



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

“Desarrollo de un software para la identificación de remolinos de mesoescala en el Golfo de México utilizando el parámetro de Okubo-Weiss”

Tesis presentada para obtener el título de:
Licenciatura en Ingeniería Geofísica

Presenta:
Alejandra Quintanilla Zurita

Asesor:
Mtro. José Luis González Guevara

Junio 2017



BUAP

Oficio N° D S.AC. 2173/17

ACEPTACIÓN TESIS

**C. ALEJANDRA QUINTANILLA ZURITA
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA DE
ESTA FACULTAD
P R E S E N T E**

En atención a la autorización del Tema de Tesis que puso Usted a consideración de esta Facultad, se turnó la misma al:

**M.C. JOSÉ CASTILLO ROMÁN
COORDINADOR DEL COLEGIO DE INGENIERÍA GEOFÍSICA**

Habiendo autorizado el tema denominado:

**“DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE
REMOLINOS DE MESOESCALA EN EL GOLFO DE MÉXICO UTILIZANDO EL
PARÁMETRO DE OKUBO-WEISS”**

Por lo anterior hacemos de su conocimiento que se asigna como Asesor Interno al **MTRO. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GUEVARA.**

Sin otro particular de momento, me es grato quedar de usted.

ATENTAMENTE

“PENSAR BIEN PARA VIVIR MEJOR”

H. PUEBLA DE Z., 30 DE MAYO DE 2016

**M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR**

c.c.p.- Expediente
c.c.p.- Interesado
FDLH/TAJT/lcm

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E**

El suscrito: **MTRO. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GUEVARA**, Asesor Interno del Tema de Tesis denominado:

“DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE REMOLINOS DE MESOESCALA EN EL GOLFO DE MÉXICO UTILIZANDO EL PARÁMETRO DE OKUBO-WEISS”

Presentado por la **C. ALEJANDRA QUINTANILLA ZURITA** matrícula **201113407**, Pasante de la Carrera de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. 2173/17, de fecha 30 de mayo del presente año, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente** el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente **autorizar la impresión** de la misma.

Lo que hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

A T E N T A M E N T E
H. PUEBLA DE Z., 31 DE MAYO DE 2017

MTRO. JOSÉ LUIS GONZÁLEZ GUEVARA
ASESOR



c.c.p.- Interesada
c.c.p.- Expediente
lcm

A Fernando Quintanilla y Sonia Zurita mis papás

A Santiago Quintanilla mi hermano

A toda mi familia, a mis amigos, a Javi y a pit

MILITIA EST VITA

Agradecimientos

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por permitirme realizar mis estudios de licenciatura.

A mis maestros por todo lo que me enseñaron a lo largo de estos años, pero en especial al maestro José Luis González Guevara por ser mi tutor y asesor de tesis y siempre ayudarme a solucionar los problemas que se presentaron en mi estancia universitaria.

Al Dr. Grijalva y al Dr. Arévalo por aceptar ser mis sinodales y asesorarme en esta tesis.

Al CICESE por permitirme realizar mis prácticas profesionales y el trabajo de investigación de esta tesis, al Dr. Enric Pallas que sin él no habría conocido a mi asesor externo el Dr. Miguel Tenreiro que me apoyo en esta idea y acepto supervisar este trabajo.

A Bere y Silverio que fueron más que solo mis compañeros de cubo en Ensenada. A Luz, Ivonne y Rodrigo por siempre estar conmigo en ese verano y nunca faltar a los miércoles de margaritas.

A mis amigos de generación Alan, Leo, Hector, Karla, Alberico, Magia, Alfonso por siempre estar, ayudarme en cada trabajo y por todos los días que compartimos juntos.

A Julia, Kari, Luis y Rodrigo por ser los mejores amigos que puedo pedir.

A mis padres, hermano, abuelos y primos por apoyarme y creer en mí siempre, ya que sin ellos nada de esto seria posible.

Agradecimientos	5
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas	9
Objetivo general.....	10
Objetivos particulares	10
Capítulo 1. Golfo de México y los remolinos anticiclónicos de mesoescala	11
1.1 El Golfo de México y la corriente de Lazo	11
1.2 Remolinos anticiclónicos de mesoescala	13
Capítulo 2. Propiedades superficiales de los remolinos anticiclónicos de mesoescala.....	15
2.1 Vorticidad	15
2.2 Corrientes geostroficas.....	16
2.3 Parámetro Okubo-Weiss	19
Capítulo 3. Metodología	20
3.1 Datos satelitales	20
3.2 Delimitación de remolinos por el parámetro de Okubo-Weiss	24
Capítulo 4. Resultados y discusión	27
4.1 Trayectoria y propiedades del remolino Hadal	27
4.2 Trayectoria y propiedades del remolino Icarus	32
4.3 Trayectoria y propiedades del remolino Jumbo	37
4.4 Trayectoria y propiedades del remolino Kraken.....	42
4.5 Comparación de resultados y discusiones.....	47
Conclusiones	51
Bibliografía	53
Anexo.....	55

Lista de figuras

Figura 1. Golfo de México (Fuente: https://global.britannica.com/place/Gulf-of-Mexico).	11
Figura 2. Representación esquemática de la circulación inducida por la Corriente de Lazo en Golfo de México. Se destaca la Corriente de Lazo (Loop Current) con una curva de colores naranja-amarillo que entra al Golfo por el Canal de Yucatán y sale por el Estrecho de Florida. Los remolinos anticiclónicos que por veces se desprenden de la Corriente de Lazo (también conocidos como Loop Current Eddies o warm core eddies) se destacan con círculos naranjas-amarillos representando aguas más calientes típicamente del Mar Caribe y flecha en sentido horario. También se destacan con círculos azules y flecha en sentido contrario al horario (cold core Eddies), a los remolinos formados localmente en el interior del Golfo de México fuera del sistema de la Corriente de Lazo que se caracterizan por atrapar aguas más frías típicamente del Golfo (Fuente: http://texaspelagics.com/gom-info/gom-loop/).....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. Mapa de altimetría del GoM. Se observa la CL en rojo y velocidades geostroficadas en flechas azules. La barra de colores representa la altimetría en centímetros.	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4. Mapa de SSH del GoM y velocidades geostroficadas en flechas azules. La barra de colores indica la altimetría del mar en centímetros.....	18
Figura 5. Liberación del remolino Kraken. A la izquierda se encuentra el remolino días antes de su liberación de la CL, a la derecha se ve el remolino recién separado de la CL.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 6. Mapa de altimetría con remolinos delimitados en el GoM para el día 30/8/13.....	25
Figura 7. Mapa de altimetría con zoom en el remolino seleccionado para el día 30/8/13. El contorno en negro delimita el remolino con el parámetro Okubo-Weiss, el asterisco amarillo señala el punto con mayor altura.	25
Figura 8. Mapa de contornos de Okubo-Weiss con zoom en el remolino seleccionado para el día 30/8/13. El contorno en negro delimita el remolino con el parámetro Okubo-Weiss.....	26
Figura 9. Desplazamiento del remolino Hadal por el GoM.....	27
Figura 10. Energía cinética promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud de la energía cinética y en el eje horizontal las semanas.....	28
Figura 11. Vorticidad promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.....	29
Figura 12. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.....	30
Figura 13. Radio promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal se muestra las semanas.	31
Figura 14. Desplazamiento del remolino Icarus por el GoM.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 15. Energía cinética promedio del remolino Icarus. En el eje vertical las unidades son Jm^3 y en el horizontal son las semanas.....	¡Error! Marcador no definido.

Figura 16. Vorticidad promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.	34
Figura 17. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.	35
Figura 18. Radio promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal las semanas.	36
Figura 19. Desplazamiento del remolino Icarus por el GoM.	37
Figura 20. Energía cinética promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical las unidades son Jm³ y en el horizontal son las semanas.	38
Figura 21. Vorticidad promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.	39
Figura 22. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.	40
Figura 23. Radio promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal se muestra el tiempo de vida.	41
Figura 24. Desplazamiento del remolino Kraken por el GoM.	42
Figura 25. Energía cinética promedio del remolino Kraken. En el eje vertical las unidades son Jm³ y en el horizontal son las semanas.	43
Figura 26. Vorticidad promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.	44
Figura 27. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.	45
Figura 28. Radio promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal las semanas.	46
Figura 29. Mapa de desplazamiento de los remolinos en el GoM. En azul tenemos al remolino Hadal, en verde a Icarus, en rojo a Jumbo y en aqua a Kraken. El rectángulo rojo muestra la zona donde se registraron los máximos y en azul los mínimos.	49

Lista de tablas

Tabla 1. Cronograma de la vida de los remolinos anticiclónicos 2010-2016 dentro de la base de datos. En negritas se presentan los remolinos que se siguieron para su estudio.....	23
Tabla 2. Cronograma de la vida de los remolinos anticiclónicos estudiados en este trabajo 2011-2014...	23
Tabla 3. Máximos y mínimos de las propiedades superficiales medidas de los remolinos Hadal, Icarus, Jumbo y Kraken.....	49

Objetivo general

Desarrollar un software utilizando el parámetro de Okubo-Weiss para detectar y seguir los remolinos anticiclónicos de mesoescala del Golfo de México que se desprenden de la Corriente de Lazo y viajan hacia el Oeste, para así poder conocer sus características y propiedades superficiales.

Objetivos particulares

Utilizar datos satelitales para la validación del software creado.

Analizar las propiedades superficiales de los remolinos anticiclónicos de mesoescala del Golfo de México, como son su trayectoria, energía cinética y su vorticidad.

Estudiar diferentes remolinos para así compararlos y conocer las propiedades y características de los remolinos anticiclónicos de mesoescala del Golfo de México.

Capítulo 1. Golfo de México y los remolinos anticiclónicos de mesoescala

1.1 El Golfo de México y la corriente de Lazo

El Golfo de México (GoM) es una amplia cuenca oceánica contenida entre los litorales de México, Estados Unidos, y Cuba; está situado en la zona subtropical entre las latitudes de 18° y 30 °N y las longitudes de 82° y 98 °W y se comunica con el Mar Caribe y el Océano Atlántico por el Canal de Yucatán y por el Estrecho de Florida, respectivamente (Fig. 1).

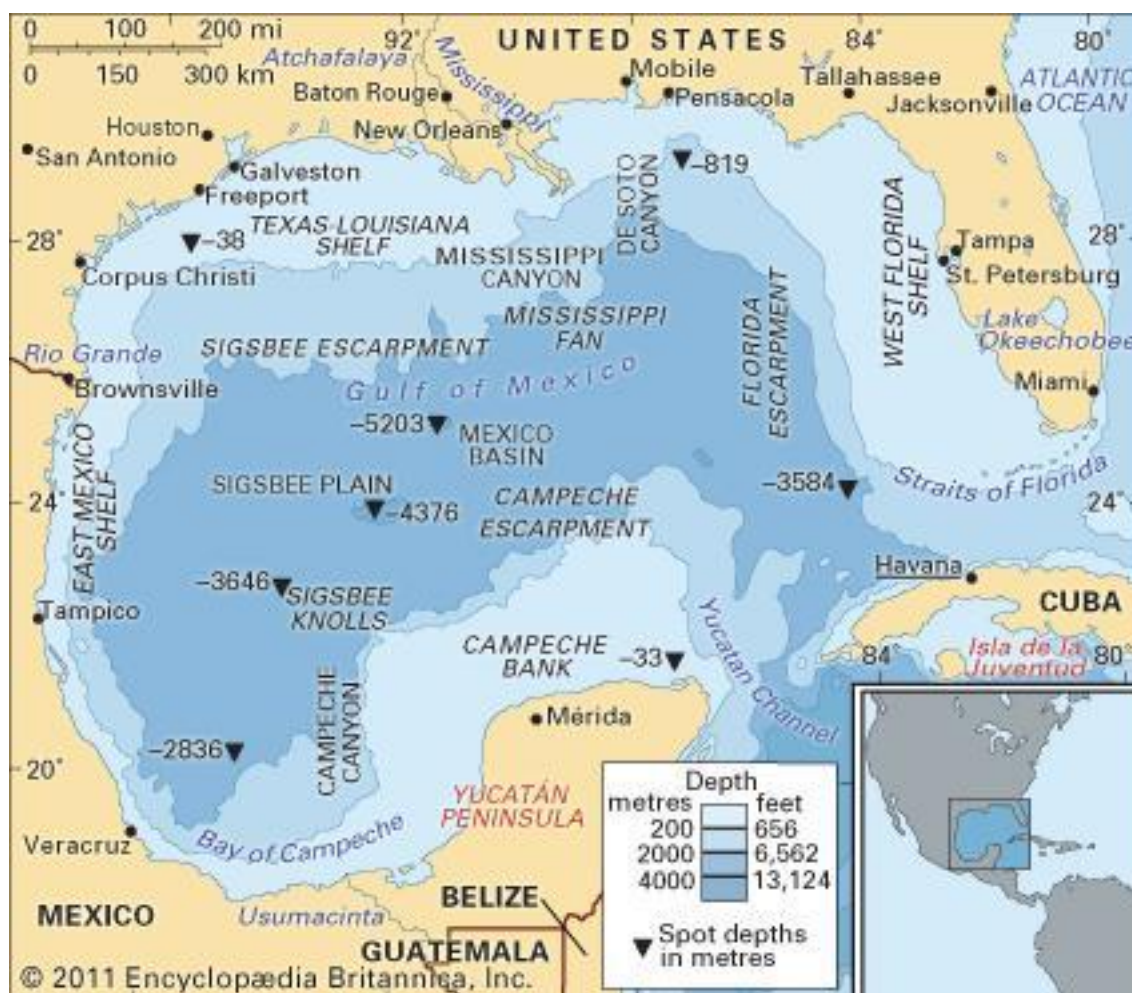


Figura 1. Golfo de México (Fuente: <https://global.britannica.com/place/Gulf-of-Mexico>).

La circulación en el GoM está altamente influenciada por la Corriente de Lazo (CL), que entra al Golfo por el Canal de Yucatán y sale por el Estrecho de Florida, para formar la Corriente del Golfo que se extiende hacia el Océano Atlántico (Leben, 2005).

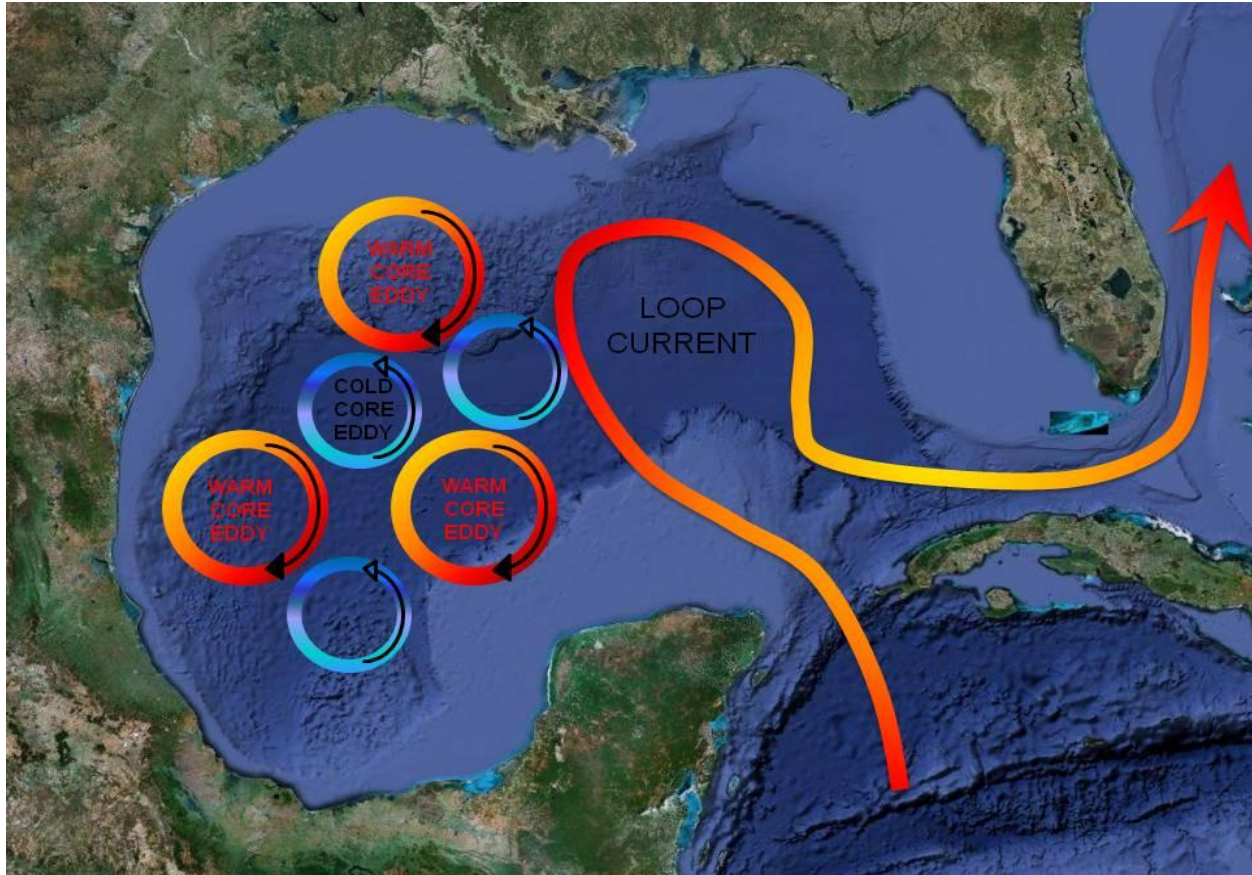


Figura 2. Representación esquemática de la circulación inducida por la Corriente de Lazo en Golfo de México. Se destaca la Corriente de Lazo (Loop Current) con una curva de colores naranja-amarillo que entra al Golfo por el Canal de Yucatán y sale por el Estrecho de Florida. Los remolinos anticiclónicos que por veces se desprenden de la Corriente de Lazo (también conocidos como Loop Current Eddies o warm core eddies) se destacan con círculos naranjas-amarillos representando aguas más calientes típicamente del Mar Caribe y flecha en sentido horario. También se destacan con círculos azules y flecha en sentido contrario al horario (cold core Eddies), a los remolinos formados localmente en el interior del Golfo de México fuera del sistema de la Corriente de Lazo que se caracterizan por atrapar aguas más frías típicamente del Golfo (Fuente: <http://texaspelagics.com/gom-info/gom-loop/>).

La CL es el motor de la circulación oceánica del Este del GoM, transporta entre 23 y 27 Sv ($1 \text{ Sv} = 100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$) a través del canal, (Badan, 2005) tiene normalmente una extensión

horizontal de 200-300 km, llega hasta los 800 metros de profundidad y tiene una velocidad promedio de 0.8 ms^{-1} siendo una de las corrientes más intensas del sistema del Océano Atlántico (Collow, 2010)

1.2 Remolinos anticiclónicos de mesoescala

Periódicamente se generan perturbaciones en el Norte de la CL y por procesos que aún no son completamente conocidos, se desprenden remolinos que se mueven al suroeste por la porción plana de la cuenca (Kirwan, *et al.*, 1984) con una velocidad de 3-5 km/día (Collow, 2010). La frecuencia de desprendimiento y generación de los remolinos es variable con periodos entre uno a tres remolinos cada año (Elliot, 1982).

Se cree que los remolinos se separan de la CL por tres factores (Leben, 2005):

- Efecto Beta: es la tendencia natural de los remolinos de moverse al oeste en el hemisferio norte debido al cambio del parámetro de Coriolis con la latitud.
- Remolinos superficiales: los remolinos anticiclónicos llegan al GoM por el Canal de Yucatán que pueden afectar el comportamiento de la CL.
- Remolinos profundos: durante la separación de un remolino superficial, otro remolino se forma debajo del original el cual rota en sentido contrario, promoviendo el desprendimiento.

Los remolinos de la CL son estructuras de mesoescala (giran en el sentido de las manecillas del reloj y su dimensión en superficie del orden de cientos de kilómetros), se caracterizan por corrientes intensas que pueden ser superiores a 1m/s durante su desplazamiento al Oeste. La frecuencia de generación (al menos uno al año), su gran tamaño comparado al GoM y su largo tiempo de vida sugiere la interacción remolino- remolino (Smith, 1986).

En el Hemisferio Norte, los remolinos ciclónicos (RCs) están asociados a anomalías negativas del nivel del mar mientras que los remolinos anticiclónicos (RAs) a anomalías positivas. (Sosa, 2014) (Fig. 2).

En la figura 3 observamos una imagen de la altimetría del GoM del 22 de Enero de 2013, la altimetría es la topografía de la superficie del océano medida por satélite donde las zonas altas (tonos claros-rojos) son los RAs y la CL por la expansión termal del agua caliente que provoca que tenga mayor elevación (Collow, 2010) al contrario de los RCs que al tener un núcleo más frío que el agua que lo rodea hará que su elevación sea menor a la promedio.

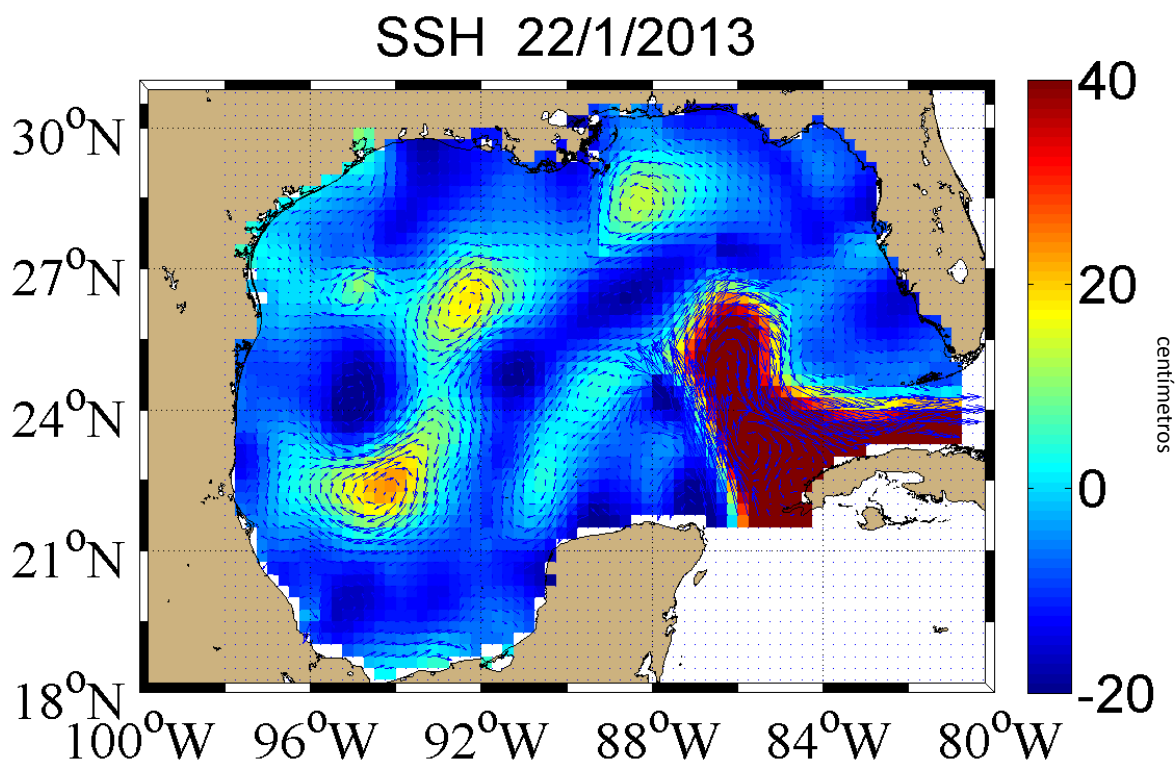


Figura 3. Mapa de altimetría del GoM. Se observa la CL en rojo y velocidades geostroficadas en flechas azules. La barra de colores representa la altimetría en centímetros.

Capítulo 2. Propiedades superficiales de los remolinos anticiclónicos de mesoescala

2.1 Vorticidad

En términos simples la vorticidad es una medida de la rotación local del fluido. Como para caracterizar el océano trabajamos en un sistema de coordenadas que gira es necesario definir la vorticidad relativa y la vorticidad planetaria, cuya suma es la vorticidad absoluta (Stewart, 2008).

En general para estudiar los movimientos oceánicos consideraremos únicamente la componente vertical (local) de la vorticidad. La componente vertical de la vorticidad planetaria es el parámetro de Coriolis f , y es igual a dos veces la razón de rotación local de la Tierra

$$f = 2\Omega \sin\theta \quad (1)$$

donde Ω es la velocidad angular de la Tierra ($7.2 \text{ e-}5 \text{ rad/s}$) y θ es la latitud del punto. Para efectos prácticos se manejara una latitud promedio ($\theta = 24^\circ$) con lo que tendremos que el parámetro de Coriolis siempre será constante en este trabajo.

La componente vertical de la vorticidad relativa es

$$\zeta = \frac{\partial v_g}{\partial x} - \frac{\partial u_g}{\partial y} \quad (2)$$

donde v_g y u_g son las velocidades geostróficas que se definirán posteriormente.

2.2 Corrientes geostróficas

El número de Rossby (Ro) es un numero adimensional bastante utilizado en la descripción de los fluidos geofísicos. El Ro compara los términos advectivos (cambio en la velocidad debido al movimiento del fluido) con los efectos de la rotación del sistema (Coriolis) y se puede escribir como

$$Ro = \frac{U}{fL} \quad (3)$$

donde U es una escala de la velocidad, f el parámetro de Coriolis y L una escala espacial. Este número es fundamental en la descripción de las escalas que dominan los flujos geofísicos. Se definen flujos de larga escala a los flujos que son influenciados por la rotación de la tierra ($Ro \leq 1$ para $L \gg 1$). Se puede igualmente definir un número de Ro temporal (Rot) el cual compara las escalas temporales del flujo con los efectos de la rotación,

$$Ro_t = \frac{1}{fT} \approx \frac{T_E}{T} \quad (4)$$

donde $T = \frac{L}{U}$ la escala temporal advectiva del flujo y T_E la escala temporal de la rotación de la tierra. En flujos geofísicos típicamente $T_E \gg T$ lo que origina $Rot \gg 1$. Por lo tanto, en ausencia de fricción la ecuación que gobierna el movimiento del agua es

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

donde ρ es la densidad, t es el tiempo y p es la presión, lo cual implica que el agua se moverá de mayor a menor presión.

Para flujos con escalas espaciales que exceden las decenas de kilómetros, y escalas de tiempo mayores a algunos días, se puede considerar que los gradientes de presión horizontal están en un balance casi completo con la fuerza de Coriolis. A este balance se denomina “balance geostrófico”, y las corrientes resultantes “corrientes geostróficas” (Stewart, 2008).

Así, el balance geostrófico se obtiene considerando

$$Ro_T \ll 1, Ro \ll 1 \quad (6)$$

o sea que se pueden despreciar las aceleraciones locales, advectivas y la fricción.

Así, las ecuaciones del movimiento horizontal son:

$$\begin{aligned} -fv &= \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \\ +fu &= \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

De acuerdo a las ecuaciones anteriores, las velocidades horizontales están dadas por el balance entre la fuerza gradiente de presión horizontal y la fuerza de Coriolis (Stewart, 2008). Este balance se denomina equilibrio geostrófico y da lugar a las corrientes geostróficas que se pueden escribir como

$$\begin{aligned} v &= \frac{+1}{\rho_0 f} \frac{\partial p}{\partial x} \\ u &= \frac{-1}{\rho_0 f} \frac{\partial p}{\partial y} \end{aligned} \quad (8)$$

El sistema de ecuaciones 8 indica que las corrientes geostróficas son perpendiculares al gradiente de presión. Por lo tanto, las parcelas de un fluido en rotación no se

mueven de la alta presión a la baja presión sino que circulan alrededor de los centros de presión moviéndose a lo largo de las isóbaras.

La dirección de la rotación cambia de signo según el hemisferio considerado ($f=0$ en el ecuador). En el hemisferio Norte (Sur) el flujo es tal que las altas presiones están a la derecha (izquierda) del flujo (Stewart, 2008).

En superficie las velocidades geostrófica resultan de las variaciones en la altura de la superficie del mar (η).

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$$v_g = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (9)$$

donde g es la gravedad y η es la altimetría.

Por lo tanto, de acuerdo a estas ecuaciones las corrientes geostróficas en superficie son proporcionales a la pendiente de la superficie del mar, la cual puede medirse con altímetros desde satélites (Stewart, 2008).

2.3 Parámetro Okubo-Weiss

La identificación de los remolinos se realizó usando el parámetro de Okubo-Weiss (W) que consiste en comparar la evolución en tiempo de la trayectoria de partículas y los gradientes de vorticidad. El comportamiento del flujo se determina por el signo del parámetro que se puede escribir como

$$W = S_n^2 + S_s^2 - \zeta^2 \quad (10)$$

Donde S_n , S_s y ζ son los componentes normales y de cizallamiento de la deformación y la vorticidad relativa vertical del flujo (2)

$$S_n = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, \quad S_s = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (11)$$

Este parámetro nos permite separar el flujo en diferentes regiones:

- Una región con vorticidad dominante ($W < -W_o$)
- Una región de tensión dominante ($W > W_o$)
- Un fondo, caracterizado por pequeños valores positivos y negativos de W

($|W| \leq W_o$)

Donde $W_o = 0.2\sigma_W$ con σ_W siendo la desviación estándar en el dominio.

$W(x, y, t)$ permite distinguir regiones del flujo, la primera dominada por la rotación ($W < 0$) que se le puede llamar núcleo del remolino donde las partículas que se encuentran dentro de esta región no saldrán hasta que el remolino se destruya o divida y la región dominada por la deformación ($W > 0$) donde las partículas pueden viajar al fondo y regresar al remolino.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Datos satelitales

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la circulación en el GoM es altamente dominada por la dinámica de la CL y por los remolinos que de ella se desprenden. Los datos de la altura de la superficie del mar obtenidos por sensores remotos (satélites) nos permiten rastrear la separación de estas estructuras y seguirlas a lo largo de sus trayectorias al oeste del GoM. Como se ha mencionado anteriormente, anomalías positivas (negativas) en la superficie se relacionan con estructuras anticiclónicas (ciclónicas).

La elevación de la superficie del mar (SSH por sus siglas en inglés) se determina usando diferentes sensores montados en un satélite como un radar escatómetro o balizas de desplazamiento doppler (DORIS).

Se necesitan hacer varias correcciones a los datos crudos. Entre estas se encuentran:

- efectos atmosféricos
- efectos del estado del mar
- efectos de los instrumentos
- ajustes geofísicos como la corrección por el geoide

Los datos utilizados en el presente trabajo tienen una resolución de $1/4^\circ$ y han sido previamente tratados y corregidos por la Universidad de Colorado, entidad responsable por su difusión.

En este trabajo se decidió usar la base de datos libre de la Universidad de Colorado donde se pueden descargar los datos de SSH del GoM de tiempo real. El periodo considerado para el estudio fue del 2010 a Junio de 2016 con una resolución temporal de 7 días.

A partir de estos datos se hicieron mapas de altimetría y se obtuvieron las velocidades geostróficas (u_g, v_g) como se muestra en la figura 4.

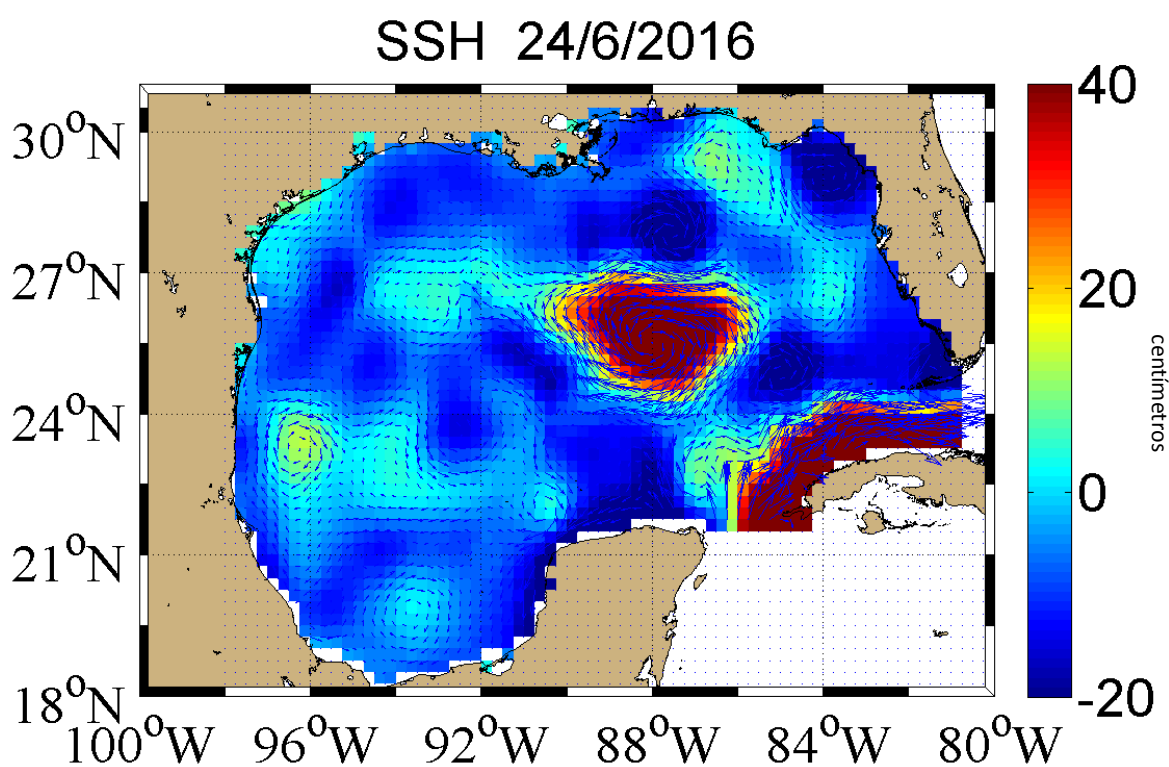


Figura 4. Mapa de SSH del GoM y velocidades geostróficas en flechas azules. La barra de colores indica la altimetría del mar en centímetros.

Después de descargados los datos, se investigó cuantos remolinos se desprendieron durante el periodo considerado usando la plataforma de Horizon Marine como referencia. Esta plataforma se dedica al monitoreo de los remolinos que se desprenden de la CL y son responsables por su nombramiento (<http://www.horizonmarine.com/loop-current-eddies.html>). En la tabla 1 se muestra el cronograma con las fechas del desprendimiento y disipación de las

estructuras monitoreadas para el periodo de Mayo de 2010 a Junio de 2015 calificando el tamaño de cada evento como pequeño, mediano, grande o gigante.

Con el objetivo de validar la herramienta desarrollada para la identificación de remolinos de mesoescala en el GoM, se decidió hacer su aplicación al periodo comprendido entre Agosto de 2011 y Octubre de 2014 (tabla 2).

Tabla 1. Cronograma de la vida de los remolinos anticiclónicos 2010-2016 dentro de la base de datos. En negritas se presentan los remolinos que se siguieron para su estudio.

Remolino	Desprendimiento	Muerte	Tamaño
Franklin	Mayo 2010	Octubre 2011	Grande
Galileo	Junio 2011	Enero 2012	Pequeño
Hadal	Agosto 2011	Marzo 2012	Gigante
Icarus	Noviembre 2011	Marzo 2013	Grande
Jumbo	Junio 2012	Febreo 2013	Gigante
Kraken	Abril 2013	Octubre 2014	Mediano
Lazarus	Julio 2014	Mayo 2015	Pequeño
Michael	Enero 2015	Julio 2015	Grande
Nautilus	Mayo 2015		Gigante
Nautilus II	Mayo 2015	Diciembre 2015	Grande
Olympus	Junio 2015		Gigante

Tabla 2. Cronograma de la vida de los remolinos anticiclónicos estudiados en este trabajo 2011-2014.

Remolino	2011					2012												2013												2014									
	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hadal																																							
Icarus																																							
Jumbo																																							
Kraken																																							

Es importante mencionar que solo se utilizaron datos de altimetría y no de temperatura, ya que al ser mediciones superficiales la temperatura del GoM se ve influenciada por las estaciones del año y los remolinos se llegan a enmascarar, por lo que se perdería su rastro.

Al tener la base de datos completa el siguiente paso era delimitar exactamente el día en el que el remolino se liberaba, como se muestra en la figura 5.

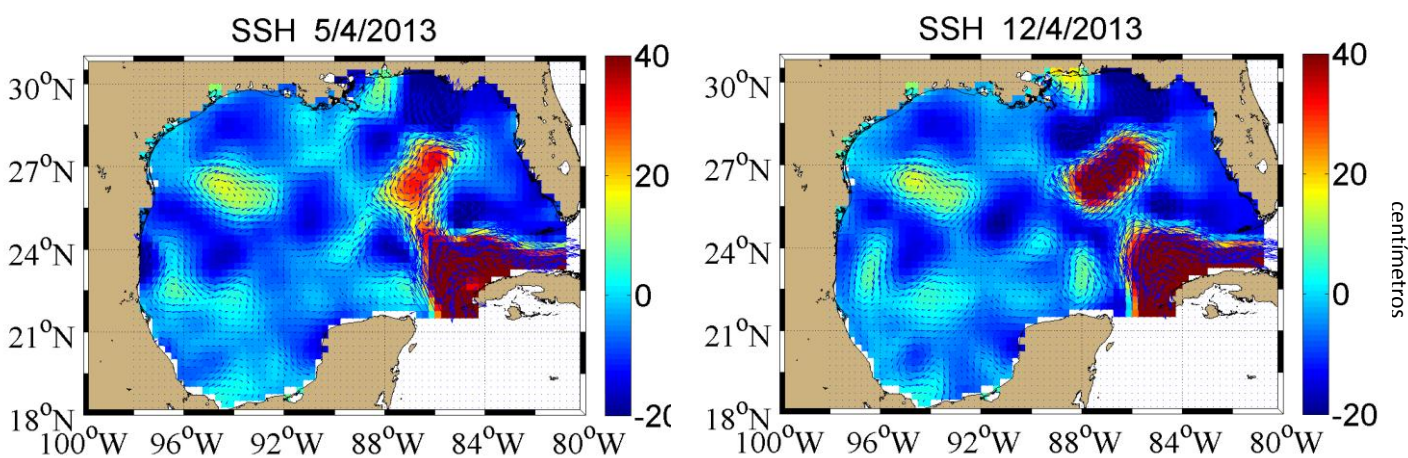


Figura 5. Liberación del remolino Kraken. A la izquierda se encuentra el remolino días antes de su liberación de la CL, a la derecha se ve el remolino recién separado de la CL.

3.2 Delimitación de remolinos por el parámetro de Okubo-Weiss

Como se mencionó en el capítulo 2 el parámetro de Okubo-Weiss es una herramienta eficaz para la delimitación de remolinos en el océano, basándose en las velocidades geostroficas y la vorticidad de estos cuerpos.

Basándonos en esta metodología se creó una herramienta en MATLAB con la cual es posible identificar los remolinos y calcular:

- velocidades geostroficas superficiales
- vorticidad
- energía cinética
- área
- perímetro
- altura promedio del remolino
- altura máxima
- desplazamiento

Lo primero que hace la herramienta es llamar los datos de altimetría de un día seleccionado y de ahí obtener las alturas para así calcular las velocidades geostroficas con la ecuación 9 y al mismo tiempo calcular el parámetro de Okubo-Weiss, como en la ecuación 10, para todo el GoM, proyectando un mapa con los remolinos delimitados.

En la figura 6 se aprecia el mapa de altimetría con los cuerpos de los remolinos delimitados con líneas rojas cerradas, el parámetro de Okubo-Weiss que se selecciono fue de $W = -2e^{-8}$ para que los contornos se cerraran y no se unieran diferentes cuerpos, esto debido a la desviación estándar que se comentó anteriormente.

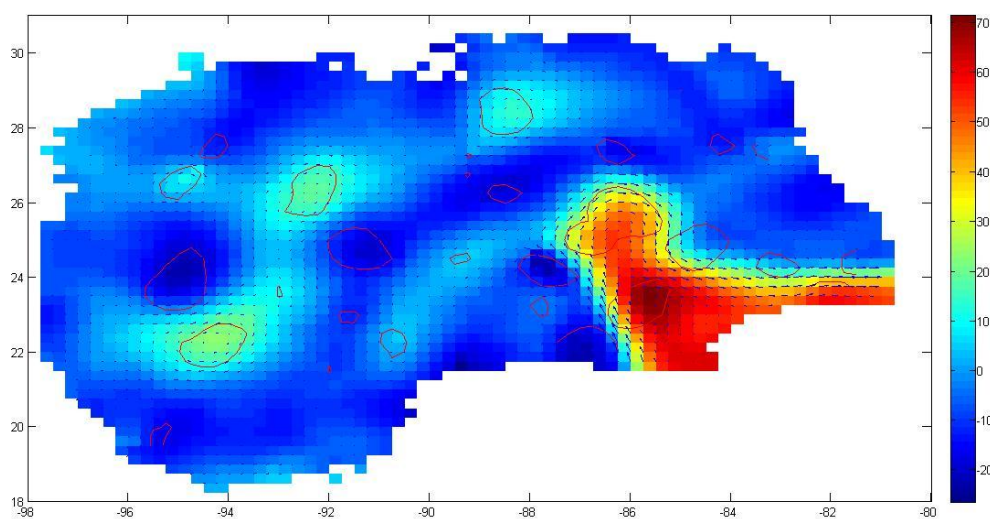


Figura 6. Mapa de altimetría con remolinos delimitados en el GoM para el día 30/8/13.

Como se puede notar en la figura 6, los remolinos se seleccionan a mano con ayuda del cursor que aparece como el centro de una cruz que divide el mapa en cuatro secciones. Se debe seleccionar el centro del remolino para que a continuación aparezca un nuevo mapa, esta vez se hará zoom en el remolino deseado.

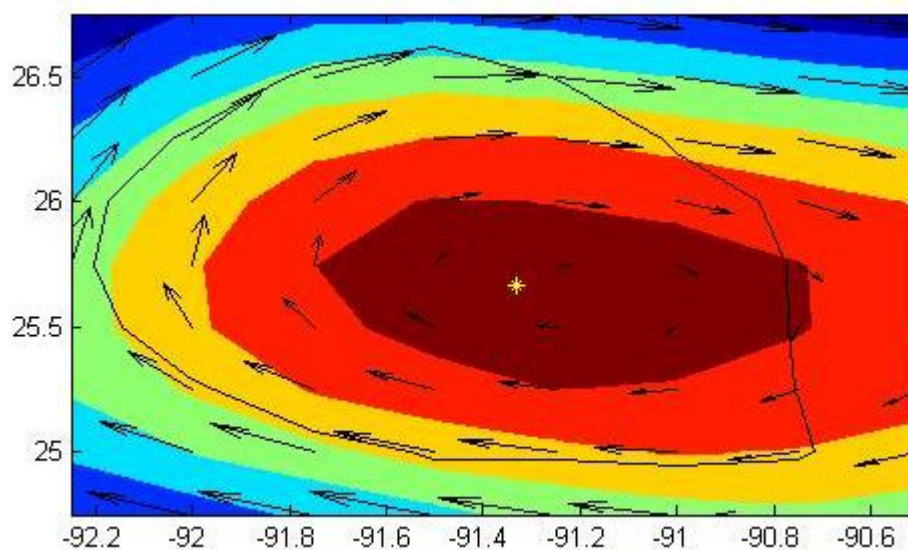


Figura 7. Mapa de altimetría con zoom en el remolino seleccionado para el día 30/8/13. El contorno en negro delimita el remolino con el parámetro Okubo-Weiss, el asterisco amarillo señala el punto con mayor altura.

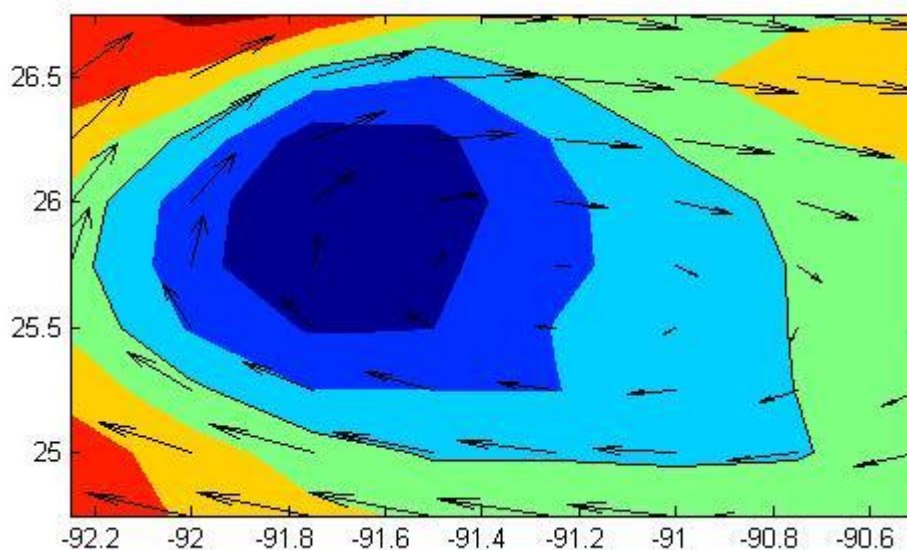


Figura 8. Mapa de contornos de Okubo-Weiss con zoom en el remolino seleccionado para el día 30/8/13. El contorno en negro delimita el remolino con el parámetro Okubo-Weiss.

En las figuras 7 y 8 se puede observar con mayor detalle el remolino seleccionado. Se puede notar que en la figura 7 que la delimitación por Okubo-Weiss no coincide del todo con el contorno de altimetría, esto se debe a que en la zona existen remolinos de menor tamaño que hacen que la altimetría real del remolino se enmascare pero en la figura 8 es claro cuál es el núcleo del remolino.

El último paso es delimitar los diámetros menor y mayor del remolino y con esto se termina el programa y se guardan automáticamente los resultados.

Al concluir se guarda un archivo tipo .mat en el cual se registran los promedios de todos los parámetros medidos y obtenidos del remolino.

Esto se repite para todo el tiempo de vida del remolino y así tener el registro completo, por fin los datos son compilados y posteriormente graficados para una análisis de su comportamiento.

El código completo de esta herramienta se encuentra en el anexo 1.

Capítulo 4. Resultados y discusión

4.1 Trayectoria y propiedades del remolino Hadal

El remolino Hadal se liberó de la CL el día 20 de agosto de 2011 y disipó en el mes de marzo de 2012. Al momento de liberarse de la CL, en la longitud 89° y latitud 26.7° , llegó a tener un radio cercano a los 75 km, un perímetro aproximado de 460 km, con una altimetría promedio de 45.5 cm y su punto más alto de 54.5 cm.

Se registraron sus propiedades superficiales durante las 32 semanas que estuvo activo este remolino, en las que pudimos notar que su desplazamiento fue prácticamente lineal desde el punto en el que se liberó hasta su última ubicación como se muestra en la figura 9.

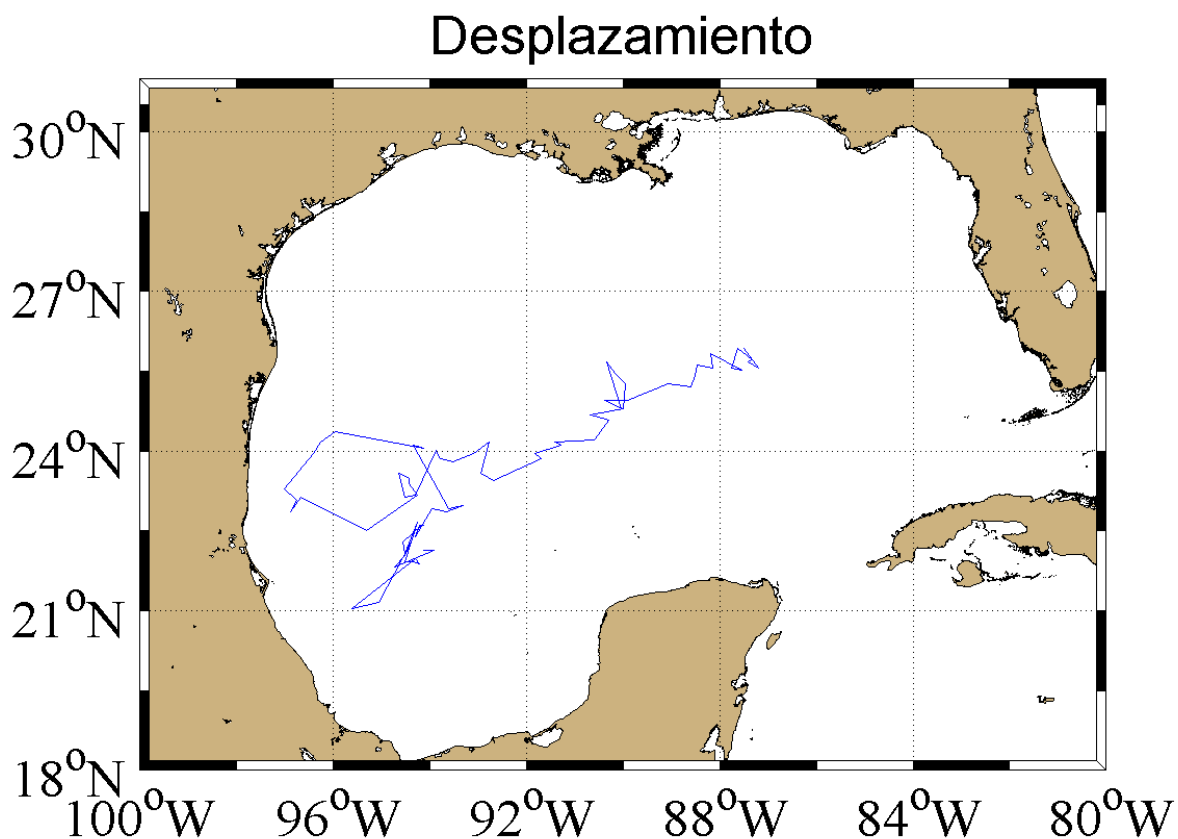


Figura 9. Desplazamiento del remolino Hadal por el GoM.

Es importante recalcar que la trayectoria marcada en la figura 9 corresponde al punto de máxima altimetría del remolino en cada una de las 32 semanas en las que se registraron sus propiedades superficiales.

En cuanto a la energía cinética promedio del remolino Hadal sabemos que en la primer semana rondaba los $13,349 \frac{J}{m^3}$, llegando a un máximo de $16,117 \frac{J}{m^3}$ en la cuarta semana y de ahí descendiendo, con algunos saltos, casi de forma regular llegando a un mínimo de $776 \frac{J}{m^3}$ antes de desaparecer como se aprecia en la figura 10.

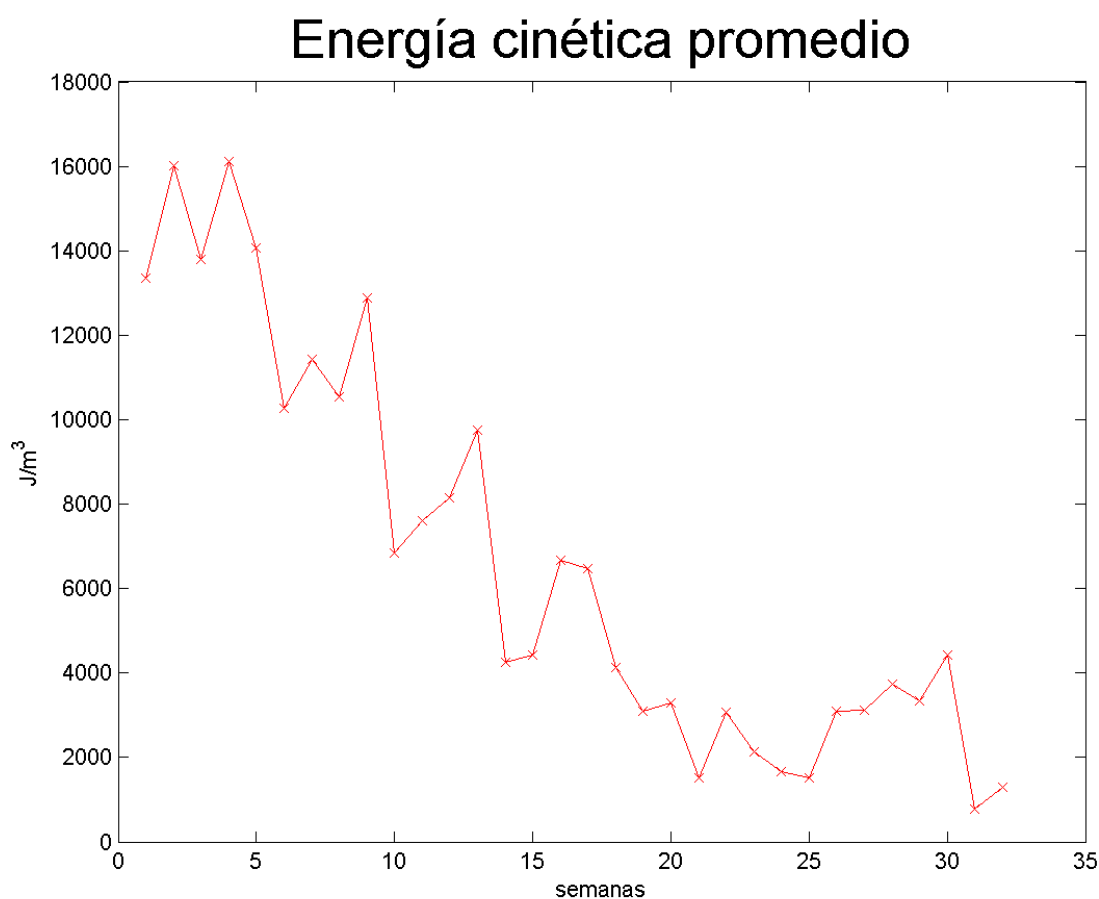


Figura 10. Energía cinética promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud de la energía cinética y en el eje horizontal las semanas.

Otro parámetro medido fue la vorticidad, que en la primer semana del remolino libre fue de $-1.327e^{-5} s^{-1}$ siendo esta su vorticidad máxima y disminuyendo con el paso del tiempo hasta llegar a su mínimo de $-5.278e^{-6}s^{-1}$ un semana antes de su extinción como se observa en la figura 11.

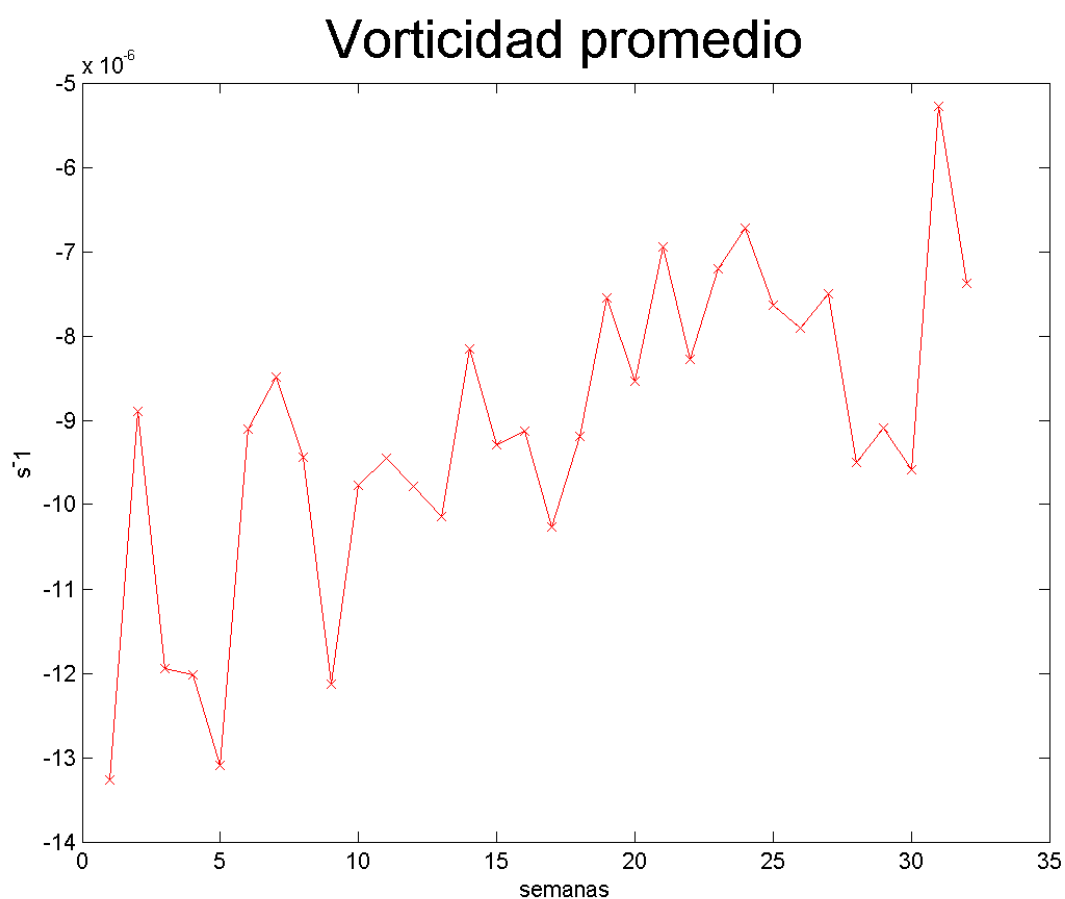


Figura 11. Vorticidad promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.

La altura máxima y la altimetría promedio del remolino Hadal se muestra en la figura 12, donde se puede observar que la tendencia es la misma en los dos casos, sus altos son en el mismo punto al igual que los bajo y en la semana 31 estuvieron casi a la misma altura antes de desaparecer una semana después. Es importante notar que los máximo se dieron en diferentes

semanas, el de la altura máxima fue en la semana 4 con 55.31 cm mientras que el máximo de la altura promedio fue en la primer semana con 45.43 cm. Los mínimos para este remolino fueron en la última semana como se puede notar en la figura.

Altura máxima y altimetría promedio

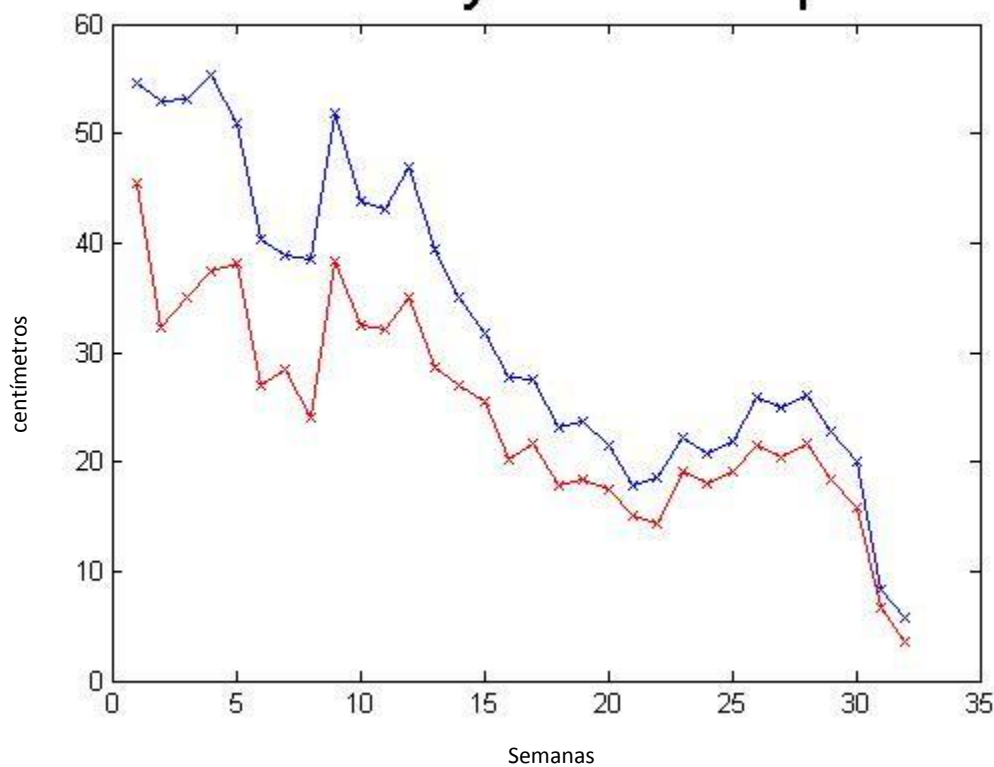


Figura 12. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.

El tamaño del remolino es el último de los parámetros que se midieron teniendo de base el radio promedio del remolino y de ahí obtuvimos el perímetro y el área, por lo cual solo se mostrara una gráfica que en este caso será el radio.

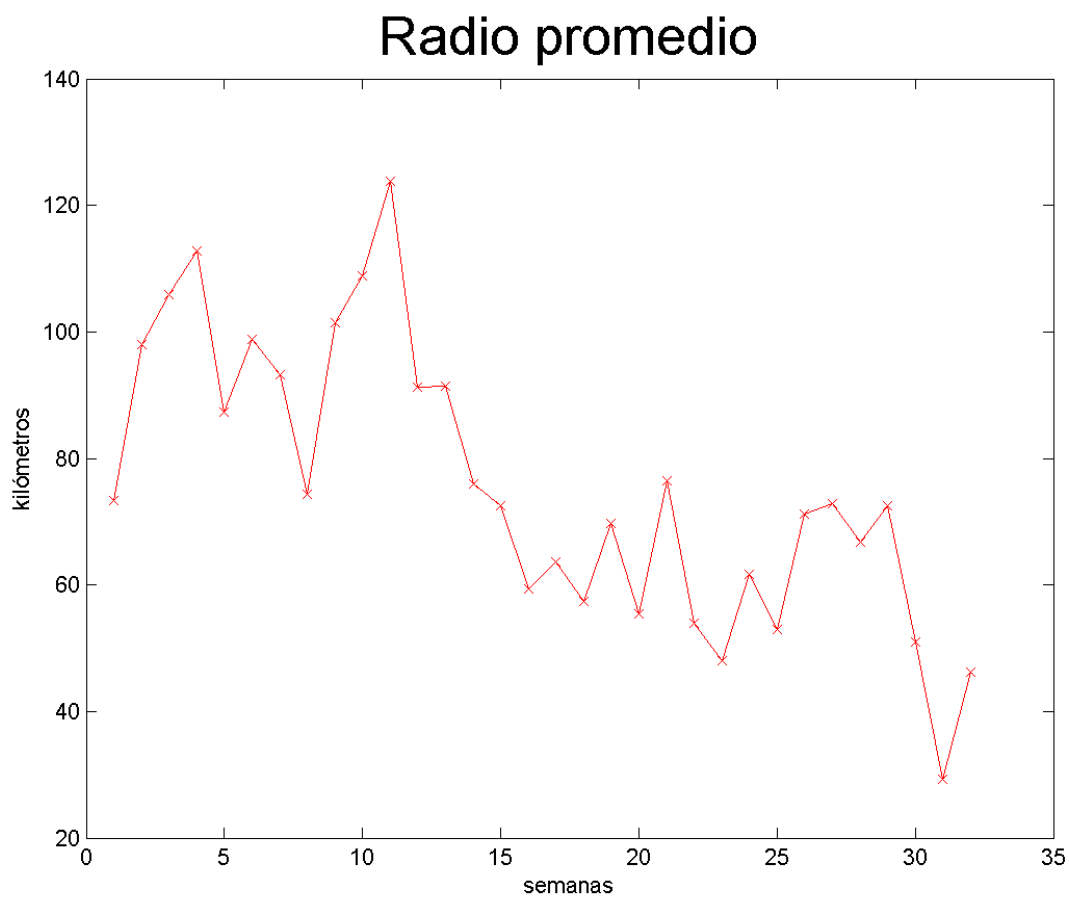


Figura 13. Radio promedio del remolino Hadal. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal se muestra las semanas.

El máximo tamaño del remolino fue en la semana 11 con un radio promedio de 124 km teniendo un mínimo de 29.32 km en la semana 31.

4.2 Trayectoria y propiedades del remolino Icarus

El remolino Icarus se liberó de la CL el día 12 de noviembre de 2011 y se disipó en el mes de marzo de 2013. Por su tamaño se considera que es un remolino grande ya que al momento de liberarse de la CL, en la longitud 87° y latitud 26° , llegó a tener un radio de 103.82 km, un perímetro aproximado de 652.37 km, con una altimetría promedio de 45.33 cm y su punto más alto de 60.68 cm.

Se pudieron registrar sus propiedades superficiales durante las 74 semanas hasta el momento en que su tamaño era tan pequeño que era imposible distinguirlo. Su desplazamiento fue un tanto inestable ya que se pueden observar varios giros y cambios de rumbo a lo largo de las 72 semanas, como podemos observar en la figura 14.

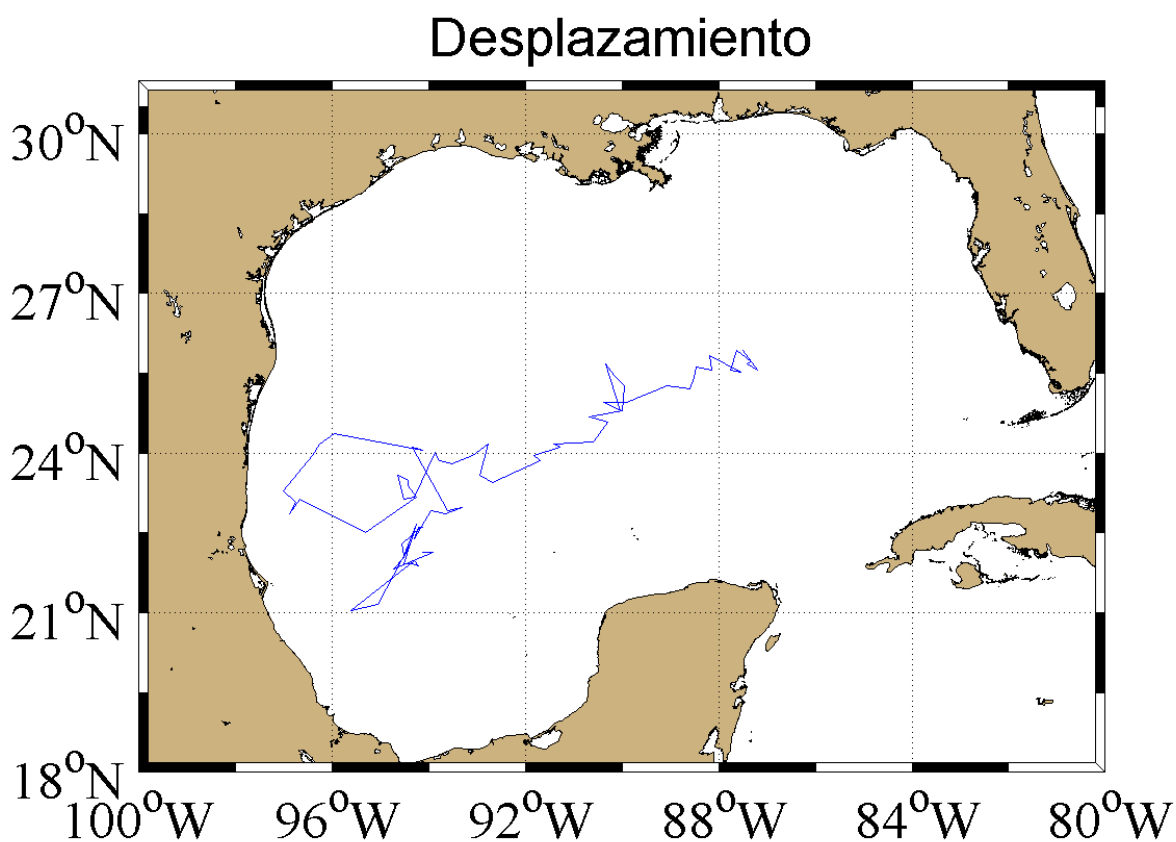


Figura 14. Desplazamiento del remolino Icarus por el GoM.

La energía cinética promedio del remolino Icarus en la primer semana rondaba los $19,074 \frac{J}{m^3}$, llegando a un máximo de $23,886 \frac{J}{m^3}$ en la cuarta semana y de ahí descendiendo rápidamente llegando a un mínimo de $367 \frac{J}{m^3}$ en la semana 33 y siguiendo con un comportamiento asintótico hasta la semana 72 como se muestra en la figura 15.

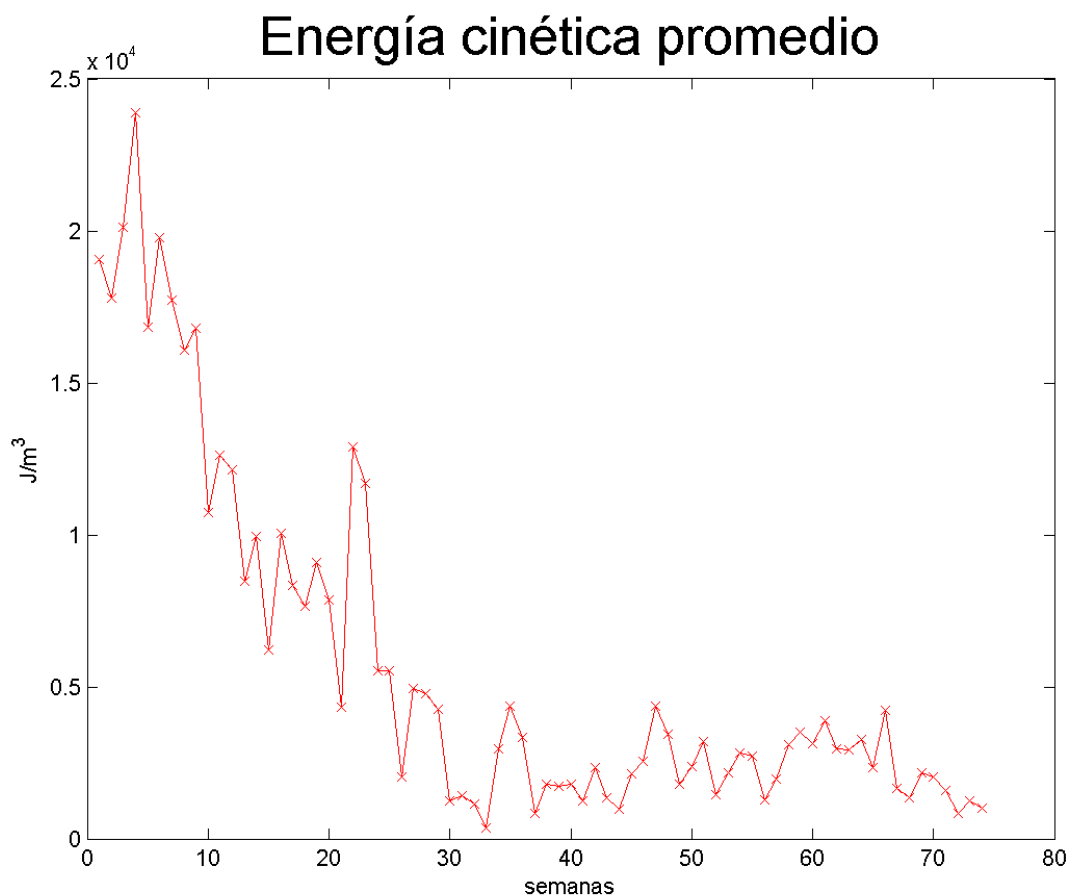


Figura 15. Energía cinética promedio del remolino Icarus. En el eje vertical las unidades son $\frac{J}{m^3}$ y en el horizontal son las semanas.

La vorticidad fue otro parámetro medido, en la primer semana del remolino fuera de la CL fue de $-1.124e^{-5} s^{-1}$ teniendo su máximo en la semana 22 de $-1.436e^{-5} s^{-1}$ y disminuyendo con el paso del tiempo hasta llegar a su mínimo de $-5.28e^{-6} s^{-1}$ un semana antes de su extinción como se observa en la figura 16.

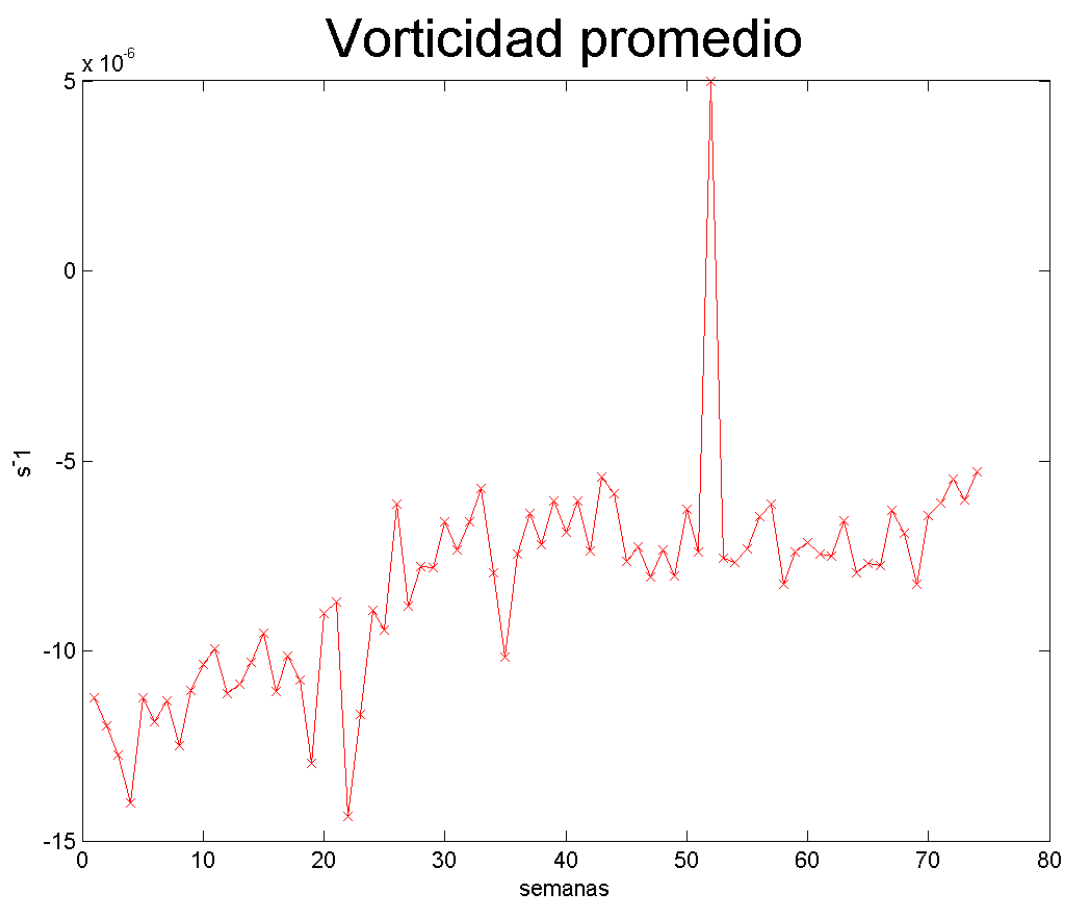


Figura 16. Vorticidad promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.

La altura y la altimetría promedio del remolino Icarus, como es de esperarse, tienen la misma tendencia exceptuando la semana 52 donde la altimetría promedio llega a un mínimo de -10 cm cosa que no es tan marcada en la altura máxima, ya que su mínimo se da en la semana 74 con una magnitud de 2.68 cm, como se muestra en la figura 17.

Altura máxima y altimetría promedio

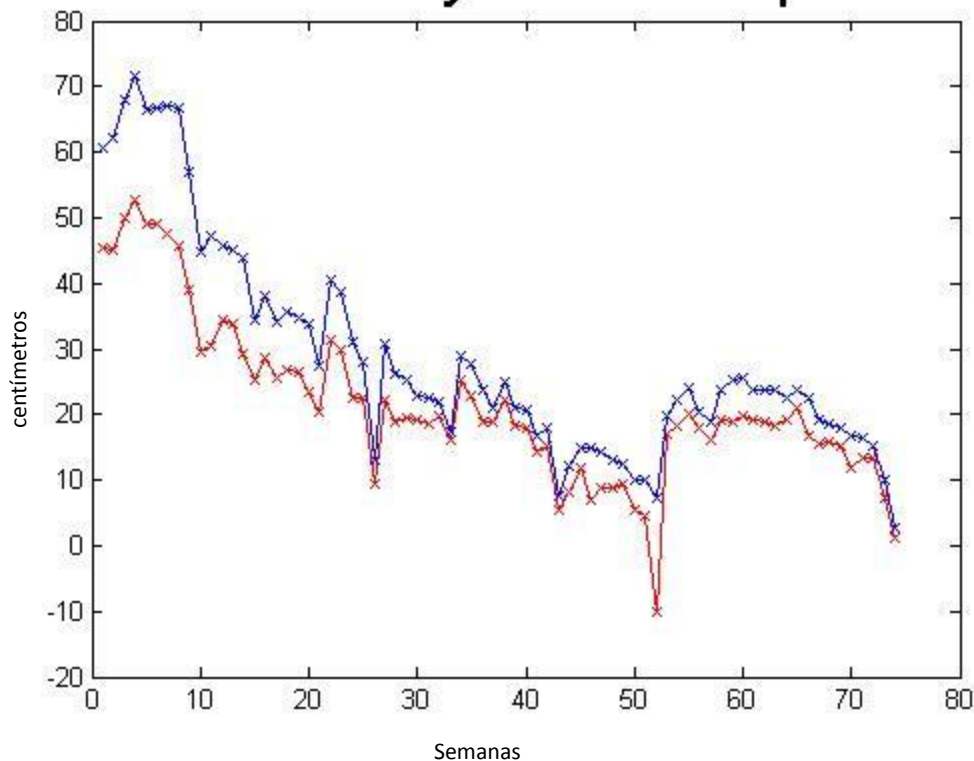


Figura 17. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.

El radio del remolino Icarus se comportó de una forma irregular con tendencia a disminuir con el paso del tiempo. Tuvo su máximo valor de 154 km en la semana 8 y su mínimo de 29 km en la semana 43 como se observa en la figura 18.

En este remolino es interesante notar que sus mínimos, exceptuando altura máxima, se dieron entre la semana 43 y 52 debido a que en su trayecto se encontró con dos remolinos ciclónicos los cuales hicieron que casi desapareciera.

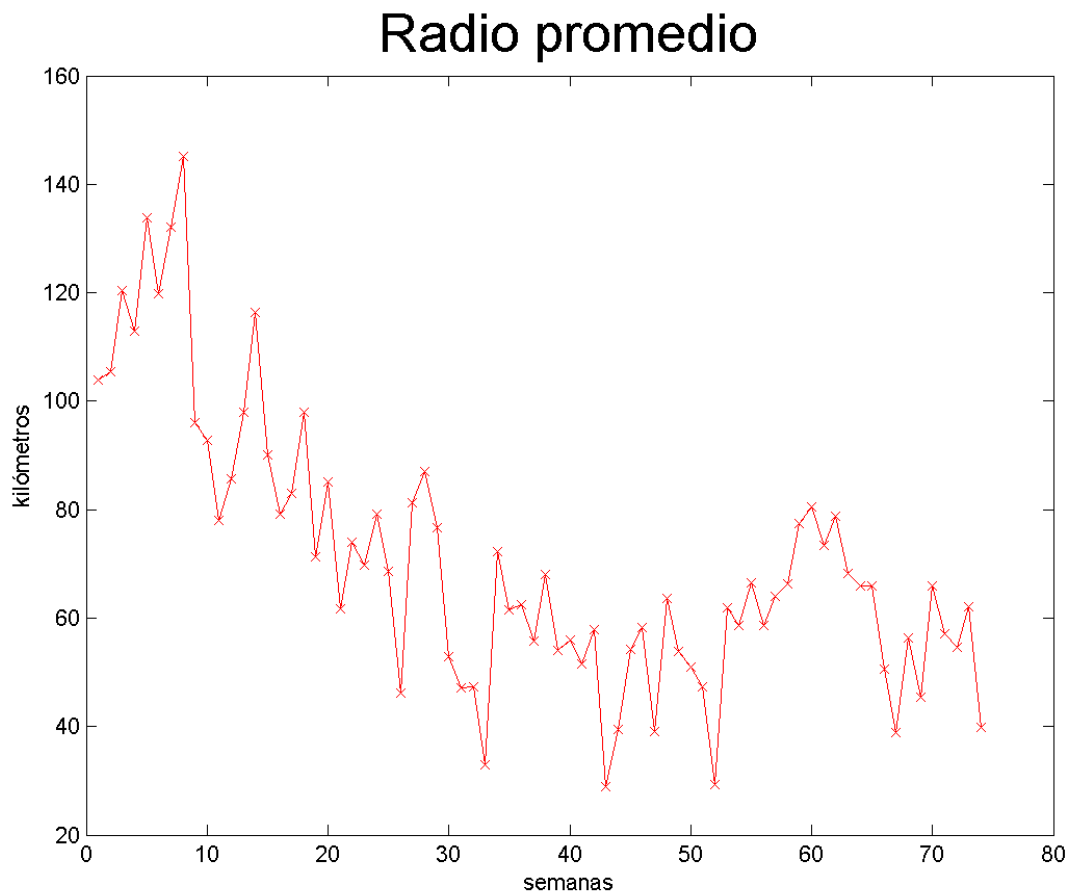


Figura 18. Radio promedio del remolino Icarus. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal las semanas.

4.3 Trayectoria y propiedades del remolino Jumbo

El remolino Jumbo se liberó de la CL el día 24 de junio de 2012 y se disipó en el mes de febrero de 2013. Por su tamaño se considera que es un remolino gigante ya que al momento de liberarse de la CL, en la longitud 87° y latitud 25°, llegó a tener un radio de 110.99 km, un perímetro aproximado de 697.4 km, con una altimetría promedio de 52.79 cm y su punto más alto de 68.11 cm.

Se pudieron registrar sus propiedades superficiales durante las 31 semanas en las que se pudo monitorear el remolino Jumbo. Su desplazamiento fue un tanto irregular ya que se pueden observar varios giros y cambios de rumbo a lo largo de las 31 semanas, como podemos observar en la figura 19.

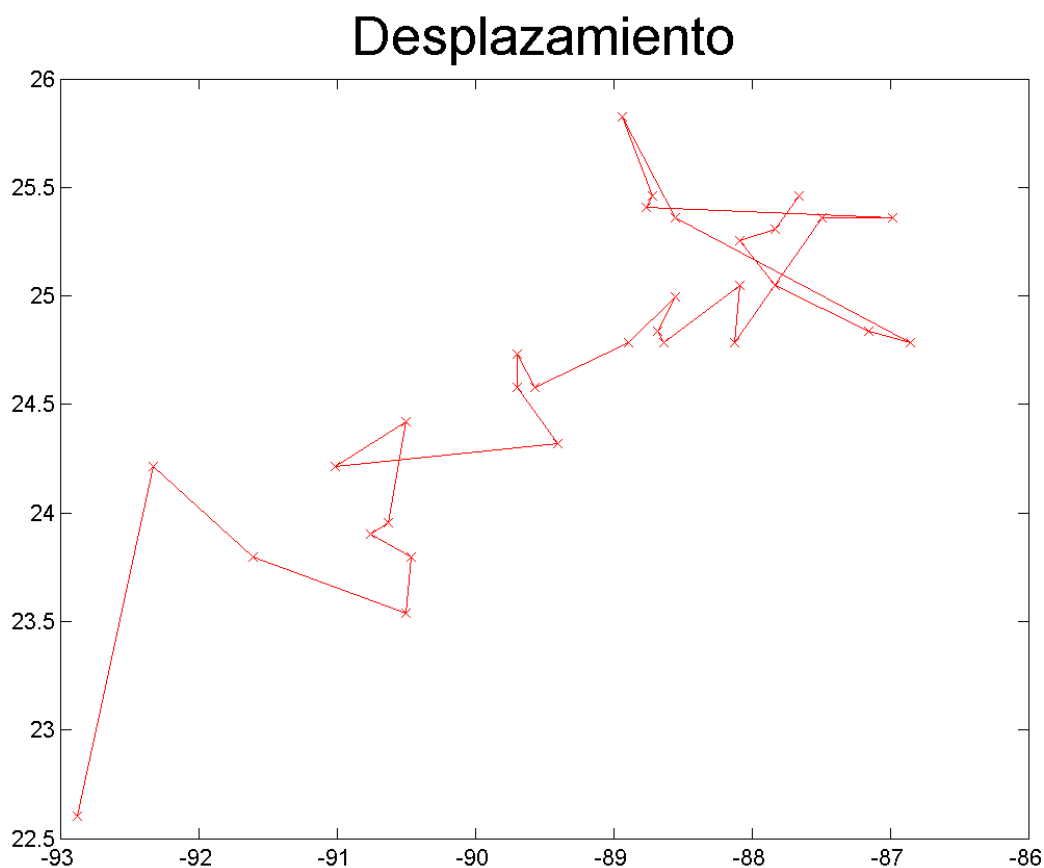


Figura 19. Desplazamiento del remolino Icarus por el GoM.

La energía cinética promedio del remolino Jumbo al momento de separarse de la CL rondaba los $13,115 \frac{J}{m^3}$, llegando a un máximo de $23,680 \frac{J}{m^3}$ en la semana 12 y a su mínimo de $409 \frac{J}{m^3}$ en la semana 28, como se puede observar en la figura 20.

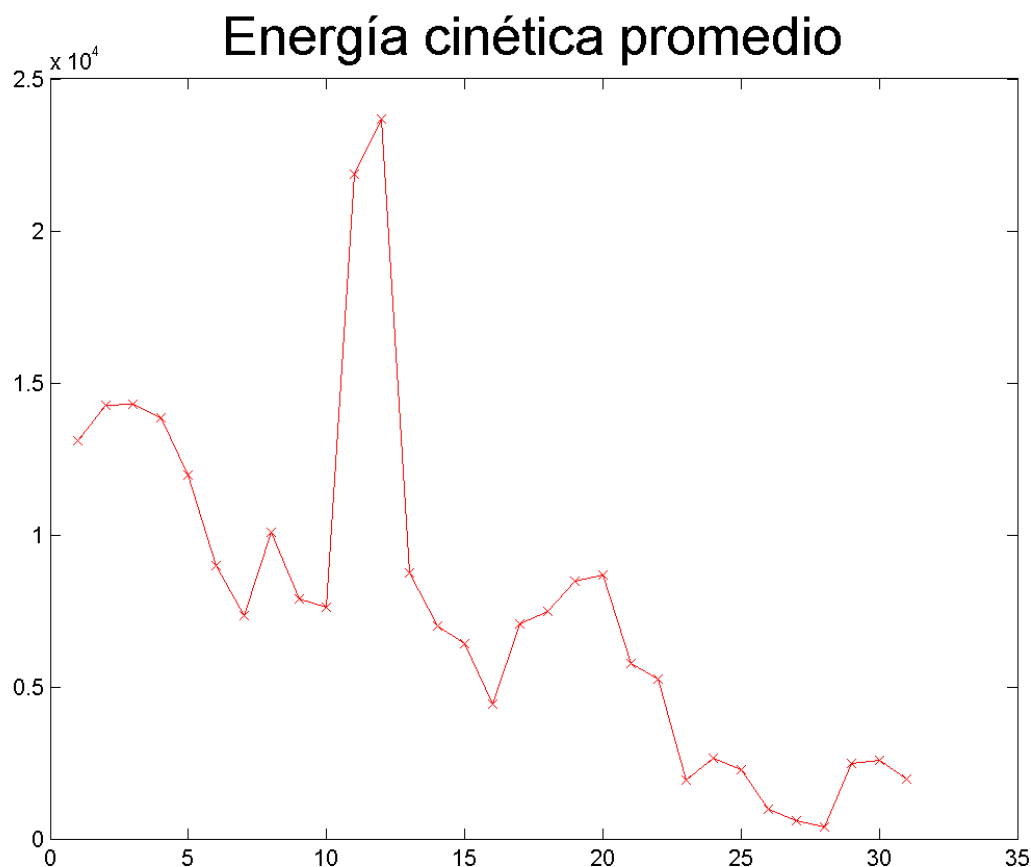


Figura 20. Energía cinética promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical las unidades son $\frac{J}{m^3}$ y en el horizontal son las semanas.

La vorticidad en la primer semana del remolino fuera de la CL fue de $-9.97e^{-6}s^{-1}$ teniendo su máximo en la semana 11 de $-1.797e^{-5}s^{-1}$ y disminuyendo con el paso del tiempo hasta llegar a su mínimo de $-5.45e^{-6} s^{-1}$ en la última semana que se tiene registro de su actividad, como se puede ver en la figura 21.



Figura 21. Vorticidad promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.

La altura máxima y la altimetría promedio del remolino Jumbo tiene casi la misma forma con algunas discrepancias y una zona donde llegan a tener casi el mismo valor en la semana 28 siendo este su valor mínimo de 2.84 cm para la altura máxima y 2.58 cm para la altimetría promedio. En cuanto a sus valores máximos podemos notar en la figura 22 que para la altura máxima se da en la cuarta semana con 71.45 cm y por el lado de la altimetría promedio fue en la semana uno con 52.79 cm.

Altura máxima y altimetría promedio

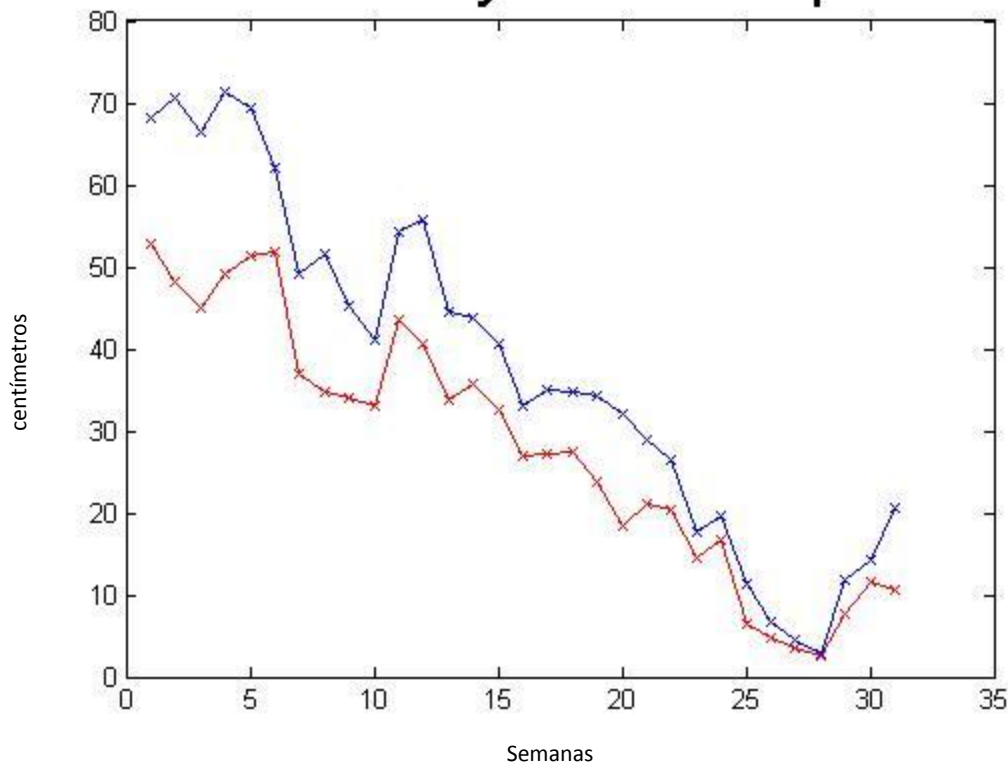


Figura 22. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.

En el radio del remolino Jumbo podemos notar una serie altos y bajos con una tendencia a minimizarse, pasando por un máximo en su tercera semana de 165 km y un mínimo en su última semana de 22.71 km como podemos ver en la figura 23.

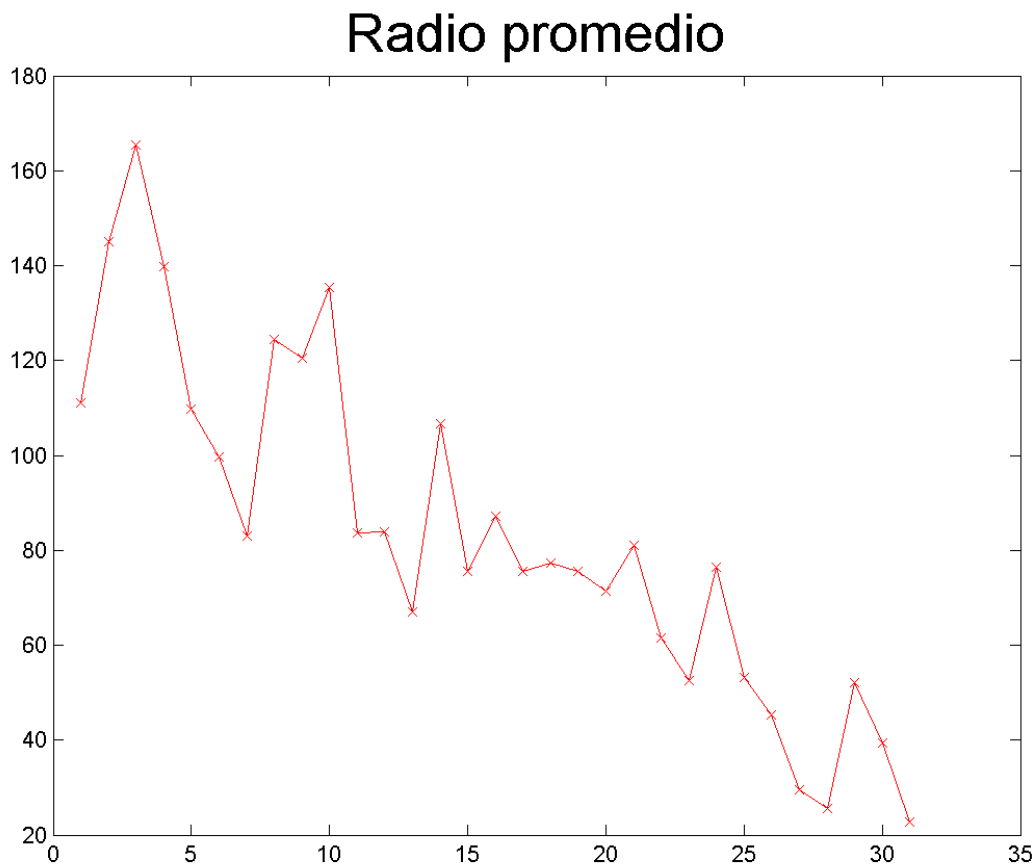


Figura 23. Radio promedio del remolino Jumbo. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal se muestra el tiempo de vida.

Se cree que los máximos que experimento este remolino de vorticidad y energía cinética se deben a la interacción que tuvo con la CL ya que tardó mucho en abandonar la zona de influencia.

4.4 Trayectoria y propiedades del remolino Kraken

El remolino Kraken se liberó de la CL el día 12 de abril de 2013 y el último día donde se pudieron registrar sus propiedades superficiales fue en el mes de octubre de 2014. Por su tamaño se considera que es un remolino mediano ya que al momento de liberarse de la CL, en la longitud 87° y latitud 26° , llegó a tener un radio de 82.29 km, un perímetro aproximado de 517.06 km, con una altimetría promedio de 40.76 cm y su punto más alto de 51.99 cm.

Se pudieron registrar sus propiedades superficiales durante las 88 semanas en las que se pudo monitorear el remolino Kraken. Su desplazamiento fue un tanto lento (fue el remolino de mayor tiempo de vida del estudio) y se pueden observar varios giros como se puede ver en la figura 24.

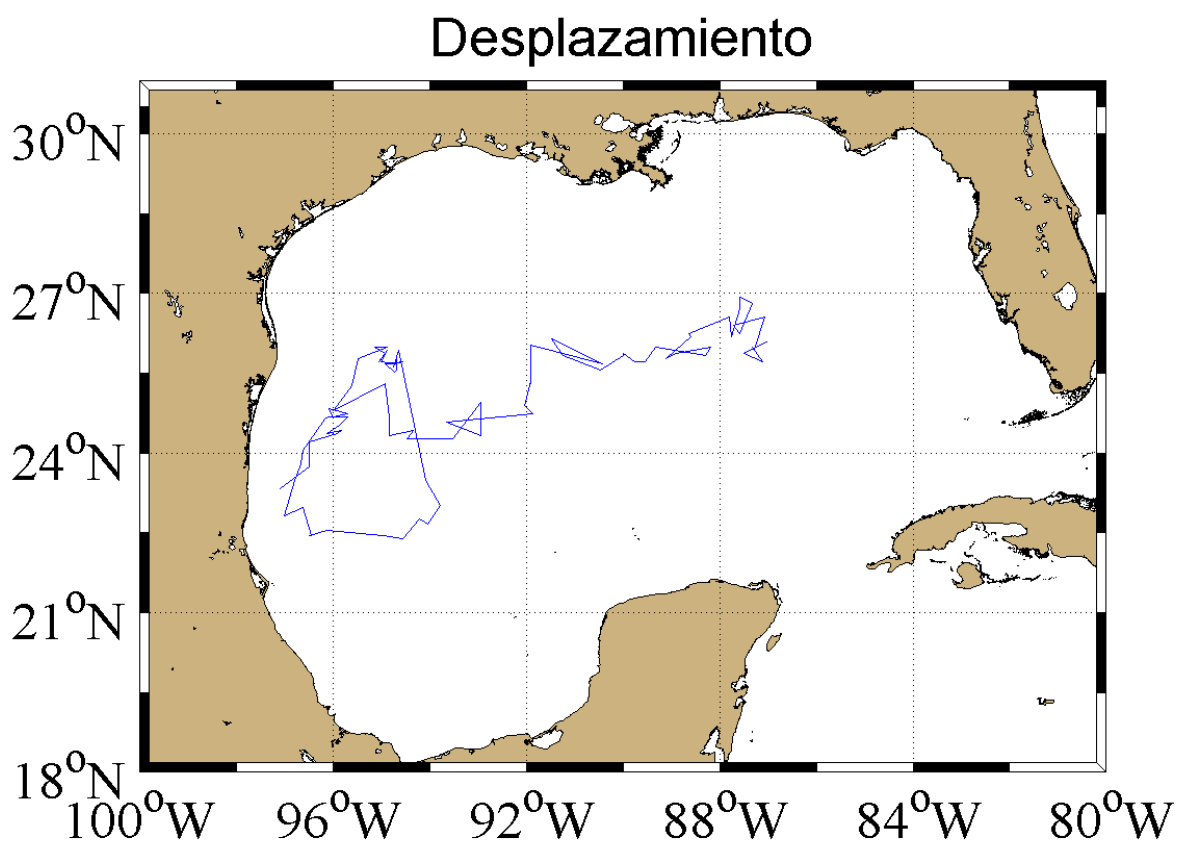


Figura 24. Desplazamiento del remolino Kraken por el GoM.

La energía cinética promedio del remolino Kraken al momento de separarse de la CL rondaba los $15,076 \frac{J}{m^3}$, llegando a un máximo de $22,831 \frac{J}{m^3}$ en la semana 7 y a su mínimo de $116 \frac{J}{m^3}$ en la semana 89, como se puede observar en la figura 25.

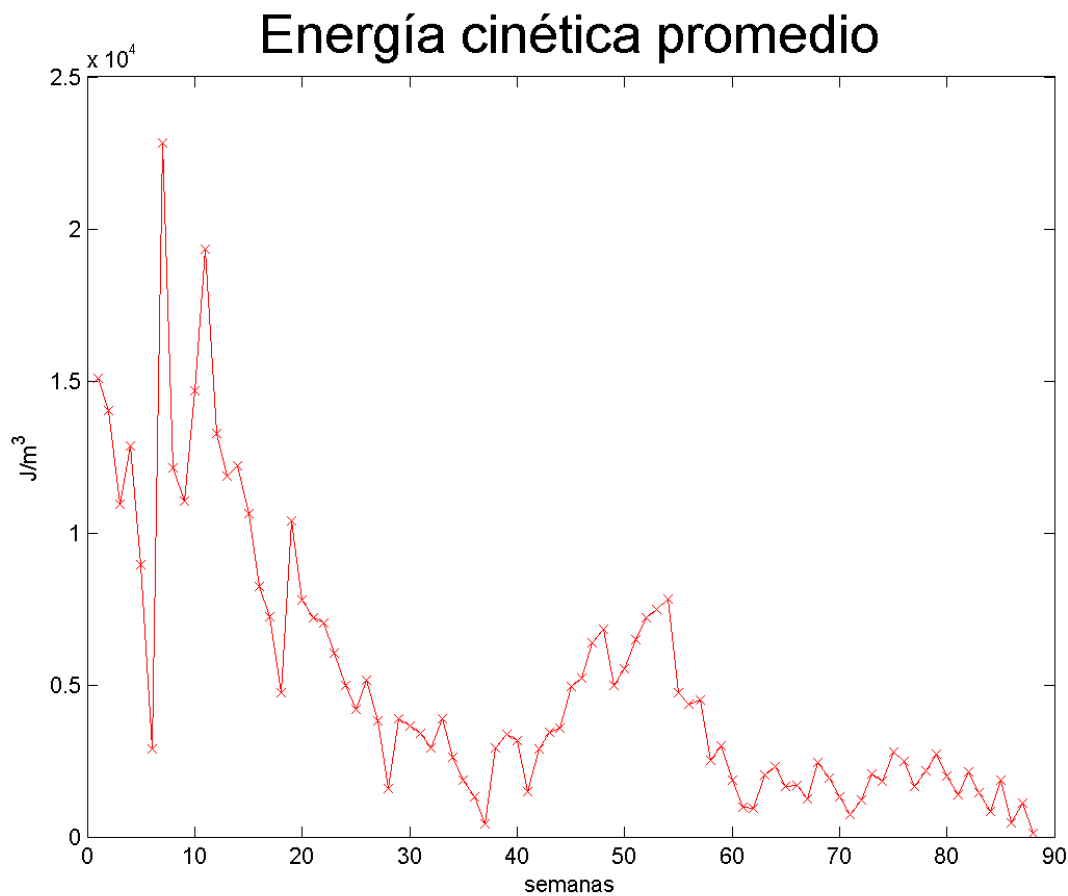


Figura 25. Energía cinética promedio del remolino Kraken. En el eje vertical las unidades son $\frac{J}{m^3}$ y en el horizontal son las semanas.

La vorticidad en la primer semana del remolino Kraken fue de $-11.55e^{-5}s^{-1}$ teniendo su máximo en la semana 11 de $-1.797e^{-5}s^{-1}$ y disminuyendo con algunos saltos hasta llegar a $-4.52e^{-6}s^{-1}$ en la última semana que se tiene registro de su actividad, como se puede ver en la figura 26.

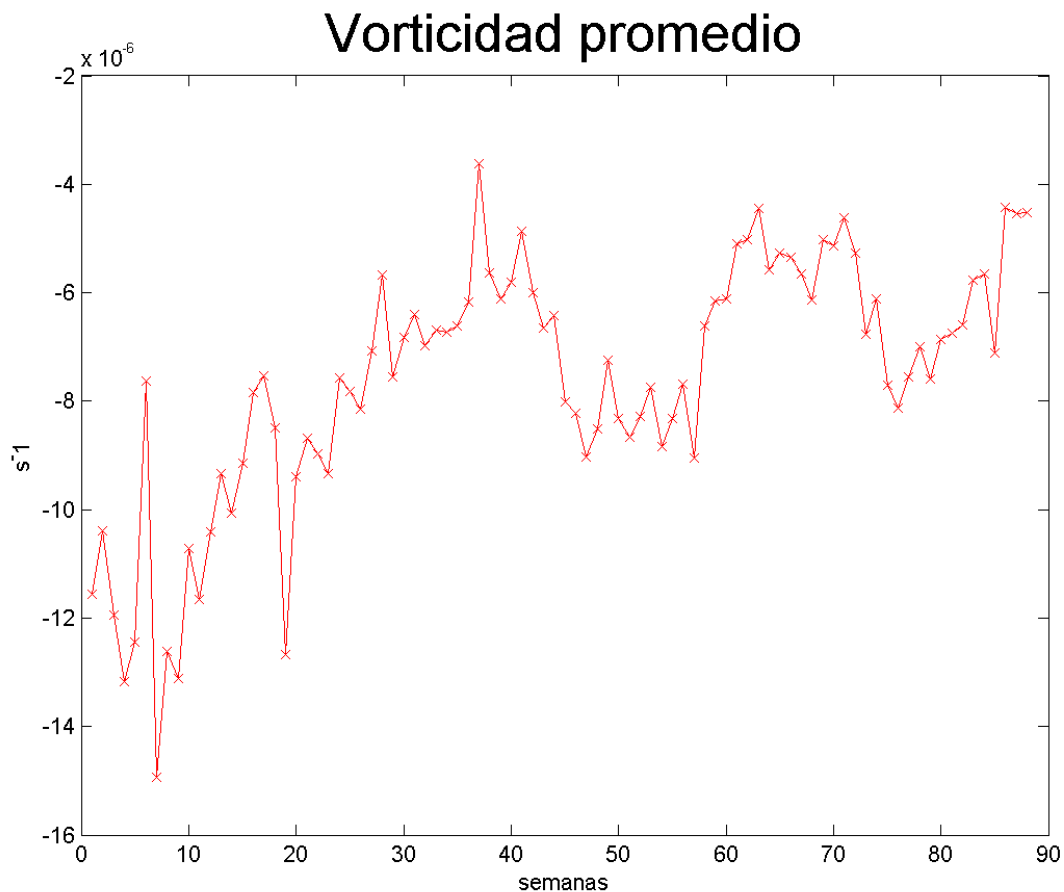


Figura 26. Vorticidad promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la magnitud de la vorticidad y en el eje horizontal las semanas.

La altura máxima y la altimetría promedio del remolino Kraken fue un tanto inestable con bajos muy marcados pero siempre siguiendo la misma tendencia como se puede observar en la figura 27. Sus puntos máximos fueron en la semana 7 y 9 llegando hasta 61 cm la altura máxima y 47 cm en altimetría promedio. Su punto más bajo fue en la semana 87 donde llegaron a estar bajo el nivel medio del mar.

Altura máxima y altimetría promedio

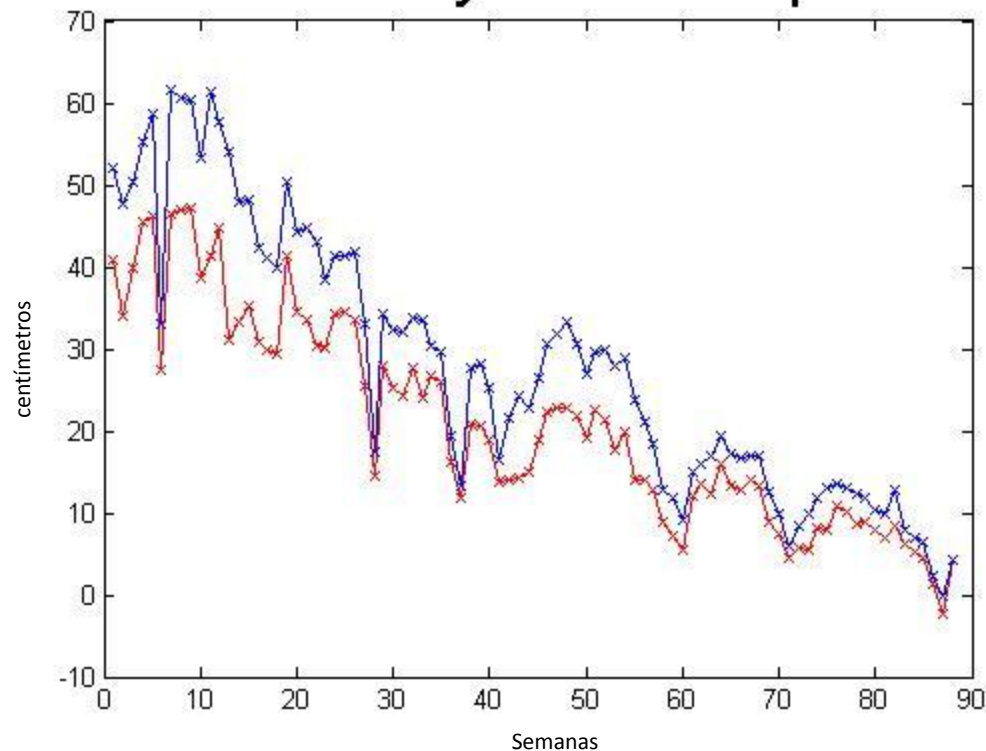


Figura 27. Altura máxima y altimetría promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la altura en centímetros y en el eje horizontal las semanas. Con línea roja se muestra la altimetría y en azul la altura máxima.

El radio del remolino Kraken se comportó de una forma irregular. Tuvo su máxima longitud de 134 km en la semana 14 y su mínimo de 20 km en la semana 37 como se observa en la figura 28.

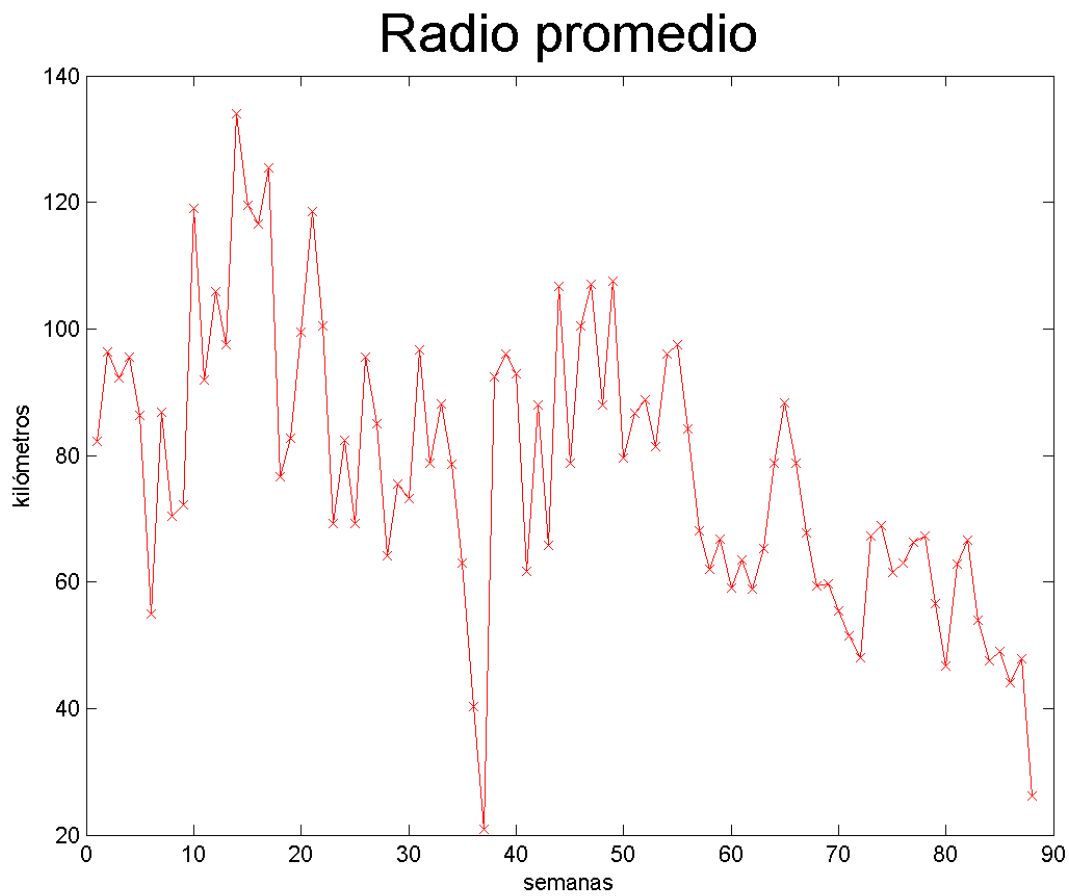


Figura 28. Radio promedio del remolino Kraken. En el eje vertical se tiene la magnitud del radio en kilómetros y en el eje horizontal las semanas.

4.5 Comparación de resultados y discusiones

En la primera parte de este capítulo se muestran las gráficas con los resultados para cada uno de los remolino identificados: Hadal, Icarus, Jumbo y Kraken.

En la tabla 3 se muestran los máximos y mínimos de las propiedades superficiales medidas de los diferentes remolinos. Como se puede observar el máximo de las propiedades de los remolinos no está ligado a su tiempo de vida, más bien se debe a su posición teniendo como límites en longitud de 92.5°W y 86.98°W y latitud de 26.81°N y 24.63°N , esto se cree debido a que necesitan alejarse de la influencia de la CL para llegar a su verdadera forma.

En el caso de la magnitud mínima es más difícil delimitar un área ya que depende más de las propiedades iniciales, el desplazamiento y la interacción con otras estructuras, aunque se pudo llegar a delimitarla entre las longitudes 97°W y 90.5°W y latitudes 23.74°N y 21.2°N .

La tendencia en el desplazamiento de los remolinos es de noreste a suroeste, desapareciendo la mayoría de las veces cerca de la costa de Tampico, como se puede observar en la figura 29.

En cuanto al tiempo de vida de los remolinos podemos decir que es independiente de la categoría o tamaño del remolino, como ejemplo podemos tomar dos remolinos: Jumbo y Kraken. Jumbo se denominó gigante al momento de separarse de la CL y vivió por 32 semanas, al contrario de Kraken que se denominó mediano y tuvo un tiempo de vida de 88 semanas.

Tabla 3. Máximos y mínimos de las propiedades superficiales medidas de los remolinos Hadal, Icarus, Jumbo y Kraken.

Hadal	Semana	Lon	Lat	Máximo	Semana	Lon	Lat	Mínimo
Área (km^2)	11	-92.54	25.83	48164.88	31	-95.39	21.20	2701.22
Perímetro (km)	11	-92.54	25.83	777.98	31	-95.39	21.20	184.24
Radio(km)	11	-92.54	25.83	123.82	31	-95.39	21.20	29.32
Altimetría(cm)	1	-89.06	26.71	45.43	32	-95.01	21.46	3.59
Altura máxima(cm)	4	-90.21	26.09	55.31	32	-95.01	21.46	5.82
Vorticidad(s^{-1})	1	-89.064	26.71	-1.33E-05	31	-95.39	21.20	-5.28E-06
Energía cinética ($\frac{J}{m^3}$)	4	-90.21	26.086	16116.972	31	-95.39	21.20	776.7446
Icarus	Semana	Lon	Lat	Máximo	Semana	Lon	Lat	Mínimo
Área (km^2)	8	-88.17	25.83	66232.00	43	-95.30	22.50	2627.00
Perímetro (km)	8	-88.17	25.83	912.30	43	-95.30	22.50	181.69
Radio(km)	8	-88.17	25.83	145.20	43	-95.30	22.50	28.92
Altimetría(cm)	4	-87.32	25.72	52.74	52	-94.33	24.11	-10.05
Altura máxima(cm)	4	-87.32	25.72	71.59	74	-94.12	22.13	2.68
Vorticidad(s^{-1})	22	-90.51	24.63	-1.44E-05	52	-94.33	24.11	4.98E-06
Energía cinética ($\frac{J}{m^3}$)	4	-87.32	25.72	23886.00	33	-93.10	23.95	367.00
Jumbo	Semana	Lon	Lat	Máximo	Semana	Lon	Lat	Mínimo
Área (km^2)	3	-88.0873	25.254	86030	31	-92.8844	22.602	1629
Perímetro (km)	3	-88.0873	25.254	1039.8	31	-92.8844	22.602	143.1
Radio(km)	3	-88.0873	25.254	165.482	31	-92.8844	22.602	22.7733
Altimetría(cm)	1	-87.6627	25.462	52.7957	28	-90.5071	23.538	2.5848
Altura máxima(cm)	4	-87.8325	25.046	71.4591	28	-90.5071	23.538	2.8474
Vorticidad(s^{-1})	11	-86.9835	25.358	-1.80E-05	31	-92.8844	22.602	-5.45E-06
Energía cinética ($\frac{J}{m^3}$)	12	-87.4929	25.358	23680	28	-90.5071	23.538	409
Kraken	Semana	Lon	Lat	Máximo	Semana	Lon	Lat	Mínimo
Área (km^2)	14	-88.6392	26.242	56474	37	-93.5212	24.266	1363
Perímetro (km)	14	-88.6392	26.242	842.423	37	-93.5212	24.266	130.8763
Radio(km)	14	-88.6392	26.242	134.0758	37	-93.5212	24.266	20.8296
Altimetría(cm)	9	-87.3231	26.814	47.2206	87	-96.4929	23.746	-2.3001
Altura máxima(cm)	7	-87.7052	26.398	61.6872	87	-96.4929	23.746	-0.2204
Vorticidad(s^{-1})	7	-87.0684	26.554	-1.49E-05	37	-93.5212	24.266	-3.62E-06
Energía cinética ($\frac{J}{m^3}$)	7	-87.7052	26.398	22831	89	-97.0873	23.33	116

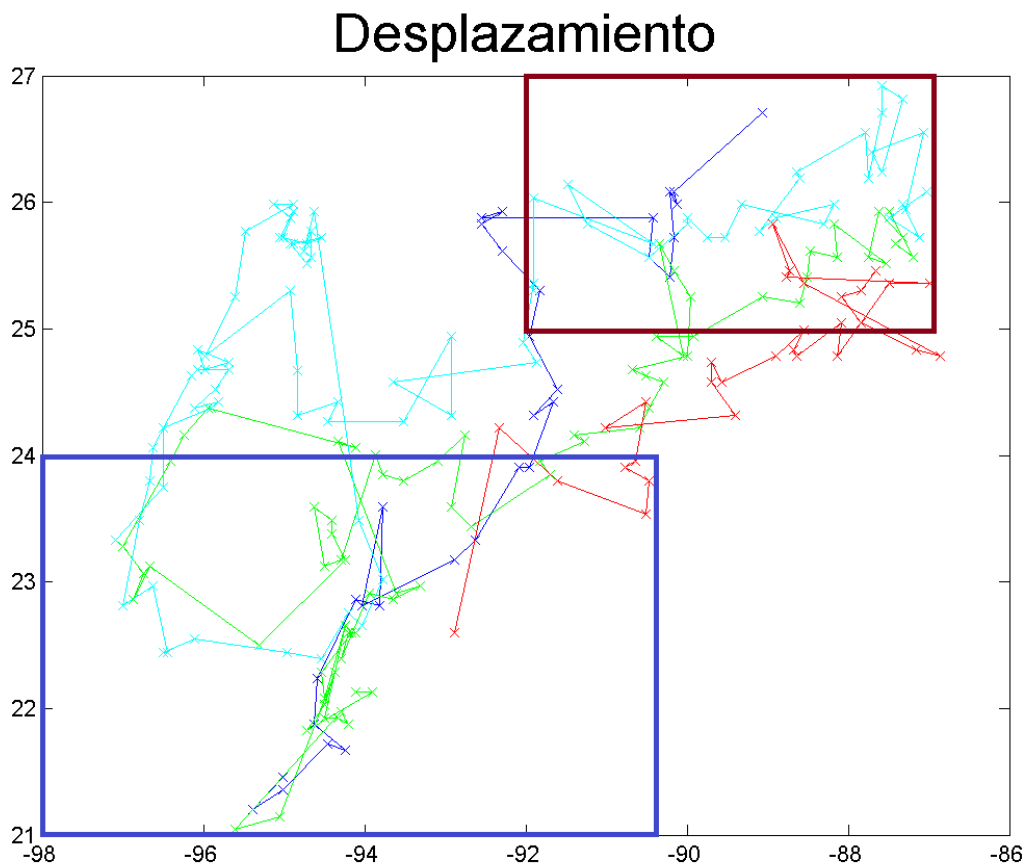


Figura 29. Mapa de desplazamiento de los remolinos en el GoM. En azul tenemos al remolino Hadal, en verde a Icarus, en rojo a Jumbo y en aqua a Kraken. El rectángulo rojo muestra la zona donde se registraron los máximos y en azul los mínimos.

La altimetría promedio de todos los remolinos estuvo cerca de los 50 cm y la mínima pudiendo llegar bajo el nivel medio del mar, como en Icarus y Kraken. Se cree que una altimetría media tan baja es causada por dos factores: primero la energía casi inexistente al final de su vida y segundo a la interacción con remolinos ciclónicos que hicieron que el nivel del mar en esa zona fuera más bajo que el nivel medio conocido.

La altura máxima de los remolinos llegó a ser hasta de 71 cm sobre el nivel medio del mar y descendiendo en algunos casos hasta -0.22 cm.

Se puede notar que el tamaño del remolino al inicio no limita el tamaño que pueda llegar a tener después, como Kraken que pese a haber sido catalogado como un remolino mediano, llegó a tener un radio de 134 km, a diferencia de Hadal que se consideró como gigante y solo llegó a tener 123 km de radio.

La energía cinética tampoco es una propiedad que nos ayude a predecir el tiempo de vida de un remolino, por ejemplo Icarus y Jumbo tuvieron una energía máxima de $23,000 \frac{J}{m^3}$ pero el Jumbo solo vivió 31 semanas, en cambio Icarus tuvo un tiempo de vida de 72 semanas.

Conclusiones

En este trabajo de tesis se han investigado las características superficiales de los remolinos anticiclónicos de mesoescala en el GoM con ayuda de mapas de altimetría satelital durante el periodo de 2011- 2014. Teniendo una resolución espacial de $\frac{1}{4}$ de grado y de ahí obteniendo las velocidades geostróficas, de estas velocidades se calculó la vorticidad, energía cinética y el parámetro de Okubo-Weiss para así poder delimitar cada uno de los remolinos y poder seguir su desplazamiento a lo largo del GoM.

La herramienta desarrollada demostró su eficacia para hacer un fácil seguimiento de los remolinos en el GoM y calcular rápidamente las propiedades superficiales, como se mostró en el capítulo 4, teniendo en cuenta que los resultados se ven afectados en las cercanías de la corriente del lazo.

Los resultados indican que los remolinos siguen la misma tendencia en su desplazamiento y el comportamiento de cada una de sus propiedades a lo largo del GoM como se mostró en la tabla 3.

Se puede decir que los remolinos anticiclónicos son liberados de la CL aproximadamente en la longitud 88°W tienen un desplazamiento hacia el suroeste con dirección a la costa de Tampico (96°W - 21°N) como se muestra en la figura 34.

Los remolinos anticiclónicos del GoM llegan a tener un radio máximo aproximado de 165 km y una altura máxima de 71 cm sobre el nivel medio del mar.

Se puede decir que la longitud 92°W marca un límite para los remolinos anticiclónicos, ya que después de este punto todas sus propiedades decaen rápidamente.

Es imposible predecir el tiempo de vida de los remolinos con este método superficial.

Al liberarse un remolino no es posible conocer el tamaño que podrá llegar a tener ya que no se conocen los factores con los que interactuará en su paso por el GoM.

Se recomienda para futuros trabajos estudiar un periodo más grande de tiempo, para así poder llegar a conocer con mayor certeza las tendencias de estos remolinos.

Bibliografía

- Badan, A., Candela, J., Sheinbaum, J., & Ochoa, J. (2005). Upper-layer circulation in the approaches to Yucatan Channel. *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*, 57-69.
- Collow, T. (2010). *Gulf of Mexico Loop Current*. Physical Oceanography
- Elliott, B. A. (1982). Anticyclonic rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 12(11), 1292-1309.
- Horizon Marine, Inc. (2017) *Gulf of Mexico Loop Current Eddies*.
<http://www.horizonmarine.com/loop-current-eddies.html>
- Isern-Fontanet, J., Font, J., García-Ladona, E., Emelianov, M., Millot, C., & Taupier-Letage, I. (2004). Spatial structure of anticyclonic eddies in the Algerian basin (Mediterranean Sea) analyzed using the Okubo–Weiss parameter. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(25), 3009-3028.
- Kirwan, A. D., Merrell, W. J., Lewis, J. K., Whitaker, R. E., & Legeckis, R. (1984). A model for the analysis of drifter data with an application to a warm core ring in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C3), 3425-3438.
- Leben, R. R. (2005). Altimeter-Derived Loop Current Metrics. *Circulation in the Gulf of Mexico: observations and models*, 181-201.
- Matthew J. LaMourie, Richard A. Geyer, James M. Broadus. *Encyclopedia Britannica*.
<https://global.britannica.com/place/Gulf-of-Mexico>

Sosa Gutiérrez, E. R. (2014) *Caracterización de la estructura vertical de los remolinos de mesoescala en el Golfo de México Tesis de maestría en ciencias*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Talley, L. D. (2011). *Descriptive physical oceanography: an introduction*. Academic press.

Texas pelagics. <http://texaspelagics.com/gom-info/gom-loop/>

Smith IV, D. C. (1986). A numerical study of Loop Current eddy interaction with topography in the western Gulf of Mexico. *Journal of physical Oceanography*, 16(7), 1260-1272.

Stewart, R. H. (2008). *Introduction to physical oceanography* (pp. 133-147). Texas: Texas A & M University.

Anexo

```

load 'SSH30_8_2013.mat';

H=H';

g=9.8;

omega=7.2e-5;

Q=0.418879;

f=2*omega*sin(Q);

[Hx,Hy]=gradient H,9755.9,9755.9);

ug=(-g/f)*Hy;

vg=(g/f)*Hx;

[vgx,vgy]=gradient(vg,9755.9,9755.9);

[ugx,ugy]=gradient(ug,9755.9,9755.9);

Sn=ugx-vgy;

Ss=vgx+ugy;

w=vgx-ugy;

W=((Sn.^2)+(Ss.^2)-(w.^2))/1000;

p=1025;

[vgx,vgy]=gradient(vg,9755.9,9755.9);

[ugx,ugy]=gradient(ug,9755.9,9755.9);

Ro=Vg/f;

f1=figure('units','normalized','Position',[0.1 0.2 0.4 0.4]);

pcolor(Lon,Lat,H); shading flat

hold on

```

```

contour(Lon,Lat,W,[-2e-8 -2e-8], 'r');
quiver(Lon,Lat,ug,vg, 'b');

[x,y]=ginput(1);
xi=x-1;
yd=y+1;
yi=y-1;
xd=x+1;

R=rectangle('Position',[xi yi 2 2]);
a=find(Lon>=xi,8);
b=find(Lat>=yi,9);

HR=H(b,a);
UR=u(a,b);
VR=v(a,b);
WR=W(b,a);
VgR=Vg(b,a);
KR=K(b,a);
RoR=Ro(b,a);

f3=figure('units','normalized','Position',[0.1 0.2 0.4 0.4]);
contourf(Lon(a),Lat(b),HR); shading flat
hold on;
quiver(Lon(a),Lat(b),UR',VR', 'k');
hold on
contour(Lon,Lat,W,[-2e-8 -2e-8], 'k');

```

```

f2=figure('units','normalized','Position',[0.1 0.2 0.4 0.4]);
contourf(Lon(a),Lat(b),WR); shading flat
hold on;
quiver(Lon(a),Lat(b),UR',VR','k');
hold on;
[xr,yr]=ginput(4);
rad1=sqrt((xr(1)-xr(2))^2+(yr(1)-yr(2))^2);
rad2=sqrt((xr(3)-xr(4))^2+(yr(3)-yr(4))^2);
[ar]=find(WR<(-2e-8));
HRA=HR(ar);
URA=UR(ar);
MWRA = median(WRA)
MVgRA = median(VgRA)
MKRA = median(KRA)
Hmx = max(max(max(HRA)))
Mrad = ((rad1+rad2)/4)*111
MRoRA = median(RoRA)
MURA = median(URA)
MVRA = median(VRA)
AREA = pi*Mrad^2
PERIMETRO = 2*pi*Mrad
dir_out='C:\Users\HP\Documents\Jumbo\';

```