



Índice

1. Introducción.	3
2. Datos	4
3. Metodología.	5
a) Remove señal Estérica	5
b) Cálculo de la vorticidad (ω) y de la energía cinética (KE)	7
Vorticidad:	7
Energía cinética:	9
4. Ejemplo de uso	13
5. Acceso a datos y productos derivados	14
6. Referencias y agradecimientos	16

Lista de figuras

Figura 1: a) Serie de tiempo de la señal Estérica MADT-DT, y b) Región GoM donde se realiza el promedio espacial de ssh.	6
Figura 2: Campo de vorticidad para el día 10-Oct-2016 vs Altimetría de AVISO MADT NRT (en contornos). Los contornos sólidos (discontinuos) corresponden a valores positivos (negativos) de la señal de altimetría sin la componente estérica, el contorno sólido grueso corresponde a ssh=0.	8
Figura 3: energía cinética de velocidades geostróficas de AVISO MADT NRT. Sobresalen un remolino anticiclónico al oeste del Golfo y la corriente del Lazo extendiéndose desde el canal de Yucatán hasta el canal de Florida.	10
Figura 4: Vorticidad y Energía Cinética MADT AVISO.	12
Figura 5: Campos de vorticidad y energía cinética MADT NRT AVISO durante el crucero XIXIMI-4 26-Ago al 16 de septiembre de 2015. Se incluyen las posiciones de todas las estaciones.	13

1. Introducción.

La comunidad de oceanografía química, física y biológica requiere de herramientas para caracterizar las condiciones físicas durante los cruceros al Golfo de México. Esto debido a que los procesos biológicos y químicos en el océano se encuentran relacionados con las condiciones físicas. Por ejemplo, las estructuras de mesoescala, como los remolinos y frentes, son de las regiones con mayor actividad bioquímica, por lo tanto, la detección de estas estructuras es de gran importancia para la comunidad oceanográfica. El uso de mediciones satelitales de cobertura global nos provee de una de las mejores herramientas con ese fin, y la altimetría (ssh) es uno de los productos más utilizados.

El conocimiento de la topografía dinámica permite el estudio de circulación oceánica asociado a las corrientes geostróficas de superficie. La Topografía Dinámica Promedio (MDT, por sus siglas en inglés) se define como la altura promedio de la superficie marina relativa a un estado de reposo (o geoide). La altura relativa (anomalía del nivel del mar, SLA por sus siglas en inglés) es medida con gran precisión por los satélites, sin embargo la MDT es difícil de medir directamente. En el caso de AVISO, esta se obtiene mediante la utilización de diferentes mediciones satelitales e *in situ*. La versión más actualizada y precisa que se tiene al día de hoy es la MDT_CNES-CLS13, que consiste de una media de 20 años del nivel del mar por encima del geoide (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt.html>). El producto de Topografía Dinámica Absoluta de AVISO (ADT, por sus siglas en inglés) es la suma de las anomalías del nivel del mar (SLA) y la topografía dinámica promedio (MDT), y es la medida más precisa que provee AVISO del nivel del mar.

Con el lanzamiento de diferentes misiones se ha mejorado la precisión. Sin embargo la resolución espacial y temporal de los datos está limitada todavía a decenas de kilómetros y días. El producto SLA (y por ende ADT) de AVISO es el resultado de la interpolación objetiva de los datos de varios satélites a una malla global con una resolución de 0.25° para cada día.

El uso de altimetría para detectar estructuras se basa en el hecho de que los remolinos (anti) ciclónicos generan una señal (positiva) negativa en la topografía dinámica, y la detección de remolinos de mesoescala mediante este producto ha sido ampliamente

utilizada por la comunidad oceanográfica. Buena parte de los estudios utilizan las anomalías (SLA).

Sin embargo, en ocasiones el uso de anomalías para caracterizar este tipo de estructuras no permite detectar sin ambigüedades la presencia de remolinos en lugares donde el promedio está influenciado por estructuras de mesoescala persistentes, en este caso la corriente del Lazo y el giro ciclónico de Campeche. Por ejemplo, una corriente de Lazo menos intensa que el promedio aparecería como una anomalía positiva del nivel del mar, que se podría interpretar erróneamente como un remolino ciclónico. Mientras que un giro de Campeche menos intenso que lo normal aparecería como una anomalía negativa, lo cual se interpretaría erróneamente como un remolino anticiclónico. Es por ello que utilizaremos el producto ADT, que incluye las deformaciones del nivel del mar debidas al flujo medio.

Se propone el uso de dos cantidades adicionales con la finalidad de mejorar la detección de estructuras: **la vorticidad y la energía cinética**.

El objetivo de este protocolo es describir el procesamiento utilizado para derivar una serie de productos que utilizados en conjunto pueden brindar la posibilidad de mejorar la detección de estructuras; y mostrar el uso de estos. En la sección 2 se describen los datos utilizados, en la sección 3 la metodología y finalmente en la sección 4 se muestra un ejemplo de aplicación.

2. Datos

Los datos de altimetría que se utilizan son de topografía dinámica absoluta y velocidades geostróficas de AVISO Ssalto/DUACS en sus versiones Delayed-Time (DT-MADT-H-UV) y Near-Real-Time (NRT-MADT-H-UV). La cobertura espacial incluye al Golfo de México y parte del mar Caribe (ver Figura 1 panel inferior), y va de (-97.875, 16.125) a (-78.125, 31.625), la cobertura temporal de los datos DT va de 01-01-1993 a 05-05-2016 (datos diarios) y de los datos NRT de 06-05-2016 a la 26-06-2017. A partir de esa fecha los datos ya no están disponibles en AVISO y la distribución del producto

la hace CMEMS (<http://marine.copernicus.eu/sea-level-thematic-center-sl-tac/>). Siendo que es común referirse al nivel del mar como SSH por sus siglas en inglés, de ahora en adelante usaremos esa nomenclatura.

Los datos fueron bajados del servidor ftp <ftp.avisos.altimetry.fr>, utilizando un usuario y contraseña. Con la finalidad de permitir la verificación del procesado se incluyen en la base de datos los datos crudos.

3. Metodología.

a) Remover señal Estérica

Con la finalidad de obtener una señal de altimetría que solo refleje la dinámica de mesoescala, se propone la eliminación de la señal Estérica. La idea es quitar una señal relacionada con el calentamiento (o enfriamiento) de gran escala para el Golfo de México, que introduce una variación estacional al nivel del mar que no tiene ningún efecto dinámico.

La señal estérica para cada campo diario de SSH se calcula mediante un promediado espacial de en la región con profundidades mayores a 200m, $\langle \text{SSH} \rangle_{200\text{m}}$ (ver Figura 1 panel inferior). La máscara de profundidades que se utiliza para el cálculo del promedio espacial se generó interpolando los datos de la batimetría del Golfo de México a la malla de AVISO y eliminando los puntos donde la profundidad fuese menor a 200m. La elección de estas profundidades se hace con la finalidad de eliminar el efecto de las zonas someras, donde el calentamiento (o enfriamiento) de la superficie es mayor y también para eliminar datos espurios que se generan cerca de la costa por contaminación de la señal medida por los satélites en tierra,

Entonces se obtiene el campo de altimetría sin señal estérica restando el promedio espacial al campo diario de SSH, de la siguiente forma:

$$\text{SSH}_{i_ns} = \text{SSH}_i - \langle \text{SSH}_i \rangle_{>200\text{m}},$$

Donde el subíndice “i” se refiere al día en que se realizó el promediado espacial.

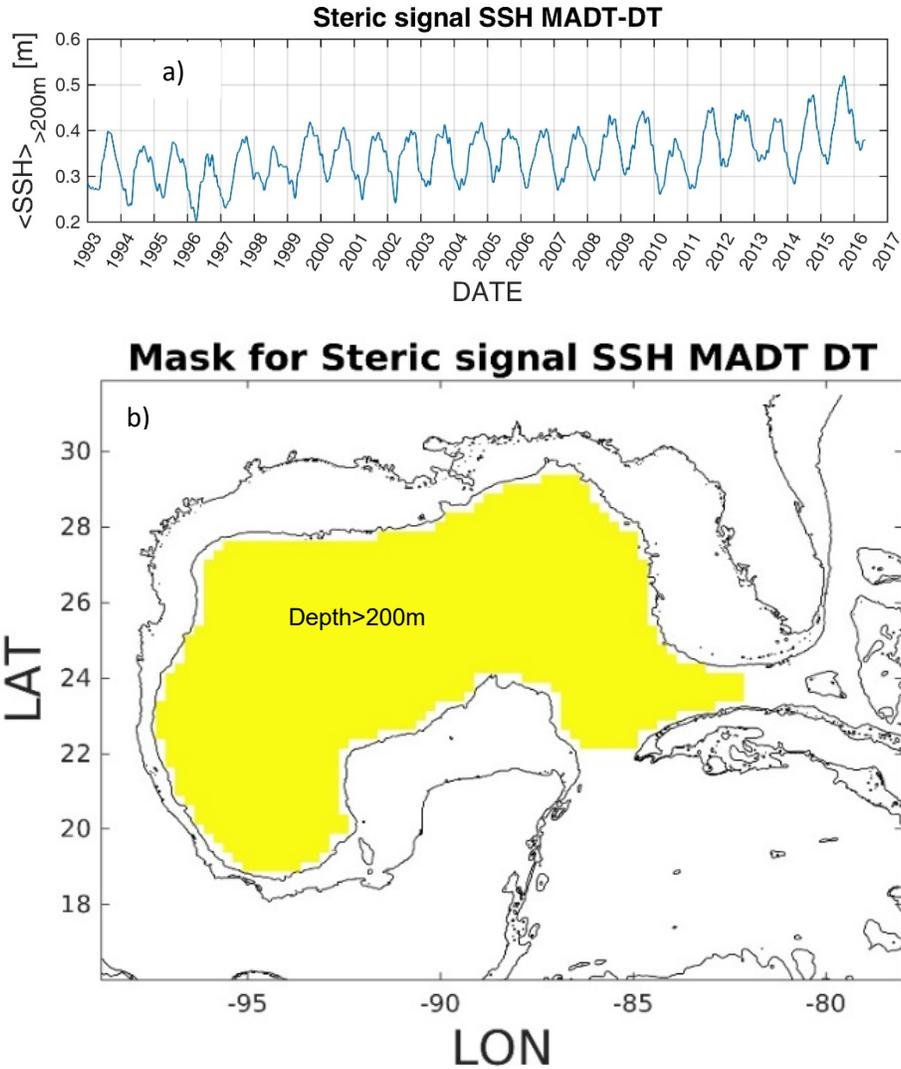


Figura 1: a) Serie de tiempo de la señal Estérica de SSH (m) a partir de datos de AVISO DT-MADT-H-UV y b) Región GoM donde se realiza el promedio espacial de SSH.

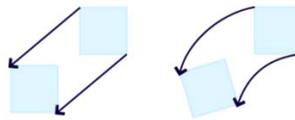
En el panel superior de la figura 1 se muestra la serie de tiempo de la evolución de la señal estérica para los datos (1993-2016), se observan valores que oscilan entre .26 y .53 m, también se muestra la zona donde se realiza el promediado espacial.

b) Cálculo de la vorticidad (ω) y de la energía cinética (KE)

Con la finalidad de complementar información respecto a la presencia de estructuras de mesoescala se propone la incorporación de dos cantidades: la vorticidad y la energía cinética.

Vorticidad:

La vorticidad (ω) es una cantidad física relacionada con la rotación que experimenta un objeto o en este caso un elemento de fluido.



Su expresión matemática es:

$$\omega = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{z}$$

Donde u y v son las componentes zonal y meridional de la velocidad.

La vorticidad en el océano nos sirve como un trazador que revela la presencia de remolinos: ciclónicos si es positiva y anticiclónicos cuando es negativa; o frentes, que son regiones donde las velocidades del flujo experimentan una cizalla horizontal importante, y por lo tanto son regiones de alta vorticidad.

La vorticidad se obtuvo usando la función `spherecurl` de `jLab`, disponible en: <http://www.jmlilly.net/jmlsoft.html>

En la Figura 2 se muestra el campo de vorticidad calculado a partir de las velocidades geostóficas del producto MADT NRT de AVISO. Se puede observar que la mayor parte de las estructuras anticiclónicas ($\omega < 0$) corresponden a valores positivos en SSH y la mayor parte de las estructuras ciclónicas ($\omega > 0$) coinciden con valores negativos de SSH. Sin embargo también se pueden observar valores

positivos de la vorticidad que coinciden con contornos positivos de SSH (y viceversa), como el caso de la vorticidad positiva al norte del remolino del Lazo centrado en $\sim (-92,24)$. Estos casos están asociados a deformaciones de los remolinos, a estructuras más pequeñas que los remolinos dominantes (región de vorticidad negativa en $\sim (-89, 27)$), regiones donde dos remolinos convergen, o al borde exterior de un remolino (caracterizado por un anillo de vorticidad contraria a la observada en su centro).

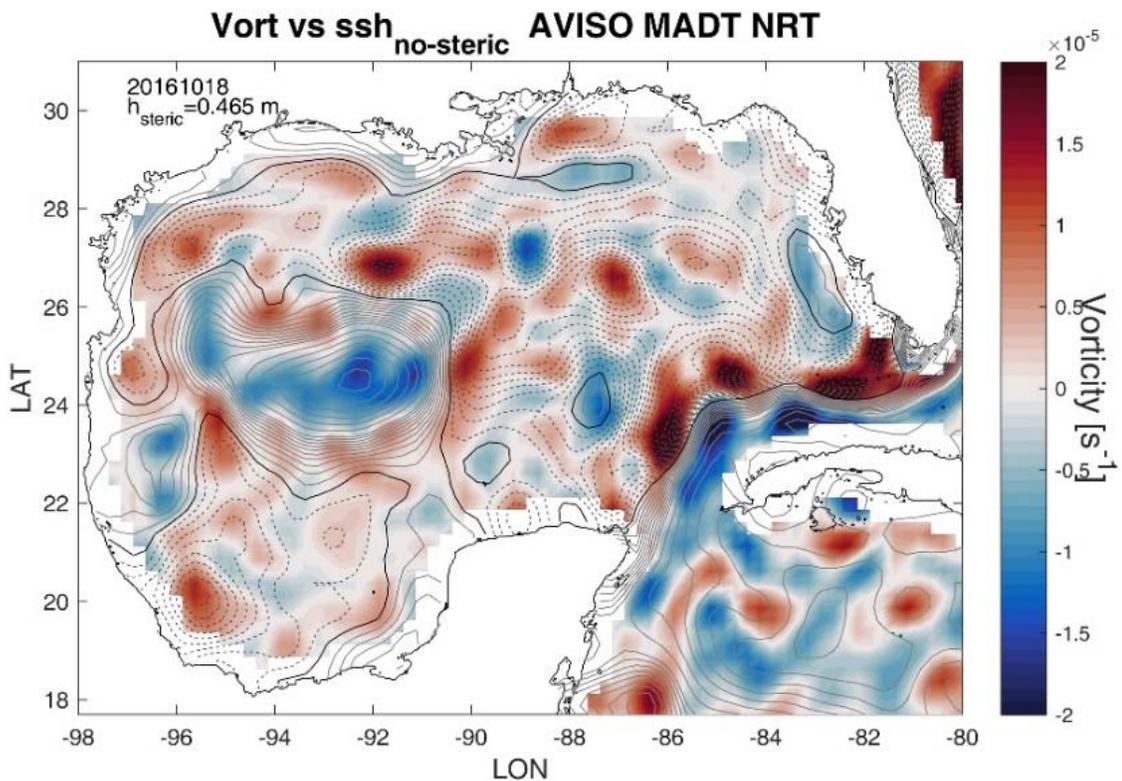


Figura 2: Campo de vorticidad para el día 10-Oct-2016 vs nivel del mar SSH (en contornos). Los contornos sólidos (discontinuos) corresponden a valores positivos (negativos) del nivel del mar sin la componente estérica, el contorno sólido grueso corresponde a $ssh=0$. Esto es para datos de AVISO NRT-MADT-H-UV.

Por último, también se observan regiones de vorticidad alta que no están asociadas a contornos cerrados del nivel del mar, como ocurre a un lado y otro de la corriente del Lazo (i.e. a un lado y otro del contorno SSH=0 que sale de la península de Yucatán y se conecta con la península de Florida). Esto indica regiones de frentes como el caso de la corriente del Lazo o los que se forman por la convergencia de estructuras de mesoescala. Estas regiones pueden tener mayor actividad de submesoescala que resulte en flujos verticales. Por lo tanto, la vorticidad da un poco más de información de las regiones que podrían ser de interés biológico o químico.

Lo anterior explica el por qué la vorticidad no necesariamente es una cantidad homogénea al interior de las estructuras de mesoescala grandes. De hecho, las animaciones de esta cantidad muestran que los remolinos del Lazo se caracterizan por una alta inhomogeneidad.

Energía cinética:

Las frentes y remolinos de mesoescala son de las estructuras más energéticas presentes en el océano. Una medida de la energía contenida en esas estructuras es la energía cinética obtenida a partir de las velocidades geostróficas, la definimos como:

$$KE = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$$

Es natural entonces utilizar esta cantidad para identificar regiones donde estas estructuras están presentes.

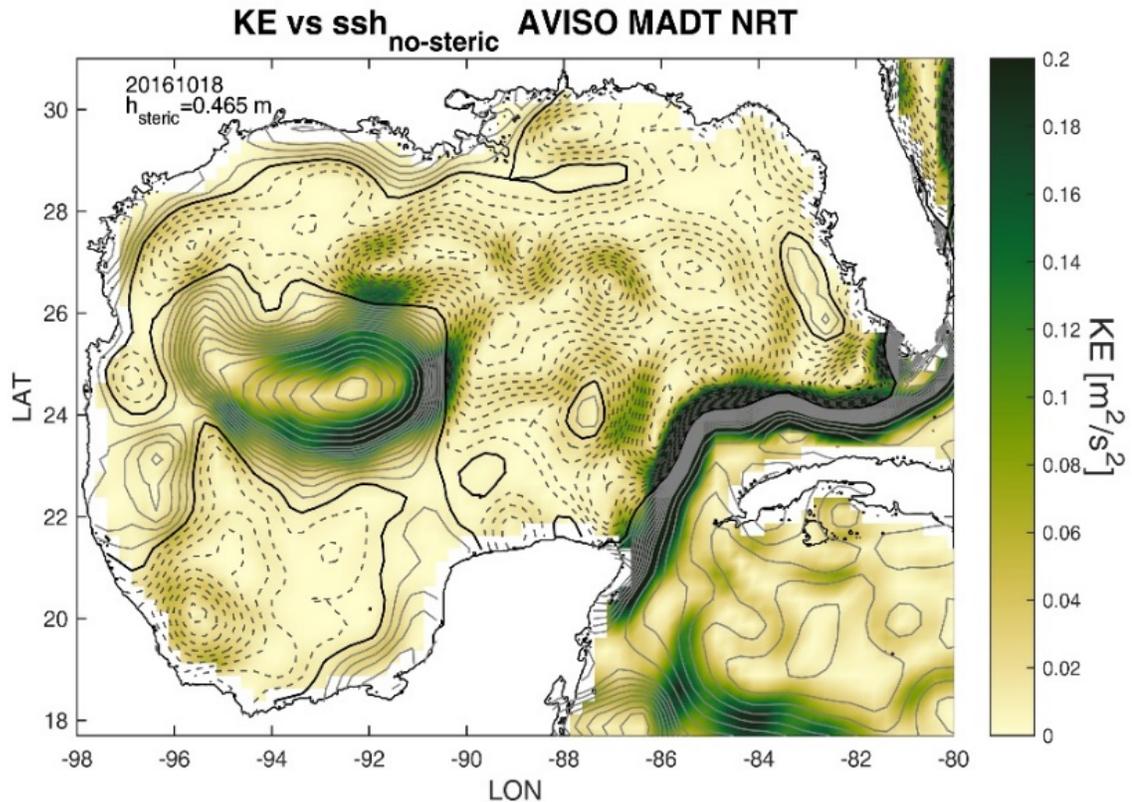


Figura 3: energía cinética de velocidades geostróficas de AVISO NRT-MADT-H-UV. Sobresalen un remolino anticiclónico al oeste del Golfo y la corriente del Lazo extendiéndose desde el canal de Yucatán hasta el canal de Florida.

La Figura 3 muestra la energía cinética (KE) del flujo geostrófico para el Golfo de México. Sobresalen dos estructuras muy energéticas, la corriente del Lazo entre los canales de Cuba y Florida, y un remolino anticiclónico al oeste del Golfo de México. Se pueden observar valores de energía cinética altos en buena parte de los remolinos presentes en el mapa, pero la señal está dominada por las grandes estructuras. También es posible detectar regiones de intensificación de la KE en los jets asociados a los frentes que se forman cuando dos remolinos interactúan. Los remolinos de mesoescala suelen presentar una señal asimétrica de KE con una intensificación en la región del remolino donde las velocidades coinciden con la velocidad de local de traslación. Adicionalmente, la deformación de los remolinos

debida a la interacción con topografía o con otros remolinos también resultará en inhomogeneidades en la señal de KE.

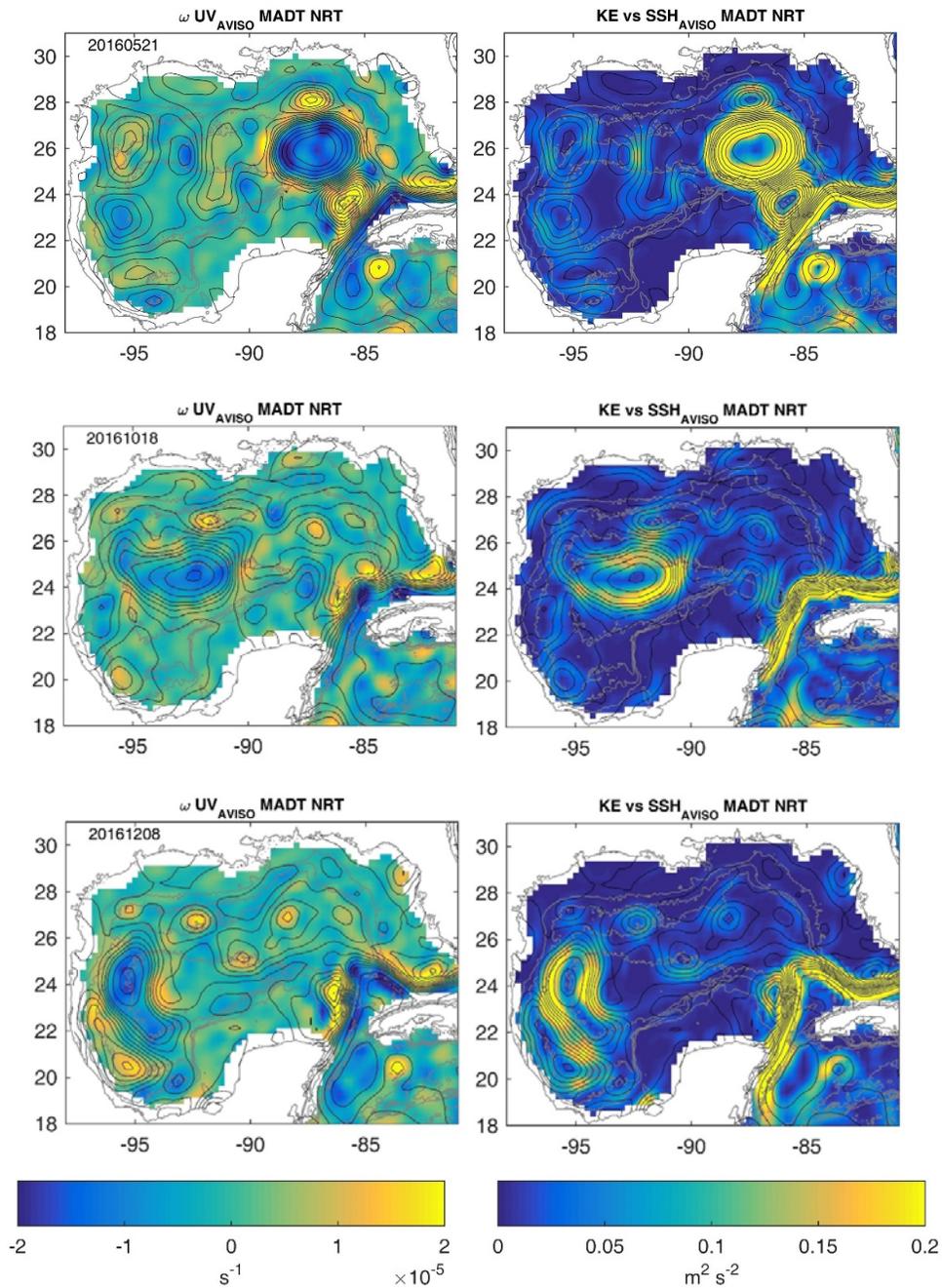


Figura 4: Vorticidad y Energía Cinética DT-MADT-H-UV de AVISO

En la Figura 4 se presentan mapas de vorticidad y energía cinética donde se muestran diferentes configuraciones tanto de la corriente del Lazo como de los remolinos al interior del Golfo de México. Se pueden ver distintos estados de la corriente del lazo: liberando, creciendo o bloqueando el Canal de Yucatán.

4. Ejemplo de uso

Como se mencionó anteriormente, la caracterización de las estructuras presentes en la región puede ayudar a la interpretación de los resultados. A continuación se muestra un ejemplo para el crucero de CICESE XIXIMI-4.

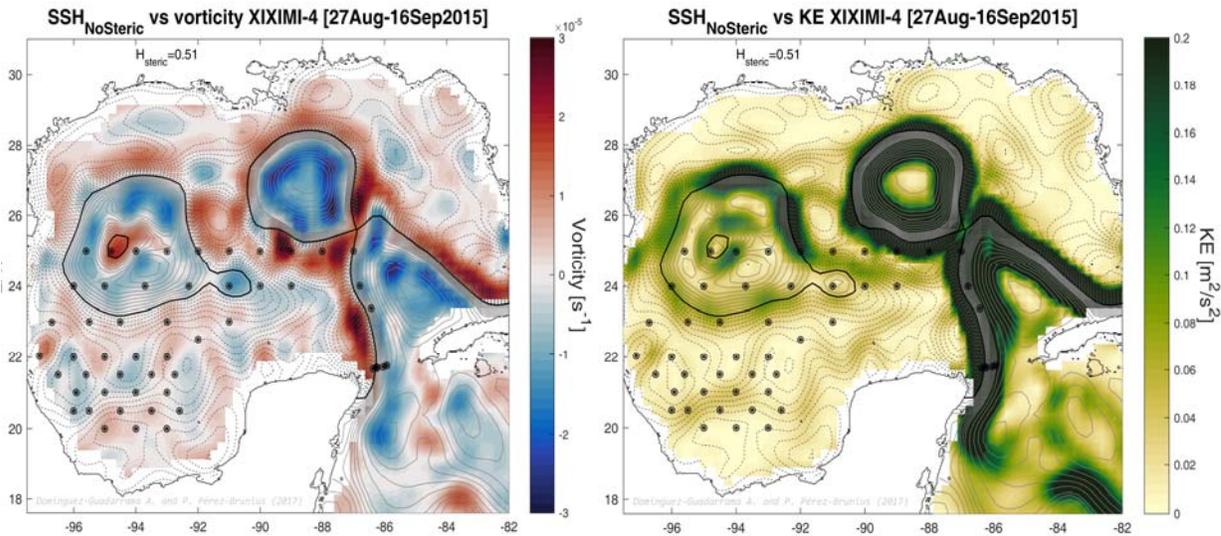


Figura 5: Campos de vorticidad y energía cinética NRT-MADT-H-UV AVISO durante el crucero XIXIMI-4 26-Ago al 16 de septiembre de 2015. Se incluyen las posiciones de todas las estaciones.

En la Figura 5 se muestran los campos promedio de altimetría, vorticidad y energía cinética derivados del producto DT-MADT-H-UV de AVISO durante el crucero XIXIMI-4. Se incluye la posición de todas las estaciones. De esos mapas se pueden detectar distintos eventos o características:

- 1) La configuración de la corriente del Lazo muestra que en ese momento se estaba liberando un gran remolino anticiclónico. Esto puede ser observado tanto en los contornos cerrados de nivel del mar positivo, como en la vorticidad negativa en su interior ($\omega < 0 \text{ s}^{-1}$) y la alta energía cinética en su borde ($KE > 0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$).

- 2) Alrededor del Lazo se puede observar una zona de vorticidad positiva que refleja la cizalla asociada al máximo de velocidad en la corriente y a remolinos ciclónicos frontales. Tanto en la corriente del Lazo como en los grandes remolinos presentes, se observa un cambio en el signo de la vorticidad en las zonas asociadas con niveles altos de energía cinética, es decir, en el núcleo de la corriente del Lazo y en los bordes de los remolinos.
- 3) Al oeste existe una serie de recirculaciones anticiclónicas formando una gran estructura que rodea a un pequeño remolino ciclónico que fue muestreado en una de las estaciones $\sim (-94,25)$.
- 4) Entre esa estructura y el remolino que está siendo liberado en el Lazo se puede observar un remolino ciclónico.

Estos mapas aportan información adicional que puede ayudar a interpretar de mejor forma las observaciones hidrográficas, químicas y biológicas obtenidas durante campañas oceanográficas.

5. Acceso a datos y productos derivados

Se cuenta con dos grupos de datos: los datos procesados a partir de la versión MADT Delayed Time (DT), y aquellos procesados a partir de MADT Near Real Time (NRT), y en la siguiente versión se incluirán los datos CMEMS. Estos datos se irán actualizando conforme se vayan publicando en los servidores públicos de CMEMS.

PRODUCTO	VARIABLES	Periodo disponible	Extracción				Mapas y gráficas
			STP	STR	Comp	Stat	
DT-MADT-H-UV	ssh, ssh_ns, u, v, vort, KE	1993-01-01 a 2016-05-06	STP	STR	Comp	Stat	Dy, Comp
NRT-MADT-H-UV	ssh, ssh_ns, u, v, vort, KE	2016-05-07 a 2017-06-26	STP	STR	Comp	Stat	Dy, Comp
CMEMS	ssh, ssh_ns, u, v, vort, KE	2017-06-27 a la fecha	STP	STR	Comp	Stat	Dy, Comp

Los servicios disponibles para todas las variables son:

Extracción:

- series de tiempo en puntos y periodos específicos (STP)
- series de tiempo de regiones (STR)
- cálculo de compuestos en regiones y periodos específicos (Comp)
- estadísticas básicas en puntos y regiones: promedio, desviación estándar, etc. (Stat)

Mapas:

- mapas diarios (Dy) para fechas específicas
- compuestos (Comp) periodos específicos

Por el momento los servicios sólo están disponibles mediante una solicitud vía correo electrónico a la dirección: adomingu@cigom.org y pperez@cigom.org. La solicitud deberá incluir un breve enunciado del uso que se dará a la información, así como el servicio requerido: extracción de datos o mapas, región y periodo de interés o puntos geográficos y fechas, y las variables requeridas.

Productos generados con estos datos deben 1) citar a:

Domínguez-Guadarrama A. and P. Pérez-Brunius (2017) "CIGoM altimetry derived products from AVISO Ssalto/DUACS" L4, V1.0, GridSeries, [dataset] CICESE., y 2)

Incluir en los agradecimientos el siguiente texto:

The altimeter products were produced by Ssalto/Duacs and distributed by Aviso, with support from Cnes (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

6. Referencias y agradecimientos

The altimeter products were produced by Ssalto/Duacs and distributed by Aviso, with support from Cnes (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>).

Hamilton, P., A. Bower, H. Furey, R.R. Leben, P. Pérez-Brunius. 2016. Deep Circulation in the Gulf of Mexico: A Lagrangian Study. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study BOEM 2016-081. 289 pp.



Este estudio es parte del proyecto 201441
"Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geo-
químicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles
contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos
en aguas profundas del Golfo de México"
financiado por el Fondo Sectorial
CONACYT-SENER-Hidrocarburos

Esta es una contribución del
Consortio de Investigación del Golfo de México



SENER
SECRETARÍA DE ENERGÍA

