

Unidades oceanográficas del Golfo de México y áreas adyacentes: La integración mensual de las características biofísicas superficiales

Oceanographic units of Gulf of Mexico and adjacent areas: The monthly integration of surface biophysical features

Uribe-Martínez, A.^{*}, Aguirre-Gómez, R., Zavala-Hidalgo, J., Ressler, R. y Cuevas, E.

Received: November 14, 2018; accepted: July 09, 2019; published on line: October 01, 2019

Resumen

El Golfo de México (GoM) es una región oceánica de una dinámica y complejidad particular, que se evidencia en las variaciones espacio temporales de la configuración de sus aguas superficiales. Varios estudios han utilizado las características superficiales térmicas, biológicas o de circulación para proponer subdivisiones estáticas del GoM; sin embargo, ninguna investigación ha regionalizado la zona integrando distintos aspectos oceanográficos de forma dinámica. El objetivo de este trabajo fue proponer una división del GoM que considerara las características físicas y biológicas y que permitiera analizar la evolución mensual espacial de las unidades en un año promedio. Utilizamos análisis multivariados para reconocer la estructura subyacente de los datos, para generar una expresión espacial mensual de los conglomerados y para probar la robustez de los resultados. Se obtuvieron 18 regiones denominadas unidades oceanográficas (UO) que condensan diversas características superficiales del GoM. Se observaron dos grupos de UO: aquellas que están relacionadas con las

propiedades de circulación y aquellas que fueron definidas por la asociación de las características biológicas y térmicas. Quince UO están presentes a lo largo del año, mientras que dos tienen presencia únicamente en verano. Todas las UO tienen variaciones temporales tanto en sus características biofísicas como en su expresión espacial. Este estudio propone una manera novedosa de particionar un sistema marino y aporta parámetros cuantitativos interpretables de las UO propuestas. La representación de la variabilidad de unidades oceanográficas homogéneas provee información valiosa para el manejo diferenciado de recursos marinos asociados temporalmente a masas de agua específicas. Los resultados obtenidos proveen también bases robustas para analizar de manera condensada la dinámica de largo plazo de un sistema tan complejo como es el GoM.

Palabras clave: Regionalización marina, análisis espacio-temporal, oceanografía satelital.

Uribe-Martínez, A.^{*}
Posgrado en Geografía
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito de la Investigación Científica
Cd. Universitaria, C.P. 04510
Ciudad de México
^{*}Corresponding author: abigailum@gmail.com

Aguirre-Gómez, R.
Instituto de Geografía
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito de la Investigación Científica
Cd. Universitaria, C.P. 04510
Ciudad de México

Zavala-Hidalgo, J.
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito de la Investigación Científica
Cd. Universitaria, C.P. 04510
Ciudad de México

Ressler, R.
Comisión Nacional para el Conocimiento
y Uso de la Biodiversidad
Liga Periférico - Insurgentes Sur #4903
Tlalpan, 14010
Ciudad de México

Cuevas, E.
Universidad Autónoma del Carmen
Calle Laguna de Términos S/N
Renovación 2da Sección, 24155
Cd. del Carmen, Campeche

Abstract

The Gulf of Mexico (GoM) is a large marine ecosystem that has unique oceanographic dynamics, as it shows important spatio-temporal variations in the configuration of its surface waters. Several studies have used the thermal and biological features to subdivide the GoM, while other had provided subdivisions using circulation features. Nevertheless, none of those works have produced a dynamic regionalization that consider biological and physical features of the GoM simultaneously. The goal of this work was to propose a dynamic division of the GoM which considers physical and biological features and to analyze the monthly spatial evolution of regions in an average year. We used statistical multivariate analysis to recognize the underlying structure of the data, to generate a monthly expression of clusters and to test the robustness of the achieved regionalization. We obtained 18 regions called oceanographic units (UO) that merged unique surface characteristics of the GoM and that had a monthly spatial configuration. We observed two main groups of UO: those that are mainly

related with circulation properties and those that were defined by its biological and thermal associations. Fifteen UO were present all year long, while three of them were only present some months. All UO have monthly internal variations and their boundaries displayed seasonal spatial variation; however, they remained well differentiated from each other. This study offers a novel way to divide an oceanic system, which provides quantitative and pragmatic parameters that can help to develop monitoring systems considering the intrinsic ocean dynamics. The information about oceanographic unit variability provides valuable information to promote marine resources management, in concordance to their temporal association with certain water masses. These results also provide the basis to analyze interannual variations of oceanographic units to offer information about the sea surface dynamics and to help understanding a complex system such as Gulf of Mexico.

Key words: Marine regionalization, spatio-temporal analysis, satellite oceanography.

Introduction

La regionalización de los océanos ha sido una forma de estudiar grandes porciones de mar desde hace varias décadas, con aproximaciones, interpretaciones, insumos y sobre todo objetivos distintos (Esaias *et al.*, 2000; Yáñez-Arancibia y Day, 2004; Longhurst, 2006). Los diversos enfoques para regionalizar los mares han servido de base para otras propuestas de organización de grandes extensiones marinas de acuerdo con sus características físicas, químicas o biológicas.

El Golfo de México (GoM) ha sido objeto de diversas divisiones que han abordado aspectos de su oceanografía de forma independiente. Los primeros trabajos se enfocaron en una visión estática del ecosistema (Yáñez-Arancibia y Day, 2004; Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2006). Otros trabajos han considerado la variación espacio temporal de parámetros físicos y biológicos como en Salmerón-García *et al.* (2010), donde, a partir de un análisis de la concentración de clorofila *a* derivada de imágenes SeaWiFS, obtuvieron 14 regiones con patrones temporales diferenciables a partir de un análisis de componentes principales. Por su parte, Callejas-Jiménez *et al.* (2012) propusieron una regionalización de 11 regiones clasificadas en provincias oceánicas y costeras,

diferenciadas a partir de la razón entre las bandas azul y verde de imágenes MODIS.

Más recientemente, Miron *et al.* (2017) presentaron una propuesta de la geografía dinámica lagrangiana del GoM a partir de un análisis de una gran colección de datos provenientes de boyas de deriva. En este estudio que integra de manera condensada la variabilidad temporal de la circulación, se reconocieron siete regiones entre las que se estima que el intercambio de partículas sea muy bajo, mientras que al interior de cada región se prevé que sea más intenso.

La delimitación oceánica del GoM ha sido un reto, debido a que sus características oceanográficas tienen un comportamiento altamente dinámico (Muller-Karger *et al.*, 2015). El GoM es una cuenca semicerrada cuya dinámica oceanográfica tiene una fuerte influencia de las aguas que ingresan del Mar Caribe por el canal de Yucatán. A su vez, la salida de agua del interior hacia el Atlántico a través del canal de Florida, tienen influencia en las características oceanográficas de la costa oeste de Estados Unidos (Fiechter y Mooers, 2007).

Una de las características de circulación es la corriente del Lazo, la cual presenta grandes

variaciones de forma, extensión y penetración al interior del GoM, y que suministra una amplia gama de giros y remolinos que se desprenden de ella (De la Lanza-Espino, 2004). A pesar de que el GoM tiene un ciclo térmico estacional marcado (Muller-Karger *et al.*, 1991), existen diferencias de la amplitud de los rangos térmicos entre regiones con variaciones intra- anuales muy marcadas en la zona norte, en contraste con las mínimas diferencias estacionales que se presentan al sur (Muller-Karger *et al.*, 2015).

El GoM es considerado como una ecoregión de productividad moderada (Heileman y Rabalais, 2009), pues cuenta con importantes aportes de nutrientes provenientes de las descargas de ríos como el sistema Grijalva-Usumacinta y el Misisipi-Atchafalaya. Aunado a esto, en las zonas de la plataforma y talud continental se observan las mayores concentraciones de clorofila mientras que en la zona oceánica, con menores concentraciones se han detectado variaciones estacionales y asociadas los giros de mesoescala (Muller-Karger *et al.*, 1991).

Las diversas regionalizaciones que se han planteado han servido de base para diferentes propósitos, como proveer información para el manejo integrado de regiones marinas (Córdova *et al.*, 2009; Wilkinson, 2009), o como base para estudios ecosistémicos integrados (Roff *et al.*, 2003; Yáñez-Arancibia *et al.*, 2013). Sin embargo, también se ha reconocido que los esfuerzos de monitoreo y manejo dependen de los componentes que pueden ser observados y medidos de manera continua, los cuales pueden utilizarse como aproximaciones o sustitutos para la identificación de características claves de los ecosistemas (Zacharias y Roff, 2000; Roff y Zacharias, 2011). Observar la dinámica espacial y temporal de las regiones, así como su variabilidad estacional resulta fundamental para conocer cómo estas variaciones se asocian a la disponibilidad de recursos de interés comercial o de conservación, y con ello proveer mejores esquemas de manejo y protección (Longhurst, 2006; Díaz de León *et al.*, 2009).

Hasta ahora las regionalizaciones del GoM han ofrecido distintas subdivisiones, físicas y biológicas que aportan elementos independientes para distinguir configuraciones estáticas del paisaje. Estos planteamientos estáticos han omitido las diferentes configuraciones espaciales que una masa de agua de características similares puede tener en diferentes épocas del año. A pesar de que algunas regionalizaciones del GoM

han involucrado la dinámica temporal (Miron *et al.*, 2017), ninguna había presentado las variaciones espacio temporales de las regiones o la aparición de conglomerados distintos a las condiciones circundantes, como en el caso de las surgencias estacionales o las aportaciones de agua fría, rica en nutrientes provenientes de los ríos. En contraparte, en el presente trabajo proponemos una subdivisión dinámica del GoM, en la que se realiza la integración de parámetros tanto biológicos como físicos, a la vez que se analizan las distintas configuraciones espacio temporales de los segmentos obtenidos.

La percepción remota ha contribuido significativamente en el análisis de procesos ecológicos a escalas regionales, por lo que varias aproximaciones han abordado el tema de las provincias marinas con base en el análisis de imágenes satelitales (Esaías *et al.*, 2000; Saraceno *et al.*, 2006; Palacios *et al.*, 2006; Hobday *et al.*, 2011). Por su parte, el modelado numérico permite entender la dinámica oceánica o bien predecir el movimiento de las masas de agua, sin que hasta el momento se hayan utilizado para delimitar regiones marinas. Ambas técnicas de observación y análisis proveen información integral de las condiciones del GoM, y que al analizarse en conjunto permiten tener un panorama sinóptico y multitemporal.

El objetivo de este trabajo fue identificar unidades oceanográficas del GoM equiparables mensualmente a partir de la integración de datos biofísicos derivados de percepción remota y modelado numérico y analizar su dinámica en un año promedio. En este trabajo se define una *unidad* como una entidad de características biofísicas superficiales similares e indivisibles con un conjunto de datos dados a una escala fija (IOCCG, 2009). Se presentan los métodos utilizados para encontrar la estructura de los datos, la definición ambiental de las unidades obtenidas y el análisis de sus variaciones espacio temporales.

Este trabajo presenta una forma novedosa de particionar una región de alto interés económico y ecológico al integrar distintos aspectos oceanográficos. Con ello se proponen provincias marinas que incorporan aspectos que influyen o incluso definen la configuración de hábitats y ecosistemas marinos y que no son estáticos a lo largo del tiempo. La visión de este trabajo es establecer un precedente para monitorear la evolución de las unidades oceanográficas a lo largo del tiempo y con ello aportar elementos cuantitativos de sus anomalías en el mediano plazo.

Materiales y Métodos

El área de estudio comprende el GoM, entre los 98°O, 30.5°N y los 78°O, 18°N, donde se incluyen las zonas de influencia de la trinchera del Caimán y la salida de agua hacia el Atlántico (Figura 1).

Los insumos utilizados para los análisis se obtuvieron de diversos productos satelitales y de modelado numérico que se describen a continuación.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

En México, la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad procesa los productos oceanográficos del sensor Aqua-MODIS a una resolución espacial de 1 km para México (Cerdeira-Estrada y López-Saldaña, 2011). De aquí se obtuvieron los compuestos mensuales de los productos:

Temperatura superficial del Mar Nocturna (NST), Concentración de la Clorofila *a* (CLO) y altura de la línea de fluorescencia (FLH) de enero de 2003 a diciembre de 2013 (CONABIO, 2014).

Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO).

Es un sitio que distribuye los productos del proyecto Ssalto/Duacs.

En este acervo se realiza la unificación de productos de altimetría de distintas misiones (Saral, Cryosat-2, Jason-1y2, Topex/Poseidon, Envisat, GFO, ERS-1 y 2, Geosat). De aquí se obtuvo la topografía dinámica del mar (ADT) de enero de 2003 a diciembre de 2013 en promedios mensuales rasterizados. Se utilizó el conjunto DUACS 2014 procesado con un período de referencia del 1993-2012, a una resolución espacial de ¼ de grado (AVISO, 2016).

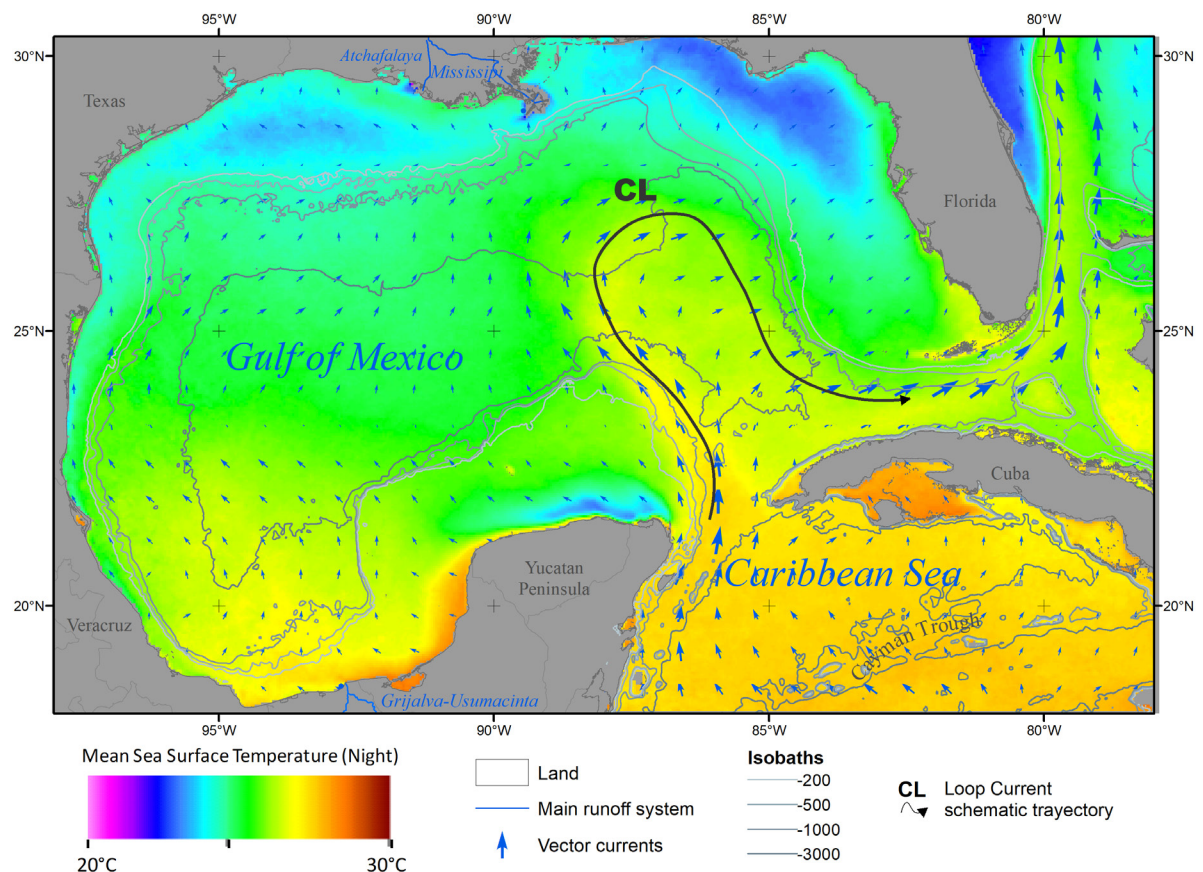


Figura 1. Área de Estudio con el promedio climatológico para el mes de mayo de la temperatura nocturna de la superficie del mar (NST) con los vectores resultantes de la circulación superficial para el mismo mes (flechas azules). En tonos de gris se sobrepone las isobatas más representativas (tonos de gris) y las entradas de los principales afluentes de los sistemas Grijalva-Usumacinta y Atchafalaya-Misisipi. Se presenta un esquema de la trayectoria típica de la Corriente del Lazo (flecha en negro).

Modelo oceánico de coordenadas híbridas (HYCOM).

El consorcio multiinstitucional HYCOM desarrolla modelo numérico de circulación oceánica híbrido generalizado con asimilación de datos llamado HYbrid Coordinate Ocean Model (Halliwell, 2004). Los modelos HYCOM permiten que las regiones poco profundas y costeras sean modeladas considerando un sistema coordinado de terreno que incorpora fronteras laterales y batimétricas, mientras que en el océano abierto utiliza un sistema de coordenadas Z en la capa de mezcla y se ajusta suavemente a un sistema de coordenadas isopícnicas por debajo de esta, donde el flujo de las corrientes sigue superficies de igual densidad. Este modelo permite la evolución dinámica de las coordenadas verticales tanto en tiempo como en espacio, lo que hace que HYCOM sea una buena opción para aplicarlo en dominios que incluyen tanto océano abierto como aguas poco profundas. El modelo también utiliza el sistema de asimilación de datos NCODA (Navy Coupled Ocean Data Assimilation) que incorpora altimetría satelital, altura promedio de la superficie del mar, forzamientos atmosféricos y temperatura superficial del mar (HYCOM, 2017). Particularmente, el experimento sobre el Golfo de México genera una simulación de 1/25° de resolución espacial del que se obtuvieron los experimentos 20.1 (datos del 2003 al 2009) y 31.0 (datos de abril del 2009 a diciembre de 2013) (HYCOM, 2017). La resolución horizontal relativamente alta esta adaptada para estudiar la dinámica de la Corriente de Lazo y los giros y remolinos que se desprenden de ella. Aunque se han documentado deficiencias del modelo en resolver la frontera entre el océano y la plataforma (Le Hénaff *et al.*, 2012), sale de los alcances de esta investigación analizar las interacciones entre estructuras de mesoescala.

De este conjunto de datos se descargaron los componentes U y V de la representación vectorial de la corriente superficial (CSU y CSV) y la resultante de la magnitud a 0m (CSMag), al igual que la salinidad superficial (SAL), todos ellos en promedios diarios.

Preprocesamiento de insumos

Para el caso de los productos derivados de modelos de circulación HYCOM, se construyeron composiciones mensuales ya que originalmente se generan como un panorama instantáneo de forma diaria.

A partir de la serie de tiempo de promedios mensuales del 2003 al 2013, se generaron

compuestos climatológicos mensuales (promedio aritmético) de todos los parámetros en su resolución original. En el caso de la ADT, los pixeles se disgregaron en seis partes iguales para aumentar artificialmente la resolución a 4.16 km, conservando su valor original.

Para homologar todos los rasters en términos del origen, resolución espacial (4 km), número de pixeles y proyección cartográfica, se realizó un remuestreo con una interpolación por el vecino más cercano (Li y Heap, 2008). Para el caso de CLO y FLH se realizó una transformación recíproca de la forma $x' = x^{-1}$ (donde x es el valor original del pixel) para simetrizar la distribución de las variables ya que están fuertemente sesgadas hacia valores pequeños. Esta transformación permite mantener la interpretación de las variables (en sentido opuesto), con un efecto en la distribución de los valores, al comprimir los más altos y expandir los bajos, lo que favorece la diversificación de los datos para la posterior segmentación (Quevedo-Urías y Pérez-Salvador, 2014).

Estructura de datos

Como requisito para utilizar los algoritmos de agrupación, los datos se estandarizaron para minimizar errores de agrupamiento derivados de las diferentes escalas de las unidades utilizadas. Se generaron diferentes clasificaciones no supervisadas utilizando el algoritmo *k-means* (Jain, 2010) con el método de Hartigan and Wong implementado en la función *kmeans* de R (Everitt y Hothorn, 2016) para encontrar la estructura de los datos con base en la homogeneidad de las variables. En cada escenario se evaluó la variabilidad óptima dentro y entre grupos, la coherencia espacial y la aportación de las variables a la separación de las clases. Este proceso se realizó de forma iterativa, hasta lograr un resultado que permitiera el reconocimiento de clases de manera consistente intermensualmente, es decir, que las clases obtenidas fueran equiparables entre meses. Para obtener el número de clases adecuado para cada conjunto de datos mensual, se generaron clasificaciones no supervisadas de entre 3 y 20 clases. Se determinó cuál representaba el menor cambio en la variación entre las clases, que fue evaluado como la suma total de cuadrados del error dentro de cada grupo (Tan *et al.*, 2018).

De forma independiente para cada conjunto de datos mensual, se obtuvieron métricas de disimilitud entre los centros de clase (Tan *et al.*, 2018). Se evaluó la separabilidad de las clases mediante la distancia euclidiana del conjunto

de los promedios de los parámetros biofísicos. También se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico con el método de mínima varianza expresado en dendogramas (Gotelli y Ellison, 2004). De esta forma, se agruparon las clases con características similares y que presentaran dificultad para separarse espacialmente y se mantuvieron aquellas clases con disimilitudes constantes.

Definición ambiental de unidades oceanográficas

La definición ambiental se conceptualizó como el conjunto de características que diferencian de forma única a una clase. Tal definición se establece como el promedio y desviación estándar mensual de los parámetros biofísicos que la distinguen del resto de las clases obtenidas con el proceso no supervisado. Para lograrlo, se realizó un proceso iterativo de depuración, de tal forma que las curvas de valores mensuales de cada parámetro fueran consistentes y definieran cada clase de manera única a lo largo del año. Particularmente, las variables de circulación se manejaron como constantes en todos los meses para todas las clases, ya que no presentaron evidencia de variar estacionalmente.

Las clases depuradas y definidas ambientalmente se denominaron *unidades oceanográficas* (UO), en donde cada UO se diferencia del resto en al menos uno de los parámetros. A fin de mantener la estabilidad en la definición ambiental de las UO a lo largo del año, se buscó que se mantuviera una relación constante entre sus parámetros con el resto de las UO. Para visualizar la definición ambiental mensual, se utilizaron diagramas de caja y bigote.

Para cuantificar la separabilidad y confusión entre las clases, se realizó un análisis de discriminante lineal (LDA) para cada mes. El LDA es una técnica que determina la combinación lineal de variables que mejor separa las clases al maximizar la relación entre las varianzas inter e intraclase, que se puede interpretar como un agrupamiento en reversa (Gotelli y Ellison, 2004). La técnica permite la predicción *a posteriori* de nuevas observaciones, lo que la convierte en una técnica tanto de análisis como de clasificación supervisada (Xanthopoulos *et al.*, 2013). Esta técnica asume una distribución normal de los patrones y discrimina bien si las diferencias se encuentran en los promedios de los valores. Esto hace que la prueba de separabilidad sea suficientemente exigente y robusta para asumir diferencias representativas entre las UO.

La fase de entrenamiento de los LDA se efectuó de forma mensual con 100 realizaciones aleatorias de la definición ambiental de cada UO. Estos conjuntos de valores fueron clasificados para su mes correspondiente y la clasificación obtenida se evaluó cuantitativamente con apoyo visual. Se obtuvieron matrices de confusión mensuales en las que se contrastaron los datos de entrenamiento contra lo predicho por el LDA. Se definió el 20% como el error máximo aceptable entre UO (Chuvieco, 1995). Aquellas con confusiones mayores fueron redefinidas o reagrupadas, ya que se asume que esto representa el grado de yuxtaposición entre las definiciones ambientales de las UO o bien áreas de transición.

Distribución espacial de las UO

Cada modelo LDA mensual obtenido se utilizó para clasificar el área de estudio y obtener la distribución espacial de las UO. Como parte del proceso de depuración, se consideró la coherencia espacial (en términos de vecindad y forma) de la definición ambiental. Debido a que se presentaron confusiones de clasificación entre píxeles de características biofísicas similares pero separados espacialmente (i.e. distintas UO), se adicionó un conjunto de reglas para considerar la ubicación como un criterio para asignar una UO. La contribución de las variables a la separabilidad de las UO se evaluó con gráficas de ordenación de los dos primeros componentes discriminantes. Finalmente, se obtuvieron las distancias euclidianas entre los centroides de las UO para representar su relación en dendogramas.

Validación

La confusión final entre la definición ambiental de las UO se evaluó con matrices de confusión mensuales (Chuvieco, 1995). Se generaron 100 nuevas realizaciones de la definición ambiental de cada UO, de forma similar a la realizada para la clasificación supervisada. Estas realizaciones se contrastaron contra las predicciones del modelo mensual de clasificación. Las doce matrices de confusión mensual se promediaron para obtener una matriz de confusión general.

Resultados

El resultado final de este trabajo fue la definición ambiental y la representación espacial mensual de 18 unidades oceanográficas (UO) climatológicas del Golfo de México y áreas adyacentes como el producto de la integración de datos biofísicos derivados de percepción remota y modelos numéricos.

Estructura de datos

Se obtuvieron 12 compuestos climatológicos mensuales para los parámetros: ADT (topografía dinámica del mar), CLO (concentración de clorofila a), CSU y CSV (componentes de los vectores de corrientes superficiales), CSMag (magnitud de la corriente superficial), FLH (altura de la línea de fluorescencia de la clorofila), SST (temperatura superficial del mar) y SAL (salinidad superficial).

Se generaron doce clasificaciones no supervisadas mensuales únicas. El número de grupos (k) fue determinado a partir de los valores del error dentro de cada clase, lo que permitió mantener la consistencia entre los meses, con el mínimo de error. De los meses de enero a agosto se utilizó una $k=13$, mientras que para septiembre, octubre y noviembre una $k=15$. Para diciembre se estableció una $k=14$ debido a que los meses de otoño presentan las condiciones más variables interanualmente, por lo que los parámetros promediados pierden la homogeneidad observada en el resto del año.

Para casi todos los meses, excepto de mayo a julio, se unieron las clases que dividían la zona central del GoM, pues éstas tenían una forma poco consistente entre meses. En las clasificaciones no supervisadas, la separación de la corriente del Lazo del GoM Norte se diluye a partir de agosto y hasta noviembre, por lo que esta UO se redefinió con base en sus parámetros ambientales.

Definición ambiental de unidades oceano-gráficas

Se obtuvo un esquema de definiciones ambientales de 14 unidades oceanográficas (UO) diferenciables por sus características biofísicas más cuatro UO separadas espacialmente (tabla 1) y con una secuencia consistente a lo largo del año de los parámetros que las definen por sus valores promedio y desviación estándar (Figuras 1-3). Mensualmente se observan entre 15 y 18 UO, ya que las UO 11. *Surgencia de Yucatán*, 15. *Costa oeste* y 18. *Surgencia de Tabasco*, se presentan estacionalmente entre mayo y agosto. El resto de las UO tienen representación a lo largo del año, con variaciones tanto en los parámetros biofísicos (Figuras 2-4) como en su extensión (Figuras 7).

En los dendogramas de los centros de clase, se observan dos grupos generales de unidades (Figura 5): las definidas por la circulación (UO 6, 7, 2, 8, 3, 1, 4, 5) y aquellas con rasgos

costeros definidos por la NST y el InvCLO (UO 10, 11, 12, 9, 13, 14). Los gráficos de ordenación mensuales derivados de LDA presentaron resultados similares (Figura 6). De forma conjunta, todas las UO que pertenecen al sistema de circulación de la corriente del Lazo (UO 1 a 5) son las de mayor magnitud de la corriente superficial, particularmente la UO 4. *Corriente del Golfo*, siendo la más intensa con dirección marcadamente hacia el norte (Figura 2). Al otro extremo se ubican las plataformas conformadas por las UO 12. *Plataforma Continental sur*, incluyendo a sus UO derivadas (UO 16 y 17) y la UO 13. *Plataforma Oeste de Florida* con corriente superficial más débil. El resto de las UO son de magnitud de corriente baja, cercanas a 0 m/s y con poca variación, a excepción de la 6. *Corriente del Caribe* de magnitud de corriente superficial media.

Se distinguen también las UO de NST y SAL opuestas (Figura 3): por un lado la UO asociadas a las masas de agua del Caribe más salinas, en contraposición con las aguas frías del norte del GoM (UO 9, 10 y 14), además de la UO 11. *Surgencia de Yucatán*, las cuales a su vez presentan altas concentraciones de CLO (representado como valores bajos del InvCLO, Figura 4).

La mayoría de los parámetros biofísicos (con excepción de las corrientes superficiales), presentan una oscilación estacional de sus valores en todas las UO (Figuras 3 y 4). Por ejemplo, las UO del norte del GoM que presentan variaciones térmicas anuales de hasta 15°C, como en la UO 10. *Costa norte* donde se observan los valores de NST más bajos de noviembre a marzo, pero los más altos de la región en agosto. En contraste, se distinguen algunas UO cuya variabilidad es muy corta y mantienen valores altos de estos parámetros, particularmente las del Mar Caribe (UO 5, 6 y 7). Un patrón diferente se observa en la UO 14. *NE Florida*, que muestra temperaturas bajas y la ADT mínima de la región a lo largo del año.

En la salinidad se distinguen UO de variabilidad muy alta, tanto anual como mensualmente (Figura 3c). Las UO del norte (9 y 10) tienen las salinidades más bajas de la región con variaciones de más de 4 UPS entre los meses de verano e invierno. De ellas resalta la UO 10, la cual refleja las amplias variaciones de salinidad que se esperan de la influencia del sistema de ríos de la costa de Estados Unidos. La UO 8. *Golfo Central* oscila anualmente de forma similar a las anteriores, pero presenta un rango de variabilidad mensual menor pero de valores más altos que las anteriores. De

Tabla 1. Características principales que establecen las diferencias más evidentes entre las clases de las unidades oceanográficas. Además de las abreviaturas ya mencionadas anteriormente, se utilizan CL=Corriente del Lazo y CS=Corriente Superficial.

| Nombre | Características principales |
|--------------------------------|--|
| 1 Corriente de Lazo Sur | Sector de la CL con componente en U negativo (siendo el menor del GoM), y magnitud ligeramente más alta que su contraparte al Norte (CL Norte). La ADT y NST también son mayores que la CL Norte. |
| 2 Corriente Lazo Norte | Representa el segmento de flujo hacia el SE (componente U de la CS más alto del GoM) de la CL de aguas cálidas y ADT alta. |
| 3 Corriente de Florida | Flujo intenso marcadamente al Este (componente en U de la CS más alto y la segunda en magnitud) de NST cálida y parámetros biológicos bajos (CLO y FLH). |
| 4 Corriente del Golfo | Se definen por tener la magnitud de corriente (particularmente en su componente en V) más alta del área de estudio. Del grupo de UO más cálidas. |
| 5 Corriente de Yucatán | Ambientalmente similar a la UO 4 salvo por la NST que en este caso es más cálida. |
| 6 Corriente Caribe | ADT y NST más altas del área de estudio y de muy baja variación intra anual. CS es de baja magnitud, particularmente con flujo promedio hacia el NNO e intrusión de agua con bajas concentraciones de los parámetros biológicos (CLO y FLH). |
| 7 Atlántico | Similar a la UO 6 con NST ligeramente más baja al igual que sus concentraciones de los parámetros biológicos. CS de poca intensidad particularmente en el componente U. |
| 8 Golfo Central | Esta clase representa la porción del GoM más variable donde todos los parámetros analizados se presentan en sus valores promedio regionales. |
| 9 GoM Norte | Transición diferenciada entre la Costa Norte y el GoM central. Alta fluctuación de NST a lo largo del año, con concentraciones de CLO altas. Presenta las magnitudes de CS segundas más bajas. |
| 10 Costa Norte | Presentan los valores más altos en los parámetros biológicos (CLO y FLH) y la menor SAL a lo largo del año. De octubre a abril tiene la menor NST, aunque está se eleva y se iguala con la mayor parte del GoM durante el verano. |
| 11 Surgencia de Yucatán | UO bien separada durante el verano por las NST más frías y concentraciones elevadas de los parámetros biológicos (CLO y FLH). |
| 12 Plataforma Continental sur | Es la UO más salina del área con concentraciones de CLO considerables. |
| 13 Plataforma Oeste de Florida | Se separa de la UO 10. Golfo Norte por su salinidad marcadamente más alta, mayor concentración de clorofila y NST, particularmente durante el verano. |
| 14 NE Florida | Agua localizada entre la UO4. Corriente del Golfo y la Costa NE de la Florida. Es diferenciada por CS mucho menor que las aledañas, con la ADT más baja del área de estudio y concentraciones de CLO importantes. |
| 15 Surgencia de la Costa Oeste | UO ambientalmente similar a la UO 11, pero diferenciada por ubicación, ya que abarca una delgada franja costera en la costa oeste del GoM. |
| 16 Plataforma Cubana | Ambientalmente similar a la UO12. Plataforma Continental sur, separada por su ubicación, y no varía espacialmente a lo largo del año. |
| 17 Bancos de las Bahamas | Ambientalmente similar a la UO12. Plataforma Continental sur, separada por su ubicación, y no varía espacialmente a lo largo del año. |
| 18 Surgencia de Tabasco | Ambientalmente idéntica a la UO11. Surgencia de Yucatán, separada por su ubicación. Se presenta únicamente en julio y agosto. |

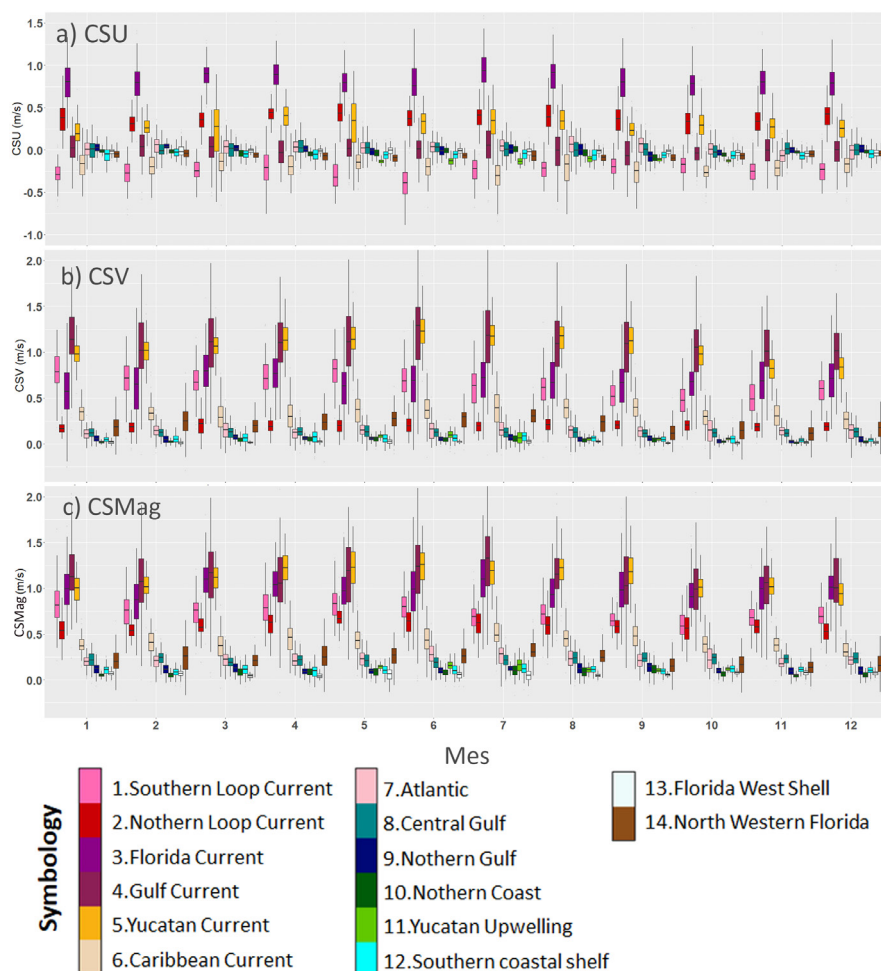


Figura 2. Gráficos de caja y bigote de los parámetros que definen la circulación: (a) CSU, (b) CSV y (c) CSMag, y que son obtenidos de la definición ambiental mensual de las unidades oceanográficas (promedio y desviación estándar de los parámetros) y que muestran la relación que guardan las unidades.

manera asincrónica, la UO 13. *Plataforma Oeste de Florida* presenta disminución de salinidad de julio a octubre y un aumento considerable en abril y mayo. A lo largo del año, la UO 12. *Plataforma Continental sur* y las UO derivadas de esta (16 y 17), tienen la salinidad más alta, excepto de agosto a octubre cuando ésta disminuye ligeramente (Figura 3).

En los parámetros biológicos se observan dos conjuntos de UO que evolucionan de forma disímil a lo largo del año (Figura 4). Por un lado, están las UO que mantienen consistentemente altas concentraciones de CLO y FLH, de las que resalta la UO 10. *Costa Norte*, seguida de la UO 11. *Surgencia de Yucatán* y como consecuencia las UO derivas: 15. *Costa Oeste* con presencia de mayo a octubre y 18. *Surgencia de Tabasco*, con presencia en julio y agosto. En el otro extremo están las UO del Mar Caribe con muy bajas concentraciones de los parámetros

biológicos, excepto la UO 5. *Corriente de Yucatán*, que presenta un aumento significativo entre julio y octubre.

De forma general, la circulación superficial de la región presenta componentes en U y en V (CSU y CSV) positivos, a excepción de las unidades 6. *Corriente Caribe* y 7. *Atlántico* con un componente de circulación hacia el oeste (CSU negativo). Con circulación hacia el este, están la UO 3. *Corriente de Florida*, seguida de las UO 2. *Corriente del Lazo Norte* y 5. *Corriente de Yucatán*; aunque ésta última es la segunda más intensa en CSV y la segunda en la magnitud de la corriente (CSMag) (Figura 2).

Distribución y variación espacial de las UO

Se generaron doce mapas de unidades oceanográficas del Golfo de México utilizando predicciones espaciales a partir de la

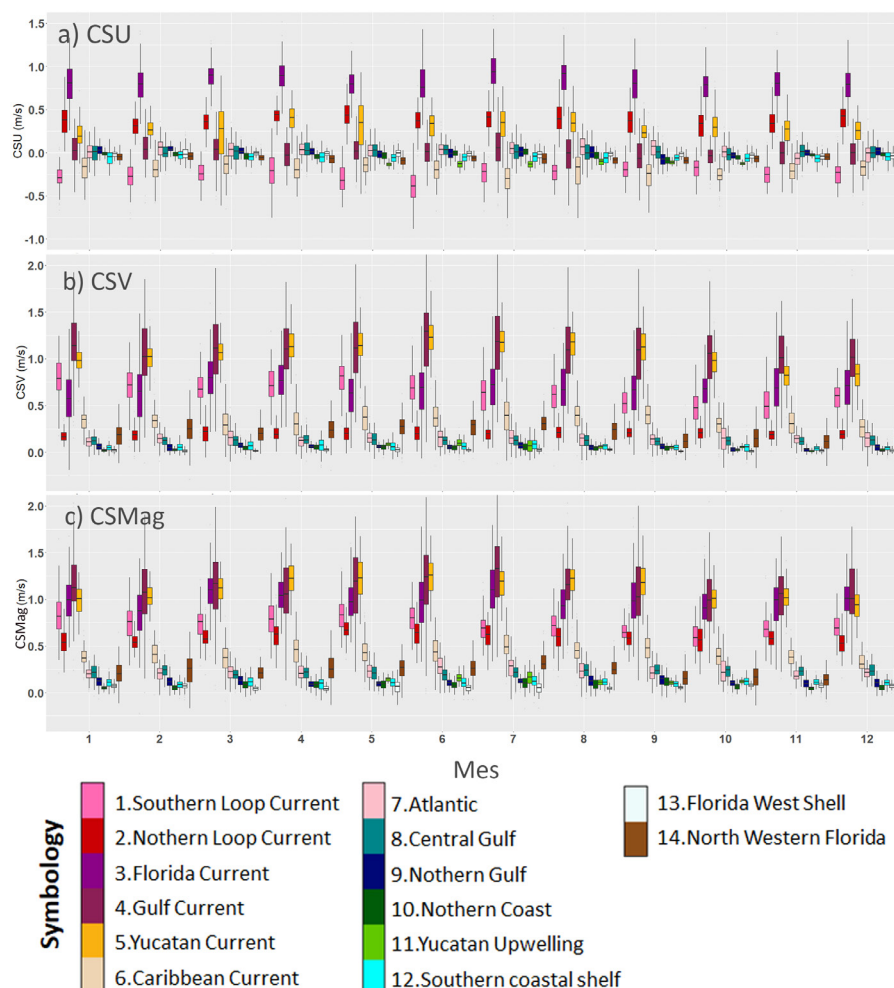


Figura 3. Gráficos de caja y bigote de los parámetros indicadores de la condición térmica y de densidad: (a) ADT, (b) NST y (c) SAL, que muestran la evolución temporal y la relación que guardan entre las unidades. Los valores que se grafican fueron obtenidos de la definición ambiental mensual de las unidades oceanográficas (promedio y desviación estándar de los parámetros).

definición ambiental (Figura 7). Aquí se observa la corriente del Lazo bien definida en dos secciones: 1. *Corriente del Lazo Sur* y 2. *Corriente del Lazo Norte* que se conectan de forma continua. Sin embargo, de agosto a noviembre, esta continuidad entre ambas UO se corrompe hasta diciembre, cuando vuelve a representar un flujo continuo.

En el sentido del flujo principal, está la UO 3. *Corriente de Florida*, presente en el estrecho de Florida, que a pesar de tener bien definidas magnitud y dirección de forma constante, su forma varía ligeramente a lo largo del año. Hacia el norte se encuentra la UO 4. *Corriente del Golfo* bien delineada de forma casi constante. En el otro extremo se ubica una porción del flujo de circulación principal denominado como UO 5. *Corriente de Yucatán*, que de octubre a febrero inicia al borde sur de la isla de Cozumel

internándose de forma vertical hacia el interior del GoM. El resto del año, se mezcla con la unidad 6. *Corriente del Caribe*, que ocupa la mitad de la porción del mar Caribe, con una división inclinada hacia el oeste. La contra parte del mar Caribe es la UO 7. *Atlántico*, la cual se interna por el centro de la Corriente del Lazo y ocupa la zona noreste del área de estudio de forma constante.

El centro del Golfo de México forma una única unidad oceanográfica (8. *Golfo Central*) delimitada al este por la Corriente del Lazo. Ésta cambia de forma en respuesta a las modificaciones de las UO aledañas, particularmente de la UO 9. *GoM Norte*, que tiene variaciones de tamaño que se presentan de forma no estacional; por un lado, esto se debe a la disminución de la NST, y alcanza su mayor extensión en marzo, cuando cubre una

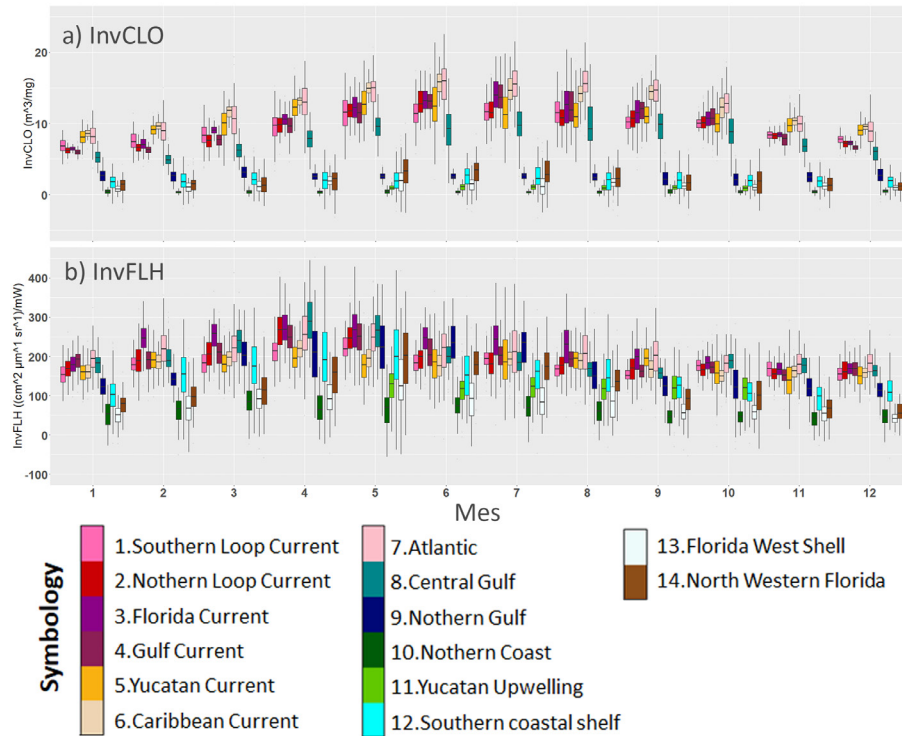


Figura 4. Gráficos de caja y bigote de los parámetros que se incorporaron como indicadores biológicos, ambos representados como su inverso matemático: (a) InvCLO y (b) InvFLH. Las gráficas muestran la evolución temporal de los parámetros y la relación que guardan entre las unidades. Los valores que se grafican fueron obtenidos de la definición ambiental mensual de las unidades oceanográficas (promedio y desviación estándar de dichos parámetros).

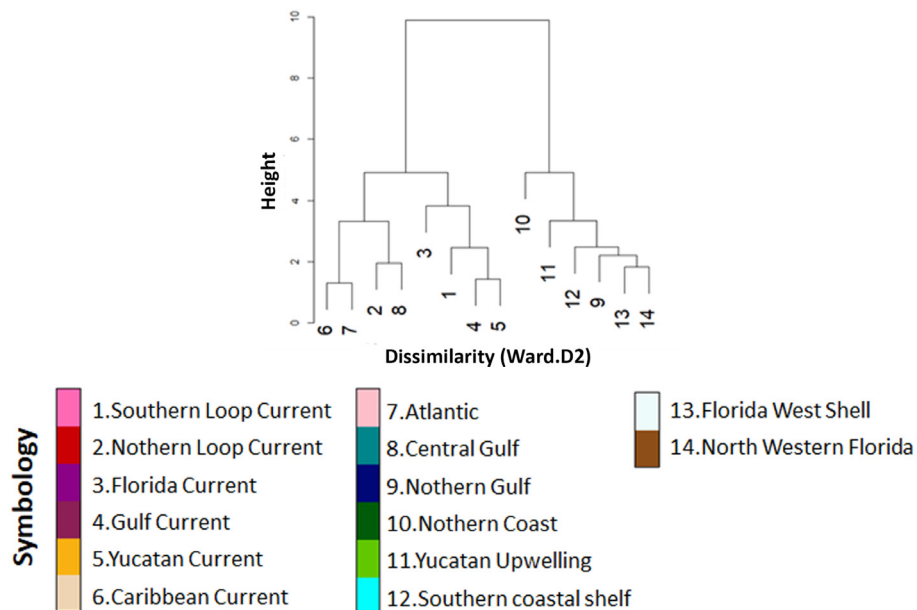


Figura 5. Dendrograma de disimilitud que muestra la asociación que existe entre los centroides de las unidades oceanográficas donde se observan dos grupos fundamentales de UO.

vasta porción del norte del GoM. Por otro lado, esta unidad también se expande en agosto, debido a la intrusión de aguas con valores de CLO altos en una porción al norte de la Corriente del Lazo.

La costa norte del Golfo de México está ocupada por la UO 10. *Costa Norte*, que desde noviembre hasta marzo, se extiende desde Texas hasta la Bahía de Tampa. De abril a agosto disminuye su extensión paulatinamente, hasta concentrarse entre las Bahías Galveston y Mobile. Complementariamente, la UO 9. *GoM Norte* se expande de septiembre a diciembre. Aledañas a la UO 9 y 10 hacia el sur, se ubica la UO 13. *Plataforma Oeste de Florida*, que presenta variaciones estacionales de tamaño particularmente hacia el norte, ya que, hacia el sur, tiene como límite la corriente de Florida. Su menor expresión sucede durante febrero y la mayor en julio, abarcando una buena porción de la plataforma de Florida.

Con excepción de la UO 13, el resto de las plataformas continentales del área de estudio se aglomeraron en la definición ambiental como la UO 12. *Plataforma Continental sur* debido a la interrelación que existe en sus parámetros biofísicos, por lo que fueron separadas por su ubicación. De aquí se derivan la UO 16. *Plataforma Cubana* que incluye el Golfo de

Guantánamo y el interior del archipiélago de los Jardines de la Reyna y la UO 17. *Bancos de las Bahamas*, que incluye los bancos asociados a estas islas. De este grupo de UO, la UO 12. *Plataforma Continental sur* es la única que presenta modificaciones geográficas debido a que ahí la NST e InvCLO varían estacionalmente y presenta una deformación hacia la Bahía de Campeche a partir de junio y con las últimas reminiscencias presentes en noviembre.

La alteración más importantes a la forma de la UO12 es la aparición de la UO 11. *Surgencia de Yucatán* que se presenta desde abril y hasta septiembre cuando se disipa. La UO 11 aparece en Cabo Catoche con un incremento de la CLO y una disminución de la NST, características fundamentales de esta surgencia. Ésta presenta una evolución de este a oeste, cubriendo paulatinamente el resto de la plataforma norte de la Península de Yucatán. Esta UO 11 exhibe dos áreas de características ambientales similares en el interior del GoM que son diferenciadas por su ubicación. Un área frente a las costas de Tabasco que se presenta en julio y agosto, llamada *Surgencia de Tabasco (UO18)*. La otra ocurre entre mayo y agosto a lo largo de la costa oeste del GoM, desde Laguna Madre en Tamaulipas hasta en Boca del Río, que fue denominada 15. *Surgencia de la Costa Oeste*.

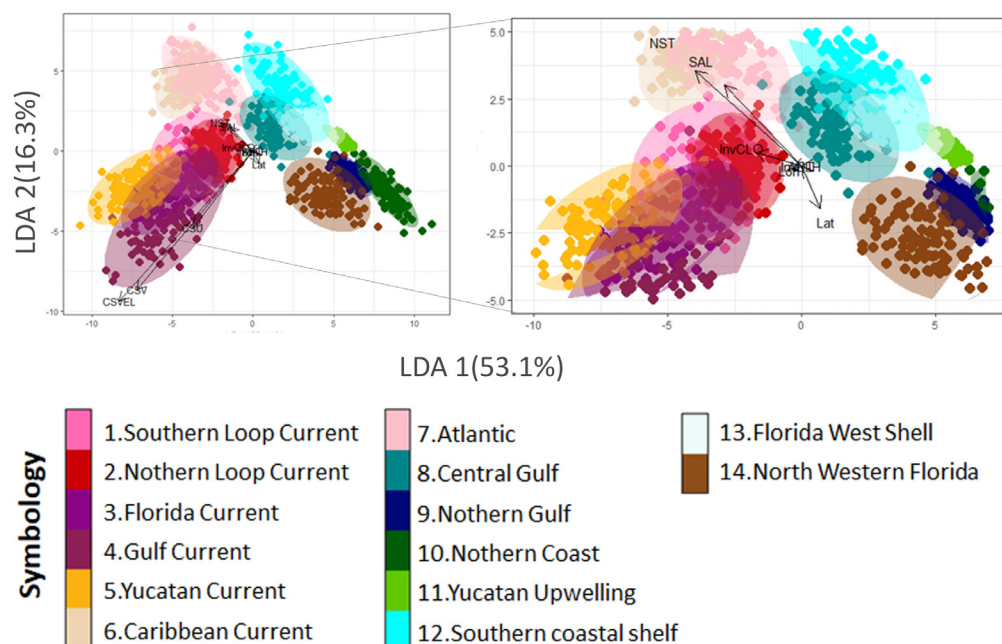


Figura 6. Gráficos de ordenación de los dos primeros discriminantes obtenidos con el análisis de discriminante lineal para el mes de mayo, donde se representa gráficamente tres dimensiones de la asociación que existe entre UO y los parámetros biofísicos a partir de la definición ambiental de las UO. En (a) se muestra el diagrama completo y en (b) un acercamiento al centro del gráfico para apreciar los vectores más cortos de los parámetros.

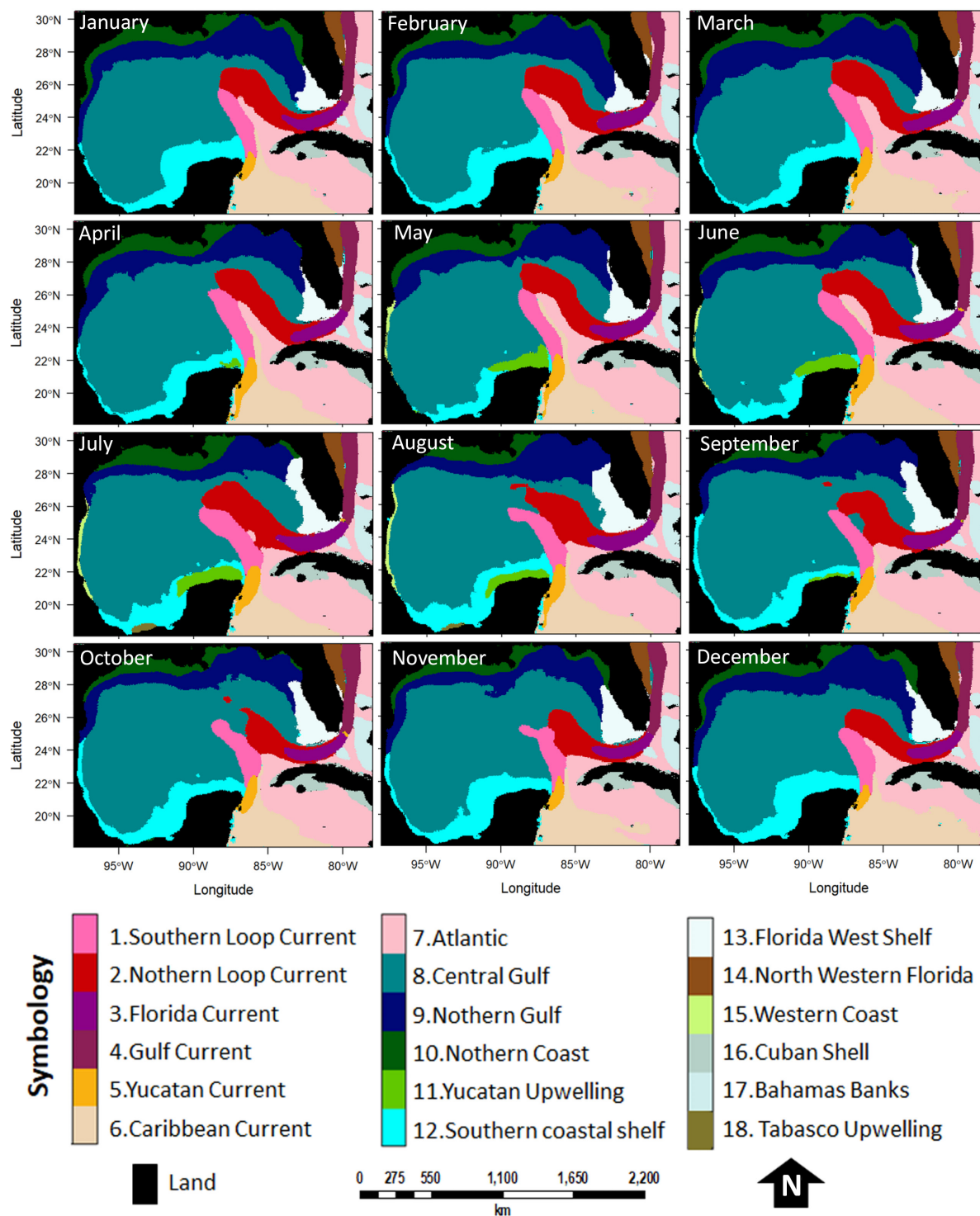


Figura 7. Representación espacial y distribución de las unidades oceanográficas a lo largo del año generada a partir de su definición ambiental.

Finalmente, la UO 14.NE de Florida, se refiere a una porción de mar ubicada entre la Corriente del Golfo y la costa este de Florida, debido a que presenta una corriente superficial débil y NST mucho menores que el resto de la zona. No presenta variaciones de forma considerables a lo largo del año.

Validación

Se generó una matriz de confusión general que promedia las matrices de confusión mensuales, donde se excluyen las UO 15 a 18 que son separadas por ubicación y no por sus valores ambientales (Tabla 2). La exactitud promedio por UO es superior al 89% (D. E.= 7.83%). Las confusiones principales ocurren entre la 9.GoM Norte y la 10.Costa Norte, particularmente entre mayo y octubre debido a la homologación de la NST y a incrementos en las CLO y FLH; entre las UO 6.Corriente Caribe y la 7.Atlántico y entre 12. Plataforma Continental sur y 13.Plataforma de Florida, por ser consistentemente unidades similares en todos los meses. Existen confusiones menores entre las UO1 y UO4, entre las UO2 con UO3 particularmente por la similitud que presentan en los parámetros de la circulación superficial.

Discusión

En este trabajo se diferenciaron para Golfo de México (GoM) conglomerados de características superficiales homogéneas, equiparables a lo largo del año denominados unidades oceanográficas.

Existen varios esfuerzos de regionalización del GoM especialmente enfocados en aspectos particulares, ya sea en la parte biológica (Salmerón-García *et al.*, 2010), delimitación de hábitats (Yáñez-Arancibia y Day, 2004), por procesos físicos (Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte, 2006 y Miron *et al.*, 2017) o bien por la respuesta espectral en imágenes satelitales (Callejas-Jiménez *et al.*, 2012). Estos trabajos tienen coincidencias espaciales y de interpretación, pero ninguno había expresado la dinámica anual integrando las distintas propiedades oceanográficas de este ecosistema.

En este trabajo realizamos análisis estadísticos multivariados para proponer una agrupación robusta de datos de diferente índole que permitieran obtener una interpretación directa de la integración de variables. De esta manera, describimos la evolución temporal de las unidades oceanográficas superficiales (UO) en un año promedio, establecimos el comportamiento intra anual de los parámetros

biofísicos que las definen y se presentan las variaciones espaciales de estas UO. El resultado fue la definición mensual ambiental y la representación espacial de 18 unidades oceanográficas en las que se observan los rasgos característicos del GoM, particularmente, los que se presentan periódicamente. Se distinguieron dos agrupaciones generales: las clases asociadas al flujo predominante de la región, en contraposición con las aledañas a este flujo, en las que predominan valores altos de los parámetros biológicos en costas y plataformas y diferencias importantes del régimen térmico.

Algunas de las regiones asociadas a la circulación reconocidas en este estudio fueron planteadas previamente por Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte (2006). Por ejemplo, estos autores dividen el Banco de Campeche en dos secciones al separar la zona con aportes de los ríos Grijalva y Usumacinta del resto de la plataforma, con fronteras son similares a las propuestas para la UO 12.Plataforma Continental sur. Sin embargo, los autores separan el giro ciclónico que se presenta en la Bahía de Campeche (Monreal-Gómez y Salas-de León, 1990), que con nuestra regionalización no pudimos diferenciar, potencialmente debido a la relativamente débil circulación superficial de la zona en comparación con el resto del GoM, y a la variabilidad temporal con la que se presenta (Vázquez de la Cerda *et al.*, 2005; Pérez-Brunius *et al.* 2013).

Por ejemplo, en los límites de la sección que divide el Mar Caribe donde se separa la corriente del Caribe, de la zona de giros y remolinos al sur de Cuba. Por otro lado, en el caso del flujo de circulación hacia el norte, ellos lo plasman como una sola región, mientras aquí la dividimos en 6 segmentos de acuerdo con la magnitud y dirección de la corriente superficial, diferenciando incluso, el agua del Atlántico que las rodea.

Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte (2006) y Miron *et al.* (2017), ambos a partir factores de circulación, dividen la porción Louisiana-Texas de la sección Mobile-Alabama-Florida en la desembocadura del río Misisipi. En contraposición, hay quienes debido a factores bióticos consideran como una sola región a la porción entre las Bahías de Galveston y Mobile (Yáñez-Arancibia y Day, 2004; Salmerón-García *et al.*, 2010; Callejas-Jiménez, 2012). Nosotros, proponemos la división del norte del GoM en dos UO separadas longitudinalmente, una más costera que su contraparte, debido a que en general, la intensidad de la corriente es menor y en promedio más homogénea que

Tabla 2. Matriz de confusión promedio entre la definición de las unidades oceanográficas expresada en porcentajes. Se remarcan en escala de grises la intensidad de la confusión entre clases mayores al 1%.

| | Referencia | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| 1. Corriente de Lazo Sur | 98 (+-1.6) | 0.42 | 0.00 | 2.58 | 1.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2. Corriente Lazo Norte | 0.50 | 98.75 (+-1.96) | 2.42 | 1.58 | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 0.50 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3. Corriente de Florida | 0.00 | 0.17 | 96.25 (+-1.91) | 0.50 | 0.58 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4. Corriente del Golfo | 0.25 | 0.00 | 0.17 | 94.67 (+-2.5) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 5. Yucatán | 0.75 | 0.00 | 1.17 | 0.17 | 98.42 (+-2.57) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6. Corriente Caribe | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 97.08 (+-2.07) | 7.75 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 7. Atlántico | 0.00 | 0.25 | 0.00 | 0.42 | 0.00 | 2.83 | 91.5 (+-4.3) | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| 8. Golfo Central | 0.08 | 0.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 96.67 (+-1.87) | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 2.92 | 0.00 | 0.00 |
| 9. GoM Norte | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.67 | 95.83 (+-3.01) | 7.83 | 0.00 | 0.33 | 0.08 | 0.00 |
| 10. Costa Norte | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.33 | 90.83 (+-3.21) | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 11. Surgencia de Yucatán | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100 (+-0) | 0.33 | 0.00 | 0.00 |
| 12. Plataforma continental Sur | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 89.33 (+-4.58) | 0.00 | 0.00 |
| 13. Plataforma de Florida | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.67 | 0.75 | 0.00 | 6.92 | 99.83 (+-0.39) | 2.00 |
| 14. NE Florida | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 2.08 | 0.58 | 0.00 | 0.08 | 0.08 | 98 (+-2.04) |

en resto del GoM, por lo que su separación responde a las concentraciones de clorofila *a* y a las condiciones térmicas.

En el siguiente grupo de UO, se divide claramente la zona norte con rangos térmicos amplios, algunas de ellas diferenciadas por una alta actividad biológica (Yáñez-Arancibia y Day, 2004; Salmerón-García, *et al.*, 2010, Muller-

Karger *et al.*, 2015) mientras que por otro lado están las UO oligotróficas y de temperaturas estables como las del Mar Caribe y agua característica del Atlántico (Aguirre-Gómez, 2014).

La región del norte es presentada como una combinación de varias zonas tanto en el trabajo de Salmerón-García *et al.*, 2010, como

en el de Callejas-Jiménez *et al.*, 2012, aunque considerablemente distintas entre sí, mientras que en nuestros resultados se expresan como dos unidades oceanográficas que evolucionan espacialmente a lo largo del año y que muestran variaciones estacionales de sus parámetros ambientales. Por ejemplo, los primeros autores describen la pluma del Misisipi como una región con presencia en verano, mientras que nosotros observamos el cubrimiento de esa área como una expansión de la UO9 entre julio y septiembre, presumiblemente por un enriquecimiento de aguas debido al flujo sureste de la pluma de dicho sistema riveroño (Müller-Karger *et al.*, 1991). El transporte de altas concentraciones de clorofila por el sistema del Misisipi hacia el interior del golfo ocurre por la interacción de giros y meandros con la topografía, contribuyendo al enriquecimiento de la zona profunda (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Consideramos que la integración de datos físicos y biológicos disminuye el efecto de las fuertes diferencias en la respuesta óptica de esta zona, como se presenta en Callejas-Jiménez *et al.*, 2012. Aunque, por otro lado, destaca que estos autores no hacen una diferencia entre la zona de transición de la zona norte del sur en la temporada de huracanes que nosotros pudimos distinguir debido a la inclusión de otros parámetros como la NST.

En la región llamada Corriente del Lazo en el trabajo de Callejas-Jiménez *et al.* (2012), fue diferenciada por nosotros como una porción homogénea del agua del Atlántico (UO7) de temperatura estable y circulación diferenciada del flujo de la Corriente del Lazo. En su trabajo, Callejas-Jiménez *et al.* (2012) integran en la región oligotrófica del Golfo de México lo que aquí diferenciamos como las Corrientes del Caribe, Yucatán, Lazo y Florida. En ese sentido, Salmerón-García *et al.* (2010) con base en las anomalías de la clorofila *a*, mantuvieron esas UO de circulación diferenciada, como una sola región junto con el centro del GoM.

Callejas-Jiménez *et al.* (2012) utilizaron datos de color del mar, como un resumen de la información detectada con percepción remota, argumentando que la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila *a* no tienen gradientes lo suficientemente agudos para ser diferenciados con técnicas de clasificación. Sin embargo, con nuestro trabajo obtuvimos unidades oceanográficas diferenciadas con estos, e incluso otros parámetros. Por ejemplo, estos autores delimitan un área que representa la surgencia de Yucatán, que va desde Cabo Catoche hasta Cayo Arenas para la temporada

de junio a noviembre, a diferencia con lo que planteamos aquí, donde se puede diferenciar espacialmente la surgencia (UO 11. *Surgencia de Yucatán*) desde los primeros esbozos detectados en mayo, hasta su máxima expresión en agosto. En Callejas-Jiménez *et al.* (2012) se enmascaró la evolución espaciotemporal de la surgencia, probablemente como efecto del agrupamiento estacional donde se presentan una región menor en la estación de secas, mientras que nosotros observamos que desaparece totalmente a partir de octubre.

Por otro lado, observamos la aparición de un área alargada entre Tamaulipas y Veracruz asociada ambientalmente a la UO 11 que se presenta de mayo a agosto, y que denominamos UO 15. *Surgencia de la Costa Oeste*, mientras que Callejas-Jiménez *et al.* (2012) muestran esta región bien delimitada durante todo el año. De manera similar existe una pequeña área que se presenta durante julio y agosto frente a la costa de Tabasco, de propiedades físicas y biológicas similares a la surgencia de Yucatán. Esta zona se alimenta de aguas frías provenientes de la descarga del afluente del sistema Grijalva-Usumacinta, que enriquecen las aguas y provoca florecimientos algales que pueden acarrear hacia el interior del golfo (Aldeco *et al.*, 2009; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006; Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009).

Si se considera la extensión que presentan Salmerón-García *et al.* (2010) con respecto de la extensión de la UO 12. *Plataforma Continental sur* de junio a octubre, se observan similitudes considerables. Esta área se caracteriza por la confluencia de las corrientes costeras provenientes del norte con las originadas en el interior de la plataforma de Campeche por lo que, durante el verano y otoño, las descargas del río Usumacinta se mueven hacia el interior del GoM (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2006). Es por lo que, coincidiendo con Salmerón-García *et al.* (2010), proponemos una extensión de la región del *Plataforma Continental sur* que se relaciona con la influencia de elementos terrígenos, en contraposición con lo propuesto por Zavala-Hidalgo y Fernández-Eguiarte (2006) y Miron *et al.* (2017) relacionados con la circulación.

La unidad que llamamos *Plataforma Oeste de Florida* ha sido reconocida como una entidad diferenciable en varios trabajos, ya sea por su contenido biológico (Salmerón-García *et al.*, 2010; Callejas-Jiménez, *et al.*, 2012), por su relevancia ecológica (Yáñez-Arancibia y Day, 2004) o por la particularidad de la circulación (Miron, *et al.*, 2017). Esta UO presenta una circulación muy débil que es una barrera de transporte, y que aísla los aportes de ríos y

lagunas de Florida (Olascoaga, 2010) y, de forma similar que en Salmerón-García *et al.* (2010), tiene características similares con la del *Plataforma Continental sur*, especialmente durante el verano.

La parte central del GoM quedó definida como una sola UO con valores promedio regionales para todos los parámetros, a pesar de que se conoce una gran variedad de procesos oceanográficos que ahí ocurren. Estos procesos no estacionales y de periodicidad poco definida (Muller-Karger *et al.*, 2015), provocan que los promedios climatológicos enmascaren la firma tanto de la circulación como de la temperatura, necesarias para ser disgregados, por lo que en la mayoría de los trabajos de regionalización ocurre el mismo efecto.

El presente trabajo muestra una forma de evaluar el complejo sistema del GoM, a partir de un análisis integrador de datos de diferente índole, obtenidos de manera remota, estandarizada y bien documentada. Las unidades oceanográficas definidas condensan atributos importantes que hacen particular a cada sección y de manera única, se presenta su evolución espacial a lo largo del año.

Si bien, las observaciones de temperatura hechas mediante satélites representan una pequeña fracción de la superficie conocida como la piel del océano (Aguirre-Gómez, 2001), considerar variables derivadas del color del mar (CLO y FLH) y de altímetros (ADT) permiten incorporar a la concepción de UO información indirecta de la columna de agua. Las variables obtenidas del color del mar envuelven información de la capa eufótica que, aunque puede variar de acuerdo a las condiciones oceanográficas, estos datos son comúnmente utilizados como un proxy de las dinámicas tróficas de las aguas superficiales (Muller-Karger *et al.*, 2015, Pardo *et al.*, 2015, Briscoe *et al.*, 2018). Establecer asociaciones de la productividad oceánica a partir de mediciones superficiales ha resultado fuertemente debatible, pues existen diferencias regionales en la forma de la distribución vertical de la clorofila y por lo tanto del fitoplancton. Esta producción está potencialmente relacionada con la profundidad de la capa de mezcla y la estratificación de la columna de agua, variables que no se han resuelto de manera contundente utilizando únicamente imágenes satelitales (Pasquero de Fommervault *et al.* 2017). Para el golfo se estima que la profundidad del máximo de clorofila varía ampliamente (>35 m y hasta 100 m) entre diferentes regiones y en diferentes épocas del año (Hidalgo-Gonzales y Alvarez-

Borrego, 2008; Pasquero de Fommervault *et al.* 2017) lo que hace difícil asumir de manera contundente una representatividad de las condiciones más profundas.

Por otro lado, la NST y la ADT en conjunto proveen un panorama de la estructura térmica de la columna de agua, ya que los procesos que afectan el balance termodinámico modifican su volumen y por lo tanto la altura de la topografía dinámica absoluta (Pardo *et al.*, 2015). Particularmente la ADT tiene información embebida de la estructura acumulada de toda la columna de agua que, con los datos complementarios de temperatura y los componentes de la circulación, proveen un panorama integrado de las condiciones oceánicas, al menos en la capa superior (Welsh e Inoue, 2000). En ese sentido diversos estudios muestran que la circulación característica superficial del golfo puede observarse en los primeros 800 m – 1000 m, con variaciones dependiendo de la influencia que imprimen las estructuras de mesoescala y los forzantes preponderantes de la circulación (DeHaan y Sturges, 2005) mientras que la circulación profunda sigue patrones muy poco variables hacia la zona más profunda y poco correlacionados con los patrones superficiales (Hamilton, 2009; Pérez-Brunius *et al.* 2017).

Sale de los alcances de este trabajo asumir o desentrañar la representatividad de las condiciones oceanográficas superficiales con respecto a toda la columna de agua. Sin embargo, como lo plantean Zacharias y Roff (2000) proponemos reconciliar los componentes de los ecosistemas que son medibles, que proveen información sinóptica, y que pueden servir de proxys para la identificación de regiones de características similares. Estas observaciones continuas permitirán además el monitoreo sistemático de tales regiones y de sus hábitats subyacentes.

La regionalización de los mares considerando la variabilidad temporal y espacial de las condiciones oceánicas es estratégico para el ordenamiento, manejo y conservación de los recursos y capital marino. Previamente se ha planteado la pertinencia de establecer esquemas de regionalización que permitan conocer cuál es la dinámica de los ecosistemas en términos de variabilidad estacional, anual, interanual e interdecadal para los mares mexicanos (Díaz de León *et al.* 2009) e inclusive como primicia para el monitoreo de grandes ecosistemas marinos (Longhurst, 2006). Proveer información de las variaciones inherentes de una región que se comporta de forma acoplada a lo largo del año permite a los

tomadores de decisiones considerar esquemas flexibles o adaptables para el manejo de recursos asociados temporalmente a masas de agua (p. ej. Tiburón ballena, atunes, aves marinas migratorias, tortugas, etc.) o bien para la implementación de estrategias para contingencias ambientales como florecimientos algales nocivos (Soto *et al.*, 2012) o derrames de hidrocarburos (Miron *et al.*, 2017).

Estos resultados abren la posibilidad de analizar y monitorear la variabilidad interanual de las unidades y con ello aportar elementos cuantitativos de sus anomalías de mediano y largo plazo. Tener un esquema integrado de diferentes aspectos biológicos y físicos permitirá un monitoreo determinista que disminuya los efectos de la interpretación cualitativa de las variaciones de unidades oceanográficas, entendiendo como unidad a una entidad indivisible a partir de un conjunto de características dadas. Por otro lado, reconocemos la necesidad de analizar a mayor escala espacial y temporal algunas unidades para definir y posteriormente monitorear otras estructuras de mesoescala conocidas como los giros desprendidos de la Corriente del Lazo o el giro ciclónico veracruzano.

Consideramos que esta investigación aporta información relevante en la caracterización espacio temporal de entidades relacionadas tanto con aspectos físicos como biológicos superficiales similares y que plantea bases sustentadas para el monitoreo integral de las aguas superficiales del Golfo de México.

Agradecimientos

Al Posgrado en Geografía de la UNAM por la oportunidad y facilidades prestadas para desarrollar esta investigación. A Olivia Salmerón-García por sus valiosos comentarios. Funding for the development of HYCOM has been provided by the National Ocean Partnership Program and the Office of Naval Research. Data assimilative products using HYCOM are funded by the U.S. Navy. Computer time was made available by the DoD High Performance Computing Modernization Program. The output is publicly available at <http://hycom.org>.

Bibliografía

Aldeco J., Monreal-Gómez M. A., Signoret M., León D. A. S., Hernández-Becerril D. U., 2009, Occurrence of a subsurface anticyclonic eddy, fronts, and *Trichodesmium spp.* over the Campeche Canyon region, Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 35,4, 333–344.

Aguirre-Gómez, R. 2001. *Los mares mexicanos a través de la percepción remota*. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México y Plaza y Valdés. México, D.F. 94 pp.

Aguirre-Gómez R., 2014, Spectral Reflectance Analysis of the Caribbean Sea. *Geofis. Int.*, 534, 385–398. <http://doi.org/10.1016/S0016-71691470073-X>

AVISO, 2016, Ssalto/duacs multimission altimeter products. Disponible en: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/product-information> Consultado mayo de 2016.

Briscoe D. K., Fossette S., Scales K. L., Hazen E. L., Mchuron E. A., Bograd S. J., Maxwell S. M., Lewison R. L., Robinson P. W., Kuhn C., Costa D. P., Crowder L. B., 2018. Characterizing habitat suitability for a central place forager in a dynamic marine environment. *Ecology and Evolution*, 2788–2801. <https://doi.org/10.1002/ece3.3827>.

Callejas-Jimenez M., Santamaria-del-Angel E., Gonzalez-Silvera A., Millan-Nuñez R., Cajal-Medrano R., 2012, Dynamic Regionalization of the Gulf of Mexico based on normalized radiances nLw derived from MODIS-Aqua. *Cont. Shelf. Res.*, 37, 8–14. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.014>.

Cerdeira-Estrada S., López-Saldaña G., 2011, Nuevo Sistema Satelital de Monitoreo Oceánico para México. *Cienc. Mar.*, 372, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.036>.

CONABIO, 2014, Promedios mensuales de temperatura superficial del mar, concentración de clorofila a y fluorescencia de la clorofila de enero de 2003 a diciembre de 2013, Ciudad de México.

Chuvieco, E., 1995, *Fundamentos de teledetección espacial*. 2ª Edición. Madrid, España. Ediciones RIALP. 451 pp.

Córdova A., Rosete-Vergés F., Enriquez G., Hernandez B., 2009, *Ordenamiento Ecológico Marino. Visión integrada de la regionalización*. Secretaría de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Distrito Federal, México. 232 pp.

De la Lanza-Espino G., 2004, Gran escenario de la zona costera y oceánica de México. *Ciencias*, 076, octubre-diciembre, 4–13.

- DeHaan C. J., Sturges W., 2005, Deep cyclonic circulation in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 1801–1812, <https://doi.org/10.1175/JPO2790.1>.
- Díaz de León A., Álvarez Torres P., Iglesias Barrón O., 2009, Experiencias globales de clasificación y ejercicios de zonificación marina. En: *Ordenamiento ecológico marino, Visión integrada de la regionalización*. Córdova, et al. comps. Secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT). Distrito Federal, México. 232 pp.
- Esaias E.W., Iverson R.L., Turpie K., 2000, Ocean provinces classification using ocean color data: observing biological signatures of variations in physical dynamics. *Global Change Biol.*, 6, 39–55.
- Everitt B., Hothorn T., 2016, *A Handbook of Statistical Analyses Using R*. Disponible en: https://cran.rproject.org/web/packages/HSAUR/vignettes/Ch_cluster_analysis.pdf, consultado en diciembre de 2016.
- Fiechter J., Mooers C. N. K., 2007, Primary production associated with the Florida Current along the East Florida Shelf: Weekly to seasonal variability from mesoscale-resolution biophysical simulations. *Journal of Geophysical Research*, 112, 12002, <https://doi.org/10.1029/2006JC003576>, 2007.
- Gotelli N. J., Ellison A.M., 2004, *A primer of ecological statistics*. Sinauer Associates Inc. USA. 510 pp.
- Halliwel G.R., 2004, Evaluation of vertical coordinate and vertical mixing algorithms in the HYbrid-Coordinate Ocean Model (HYCOM). *Ocean Modelling*, 7, 3–4, 285–322, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2003.10.002>.
- Hamilton P., 2009, Topographic Rossby waves in the Gulf of Mexico. *Progress in Oceanography*, 82, 1, 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2009.04.019>.
- Heileman S., Rabalais N., 2009, XV-50 Gulf of Mexico: LME # 5, Disponible en: http://lme.edc.uri.edu/images/Content/LME_Briefs/lme_5.pdf, Consultado en mayo de 2016.
- Hidalgo-González R. M., Álvarez-Borrego S., 2008, Water column structure and phytoplankton biomass profiles in the Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 34, 2, 197–212.
- Hobday aJ., Young J.W., Moeseneder C., Dambacher J.M., 2011, Defining dynamic pelagic habitats in oceanic waters off eastern Australia. *Deep Sea Res. Pt II*, 585, 734–745, <http://doi.org/10.1016/j.dsr2.2010.10.006>.
- HYCOM, 2017, HYCOM Overview. Disponible en <https://hycom.org/hycom/overview>, Consultado en mayo de 2017.
- IOCCG, 2009, Partition of the Ocean into Ecological Provinces: Role of Ocean-Colour Radiometry. Dowell, M. and Platt, T. eds, *Reports of the Coordinating Group, No. 9*, IOCCG, Dartmouth, Canada International Ocean-Colour.
- Jain A.K., 2010, Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, 31-8, 651–666, ISSN 0167-8655, <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>.
- Le Hénaff M., Kourafalou V. H., Morel Y., Srinivasan, A., 2012, Simulating the dynamics and intensification of cyclonic Loop Current Frontal Eddies in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117-2, 1–20. <https://doi.org/10.1029/2011JC007279>
- Li J., Heap A.D., 2008, A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Geoscience*. Canberra, Australia, 163 pp. ISBN: 978 1 921498 28 2.
- Longhurst A., 2006, *Ecological geography of the sea*, 2nd edn. Elsev Sci Pub. New York. 560 pp.
- Martínez-López B., Zavala-Hidalgo J., 2009. Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Systems*, 77, 1–2, 1–20. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.10.002>.
- Miron P., Beron-Vera F.J., Olascoaga M.J., Sheinbaum J., Pérez-Brunius P., Froyland G., 2017, Lagrangian dynamical geography of the Gulf of Mexico. *Sci*. 71. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-07177-w>.
- Monreal-Gómez M.A., Salas-de León D.A., 1990, Simulación de la circulación en la Bahía de Campeche. *Geofísica Internacional*, 29, 2.
- Müller-Karger F.E., Smith J.P., Werner S., Chen R., Roffer M., Liu Y., Muhling B., Lindo-Atichati D., Lamkin J., Cerdeira-Estrada S., Enfield D.B., 2015, Natural variability of surface oceanographic conditions in the offshore Gulf of Mexico. *Prog. Oceanogr*, 134, 54–76, <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2014.12.007>.

- Müller-Karger F.E., Walsh J.J., Evans R.H., Meyers M.B., 1991, On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *J. Geophys. Res-Oc*, 96,C7, 12645-12665.
- Olascoaga M.J., 2010, Isolation on the West Florida shelf with implications for red tides and pollutant dispersal in the Gulf of Mexico. *Nonlinear Proc. Geoph*, 176, 685-696. <https://doi.org/10.5194/npg-17-685-2010>.
- Palacios D.M., Bograd S.J., Foley D.G., Schwing F.B., 2006, Oceanographic characteristics of biological hot spots in the North Pacific: a remote sensing perspective. *Deep Sea Res. Pt II*, 533, 50-269.
- Pardo M. A., Gerrodette T., Beier E., Gendron D., Forney K. A., Chivers S. J., Barlow J., Palacios D. M., 2015, Inferring cetacean population densities from the absolute dynamic topography of the ocean in a hierarchical bayesian framework. *PLoS ONE*, 10(3), 1-23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0120727>.
- Pasqueron De Fommervault O., Perez-Brunius P., Damien P., Camacho-Ibar V. F., Sheinbaum J., 2017. Temporal variability of chlorophyll distribution in the Gulf of Mexico: Bio-optical data from profiling floats. *Biogeosciences*, 14,24, 5647-5662. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5647-2017>.
- Pérez-Brunius P., García-Carrillo P., Dubranna J., Sheinbaum J., Candela J. 2013. Direct observations of the upper layer circulation in the southern Gulf of Mexico. *Deep Sea Res. Pt II*, 85, 182-194. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.07.020>.
- Pérez-Brunius P., Furey H., Bower A., Hamilton P., Candela J., García-Carrillo P., Leben R., 2017, Dominant circulation patterns of the deep Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 17,0140,1. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0140.1>.
- Quevedo-Urías, H. A., Pérez-Salvador, B. R., 2014, *Estadística para Ingeniería y Ciencias*. Grupo Editorial Patria, México, D.F. ISBN: 978-607-438-939-5.
- Roff J. C., Taylor M. E., Laughren J., 2003, Geophysical approaches to the classification, delineation and monitoring of marine habitats and their communities. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13,1, 77-90. <https://doi.org/10.1002/aqc.525>.
- Roff J., Zacharias M., 2011, *Marine Conservation Ecology*. Earthscan publisher, Washington, D.C., USA. 439 p.p.
- Salmerón-García O., Zavala-Hidalgo J., Mateos-Jasso A., Romero-Centeno R., 2010, Regionalization of the Gulf of Mexico from space-time chlorophyll-a concentration variability. *Ocean Dynam*, 614, 439-448. <https://doi.org/10.1007/s10236-010-0368-1>.
- Saraceno M., Provost C., Lebbah M., 2006, Biophysical regions identification using an artificial neuronal network: A case study in the South Western Atlantic. *Adv Space Res*, 37, 793-805. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.11.005>.
- Soto I., Hu C., Steidinger K., Muller-Karger F., Cannizzaro J., Wolny J., Cerdeira-Estrada S., Santamaria-del-Angel E., Tafoya-del-Angel F., Alvarez-Torres P., Herrera-Silveira J., Allen J., 2011, Binational Collaboration to Study Gulf of Mexico ' s Harmful Algae. *Eos*, 93,5, 49-50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2004.04.007>.
- Tan P.N., Steinbach M., Karpatne A., Kumar V., 2018, *Introduction to Data Mining*. 2a edición. Pearson Addison-Wesley. 840 pp. ISBN: 9780134080284, 0134080289.
- Vazquez de la Cerda A.M., Reid Ro., DiMarco S.F., Jochens A.E., 2005, Bay of Campeche Circulation: An Update. En: *Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models*. Eds: Wilton Sturges, Alexis Lugo-Fernandez. Geoph Monog Series.161 pp.
- Welsh E. S., Inoue M., 2000, Loop Current rings and the deep circulation in the Gulf. *Journal of Geophysical Research*, 105,c7, 951-959.
- Wilkinson T., Wiken E., Bezaury J., Hourigan T., Agardy T., Herrmann H., Janishevski L., Madden C., Morgan L., Padilla M., 2009, *Marine ecoregions of North America*. Commission for Environmental Cooperation. Montreal, Canada. 200 pp.
- Xanthopoulos P., Pardalos P.M., Trafalis T.B., 2013., Linear Discriminant Analysis. In: *Robust Data Mining*. Springer Briefs in Optimization. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9878-1_4.

- Yáñez-Arancibia A., Day J.W., 2004, Environmental sub-regions in the Gulf of Mexico coastal zone: the ecosystem approach as an integrated management tool. *Ocean Coast Management*, 47:11-12, 727-757. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.12.010>.
- Yáñez-Arancibia A., Day J. W., Reyes E., 2013. Understanding the Coastal Ecosystem-Based Management Approach in the Gulf of Mexico. *Journal of Coastal Research*, 63, 244-262. <https://doi.org/10.2112/SI63-018.1>
- Zacharias M., Roff J. C., 2000, A Hierarchical Ecological Approach to Conserving Marine Biodiversity. *Conservation Biology*, 14,5, 1327-1334. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99191.x>
- Zavala-Hidalgo J., Fernandez-Eguiarte A., 2006, Propuesta para la regionalización de los mares mexicanos desde el punto de vista de los procesos físicos: el caso del Golfo de México. En: *Ordenamiento Ecológico Marino. Visión temática de la regionalización*. Córdova A., Rosete-Vergés F., Enriquez G., Hernandez, B. coords. INE, México. Pags 21-32.
- Zavala-Hidalgo J., Gallegos-García A., Martínez-López B., Morey S.L., O'Brien J.J., 2006, Seasonal upwelling on the Western and Southern Shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean Dynam.*, 56:3-4, 333-338. <https://doi.org/10.1007/s10236-006-0072-3>