

## El modelo HYCOM

El modelo HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) es un modelo de circulación oceánica con ecuaciones primitivas que combina tres tipos de coordenadas verticales ( $z$ ,  $\sigma$  e isopícnica). Esta ventaja en su estructura vertical permite el estudio con más detalle de las zonas de mezcla y estratificadas en ecosistemas marinos, tanto para aguas profundas como para regiones costeras. Para las coordenadas horizontales HYCOM maneja mallas rectilíneas y curvilíneas ortogonales. HYCOM resuelve de manera eficiente la difusión isopícnica, que es la interacción entre capas de diferentes densidades. También, resuelve muy bien la dinámica en la parte sub-superficial estratificada del océano y su ajuste con la capa de mezcla.

## HYCOM (v2.2.98)

HYCOM, en particular, requiere las forzantes atmosféricas, climatológicas oceánicas, condiciones iniciales y de frontera, en el formato único para HYCOM. Esto se traduce como un pre- y post-procesamiento de toda la información que conlleva varios procesos y software.

El modelo oceánico calcula 541x385 celdas en la horizontal a  $1/25^\circ$  en ambas direcciones, zonal y meridional, y 27 capas híbridas (coordenadas  $z$ ,  $\sigma$  e isopícnica) en la vertical, detallando en la superficie y zona de la capa de mezcla con coordenadas- $z$ . En las fronteras se utilizan forzantes diarias climatológicas para la parte barotrópica del modelo. La temperatura y salinidad son producto de climatologías mensuales del WOA-Levitus (World Ocean Atlas), la densidad es calculada internamente por el modelo.

Las forzantes en atmósfera provienen del modelo WRF que incluyen 10 variables con salidas horarias, tales como: temperatura del aire,

precipitación, presión atmosférica en la superficie, radiación de onda corta y radiación de onda larga (ambos corregidos con una formulación para el albedo que es la radiación reflejada por el océano considerando un ciclo anual), temperatura en la superficie del mar, vapor de mezcla, y esfuerzos de viento en ambas componentes. Para obtener estas variables atmosféricas se tuvieron que re-hacer las simulaciones del modelo WRF para corregir flujos de calor y las diferentes radiaciones que afectan la superficie del mar.

Como forzantes climatológicas mensuales en el océano tenemos: forzantes en las fronteras abiertas, que son climatologías de un HYCOM global; campos de temperatura y salinidad de Levitus; y descarga de 41 ríos a lo largo de la costa en el dominio del Golfo de México (GoM). Estas bases de datos cubren ambos el plano horizontal y vertical con 27 niveles híbridos. También, se produjeron climatologías para la radiación fotosintética superficial en el GoM de SeaWiFS.

Una vez realizado el pre-procesamiento de las bases de datos requeridas se procede al periodo de simulación que se divide en tres etapas: arranque del modelo o spinup de 10 años, calentamiento del modelo de 20 años, y simulaciones para el periodo requerido, 21 años. Esta información requiere un procesamiento y almacenamiento computacional de dimensiones considerables (~4TB).

En este trabajo se presentan promedios de 21 años de simulaciones con una nueva versión del modelo HYCOM (v2.2.98). Esta nueva versión es más eficiente en el uso de recursos computacionales, la Corriente del Lazo mantiene sus emprendimientos, la temperatura superficial e intercambio con las forzantes atmosféricas se corrigió, y la estructura vertical se ha detallado más.

## Profundidad de la capa de mezcla

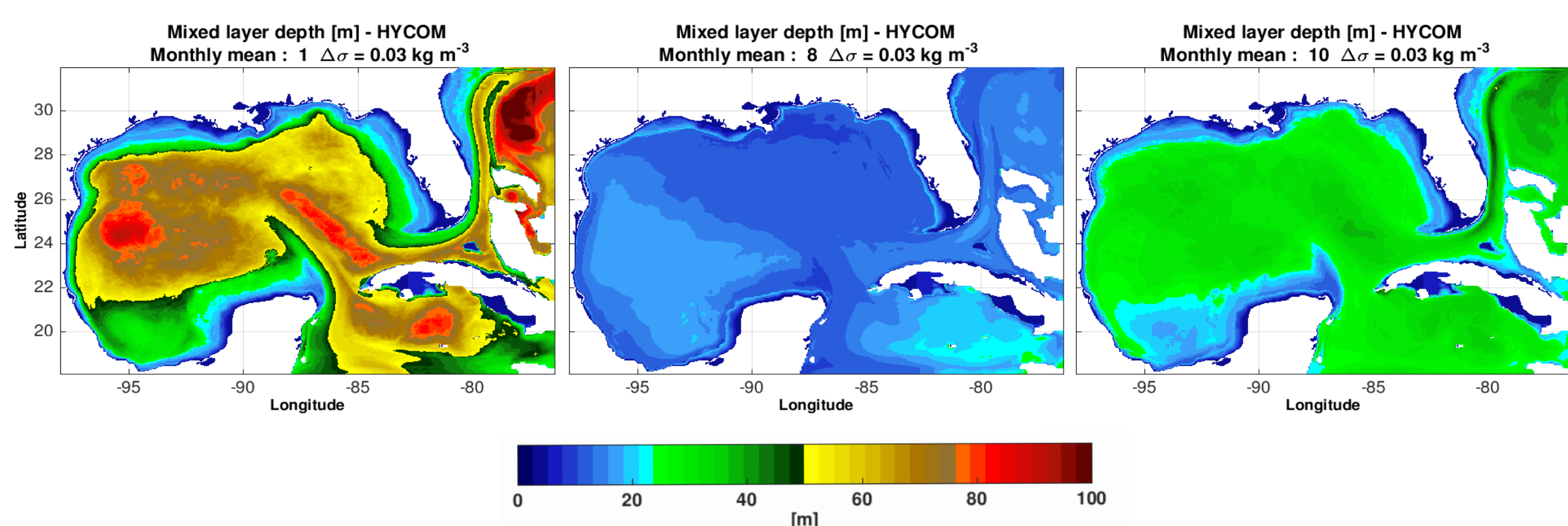


Figura 5. Promedio mensual de la profundidad de la capa de mezcla (MLD, Mixed Layer Depth). En los meses invernales se presenta mayor profundidad de la MLD y para los meses de verano se observa menor profundidad de la MLD, esto es, el océano está más estratificado debido al calentamiento superficial y a la termoclina poco profunda para esta temporada. Finalmente se rompe

esta condición de estratificación hacia finales de verano siendo más notoria en octubre. Los gráficos de boxplot contienen las cajas para los cuartiles de 25%, 50% y 75%, las barras son valores extremos, y los valores atípicos son presentados en con asterisco rojo, (arriba) HYCOM vs (abajo, cortesía Orens de Fommervault, CICESE, con datos de BOEM, EUA).

## Circulación profunda - Región Oeste del Golfo de México

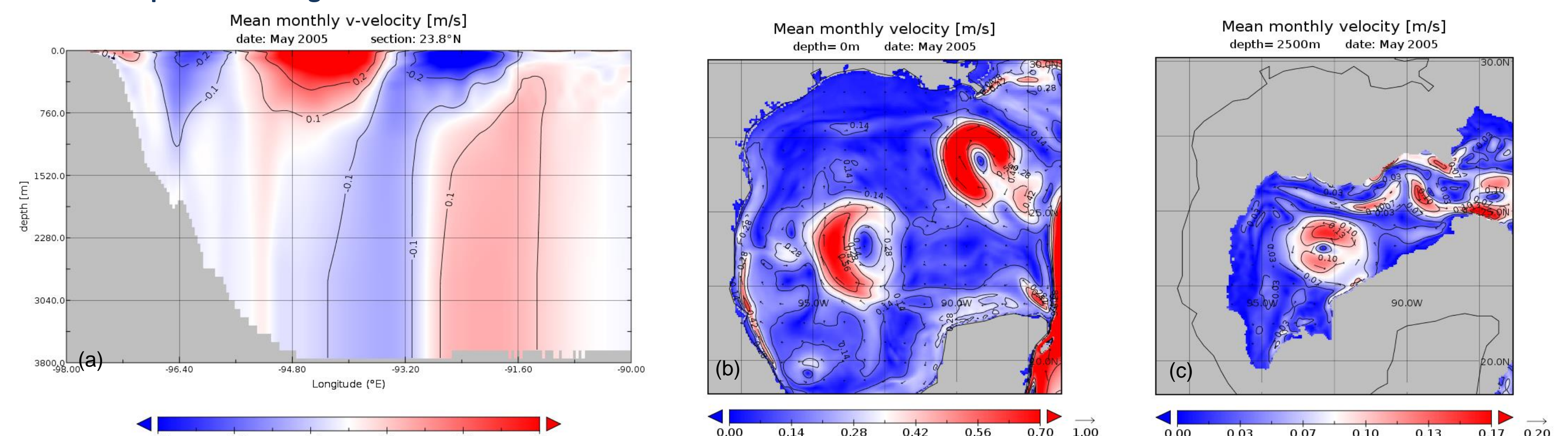


Figura 6. (a) Promedio mensual (may 2005) de la componente de velocidad- $v$  a lo largo de la sección  $23^\circ N$ , (rojo) hacia el norte, (azul) hacia el sur. En la superficie se observa un giro anticiclónico, y abajo se observa un giro abisal ciclónico que tiene una duración un poco mayor al giro anticiclónico; a medida que el giro anticiclónico decae, el giro ciclónico profundo decae también, esto coincide a lo reportado por Tenreiro et al. (2018)<sup>[4]</sup>. (b) Magnitud de la velocidad vista en planta para la superficie y (c) a 2500m de profundidad. Se observa el giro anticiclónico en la superficie y ciclónico en la profundidad. Este fenómeno se presenta cada vez que hay un giro anticiclónico en el oeste del GoM.

## Métricas comparativas

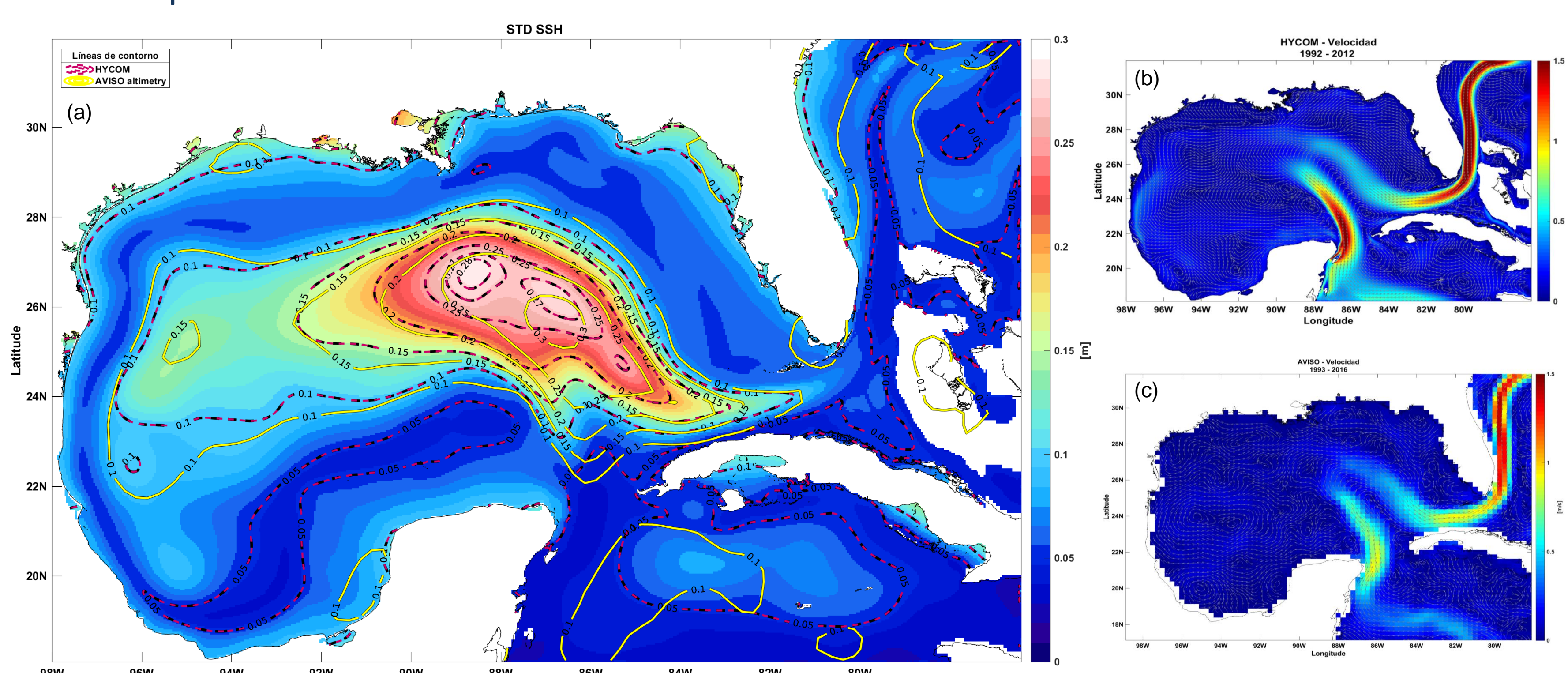


Figura 1. (a) Desviación estándar de la superficie del mar (m) para los 21 años simulados de HYCOM (contornos con línea interrumpida) vs AVISO – observaciones de altimetría de 1993 a 2017 (contornos con línea continua). La tendencia del incremento del nivel del mar fué removida para la base de datos AVISO. (derecha) Promedio de la magnitud de velocidad superficial ( $m s^{-1}$ ) para los 21 años simulados de HYCOM (b) vs AVISO (c) – observaciones de altimetría de 1993 a 2017.

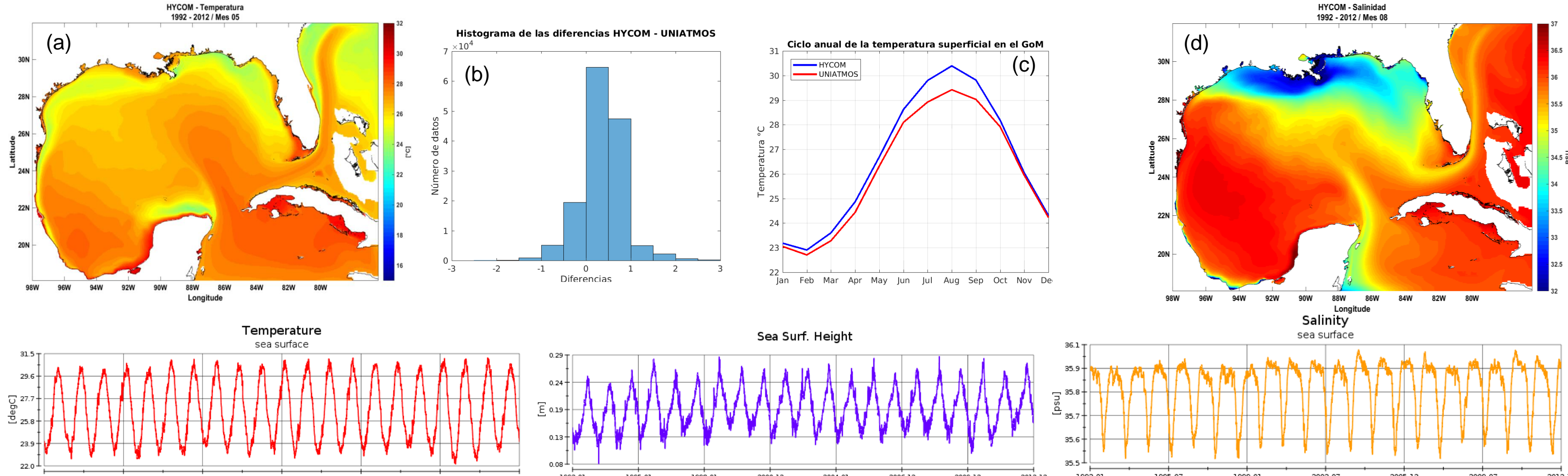


Figura 2. (a-c) Promedio mensual de la temperatura superficial para los 21 años de HYCOM vs UNIAIMOS (Observaciones de satélite). (a) Ejemplo del mes de mayo, se observa la surgencia quasi-permanente en la península de Yucatán. (b y c) Diferencias entre el modelo vs lo observado. (d) Promedio mensual de salinidad, ejemplo del mes de Agosto; (abajo) Series de tiempo a lo largo de 21 años de simulación con HYCOM, en la superficie del dominio, para temperatura, superficie libre del mar y salinidad.

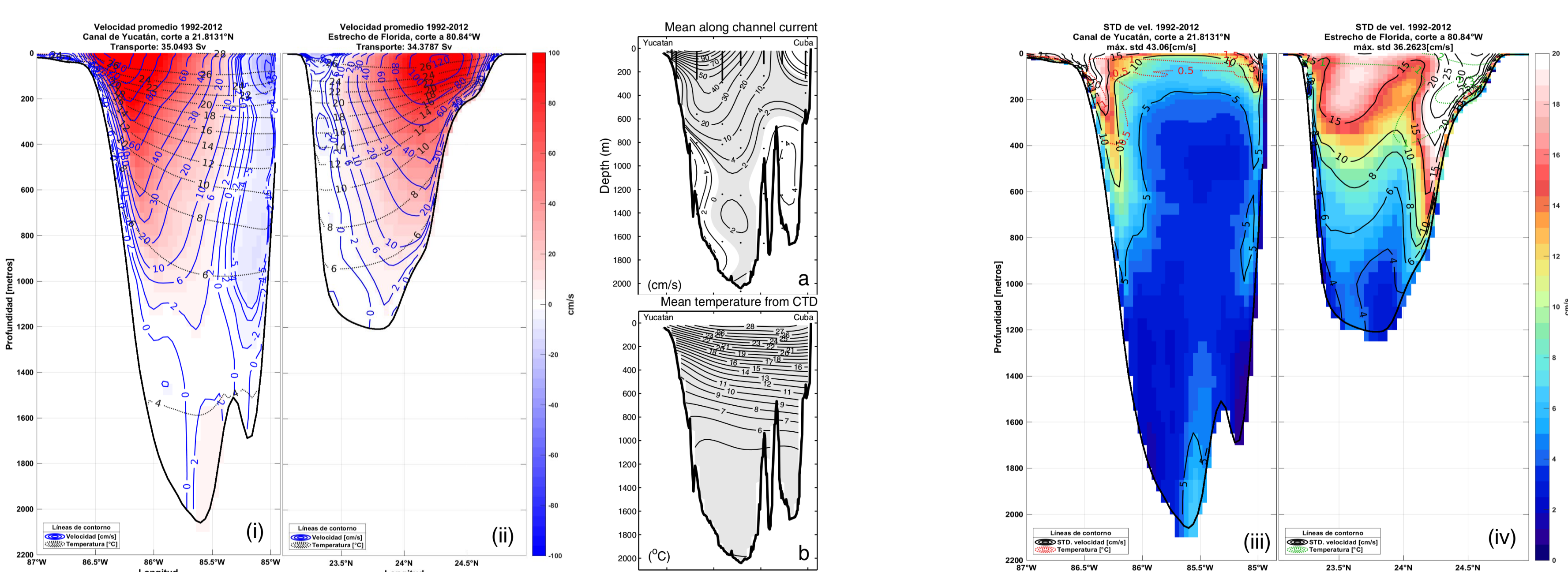


Figura 3. (i) promedio de la velocidad -  $v$  ( $cm s^{-1}$ ) para un corte zonal en el Canal de Yucatán (CY) a una latitud de  $21.81^\circ N$  y su promedio de la temperatura para la misma sección; (a y b) Sección y variables similares a (i) de Sheinbaum et al., (2002)<sup>[1]</sup>. (ii) Similar a (i), corte meridional en el Estrecho de Florida (EF) a una longitud de  $34.37^\circ W$  de la componente -  $u$  ( $cm s^{-1}$ ). (iii) y (iv) Desviación estándar de datos diarios para los mismos cortes, respectivamente. El transporte entrante al GoM por el CY es de  $\sim 35 Sv$  y el transporte saliente a través del EF es de  $\sim 34 Sv$ . Las máximas variaciones de la Corriente del Lazo (LC) se observan desde la superficie hasta el talud continental llegando a  $\sim 200m$  en el CY y a  $\sim 400m$  en el EF de profundidad.

## Corriente del Lazo

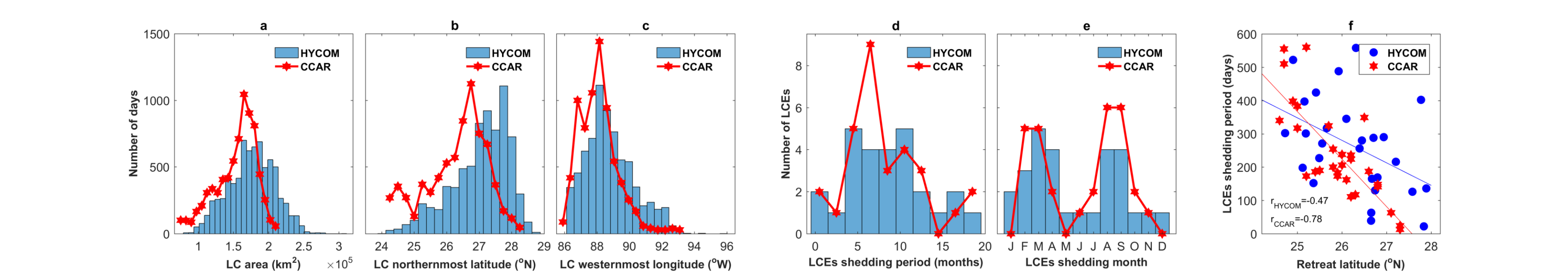


Figura 4. Comparación de métricas de la Corriente del Lazo (LC) y Remolinos de la Corriente del Lazo (LCEs) (diámetro > 150 km) utilizando HYCOM y datos de altimetría CCAR (Hall, 2014)<sup>[2]</sup> de 1993-2012. HYCOM exhibe mayor extensión y penetración de la LC (a, b y c); reproduce adecuadamente la periodicidad y bimodalidad del desprendimiento de los LCEs (d y e); y presenta una menor correlación en el indicador de pronóstico estadístico propuesto por Leben (2005)<sup>[3]</sup> (f).

## Referencias

- Sheinbaum J., Candela J., Badan A., Ochoa J. 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. Geophysical Research Letters, vol. 29, No. 3, 1040.
- Hall C. 2014. The Seasonality of the Loop Current. PhD Thesis, University of Colorado Boulder, United States.
- Leben, R., 2005. Altimeter-Derived Loop Current Metrics. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models, Geophys. Monogr., eds. W. Sturges and A. Lugo-Fernandez, 161, Eos, Trans. Amer. Geophys. Union.
- Tenreiro M., Candela J., Pallás-Sanz E., Sheinbaum J., Ochoa J. 2018. Near-Surface and Deep Circulation Coupling in the Western Gulf of Mexico. American Meteorological Society, January 2018. p. 145-161.
- Pérez-Brunius P., Furey H. & Bower A., Hamilton P., Candela J., García-Carrillo P., Leben R. 2018. Dominant Circulation Patterns of the Deep Gulf of Mexico. American Meteorological Society, March 2018. p. 511-529.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Sectorial CONACYT - SENER - Hidrocarburos, proyecto 201441. Esta es una contribución del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM).