densidad del agua, la temperatura y la salinidad. Campos con sólo dos dimensiones espaciales incluyen el nivel del mar, la velocidad y forzamiento del viento en la superficie, la temperatura superficial del mar, el color del océano y la distribución de hielo marino (National Academic Press, 1993). En este trabajo, las corrientes geostróficas son representadas con campos de velocidad de dos dimensiones espaciales y una dimensión temporal.

La metodología implementada se basa en los trabajos publicados por Robinson (2010), Vignudelli et al. (2011) y CNES (2016). La idea es representar las variaciones espaciales y temporales de la topografía dinámica y corrientes asociadas de una región del océano, generando una secuencia de mapas.

Posteriormente estos mapas individuales se convertirán en cuadros de vídeo para visualizar la secuencia. En oceanología, es común discutir sobre la extensión, duración, periodicidad, intensidad, etc., de estructuras de circulación marina como giros, frentes, filamentos, ondas internas, surgencias, entre otras. El objetivo es representar como varían tales estructuras en el espacio y el tiempo, y posteriormente (en trabajos futuros) poder correlacionar sus características con otros parámetros, como se discute más adelante.

Los datos diarios de altimetría satelital utilizados en este trabajo, así como los vectores de corrientes geostróficas se obtuvieron del sitio de AVISO (<http://www.aviso.altimetry.fr>). La cobertura seleccionada fue la región entre 76 y 133° de longitud oeste y entre 0 y 37° de latitud norte, correspondiente al Pacífico mexicano. La resolución espacial de estos datos (tamaño del pixel) es de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ en una cuadrícula cartesiana. Fueron seleccionados los datos diarios correspondientes al año 2014. Se implementaron algoritmos de procesamiento de imágenes en Matlab para acceder y procesar estos datos de acuerdo a las especificaciones técnicas del CNES (2016). Las variaciones en la altura de la superficie del mar se presentan en centímetros sobre el nivel medio del mar, mientras que los vectores de velocidad están definidos por sus componentes zonal (este-oeste) y meridional (norte-sur), calculando la resultante en ms-1.

Estos datos corresponden a las anomalías del nivel del mar (SLA, por sus siglas en inglés), así como los componentes U y V con los que se caracteriza la corriente geostrófica asociada a la SLA. El formato de estos archivos es NetCDF. En la figura 2 se muestra el diagrama conceptual de la metodología. El recuadro de la esquina superior derecha representa los archivos en formato NetCDF de las anomalías del nivel del mar, así como de los componentes U y V.

La cobertura original de estos datos es global. A partir de éstos, se extrae la región de interés (ROI) así como la cobertura temporal en matrices tridimensionales, misma que se representa por la secuencia de mapas en la figura 2. Cada uno de estos mapas muestra el estado del nivel del mar y los vectores de corrientes geostróficas para cada día del año 2014. Una vez conformado este arreglo de mapas, se extrajeron líneas a latitudes específicas, con la finalidad de ordenarlas

secuencialmente en un stack, generando un diagrama conocido como Hovmöller (Robinson, 2010). Este proceso se esquematiza en la parte inferior de la misma figura 2.

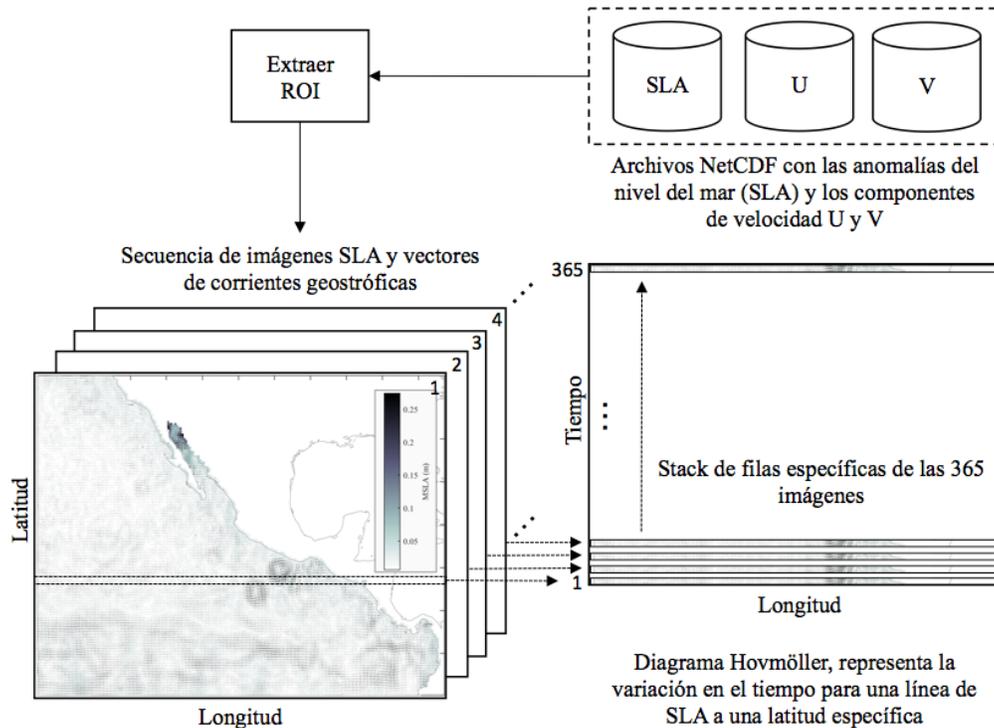


Figura 2 Diagrama conceptual de la metodología.

3. Resultados

Como parte de los resultados se generaron una serie de funciones basadas en el tratamiento y manipulación de arreglos bidimensionales y tridimensionales, para acceder, procesar y representar los datos de altimetría y de corrientes geostroficas contenidos en los archivos NetCDF.

Derivado de la implementación de estos algoritmos, se obtuvieron 365 mapas (uno por día para el año 2014), en los que se representan las anomalías del nivel del mar, así como los vectores de velocidad geostrofica asociados a estas anomalías, superpuestos en los mapas.

En las figuras 3 a 6, se muestran cuatro de los primeros mapas de la secuencia, correspondientes a los días 1, 10, 20 y 30 de enero. La escala de colores representa las anomalías del nivel del mar, cuyos valores más altos (~ 0.3 m) se

observan en la región norte del Golfo de California. Otro aspecto evidente en esta secuencia es la evolución de una serie de giros cercanos al Golfo de Tehuantepec.

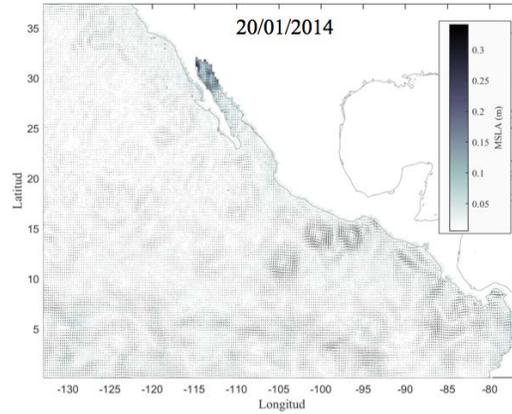


Figura 3 Mapa de la anomalía del nivel del mar (1 de enero de 2014).

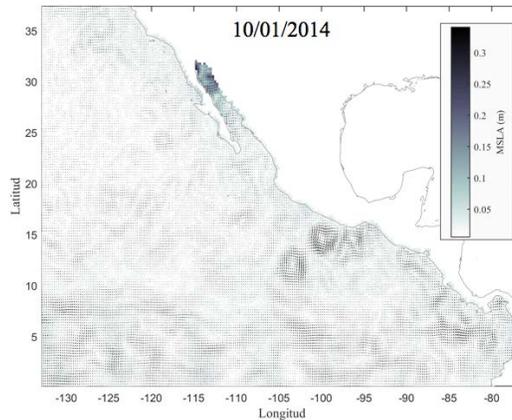


Figura 4 Mapa de la anomalía del nivel del mar (10 de enero de 2014).

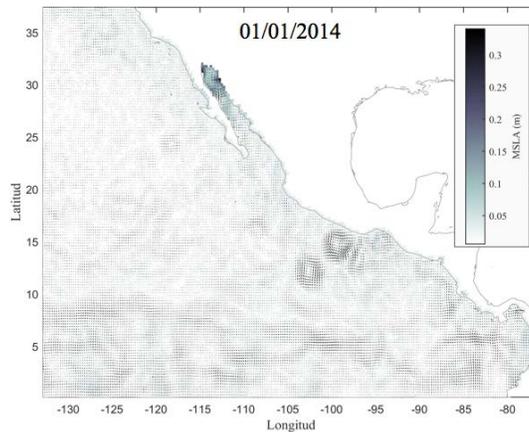


Figura 5 Mapa de la anomalía del nivel del mar (20 de enero de 2014).

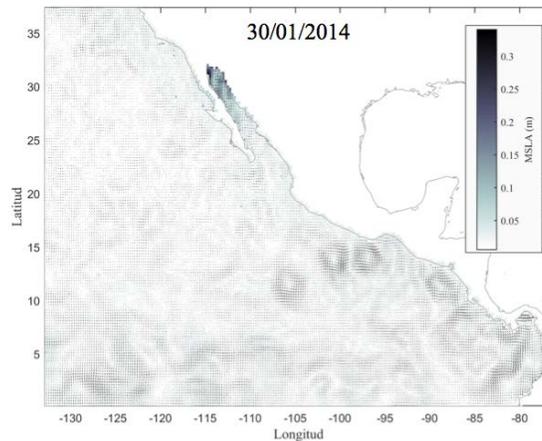


Figura 6 Mapa de la anomalía del nivel del mar (30 de enero de 2014).

La figura 7 muestra un acercamiento a estos giros. Según López-Calderón et al. (2006), uno de los factores que influyen en la formación de estos giros son los fuertes vientos provocados por la influencia de los sistemas de alta presión a lo largo del Golfo de México y el Mar Caribe. Estos fluyen hacia el Océano Pacífico a través de las regiones con relieve topográfico bajo de Centro América (golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá), principalmente en invierno y primavera boreal.

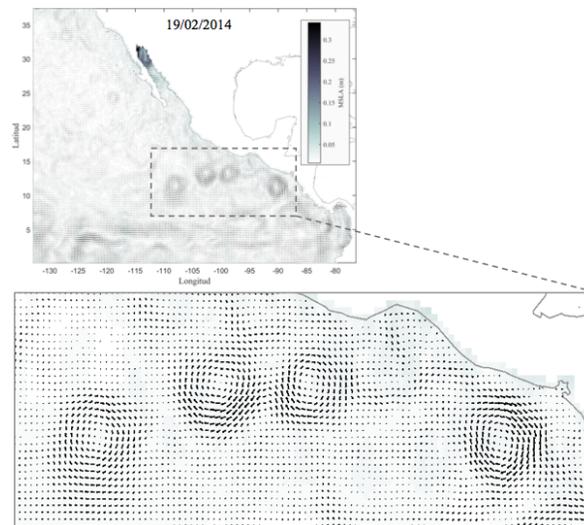


Figura 7 Acercamiento a los giros (19 de febrero 2014).

Con la finalidad de observar la secuencia de esta circulación para todo el año, se generó un video a partir de los mapas individuales obtenidos en la primera etapa

del proceso, como se ha descrito en el apartado anterior. Así, es posible visualizar la evolución del nivel del mar y de los vectores de velocidad a lo largo del año, observando cómo interactúan algunas estructuras oceanográficas, como las corrientes y los giros.

Para caracterizar las olas de gran escala mencionadas en la introducción, se generaron diagramas tipo Hovmöller para latitudes de 0 a 35° N en el área de estudio. La figura 8 muestra el diagrama Hovmöller correspondiente a 1° N, en la que es posible inferir la dirección amplitud y altura del oleaje de gran escala.

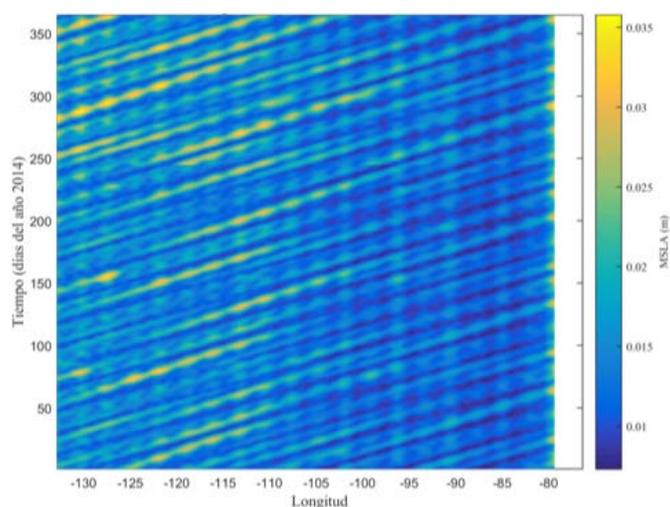


Figura 8 Diagrama Hovmöller de la anomalía del nivel del mar a 1°N.

4. Discusión

Los giros observados en este trabajo, que se generan en los golfos de Tehuantepec y Papagayo, han sido documentados previamente por López-Calderón et al. (2006) y Müller-Karger et al. (2000). Estos últimos autores mencionan que estos giros viajan sobre los 10° N a más de 1,000 km mar adentro, transportando material orgánico e inorgánico. También encuentran que el sentido de rotación de los giros es principalmente anticiclónico (en el sentido de las manecillas del reloj), lo cual concuerda con los resultados observados en este trabajo. Estos giros son el parte de un engranaje complejo de las corrientes marinas en la región.

La Corriente Ecuatorial Sur fluye superficialmente hacia el oeste a lo largo del Ecuador con una velocidad promedio de 0.5 ms⁻¹, alcanzando su mayor intensidad en invierno cuando los vientos alisios son más fuertes. Estos causan apilamiento de agua en el borde oeste de la cuenca del Pacífico, manteniendo un gradiente de oeste a este en el nivel del mar. Este desequilibrio es compensado por un flujo de retorno subtropical hacia el este, conocido como Corriente Ecuatorial Subsuperficial con velocidades de 0.5 a 1.5 ms⁻¹, siendo más fuerte entre febrero y junio (Montes, 2014). Esta corriente interactúa con la batimetría y las costas de América Central, provocando entre otras respuestas, cambios en la topografía dinámica.

Los abultamientos de agua representados con los datos de SLA, crean en la superficie del mar fuerzas horizontales en la dirección de la pendiente de abultamiento, lo que ocasiona un movimiento de los lugares más altos hacia los más bajos. El efecto de Coriolis a su vez, desvía el sentido del flujo (a la izquierda en el hemisferio sur y a la derecha en el hemisferio norte). El agua se mueve no solo a lo largo de la pendiente de la topografía dinámica, sino también alrededor de los abultamientos. Este es el tipo de circulación que se muestra en los mapas y vídeo generados en este trabajo y que constituyen el alcance del mismo. En un futuro se pretende estimar la variación interanual de estos parámetros, con la finalidad de hacer comparaciones entre épocas con diferentes fenómenos climáticos, por ejemplo, durante años en que ocurren fenómenos meteorológicos conocidos como el Niño y la Niña, así como posibles tendencias decadales. Las variaciones en magnitud, extensión y tipo de circulación de estas estructuras podrán utilizarse para tratar de explicar su relación con factores biológicos, como los florecimientos algales, productividad primaria o el impacto de estos fenómenos en el clima y las pesquerías regionales. Para realizar un análisis de este tipo, se requerirá la incorporación de un mayor número de variables, así como de otras técnicas de adquisición y procesamiento de datos.

Los procedimientos implementados en este son la base para el diseño de un sistema informático integral para el análisis de datos oceanográficos. Este se concibe como una herramienta de apoyo a los trabajos de investigación en

oceanología en el Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Para dar mayor difusión al uso de esta herramienta, sus funciones deberán ser implementadas en un sistema distribuido en línea (por ejemplo, en una aplicación cliente-servidor).

El tiempo de procesamiento para la generación de los mapas y el video, fue de aproximadamente 48 horas en una computadora con 16 GB de RAM y procesador Intel Core i5. Es necesario optimizar el tiempo de proceso con la implementación de otras técnicas, como programación en paralelo. Estas son oportunidades para el desarrollo computacional aplicado a las Ciencias de la Tierra y en particular al estudio de los océanos a partir de datos obtenidos con percepción remota.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Bowman K. (2006). *An Introduction to Programming with IDL: Interactive Data Language*. Elsevier Academic Press, ISBN 978-0-12-088559-6. 286 pp.
- [2] Cheng, X., S. P. Xie, J. P. McCreary, Y. Qi and Y. Du. (2013). Intraseasonal variability of sea surface height in the Bay of Bengal, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 8167-830, doi:10.1002/jgrc.20075.
- [3] CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales, Francia). (2016). *SSALTO/DUACS User Handbook: MSLA and (M) ADT Near-Real Time and Delayed Time*. Products Reference CLS-DOS-NT-06-034, Nomenclature SALP-MU-P-EA-21065-CLS, Issue 5rev 0, Date: 2016/08/20.
- [4] López-Calderón J., Manzo-Monroy H., Santamaría-del-Ángel E., Castro R., González-Silvera A., Millán-Núñez R. (2006). Variabilidad de mesoescala del Pacífico tropical mexicano mediante datos de los sensores TOPEX y SeaWiFS. *Cienc. Mar.* 32: 539-549.
- [5] Mertz Françoise, Rosmorduc Vinca, Maheu Caroline, Faugère Yannice. (2016). *Product User Manual, Copernicus Marine Environment Monitoring Service*. CMEMS version scope 2.0, Approval Date: April 13, 2016.
- [6] Montes, I. (2014). La circulación del Pacífico tropical este y su conexión con el Perú. *Boletín Técnico Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, abril, 1, 4, 4-7: <https://goo.gl/khrxyx>.

- [7] Müller-Karger F. E., Fuentes-Yaco C. (2000). Characteristics of wind-generated rings in the eastern tropical Pacific Ocean. *J Geophys. Res.* 105(C1): 1271-1284.
- [8] National Academic Press. (1993). *Statistics and Physical Oceanography*. Washington, DC. 62 p.
- [9] Paradis, M. (1981). De l'arpentage à la géomatique (From Surveying to Geomatics). *The Canadian Surveyor*, Ottawa, Canada, 35 (3), pp. 262-268.
- [10] Robinson, I. S. (2010). *Discovering the Oceans from Space: The unique applications of satellite oceanography*. Springer-Praxis Publishing, UK. 638 p.
- [11] Robinson, I. S. (2004). *Measuring the Oceans from Space: The principles and methods of satellite oceanography*. Springer-Praxis Publishing, UK. Pág. 669.
- [12] UCC (Universidad Católica de Chile). (s. f.). *Curso Geografía del Mar*: http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/.
- [13] Vignudelli S., Kostianoy A.G., Cipollini P. and Benveniste J. (Eds.). (2011). *Coastal Altimetry*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 578 p.