



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

**DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT DE PREDILECCIÓN DE *Epinephelus morio*  
(VALENCIENNES, 1828) EN DOS ÁREAS DE PESCA ARTESANAL EN  
YUCATÁN**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:  
**BIÓL. RODRIGO ADRIÁN RODRÍGUEZ VÁZQUEZ**

TUTOR PRINCIPAL:  
**DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM

COMITÉ TUTOR:  
**DR. RODOLFO RIOJA NIETO**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM  
**DR. HUGO AGUIRRE VILLASEÑOR**  
CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIÓN PESQUERA, MAZATLÁN  
**DR. JORGE ALBERTO LOPEZ ROCHA**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM  
**DR. FRANCISCO JAVIER FLORES DE SANTIAGO**  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**SISAL, YUCATÁN, MÉXICO, JULIO, 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT DE PREDILECCIÓN DE *Epinephelus morio*  
(VALENCIENNES, 1828) EN DOS ÁREAS DE PESCA ARTESANAL EN  
YUCATÁN**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
(BIOLOGÍA MARINA)**

PRESENTA:

**BIÓL. RODRIGO ADRIÁN RODRÍGUEZ VÁZQUEZ**

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM

COMITÉ TUTOR:

**DR. RODOLFO RIOJA NIETO**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM  
**DR. HUGO AGUIRRE VILLASEÑOR**  
CENTRO REGIONAL DE INVESTIGACIÓN PESQUERA, MAZATLÁN  
**DR. JORGE ALBERTO LOPEZ ROCHA**  
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM  
**DR. FRANCISCO JAVIER FLORES DE SANTIAGO**  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM

**SISAL, YUCATÁN, MÉXICO, 2019**

## Hoja de Datos del Comité Tutor

1. Datos del alumno  
Biol.  
Rodrigo Adrián  
Rodríguez  
Vázquez  
5547639911  
Universidad Nacional Autónoma de México  
Maestría en Ciencias del Mar y Limnología  
309201746
2. Presidente  
Dr.  
Hugo  
Aguirre  
Villaseñor
3. Secretario  
Dr.  
Joaquín Rodrigo  
Garza  
Pérez
4. Vocal  
Dr.  
Rodolfo  
Rioja  
Nieto
5. Suplente  
Dr.  
Jorge Alberto  
López  
Rocha
6. Suplente  
Dr.  
Francisco Javier  
Flores  
De Santiago
7. Datos del trabajo escrito  
Distribución del hábitat de predilección de *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828)  
en dos áreas de pesca artesanal en Yucatán  
98 p.  
2019

## **DEDICATORIA**

A mi familia, por constituir el pilar más importante en mi vida, así como una fuente inagotable de apoyo e inspiración incondicional.

**“Tras el instante mágico en que mis ojos se abrieron en el mar, no me fue posible ver,  
pensar o vivir como antes”**

**Jacques-Yves Cousteau**

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de maestría otorgada, así como al proyecto “Efectos de factores ecológicos y tecnológicos sobre la talla de primera captura del mero americano *Epinephelus morio*: consecuencias para el ordenamiento y la sustentabilidad de la pesquería artesanal de Yucatán.” CONACYT PDCPN-2014 Clave: 0247176.

A mi alma mater y segunda casa, la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) a través del Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología (PCML). Gracias por abrirme sus puertas una vez más y brindarme la oportunidad de seguir creciendo como persona y como profesionista.

Al Dr. Rodrigo Garza, por proporcionarme su apoyo incondicional en todos los niveles, así como sus consejos e invaluable tiempo y amistad, pero sobre todo por creer en mí y ofrecerme esta magnífica oportunidad de aprendizaje.

A los miembros del comité tutor: Dr. Hugo Aguirre Villaseñor, Dr. Rodolfo Rioja Nieto, Dr. Jorge Alberto López Rocha y Dr. Francisco Javier Flores de Santiago, por su acompañamiento a lo largo de este proceso, así como por sus atinados comentarios y aportaciones que mejoraron este trabajo.

Al Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos (PIESACOM) así como a la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) sede Sisal, por brindarme toda la infraestructura y capacitación a lo largo de mi estancia en Sisal.

Mi entera gratitud y respeto a mis compañeros de trabajo y PIESACOM divers: Biol. Alexis Serratos, Lic. Adán Aranda, M. en C. Ana Molina, M. en C. Johny Valdés por su apoyo en las salidas al campo y en laboratorio.

A los viejos y nuevos amigos, les agradezco por siempre contar con su amistad en los momentos más difíciles.

Y a todas aquellas personas que de una forma u otra colaboraron en el escrito de esta tesis.

# ÍNDICE

<b>I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1 El mero rojo .....	3
2.1.1 Descripción y taxonomía de la especie .....	3
2.1.2 Distribución geográfica .....	4
2.1.3 Biología .....	5
2.1.4 Aspectos ecológicos .....	6
2.2 Hábitat bentónico marino.....	7
2.2.1 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos.....	8
2.3 Percepción remota.....	8
2.3.1 Sensores remotos pasivos.....	9
2.3.2 Resolución.....	10
2.3.3 Misiones Landsat.....	11
2.4 Imágenes satelitales y productos derivados .....	13
2.4.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales.....	13
2.4.2 Predicción espacial.....	14
2.4.3 Clasificación de imágenes y mapeo de hábitat.....	15
<b>III. ANTECEDENTES.....</b>	<b>16</b>
3.1 Estudios de mero rojo .....	16
3.2 Estudios de caracterización del hábitat bentónico marino .....	18
<b>IV. JUSTIFICACIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>V. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>21</b>
5.1 Hipótesis .....	21
5.2 Objetivo general.....	21
5.3 Objetivos específicos .....	21
<b>VI. ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>22</b>
<b>VII. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>24</b>
7.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales .....	24
7.2 Diseño muestral .....	27
7.3 Caracterización de hábitats bentónicos marinos .....	27
7.4 Definición de hábitats bentónicos marinos .....	32



7.7 Generación de productos geográficos adicionales.....	32
7.8 Mapeo de hábitats por medio de clasificación supervisada .....	34
7.9 Estimación de abundancia y biomasa de mero rojo.....	34
7.10 Análisis de la relación entre el mero rojo y su hábitat.....	35
7.11 Mapeo de hábitats de predilección del mero rojo .....	35
<b>VIII. RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
8.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales .....	36
8.2 Diseño muestral .....	36
8.3 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos .....	41
8.4 Definición de hábitats submarinos.....	41
8.5 Mapeo de hábitats bentónicos marinos por medio de clasificación supervisada.....	44
8.5.1 Celestún-Sisal.....	44
8.5.2 Río Lagartos-Las Coloradas.....	53
8.6 Estimación de biomasa y abundancia de mero rojo.....	61
8.7 Análisis de la relación entre la población de mero rojo y su hábitat .....	63
8.8 Mapeo de hábitat de predilección de mero rojo.....	66
<b>IX. DISCUSIÓN .....</b>	<b>69</b>
9.1 Hábitats bentónicos marinos detectables en imágenes satelitales .....	69
9.2 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos .....	71
9.3 Mapeo de los hábitats bentónicos marinos a través de clasificación supervisada .....	74
9.3.1 Generación de productos geográficos adicionales .....	74
9.3.2 Clasificación supervisada.....	75
9.4 Mapeo de hábitats de predilección de <i>E. morio</i> .....	78
<b>X. CONCLUSIONES .....</b>	<b>81</b>
<b>XI. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustración de las características del mero rojo. Tomada de: NOAA Photo Library. ....	3
Figura 2. Etapas del ciclo de vida del mero rojo ( <i>E. morio</i> ). Tomada de Giménez-Hurtado <i>et al.</i> (2003). ....	5
Figura 3. Mapa de distribución de la población de <i>E. morio</i> en el Banco de Campeche durante los meses de enero y febrero. Tomada de Hernández y Seijo (2003). ....	6
Figura 4. Longitudes de onda correspondientes al espectro electromagnético. Modificado de Goodman <i>et al.</i> , 2013. ....	9
Figura 5. Características y procesos ambientales que afectan los registros de los sensores remotos pasivos. Modificada de Goodman <i>et al.</i> , 2013. ....	10
Figura 6. Ilustración representativa de los cuatro tipos de resolución de un sensor remoto. Modificada de GEOSYSTEMS, 2010. ....	11
Figura 7. Gráfico que describe las designaciones de cada banda para todos los sensores Landsat. Modificada de USGS, 2017. ....	12
Figura 8. Localización geográfica del área de Celestún-Sisal (oeste) y Río Lagartos-Las Coloradas (este). ....	23
Figura 9. Imagen ilustrativa del posicionamiento de las áreas de interés sobre imagen corregida atmosféricamente. ....	25
Figura 10. Método de filmación de videotransectos. Tomada de Garza-Pérez (1999). ....	28
Figura 11. Ejemplo de patrón de puntos analizados para la determinación de la cobertura bentónica. ....	29
Figura 12. Vista de un área de la imagen satelital del área de Celestún-Sisal. A. Antes de las operaciones de preprocesamiento. B. Después de las operaciones de preprocesamiento. ....	36
Figura 13. Imagen preprocesada usada para clasificación no supervisada y clasificación supervisada del área de Celestún-Sisal. ....	37
Figura 14. Imagen preprocesada usada para clasificación no supervisada y clasificación supervisada del área de Río Lagartos-Las Coloradas. ....	38
Figura 15. Clasificación no supervisada de 7 clases correspondiente a las estaciones utilizadas para el área de Celestún-Sisal. ....	39
Figura 16. Clasificación no supervisada de 7 clases correspondiente a las estaciones utilizadas para el área de Río Lagartos-Las Coloradas. ....	40
Figura 17. Análisis multivariado de agrupamiento jerárquico correspondiente a las estaciones pertenecientes al área Celestún-Sisal. Grupos creados con similitudes mayores al 85% ....	42

Figura 18. Análisis multivariado de agrupamiento jerárquico correspondiente a las estaciones SCUBA pertenecientes al área de Río Lagartos-Las Coloradas. Grupos creados con similitudes mayores al 85%.....	43
Figura 19. Localización de las 100 estaciones "dummies" de sedimento usadas para obtener la banda de predicción espacial del sedimento.....	45
Figura 20. Banda de predicción de porcentaje de sedimento. Obtenida a través del uso del algoritmo Support Vector Machine (SVM).....	46
Figura 21. Barridos batimétricos usados para la derivación de la banda de batimetría. ....	47
Figura 22. Banda de derivación batimétrica. Obtenida a través de la linealización del decaimiento espectral en función de la profundidad. ....	49
Figura 23. Mapa temático de siete clases. Obtenido a través del clasificador de máxima similitud. Precisión general: 64.1860%. Coeficiente kappa: 0.5296. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas. ....	50
Figura 24. Mapa temático de cinco clases o hábitats. Obtenido a través de la combinación de la Clase 2 con Clase 5 y Clase 4 con Clase 7 del mapa temático de siete clases o hábitats. Precisión general: 76.2791%. Coeficiente kappa: 0.6502. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento.....	51
Figura 25. Localización de las 100 estaciones "dummies" de sedimento usadas para obtener la banda de predicción espacial del sedimento.....	55
Figura 26. Banda de predicción de porcentaje de sedimento. Obtenida a través del uso del algoritmo Support Vector Machine (SVM).....	56
Figura 27. Barridos batimétricos usados para la derivación de la banda de batimetría. ....	57
Figura 28. Banda de derivación batimétrica. Obtenida a través de la linealización del decaimiento espectral en función de la profundidad. ....	58
Figura 29. Mapa temático de cuatro clases o hábitats. Obtenido a través del clasificador de máxima similitud. Precisión general: 73.6196%. Coeficiente kappa: 0.5278. C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.....	59
Figura 30. Histograma de las tallas registradas de los 31 individuos de <i>E. morio</i> en el área de Celestún-Sisal. ....	61
Figura 31. Histograma de las tallas registradas de los 10 individuos de <i>E. morio</i> en el área de Río Lagartos-Las Coloradas. ....	61

Figura 32. Gráfico representativo del análisis de redundancia (RDA) del área de Celestún-Sisal. A saber: algas verdes (AV), algas calcáreas rojas (ACR), profundidad (Prof), esponjas (Esp), complejidad de hábitat (CH), sedimento (Sedim), algas calcáreas verdes (ACV), algas rojas (AR), corales (Cor), roca/pavimento calcáreo (Roc), algas filamentosas (AF), algas incrustantes (Ainc), pedacería (Ped), algas pardas (AP), zoántidos y tunicados (ZT). ..... 64

Figura 33. Gráfico representativo del análisis de redundancia (RDA) del área de Río Lagartos-Las Coloradas. A saber: algas verdes (AV), algas calcáreas rojas (ACR), profundidad (Prof), esponjas (Esp), complejidad de hábitat (CH), sedimento (Sedim), algas calcáreas verdes (ACV), algas rojas (AR), corales (Cor), roca/pavimento calcáreo (Roc), algas filamentosas (AF), algas incrustantes (Ainc), pedacería (Ped), algas pardas (AP), zoántidos y tunicados (ZT). ..... 65

Figura 34. Mapa del hábitat de predilección del mero rojo (*E. morio*). Obtenido a través de la extracción de los píxeles de la Clase 2 (sedimento con algas verdes) del mapa temático de cinco clases. Esferas rojas: número de individuos observados en censos visuales. Esferas moradas: número de individuos capturados en palangres. .... 67

Figura 35. Mapa del hábitat de predilección del mero rojo (*E. morio*). Obtenido a través de la extracción de los píxeles de la Clase 2 (sedimento con algas verdes) del mapa temático de cinco clases. Esferas rojas: biomasa calculada a partir de los individuos observados en censos visuales. Esferas moradas: biomasa calculada a partir los individuos capturados en palangres. .... 68

Figura 36. Imágenes tomadas en la misma estación SCUBA. A. Fondo a 20 m de profundidad. B. Columna de agua a 5 m de profundidad. .... 71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ubicación taxonómica del mero rojo según Hoose y Moore (1977).....	4
Tabla 2. Tabla con características de cada banda del escáner Operational Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS). IRC=Infrarrojo cercano; IOC=Infrarrojo de onda corta. ....	13
Tabla 3. Tabla de grupos funcionales para la identificación de organismos bentónicos y sustratos inertes. Modificada a partir de Garza-Pérez (2010). ■: Modificación a la tabla original para incluir nuevos componentes bentónicos.....	30
Tabla 4. Tabla de ecuaciones utilizadas para estimar biomasa de mero rojo. Modificada de Renán <i>et al.</i> (2015). ....	35
Tabla 5. Promedio de cobertura bentónica en el área Celestún-Sisal de los transectos pertenecientes a C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas. Debajo: porcentaje de los 61 videotransectos usados para definir cada clase. ....	42
Tabla 6. Promedio de cobertura bentónica en el área de Río Lagartos-Las Coloradas de los transectos pertenecientes a C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento. Debajo: porcentaje de los 60 videotransectos usados para definir cada clase. ....	43
Tabla 7. Resultado de la regresión lineal múltiple, llevada a cabo en el software Excel. ....	47
Tabla 8. Matriz de confusión derivada de la evaluación de la clasificación supervisada de siete clases. Precisión general: 64.1860%. Coeficiente kappa: 0.5296. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas.52	
Tabla 9. Matriz de confusión derivada de la evaluación de la clasificación supervisada de cinco clases. Precisión general: 76.2791%. Coeficiente kappa: 0.6502. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento.....	52
Tabla 10. Resultado de la pendiente para cada banda y el y-intercepto para la derivación batimétrica. ....	53
Tabla 11. Matriz de confusión derivada del uso del 20% de estaciones para la evaluación de la clasificación supervisada realizada en el área de Río Lagartos-Las Coloradas. Precisión general: 73.6196%. Coeficiente kappa: 0.5278. C1: dominado por algas filamentosas; C2:	

sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.....	60
Tabla 12. Individuos de <i>E. morio</i> registrados en ambas áreas de estudio.....	61
Tabla 13. Conglomerado de las observaciones de <i>E. morio</i> realizadas en ambas áreas de estudio. Celestún-Sisal: C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas. Río Lagartos-Las Coloradas: C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.....	63
Tabla 14. Resultados del análisis de redundancia (RDA) para el área de Río Lagartos- Las Coloradas. Valores propios de los cuatro ejes, su porcentaje asociado de contribución a la varianza y valores de correlación entre <i>E. morio</i> y las variables ambientales. ....	64
Tabla 15. Resultados del análisis de redundancia (RDA) para el área de Río Lagartos- Las Coloradas. Valores propios de los cuatro ejes, su porcentaje asociado de contribución a la varianza y valores de correlación entre <i>E. morio</i> y las variables ambientales. ....	65
Tabla 16. Conglomerado de las observaciones de <i>E. morio</i> realizadas por ambos métodos. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento. ....	66
Tabla 17. Tabla comparativa entre los hábitats definidos por este trabajo y los definidos previamente en las zonas de estudio. Garza-Pérez <i>et al.</i> (2017) litoral de Sisal. Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) zona costera de Yucatán.....	73
Anexo 1. Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral de Celestún-Sisal. ....	94
Anexo 2. Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral de Río Lagartos-Las Coloradas.....	97

## RESUMEN

El Banco de Campeche es una importante zona de pesca en el Golfo de México debido a su alta diversidad de recursos marinos que son explotados por flotas artesanales e industriales. Específicamente, la pesquería de mero rojo (*Epinephelus morio*), por su volumen de captura, representa un recurso de suma importancia la economía regional. Sin embargo, el volumen de captura ha disminuido a partir de la década de los ochenta, lo que ha llevado a la sobreexplotación y sobrecapitalización de la pesquería, por lo cual es urgente la implementación de estrategias de gestión y manejo adicionales. En este sentido, a pesar de la relevancia para el manejo de la pesquería, la información sobre la distribución espacial de los hábitats de predilección del mero rojo es escasa. El avance tecnológico y el acceso a la información proporcionan herramientas adicionales robustas que pueden proporcionar nueva información en este campo. El objetivo principal de este trabajo fue definir la distribución espacial de hábitats de predilección del mero rojo, y las variables bentónicas a las que se asocia, en dos áreas de pesca artesanal en el extremo noroeste y noreste del estado de Yucatán (Celestún-Sisal y Río Lagartos-Las Coloradas) a través de muestreos en campo con equipos de buceo autónomo (videotransectos y censos visuales de peces) y análisis de estadísticos. Los resultados indicaron una asociación significativa de la distribución de mero rojo con la cobertura de algas verdes y sedimento en la zona de Celestún-Sisal, mientras que para la zona de Río Lagartos-Las Coloradas no se identificó ninguna asociación significativa. En cuanto a la distribución de los hábitats de predilección, primeramente, se realizaron mapas temáticos de los hábitats presentes en las áreas de estudio, los cual fueron el resultado de la combinación de datos de campo y la aplicación de técnicas de detección remota y predicción espacial en imágenes Landsat 8-OLI preprocesadas. Los resultados fueron un mapa temático de cinco clases o hábitats para el área de Celestún-Sisal (Precisión general: 76.2791%) del cual se extrajo, por sus resultados en los censos visuales y el análisis de redundancia (RDA), la Clase 2 (sedimento con algas verdes) para definirla como el hábitat de predilección de mero rojo, la cual se validó mediante el uso de datos independiente (palangres). Por su parte para el área de Río Lagartos-Las Coloradas se obtuvo un mapa temático de cuatro clases (Precisión general: 73.6196%) del cual, por sus características en la columna de agua y el análisis RDA, no fue posible extraer información relacionada con el hábitat de distribución del mero rojo.

## I. INTRODUCCIÓN

La plataforma continental de la península de Yucatán o Banco de Campeche es un área de pesca importante dentro del Golfo de México ya que cuenta con una significativa diversidad de recursos pesqueros los cuales son aprovechados por flotas artesanales y de mediana altura que operan cerca de la costa (Arreguín-Sánchez y Valero, 1996).

Específicamente, por su volumen de captura, el mero rojo (*Epinephelus morio*) (Valenciennes, 1828) constituye la pesquería de escama más importante del Banco de Campeche (Arreguín-Sánchez y Valero, 1996) y se encuentra posicionado en el lugar 26 de la producción pesquera en México (CONAPESCA, 2014). Esta pesquería data de finales del siglo XIX, no obstante, según lo señalado por Brulé y Colas-Marrufo (1996) el desarrollo sostenido de la pesquería se inició en la década de 1940 a partir de la introducción de motores en las embarcaciones y el uso de cámaras de congelación.

El desarrollo de esta pesquería ha contribuido de manera importante al crecimiento de la economía regional, ya que genera divisas por concepto de exportación y da sustento a un número importante de pescadores y empleados de congeladoras, entre otros (Giménez-Hurtado, 2005). La explotación pesquera de *E. morio* es llevada a cabo por tres flotas: dos mexicanas -artesanal y de mediana altura- y una flota mayor cubana (Arreguín-Sánchez *et al.*, 1987).

En el estado de Yucatán la flota pesquera artesanal se conforma de un total 4352 lanchas de madera y fibra de vidrio, con eslora de 6.5 a 7.5 m y motores fuera de borda entre 40 y 65 HP. De estas embarcaciones, 3371 cuentan con permisos vigentes para la captura de escama y 981 están proceso de regularización (CONAPESCA, 2012). Según los datos históricos la flota artesanal se ha incrementado notablemente en los últimos 10 años. En 2006 se reportaban un total de 1650 embarcaciones con permiso vigente para la captura de escama, lo cual representa un crecimiento mayor al 100% (SAGARPA, 2014). Dicha flota opera en los 12 municipios costeros del estado en profundidades menores a los 30 m, capturando los individuos jóvenes e inmaduros de la población ( $\leq 50$  cm) mediante el uso de artes de pesca como el palangre y la línea de mano (Arreguín-Sánchez *et al.*, 1996; Arreguín-Sánchez y Valero, 1996; Giménez-Hurtado, 2005).



En lo que se refiere a la magnitud de las capturas, la tendencia es hacia su disminución a partir de la década de los setentas (~19 mil toneladas anuales), en contraste con las 7 mil toneladas anuales que se capturan hoy en día (CONAPESCA, 2017). Desde 1986 algunos autores (Seijo, 1986; Arreguín-Sánchez *et al.*, 1987) ya señalaban que la población de mero rojo (*E. morio*), se encontraba intensamente explotada y que la captura registrada ya sobrepasaba la captura máxima sostenible. Además, también se había identificado que la flota artesanal estaba ejerciendo una fuerte influencia sobre los individuos juveniles de la población afectando el reclutamiento a la población reproductora (Seijo, 1986).

En este contexto de sobreexplotación, debido a la reducción del tamaño de los stocks, la pesquería ha presentado desde hace más de 20 años, signos de sobrecapitalización y disipación de rentas (Monroy 1998; Monroy *et al.* 2001; Burgos y Defeo, 2004; Salas *et al.*, 2006; Monroy, *et al.* 2010)

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 El mero rojo

#### 2.1.1 Descripción y taxonomía de la especie

*E. morio* (Valenciennes, 1828), se caracteriza por su color marrón rojizo con manchas blancas que se distribuyen sobre la superficie del cuerpo y pequeñas motas negras alrededor de los ojos (Grece *et al.*, 1994). Presenta un patrón de rayas oscuras difusas o ausentes a los lados del cuerpo; los patrones de coloración varían de acuerdo con la actividad del pez y del entorno, especialmente de la profundidad. *E. morio* es una especie de tamaño moderado, ojos grandes y cuerpo robusto cubierto por escamas pequeñas de tipo ctenoides (Fischer, 1978) (Figura 1; Tabla 1).

Esta especie cuenta con varios nombres comunes que varían en función del país de captura. Los más relevantes son: mero rojo, mero americano, garopa, cherna yucateca y mero paracamo para la zona de México (Moe, 1969; Rivas, 1970). Cherna americana, cherna de vivero, cherna de corrida y cherna de arribazón para Cuba (Guitart, 1977).

De igual forma se le conoce como “merou rogue” en francés y como “red grouper” en inglés (Fischer, 1978). La palabra “grouper” es un derivado de la palabra “garoupa” la cual es usada para designar a un serránido en Portugal. Asimismo, el nombre del género *E.* proviene del griego y significa nublado (Stewart, 1989).



Figura 1. Ilustración de las características del mero rojo. Tomada de: NOAA Photo Library.

Tabla 1. Ubicación taxonómica del mero rojo según World Register of Marine Species.

Phylum Chordata

Subphylum Vertebrata

Superclase Gnathostomata

Superclase Pisces

Clase Arctinopterygii

Orden Perciformes

Suborden Percoidei

Familia Serranidae

Subfamilia Epinephelinae

Género *Epinephelus*

**Especie: *Epinephelus morio*** (Valenciennes, 1828)

### 2.1.2 Distribución geográfica

El mero *E. morio* es una especie de hábitos demersales con un fuerte patrón territorial, se distribuye desde Bahía de Katama, Massachussets, EE. UU., hasta Río de Janeiro, Brasil (Moe, 1969; Rivas, 1970). Esta especie es un habitante de la comunidad bentónica de aguas tropicales con temperaturas mayores a 20 °C; en cruceros de investigación ha presentado alta incidencia en aguas de 23 a 25 °C y no se captura en temperaturas por debajo de los 16 °C (González *et al.*, 1974). Es común en las regiones cársticas del Golfo de México y está asociado con la plataforma continental (Roe, 1976). Específicamente en el Banco de Campeche la distribución batimétrica de los peces va desde la costa hasta los 300 metros, existiendo una segregación de tallas relacionada con el aumento en la profundidad (González *et al.*, 1974b).

### 2.1.3 Biología

El mero rojo (*E. morio*) tiene un ciclo de vida complejo, cuyas fases de desarrollo (huevo-larva-juvenil-adulto) requieren de diferentes tipos de hábitat (Figura 2). La fecundación es externa y los huevos y larvas son planctónicos. Los desoves ocurren en aguas alejadas de la costa, entre los 35 y 70m de profundidad y principalmente se han reportado en el Banco de Campeche en la zona oriente (Valdés y Padrón, 1980; López-Rocha y Arreguín-Sánchez, 2008).

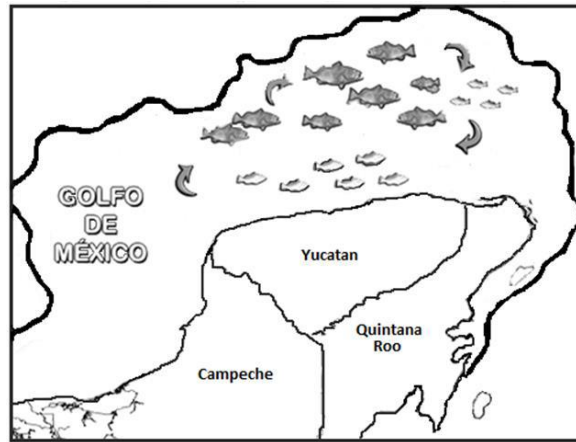


Figura 2. Etapas del ciclo de vida del mero rojo (*E. morio*). Tomada de Giménez-Hurtado *et al.* (2003).

*E. morio* es una especie hermafrodita secuencial con inversión protogínica (los individuos nacen como hembras y posteriormente se transforman en machos) (Moe, 1969), por lo cual la proporción macho hembra aumenta con la edad. La talla a la cual comienza el cambio de sexo es alrededor de los 35 cm (Giménez-Hurtado *et al.* 2003). La proporción sexual (M/H) presenta la mayor proporción de hembras en la talla de 30 cm de longitud total (LT) y disminuye a partir de los 45 cm (LT), en la talla de 75 cm (LT) y mayores, la proporción sexual no es significativamente diferente de 1:1 (Giménez-Hurtado *et al.*, 2003). Su talla de primera madurez sexual ha sido reportada en los 50.9 cm de longitud furcal (LF) (Moe, 1969; Brulé *et al.*, 1999). Presenta un periodo de reproducción anual, con una época de actividad sexual intensa en invierno y primavera (Moe, 1969; Valdés y Padrón, 1980). El pico de

desove ocurre de enero a abril y el sitio de desove no parece estar restringido a una zona en específica debido a que se han observado hembras maduras en diferentes zonas de la plataforma continental (Brulé *et al.*, 1999; Giménez-Hurtado *et al.*, 2003).

No existen evidencias de que el mero rojo (*E. morio*) realice agregaciones masivas como ocurre en otras especies de meros (Shapiro, 1987; Sadovy, 1996), pero se ha reconocido un importante movimiento poblacional hacia la región central y oriental de la plataforma continental en enero y febrero (Figura 3) en relación con el periodo reproductivo (González *et al.*, 1974; Valdés y Padrón, 1980; Arreguín-Sánchez y Pitcher, 1999; Hernández y Seijo, 2003).

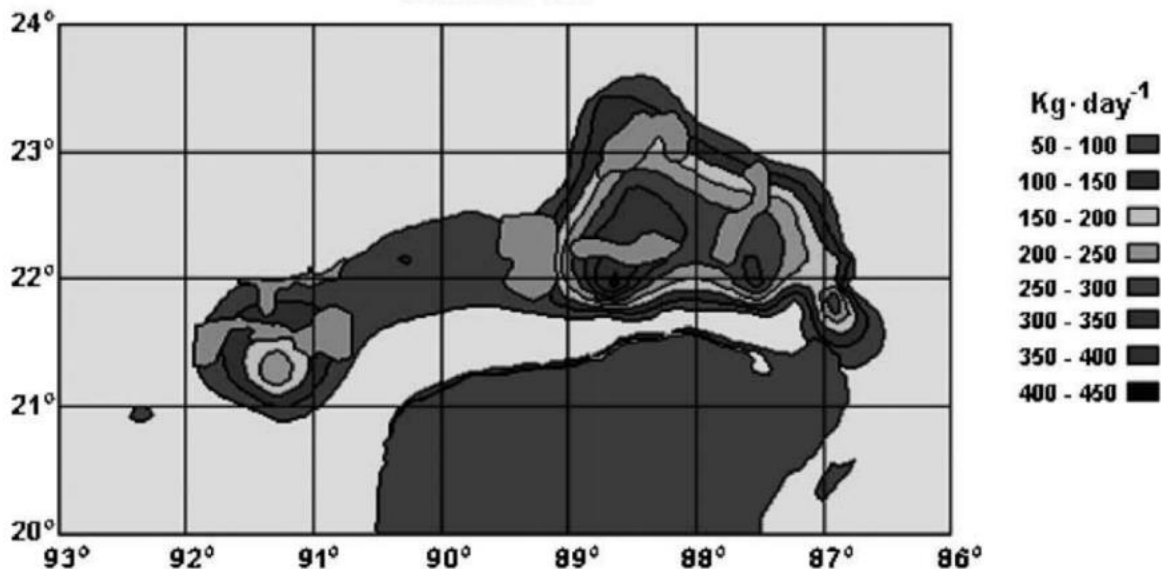


Figura 3. Mapa de distribución de la población de *E. morio* en el Banco de Campeche durante los meses de enero y febrero. Tomada de Hernández y Seijo (2003).

#### 2.1.4 Aspectos ecológicos

El mero rojo es un pez esencialmente carnívoro y depredador activo. Los principales grupos en su dieta son: crustáceos: langostas, cangrejos y camarón; peces: lutjánidos, hemúlidos, espáridos y jureles; moluscos: pulpos y calamares (Arreguín-Sánchez *et al.*, 1997; Brulé y Rodríguez-Canché, 1993).

De acuerdo con Böhlke y Chaplin (1968) y Moe (1969) el mero rojo es una especie asociada a tipos de substrato duro, principalmente de origen calcáreo. Albañez-Lucero y Arreguín Sánchez (2009) encuentran relación en la distribución de tallas grandes de mero en el banco de Campeche con fondos de arena y concha en la zona noreste del banco y de organismos jóvenes asociados a fondos rocosos y arena en zonas cercanas a la costa norte de Yucatán.

Evidencias recientes indican que el mero rojo (*E. morio*) es capaz de modificar su entorno mediante la excavación de sedimentos para exponer la superficie rocosa en el fondo del mar, la cual crea un hábitat propicio para una gran variedad de especies (Coleman y Williams, 2002; Coleman *et al.*, 2010).

También, junto con tiburones, huachinangos y mojarras son conocidos como depredadores tope de la red trófica en las comunidades de fondos rocosos, ya que pueden incidir en algunos aspectos del balance de la comunidad dentro del ecosistema (Arreguín-Sánchez y Valero, 1996).

## **2.2 Hábitat bentónico marino**

El concepto de hábitat bentónico marino tiene connotaciones inconsistentes para los científicos de diferentes disciplinas y ninguno de los descriptores generales resulta de utilidad ya que necesariamente se definen sobre una base específica de la especie y pueden ser muy variables para diferentes poblaciones o etapas de la vida (Greene *et al.*, 2005). Sin embargo, por lo general se considera como un hábitat bentónico marino al conjunto de componentes fisicoquímicos (p.ej. temperatura, profundidad, salinidad, nutrientes), geomorfológicos (sustratos inertes y complejidad topográfica) y biológicos (organismos sésiles o incrustantes) del fondo marino que se asocian comúnmente con una especie o con una población local de la misma (Greene *et al.*, 2005; Arias *et al.*, 2006).

### 2.2.1 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos

Existen varias técnicas para la caracterización de los hábitats bentónicos marinos como los cuadrantes, los transectos en banda, transectos de intercepción de puntos, áreas circulares, fotocadrantes y videotransectos, entre otros (English *et al.* 1997; Raymundo *et al.* 2008).

Específicamente, la filmación de videotransectos, fue propuesto en la década de los 90 para muestrear arrecifes coralinos en Estados Unidos de América y en Australia, por autores como Aronson y Swanson (1997) y Osborne y Oxley (1997). Este método es no destructivo, permite analizar comunidades bentónicas y además provee medidas cuantitativas de cambios temporales en las comunidades, además de permitir al investigador cubrir un área mayor por unidad de esfuerzo de muestreo y producir un registro permanente (Aronson y Swanson, 1997).

La técnica de videotransectos obtiene el porcentaje de cobertura de organismos bentónicos sésiles o incrustantes (desde grandes grupos funcionales hasta el nivel taxonómico de especie), así como el porcentaje de cobertura de sustratos inertes (Christie *et al.*, 1996; Aronson y Swanson, 1997; Garza-Pérez *et al.* 2004).

Garza-Pérez *et al.* (2004) propone la caracterización de los hábitats bentónicos marinos desde varios enfoques y escalas, de una manera más integral con otros componentes geomorfológicos, estructurales, ambientales y ecológicos, como modelos digitales batimétricos detallados, registros de parámetros ambientales (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto del agua), densidad de colonias de coral escleractíneo, hidrocorales, octocorales, esponjas y algas, y la evaluación de la complejidad topográfica o rugosidad.

## 2.3 Percepción remota

La percepción remota permite la adquisición de información de objetos, sin tener un contacto físico con ellos. Usualmente, los datos obtenidos de percepción remota hacen referencia a datos de la Tierra recolectados por sensores que se encuentran a bordo principalmente de satélites y aviones, entre otros.

Los sensores remotos por lo general obtienen datos de la radiación electromagnética, la cual es energía transmitida a través del espacio en forma de ondas eléctricas y magnéticas

(Star y Estes, 1990). Estos sensores se encuentran diseñados para registrar datos de longitudes de onda específicas del espectro electromagnético, el cual se extiende desde las ondas cósmicas hasta las de radio (Jensen, 1996) (Figura 4).

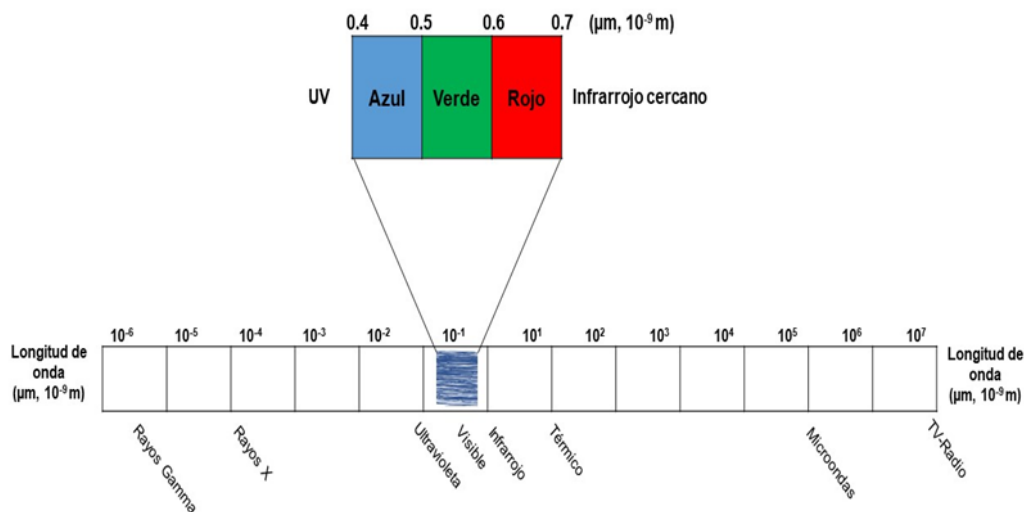


Figura 4. Longitudes de onda correspondientes al espectro electromagnético. Modificado de Goodman *et al.*, 2013.

### 2.3.1 Sensores remotos pasivos

La mayoría de los sensores remotos comerciales, con excepción de los radares y la tecnología LiDAR, son sensores ópticos pasivos. Este tipo de sensores solo pueden recibir ondas de radiación, mas no pueden emitirlas (GEOSYSTEMS, 2010).

El uso de estos sensores para la caracterización o identificación de un material de interés se basa en los principios de espectroscopia, los cuales indican el espectro de las longitudes de onda absorbidas o reflejadas por los materiales de interés debido a sus características fisicoquímicas y que son específicas de cada uno de ellos otorgándoles una firma espectral particular (GEOSYSTEMS, 2010).

Debido a que en los sensores remotos pasivos el sol es la fuente de radiación se debe de considerar que dicha radiación debe viajar a través de la atmosfera terrestre antes de alcanzar su superficie y por tanto se ve afectada de manera importante a su paso por ella (Elachi, 2006) (Figura 5).



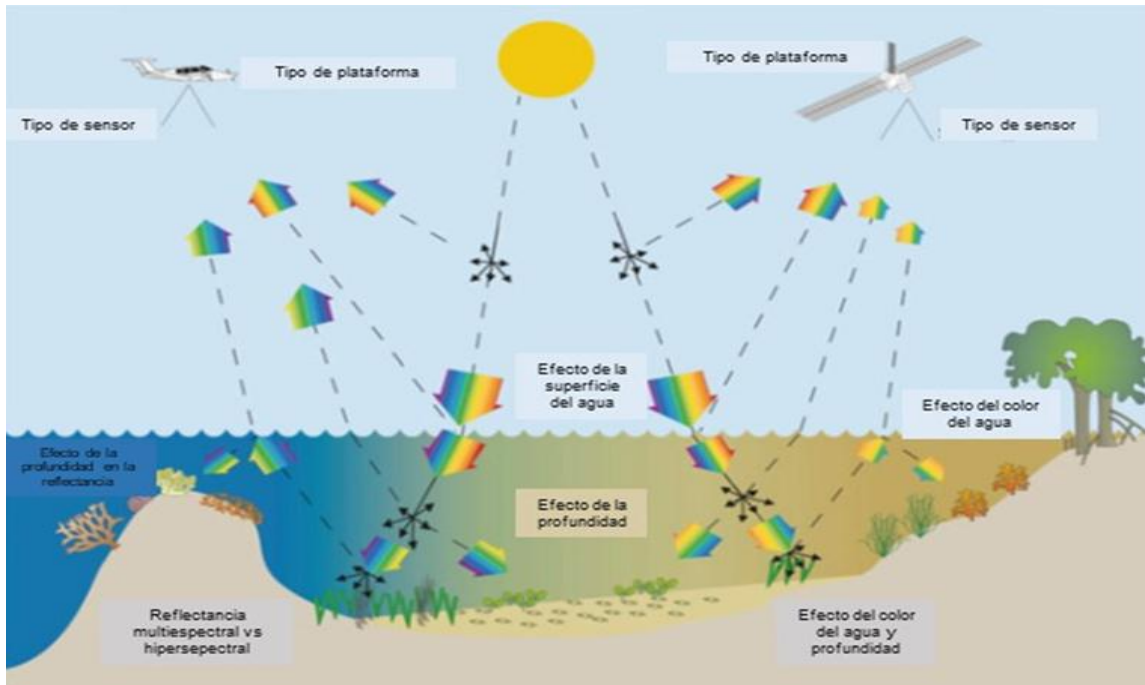


Figura 5. Características y procesos ambientales que afectan los registros de los sensores remotos pasivos. Modificada de Goodman *et al.*, 2013.

### 2.3.2 Resolución

Las características de cada sensor son el primer paso por considerar para la delimitación de los usos que se pueden dar a cada uno de ellos. Las características de estos se pueden dividir principalmente en cuatro tipos de resolución: espectral, espacial, radiométrica y temporal (GEOSYSTEMS, 2010).

*Resolución espectral:* se refiere a los intervalos de longitudes de onda del espectro electromagnético que el sensor puede registrar (Simonett *et al.*, 1983). Los intervalos amplios en el espectro electromagnético son considerados como de baja resolución, mientras que los intervalos cortos son considerados de mayor resolución (Figura 6).

*Resolución espacial:* es la medida del objeto más pequeño que puede definir el sensor, o, en otras palabras, el área de la superficie terrestre representada por cada píxel (Simonett *et al.*, 1983) (Figura 6).

*Resolución radiométrica:* se refiere al rango o número de datos posibles que el sensor puede registrar en cada banda. Esta también se refiere al número de bits en los que se divide la energía registrada (Figura 6).

*Resolución temporal:* se refiere la periodicidad con que el sensor puede obtener imágenes de un área en particular, este tipo de resolución es de suma importancia y se tiene que considerar para estudios de detección de cambios en un área determinada (Figura 6).

La resolución espacial y temporal se distinguen en tres rangos: alta, media y baja resolución, independiente del tipo de sensor. Los sensores de media resolución son aquellos que cuentan con un tamaño de píxel que va de los 10 a los 100m (Wulder *et al.*, 2008).

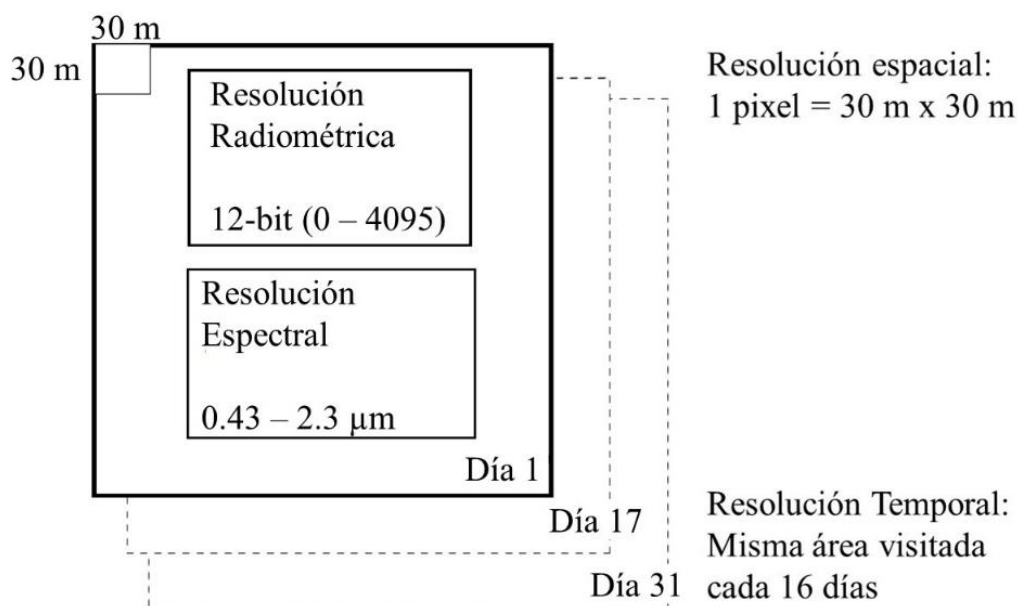


Figura 6. Ilustración representativa de los cuatro tipos de resolución de un sensor remoto. Modificada de GEOSYSTEMS, 2010.

### 2.3.3 Misiones Landsat

En 1972, la NASA inicio el primer programa de acceso civil especializado en la obtención de datos de la superficie terrestre a través del uso de satélites. Originalmente fue llamado ERTS (Earth Resources Technology Satellites), posteriormente fue renombrado Landsat. A partir del año de inicio del programa ocho satélites han sido puestos en órbita. Los satélites

Landsat 1, 2 y 3 actualmente se encuentran fuera de operación, no obstante, los Landsat 4, 5, 6, 7 y 8 se encuentran en órbita y funcionando (USGS, 2017).

Con excepción del Landsat 8 (del cual se habla de sus características principales más adelante), todos los satélites Landsat se encuentran equipados con un escáner multiespectral (MSS) de cuatro bandas, sin embargo, a partir del Landsat 4 y hasta el Landsat 7 fueron equipados adicionalmente con un escáner para mapeo temático (TM o ETM+) (USGS, 2017).

*Landsat 8*: lanzado el 11 de febrero de 2013, lleva dos instrumentos de barrido automático: el Operational Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS). Las bandas espectrales del sensor OLI, aunque similares al sensor ETM+ de Landsat 7, mejoran los instrumentos Landsat anteriores (Figura 7), con la grabación en 12-bits y la adición de dos nuevas bandas espectrales: un canal visible azul profundo (banda 1) y un nuevo canal infrarrojo (banda 9) (USGS, 2017) (Tabla 2).

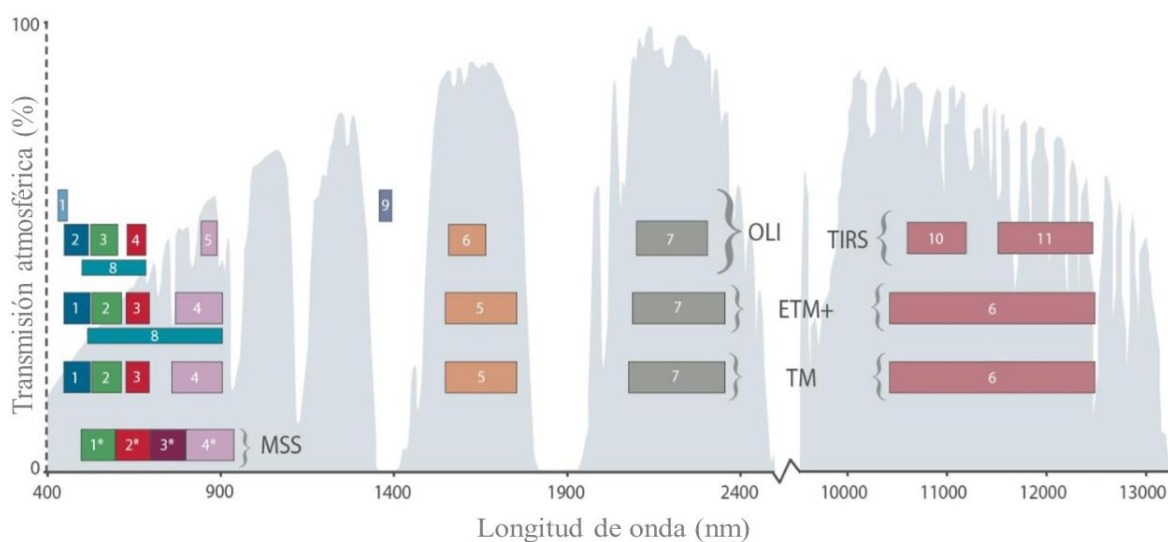


Figura 7. Gráfico que describe las designaciones de cada banda para todos los sensores Landsat. Modificada de USGS, 2017.

Tabla 2. Tabla con características de cada banda del escáner Operational Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS). IRC=Infrarrojo cercano; IOC=Infrarrojo de onda corta.

Banda	Longitud de onda	Aplicaciones
1, Azul profundo	0.435 a 0.451 $\mu\text{m}$	Estudios de la zona costera
2, Azul	0.452 a 0.512 $\mu\text{m}$	Mapeo batimétrico, discriminar el suelo de la vegetación y diferenciar entre vegetación caducifolia de la vegetación de coníferas
3, Verde	0.533 a 0.590 $\mu\text{m}$	Enfatizar picos de vegetación, que es útil para evaluar salud vegetal
4, Roja	0.636 a 0.673 $\mu\text{m}$	Discriminar entre curvas de vegetación
5, IRC	0.851 a 0.879 $\mu\text{m}$	Enfatizar contenido de biomasa y líneas de costa
6, IOC 1	1.566 a 1.651 $\mu\text{m}$	Discriminar composición de suelos y vegetación, penetrar nubes delgadas
7, IOC 2	2.107 a 2.294 $\mu\text{m}$	Composición de suelos y vegetación y penetración de nubes delgadas
8, Pancromática	0.503 a 0.676 $\mu\text{m}$	Resolución de 15 metros, mejor definición de formas
9, Cirrus	1.363 a 1.384 $\mu\text{m}$	Detectar contaminación por nubes cirrus
10, TIRS 1	10.60 a 11.19 $\mu\text{m}$	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y estimar contenido de suelos
11, TIRS 2	11.50 a 12.51 $\mu\text{m}$	Resolución de 100 metros, mapeo térmico y estimar contenido de suelos

## 2.4 Imágenes satelitales y productos derivados

### 2.4.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales

Los conjuntos de datos de imágenes que se obtienen de los sistemas satelitales proporcionan una poderosa fuente de información espacialmente explícita sobre los hábitats (Overton *et al.*, 2002), sin embargo, deben ser sometidas a una serie de operaciones de preprocesamiento (para corregir y estandarizar algunas distorsiones) antes de que sean útiles (Overton *et al.*, 2002; Goodman *et al.*, 2013). Algunas operaciones de procesamiento son esenciales si se está planeando vincular datos de campo u otros datos espaciales con imágenes obtenidas por un sensor remoto. Según Goodman *et al.* (2013) las correcciones de preprocesamiento más importantes para imágenes que se usaran con fines de estudio de la zona costera son:

*Corrección geométrica:* implica alinear la imagen con un sistema de coordenadas establecido, proyección y referencia, lo que permite que la imagen se use o se superponga con otros datos espaciales y datos de campo.

*Corrección radiométrica:* convierte los valores relativos de los píxeles en medidas absolutas de luminosidad por unidad de longitud de onda de la luz.

*Corrección atmosférica:* elimina los efectos atmosféricos y, por lo tanto, transforma los valores radiométricos en luminosidad o reflectancia de la superficie. Esto permite estimar mediciones basadas en campo o parámetros biofísicos.

*Corrección de la columna de agua:* en algunos casos, pueden requerirse correcciones adicionales para eliminar el brillo solar o la atenuación debida a la columna de agua.

Después de que estas correcciones se han tenido en cuenta, la información espectral se encuentra disponible como una capa que puede usarse para una mayor integración o generalización (Overton *et al.*, 2002).

#### 2.4.2 Predicción espacial

Como concepto la predicción espacial se define como el uso de diferentes modelos estadísticos para establecer relaciones entre una variable de respuesta y un conjunto de variables predictivas, que permiten realizar predicciones espaciales de la variable de respuesta, para lo cual se requieren mediciones puntuales de ambos tipos de variables. (Lehmann *et al.*, 2002; Overton *et al.*, 2002).

Se ha explorado el uso de la predicción espacial tanto en ambientes terrestres como en ambientes costeros y marinos, lo cual ha dado lugar al desarrollo de diferentes modelos estadísticos que incorporan la gestión de bases de datos geográficas, modelación espacial y predicción espacial (Garza-Pérez *et al.*, 2004).

Específicamente, para crear predicciones espaciales que relacionen los datos obtenidos en campo con los parámetros derivados de la percepción remota, se han implementado distintos modelos (p.ej. modelos aditivos generales (GAM), máquinas de soporte vectoriales (SVM) y modelos de árboles de regresión) que pueden variar en precisión según las características particulares de cada sitio de estudio (Goodman *et al.*, 2013).

### 2.4.3 Clasificación de imágenes y mapeo de hábitat

La clasificación de imágenes es el proceso de identificación de píxeles de una imagen que poseen características similares, organizarlos en grupos y asignarles una etiqueta (p.ej. nombres de hábitats). El producto final de la clasificación es un mapa de hábitats o de otras características de interés. Existen dos enfoques principales para clasificar imágenes digitales multiespectrales: clasificación no supervisada y clasificación supervisada. (Green *et al.*, 2000).

*Clasificación no supervisada:* la computadora clasifica automáticamente los píxeles de una imagen en varias clases (definidas previamente por el operador) sobre la base de similitud espectral (Green *et al.*, 2000). Dicha clasificación utiliza técnicas estadísticas de clúster para agrupar píxeles de manera automática a una clase que no ha sido entrenada previamente, tiene en cuenta parámetros estadísticos, que buscan minimizar las desviaciones de las clases y maximizar la distancia al centro de cada grupo de píxeles encontrados (Lang *et al.*, 2008). El método ha sido encontrado útil en la planificación de muestreos en campo para aquellas áreas donde no se conocen los detalles (Green *et al.*, 2000).

*Clasificación supervisada:* es aquella donde los datos del muestreo en campo se utilizan para identificar píxeles de tipos de hábitat particulares y así obtener las firmas espectrales de cada hábitat a partir de los datos de imagen (Green *et al.*, 2000). Para Lang *et al.* (2008) consta de dos fases: entrenamiento y asignación. En la fase de entrenamiento, el investigador realiza un reconocimiento general de las áreas de estudio, con el fin de determinar patrones relacionados con una clase, el conjunto de píxeles relacionados a cada clase encontrada delimita las firmas espectrales de los mismos. En la fase de asignación, se asigna una lista de clases para que la computadora, mediante algoritmos, realice una clasificación general de la imagen.

Según Green *et al.* (2000) una combinación de las técnicas de clasificación no supervisada, estudios de campo y técnicas de clasificación supervisada proporcionan los mapas de hábitat más precisos.

### III. ANTECEDENTES

#### 3.1 Estudios de mero rojo

Hernández y Seijo (2003) mediante la correlación en serie y pruebas paramétricas analizaron la distribución espacial del mero rojo (*E. morio*) en Yucatán. Estos métodos mostraron que, durante cada año, la distribución espacial del mero rojo es significativamente diferente en enero y febrero. Este periodo se caracteriza por la mayor abundancia, particularmente en las áreas de pesca ubicadas en la parte oriental de la plataforma continental. De igual forma proponen incluir sus hallazgos para determinar el impacto en la pesquería y evaluar la implementación de vedas temporales o espaciales para reconstruir el stock.

López-Rocha y Arreguín-Sánchez (2008) evaluaron los patrones de distribución de capturabilidad para el mero rojo (*E. morio*) en el Banco de Campeche, en la costa norte de Yucatán, México. Se identificaron dos patrones de capturabilidad predominantes en la pesquería de mero rojo en el Banco de Campeche. El primer patrón se ubicó en áreas más profundas lejos de la costa y se caracterizó por una alta probabilidad de captura que aumenta con la longitud. El segundo patrón predominante muestra una baja probabilidad de captura en áreas cercanas a la costa. Sus resultados apuntan a que el área principal de agregación para la reproducción con valores más altos de capturabilidad se encuentra en la parte oriental del banco. Estas diferencias de capturabilidad sugieren que políticas de gestión espacial deben implementarse para permitir la recuperación del stock agotado.

Albáñez-Lucero y Arreguín-Sánchez (2009) basándose en el modelo de red neuronal artificial (ANN), analizaron la distribución espacial del mero rojo (*E. morio*) con respecto al sustrato, considerando la estructura demográfica del stock. Encontraron una relación significativa entre el tipo de sustrato y las tres etapas de desarrollo (juveniles, pre-adultos y adultos). Los juveniles se distribuyen en aguas poco profundas cerca de la costa sobre sustratos de coral; los pre-adultos también están asociados con sustratos de coral, pero a una profundidad intermedia y los adultos se encuentran en aguas más profundas en sustratos arenosos. También identificaron patrones de agregación reproductiva estacional en relación con los tipos de sustrato.

En 2014 la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA) publicó en el Diario Oficial de la Federación el Plan de manejo pesquero del mero rojo (*E. morio*) y especies asociadas en la península de Yucatán, el cual establece medidas de manejo enfocadas a la restauración de las poblaciones de mero rojo y al desarrollo de una pesquería rentable económicamente, a través del monitoreo y la evaluación. Dicho plan implementa dos tipos de indicadores: de gestión para medir el cumplimiento de la ejecución de las acciones, y de resultados para valorar en un futuro el logro de los objetivos establecidos por el plan de manejo. Dentro de estos indicadores se incluye lo relativo a las investigaciones científicas, dentro de las que se comprenden: definir áreas de hábitat crítico de *E. morio* para implementación de estrategias de protección, monitorear indicadores biológico-pesqueros, realizar evaluaciones periódicas que permitan monitorear el estado de las poblaciones de *E. morio* y definir un muestreo dirigido a la flota artesanal para monitorear la frecuencia de tallas en la captura.

Garza-Pérez *et al.* (2017), a través de un análisis de redundancia (RDA) observó la relación de la comunidad de peces (incluido *E. morio*) con los diferentes tipos de fondos en la zona sublitoral de Sisal, Yucatán, así como la magnitud de la importancia de dicha relación en tres temporadas climáticas: secas, lluvias y nortes. Sus resultados revelaron una baja selectividad de las especies a los tipos de cobertura y de sustrato, sin embargo, estableció que la variable más importante a la que se asocia mayor biomasa y riqueza de especies de peces es la complejidad del hábitat, la cual está dada por la cobertura de algas que fluctúa entre temporadas climáticas y está completamente asociada a las condiciones ambientales de estas (p.ej. irradiación solar, temperatura, nubosidad, velocidad del viento, velocidad de corrientes marinas, intensidad de oleaje y surgencias).

Vidal-Hernández *et al.* (2017) a través de un análisis de redundancia (RDA) analizaron la diversidad y abundancia de peces asociados a coberturas bentónicas y tipos de fondo en seis sitios de pesca recreativa en Sisal, Yucatán; con el fin de establecer bases para la conservación y el manejo adecuado de sus recursos pesqueros, especialmente de especies comerciales y deportivas. Los resultados muestran cierta homogeneidad en las asociaciones ícticas entre sitios y entre temporadas climáticas (sin diferencias significativas); sin embargo, algunas especies parecen mostrar preferencias con algunos elementos bentónicos. Específicamente *E. morio* parece relacionarse con la presencia de algas pardas.



### 3.2 Estudios de caracterización del hábitat bentónico marino

Rosado-Espinosa *et al.* (2011) a través de videotransectos y un diseño muestral generado a partir de una clasificación no supervisada de una imagen de satélite Landsat ETM+, caracterizaron los mantos algales en el área natural protegida de Dzilam de Bravo, Yucatán. Encontraron un total de 74 especies de algas clasificadas en un total de nueve clases o hábitats distintos. Definieron que en las zonas más profundas las comunidades de algas se conforman principalmente por *Sargassum spp.*, mientras que en los sitios con una profundidad media se desarrollan comunidades de algas rojas que van disminuyendo su cobertura gradualmente conforme disminuye la profundidad.

Naranjo-García (2012) estimó el cambio en los hábitats submarinos en el litoral de Sisal, Yucatán a través del tiempo mediante la comparación de dos mapas temáticos realizados a través de clasificación supervisada de dos imágenes Landsat obtenidas en época de secas: abril de 2000 y mayo de 2010. Sus resultados indican la permanencia del patrón espacial de distribución de los hábitats submarinos al menos durante una década.

Garza-Pérez *et al.* (2017) caracterizó a través de tres temporadas climáticas (secas, lluvias y nortes), los hábitats submarinos en el litoral de Sisal, Yucatán. La caracterización bentónica se llevó a cabo siguiendo un diseño muestral generado a partir de una clasificación no supervisada de una imagen de satélite Landsat 7 ETM+ y el uso de videotransectos en cada punto. Definieron un total de seis paisajes submarinos (constantes durante tres temporadas climáticas) que presentan una alta homogeneidad en el tipo y porcentaje de cobertura bentónica, lo cual se ve reflejado en un gradiente continuo desde los fondos arenosos con escasa cobertura algal hasta los fondos rocosos con coberturas de corales y octocorales. De igual forma plasmaron la distribución espacial de los mismos en un mapa temático generado a partir de una clasificación supervisada de una imagen de satélite Landsat 7 ETM+ preprocesada con corrección atmosférica y del efecto de la columna de agua.

Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) a través de imágenes satelitales, caracterizaron espacialmente los hábitats bentónicos marinos de la costa de Yucatán, con el fin de identificar áreas de conservación prioritarias. Identificaron un total de 40 morfotipos bentónicos, predominantemente algas pardas y pastos marinos. Definieron siete tipos de hábitat a lo largo de la costa según la disposición y la organización espacial de la comunidad béntica: sustrato

desnudo (A), arena con pastos marinos (B), pradera de pastos marinos (C), pastos marinos con macroalgas (D), macroalgas sobre arena (E), pavimento calcáreo con macroalgas (F), y bosque de macroalgas (G). Definieron que, debido a su complejidad estructural y riqueza biológica, los hábitats C, D, F y G son potencialmente críticos para las tortugas, meros, pulpos y langostas, por lo que sugieren estos hábitats como áreas de conservación prioritarias.

#### IV. JUSTIFICACIÓN

Anteriormente se han desarrollado trabajos de investigación que abordan aspectos de la distribución espacial del mero rojo en las costas de Yucatán, sin embargo, en su mayoría, han sido dirigidos exclusivamente a las áreas de incidencia de la flota de mediana altura (Prof. > 30m). Aunado a esto, los mismos, se han basado en el uso de datos históricos derivados de la pesca comercial, así como en el uso de mapas de clasificación de sustratos, con una baja precisión.

En este contexto, la importancia de este trabajo radica en proporcionar información científicamente validada acerca de la distribución espacial del o los hábitats de predilección de *E. morio* en las áreas de incidencia de la flota menor artesanal de las costas de Yucatán. Esta información, basada en datos obtenidos de manera directa en campo y su combinación con el uso de datos de sensores remotos, será de utilidad para el soporte a la toma de decisiones en la conservación y manejo sustentable de este recurso marino renovable de alta importancia comercial y alimentaria.

## V. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

### 5.1 Hipótesis

Con base en estudios anteriores de distribución y abundancia del mero rojo (*E. morio*) en el Banco de Campeche, se espera que los hábitats con dominancia de fondos duros y arenosos, así como con presencia de algas verdes y pardas, estén asociados a una mayor abundancia y biomasa de mero rojo.

### 5.2 Objetivo general

Analizar la relación de la abundancia y biomasa de *E. morio* con las variables de profundidad y cobertura bentónica presentes en el área de incidencia de la flota artesanal en el área este y oeste de Yucatán, para definir su hábitat de predilección y generar cartografía de la distribución espacial de estos hábitats.

### 5.3 Objetivos específicos

- Definir los diferentes hábitats bentónicos marinos detectables en las imágenes satelitales de las áreas de estudio, a través de clasificaciones no supervisadas.
- Caracterizar los hábitats bentónicos marinos definidos en las áreas de estudio con base en la cobertura bentónica, la profundidad y la complejidad topográfica.
- Generar mapas temáticos de los hábitats bentónicos marinos presentes en ambas áreas de estudio, a través de clasificaciones supervisadas.
- Definir las asociaciones de la población de mero rojo (*E. morio*) con los componentes bentónicos de cada hábitat bentónico marino.
- Generar mapas de la distribución espacial de sus hábitats de predilección.

## VI. ÁREA DE ESTUDIO

Las áreas de interés se localizaron en la península de Yucatán, la cual se encuentra entre los 18° 42' y 20° 34' latitud norte y los 86° 26' y 87° 42' longitud oeste, frente a dos localidades con influencia de la flota menor artesanal yucateca (Prof. < 30m), una al oeste, con referentes: el puerto de Celestún y el puerto de Sisal; y otra al este, con referentes: el puerto de Río Lagartos y el puerto de Las Coloradas; en este estudio, estas regiones se designaron como Celestún-Sisal y Río Lagartos-Las Coloradas, respectivamente (Figura 8).

La costa yucateca está ubicada en una llanura a lo largo de una amplia plataforma continental con una suave pendiente; es poco profunda y está compuesta por depósitos marinos carbonatados de origen biogénico (Capurro *et al.*, 2002). Una particularidad de las costas de la península de Yucatán es que carecen de características topográficas principales y escorrentía superficial (Merino y Otero, 1991; Solleiro-Rebolledo *et al.*, 2011), por lo cual los aportes de nutriente y de agua dulce se producen mediante descargas de aguas subterráneas, lagunas costeras y manantiales relacionados con el "anillo de cenotes" asociado con el cráter de Chicxulub (Pacheco-Martínez y Alonzo-Salomón, 2003).

En relación con el régimen de vientos y lluvias, la región se caracteriza por contar con tres épocas diferentes: de "secas" de marzo a mayo, de "lluvias de verano" de junio a septiembre, y de "nortes" de octubre a febrero (Day *et al.*, 2004). Los llamados "nortes" son masas de aire frío provenientes de Estados Unidos y del sur de Canadá, que producen un descenso en la temperatura, así como un aumento en las precipitaciones (García, 1970). La temporada de huracanes (agosto a noviembre) se superpone a la época de lluvias y "nortes" (Álvarez-Góngora y Herrera-Silveira, 2006) provocando vientos con velocidades de hasta 10 metros por segundo (Enríquez *et al.*, 2013), lo que causa un aumento en la intensidad de los procesos costeros.

La parte marina tiene ondas de baja energía y corrientes superficiales dominantes de este a oeste (Enríquez *et al.*, 2013) que transportan sedimentos en la misma dirección (Appendini *et al.*, 2012).

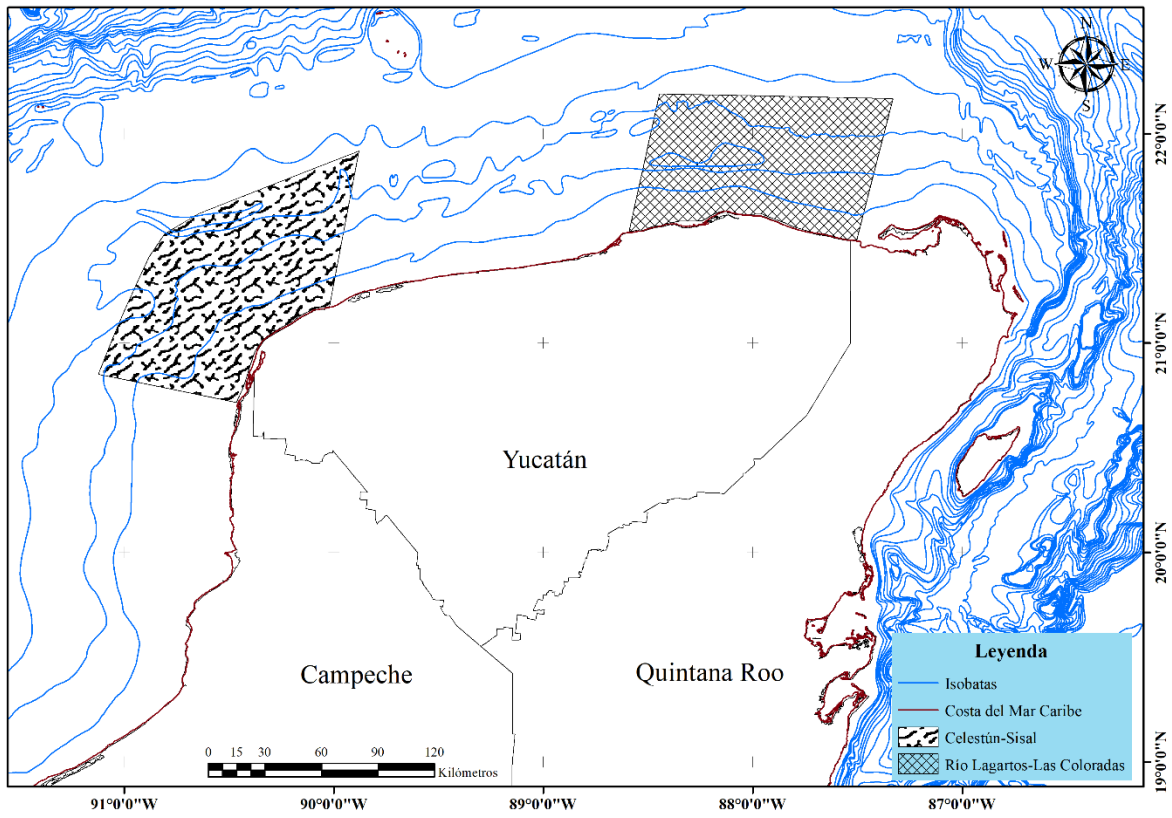


Figura 8. Localización geográfica del área de Celestún-Sisal (oeste) y Río Lagartos-Las Coloradas (este).

## VII. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales

Se llevaron a cabo operaciones de preprocesamiento mediante el uso de las funciones del software ENVI 5.3, sobre dos imágenes de acceso público Landsat 8 OLI/TIRS: Celestún-Sisal (Path 21, Row 45) y Río Lagartos-Las Coloradas (Path 19, Row 45). Es importante mencionar que previo a las correcciones, se procedió a seleccionar regiones de interés (ROI por sus siglas en inglés) que abarcaron las áreas de incidencia de la flota artesanal de ambas áreas de estudio, dicha acción garantizó la reducción de los tiempos de procesamiento de cada imagen. Todas las acciones de preprocesamiento se llevaron a cabo en el software ENVI 5.3.

*Corrección geométrica:* esta corrección no fue necesaria realizarla debido a que las imágenes Landsat 8 OLI/TIRS descargadas ya se encuentran alineadas con el sistema de coordenadas predilecto (UTM).

*Corrección radiométrica:* es esencial para el próximo paso y se realizó mediante el uso de la función *Radiometric Calibration*, la cual traduce los valores relativos de los píxeles (Números Digitales) a valores absolutos (medidas de irradiancia por unidad de longitud de onda de luz).

*Corrección atmosférica:* Para dicha corrección se usó el módulo de Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH®) la cual transforma los valores radiométricos en resplandor o reflectancia superficial, y elimina los efectos atmosféricos.

Específicamente, en este trabajo es requerida la atenuación del brillo de la luz solar en la superficie del agua, así como tomar en cuenta la influencia de la profundidad en la columna de agua y la generación de vapor a partir de la evaporación de esta.

*Corrección del brillo de la superficie del agua:* La corrección del brillo de la superficie del agua se logró a través de la aplicación de la siguiente fórmula en las bandas 1, 2, 3 y 5 de las imágenes con corrección atmosférica (Hedley *et al.* 2005):

$$R'i = R i - b_i (R_{IOC})$$

Donde:

$R'i$  = corrección de banda  $i$

$Ri$  = valores de la banda  $i$

$b_i$  = pendiente de la regresión lineal de la banda  $IOC2$  (banda 7) con la banda  $i$

$R_{IOC}$  = valores de la banda  $IOC2$  (banda 7)

Para obtener la pendiente de la regresión lineal observada en la formula, se seleccionaron regiones de interés sobre las imágenes corregidas atmosféricamente que contenían un alto grado de brillo, pero donde se esperaba que la imagen fuera homogénea si el brillo del sol no estuviera presente, por ejemplo, sobre aguas profundas (Figura 9). Posterior al posicionamiento de las áreas de interés, se procedió a extraer y exportar en formato ASCII los valores de los píxeles contenidos en cada una de dichas áreas de interés. Estos archivos se importaron al software Microsoft Excel donde se calcularon las pendientes de las regresiones lineales entre las bandas de interés (7-1, 7-2, 7-3 y 7-5).

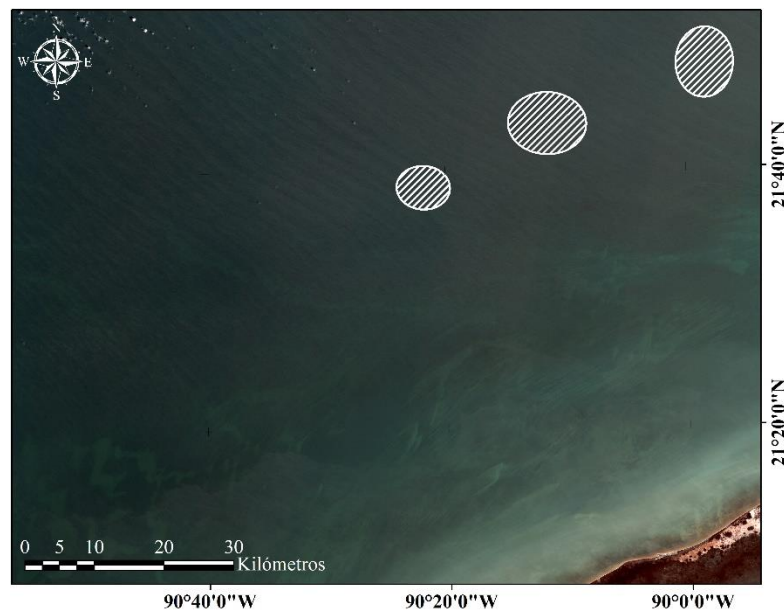


Figura 9. Imagen ilustrativa del posicionamiento de las áreas de interés sobre imagen corregida atmosféricamente.



*Corrección de vapor:* se resolvió mediante el uso de la siguiente formula en las bandas 1, 2 y 3 de la imagen corregida de brillo de la superficie del agua:

$$R'i = R i - bi (R_{IRC})$$

Donde:

$R'i$  = corrección de banda  $i$

$Ri$  = valores de la banda  $i$

$bi$  = pendiente de la regresión lineal de la banda  $IRC$  (banda 5) con la banda  $i$

$R_{IRC}$  = valores de la banda  $IRC$  (banda 5)

Para obtener la pendiente de la regresión lineal observada en la formula se seleccionaron regiones de interés ubicadas sobre la imagen corregida del brillo solar, donde el vapor de agua era abundante. De igual forma que en la corrección de brillo, se procedió a extraer y exportar en formato ASCII los valores de los píxeles contenidos en cada una de dichas áreas de interés para realizar las regresiones lineales entre las bandas de interés (1, 2 y 3) y la banda  $IRC$  (banda 5).

*Corrección de efecto de memoria (bandeo):* fue necesario el uso de la función *Cross-Track Illumination Correction* para corregir el error intrínseco de las plataformas Landsat conocido como efecto de memoria el cual produce una alternancia de escaneos más claros y más oscuros (bandeo). El efecto de memoria se ve típicamente en las bandas de ondas visibles (1 a 4), después de una transición significativa en la intensidad radiante, como en grandes cuerpos de agua o nieve (USGS, 2018).

*Corrección del efecto de la profundidad:* Para linealizar el decaimiento espectral en función de la profundidad, fue necesario obtener el coeficiente de atenuación de cada banda de la imagen corregida en los pasos anteriores y a continuación se aplicó la siguiente ecuación a cada una de ellas (Hogrefe, 2008):

$$RLinear = Ln(Ri - Rmin)$$

Donde:

*RLinear* = linealización del decaimiento espectral en función de la profundidad

*Ln* = logaritmo natural

*Ri* = valores de la banda *i*

*Rmin* = valor espectral mínimo de la banda *i*

## 7.2 Diseño muestral

Las estaciones de muestreo se seleccionaron mediante muestreos estratificados al azar sobre clasificaciones no supervisadas de siete clases, generadas en el software ENVI, a partir de las imágenes multiespectrales obtenidas tras el preprocesamiento. Dicho muestro consistió en seleccionar las estaciones de muestreo a mano tomando en cuenta la profundidad ( $\leq 30$  m) y las clases definidas por la clasificación no supervisada. A continuación, se establecieron rutas de navegación en un patrón radial, lo cual permitió la optimización del tiempo de lancha y combustible.

Se planeó ejecutar los muestreos con fines de recolección de datos durante la época de secas en los meses de marzo, abril y mayo del 2017, debido a que, según lo registrado por Garza- Pérez *et al.* (2017), la temporada de secas cuenta con una mayor complejidad de hábitat la cual es la variable más importante a la que se asocia una mayor concentración de biomasa.

## 7.3 Caracterización de hábitats bentónicos marinos

Por medio de un GPS se navegó hacia cada estación seleccionada en el diseño muestral. Al llegar a las coordenadas se marcó el punto con una boya, el anclaje de dicha boya sirvió como soporte para desplegar un transecto de 50 m (Cinta métrica de PVC). Con ayuda del equipo de buceo autónomo (SCUBA) se realizaron inmersiones a lo largo de cada transecto. Dichas inmersiones se realizaron en profundidades que van de los 12 a los 30 m y fueron ejecutadas por dos equipos de trabajo compuestos por dos buzos cada uno.

Para la caracterización de la cobertura bentónica de los sitios de muestreo se utilizó el método de videotransectos el cual consiste en la filmación del fondo de cada transecto, con un enfoque perpendicular ( $90^\circ$ ), a una distancia de 55cm del sustrato, para mantener un área constante de filmación y obtener un barrido de 50 x 1.1m (Figura 10).

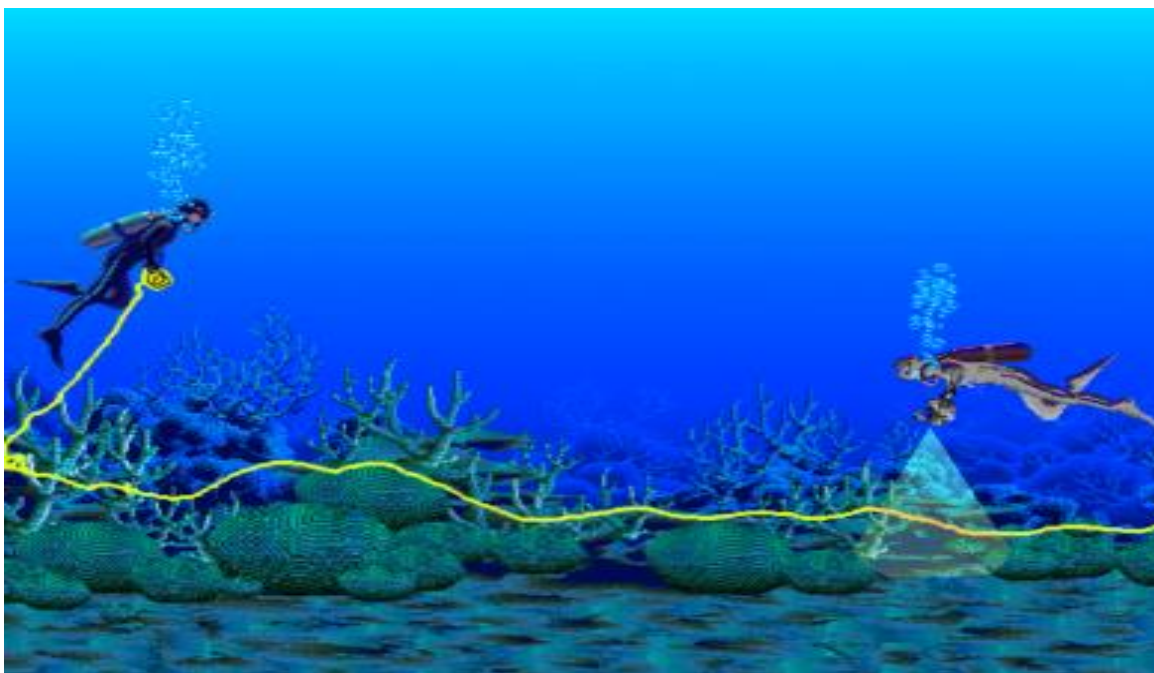


Figura 10. Método de filmación de videotransectos. Tomada de Garza-Pérez (1999).

Para la filmación de cada videotransecto se utilizó una videocámara submarina de alta resolución GoPro Hero 3+ (1080p a 30 fps) equipada con un filtro magenta y dos lámparas de video submarinas SideKick Duo de 600 lumenes cada una (para compensar el efecto de la extinción de la luz en la columna de agua y las tonalidades verdes del agua), así como un pequeño plomo atado con cabo a la base de la cámara que garantizó el tamaño mínimo de cuadro. El procedimiento de filmación se llevó a cabo de la siguiente manera: el primer buzo se encargó de desplegar la cinta métrica de PVC, mientras que el buzo encargado de la filmación del videotransecto al encender la cámara indicó, mediante el uso de señas con las manos, la estación y el día de grabación. Adicionalmente se realizaron tomas panorámicas de  $360^\circ$  al comienzo y al final de cada grabación, que posteriormente ayudaron en la interpretación visual de los videos en el laboratorio.

Para el análisis de los videotransectos, se importaron en formato de video digital (.mp4). Estos se analizaron a través de una modificación del método propuesto por Garza-Pérez *et al.* (2004). Dicha modificación, realizada a través de una prueba de curvas de acumulación, determinó el número de pausas (40) y puntos a identificar en cada pausa (25) necesarios para la estimación representativa de coberturas bentónicas (Figura 11). La identificación del sustrato y su cobertura se basó en una modificación de los grupos funcionales propuestos originalmente por Garza-Pérez para la evaluación de arrecifes coralinos en 2010 (Tabla 3).

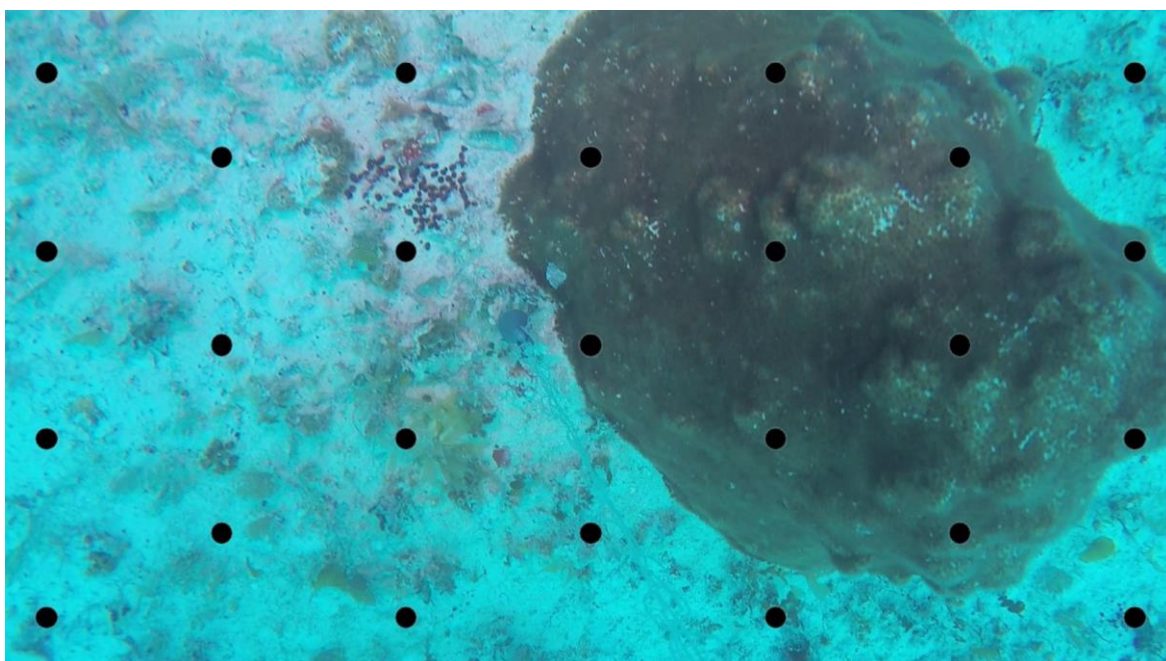


Figura 11. Ejemplo de patrón de puntos analizados para la determinación de la cobertura bentónica

Tabla 3. Tabla de grupos funcionales para la identificación de organismos bentónicos y sustratos inertes. Modificada a partir de Garza-Pérez (2010). ─: Modificación a la tabla original para incluir nuevos componentes bentónicos.

Nombre	Género/Especie/Descripción
<b>Grupo Funcional: Coral Escleractinio</b>	
Ramoso/Ramificado	<i>Acropora palmata, Acropora cervicornis, Acropora prolifera</i>
Digitiforme	<i>Madracis decactis, Madracis fromosa, Madracis auretenra, Porites porites</i> <i>Cladocora arbuscula, Oculina robusta, Oculina tenella, Oculina diffusa.</i>
Masivo/Domo	<i>Montastrea cavernosa, Montastrea faveolata, Solenastrea bournoni, Siderastrea siderea, Stephanocoenia intersepta, Porites astreoides</i>
Incrustante	<i>Dichocoenia stokesii, Favia fragum, Siderastrea radians, Undaria agaricites, Undaria humilis, Madracis pharensis, Madracis senaria, Porites colonensis</i>
Cerebro	<i>Diploria strigosa, Diploria clivosa, Diploria labyrinthiformis, Colpophyllia nathans, Isophyllia sinuosa, Isophyllastrea rigida, Meandrina meandrites, Meandrina jacksoni, Manicina areolata</i>
Folioso	<i>Undaria tenuifolia, Undaria agaricites, A. fragilis, Helioseris cucullata</i>
Carnoso/Rugoso	<i>Mycetophyllia aliciae, Mycetophyllia ferox, Mycetophyllia lamarckiana</i>
Disco/Plato	<i>Scolymia</i>
Copa/Flor	<i>Eusmilia fastigiata, Mussa angulosa</i>
Pilar	<i>Dendrogyra cylindrus</i>
<b>Grupo Funcional: Hidrocorales</b>	
Coral de Fuego	<i>Millepora Millepora alcicornis, Millepora Complanata, Millepora squarrosa</i>
Coral Encaje	<i>Stylaster roseus</i>
<b>Grupo Funcional: Octocorales (Corales Blandos)</b>	
Digitiforme	<i>Briareum asbestinum</i>
Ramoso/Arbustivo	<i>Pseudoplexaura, Muricea, Plexaurella, Plexaura homomalla, Plexaura flexuosa, Eunicea succinea, Eunicea mammosa, Izciligorgia schrammi, Muricea muricata, Pterogorgia guadalupensis, Pterogorgia anceps, Eunicea calyculata, Eunicea fusca, Muricea elongata, Muricea laxa</i>
Pluma	<i>Pseudeptergorgia americana, Muriceopsis flavida</i>
Abanico	<i>Gorgonia flabellum, Gorgonia ventalina, Gorgonia marieae</i>
Incrustante	<i>Erythropodium caribeorum, Briareum asbestinum</i>
<b>Grupo Funcional: Esponjas</b>	
Incrustantes	<i>Cliona langae, Cliona varians, Calix podatypa, Neofibularia nolitangere, Ectyoplasia ferox, Siponodiction coralliphagum</i>
Columna	<i>Aplysina cauliformis, Iotrochota, birtulata, Aplysina fulva</i>
Tubo	<i>Aplysina fistularis, Aplysia archeri, Pseudocerata crassa, Agelas conifera,</i>
Vaso	<i>Callyspongia vaginalis, Callyspongia plicifera, Niphates digitalis, Cribochalina vasculum, Geodia neptuni, Xetospongia muta</i>
Semiesférica	<i>Ircinia strobilina, Ircinia felix</i>

Tabla 3 (continuación). Tabla de grupos funcionales para identificación de organismos bentónicos y sustratos inertes. Modificada a partir de Garza-Pérez (2010). ■: Modificación a la tabla original para incluir nuevos componentes bentónicos.

Nombre	Género/Especie/Descripción
<b>Grupo Funcional: Algas</b>	
Macroalgas Pardas	<i>Dyctiota, Padina, Turbinaria, Sargassum, Lobophora variegata, Stypopodium zonale</i>
Macroalgas Verdes	<i>Avranvillea, Penicillus, Caulerpa, Valonia, Udotea, Acetabularia, Ventricaria</i>
Calcáreas Articuladas	<i>Halimeda</i>
Filamentosas	<i>Gelidiella, Ceramium, Polysiphonia, Wrangelia, Feldmannia, Sphacelaria</i>
Calcáreas Rojas	<i>Amphiroa, Galaxaura, Jania, Neogoniolithon</i>
Macroalgas Rojas	<i>Asparagopsis, Chondria, Dasya, Eucheuma, Gracilaria, Halymenia</i>
Coralinas/Incrustantes	<i>Galaxaura, Jania, Amphiroa, Porolithon</i>
<b>Grupo Funcional: Pastos Marinos</b>	
Pastos Marinos	<i>Thalassia testudinum, Syringodium filiforme, Halophila, Halodule wrightii</i>
<b>Grupo Funcional: Zoántidos y Tunicados</b>	
Zoántidos	<i>Playthoa caribeourm, Playthoa grandis, Zoanthus pulchellus, Epizoanthus cutressi, Parazoanthus</i>
Tunicados	<i>Didemnum vanderhorsti, Trididemum solidum, Clavelina, Eudistoma, Botrylloides, Distalpia</i>
<b>Grupo Funcional: Sustratos Inertes</b>	
Arena	Arena gruesa en grandes camas o acumulada en grietas o hendiduras
Sedimento	Sedimento calcáreo fino (arcillas y lodos) en grandes camas o acumulado en grietas o hendiduras. En zonas de alta sedimentación puede llegar a cubrir sustratos rocosos
Pavimento Calcáreo/Roca	Substrato desnudo o relativamente desnudo de carbonato de calcio y/o colonias coralinas muertas erectas, puede presentar una ligera película de microalgas y/o sedimento
Pedacería/Cascajo	Pedazos sin tejido coralino vivo de colonias rotas, generalmente de corales ramosos y digitiformes ( <i>Acropora</i> y <i>Porites</i> ). Cuando esta pedacería es muy antigua puede estar en alguna fase de cementación con el sustrato y puede estar recubierta significativamente por macroalgas, algas filamentosas o algas coralinas incrustantes. Solo en estos casos se registrará la cobertura como tal, en vez de considerarlo como pedacería/cascajo
■ Tubos calcáreos	Tubos de carbonato de calcio secretados por organismos tubícolas como los poliquetos

#### **7.4 Definición de hábitats bentónicos marinos**

A fin de generar un esquema de clasificación de los hábitats bentónicos marinos, basados en la similitud entre sus coberturas, se realizó un análisis multivariado de agrupamiento jerárquico (coeficiente de similitud de Gower) mediante el uso del software Primer 6 (Primer-E Ltd.). El objetivo del análisis Clúster es crear grupos de objetos similares (relacionados) a partir de un conjunto. Específicamente en este trabajo los diferentes grupos se definieron a partir de una similitud mínima del 85% en el porcentaje de cobertura bentónica de cada una de las estaciones.

#### **7.7 Generación de productos geográficos adicionales.**

Los productos geográficos utilizados para la implementación de las técnicas de clasificación fueron el resultado de la combinación de las bandas obtenidas en el preprocesamiento, con la adición de dos bandas nuevas creadas a partir de los datos obtenidos en campo: predicción espacial del sedimento y derivación batimétrica.

*Predicción espacial del sedimento:* Se generó una banda predictiva de sedimento utilizando los porcentajes de cobertura de arena y sedimento de las estaciones SCUBA, además se crearon 100 estaciones “dummies” colocadas en sitios de la imagen donde era posible reconocer a simple vista la cobertura de arena o sedimento (~100%). Posteriormente, en el software ArcMap, se extrajo el valor de reflectancia en la imagen preprocesada (tres bandas) de cada punto geográfico de las estaciones SCUBA y “dummies” (un valor por cada banda). La tabla de atributos resultante de la extracción fue exportada en formato de texto (.txt). La imagen obtenida tras el preprocesamiento fue exportada en el software ENVI a formato de ASCII grid, este tipo de formato es un archivo de texto con los valores de radiancia de cada píxel en cada banda. Estos datos fueron utilizados como las variables predictivas mientras que los datos de las estaciones SCUBA y “dummies” fueron utilizados como variables de respuesta en el algoritmo de clasificación Support Vector Machine (SVM) de la librería kernlab en la consola R studio.

*Derivación batimétrica:* Se obtuvo a partir de la regresión múltiple entre los valores de las bandas 1 (azul costero), 2 (azul) y 3 (verde) de la imagen sin corrección del efecto de la

profundidad, y los valores de datos de profundidad obtenidos mediante barridos sobre las áreas de interés mediante el uso de un ecosonda GARMIN EchoMap CHIRP 92SV que integra un transductor GT52HW-TM-CHIRP de alta frecuencia (50/70/200 kHz), barrido de ancho de 250 W de poder, con un sensor GPS con actualización de 5 Hz. Una vez realizada esta acción, en el software ArcMap, se creó una serie de puntos con información georreferenciada y de profundidad obtenida por datos del ecosonda. Estos puntos se dividieron en tres partes iguales debido a la gran cantidad de datos. Con una tercera parte se extrajo el valor espectral para cada banda, la tabla resultante de la extracción fue exportada en formato de texto (.txt) para la realización de la regresión lineal múltiple.

La regresión lineal múltiple fue llevada a cabo en el software Microsoft Excel con los valores de profundidad como la variable dependiente y los valores espectrales como las variables independientes. Los resultados de interés son y-intercepto y los valores de la pendiente para cada banda. Para derivar la profundidad de las imágenes satelitales, en el software ENVI, se realizó la siguiente ecuación en la imagen sin corrección del efecto de la profundidad (Hogrefe, 2008):

$$D = a + (B_i)(R_i) + (B_j)(R_j)$$

Dónde:

D = profundidad

a = intercepto

B = valores de la pendiente

R = valores de la banda

i y j= indican la banda espectral



## 7.8 Mapeo de hábitats por medio de clasificación supervisada

*Clasificación supervisada:* Una vez creadas las imágenes compuestas de ambas áreas (5 bandas), se generaron mapas temáticos de hábitats a través de la aplicación de técnicas de clasificación supervisada las cuales consistieron en el uso de los esquemas de clasificación definidos por el análisis clúster de cada polígono para la creación de semillas que definieron las firmas espectrales de cada hábitat. Dichos píxeles o semillas fueron complementados con píxeles cercanos que contaban con valores similares en las bandas de interés ( $\leq 0.05$ ). De estas semillas, el 80% fueron usadas para probar diferentes algoritmos de clasificación dentro del software ENVI. El porcentaje restante de semillas (20%) se usaron para la evaluación de la precisión de la clasificación y de esta forma elegir la imagen clasificada más precisa.

## 7.9 Estimación de abundancia y biomasa de mero rojo

Se utilizó una modificación al método de censos visuales propuesto por Núñez-Lara *et al.* (2005), con un transecto de 50 x 2 m (100m<sup>2</sup>) sobre el mismo transecto en donde se filmó el video, en el cual se registró el número de individuos de *E. morio* y se estimó la longitud total (LT) de cada individuo.

Posteriormente, se generaron bases de datos a partir de los datos de campo con el número de individuos por tallas en cada transecto. Estas bases de datos fueron utilizadas para calcular la biomasa de mero rojo, donde se tomó la longitud total (cm) como la variable independiente, y al peso (g) como la variable dependiente. Con este fin, las variables se ajustaron a una ecuación de tipo potencial (Gould, 1966).

$$w = aL^b$$

Dónde:

w = variable dependiente (peso en gramos)

L = variable independiente (longitud en centímetros)

a = constante

b = factor de crecimiento

Es importante mencionar que, para lograr una mayor precisión en el cálculo de las biomásas, el intercepto (a) y la pendiente (b) variaron de acuerdo con las diferentes tallas según lo establecido por Renán *et al.* en 2015 para el mero rojo en el Banco de Campeche (Tabla 4).

Tabla 4. Tabla de ecuaciones utilizadas para estimar biomasa de mero rojo. Modificada de Renán *et al.* (2015).

Grupo	n	Rango de tallas (cm)	Ecuación
Hembras juveniles	288	≤ 25.8	$w=0.011803206L^{3.077}$
Hembras adultas	1599	25.8-70	$w= 0.003926449L^{3.319}$
Machos adultos	441	≥ 70	$w= 0.016710906L^{3.040}$

### 7.10 Análisis de la relación entre el mero rojo y su hábitat

Para analizar la relación existente entre las poblaciones de mero rojo y su hábitat, se obtuvo el porcentaje de individuos y biomasa presente en cada uno de los hábitats definidos por el análisis multivariado de agrupamiento jerárquico. Posteriormente se exploró la relación de las poblaciones del mero americano con los hábitats bentónicos marinos mediante un análisis de redundancia (RDA), entre la abundancia y biomasa de *E. morio* y las variables ambientales (profundidad, rugosidad, cobertura bentónica), llevado a cabo en el software CANOCO.

### 7.11 Mapeo de hábitats de predilección del mero rojo

Se extrajeron los hábitats preferenciales de *E. morio*, a través de técnicas de geoprocésamiento aplicadas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) basadas en los datos obtenidos en campo, los resultados obtenidos en el mapeo temático de hábitats y en los análisis de redundancia (RDA) de la relación del mero rojo con su hábitat. Con el fin de corroborar las observaciones, los resultados fueron contrastados con datos independientes de abundancia y longitud total (cm) de individuos de *E. morio* capturados a través de palangres desplegados dentro de las áreas de interés de este trabajo (datos proporcionados por el Laboratorio de Ictiología del CINVESTAV, Unidad Mérida).

## VIII. RESULTADOS

### 8.1 Preprocesamiento de imágenes satelitales

Tras realizar las operaciones de preprocesamiento a las imágenes, se observó una mejoría (Figura 12). Como resultado se obtuvieron dos imágenes funcionales correspondientes al área Celestún-Sisal (Figura 13) y Río Lagartos-Las Coloradas (Figura 14).

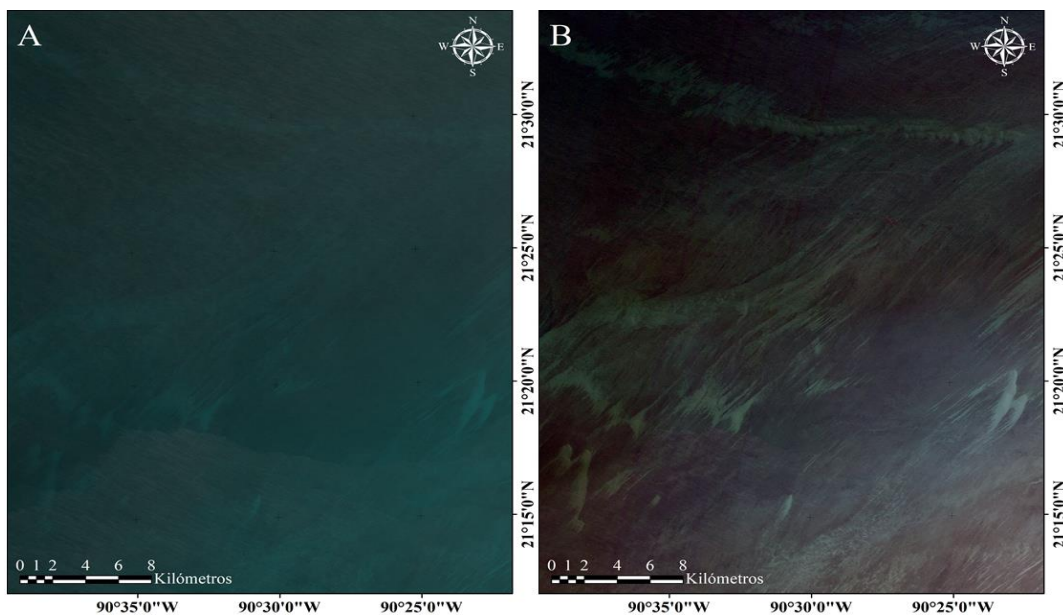


Figura 12. Vista de un área de la imagen satelital del área de Celestún-Sisal. A. Antes de las operaciones de preprocesamiento. B. Después de las operaciones de preprocesamiento.

### 8.2 Diseño muestral

Con las bandas satelitales preprocesadas, se generó una clasificación no supervisada de 7 clases para ambas áreas (Celestún-Sisal y Río Lagartos-Las Coloradas), en las cuales, mediante un diseño estratificado al azar, se posicionaron un total de 66 estaciones SCUBA a profundidades entre 10 y 33m y 59 estaciones costeras a profundidades entre 3 y 15m, cubiertas con videos cortos utilizados como soporte para la clasificación supervisada (similar a Bello-Pineda *et al.*, 2005) para el área de Celestún-Sisal (Figura 15; Anexo 1); y 64 estaciones SCUBA para el área de Río Lagartos-Las Coloradas (Figura 16; Anexo 2).

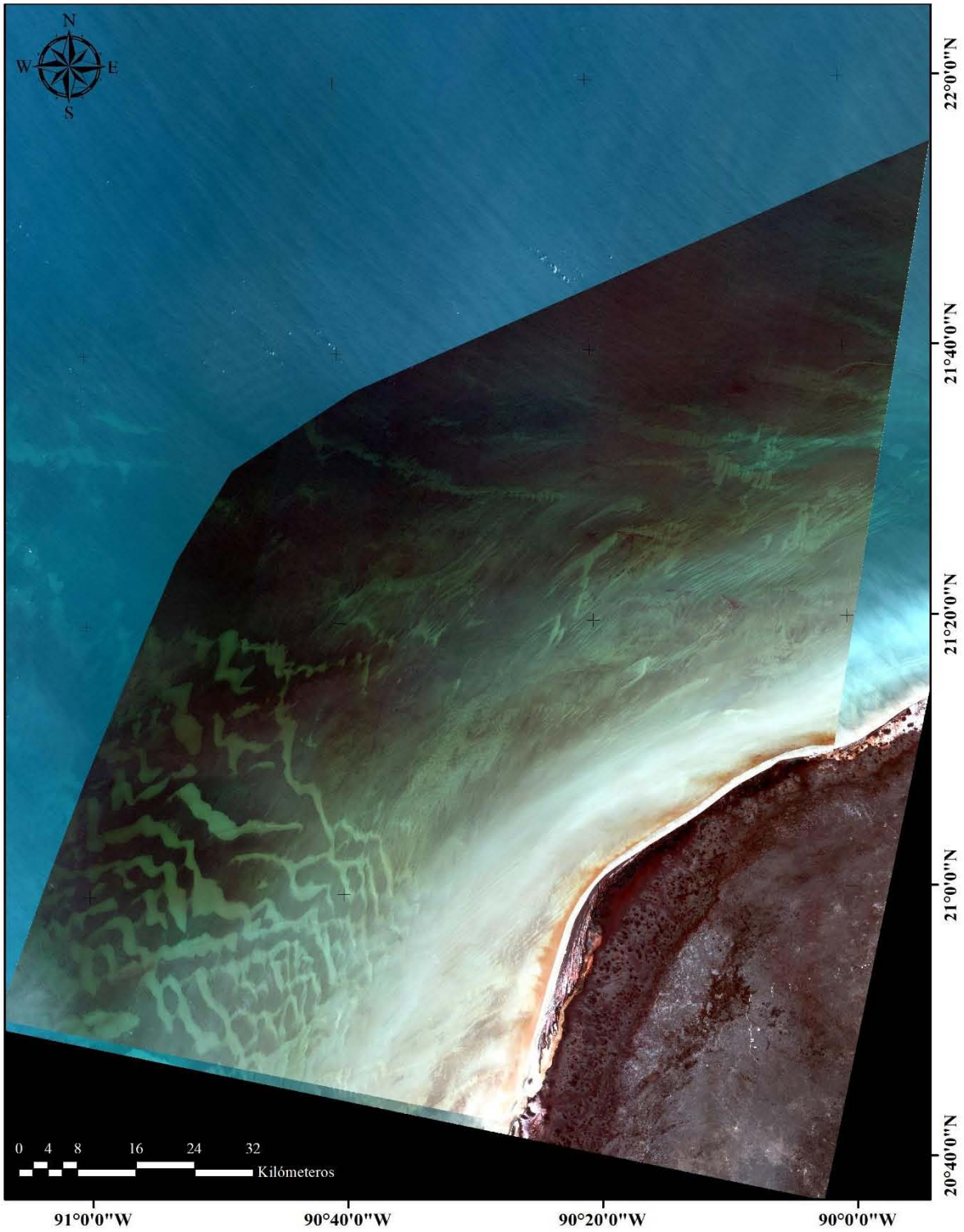


Figura 13. Imagen preprocesada usada para clasificación no supervisada y clasificación supervisada del área de Celestún-Sisal.

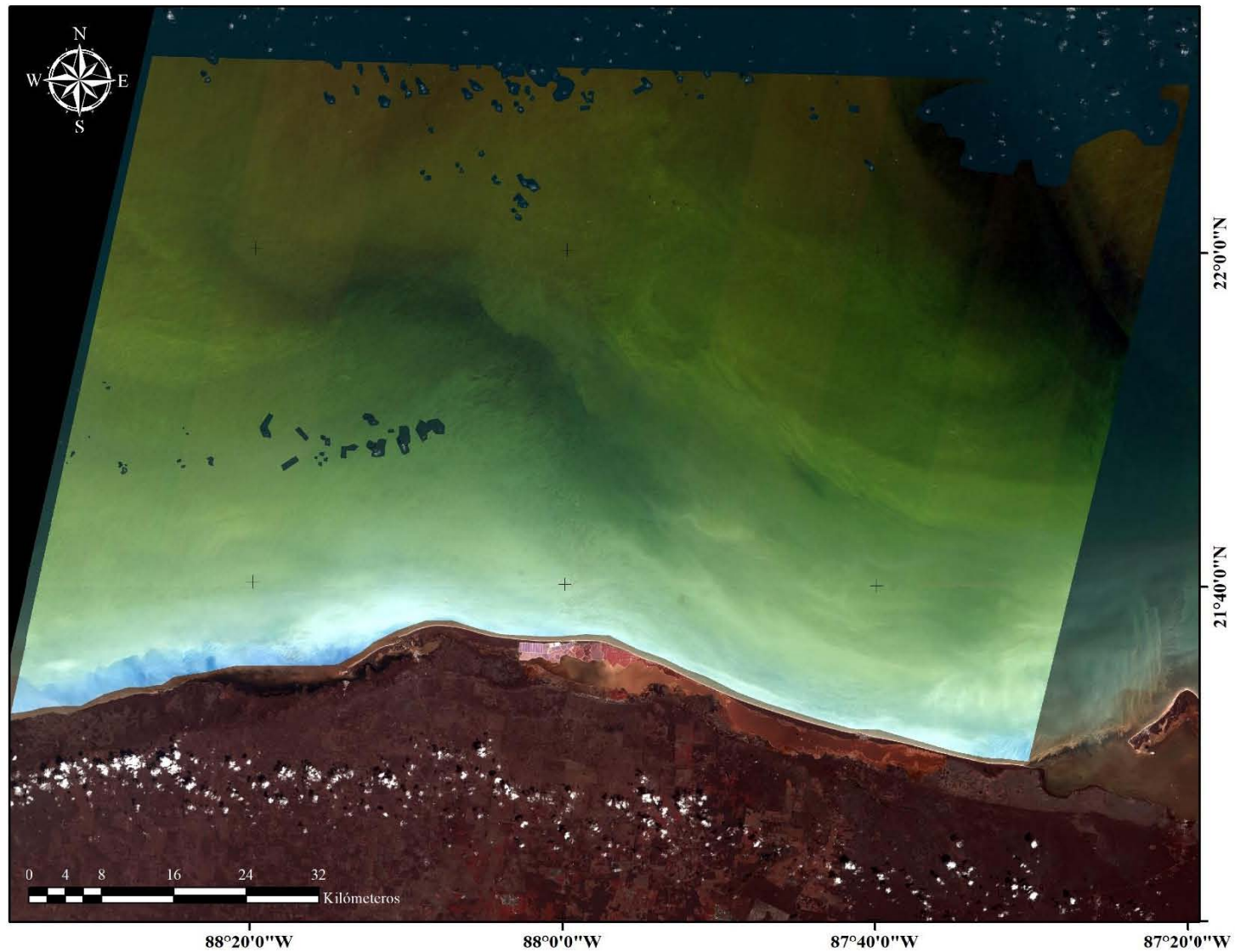


Figura 14. Imagen preprocesada usada para clasificación no supervisada y clasificación supervisada del área de Río Lagartos-Las Coloradas.

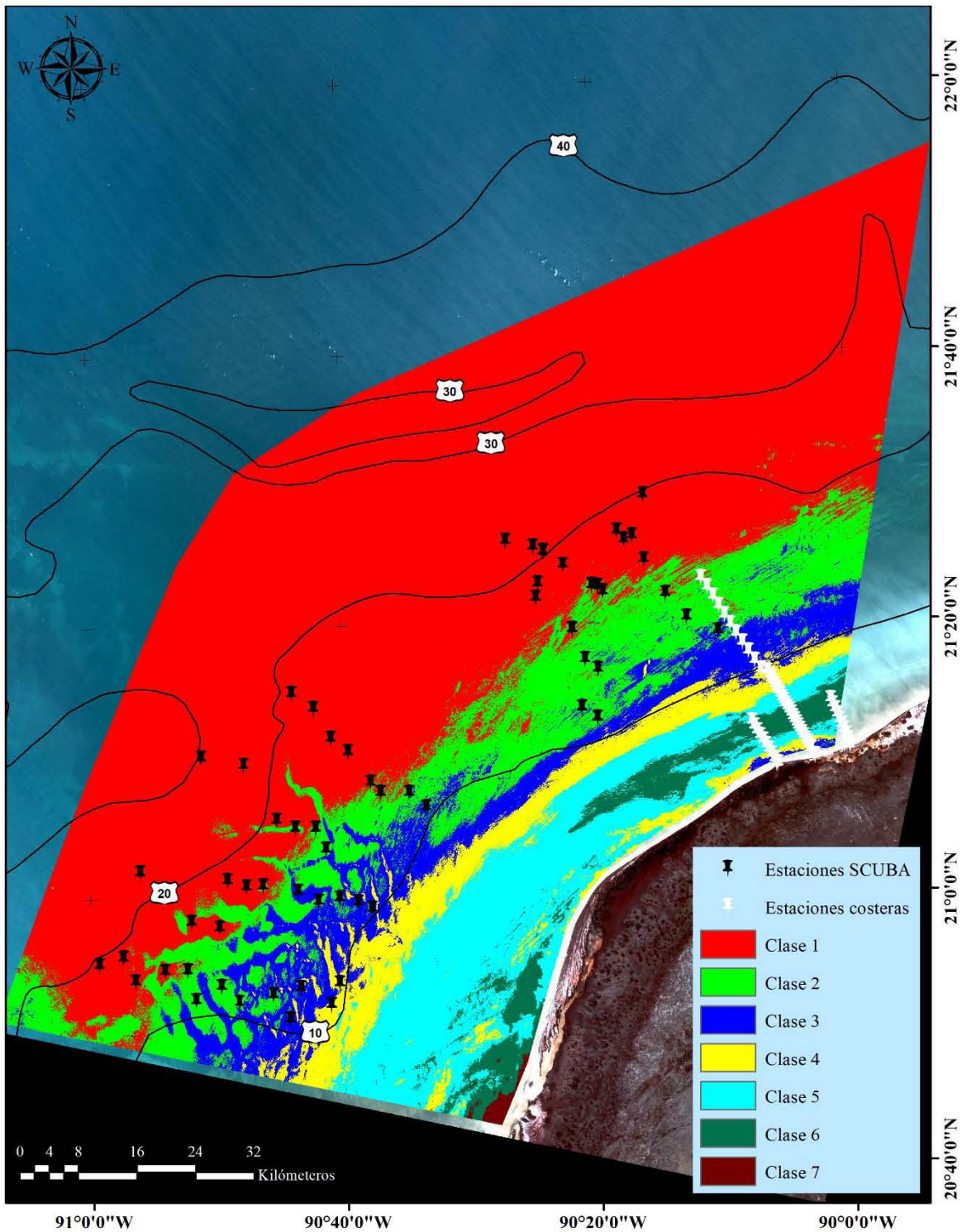


Figura 15. Clasificación no supervisada de 7 clases correspondiente a las estaciones utilizadas para el área de Celestún-Sisal.

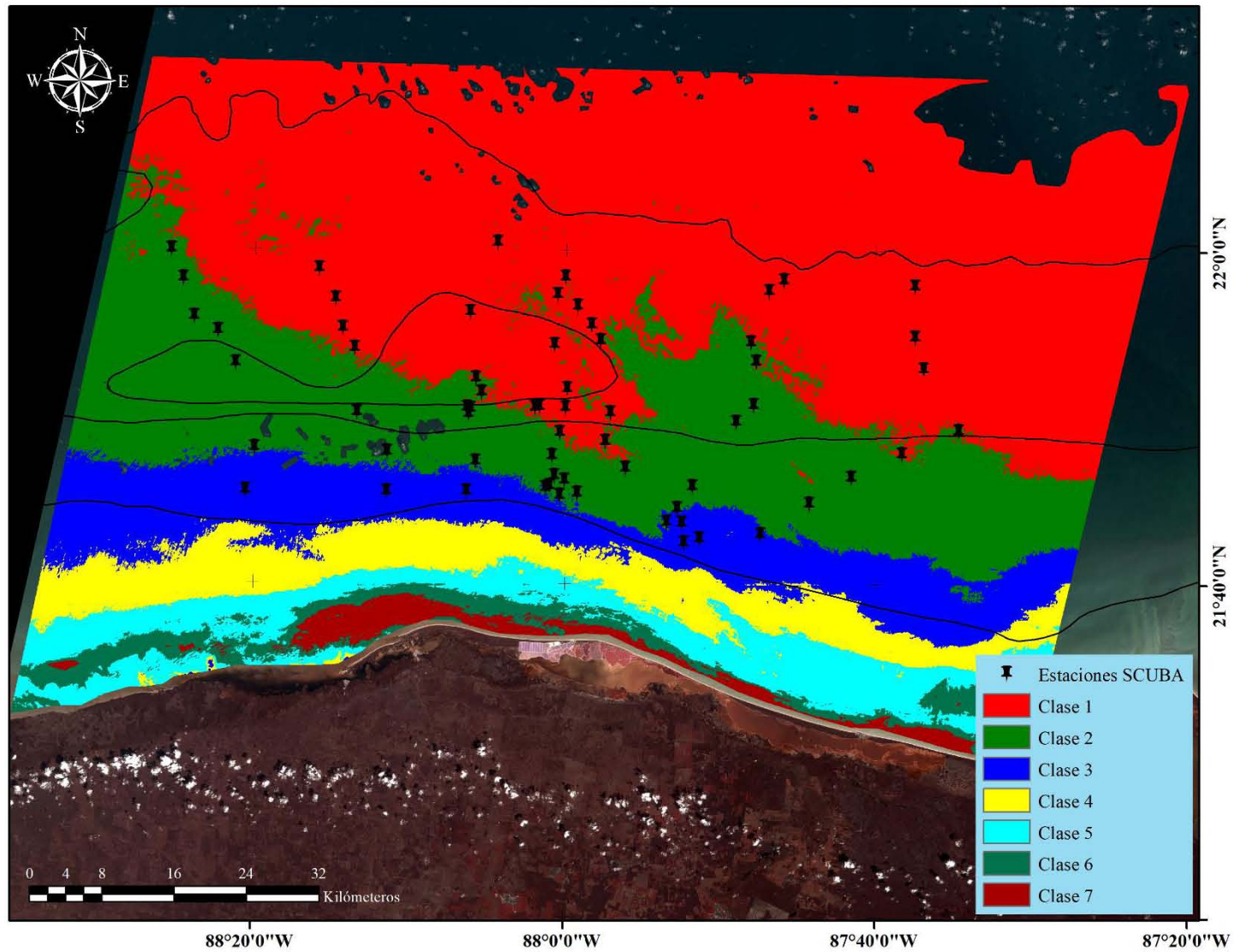


Figura 16. Clasificación no supervisada de 7 clases correspondiente a las estaciones utilizadas para el área de Río Lagartos-Las Coloradas.

### **8.3 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos**

En total, se analizaron un total de 130 videotransectos para la caracterización de los hábitats bentónicos marinos (66 para el área de Celestún-Sisal y 64 para el área de Río Lagartos-Las Coloradas). El resultado final de estas operaciones fue la obtención del porcentaje de la cobertura bentónica en cada uno de los videotransectos de acuerdo con los grupos funcionales propuestos por Garza-Pérez (2010).

### **8.4 Definición de hábitats submarinos**

En el área de Celestún-Sisal, de las 66 estaciones SCUBA muestreadas, solo 61 estaciones fueron utilizadas para definir las clases de cobertura de los paisajes, ya que en análisis clúster (coeficiente de similitud de Gower) únicamente se agruparon aquellas que tuvieran una similitud mayor al 85%, lo cual derivó en la aglomeración de las estaciones en 7 clases o hábitats (Figura 17). En cuanto al área de Río Lagartos-Las Coloradas, y siguiendo el mismo parámetro de similitud (>85%), únicamente 60 estaciones SCUBA se aglomeraron en 4 clases o hábitats (Figura 18). Posteriormente los nombres de las clases o hábitats fueron definidos a través de la obtención del promedio de la cobertura bentónica de los grupos funcionales de cada uno de los transectos contenidos en cada clase (Tabla 5; Tabla 6):

*Celestún-Sisal:* Clase 1: sedimento con algas filamentosas; Clase 2: sedimento con algas verdes; Clase 3: algas pardas sobre sedimento; Clase 4: sedimento desnudo; Clase 5: sedimento con parches de algas verdes; Clase 6: algas filamentosas y parches de sedimento; Clase 7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas.

*Río Lagartos-Las Coloradas:* Clase 1: dominado por algas filamentosas; Clase 2: sedimento desnudo; Clase 3: algas pardas sobre sedimento; Clase 4: algas filamentosas sobre sedimento.

En cuanto a las estaciones costeras del área de Celestún-Sisal, estas se asignaron a una clase definida por el análisis clúster de acuerdo con el tipo de cobertura analizado. De las 59 estaciones costeras, cuatro fueron asignadas a la Clase 1, 11 fueron asignadas a la Clase 2, 24 asignadas a la Clase 3, diez a la Clase 4, siete a la clase 7 y tres permanecieron sin clasificar debido a que contaban con coberturas que no se ajustaban a las clases definidas.



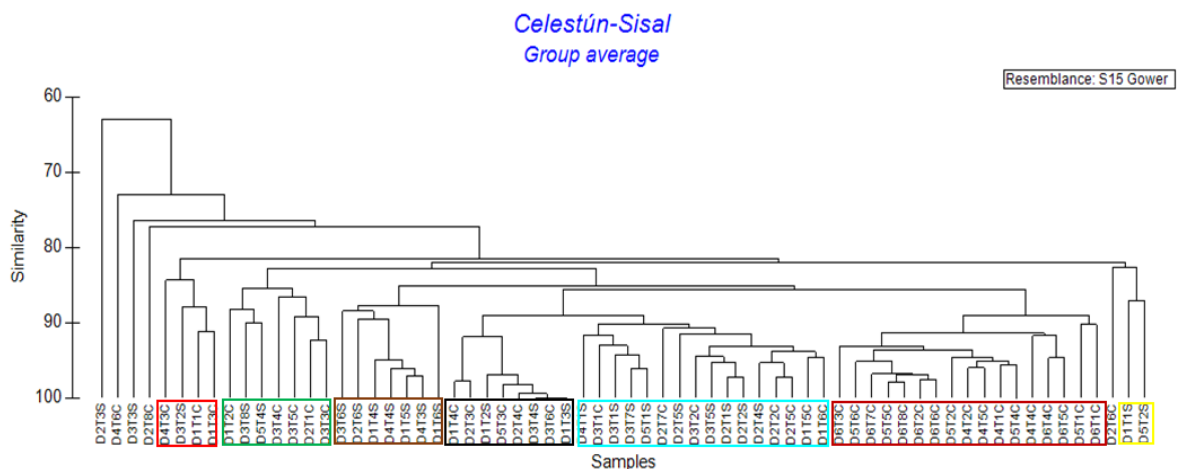


Figura 17. Análisis multivariado de agrupamiento jerárquico correspondiente a las estaciones pertenecientes al área Celestún-Sisal. Grupos creados con similitudes mayores al 85%.

Tabla 5. Promedio de cobertura bentónica en el área Celestún-Sisal de los transectos pertenecientes a C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas. Debajo: porcentaje de los 61 videotransectos usados para definir cada clase.

	Clase 1 (6.56%)	Clase 2 (11.48%)	Clase 3 (11.48%)	Clase 4 (13.11%)	Clase 5 (26.23%)	Clase 6 (27.87%)	Clase 7 (3.28%)
Coral Pétreo	0.30	0.44	0.10	0.00	0.25	0.19	0.07
Octocorales	0.43	0.91	1.34	0.01	0.42	0.15	0.97
Algas Filamentosas	<b>27.13</b>	6.19	2.80	2.08	6.87	<b>71.56</b>	<b>12.37</b>
Algas Pardas	7.58	7.47	<b>59.87</b>	0.25	4.13	4.72	7.20
Algas Verdes	11.70	<b>29.53</b>	3.76	1.29	<b>23.81</b>	5.12	<b>10.60</b>
Algas Calcáreas Verdes	5.95	0.94	0.49	0.16	1.55	0.49	0.30
Algas Rojas	0.85	0.26	0.06	0.01	0.19	0.14	1.83
Alcas Calcáreas Rojas	0.03	0.06	0.00	0.00	0.01	0.03	0.13
Algas coralinas incrustantes	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Espojas	0.80	2.50	0.66	0.03	0.69	0.46	0.23
Pastos	0.10	0.00	0.00	5.36	0.00	0.00	0.00
Zoántidos y Tunicados	0.00	0.09	0.09	0.00	0.01	0.01	0.00
Sedimento	<b>44.23</b>	<b>50.36</b>	<b>30.60</b>	<b>90.73</b>	<b>61.41</b>	<b>16.79</b>	<b>65.53</b>
Pedacería	0.08	0.47	0.03	0.01	0.11	0.01	0.03
Roca o Pavimento Calcáreo	0.20	0.63	0.17	0.05	0.53	0.26	0.73
Tubos calcáreos	0.60	0.14	0.04	0.03	0.02	0.05	0.00

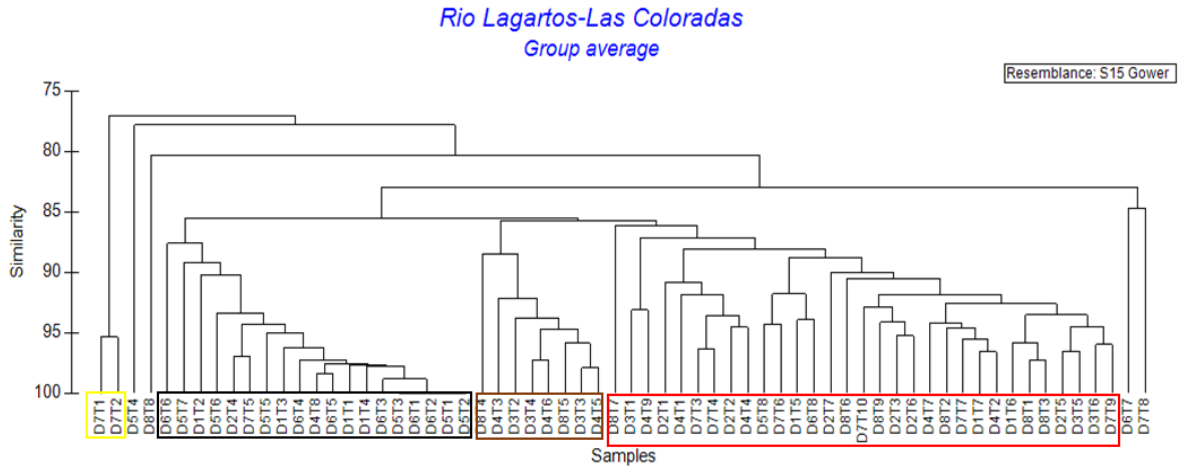


Figura 18. Análisis multivariado de agrupamiento jerárquico correspondiente a las estaciones SCUBA pertenecientes al área de Río Lagartos-Las Coloradas. Grupos creados con similitudes mayores al 85%.

Tabla 6. Promedio de cobertura bentónica en el área de Río Lagartos-Las Coloradas de los transectos pertenecientes a C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento. Debajo: porcentaje de los 60 videotransectos usados para definir cada clase.

	Clase 1 (3.33%)	Clase 2 (31.67%)	Clase 3 (13.33%)	Clase 4 (51.67%)
Coral Pétreo	0.18	0.05	0.09	0.08
Octocorales	0.03	0.00	0.00	0.54
Algas Filamentosas	<b>48.53</b>	5.19	16.10	<b>52.22</b>
Algas Pardas	5.03	0.78	<b>56.24</b>	6.66
Algas Verdes	1.43	0.23	0.46	1.83
Algas Calcáreas Verdes	0.00	0.00	0.00	0.02
Algas Rojas	2.90	0.05	0.30	0.51
Alcas Calcáreas Rojas	0.00	0.00	0.06	0.00
Algas coralinas incrustantes	0.00	0.00	0.00	0.00
Eponjas	1.30	0.11	0.01	0.14
Pastos	0.00	0.23	0.00	0.85
Zoántidos y Tunicados	0.55	0.23	0.00	0.12
Sedimento	<b>25.48</b>	<b>90.42</b>	<b>22.62</b>	<b>33.56</b>
Pedacería	1.93	2.49	3.70	3.23
Roca o Pavimento Calcáreo	12.65	0.19	0.43	0.25
Tubos calcáreos	0.03	0.02	0.00	0.00

## 8.5 Mapeo de hábitats bentónicos marinos por medio de clasificación supervisada

La combinación de las bandas 1, 2 y 3 de las imágenes resultantes de las operaciones de preprocesamiento y las bandas de predicción espacial del sedimento y derivación batimétrica, dio como resultado una imagen compuesta de 5 bandas para cada área de estudio que fue utilizada para la clasificación supervisada.

### 8.5.1 Celestún-Sisal

*Predicción espacial del sedimento:* derivado del uso de 80 estaciones “dummies” de sedimento (Figura 19) y la cobertura de sedimento y arena del 80 % de las estaciones SCUBA, el resultado del análisis predictivo Support Vector Machine (SVM), llevado a cabo en el software R studio a través del uso de la librería kernlab, fue una banda en escala de grises en formato de texto (.acs) que fue proyectada en el software ArcMap y transformada a imagen de formato del software ENVI (.dat). La imagen obtenida fue modificada ópticamente para ser representada en una rampa de color para ser visualizada con mejor claridad (Figura 20). La precisión del resultado se evaluó con una regresión lineal que usó el porcentaje de cobertura de sedimento y arena del 20% las estaciones SCUBA y 20 estaciones “dummies” en el eje x. En el eje y, los valores de estas mismas estaciones en la banda de predicción del sedimento generada. El resultado del  $R^2$  fue de 0.49 y un error típico de  $\pm 13.35$  puntos porcentuales de sedimento.

*Derivación batimétrica:* de los barridos con el ecosonda realizados para el sitio de interés de Celestún-Sisal se registraron un total de 29,470 puntos de profundidad georreferenciados (Figura 21). Por la gran cantidad de datos, el total de los puntos se dividió en tres partes (a, b, c) y se proyectaron en una capa vectorial de puntos en formato de puntos (.shp) en el software ArcMap. Para obtener los datos de profundidad derivada se extrajo el valor de píxel de la imagen sin corrección del efecto de profundidad, mediante el uso de una tercera parte de los puntos de batimetría (puntos a). Para la regresión lineal múltiple, los datos de batimetría del ecosonda fueron utilizados como la variable independiente, mientras que los datos de reflectancia de cada banda fueron utilizados como las variables dependientes. El resultado de interés es la pendiente para cada banda y el y-intercepto que es necesaria para linealizar los datos espectrales a datos de profundidad (Tabla 7).

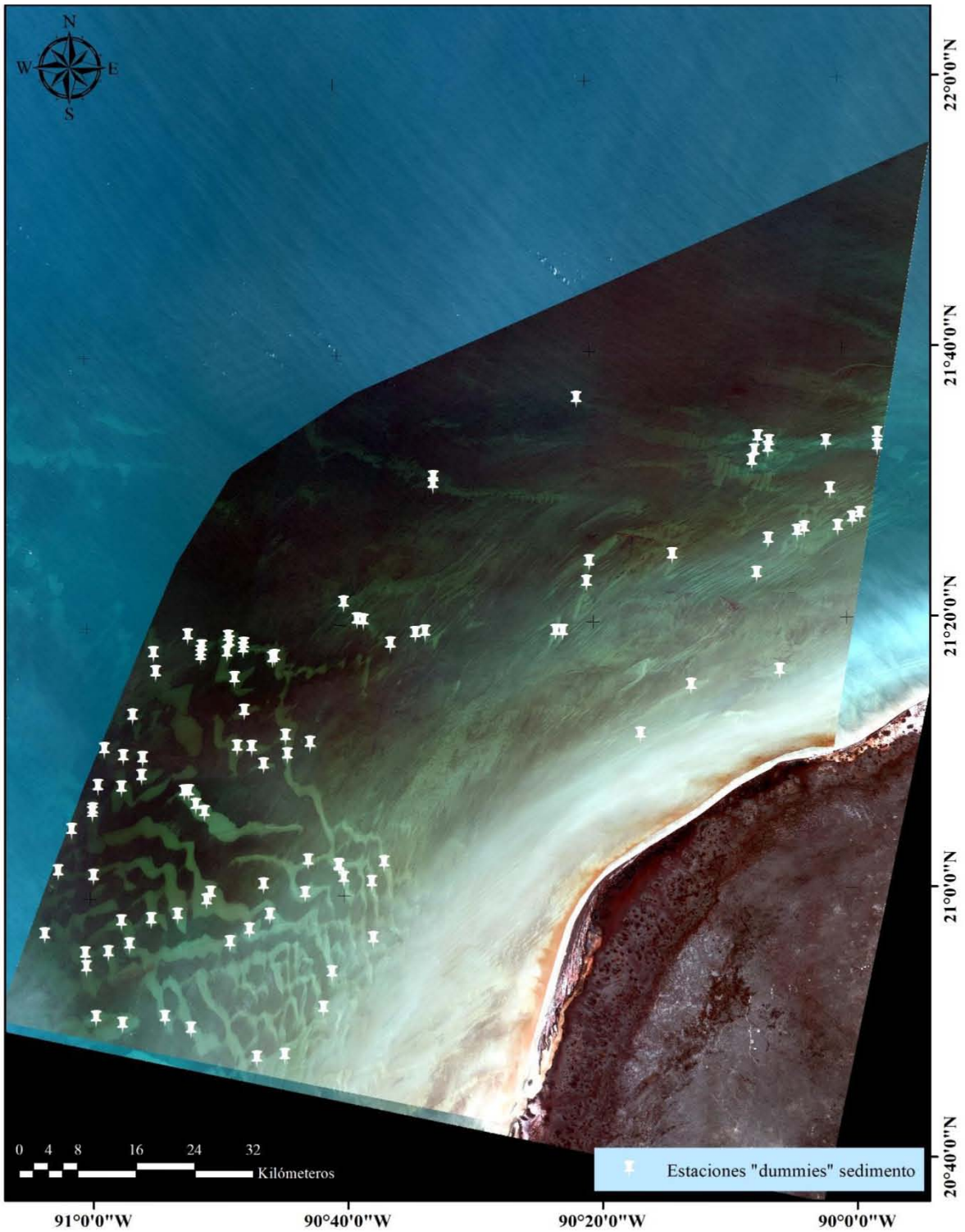


Figura 19. Localización de las 100 estaciones "dummies" de sedimento usadas para obtener la banda de predicción espacial del sedimento.

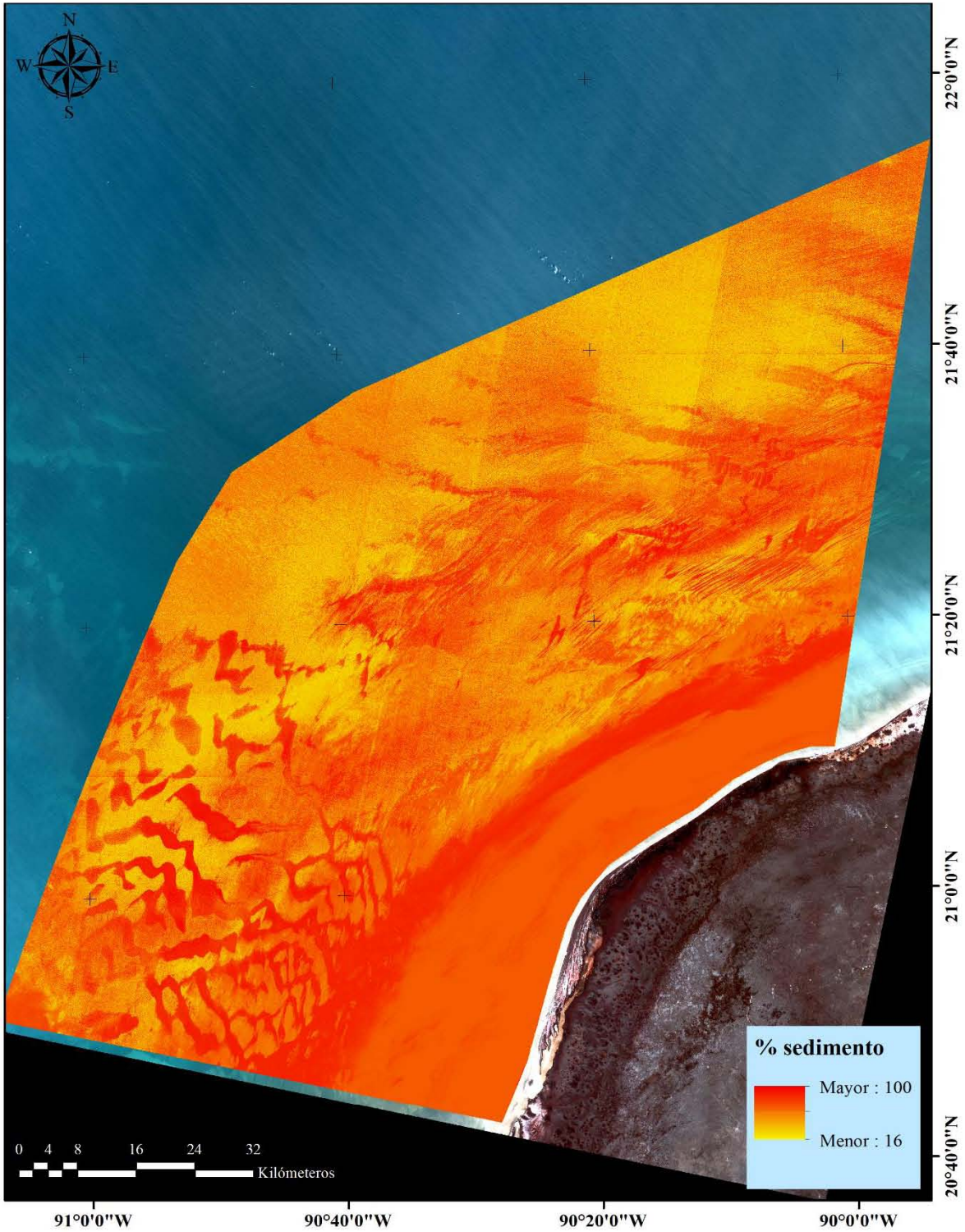


Figura 20. Banda de predicción de porcentaje de sedimento. Obtenida a través del uso del algoritmo Support Vector Machine (SVM).

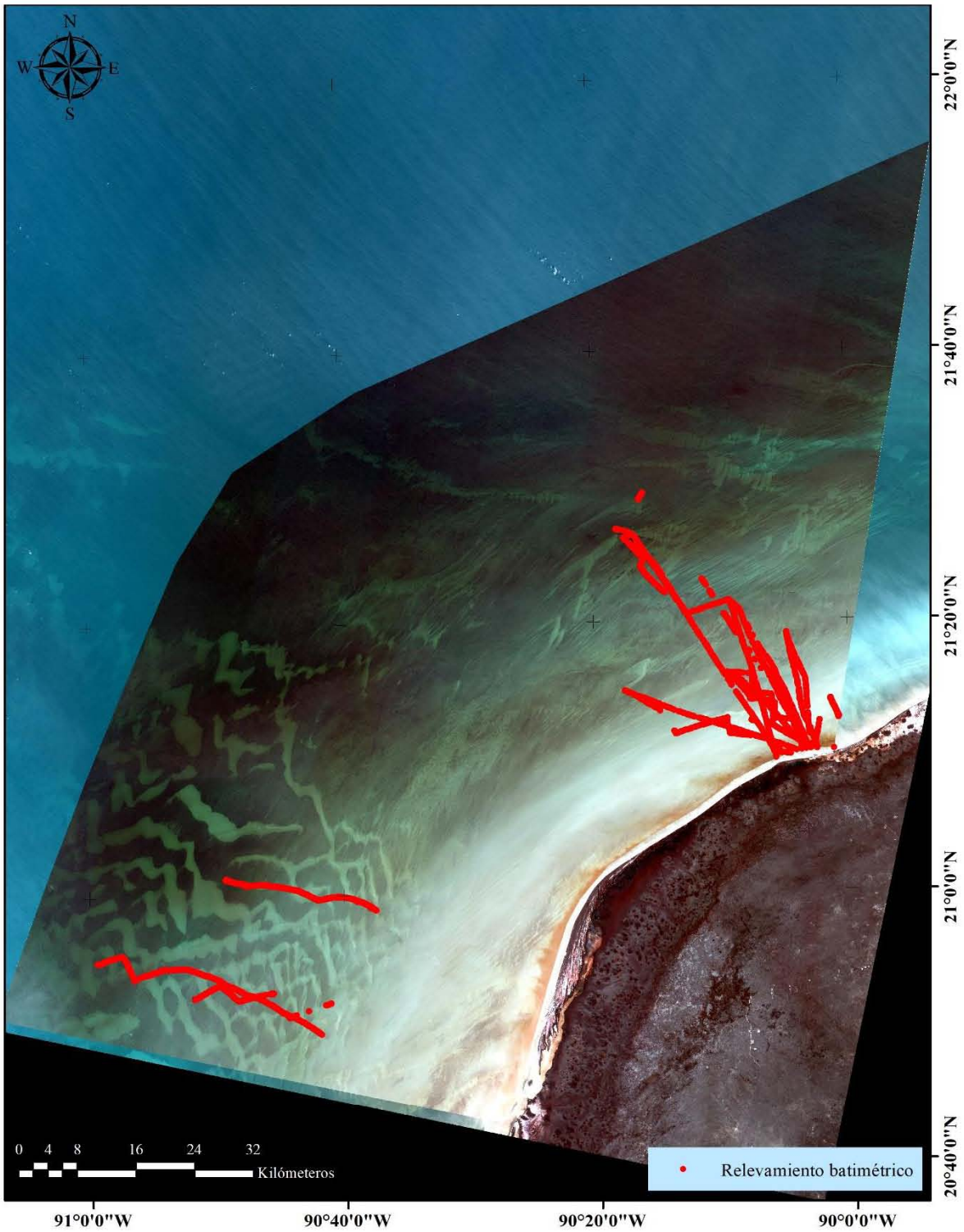


Figura 21. Barridos batimétricos usados para la derivación de la banda de batimetría.

Tabla 7. Resultado de la regresión lineal múltiple, llevada a cabo en el software Excel.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	-20.5835399	0.19825701	-103.822508	0
Variable B1	-22.3550013	1.63771986	-13.6500765	4.8726
Variable B2	14.1752104	1.67518341	8.4618856	3.0066
Variable B3	37.6414856	0.71847744	52.3906296	0

Para evaluar la precisión se realizó una regresión lineal utilizando otra tercera parte de los datos del ecosonda (puntos b) como el eje x y los datos de batimetría derivada como el eje y. El resultado fue una  $R^2$  de 0.6325 y un error típico de  $\pm 3.086$  metros de profundidad. La imagen (en escala de grises) de la profundidad derivada fue editada en el software ArcMap para que los valores de profundidad puedan ser visualizados con mejor claridad (Figura 22).

*Clasificación supervisada:* Se utilizaron un total de 61 estaciones SCUBA, 100 estaciones “dummies” de sedimento y 56 estaciones costeras para extraer la firma espectral de cada clase o hábitat. Mediante el uso del método propuesto para selección de píxeles cercanos, derivó en la selección de 1146 píxeles: 62 correspondientes a la Clase 1; 202 a la Clase 2; 179 a la Clase 3; 497 a la Clase 4; 72 a la Clase 5; 84 a la Clase 6 y 50 a la Clase 7. El resultado de usar 175 estaciones (80%) para probar los distintos algoritmos disponibles en el software ENVI fue una clasificación supervisada de siete clases obtenida por el clasificador de máxima similitud (Figura 23), a la cual se le fusionaron, con base en la matriz de confusión (Tabla 8) y la similitud en sus porcentajes de coberturas, la Clase 2 con la Clase 5 y la Clase 4 con la Clase 7. Dicha fusión derivó en una clasificación supervisada de cinco clases (Figura 24) que permitió elevar la precisión general de la clasificación del 64.19% al 76.28% y el coeficiente kappa del 0.53 al 0.65 (Tabla 9).

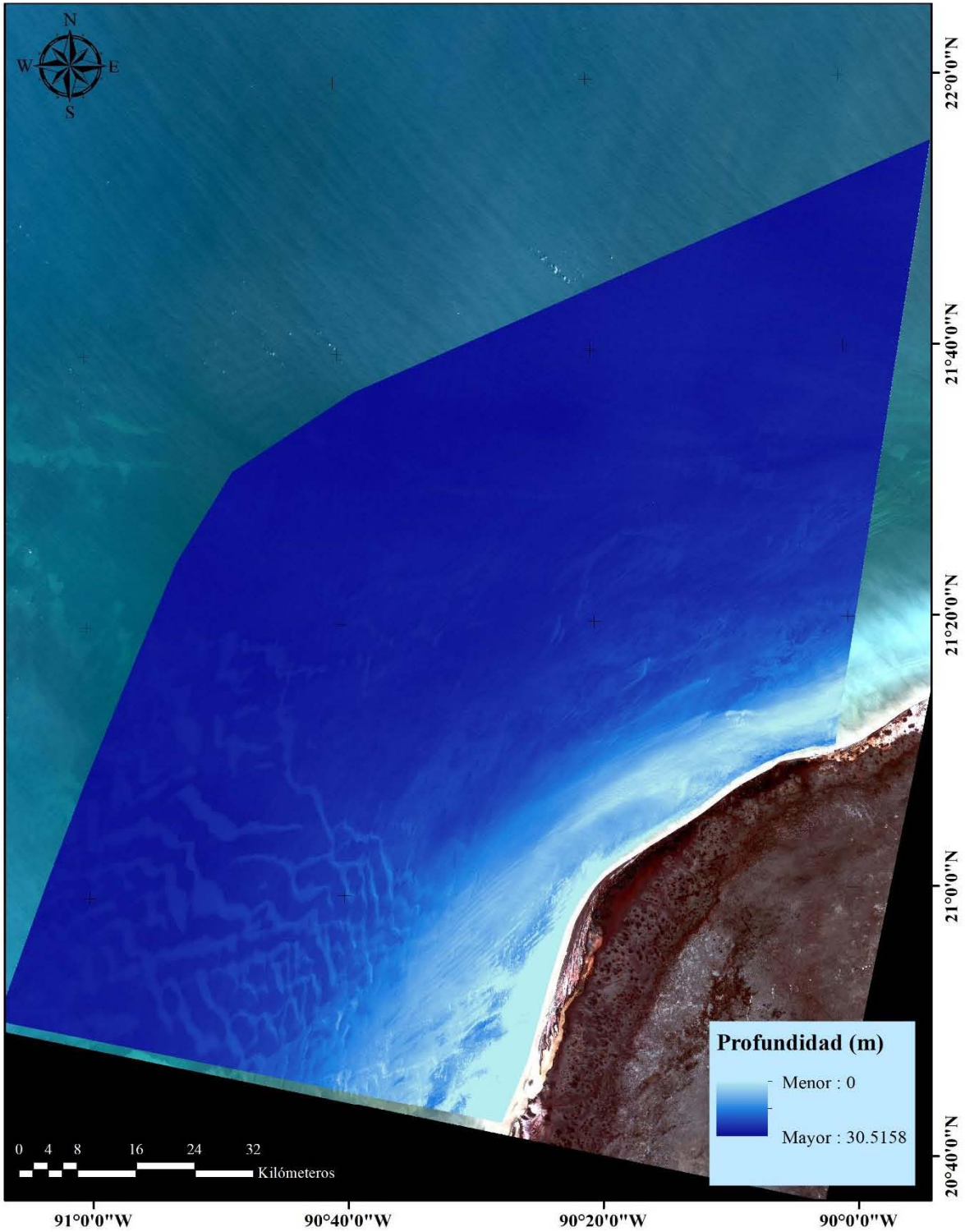


Figura 22. Banda de derivación batimétrica. Obtenida a través de la linealización del decaimiento espectral en función de la profundidad.



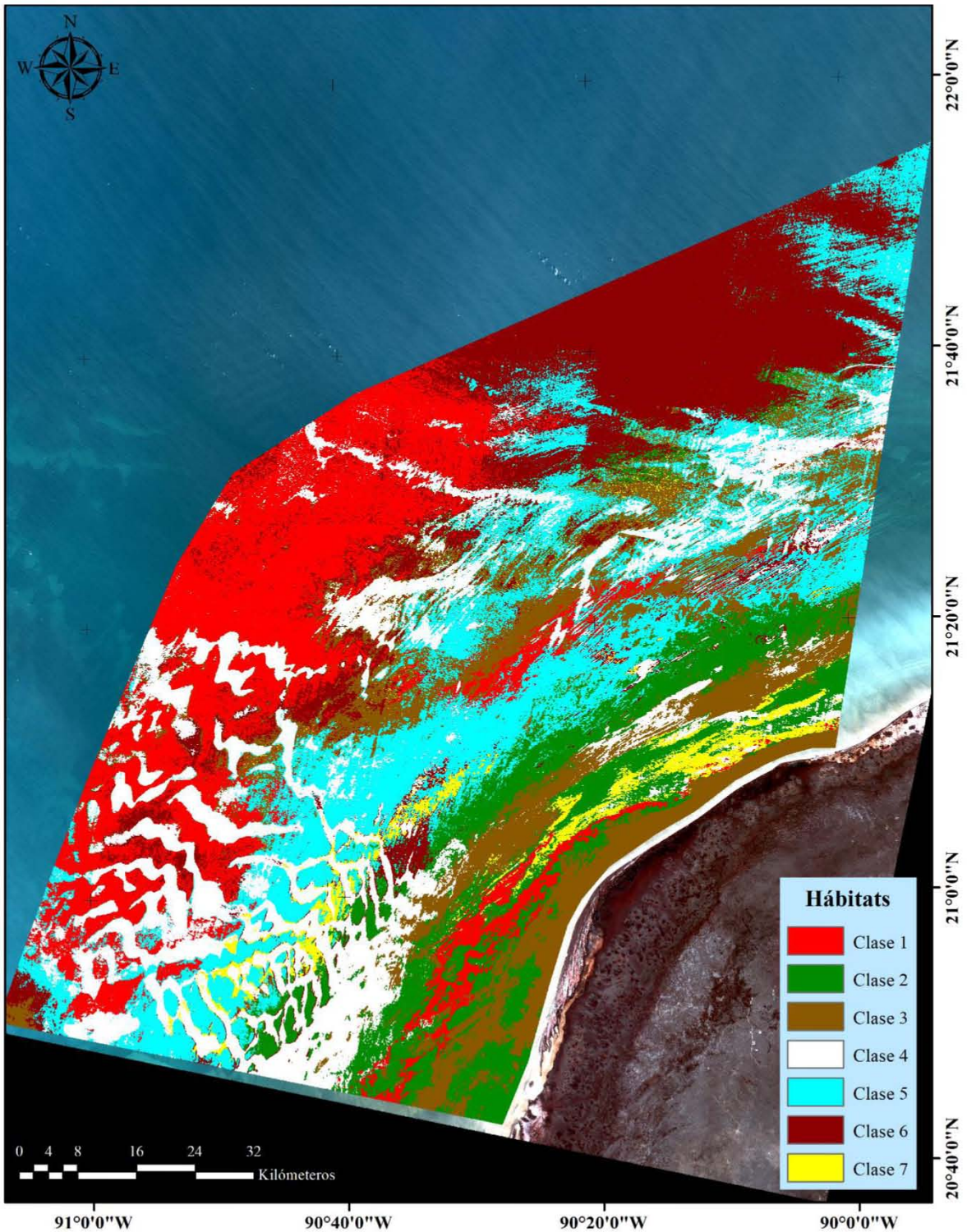


Figura 23. Mapa temático de siete clases. Obtenido a través del clasificador de máxima similitud. Precisión general: 64.1860%. Coeficiente kappa: 0.5296. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas.

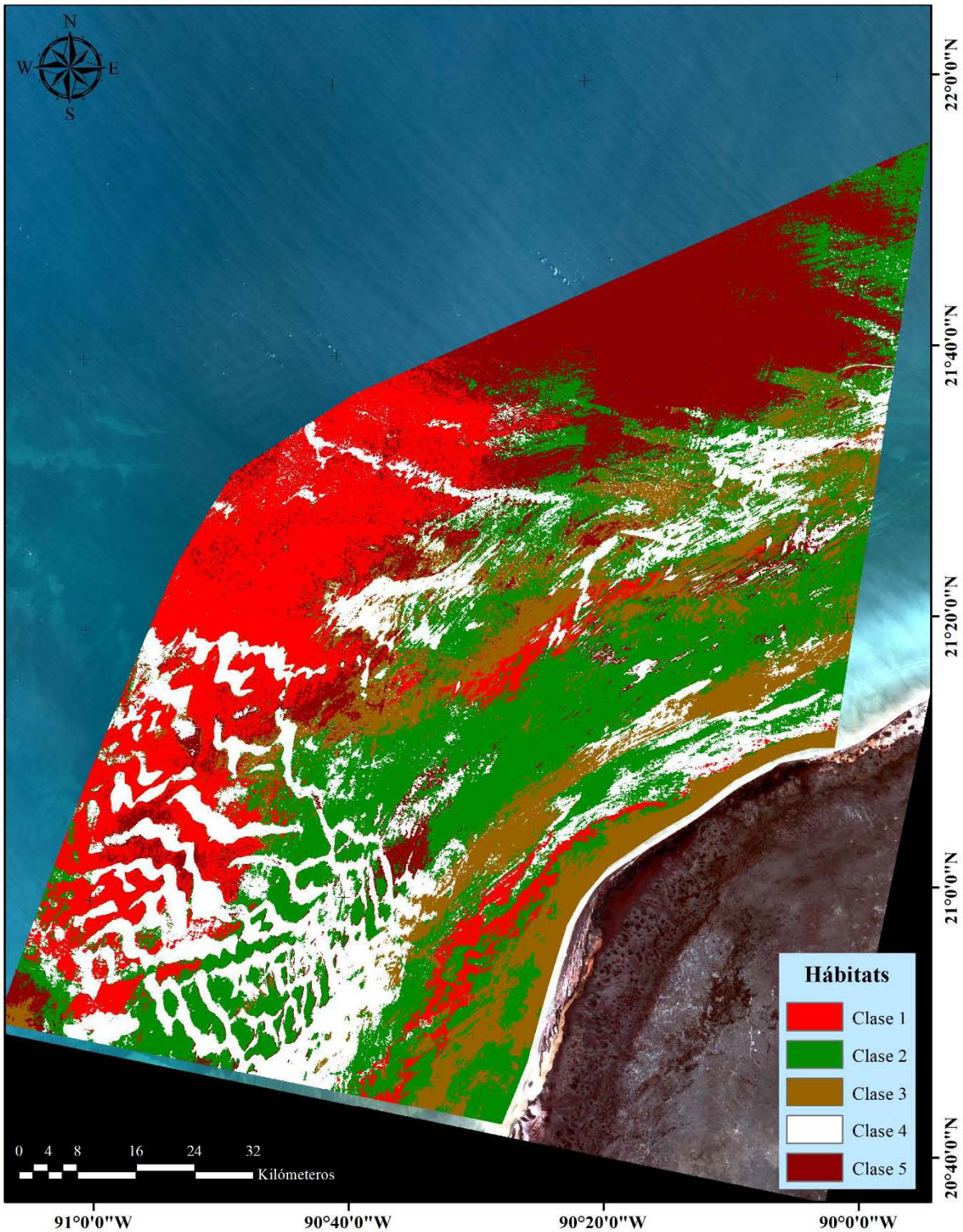


Figura 24. Mapa temático de cinco clases o hábitats. Obtenido a través de la combinación de la Clase 2 con Clase 5 y Clase 4 con Clase 7 del mapa temático de siete clases o hábitats. Precisión general: 76.2791%. Coeficiente kappa: 0.6502. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento.

Tabla 8. Matriz de confusión derivada de la evaluación de la clasificación supervisada de siete clases. Precisión general: 64.1860%. Coeficiente kappa: 0.5296. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas.

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Total	% Utilización	% Producción
Clase 1	5	0	0	0	0	7	0	12	55.56	41.67
Clase 2	4	19	10	0	0	0	3	36	54.29	52.78
Clase 3	0	0	21	0	0	0	9	30	58.33	70
Clase 4	0	0	0	80	2	2	0	84	85.11	95.24
Clase 5	0	16	5	4	11	5	0	41	84.62	26.83
Clase 6	0	0	0	0	0	2	0	2	12.50	100
Clase 7	0	0	0	10	0	0	0	10	0	0
Total	9	35	36	94	13	16	12	215		

Tabla 9. Matriz de confusión derivada de la evaluación de la clasificación supervisada de cinco clases. Precisión general: 76.2791%. Coeficiente kappa: 0.6502. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento.

Clase	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Total	% Utilización	% Producción
Clase 1	5	0	0	0	7	12	55.56	41.67
Clase 2	4	46	15	7	5	77	95.83	59.74
Clase 3	0	0	21	9	0	30	58.33	70
Clase 4	0	2	0	90	2	94	84.91	95.74
Clase 5	0	0	0	0	2	2	12.50	100
Total	9	48	36	106	16	215		

### 8.5.2 Río Lagartos-Las Coloradas

*Predicción espacial del sedimento:* derivado del uso de 100 estaciones “dummies” de sedimento (Figura 25) y el porcentaje cobertura de sedimento y arena de las 64 estaciones SCUBA, el resultado del análisis predictivo Support Vector Machine (SVM), llevado a cabo en el software R studio a través del uso de la librería kernlab, fue una banda en escala de grises en formato de texto (.acs) que fue proyectada en el software ArcMap y transformada a imagen de formato del software ENVI (.dat). La imagen obtenida fue modificada ópticamente para ser representada en una rampa de color para ser visualizada con mejor claridad (Figura 26). La precisión del resultado se evaluó con una regresión lineal que usó el porcentaje de cobertura de sedimento y arena de todas las estaciones SCUBA y “dummies” en el eje x y en el eje y, los valores de estas mismas estaciones en la banda de predicción del sedimento generada. El resultado del  $R^2$  fue de 0.68 y un error típico de  $\pm 13.88$  puntos porcentuales de sedimento.

*Derivación batimétrica:* de los barridos con el ecosonda realizados para el sitio de interés de Río Lagartos-Las Coloradas se registraron un total de 40,143 puntos de profundidad georreferenciados (Figura 27). Por la gran cantidad de datos, el total de los puntos se dividió en tres partes y se proyectaron en una capa vectorial de puntos en formato de puntos en el software ArcMap. Para obtener los datos de profundidad derivada se extrajo el valor de píxel de la imagen sin corrección del efecto de profundidad, mediante el uso de una tercera parte de los puntos de batimetría (puntos a). Para la regresión lineal múltiple los datos de batimetría del ecosonda fueron utilizados como la variable independiente, mientras que los datos de reflectancia de cada banda fueron utilizados como las variables dependientes. El resultado de interés es la pendiente para cada banda y el y-intercepto que es necesaria para linealizar los datos espectrales a datos de profundidad (Tabla 10).

Tabla 10. Resultado de la pendiente para cada banda y el y-intercepto para la derivación batimétrica.

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>
Intercepción	21.5096291	0.00408017	5271.75168	0
Variable B1	3.77327221	0.03075132	122.702757	0
Variable B2	-4.62597174	0.03163787	-146.216267	0
Variable B3	1.14826857	0.01831979	62.6791273	0

Para evaluar la precisión se realizó una regresión lineal utilizando otra tercera parte de los datos del ecosonda (puntos b) como el eje x y los datos de batimetría derivada como el eje y. El resultado fue una R2 de 0.85 y un error típico de  $\pm 2.69$  metros de profundidad. La imagen (en escala de grises) de la profundidad derivada fue editada en el software ArcMap para que los valores de profundidad puedan ser visualizados con mejor claridad (Figura 28).

*Clasificación supervisada:* Se utilizaron un total de 60 estaciones SCUBA y 100 estaciones “dummies” de sedimento. Mediante el uso del método propuesto para selección de píxeles cercanos, derivó en la selección de 883 píxeles: 37 correspondientes a la Clase 1; 543 a la Clase 2; 59 a la Clase 3 y 244 a la Clase 4. El resultado de usar 133 estaciones (80%) para probar los distintos algoritmos disponibles en el software ENVI fue una clasificación supervisada de cuatro clases obtenida por el clasificador de máxima similitud (Figura 29), con una precisión general del 73.6196 % y un coeficiente kappa de 0.5278 (Tabla 11).

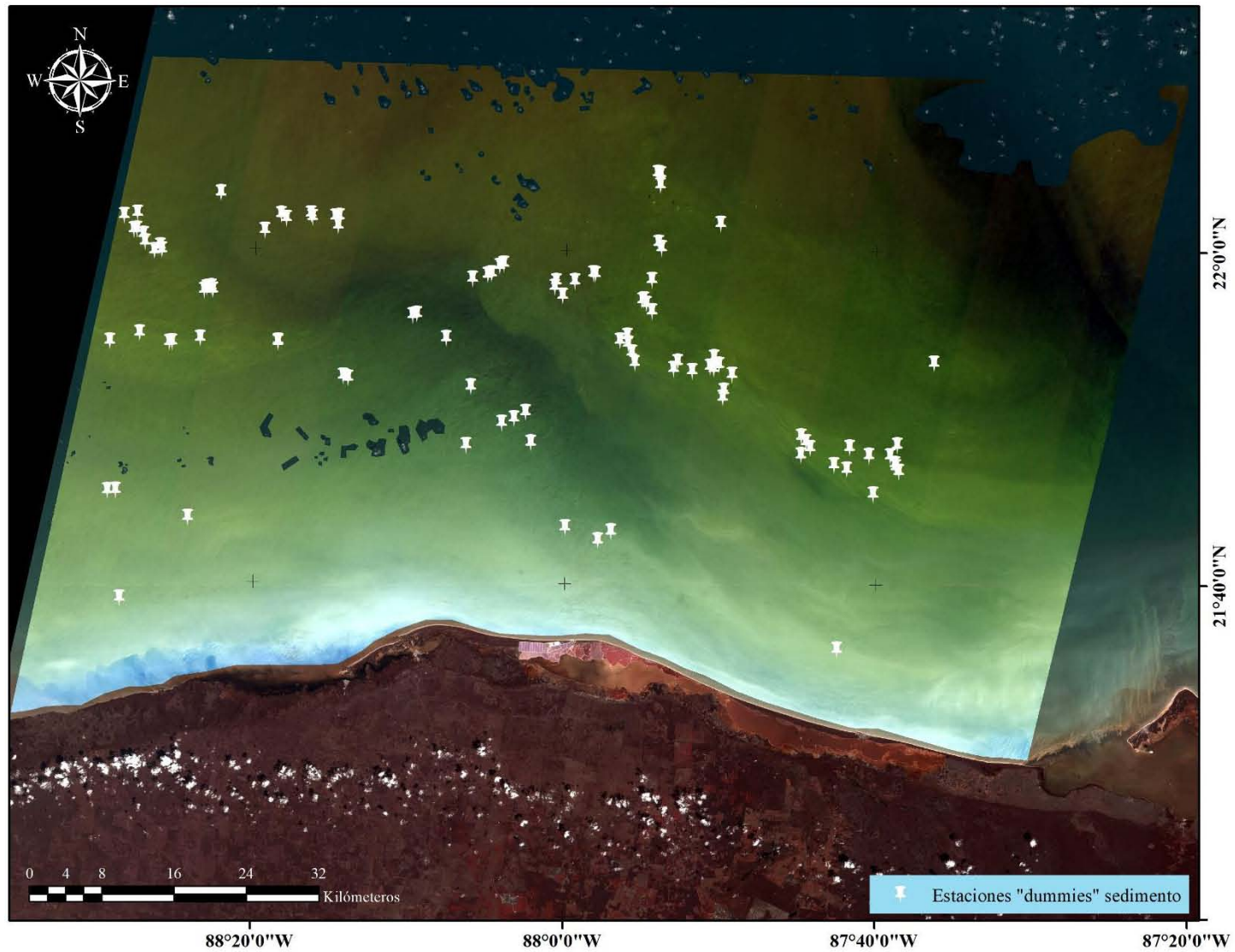


Figura 25. Localización de las 100 estaciones "dummyes" de sedimento usadas para obtener la banda de predicción espacial del sedimento.

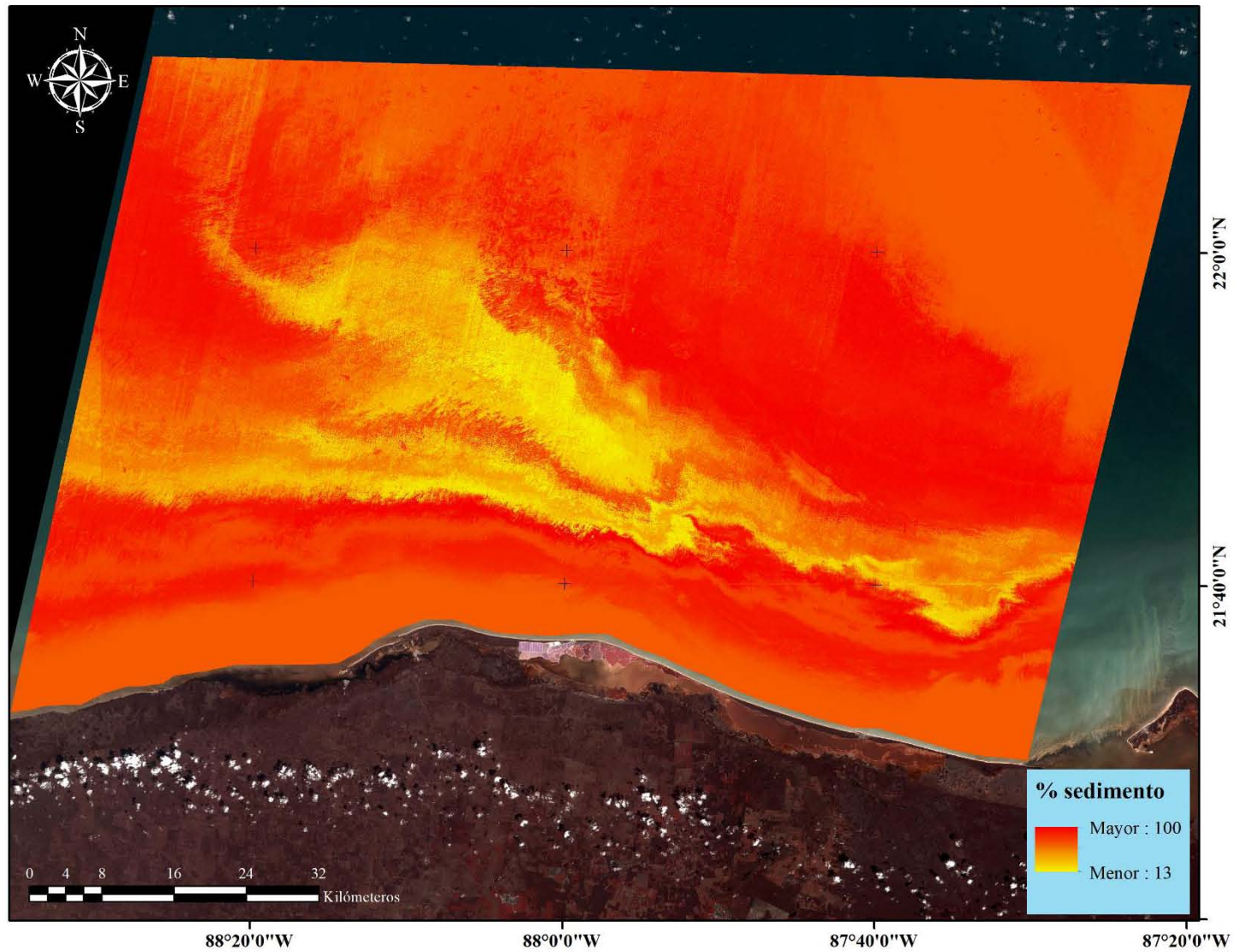


Figura 26. Banda de predicción de porcentaje de sedimento. Obtenida a través del uso del algoritmo Support Vector Machine (SVM).

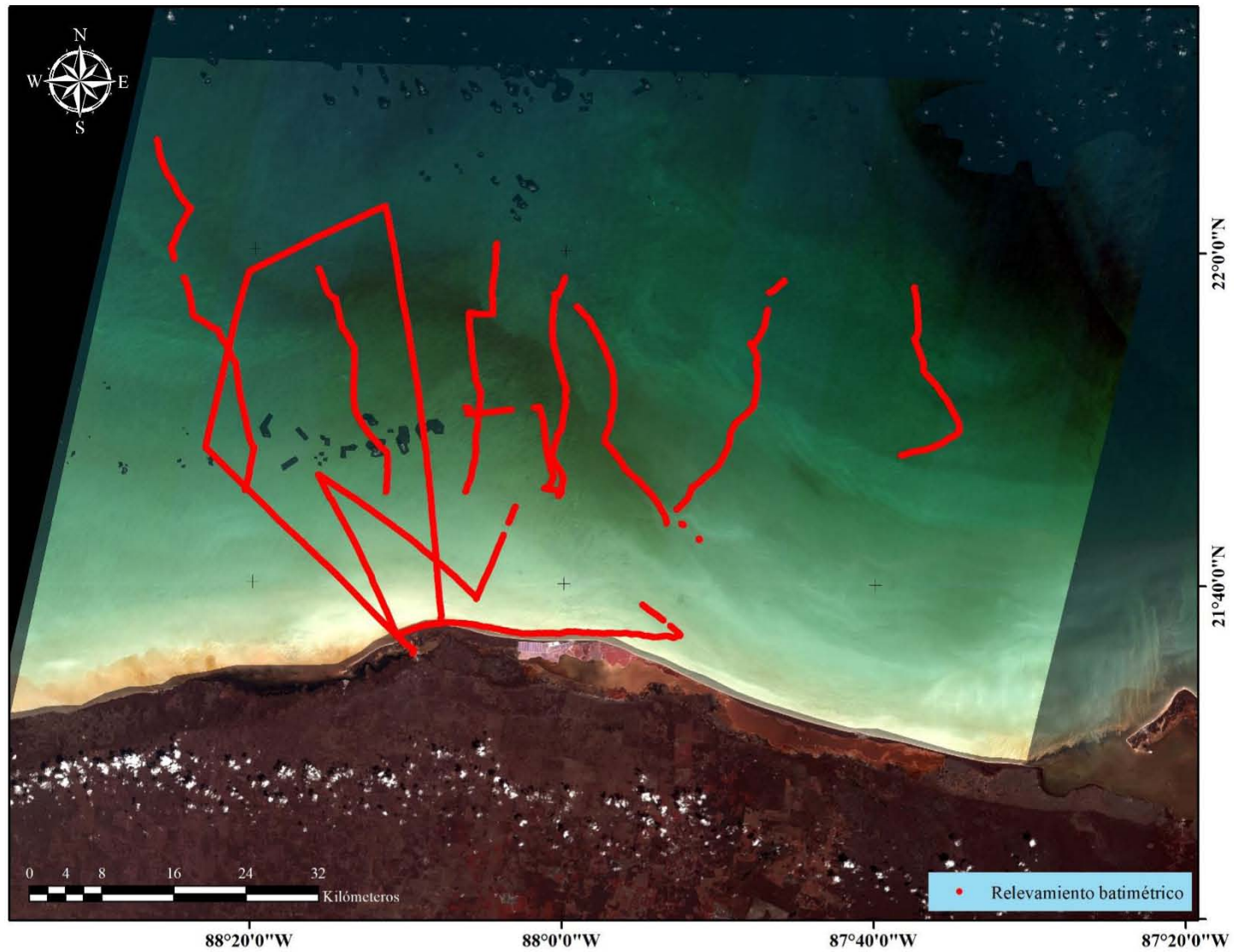


Figura 27. Barridos batimétricos usados para la derivación de la banda de batimetría.



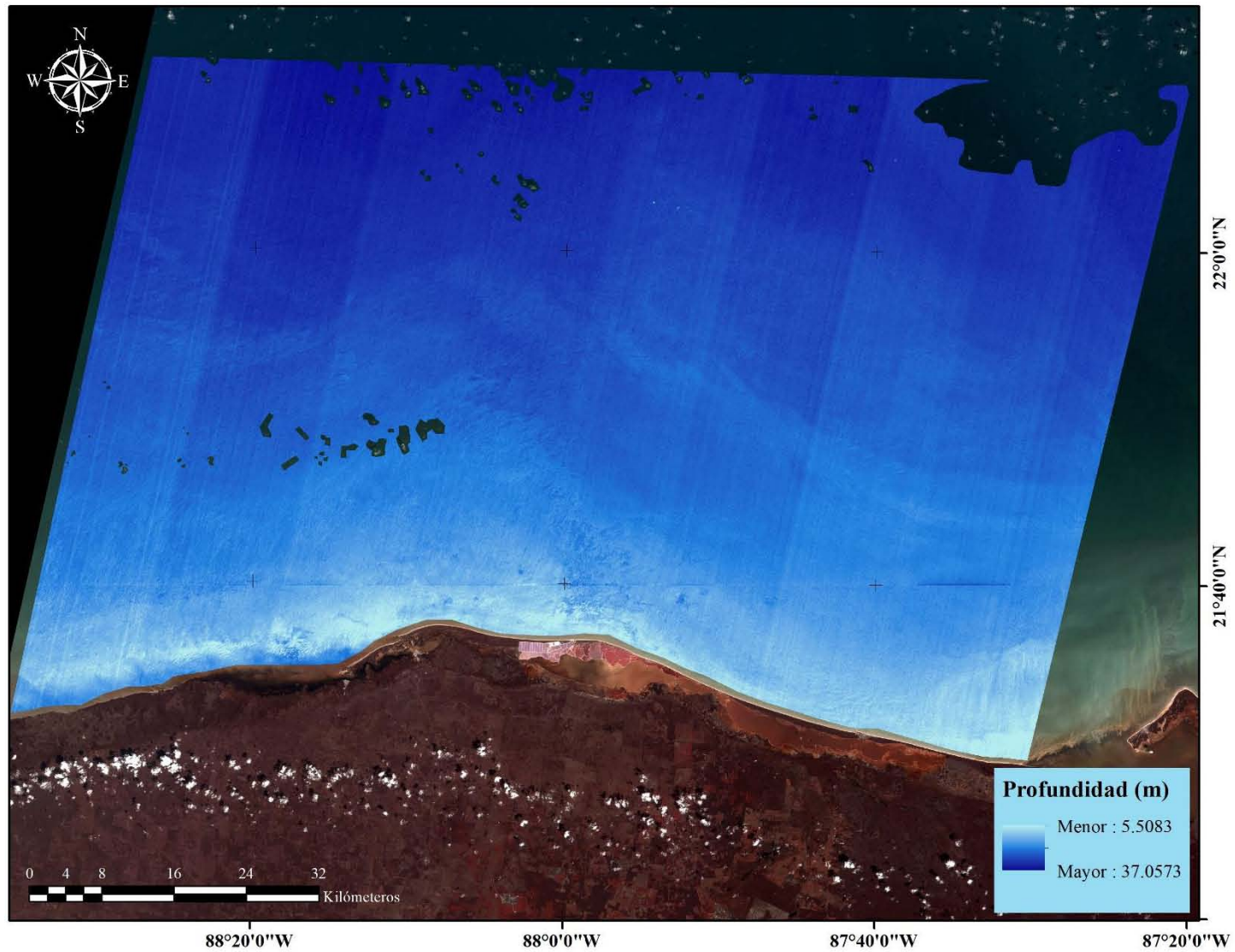


Figura 28. Banda de derivación batimétrica. Obtenida a través de la linealización del decaimiento espectral en función de la profundidad.

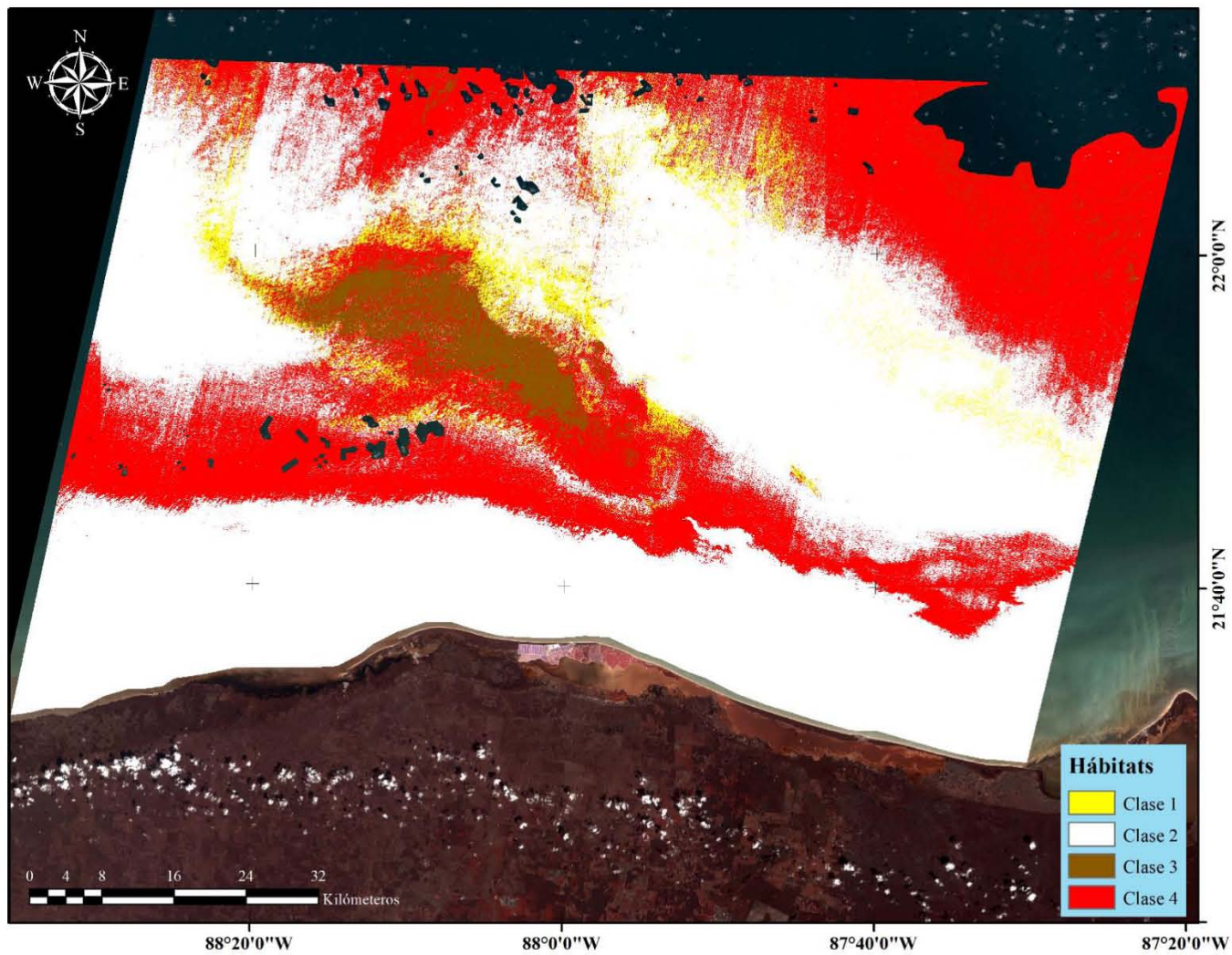


Figura 29. Mapa temático de cuatro clases o hábitats. Obtenido a través del clasificador de máxima similitud. Precisión general: 73.6196%. Coeficiente kappa: 0.5278. C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.

Tabla 11. Matriz de confusión derivada del uso del 20% de estaciones para la evaluación de la clasificación supervisada realizada en el área de Río Lagartos-Las Coloradas. Precisión general: 73.6196%. Coeficiente kappa: 05278. C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.

Clase	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	% Utilización	% Producción
Clase 1	0	4	0	11	15	0	0
Clase 2	7	83	0	0	90	92.22	82.18
Clase 3	0	4	1	0	5	20	12.50
Clase 4	0	10	7	36	53	67.92	76.60
Total	7	101	8	47	163		

## 8.6 Estimación de biomasa y abundancia de mero rojo

En total se contabilizaron, mediante censos visuales, un total de 31 individuos de *E. morio* en el área de Celestún-Sisal (Figura 30, Tabla 12) mientras que para el área de Río Lagartos-Las Coloradas se observaron únicamente 10 especímenes (Figura 31, Tabla 12).

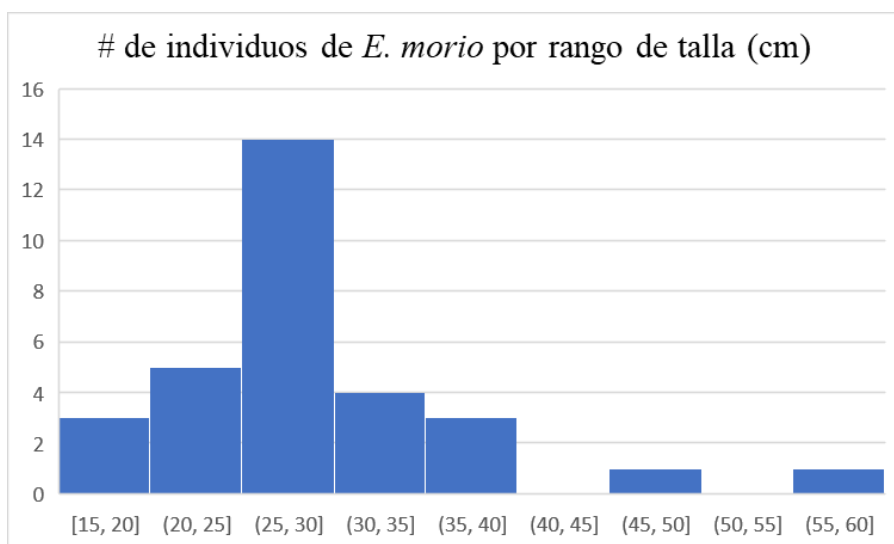


Figura 30. Histograma de las tallas registradas de los 31 individuos de *E. morio* en el área de Celestún-Sisal.

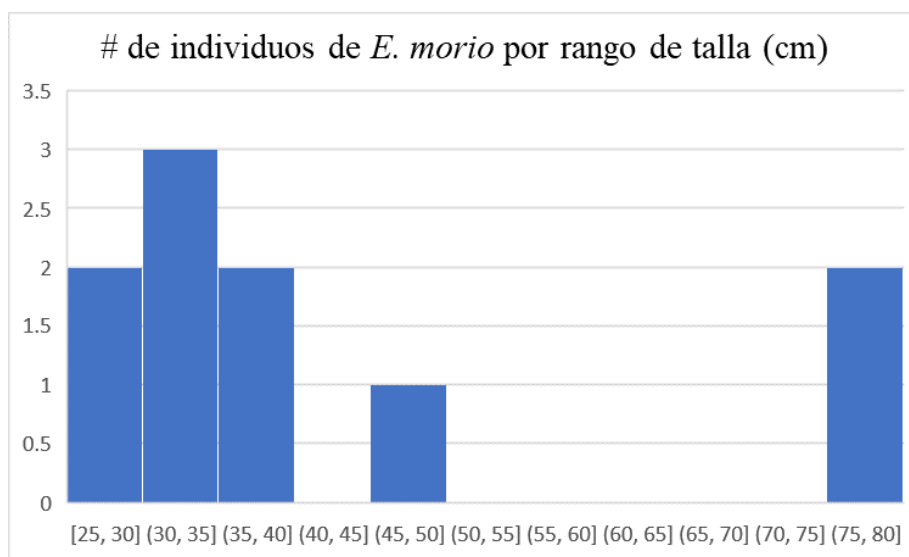


Figura 31. Histograma de las tallas registradas de los 10 individuos de *E. morio* en el área de Río Lagartos-Las Coloradas.

Tabla 12. Individuos de *E. morio* registrados en ambas áreas de estudio.

<b>Id</b>	<b>Transecto</b>	<b>Fecha</b>	<b>Localidad</b>	<b>Longitud total (cm)</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Biomasa (g)</b>
1	D1T3C	21/03/2017	Celestún	25	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	236.2987
2	D1T6C	21/03/2017	Celestún	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
3	D2T7C	22/03/2017	Celestún	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
4	D3T5C	23/03/2017	Celestún	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
5	D5T2C	26/04/2017	Celestún	25	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	236.2987
6	D6T1C	27/04/2017	Celestún	20	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	118.9239
7	D6T6C	27/04/2017	Celestún	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
8	D1T2S	28/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
9	D1T4S	28/03/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
10	D2T2S	30/03/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	1360.3636
11	D2T2S	30/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	1360.3636
12	D2T2S	30/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	1360.3636
13	D2T3S	30/03/2017	Sisal	60	$w= 0.003926449(60)^{3.319}$	3131.0067
14	D2T5S	30/03/2017	Sisal	15	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	49.0719
15	D2T5S	30/03/2017	Sisal	18	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	85.9951
16	D3T5S	31/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
17	D3T8S	31/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
18	D3T8S	31/03/2017	Sisal	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
19	D3T8S	31/03/2017	Sisal	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
20	D3T8S	31/03/2017	Sisal	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
21	D4T1S	19/04/2017	Sisal	25	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	236.2987
22	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
23	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
24	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
25	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
26	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
27	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
28	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
29	D4T1S	19/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
30	D4T1S	19/04/2017	Sisal	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
31	D5T1S	20/04/2017	Sisal	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
32	D3T2	07/05/2017	Río Lagartos	30	$w= 0.003926449(30)^{3.319}$	313.7368
33	D5T5	16/05/2017	Las Coloradas	80	$w= 0.016710906(80)^{3.040}$	10195.1486
34	D6T5	17/05/2017	Las Coloradas	80	$w= 0.016710906(80)^{3.040}$	10195.1486
35	D7T4	19/05/2017	Las Coloradas	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
36	D7T9	19/05/2017	Las Coloradas	25	$w=0.011803206(25)^{3.077}$	236.2987
37	D7T9	19/05/2017	Las Coloradas	50	$w= 0.003926449(50)^{3.319}$	1709.5484
38	D8T1	20/05/2017	Las Coloradas	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
39	D8T1	20/05/2017	Las Coloradas	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134
40	D8T2	20/05/2017	Las Coloradas	40	$w= 0.003926449(40)^{3.319}$	815.1492
41	D8T5	20/05/2017	Las Coloradas	35	$w= 0.003926449(35)^{3.319}$	523.3134

### 8.7 Análisis de la relación entre la población de mero rojo y su hábitat

De los 31 individuos contabilizados en los censos visuales del área de Celestún-Sisal, la mayoría (19) se encontraron en la Clase 5 (sedimento con parches de algas verdes), de igual forma la mayor cantidad de biomasa (6521.30 g) se encontró en esta clase (Tabla 13). Para el área de Río Lagartos-Las Coloradas la mayor cantidad de individuos (6) se registraron en la Clase 4 (algas filamentosas sobre sedimento), sin embargo, la mayor cantidad de biomasa (15,117.26 g) se concentró en la Clase 2 (sedimento desnudo) (Tabla 13).

Tabla 13. Conglomerado de las observaciones de *E. morio* realizadas en ambas áreas de estudio. Celestún-Sisal: C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento desnudo; C5: sedimento con parches de algas verdes; C6: algas filamentosas y parches de sedimento; C7: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas. Río Lagartos-Las Coloradas: C1: dominado por algas filamentosas; C2: sedimento desnudo; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: algas filamentosas sobre sedimento.

Clase	Celestún-Sisal				Río Lagartos-Las Coloradas			
	Individuos (#)	Biomasa (g)	Individuos (%)	Biomasa (%)	Individuos (#)	Biomasa (g)	Individuos (%)	Biomasa (%)
1	1	236.30	3.23	1.59	0	0	0	0
2	5	3492.07	16.13	23.46	2	<b>15117.26</b>	20	<b>70.85</b>
3	1	313.74	3.23	2.11	2	1022.46	20	4.79
4	2	3654.32	6.45	24.55	<b>6</b>	5196.82	<b>60</b>	24.36
5	<b>19</b>	<b>6521.30</b>	<b>61.29</b>	<b>43.81</b>	-	-	-	-
6	3	668.96	9.68	4.49	-	-	-	-
7	0	0	0	0	-	-	-	-
Total	31	14886.69	100	100	10	21336.54	100	100

El análisis de redundancia (RDA) del área de Celestún-Sisal, indicó que la abundancia de *E. morio* se encuentra relacionada de manera significativa con la cobertura de algas verdes (AV), en tanto que la biomasa se encuentra relacionada con la presencia de octocorales, no obstante, dicha relación no es significativa (Figura 30). Este modelo tan solo explica el 15.8% de la variabilidad de los datos de abundancia y de mero rojo respecto al tipo de cobertura (Tabla 14).

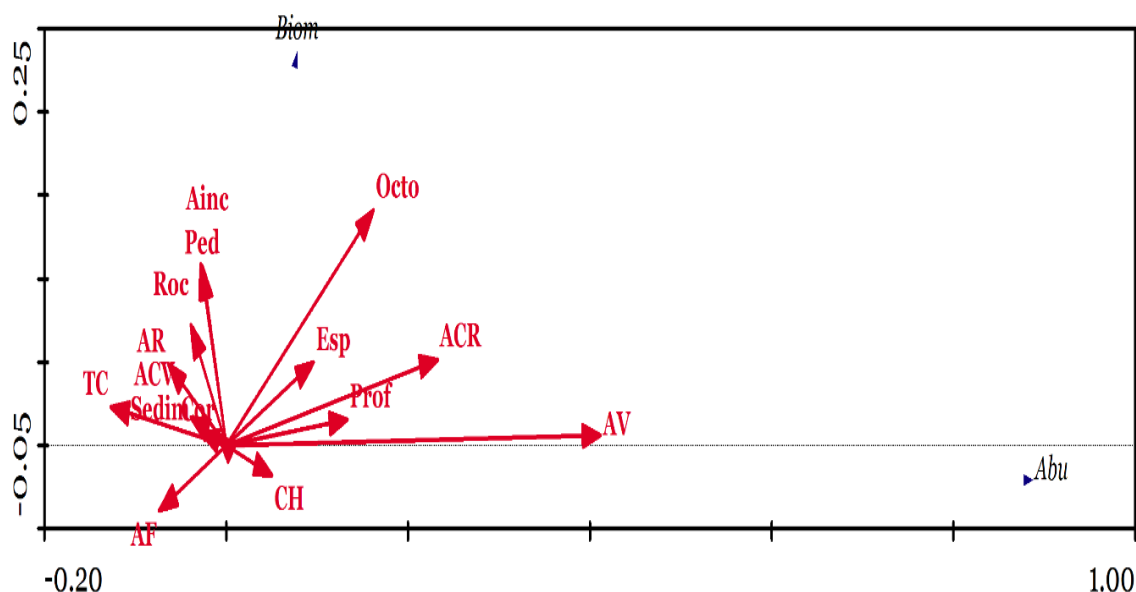


Figura 32. Gráfico representativo del análisis de redundancia (RDA) del área de Celestún-Sisal. A saber: algas verdes (AV), algas calcáreas rojas (ACR), profundidad (Prof), esponjas (Esp), complejidad de hábitat (CH), sedimento (Sedim), algas calcáreas verdes (ACV), algas rojas (AR), corales (Cor), roca/pavimento calcáreo (Roc), algas filamentosas (AF), algas incrustantes (Ainc), pedacería (Ped), algas pardas (AP), zoántidos y tunicados (ZT).

Tabla 14. Resultados del análisis de redundancia (RDA) para el área de Río Lagartos- Las Coloradas. Valores propios de los cuatro ejes, su porcentaje asociado de contribución a la varianza y valores de correlación entre *E. morio* y las variables ambientales.

Ejes	1	2	3	4
<b>Valores propios</b>	0.157	0.001	0.840	0.001
<b>Correlaciones especie-ambiente</b>	0.397	0.532	0.000	0.000
<b>Variación porcentual acumulada de</b>				
Datos de las especies:	15.7	15.8	99.9	100.0
Relación especie-ambiente:	99.5	100.0	0.0	0.0
<b>Suma de todos los ejes canónicos: 0.158</b>				

En el área de Río Lagartos-Las Coloradas ninguna variable estuvo relacionada de manera significativa con la abundancia, no obstante, la presencia de algas pardas (AP), algas verdes y algas filamentosas (AF) se relacionan en cierta medida con la misma. En cuanto a la biomasa, la presencia de zoántidos y tunicados (ZT) se relaciona con la misma (Figura 31). Este modelo solo explica el 14.5% de la variabilidad de los datos de abundancia y de mero rojo respecto al tipo de cobertura (Tabla 15).

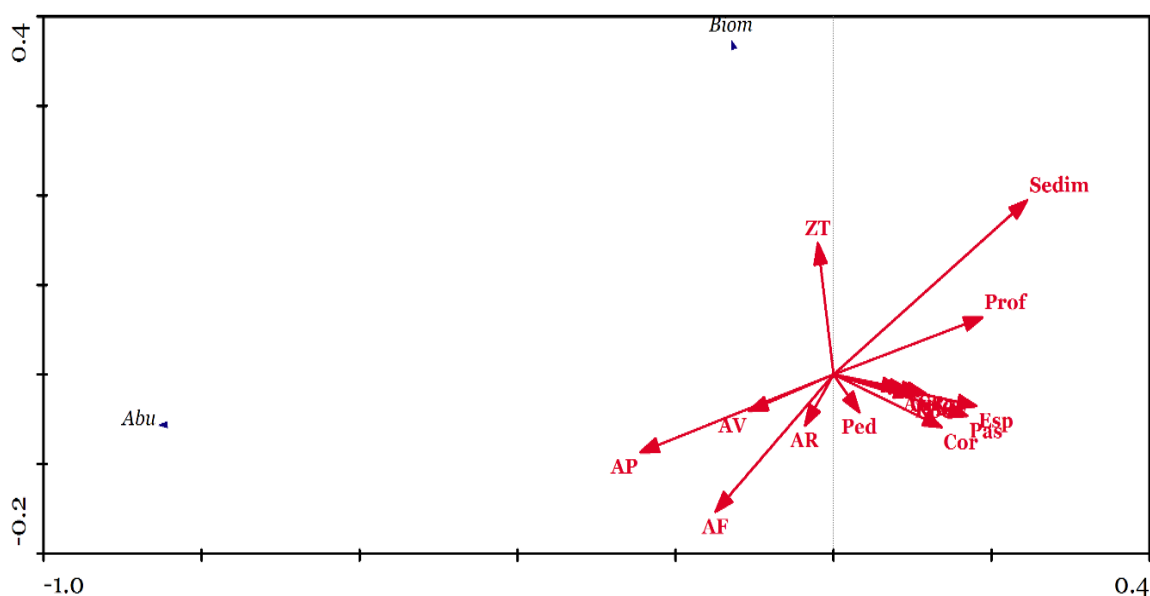


Figura 33. Gráfico representativo del análisis de redundancia (RDA) del área de Río Lagartos-Las Coloradas. A saber: algas verdes (AV), algas calcáreas rojas (ACR), profundidad (Prof), esponjas (Esp), complejidad de hábitat (CH), sedimento (Sedim), algas calcáreas verdes (ACV), algas rojas (AR), corales (Cor), roca/pavimento calcáreo (Roc), algas filamentosas (AF), algas incrustantes (Ainc), pedacería (Ped), algas pardas (AP), zoántidos y tunicados (ZT).

Tabla 15. Resultados del análisis de redundancia (RDA) para el área de Río Lagartos- Las Coloradas. Valores propios de los cuatro ejes, su porcentaje asociado de contribución a la varianza y valores de correlación entre *E. morio* y las variables ambientales.

Ejes	1	2	3	4
<b>Valores propios</b>	0.140	0.005	0.830	0.026
<b>Correlaciones especie-ambiente</b>	0.380	0.391	0.000	0.000
<b>Variación porcentual acumulada de</b>				
Datos de las especies:	14.0	14.5	97.4	100.0
Relación especie-ambiente:	96.5	100.0	0.0	0.0
<b>Suma de todos los ejes canónicos: 0.145</b>				



## 8.8 Mapeo de hábitat de predilección de mero rojo

Para el área de Celestún-Sisal, las clases más importantes, por su abundancia y biomasa de *E. morio*, son la Clase 2 (sedimento con algas verdes) y la Clase 5 (sedimento con parches de algas verdes) en el esquema de clasificación original (7 clases). Según los resultados obtenidos por el análisis de redundancia (RDA) las algas verdes son la única variable que influye de manera significativa en la abundancia de mero rojo; La Clase 2 en el esquema de clasificación posterior (clasificación supervisada de cinco clases), se definió como el hábitat de predilección, dominada por sedimento y algas verdes.

Para la validación externa, se sobrepuso sobre la clasificación supervisada de cinco clases, un shapefile correspondiente a un total de 30 palangres desplegados durante la época de secas sobre el área de Celestún-Sisal. Esta validación con datos independientes indicó que, de los 109 individuos capturados en los palangres, 91 de ellos (83.49%) se encontraron dentro de la Clase 2, los cuales representan de igual forma un 81.16% de la biomasa total capturada (66,488.88 g). Con este resultado se corrobora lo establecido anteriormente con los datos de los censos visuales (Tabla 16), por lo cual se procedió a extraer los pixeles de la Clase 2 para generar el mapa del hábitat de predilección de *E. morio*, fondos dominados por sedimento con presencia de algas verdes, y se incluyeron sus abundancias y biomاسas (Figura 32; Figura 33).

Tabla 16. Conglomerado de las observaciones de *E. morio* realizadas por ambos métodos. C1: sedimento con algas filamentosas; C2: sedimento con algas verdes; C3: algas pardas sobre sedimento; C4: sedimento con parches de algas verdes, pardas y filamentosas; C5: algas filamentosas y parches de sedimento.

Clase	Censos Visuales				Palangres			
	Individuos (#)	Biomasa (g)	Individuos (%)	Biomasa (%)	Individuos (#)	Biomasa (g)	Individuos (%)	Biomasa (%)
1	1	236.30	3.23	1.59	0	0	0	0
2	<b>24</b>	<b>10013.37</b>	<b>77.42</b>	<b>67.26</b>	<b>91</b>	<b>66488.88</b>	<b>83.49</b>	<b>81.16</b>
3	1	313.74	3.23	2.11	8	7043	8.26	8.60
4	2	3654.32	6.45	24.55	2	1234.11	2.75	1.51
5	3	668.96	9.68	4.49	8	7162.19	5.50	8.74
Total	31	14886.69	100	100	109	81927.98	100	100

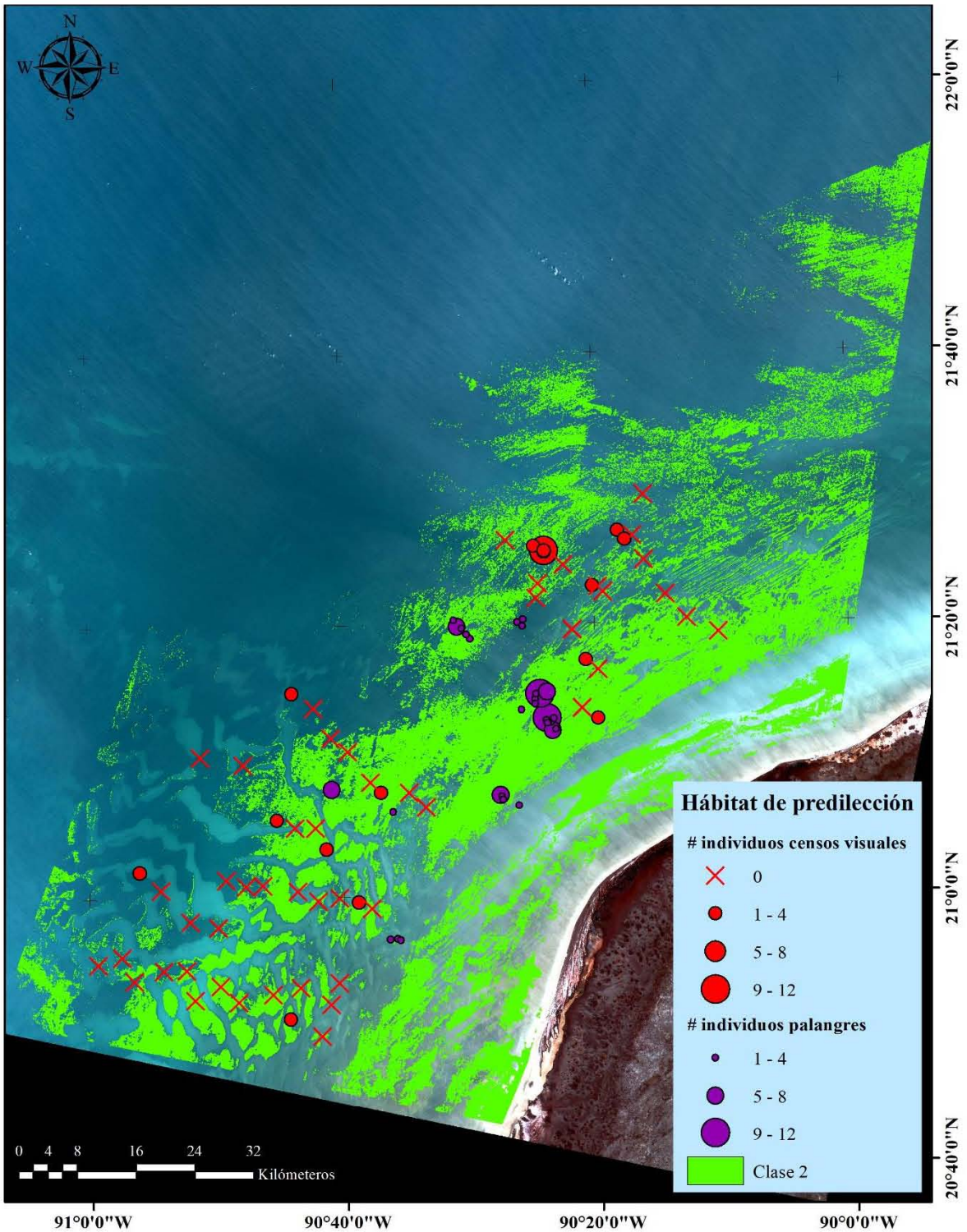


Figura 34. Mapa del hábitat de predilección del mero rojo (*E. morio*). Obtenido a través de la extracción de los píxeles de la Clase 2 (sedimento con algas verdes) del mapa temático de cinco clases. Esferas rojas: número de individuos observados en censos visuales. Esferas moradas: número de individuos capturados en palangres.

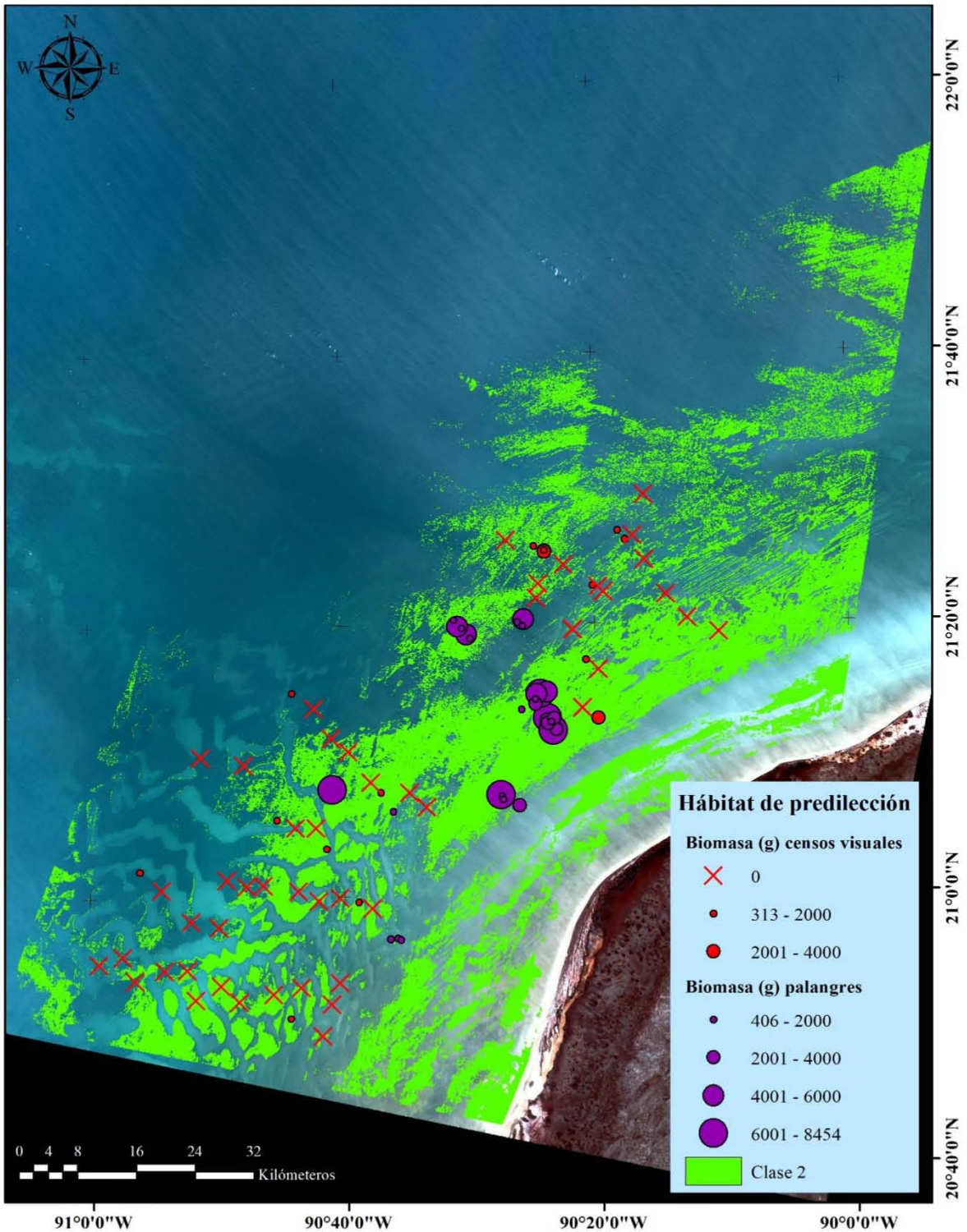


Figura 35. Mapa del hábitat de predilección del mero rojo (*E. morio*). Obtenido a través de la extracción de los píxeles de la Clase 2 (sedimento con algas verdes) del mapa temático de cinco clases. Esferas rojas: biomasa calculada a partir de los individuos observados en censos visuales. Esferas moradas: biomasa calculada a partir los individuos capturados en palangres.

## IX. DISCUSIÓN

### 9.1 Hábitats bentónicos marinos detectables en imágenes satelitales

El uso de imágenes provenientes del satélite Landsat 8 OLI/TIRS, al ser una plataforma de resolución espacial media (30m) aporta una amplia gama de ventajas y desventajas derivadas de su uso (Roy *et al.* 2014). Entre las principales ventajas con las que cuenta es que todas las imágenes adquiridas en su nivel 1 (L1T) son de acceso público y gratuito, lo cual se ve reflejado en su amplio uso alrededor del mundo. Aunado a su gratuidad y fácil acceso, la plataforma cuenta con un sensor de última generación (Operational Land Imager) el cual, en contraste con las generaciones pasadas Landsat, cuenta con una banda azul costero/aerosol diseñada específicamente para el estudio de recursos hídricos e investigaciones en zonas costeras (Andino y López, 2017).

Dentro de las limitantes de este trabajo, anteriormente se ha especificado que las imágenes satelitales con resoluciones espaciales medias (10- 100m) no son las óptimas para la discriminación de hábitats marinos a un nivel fino (~ 13 clases), lo que resulta en una menor precisión temática (Mumby *et al.* 1997; Green *et al.* 2000; Mumby y Edwards 2002), sin embargo, el costo económico de imágenes provenientes de sensores remotos con una alta resolución espacial (p.ej. WorldView-3) es alto en relación con el área cubierta por los mismos. Es importante mencionar que, para los objetivos planteados en este trabajo, el uso imágenes provenientes de sensores remotos de alta resolución no es funcional, debido a la amplitud de las áreas de estudio propuestas, el costo de estas y a que en principio se buscó una discriminación gruesa de los hábitats (~ 5 clases) que permitiera definir de forma accesible y eficaz el hábitat de predilección de *E. morio*, así como aumentar la precisión temática para este tipo de sensores.

Tomando en cuenta lo anterior se optó por el uso de imágenes Landsat 8 siguiendo los criterios de Eugenio *et al.* (2015), quienes especifican que las imágenes han de ser adquiridas en condiciones idóneas desde el punto de vista de calidad atmosférica, marina y de oleaje. No obstante, a pesar de la obtención de imágenes con buena calidad según los criterios mencionados, estas se encuentran sujetas a ciertas limitantes con su uso para el mapeo de hábitats bentónicos marinos, ya que la turbidez del agua de las áreas, la profundidad

a la que puede penetrar la luz y la experiencia del operador para analizar y producir los mapas temáticos deseados pueden influir significativamente en los resultados obtenidos (Lyzenga 1981; Mumby *et al.* 1998; Green *et al.* 2000; Mumby y Edwards 2002; Mumby *et al.* 2004).

El uso de técnicas de preprocesamiento, que corrigen las distorsiones ocasionadas por factores físicos de la atmosfera y la columna de agua, produjo una notable mejoría de las imágenes satelitales originales; esto se percibe visualmente en el área de Celestún-Sisal (Figura 13). En teoría, el uso de dichas técnicas debería permitir que la visibilidad y las características del fondo fueran más notables y pudieran ser discriminadas eficazmente (Overton *et al.*, 2002; Goodman *et al.*, 2013), sin embargo, en el área de Río Lagartos-Las Coloradas, a pesar de haber implementado de manera parsimoniosa las técnicas de preprocesamiento, la imagen no es adecuada, ya que la visibilidad del fondo se ve obstruida por la turbidez y la señal el fondo es difusa. Una posible explicación al fenómeno observado en esta imagen podría estar asociada a que el área de Río Lagartos-Las Coloradas, se encuentra en una región en la que durante la primavera y el verano afloran masas de agua del Mar Caribe (Merino 1997; Reyes-Mendoza *et al.* 2015). Estas surgencias de masas de agua, de baja temperatura ( $\sim 22^{\circ}\text{C}$ ) y alto contenido de nutrientes, emergen en la plataforma continental y son puestas en movimiento por las corrientes superficiales locales hacia el oeste; al ser considerablemente más densas (por su temperatura) que las aguas de la plataforma ( $\sim 30^{\circ}\text{C}$ ), se genera una columna estratificada con dos capas divididas por una fuerte termoclina. La combinación de la masa de agua fría y rica en nutrientes y la irradiación solar provoca una proliferación de fitoplancton el cual impide la penetración de la luz solar al fondo (Zavala-Hidalgo *et al.* 2006); esta turbidez asociada a la productividad primaria absorbe fuertemente la señal espectral del canal azul y verde y la señal que capta el sensor se dispersa (Lee y Carder, 2004). Cabe mencionar que la termoclina fue percibida claramente por los buzos desplegados, así como por las computadoras de buceo, de igual forma se observó sistemáticamente una capa de agua oceánica transparente tipo 1 (sin materia orgánica disuelta ni materiales en suspensión) en el tercio superior de la columna de agua y la turbidez con agua oceánica tipo 2 (con materia orgánica disuelta y materiales en suspensión) en los dos tercios de la columna adyacentes al fondo (Figura 34).

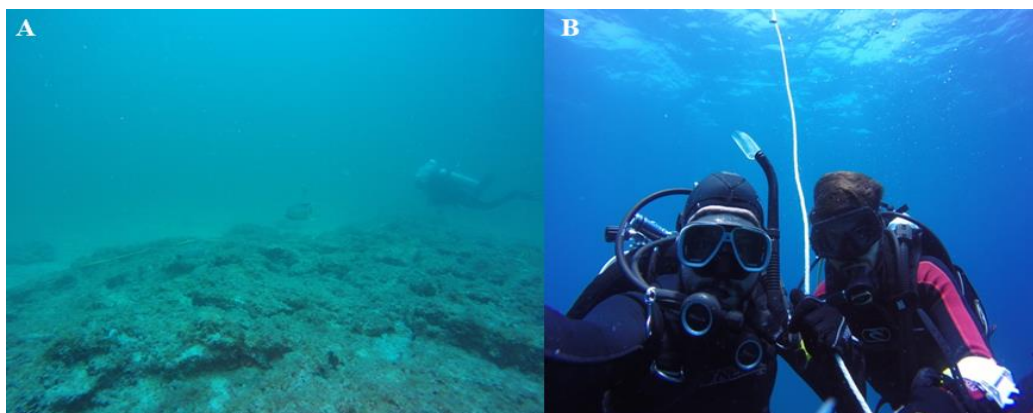


Figura 36. Imágenes tomadas en la misma estación SCUBA. A. Fondo a 20 m de profundidad. B. Columna de agua a 5 m de profundidad.

En cuanto la clasificación no supervisada, se optó por la utilización de siete clases debido a que se tomaron en cuenta los siete hábitats establecidos anteriormente para la costa somera de Yucatán (Palafox-Juárez y Liceaga-Correa, 2017), así como los seis hábitats establecidos en tres temporadas climáticas diferentes para la zona costera de Sisal (Garza-Pérez *et al.*, 2017). Si bien el presente trabajo se llevó a cabo únicamente en una sola temporada climática, el mismo abarca zonas considerablemente más amplias que además no han sido exploradas, y por tanto no es posible definir en primera instancia la presencia o ausencia de ninguno de los hábitats definidos anteriormente.

## 9.2 Caracterización de los hábitats bentónicos marinos

El método de videotransectos (Aronson y Swanson, 1997) fue desarrollado, y en general ha sido usado, para el estudio de arrecifes coralinos (p.ej. Mumby *et al.*, 1997; Garza-Pérez *et al.*, 2004; Molina-Hernández *et al.* 2018). Por lo anterior, fue necesario llevar a cabo una modificación al método de análisis de videotransectos propuesto por Garza-Pérez *et al.* (2004) (40 pausas y 13 puntos), ya que, según las curvas de acumulación de especies realizadas en videotransectos de evaluación, y debido a las características particulares de las áreas de estudio, dicho método no era suficiente para obtener los porcentajes de cobertura representativos de cada video. Para realizar la modificación, se probaron distintas configuraciones de pausas y puntos distribuidos en cada cuadro hasta alcanzar la asíntota de la curva de acumulación de especies. La modificación al método de análisis de

videotransectos resultante (40 pausas y 25 puntos), utilizado en este trabajo para caracterizar los hábitats bentónicos marinos, ofrece detalles suficientes para identificar con precisión incluso especies de corales, sin embargo, en la mayoría de los casos, sin su respectivo manejo y extracción, no es posible distinguir a nivel de especie otros grupos (p.ej. macroalgas y esponjas) (Puente y Juanes, 2008; Loh *et al.*, 2012), y por tanto los mapeos de las distribuciones espaciales a nivel de especie de estos, por el momento parecen estar más allá del alcance de los sensores remotos (Pittman *et al.*, 2007). Debido a lo anterior y a que el método por definición es no invasivo, no fue posible identificar todos los grupos al nivel de especies, sin embargo, aunado con sus diversas ventajas, fue posible identificar al nivel de los grupos funcionales propuestos por Garza-Pérez (2010), que para los objetivos de este trabajo se considera suficiente.

En cuanto a los grupos definidos por el análisis clúster, se puede decir que se decidió usar una similitud mínima del 85% como parámetro para la separación de grupos debido al conjunto de las observaciones realizadas en campo y a los datos proporcionados anteriormente por otros autores. En este sentido, Garza-Pérez *et al.* (2017), dentro del análisis clúster que llevaron a cabo en las costas de Sisal, se puede observar que, en términos generales, la similitud de las clases en cada temporada está por encima del 70% y que la variable constante que proporciona similitud es el substrato arena, y la disimilitud está dada por la cobertura de algas rojas y filamentosas/pardas. Corroborando las observaciones de estos autores, en los dos análisis clúster llevados a cabo (Celestún-Sisal y Río Lagartos-Las Coloradas), la similitud mínima entre estaciones es del 70% y la variable que proporciona similitud es el sedimento, mientras que las coberturas que otorgan disimilitud entre clases están dadas por el tipo de cobertura algal con la que cuentan (verdes, pardas o filamentosas). Lo anterior denota la relativa homogeneidad del fondo marino en la plataforma continental no solo frente a las costas de Sisal (Garza-Pérez *et al.*, 2017), sino en toda la costa del estado de Yucatán. Tomando en cuenta esta homogeneidad entre estaciones, el usar el 85% de similitud como punto de separación de clases o grupos implicó la pérdida de cinco estaciones en el área de Celestún-Sisal y cuatro estaciones en el área de Río Lagartos-Las Coloradas, sin embargo, esto llevó a describir de manera más precisa los tipos de coberturas dominantes de cada clase y por tanto a definir un nombre sencillo y de fácil entendimiento para cada una.

En general los hábitats definidos por este estudio son muy parecidos en número, así como en tipo de coberturas a los definidos anteriormente por Garza-Pérez *et al.* (2017) para la zona costera de Sisal y los definidos por Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) para la zona costera de Yucatán (Tabla 17).

Tabla 17. Tabla comparativa entre los hábitats definidos por este trabajo y los definidos previamente en las zonas de estudio. Garza-Pérez *et al.* (2017) litoral de Sisal. Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) zona costera de Yucatán.

<b>Rodríguez-Vázquez (2019)</b>	<b>Garza-Pérez <i>et al.</i> (2017)</b>	<b>Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017)</b>
Sedimento con algas filamentosas	Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena	Bosque de macroalgas
Sedimento con algas verdes	Algas verdes sobre arena	Pavimento calcáreo con macroalgas
Algas pardas sobre sedimento	Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena	Arena con pastos marinos
Sedimento desnudo	Arenal	Sustrato desnudo
Sedimento con parches de algas verdes	-	Praderas de pastos marinos
Algas filamentosas sobre sedimento	Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento fino	Pastos marinos con macroalgas
Sedimento con parches de algas mixtas	Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena	Macroalgas sobre arena

Como se puede observar, en los tres trabajos los hábitats se encuentran definidos por una alta dominancia de sedimento y macroalgas. En el presente trabajo, a pesar de que se llevo a cabo en áreas que incluyen algunas de las zonas trabajadas anteriormente por Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017), existen diferencias entre los hábitats definidos, sin embargo, esto se puede explicar a partir del uso de diferentes referencias para la identificación de los organismos bentónicos, así como que el presente trabajo estuvo enfocado a las zonas de incidencia de la flota menor artesanal (Prof. >10 m), mientras que el realizado por Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) se enfocó únicamente en aguas someras (Prof.<10 m).



### 9.3 Mapeo de los hábitats bentónicos marinos a través de clasificación supervisada

#### 9.3.1 Generación de productos geográficos adicionales

La ventaja más notable de la generación de bandas de predicción espacial es que cuentan con la capacidad de realizar predicciones, como variables continuas y a gran escala geográfica, a partir de los datos obtenidos de un área relativamente pequeña (Garza-Pérez *et al.*, 2004) y, al estar basada en las bandas de la imagen satelital se mantienen los patrones espaciales del fondo, sin embargo, cuenta con algunas desventajas ya que las características de la columna (p.ej. turbidez) influyen significativamente en los resultados (Garza-Pérez *et al.*, 2017).

La banda de predicción de sedimento generada para Celestún-Sisal corresponde a lo observado tanto en campo como en la imagen satelital, sin embargo, en el área de Río Lagartos-Las Coloradas, a pesar de que la validación de la capa predictiva de sedimento indica una correlación del 0.68 de lo observado vs. lo predicho, las características particulares de la columna de agua hacen que la predicción resultante sea difusa y, sobre todo, incierta (Figura 34). Esta predicción parece corresponder a los patrones de turbidez del agua de fondo causada por la surgencia del Mar Caribe, que el algoritmo clasifica como sedimento. Existe poca información respecto al uso de la predicción espacial para generación de bandas predictivas en las costas de Yucatán, Garza-Pérez *et al.* (2017) obtuvieron una banda de predicción de la profundidad del área costera de Sisal, Yucatán mediante el uso de imágenes provenientes del satélite Landsat 7 ETM+ y la técnica de GRASP, no obstante, en el trabajo mencionado, no se especifica la correlación entre la banda predicha y los datos reales obtenidos en campo. Por su parte Garza-Pérez *et al.* (2004) realizaron aproximaciones similares en la costa de Akumal, Quintana Roo. Dichos autores obtuvieron un total de 10 bandas de predicción espacial, incluyendo una banda de predicción de sedimento, a través del uso de imágenes de alta resolución (4 x 4 m) provenientes del satélite IKONOS. La validación de su banda predictiva de sedimento (0.875) contrasta con la validación obtenida en este trabajo para el área de Celestún-Sisal (0.49), esta diferencia entre valores puede ser explicada a partir de la magnitud de las áreas predichas, así como con la diferencia en la resolución espacial de las plataformas usadas. Tomando en cuenta las características particulares de ambas bandas de predicción de sedimento, se decidió que serían usadas para la clasificación supervisada ya que la incorporación de capas adicionales de información permite al clasificador una mejor discriminación de los píxeles pertenecientes a clases

específicas al poder interactuar con más datos para cada píxel, sin embargo, únicamente la banda correspondiente al área de Celestún-Sisal puede ser usada para futuros estudios.

En cuanto a las bandas de derivación batimétrica, para el área de Celestún-Sisal, el resultado del ajuste linear fue de 0.6325 y un error típico de  $\pm 3.086$  metros de profundidad, mientras que en el área de Río Lagartos-Las Coloradas el ajuste linear fue de 0.85 y un error típico de  $\pm 2.69$  metros de profundidad. Resultados más precisos (95% de precisión con error típico de  $\pm 1$  m) se han reportado anteriormente mediante el uso de sensores de alta resolución (Lyzenga *et al.* 2006; Hogrefe *et al.* 2009). La principal diferencia de utilizar imágenes de alta resolución y mediana resolución está en la extensión que la imagen pueda cubrir. Imágenes de alta resolución pueden producir precisiones mayores en la derivación batimétricas pero su extensión suele ser a una escala local y para cubrir grandes extensiones es necesaria la adquisición de más de una escena para crear mosaicos del sitio de interés (Hogrefe, 2009). Por su parte, las imágenes de resolución media son comúnmente utilizadas para tratar grandes extensiones, pero la precisión general suele ser menor (~80%), esto se ve reflejado en el presente estudio y trabajos similares que han utilizado datos satelitales de resolución media como la serie Landsat y Sentinel (Ariza y Ramírez, 2014; Jagalingam *et al.*, 2015; Hedley *et al.* 2018). En general los modelos batimétricos obtenidos en este trabajo, por tratarse de áreas marinas de gran extensión, son considerados aceptables ya que muestran un acercamiento a la profundidad real, sin embargo, el modelo correspondiente al área de Río Lagartos-Las Coloradas, no debe ser utilizado ya que presenta una alta incertidumbre en los valores reales de profundidad, por el hecho de que la imagen utilizada no presentaba las condiciones idóneas para representar las características del fondo.

### 9.3.2 Clasificación supervisada

La evaluación de distintos clasificadores permitió seleccionar los productos geográficos con una mayor precisión general de la clasificación. El clasificador de máxima similitud resultó ser el más adecuado de acuerdo con la evaluación de precisión general (76.28%) y coeficiente Kappa (0.65) en comparación con métodos similares como el clasificador de distancia mínima (Precisión general: 53.85%; Coeficiente kappa: 0.32) y distancia de Mahalanobis (Precisión general: 55%; Coeficiente kappa: 0.38). De igual forma, el agrupar nuevas capas

de información en imágenes compuestas, permite al clasificador una mejor discriminación de los píxeles pertenecientes a clases específicas al poder interactuar con más datos para cada píxel, específicamente, la incorporación de datos batimétricos para la clasificación supervisada deber ser tomado en cuenta, por el hecho de que la profundidad es un factor que influye en la distribución de tipos de cobertura morfológica y vegetal (Ecochard *et al.* 2003). Asimismo, la capa de sedimento jugó un papel importante en la discriminación de los tipos de fondo, ya que la similitud de al menos 84% entre las clases definidas dificulta su adecuada separación (Serratos-Toscano, 2019).

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados, en un principio las clasificaciones supervisadas no fueron satisfactorias, razón por la cual fue necesario la extensión de las áreas propuestas (Prof. > 10 m) a la zona costera (Prof. >0 m), con este fin, fue necesario la visita y evaluación mediante un método similar al de Bello-Pineda *et al.* (2005) de 59 estaciones costeras en el área de Celestún-Sisal visitadas un año después que las estaciones SCUBA (época de secas 2018), siguiendo lo establecido por Garza-Pérez *et al.* (2004), quienes mencionan que para poder realizar la comparación entre conjuntos de datos de entrenamiento y pruebas, deben realizarse en la misma época del año, ya que el porcentaje de cobertura de componentes bióticos importantes, como las algas, tienden a fluctuar durante y entre las estaciones climáticas. Tras su respectiva clasificación en alguna de las clases definidas previamente por el análisis clúster, estas estaciones costeras fueron utilizadas para definir las mismas clases en la zona más somera y que permitieron aumentar la discriminación de los resultados y por tanto la definición de la distribución espacial de los hábitats, así como la precisión general y coeficiente kappa de la clasificación. En el caso del área de Río Lagartos-Las Coloradas, no se visitaron estaciones costeras debido a que la imagen obtenida tras el preprocesamiento y la clasificación supervisada derivada del uso de las estaciones SCUBA no fueron alentadores; se consideró que la visita a las mismas no derivaría en la obtención de mejores resultados y por tanto la idea fue descartada.

La precisión general (76.28%) obtenida para el área de Celestún-Sisal es satisfactoria para las 5 clases clasificadas, a pesar de que el área marina cartografiada es muy extensa, en este trabajo la precisión general refleja un primer acercamiento la composición bentónica en esta zona. En cambio, en el área de Río Lagartos-Las Coloradas, aunque la precisión general obtenida (73.62%) se encuentra dentro del rango de aceptable para sensores de mediana

resolución espacial, este mapa queda descartado para aplicaciones científicas y otros fines de manejo debido a la incertidumbre en la derivación batimétrica y de las características espectrales de la columna de agua, que no permitieron la adecuada representación de las características del fondo. Asimismo, aunque el resultado de la clasificación supervisada corresponde a los patrones espaciales observables en la imagen, se considera que la misma no refleja adecuadamente la distribución real de los diferentes tipos de fondo presente en el área de área de Río Lagartos-Las Coloradas.

Los resultados en la precisión general de la clasificación supervisada de cinco clases (76.29%) usada para el mapeo temático del área de Celestún-Sisal de este trabajo son muy similares a las precisiones reportadas por Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) para la zona costera del área de Celestún-Sisal (78.2%) esto se debe a que básicamente fueron usados los mismos métodos de muestreo, sin embargo las principales diferencias entre ambos trabajos son que los autores citados utilizaron imágenes provenientes del satélite Landsat 7 con sensor ETM+ (sin banda azul costero), sus áreas de estudio fueron considerablemente más pequeñas, y tampoco fueron usadas bandas distintas a las proporcionadas por el preprocesamiento de las imágenes de satélite, las cuales, en el presente trabajo, fueron de suma importancia. Otra importante diferencia con este trabajo es que Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) lograron realizar un mapa temático con buen acercamiento a la realidad y buena precisión (77.6%) de la zona costera del área de Río Lagartos-Las Coloradas, que en este trabajo no fue posible. Esta diferencia radica principalmente en que en el trabajo citado su área de interés fue delimitado a no más de 10 km de la costa (Prof. <13 m), donde la influencia de la surgencia proveniente del Mar Caribe es mínima y por tanto las características del fondo pueden ser observadas de mejor manera a través de imágenes satelitales, en comparación con la extensión de nuestra área de estudio (60 km desde la costa) y profundidades de hasta 30 m.

Por su parte, la caracterización espacial de los cinco hábitats bentónicos marinos en el área de Celestún-Sisal indica que estos se distribuyen como bandas paralelas a la línea costera en una transición difusa, sin límites drásticos entre ellos y con un patrón de distribución que se adapta al enfoque de gradiente propuesto por Cushman y McGarigal (2003). Esta falta de límites otorga continuidad a los diferentes hábitats costeros, por lo que es posible encontrar en todos los hábitats algún porcentaje de todos los grupos funcionales identificados. Lo

anterior refleja la falta de características geomorfológicas significativas en el área de estudio que influyan en la distribución de los diferentes grupos funcionales, y constituye una planicie con una pendiente suave con un gradiente de profundidad prolongado (Hubp *et al.*, 1992; Liceaga-Correa y Hernández-Núñez, 2013).

#### **9.4 Mapeo de hábitats de predilección de *E. morio***

Los censos visuales llevados a cabo para el registro de mero rojo fueron funcionales para identificar de manera correcta tanto el número de individuos presentes en cada transecto, como la longitud total (intervalos de cinco centímetros) asociada a cada individuo. Por su parte las ecuaciones usadas para el cálculo de biomasa a partir de los datos obtenidos en campo según lo especificado por Renán *et al.* 2013 se debió a que el mero rojo es conocido por ser una especie hermafrodita protógina (Moe, 1969; Shapiro, 1987), y por tanto el uso diferencial de ecuaciones para hembras jóvenes (<25.8cm), hembras adultas (25.9-70cm) y machos adultos (>70cm), derivó en el cálculo de datos de biomasa con alto grado de precisión que fueron usados para analizar las asociaciones de la abundancia y biomasa de esta especie con los componentes bentónicos de cada hábitat definido por el análisis clúster en cada área de estudio, con el fin de mapear los hábitats de predilección.

En el área de Celestún-Sisal se registró una mayor cantidad de individuos (n=31) que en el área de Río Lagartos-Las Coloradas (n=10), sin embargo, en esta última se registró una mayor cantidad de biomasa (21336.54g) en comparación con el área de Celestún-Sisal (14886.69g) lo cual indica, debido a la concentración de biomasa por individuo, la presencia de adultos de la especie. Lo anterior concuerda con lo mencionado por otros autores (Valdés y Padrón, 1980; Arreguin-Sánchez y Pitcher, 1999; Giménez *et al.*, 2003; Hernández y Seijo, 2003) quienes han reconocido que, debido a una probable migración durante la temporada de secas, se concentra una mayor cantidad de biomasa en la zona este del Banco de Campeche, la cual se disipa de forma gradual hasta alcanzar concentraciones similares en ambas zonas del banco en el mes de junio. Lo anterior fue corroborado por López-Rocha *et al.* (2008) quienes reportan una alta probabilidad de captura de organismos maduros (>50 cm) en esta zona, en esta temporada.

Las características de cobertura bentónica, definidas por los análisis de redundancia (RDA), a las que se asocia el mero rojo; en el área de Celestún-Sisal, son las algas verdes relacionadas de manera significativa con la abundancia de la especie, mientras que, para la biomasa, aunque sin ninguna relación significativa, se puede observar cierta influencia en ella de los octocorales. En el área de Río Lagartos-Las Coloradas, el análisis de redundancia (RDA) indicó que ninguna variable estuvo relacionada de manera significativa con la abundancia o biomasa de *E. morio*, lo cual se puede atribuir al bajo número de individuos observados, a pesar de lo anterior, se observa cierta influencia de las variables de sedimento y zoántidos y tunicados en la biomasa, y de las variables de las algas pardas y filamentosas en la abundancia. En general, todos los organismos bentónicos con los que se relaciona la abundancia y biomasa de *E. morio* (p.ej. macroalgas, octocorales, zoántidos y tunicados) cuentan con estructuras de fijación que requieren de sustratos duros (p.ej. pavimento calcáreo) para adherirse y proliferar. Estos resultados concuerdan con lo que se ha especificado anteriormente para la especie, ya que se asocia a tipos de sustrato duro, principalmente de origen calcáreo (Böhlke y Chaplin, 1968; Moe, 1969). De igual forma Albañez-Lucero y Arreguín Sánchez (2009) encuentran relación de los juveniles y preadultos de *E. morio* con sustratos de coral con fondos rocosos, mientras que los fondos arenosos con conchas se asocian con la distribución espacial de los adultos. Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) especifican que la complejidad estructural de los hábitats de macroalgas también juega un papel importante en la distribución de *E. morio* y otras especies en la zona costera de Yucatán, ya proporciona espacios para alimento, refugio y reproducción. En concordancia, Garza-Pérez *et al.* (2017) mencionan que la variable más importante a la que se asocian tanto biomasas como riqueza de especies de peces (dentro de las que se encuentra *E. morio*) es la complejidad del hábitat, que, en la zona litoral de Sisal (fondo de origen sedimentario, topografía homogénea y pendiente suave) esta complejidad está dada por la cobertura y el dosel de algas. Debido a la amplia distribución de *E. morio* existen algunos trabajos realizados en otras partes del mundo que abordan la distribución de esta especie (Wall *et al.*, 2014; Sagarese *et al.*, 2015; Grüs *et al.*, 2017) sin embargo las aproximaciones realizadas por los mismos se basan en datos de pesca y no toman en cuenta la relación que existe entre el mero rojo y los componentes bentónicos, por lo cual no es posible llevar a cabo una comparación con los resultados obtenidos por este trabajo.

Para el mapeo de los hábitats de predilección de *E. morio* en el área de Celestún-Sisal, los censos visuales, así como el análisis de redundancia (RDA) permitieron definir la Clase 2 (dominada por sedimento y algas verdes) como la indicada para extraer los píxeles correspondientes para crear el mapa de hábitat de predilección. La validación externa con los palangres desplegados (temporada de secas 2017) en zonas donde previamente era conocida la presencia de mero rojo corroboraron nuestras observaciones.

En cuanto al área de Río Lagartos-Las Coloradas, a pesar de que también se contaba con datos para la validación externa, no fue posible llevar a cabo el mapeo de hábitat de predilección de mero rojo debido a que por una parte el análisis de redundancia (RDA) no identificó ninguna variable significativa para la abundancia o biomasa; y, por otra parte, como se indicó anteriormente, el mapa, resultado de la clasificación supervisada de 4 clases del área de Río Lagartos-Las Coloradas, quedó descartado para aplicaciones científicas y otros fines de manejo debido a la incertidumbre con la que cuenta.

## X. CONCLUSIONES

El presente trabajo demostró que las imágenes de acceso público (nivel 1) provenientes del satélite Landsat 8 OLI, son suficientes y adecuadas (precisión general mayor al 75%) para el mapeo y discriminación a nivel grueso (~5 clases) de los hábitats bentónicos marinos de grandes extensiones territoriales, lo cual le ofrece a esta plataforma la gran ventaja de adecuarse a diferentes situaciones en contraste con el costo y la cobertura espacial que ofrecen otras plataformas, sin embargo, como se puede observar en el área de Río Lagartos-Las Coloradas, su uso con este fin se encuentra limitado por las características físicas y ambientales bajo las cuales fueron adquiridas las imágenes (p.ej. turbidez del agua, oleaje y profundidad a la que puede penetrar la luz), así como por la resolución temporal (16 días) del sensor, la cual limita la disponibilidad de imágenes de un área determinada durante la misma temporada climática

La caracterización y mapeo de los hábitats bentónicos marinos coincide y corrobora lo reportado anteriormente por otros autores en las áreas de estudio, ya que, debido a las características ambientales y geomorfológicas con las que cuenta el Banco de Campeche, los hábitats, dominados principalmente por coberturas de sedimento y parches de macroalgas, se distribuyen como bandas paralelas a la línea costera en una transición difusa y sin límites drásticos entre ellos.

En cuanto a *E. morio*, se puede decir que, debido a los patrones de distribución de la abundancia y biomasa observados en las áreas de estudio, los individuos de esta especie se encuentran principalmente relacionados con la cobertura de sedimento y macroalgas, las cuales generan hábitats con la suficiente complejidad estructural para proporcionar espacios para alimento, refugio y reproducción.

Debido a los satisfactorios resultados obtenidos en la clasificación supervisada, la cantidad de individuos observada (n=31) y la validación externa que corrobora nuestras observaciones, en el área de Celestún-Sisal fue posible extraer y mapear con buena precisión el hábitat de predilección del mero rojo correspondiente a fondos dominados por arena y



algas verdes representado espacialmente por la Clase 2 del mapa temático de 5 clases del área de Celestún-Sisal.

Los productos geográficos referentes a la distribución del hábitat preferencial del mero rojo, generados para el área de Celestún-Sisal, poseen las cualidades necesarias con respecto a su precisión general y su validación externa como para ser empleadas como soporte a la toma de decisiones en manejo con fines de recuperación de este importante recurso pesquero.

El mapeo de hábitats de predilección de *E. morio* no fue posible en el área de área de Río Lagartos-Las Coloradas, ya que, a pesar de aplicar los mismos procesos y estándares que en el área de Celestún-Sisal, la incertidumbre en las características espectrales de la columna de agua no permitieron la adecuada representación de las características del fondo en esta área, ni de batimetría, por tanto, este mapa no debe usarse para aplicaciones científicas, ni con fines de manejo.

## XI. LITERATURA CITADA

- Albañez-Lucero, M. O., y Arreguin-Sanchez, F. (2009). Modelling the spatial distribution of red grouper (*Epinephelus morio*) at Campeche Bank, México, with respect substrate. *Ecological Modelling*, 220(20), 2744-2750.
- Álvarez-Góngora, C., y Herrera-Silveira, J. A. (2006). Variations of phytoplankton community structure related to water quality trends in a tropical karstic coastal zone. *Marine pollution bulletin*, 52(1), 48-60.
- Appendini, C. M., Salles, P., Mendoza, E. T., López, J., y Torres-Freyermuth, A. (2012). Longshore sediment transport on the northern coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1404-1417.
- Arias-González, J. E., Done, T. J., Page, C. A., Cheal, A., Kininmonth, S., y Garza-Pérez, J. R. (2006). Towards a reefscape ecology: relating biomass and trophic structure of fish assemblages to habitat at Davies Reef, Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 320, 29-41.
- Ariza, A., y Ramírez, H. M. (2014). Modelo Batimétrico derivado de imágenes Landsat ETM+ en zonas de arrecifes tropicales. *Revista Cartográfica*, (90).
- Aronson, R. B., y Swanson, D. W. (1997). Video surveys of coral reefs: uni-and multivariate applications. In *Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium* (Vol. 2, pp. 1441-1446). Smithsonian Tropical Research Institute.
- Arreguín-Sánchez, F., Seijo-Gutiérrez, J. C., Fuentes-Castellanos, D., y Solís-Ramírez, M. J. (1987). Estado del conocimiento de los recursos pesqueros de la plataforma continental de Yucatán y región adyacente.
- Arreguín-Sánchez, F. (1996). Catchability: a key parameter for fish stock assessment. *Reviews in fish biology and fisheries*, 6(2), 221-242.
- Arreguín-Sánchez, F., y Valero, E. (1996). Trophic role of the red grouper (*Epinephelus morio*) in the ecosystem of the northern continental shelf of Yucatan, Mexico. In *Arreguín-Sánchez, F., Munro, JL, Balgos, MC, and D. Pauly (eds.) Biology*,

- fisheries and culture of tropical groupers and snappers. ICLARM Conference Proceedings* (Vol. 48, pp. 19-27).
- Arreguín-Sánchez, F., Ruiz, L. S., Gracia, A., Sánchez, J., y Alarcón, T. (1997). Estado actual y perspectivas de las pesquerías de camarón del Golfo de México. *Análisis y diagnóstico de los recursos pesqueros críticos del Golfo de México. EPOMEX Serie Científica*, 7, 145-172.
- Arreguín-Sánchez, F., y Pitcher, T. J. (1999). Catchability estimates and their application to the red grouper (*Epinephelus morio*) fishery of the Campeche Bank, Mexico. *Fishery Bulletin*, 97(4), 746-757.
- Andino, R. E. C., y López, V. L. O. (2017). Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Ciencias Espaciales*, 9(1), 81-96.
- Bello-Pineda, J., Liceaga-Correa, M. A., Hernández-Núñez, H., y Ponce-Hernández, R. (2005). Using aerial video to train the supervised classification of Landsat TM imagery for coral reef habitats mapping. *Environmental monitoring and assessment*, 105(1-3), 145-164.
- Bohlke, J. E., y Chaplin, C. C. (1968). Fishes of the Bahamas. *The Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Livingston Publishing Company, Wynnewood, Penn.*
- Brulé, T., y Canché, L. R. G. (1993). Food habits of juvenile red groupers, *Epinephelus morio* (Valenciennes, 1828), from Campeche Bank, Yucatan, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 52(2), 772-779.
- Brulé, T., y Marrufo, T. C. (1996). Groupers Exploitation on the Southwest Gulf of Mexico: History and Present. *Gulf and Caribbean Fisheries Inst., Inc.* 49: 173, 214.
- Brulé, T., Déniel, C., Colás-Marrufo, T., y Sánchez-Crespo, M. (1999). Red grouper reproduction in the southern Gulf of Mexico. *Transactions of the American Fisheries Society*, 128(3), 385-402.
- Burgos, R., y Defeo, O. (2004). Long-term population structure, mortality and modeling of a tropical multi-fleet fishery: the red grouper *Epinephelus morio* of the Campeche Bank, Gulf of Mexico. *Fisheries Research*, 66(2-3), 325-335.

- Capurro, L., Euán, J., y Herrera, J. (2002). Manejo sustentable del ecosistema costero de Yucatán. *Avance y Perspectiva*, 21, 195-204.
- Christie, C. C., Bass, D. D., Neale, S. S., Osborne, K. K., y Oxley, W. W. (1996). Surveys of sessile benthic communities using the video technique. Long term monitoring of the Great Barrier Reef. Standard operational procedure No. 2.
- Coleman, F. C., Koenig, C. C., Scanlon, K. M., Heppell, S., Heppell, S., y Miller, M. W. (2010). Benthic habitat modification through excavation by red grouper, *Epinephelus morio*, in the northeastern Gulf of Mexico. *The Open Fish Science Journal*, 3(1).
- Coleman, F. C., y Williams, S. L. (2002). Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. *Trends in Ecology y Evolution*, 17(1), 40-44.
- Cushman, S. A., y McGarigal, K. (2003). Landscape-level patterns of avian diversity in the Oregon Coast Range. *Ecological Monographs*, 73(2), 259-281.
- Day, J. W., de León, A. D., González, G., Moreno-Casasola, P., y Yáñez-Arancibia, A. (2004). Diagnóstico ambiental del golfo de México (resumen ejecutivo). *Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra, E. (Compiladores), Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. INE-SEMARNAT.*
- Ecochard, J. L., Heyman, W., Requena, N., Cuevas, E., y Biasi, F. B. (2003). Case Study: Mapping Half Moon Caye's Reef Using the Adaptive Bathymetric System (ABS).
- Elachi, C., y Van Zyl, J. J. (2006). *Introduction to the physics and techniques of remote sensing* (Vol. 28). John Wiley y Sons.
- English, S. S., Wilkinson, C. C., y Baker, V. V. (1997). *Survey manual for tropical marine resources*. Australian Institute of Marine Science.
- Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., Jeronimo, G., y Capurro-Filograsso, L. (2013). Thermohaline processes in a tropical coastal zone. *Continental Shelf Research*, 69, 101-109.

- Eugenio, F., Marcello, J., Marqués, F., y Martín, J. (2015). Estimación de las propiedades ópticas del agua, batimetría y albedo del fondo en ecosistemas litorales mediante imágenes multiespectrales de satélite de alta resolución. Extenso de congreso.
- Geosystems, L. (2010). ERDAS field guide. *Copyright Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC.*
- Fischer, W., Bianchi, G., y Scott, W. B. (1978). Species identification sheets for fishery purposes. *Western Central Atlantic. FAO, Rome, 1, 4.*
- García, E., 1970. Los climas del estado de Veracruz. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México* 41: 3-42.
- Garza-Pérez, J. R. (1999). *Análisis comparativo de cuatro comunidades coralinas arrecifales del Caribe Mexicano*. Tesis de maestría. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional. México.
- Garza-Pérez, J. R., Lehmann, A., y Arias-González, J. E. (2004). Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial modeling and remote sensing. *Marine Ecology Progress Series, 269, 141-152.*
- Garza-Pérez, J. R., Naranjo J. y Orvañanos D. P. (2017). Dinámica temporal de los paisajes sublitorales de Sisal, Yucatán. Pp. 102-120 In: J. R. Garza-Pérez e I. Ize-Lema (Eds), *Caracterización multidisciplinaria de la zona costera de Sisal, Yucatán*. Editorial Dante S.A. de C.V., México, 200 p.
- Giménez-Hurtado, E., Moreno V. J., García C., Burgos-Rosas R. y Chioldes S. (2003). Reproducción y Fecundidad de la cherna americana (*Epinephelus morio*) en el Banco de Campeche, México. *Océanides* 18 (1): 13-21.
- Giménez-Hurtado, E. (2005). Análisis de la pesca del mero *Epinephelus morio* (Serranidae: Pisces, Valenciennes 1928) en el Banco de Campeche. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S. C. La Paz, B. C. S. México. 93 p.
- Gonzalez, P. D., Zupanovic, S., y Ramis, H. E. (1974). Biología pesquera de la cherna americana del Banco de Campeche. *Res. de inv. INP, CIP-La Habana, Cuba, 1, 107-111.*

- González, P., Zupanovic, S., y Ramis, H. (1974). Evaluación de los niveles de explotación de la cherna americana en el Banco de Campeche. *Instituto Nacional de la Pesca, Centro de Investigaciones Pesqueras, Cuba, Resúmenes de Investigación, 1*, 172-175.
- Goodman, A.J., Purkis, S.J., and Phinn, S.R. (Eds). (2013). *Coral Reef Remote Sensing: A guide for mapping, monitoring and management*. Springer, Nueva York. 436p.
- Gould, S. J. (1966). Allometry and size in ontogeny and phylogeny. *Biological Reviews, 41*(4), 587-638.
- Grece, M., Rademacher, K., y Russell, M. (1994). Pictorial guide to the Groupers (Teleostei: Serranidae) of the western North Atlantic. NOAA. Technical Report NMFS 118. May 1994.
- Green, E., Mumby, P., Edwards, A., y Clark, C. (2000). *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Greene, H. G., Bizzarro, J. J., Tilden, J. E., Lopez, H. L., y Erdey, M. D. (2005). The benefits and pitfalls of geographic information systems in marine benthic habitat mapping. *Wright, DJ and Scholz, AJ Place Matters: Geospatial Tools for Marine Science, Conservation, and Management in the Pacific Northwest. Oregon State University Press, Corvallis, OR*.
- Grüss, A., Thorson, J. T., Sagarese, S. R., Babcock, E. A., Karnauskas, M., Walter III, J. F., y Drexler, M. (2017). Ontogenetic spatial distributions of red grouper (*Epinephelus morio*) and gag grouper (*Mycteroperca microlepis*) in the US Gulf of Mexico. *Fisheries Research, 193*, 129-142.
- Grüss, A., Schirripa, M. J., Chagaris, D., Velez, L., Shin, Y. J., Verley, P., y Ainsworth, C. H. (2016). Estimating natural mortality rates and simulating fishing scenarios for Gulf of Mexico red grouper (*Epinephelus morio*) using the ecosystem model OSMOSE-WFS. *Journal of Marine Systems, 154*, 264-279.
- Guitart, A. (1977). Sinopsis de los peces marinos de Cuba. Tomo III. Consejo Editorial de la Academia de Ciencias, La Habana. 608p.

- Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107-2112.
- Hedley, J.D., Roelfsema, C., Brando, V., Giardino, C., Kutser, T., Phinn, S., Mumby, P.J., Barrilero, O., Laporte, J., and Koetz, B. (2018). Coral reef applications of Sentinel 2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping whit comparison to Landsat 8. *Remote Sensing of Environment*. 216, 598-614.
- Hernandez, A., y Seijo, J. C. (2003). Spatial distribution analysis of red grouper (*Epinephelus morio*) fishery in Yucatan, Mexico. *Fisheries Research*, 63(1), 135-141.
- Hoese, H. D., y Moore, R. H. (1977). *Fishes of the Gulf of Mexico, Texas, Louisiana, and adjacent waters*. Texas AyM University Press. 331p.
- Hogrefe, K. R., Wright, D. J., & Hochberg, E. J. (2008). Derivation and integration of shallow-water bathymetry: Implications for coastal terrain modeling and subsequent analyses. *Marine Geodesy*, 31(4), 299-317.
- Hubp, J. L., Quesado, J. F. A., y Pereño, R. E. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la Península de Yucatán. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 10(2), 143-150.
- Jensen, J. R. (1996). *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. 2d ed. Englewood Cliffs, Nueva Jersey: Prentice-Hall.
- Lang, R., Shao, G., Pijanowski, B. C., y Farnsworth, R. L. (2008). Optimizing unsupervised classifications of remotely sensed imagery with a data-assisted labeling approach. *Computers y Geosciences*, 34(12), 1877-1885.
- Lee, Z., y Carder, K. L. (2004). Absorption spectrum of phytoplankton pigments derived from hyperspectral remote-sensing reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 89(3), 361-368.
- Lehmann, A., Overton, J. M., y Leathwick, J. R. (2002). GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological modelling*, 157(2-3), 189-207.
- Liceaga-Correa, M.A., Hernández-Núñez, H., 2013. Modelo Digital de Elevación, Batimetría, Pendiente y Orientación del Litoral Somero del Estado de Yucatán,

- México. Escala 1:50,000. In: Proyecto FOMIX 108960: Caracterización Integral del fondo Marino costero del estado de Yucatán: estratigrafía, Microrelieve y Comunidades Bentónicas, vol. I. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida, Del. P.N. Laboratorio de Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica, Yucatán, México.
- Loh, T. L., López-Legentil, S., Song, B., y Pawlik, J. R. (2011). Phenotypic variability in the Caribbean orange icing sponge *Mycale laevis* (Demospongiae: Poecilosclerida). In *Ancient Animals, New Challenges* (pp. 205-217). Springer, Dordrecht.
- López-Rocha, J. A., y Arreguín-Sánchez, F. (2008). Spatial distribution of red grouper *Epinephelus morio* (Serranidae) catchability on the Campeche Bank of Mexico. *Journal of Applied Ichthyology*, 24(3), 282-289.
- Lyzenga, D. R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International journal of remote sensing*, 2(1), 71-82.
- Merino, M., y Otero, L. (1991). Atlas Ambiental Costero, Puerto Morelos-Quintana Roo. *Centro de Investigaciones de Quintana Roo, Chetumal*. Moe, M. A., 1969. Biology of the red grouper, *Epinephelus morio* (Valenciennes), from the eastern Gulf of México, Fla. Bd. *Conserv. Mar. Lab., Prof. Pap. Ser.*, 10:1-95.
- Merino, M. (1997). Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine systems*, 13(1-4), 101-121.
- Molina-Hernández, A. L., Garza-Pérez, J. R., y Aranda-Fragoso, A. (2018). Identifying management challenges and implementation shortcomings of a new fishing refuge: Akumal reef, Mexico. *Ocean y Coastal Management*, 161, 127-140.
- Monroy, C. (1998). *Análisis bioeconómico de la pesquería de mero (Epinephelus morio) en el Banco de Campeche, bajo condiciones de riesgo e incertidumbre* (Doctoral dissertation, Tesis de Maestría, CINVESTAV, Unidad Mérida, Yucatán, México).
- Monroy, C., Giménez, E., Burgos, R., y Moreno, V. (2001). Informe de Investigaciones conjuntas México-Cuba sobre el mero (*Epinephelus morio*, Valenciennes, 1828) en el Banco de Campeche. *Ministerio de la Industria pesquera, Cuba* 43p.



- Monroy, C., Salas, S., y Bello-Pineda, J. (2010). Dynamics of fishing gear and spatial allocation of fishing effort in a multispecies fleet. *North American Journal of Fisheries Management*, 30(5), 1187-1202.
- Mumby, P. J., y Edwards, A. J. (2002). Mapping marine environments with IKONOS imagery: enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy. *Remote sensing of environment*, 82(2-3), 248-257.
- Mumby, P. J., Green, E. P., Edwards, A. J., y Clark, C. D. (1997). Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide?. *Marine Biology*, 130(2), 193-202.
- Mumby, P. J., Clark, C. D., Green, E. P., y Edwards, A. J. (1998). Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1), 203-210.
- Mumby, P. J., Skirving, W., Strong, A. E., Hardy, J. T., LeDrew, E. F., Hochberg, E. J., ... y David, L. T. (2004). Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Marine pollution bulletin*, 48(3-4), 219-228.
- Naranjo-García, M. J. (2012). Distribución de paisajes submarinos del litoral de Sisal, Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Zapopan, Jalisco. México. 113 p.
- Núñez-Lara, E., Arias-González, J. E., y Legendre, P. (2005). Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: testing models using a multi-scale survey design. *Journal of experimental marine Biology and Ecology*, 324(2), 157-169.
- Osborne, K., y Oxley, W. G. (1997). Sampling benthic communities using video transects. *Survey Manual for Tropical Marine Resources, 2nd Edition. Australian Institute of Marine Science, Cape Ferguson*, 363-376.
- Overton, J. M., Stephens, R. T., Leathwick, J. R., y Lehmann, A. (2002). Information pyramids for informed biodiversity conservation. *Biodiversity y Conservation*, 11(12), 2093-2116.
- Pacheco Martinez, J. L., y Alonzo Salomon, L. A. (2003). Characterization of karst material of Carrillo Puerto formation in Yucatan Autonomous University of Yucatan, Mérida, México. *Acad Mag Eng*, 7, 7-19.

- Palafox-Juárez, E. B., y de los Ángeles Liceaga-Correa, M. (2017). Spatial diversity of a coastal seascape: Characterization, analysis and application for conservation. *Ocean y coastal management*, 136, 185-195.
- Pittman, S. J., McAlpine, C. A., y Pittman, K. M. (2004). Linking fish and prawns to their environment: a hierarchical landscape approach. *Marine Ecology Progress Series*, 283, 233-254.
- Puente, A., y Juanes, J. A. (2008). Testing taxonomic resolution, data transformation and selection of species for monitoring macroalgae communities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78(2), 327-340.
- Raymundo, L., Courtney, S. y Harvell, C. (2008). “The Objectives and Scop of this Manual, en Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Program” en Coral disease handbook. Guidelines for assesment, monitoring y management (7-17). Currie Communications, Australia, 114 pp.
- Renán, X., Trejo-Martínez, J., Caballero-Arango, D., y Brulé, T. (2015). Growth stanzas in an Epinephelidae-Lutjanidae complex: considerations to length-weight relationships. *Revista de biología tropical*, 63(1), 175-187.
- Rivas, L.R. (1970). The red grouper of the Gulf of Mexico. *Commer. Fish.* 32 (18): 24-30.
- Roe, R. B. (1976). Distribution of snappers and groupers in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea as determined from exploratory fishing data. *Florida Sea Grant Report*, 17, 129-164.
- Rosado-Espinosa, L. A., Ortégón-Aznar, y Ruíz-Zárate, M. Á. (2012). Caracterización Estructural de los Mantos Algales como Recurso Natural Explotable en el Area Natural Protegida de Dzilam de Bravo, Yucatán, *Proceedings of the 64th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 64, 208-215.
- Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., y Scambos, T. A. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote sensing of Environment*, 145, 154-172.
- SAGARPA. (2014). Plan de Manejo Pesquero de Mero (*Epinephelus morio*) y especies asociadas en la Península de Yucatán. Diario Oficial de la Federación

- Salas, S., Mexicano-Cíntora, G., y Cabrera, M. A. (2006). ¿ Hacia dónde van las pesquerías en Yucatán. *Tendencias, Retos y Perspectivas. CINVESTAV Unidad Mérida. Mérida, Yucatán, México.*
- Sagarese, S.R., M.D. Bryan, J.F. Walter, M. Schirripa, A. Grüss, M. Karnauskas. 2015. Incorporating ecosystem considerations within the Stock Synthesis integrated assessment model for Gulf of Mexico Red Grouper (*Epinephelus morio*). SEDAR42-RW-01. SEDAR, North Charleston, SC. 27 pp.
- Seijo J. C. (1986). Comprehensive simulation model of a tropical demersal fishery red grouper (*Epinephelus morio*) of the Yucatan continental Shelf. Ph. D. Thesis. Michigan State University. 210 p.
- Serratos-Toscano, A.A. (2019). Integración de productos satelitales de resolución media para la cartografía de paisajes submarinos del litoral de Yucatán. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. Centro Universitario de la Costa Sur. Autlán de Navarro, Jalisco. México. 80 p.
- Shapiro, D. (1987). Reproduction in groupers. En: J.J. Polovina y S. Raltson (eds). Tropical snappers and groupers: biology and fisheries management. Westview Press, Boulder, Colorado, pp: 295-327.
- Simonett, D. S. (1983). The Development and Principles of Remote Sensing. Chapter 1 in *Manual of Remote Sensing*. Ed. R. N. Colwell. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.
- Solleiro-Rebolledo, E., Cabadas-Báez, H. V., Pi, P. T., González, A., Fedick, S. L., Chmilar, J. A., y Leonard, D. (2011). Genesis of hydromorphic Calcisols in wetlands of the northeast Yucatan Peninsula, Mexico. *Geomorphology*, 135(3-4), 322-331.
- Star, J. y Estes, J. (1990). *Geographic Information Systems: An Introduction*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Stewart, V. N. (1989). Grouper. Sea-Stats No. 8. *Fla. Dept. Nat. Res., St. Petersburg, Florida.*
- USGS. (2017). “Landsat Missions” revisado en el portal <https://landsat.usgs.gov/landsat-project-description> el 21/11/2017 a la 01:25p.m.

- Valdés, E. y Padrón, G. (1980). Pesquerías de palangre. *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras* 5:38-52.
- Vidal-Hernández, L., Garza-Pérez J.R., Chiappa-Carrara, X., Arceo-Carranza, D. (2017). Asociación de especies ícticas a fondos marinos en sitios de pesca recreativa-deportiva frente a Sisal, Yucatán In: J.R. Garza-Pérez e I. Ize Lema (Eds), *Caracterización multidisciplinaria de la zona costera de Sisal, Yucatán*. Editorial Dante S.A. de C.V., México, 200 p.
- Wall, C. C., Simard, P., Lindemuth, M., Lembke, C., Naar, D. F., Hu, C., ... y Mann, D. A. (2014). Temporal and spatial mapping of red grouper *Epinephelus morio* sound production. *Journal of fish biology*, 85(5), 1470-1488.
- Weng, Q. 2009. Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications. *McGraw-Hill*, p.8-15.
- Wulder, M.A., Wjite, J.C., Goward, S.N., Masek, J.G., Irons, J.R., Herold, M., Cohen, W.B., Loveland, T.R., Woodcock, C.E. (2008). Landsat continuity: Issues and opportunities for land cover monitoring. *Remote Sensing of Environment*, v.112, n.3, p.955-969.
- Zavala-Hidalgo, J., Gallegos-García, A., Martínez-López, B., Morey, S. L., y O'Brien, J. J. (2006). Seasonal upwelling on the western and southern shelves of the Gulf of Mexico. *Ocean dynamics*, 56(3-4), 333-33

Anexo 1. Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral Celestún-Sisal.

<b>ID</b>	<b>Estación</b>	<b>Localidad</b>	<b>Fecha</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
1	D1T1C	Celestún	21/03/2017	21.17319	-90.85316
2	D1T2C	Celestún	21/03/2017	21.16328	-90.79686
3	D1T3C	Celestún	21/03/2017	21.09524	-90.75423
4	D1T4C	Celestún	21/03/2017	21.08534	-90.72976
5	D1T5C	Celestún	21/03/2017	21.08489	-90.7027
6	D1T6C	Celestún	21/03/2017	21.05901	-90.68938
7	D2T1C	Celestún	22/03/2017	21.02174	-90.82079
8	D2T2C	Celestún	22/03/2017	21.01377	-90.79476
9	D2T3C	Celestún	22/03/2017	21.015	-90.77302
10	D2T4C	Celestún	22/03/2017	21.00724	-90.72721
11	D2T5C	Celestún	22/03/2017	20.99489	-90.70022
12	D2T6C	Celestún	22/03/2017	20.99904	-90.67243
13	D2T7C	Celestún	22/03/2017	20.99342	-90.6481
14	D2T8C	Celestún	22/03/2017	20.98545	-90.6304
15	D3T1C	Celestún	23/03/2017	20.87489	-90.86349
16	D3T2C	Celestún	23/03/2017	20.89154	-90.82974
17	D3T3C	Celestún	23/03/2017	20.87192	-90.8063
18	D3T4C	Celestún	23/03/2017	20.88096	-90.76115
19	D3T5C	Celestún	23/03/2017	20.85059	-90.73937
20	D3T6C	Celestún	23/03/2017	20.86761	-90.68503
21	D4T1C	Celestún	25/04/2017	20.91958	-90.98962
22	D4T2C	Celestún	25/04/2017	20.92824	-90.95851
23	D4T3C	Celestún	25/04/2017	20.89883	-90.94262
24	D4T4C	Celestún	25/04/2017	20.91117	-90.90386
25	D4T5C	Celestún	25/04/2017	20.91167	-90.87384
26	D4T6C	Celestún	25/04/2017	20.82896	-90.69761
27	D5T1C	Celestún	26/04/2017	20.96371	-90.83178
28	D5T2C	Celestún	26/04/2017	21.03279	-90.93496
29	D5T3C	Celestún	26/04/2017	21.01028	-90.90628
30	D5T4C	Celestún	26/04/2017	20.97091	-90.8683
31	D5T5C	Celestún	26/04/2017	20.88892	-90.72478
32	D5T6C	Celestún	26/04/2017	20.89434	-90.67426
33	D6T1C	Celestún	27/04/2017	21.25093	-90.73252
34	D6T2C	Celestún	27/04/2017	21.23217	-90.70384
35	D6T3C	Celestún	27/04/2017	21.19513	-90.68139
36	D6T4C	Celestún	27/04/2017	21.17858	-90.65946
37	D6T5C	Celestún	27/04/2017	21.14061	-90.63014
38	D6T6C	Celestún	27/04/2017	21.12807	-90.6171
39	D6T7C	Celestún	27/04/2017	21.12728	-90.57951
40	D6T8C	Celestún	27/04/2017	21.10922	-90.5574
41	D1T1S	Sisal	28/03/2017	21.49082	-90.26672
42	D1T2S	Sisal	28/03/2017	21.44693	-90.30159

Anexo 1 (continuación). Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral.

<b>ID</b>	<b>Estación</b>	<b>Localidad</b>	<b>Fecha</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
43	D1T3S	Sisal	28/03/2017	21.44073	-90.28172
44	D1T4S	Sisal	28/03/2017	21.43588	-90.29254
45	D1T5S	Sisal	28/03/2017	21.41047	-90.26693
46	D1T6S	Sisal	28/03/2017	21.36797	-90.23911
47	D2T1S	Sisal	30/03/2017	21.43658	-90.44858
48	D2T2S	Sisal	30/03/2017	21.42907	-90.41239
49	D2T3S	Sisal	30/03/2017	21.42213	-90.3989
50	D2T4S	Sisal	30/03/2017	21.40572	-90.37322
51	D2T5S	Sisal	30/03/2017	21.37982	-90.33565
52	D2T6S	Sisal	30/03/2017	21.37145	-90.32113
53	D3T1S	Sisal	31/03/2017	21.38245	-90.40704
54	D3T2S	Sisal	31/03/2017	21.32557	-90.36242
55	D3T3S	Sisal	31/03/2017	21.2296	-90.35095
56	D3T4S	Sisal	31/03/2017	21.32604	-90.36241
57	D3T5S	Sisal	31/03/2017	21.28865	-90.34579
58	D3T6S	Sisal	31/03/2017	21.27643	-90.32872
59	D3T7S	Sisal	31/03/2017	21.22905	-90.35104
60	D3T8S	Sisal	31/03/2017	21.2161	-90.33031
61	D4T1S	Sisal	19/04/2017	21.42326	-90.39857
62	D4T3S	Sisal	19/04/2017	21.33852	-90.2116
63	D4T4S	Sisal	19/04/2017	21.32117	-90.17048
64	D5T1S	Sisal	20/04/2017	21.42327	-90.39857
65	D5T2S	Sisal	20/04/2017	21.37809	-90.32784
66	D5T4S	Sisal	20/04/2017	21.36465	-90.40984
67	615	Sisal	18/03/2018	21.2702	-90.10573
68	616	Sisal	18/03/2018	21.26545	-90.10296
69	617	Sisal	18/03/2018	21.26154	-90.10042
70	618	Sisal	18/03/2018	21.25753	-90.09823
71	619	Sisal	18/03/2018	21.25361	-90.09592
72	620	Sisal	18/03/2018	21.24967	-90.09373
73	621	Sisal	18/03/2018	21.24562	-90.09148
74	622	Sisal	18/03/2018	21.24165	-90.08937
75	623	Sisal	18/03/2018	21.2376	-90.08715
76	624	Sisal	18/03/2018	21.23368	-90.08484
77	625	Sisal	18/03/2018	21.22983	-90.08252
78	626	Sisal	18/03/2018	21.22611	-90.07976
79	600	Sisal	18/03/2018	21.22611	-90.07976
80	627	Sisal	18/03/2018	21.22219	-90.07742
81	628	Sisal	18/03/2018	21.21827	-90.07504
82	629	Sisal	18/03/2018	21.21405	-90.0732
83	630	Sisal	18/03/2018	21.21005	-90.07077
84	631	Sisal	18/03/2018	21.2061	-90.06867

Anexo 1 (continuación). Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral.

<b>ID</b>	<b>Estación</b>	<b>Localidad</b>	<b>Fecha</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
85	632	Sisal	18/03/2018	21.20213	-90.06656
86	633	Sisal	18/03/2018	21.19796	-90.06446
87	634	Sisal	18/03/2018	21.19404	-90.06212
88	635	Sisal	18/03/2018	21.19025	-90.05963
89	636	Sisal	18/03/2018	21.18625	-90.05719
90	637	Sisal	18/03/2018	21.18251	-90.05493
91	638	Sisal	18/03/2018	21.17854	-90.05247
92	639	Sisal	18/03/2018	21.17478	-90.0501
93	640	Sisal	18/03/2018	21.16678	-90.04517
94	641	Sisal	19/03/2018	21.3871	-90.19242
95	642	Sisal	19/03/2018	21.37523	-90.18405
96	643	Sisal	19/03/2018	21.36385	-90.17672
97	644	Sisal	19/03/2018	21.35207	-90.16926
98	645	Sisal	19/03/2018	21.34069	-90.16177
99	646	Sisal	19/03/2018	21.3294	-90.1538
100	648	Sisal	19/03/2018	21.31785	-90.14623
101	649	Sisal	19/03/2018	21.30691	-90.13789
102	650	Sisal	19/03/2018	21.2954	-90.13017
103	651	Sisal	19/03/2018	21.28407	-90.1223
104	652	Sisal	19/03/2018	21.27268	-90.11424
105	653	Sisal	20/03/2018	21.20928	-90.12734
106	654	Sisal	20/03/2018	21.20342	-90.1241
107	655	Sisal	20/03/2018	21.19732	-90.12043
108	656	Sisal	20/03/2018	21.19141	-90.11681
109	657	Sisal	20/03/2018	21.18584	-90.11298
110	658	Sisal	20/03/2018	21.18003	-90.10913
111	659	Sisal	20/03/2018	21.17436	-90.10551
112	660	Sisal	20/03/2018	21.16835	-90.10207
113	661	Sisal	20/03/2018	21.16253	-90.09805
114	662	Sisal	20/03/2018	21.1574	-90.0941
115	663	Sisal	20/03/2018	21.15647	-90.09599
116	664	Sisal	20/03/2018	21.235	-90.02365
117	665	Sisal	20/03/2018	21.22875	-90.02117
118	666	Sisal	20/03/2018	21.22266	-90.01788
119	667	Sisal	20/03/2018	21.21584	-90.01479
120	669	Sisal	20/03/2018	21.20929	-90.01255
121	670	Sisal	20/03/2018	21.20329	-90.00967
122	671	Sisal	20/03/2018	21.19736	-90.0069
123	672	Sisal	20/03/2018	21.19102	-90.00394
124	673	Sisal	20/03/2018	21.18512	-90.00148
125	674	Sisal	20/03/2018	21.17753	-89.99913

Anexo 2. Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral Río Lagartos-Las Coloradas.

<b>ID</b>	<b>Estación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Localidad</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
1	D1T1	4/05/2017	Río Lagartos	21.9985163	-88.4231967
2	D1T2	4/05/2017	Río Lagartos	21.9696461	-88.4102461
3	D1T3	4/05/2017	Río Lagartos	21.9314014	-88.3980967
4	D1T4	4/05/2017	Río Lagartos	21.9175979	-88.3726041
5	D1T5	4/05/2017	Río Lagartos	21.8854493	-88.3533834
6	D1T6	4/05/2017	Río Lagartos	21.8008244	-88.3327074
7	D1T7	4/05/2017	Río Lagartos	21.757967	-88.3419106
8	D2T1	6/05/2017	Río Lagartos	21.9801803	-88.2647276
9	D2T2	6/05/2017	Río Lagartos	21.9501865	-88.2470807
10	D2T3	6/05/2017	Río Lagartos	21.9208222	-88.2391682
11	D2T4	6/05/2017	Río Lagartos	21.9007269	-88.2261693
12	D2T5	6/05/2017	Río Lagartos	21.8364558	-88.2233509
13	D2T6	6/05/2017	Río Lagartos	21.7971524	-88.1906738
14	D2T7	6/05/2017	Río Lagartos	21.757321	-88.1909838
15	D3T1	7/05/2017	Río Lagartos	22.0072422	-88.0735247
16	D3T2	7/05/2017	Río Lagartos	21.9373616	-88.1025909
17	D3T3	7/05/2017	Río Lagartos	21.8711004	-88.0960023
18	D3T4	7/05/2017	Río Lagartos	21.8570929	-88.0899337
19	D3T5	7/05/2017	Río Lagartos	21.7879679	-88.09618
20	D3T6	7/05/2017	Río Lagartos	21.7581369	-88.1055312
21	D4T1	8/05/2017	Río Lagartos	21.9725121	-88.0006801
22	D4T2	8/05/2017	Río Lagartos	21.9550984	-88.0089777
23	D4T3	8/05/2017	Río Lagartos	21.9048163	-88.0123673
24	D4T4	8/05/2017	Río Lagartos	21.8610092	-87.9981702
25	D4T5	8/05/2017	Río Lagartos	21.8422307	-88.0000512
26	D4T6	8/05/2017	Río Lagartos	21.8170081	-88.006124
27	D4T7	8/05/2017	Río Lagartos	21.7939697	-88.0141485
28	D4T8	8/05/2017	Río Lagartos	21.7694832	-88.0008909
29	D4T9	8/05/2017	Río Lagartos	21.754147	-88.0059037
30	D5T1	16/05/2017	Las Coloradas	21.9644908	-87.6256045
31	D5T2	16/05/2017	Las Coloradas	21.9136174	-87.6252932
32	D5T3	16/05/2017	Las Coloradas	21.8816642	-87.6159928
33	D5T4	16/05/2017	Las Coloradas	21.8198681	-87.5779965
34	D5T5	16/05/2017	Las Coloradas	21.7967866	-87.6391545
35	D5T6	16/05/2017	Las Coloradas	21.7729464	-87.6929297
36	D5T7	16/05/2017	Las Coloradas	21.7467534	-87.7379048
37	D5T8	16/05/2017	Las Coloradas	21.7159118	-87.7901114
38	D6T1	17/05/2017	Las Coloradas	21.9700156	-87.7656324
39	D6T2	17/05/2017	Las Coloradas	21.9592029	-87.7817844
40	D6T3	17/05/2017	Las Coloradas	21.9078231	-87.8009677



Anexo 2 (continuación). Tabla representativa de las estaciones derivadas del diseño muestral.

<b>ID</b>	<b>Estación</b>	<b>Fecha</b>	<b>Localidad</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>
41	D6T4	17/05/2017	Las Coloradas	21.8883888	-87.7953387
42	D6T5	17/05/2017	Las Coloradas	21.845096	-87.7977818
43	D6T6	17/05/2017	Las Coloradas	21.8282977	-87.8166156
44	D6T7	17/05/2017	Las Coloradas	21.7635689	-87.8628939
45	D6T8	17/05/2017	Las Coloradas	21.7414066	-87.8791612
46	D7T1	19/05/2017	Las Coloradas	21.9437034	-87.9873216
47	D7T2	19/05/2017	Las Coloradas	21.9247701	-87.9715534
48	D7T3	19/05/2017	Las Coloradas	21.9093654	-87.9618452
49	D7T4	19/05/2017	Las Coloradas	21.8371402	-87.9513146
50	D7T5	19/05/2017	Las Coloradas	21.8083589	-87.9567011
51	D7T6	19/05/2017	Las Coloradas	21.7820081	-87.9350046
52	D7T7	19/05/2017	Las Coloradas	21.7277411	-87.8901179
53	D7T8	19/05/2017	Las Coloradas	21.7269304	-87.8738262
54	D7T9	19/05/2017	Las Coloradas	21.7116228	-87.855022
55	D7T10	19/05/2017	Las Coloradas	21.7073201	-87.8719789
56	D8T1	20/05/2017	Las Coloradas	21.8416026	-88.1059104
57	D8T2	20/05/2017	Las Coloradas	21.8406015	-88.1017657
58	D8T3	20/05/2017	Las Coloradas	21.8354832	-88.103708
59	D8T4	20/05/2017	Las Coloradas	21.8422722	-88.0329653
60	D8T5	20/05/2017	Las Coloradas	21.8431964	-88.0281386
61	D8T6	20/05/2017	Las Coloradas	21.7739896	-88.0117303
62	D8T7	20/05/2017	Las Coloradas	21.7639926	-88.0166747
63	D8T8	20/05/2017	Las Coloradas	21.7618307	-88.0211437
64	D8T9	20/05/2017	Las Coloradas	21.7565044	-87.9872474