



**UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA**

**POSGRADO DE ENERGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**

**PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL
DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA
EN LA RESERVA DE LA BIOSFERA DE LOS PETENES, CAMPECHE,
MÉXICO**

TESIS

para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS (ENERGÍA Y
MEDIO AMBIENTE)**

PRESENTA:

Biól. Iliana Pérez Espinosa

Directora:

Dra. Margarita E. Gallegos Martínez

CoDirector: **Dr. Rainer Andreas Ressler**

Coasesores:

Dr. Luis Valderrama Landeros

Biól. Gilberto Hernández Cárdenas

Ciudad de México., 25 de julio de 2018

AGRADECIMIENTOS

La Maestría en Ciencias (Energía y Medio Ambiente) de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT y cuenta con apoyo del mismo Consejo con el convenio 003893; por lo que agradece la beca recibida para el desarrollo de esta tesis.

Esta tesis forma parte de proyectos financiados por varias instituciones y laboratorios de investigación. Por lo que también agradezco al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), Laboratorio de Manejo de Recursos Naturales (LABRENA) y al de Pastos Marinos, ambos de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa (UAM-I).

El primer impulso para que iniciará este estudio de línea base comenzó en 2011 con el apoyo recibido por parte del INECC en el marco del proyecto: “Indicadores del estado de las comunidades de Pastos Marinos en la zona costera del Golfo de México susceptible de ser impactada por los hidrocarburos derramados por la Plataforma Horizon operada por BP”. Posteriormente el proyecto titulado: “Implementación de redes de observaciones oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la explotación y producción de hidrocarburos en aguas profundas del Golfo de México” encabezado por el CIGOM, CONACyT e INECC, entre otras instituciones, principalmente universidades e institutos de varios estados de la república. Al préstamo de instalaciones y la asesoría de investigadores por parte de la CONABIO y la UAM-I. Sin el apoyo de las personas que hay detrás de esta tesis no hubiera sido posible tantas experiencias ganadas y lo más importante para mí, el reconocimiento de los pastos marinos de la Reserva de la Biosfera de Los Petenes, Campeche, México.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Principalmente al equipo de trabajo de pastólogos quienes me han apoyado durante más de 7 años, comenzando por mi profesor el Biól. Gilberto Hernández Cárdenas, por ser el primero que confió en mí y en mis capacidades de desarrollo. A la Dra. Margarita Gallegos Martínez, quien lidera los proyectos en los que me fue posible desarrollarme como investigadora recién egresada de la carrera en Biología por parte de mi casa de estudios, la UAM-I. A ambos por fungir como mis padres académicos. Al equipo de trabajo de investigadores, técnicos y amigos del Laboratorio de Manejo de Recursos Naturales y Pastos Marinos de la UAM-I y a los compañeros de la CONABIO, por compartir el espacio conmigo y por todos esos momentos de apoyo y crecimiento. A las personas de Campeche que facilitaron los muestreos de campo y por brindar su trabajo con muy buena disposición y el entusiasmo que muestran cada vez que nos reencontramos.

Al apoyo de mi familia, quienes pacientemente han creído en mis proyectos de vida y han hecho este camino más fácil, gracias por no dejar de creer en mí. A mi madre que me ha dado el ejemplo de responsabilidad y trabajo duro para conseguir un mejor camino en la vida. A mi padre que murió hace muchos años y que me motivo a ser de los pocos con carrera profesional en la familia. A mis hermanas que gracias a sus sacrificios laborales me permitieron tener la carrera que ellas no pudieron por la muerte de mi padre. Y a mi sobrina pequeña para motivarla a llegar alto en esta vida. Por supuesto a mi esposo que, con su positivismo y gran disposición de colaboración de pareja, ha dejado lo más importante en mí, la seguridad para creer que puedo con lo que sea que sueñe. Esta tesis es uno de esos sueños cumplidos. A mis suegros porque se han convertido en padres sustitutos. A las personas que conocí en el camino y que se han ido adicionando a ese grupo de personas con las que quiero trabajar y estar. Por último, a mí misma por superar mis propios retos y tantos momentos de reflexión. Muchas gracias a todos.

COMITÉ TUTORAL

Co-director:

Dra. Margarita E. Gallegos Martínez 1. División de Ciencias Básicas y de la Salud
Departamento de Hidrobiología Laboratorio de Pastos Marinos Universidad Autónoma
Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I)

Co-director:

Dr. Rainer Andreas Ressler 2. Coordinación General de Información y Análisis. Director
General de Geomática Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad
(CONABIO).

Co-asesor:

Dr. Luis H. Valderrama Landeros. Subcoordinación de Percepción Remota de la
Dirección General de Geomática, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la
Biodiversidad (CONABIO).

Co-asesor:

Biól. Gilberto Hernández Cárdenas 2. División de Ciencias Básicas y de la Salud
Departamento de Biología Laboratorio de Manejo de Recursos Naturales Universidad Autónoma
Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I)

El jurado designado por

Comisión Académica del Posgrado en Energía y Medio Ambiente de la
Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó **ILIANA PÉREZ ESPINOSA**

El día **número de día** de mes del año **2018**

Miembros del Jurado

Dr. Luis H. Valderrama Landeros
Presidente

M. en G. María Isabel Cruz López
Secretario

M. en B. Alma Delia Toledo-Guzmán
Vocal

ÍNDICE

RESUMEN	1
SUMMARY	2
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 GENERALIDADES DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA.....	3
1.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS PASTOS MARINOS.....	4
1.2 RELACIONES AMBIENTALES CON LA DISTRIBUCIÓN DE LA VAS	5
1.3. DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN ACUATICA SUMERGIDA.....	6
1.4 ANTECEDENTES	9
1.5 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.6 OBJETIVOS.....	12
CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO.....	13
CAPITULO 3. MÉTODOS	17
3.1 REGISTROS DE VARIABLES AMBIENTALES	17
3.1.1 TRABAJO DE CAMPO.....	17
3.2 REGISTRO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS CON PR HIDROACÚSTICA	21
3.2.1. TRABAJO DE CAMPO.....	21
3.3. TRABAJO DE GABINETE	28
3.3.1 INTERPOLACIÓN DE VARIABLES COLECTADAS CON LA ECOSONDA HIDROACÚSTICA.....	28
3.3.2 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS	29
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1 RELACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES CON LAS COBERTURAS DE LAS ESPECIES DE VAS.	33
4.1.1 VARIABLE PROFUNDIDAD	36
4.1.2 FÓSFORO TOTAL EN AGUA INTERSTICIAL	37
4.1.3 PH Y SALINIDAD	38
4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CLASES DE VAS DETECTADAS POR PERCEPCIÓN REMOTA HIDROACÚSTRICA.....	39
4.2.1 PROFUNDIDAD Y ALTURA DE LA PLANTA.....	39
4.2.2 COBERTURA DE LA VAS	41
4.2.3 TIPO DE GRANO SEDIMENTARIO.....	43

4.3 INTERPOLACIÓN DE PROFUNDIDAD Y ALTURA DE LA PLANTA CON LA ECOSONDA HIDROACÚSTICA	44
4.4 PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS EN LA RBLP	48
4.5 DISTRIBUCIÓN DE CLASES POR SUPERFICIES	53
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	60
RECOMENDACIÓN	61
REFERENCIAS	62
ANEXO	77

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución global de pastos marinos (Short et al., 2007)	7
Figura 2. Distribución de la vegetación acuática sumergida en el Golfo de México.	8
Figura 3. Ubicación y delimitación de la zona marina estudiada en la RBLP, Campeche, México.	13
Figura 4. Especies de pasto marino del Golfo de México.	14
Figura 5. Climograma para la zona de estudio (fuente de datos: Sistema Meteorológico Nacional).....	16
Figura 6. Localización de las 38 estaciones de monitoreo en la RBLP con mediciones de las variables ambientales durante los años 2013 y 2016.	20
Figura 7. Ecosonda instalada en la embarcación y registrando la VAS en la RBLP.....	22
Figura 8. Registros de la VAS colectados con la ecosonda mediante transectos perpendiculares y paralelos a la costa elaborados entre 2011 y 2017	23
Figura 9. Ecograma con información de la VAS.....	24
Figura 10. Verificaciones in situ de la composición y cobertura de la VAS en la RBLP mediante buceos	27
Figura 11. Vectores correspondientes al factor 1, 2 y 3 resultantes del análisis de componentes principales de las variables ambientales.....	36
Figura 12. Distribución de las variables profundidad y altura de la planta por clases de VAS.....	40
Figura 13 Porcentaje de cobertura encontrada en cada clase de VAS.....	42
Figura 14. Distribución de las categorías de TDS por clase de VAS..	44
Figura 15. Batimetría del fondo marino en la RBLP obtenida de los transectos paralelos y perpendiculares por medio de interpolación de datos	46
Figura 16. Altura de la VAS en la RBLP obtenida de los transectos paralelos y perpendiculares por medio de interpolación de datos.	47
Figura 17. Porcentaje de reflectancia de los promedios de las firmas espectrales de las Clases de VAS detectadas con S-2A en las diferentes bandas del espectro electromagnético.....	50
Figura 18. Mapa de los patrones de distribución espacial de la vegetación acuática sumergida..	54
Figura 19. Superficies calculadas (Km ²) de las clases de VAS.....	55
Figura 20. Modelo en 3D del perfil marino en el sitio de estudio construido con la información de percepción remota.....	59

INDICE DE TABLAS DEL TEXTO

Tabla 1. Variables ambientales registradas en 2 periodos anuales (2013, 2016) en 38 estaciones de monitoreo.....	19
Tabla 2 Información referente a la imagen utilizada para la clasificación de la VAS en la RBLP..	30
Tabla 3. Estadística descriptiva de las variables ambientales registradas en la RBLP en las 38 estaciones de monitoreo. Profundidad (Z), Fósforo total en agua intersticial (PT_s), potencial de iones Hidrogeno (pH), y la salinidad (sal).....	34
Tabla 4. Matriz del análisis de componentes principales. Factores o grupos generados a partir de las variables ambientales..	34
Tabla 5. Coeficientes de correlación de variables ambientales analizadas en el ACP	35
Tabla 6. Índice de similitud entre las respuestas espectrales de las diferentes clases detectadas con S-2A.	52
Tabla 7. Matriz de confusión para evaluar la exactitud de la clasificación derivada de datos de S-2A	57

INDICE DE TABLAS DE ANEXO

Tabla 1A. Información sobre los transectos perpendiculares y paralelos trazados con la ecosonda hidroacústica del 2011 al 2017.	77
Tabla 2A. Información de los video-transectos trazados durante los periodos de colecta del 2013 al 2014.....	82
Tabla 3A. Información sobre las verificaciones in situ realizadas a lo largo de los transectos elaborados en la RBLP.....	85
Tabla 4A. Información de las variables ambientales en dos ciclos anuales (2013 y 2016) colectadas en las 38 estaciones de monitores.....	88
Tabla 5A. Superficies que ocupan la VAS en la RBLP obtenidas de la clasificación con la imagen Sentinel 2A.....	92
Tabla 6A. Información asociada a las variables profundidad y altura de la planta de cada clase de VAS en la RBLP.....	93
Tabla 7A Información asociada a las variables cobertura y tipo de grano sedimentario de cada clase de VAS en la RBLP.....	93

RESUMEN

En los últimos treinta años la vegetación acuática sumergida (VAS) ha sido reconocida por los servicios ambientales que proporcionan a los ecosistemas costeros y a las poblaciones humanas. Uno de los más relevantes es el almacenamiento de carbono en su sistema de rizomas y raíces y la capacidad de retenerlo en el suelo donde crece. Ese carbono almacenado es denominado “Carbono Azul” y se ha estimado que su capacidad de almacenamiento rebasa en cuatro órdenes de magnitud al de las plantas terrestres. El cambio climático y las permanentes perturbaciones en las zonas costeras, propician que el carbono azul sea expuesto, la materia orgánica se oxide y que por lo tanto se incrementen los gases de efecto invernadero con su destrucción. Para calcular el carbono azul almacenado es importante contar con estudios de línea base de la VAS. A la fecha, la distribución y extensión de la VAS de la Reserva de la Biosfera de Los Petenes (RBLP área de estudio), era desconocida en su mayor parte. Con esta tesis proporcionaremos información que permita promover el manejo, protección y conservación de la VAS en México.

La cartografía presentada aquí, se realizó con técnicas de percepción remota para una mejor delimitación de la extensión de la VAS. Con el apoyo de una ecosonda hidroacústica e imágenes satelitales de Sentinel-2A derivamos el mapa de la distribución de la VAS aplicando el algoritmo de máxima probabilidad en la clasificación supervisada, el rango del espectro visible fue suficiente para diferenciar las Clases. Se utilizaron datos de video-transectos y verificaciones *in situ* para generar las 5 Clases de VAS en la RBLP, dominada principalmente por *Thalassia testudinum* (*Tt*). Los resultados muestran patrones de distribución continua de VAS extendiéndose de sur a norte, paralelo a las salidas de agua dulce. El área ocupada es de 1,514 km², correspondiente al 83% de la zona marina de la RBLP. El coeficiente Kappa para la evaluación de la fiabilidad de la cartografía fue de 71%. Las clases monoespecíficas de *Thalassia testudinum* (*Tt*) y *Syringodium filiforme* (*Sf*) fueron diferenciables comparado con las de vegetación mixta. La mayor confusión y menor variabilidad de reflectancia fueron las clases 4 correspondiente a vegetación mixta de Pasto Marino y Algas (MxPA) y clase 5 correspondiente a vegetación mixta de *Tt* y/o *Sf* y/o *Hw* (MxPP). El análisis de componentes principales de las variables ambientales demostró que la profundidad es una variable determinante en la presencia de *Tt*, *Sf* y macro algas mientras que el fósforo en agua intersticial, la salinidad y pH están relacionadas con la presencia de *Halodule wright* (*Hw*). Nuestros resultados muestran que la combinación de técnicas de percepción remota con datos de parámetros físicos-químicos proporcionan gran potencial de mapeo de la distribución de VAS en aguas costeras de México.

SUMMARY

During the last twenty years, Submerged Aquatic Vegetation (SAV) has been globally recognized for the provision of diverse environmental services. Of special relevance are carbon storage and sequestration capabilities through roots and soils, estimated to be up to two to four times higher than terrestrial forests. This carbon is denominated as “blue carbon”. Currently most countries can't report accurately on blue carbon due to lack of detailed information. Until now, the distribution of SAV in the biosphere reserve “Los Petenes”, Campeche was largely unknown. In that context, baseline information on national seagrass distribution and extension is essential to provide solid information for conservation strategies in Mexico.

Our project applies remote sensing techniques to delineate major SAV extensions for the generation of baseline cartography. We used hydroacoustic echosounder and satellite images of Sentinel-2A to derive a distribution map of SAV applying a supervised maximum likelihood classification. Additionally, we used video-transects and *in situ* verification data to generate five classes of SAV in the biosphere reserve of los Petenes in Campeche, dominated principally by *Thalassia testudinum* (*Tt*). The results show continuous distribution patterns of SAV extending south-north, parallel to the shore. The occupied area is 1,514 km² corresponding to 83% of the marine zone. The Kappa coefficient during accuracy assessment resulted in 71%. The best differentiation between classes was observed for *Thalassia testudinum* (*Tt*) and *Syringodium filiforme* (*Sf*), while major confusion between classes of MxPA (4) and MxPP (5) was noted. A principal component analysis of the collected environmental data demonstrated that water depth was the determining variable for the presence of *Tt* and *Sf*, while *Halodule wrightii* presence was mainly related to salinity and pH. Our results show that combined remote sensing techniques together with biochemical/physical data offer great potential for mapping seagrass distribution in shallow waters in México.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA

La Vegetación Acuática Sumergida (VAS) es un grupo de plantas cuyas funciones biológicas se llevan a cabo sumergidas en el agua somera. Incluye especies de ambientes dulceacuícolas, salobres y marinas (Thayer et al., 1984). Las especies marinas crecen a lo largo de la zona costera (Batiuk et al., 2000); incluye, macro algas y pastos marinos (PM), (Den Hartog, 1970; Rozas y Odum, 1988). Los PM son las únicas plantas vasculares que desarrollan raíces, flores, frutos y semillas a diferencia de las macro algas. Las macro algas a pesar de ser un grupo bien diferenciado, suelen confundirse morfológicamente con PM porque comparten o disputan el espacio con estos. En esta investigación daremos especial énfasis a los PM, sin embargo, como ambos grupos coexisten en la zona de estudio, se consideró a las macro algas como parte importante de la composición florística de la VAS en la Reserva de la Biosfera de Los Petenes (Fuentes et al., 2014). Recientemente se ha reconocido que los PM son más productivos que otros ecosistemas marinos y terrestres tanto ecológica como económicamente, a pesar del reducido número de especies existentes a nivel global (Lee y Dunton, 2000; Kennedy et al., 2010; Van Der Heide et al., 2012). Los PM proporcionan muchos servicios ecológicos, destacando su papel como productores primarios y parte fundamental en la cadena trófica de consumidores como las tortugas marinas (Hernández y van Tussenbroek, 2014). Constituyen un hábitat con flora y fauna diversa en donde muchas especies lo utilizan como sitios de anidación, alimentación y crianza de fauna ecológica y comercialmente importante para las poblaciones humanas (Hemminga y Duarte, 2008). Protegen la línea de costa amortiguando la intensidad de corrientes y mareas (Hotaling-Hagan et al., 2017), evitando la pérdida de suelo marino. Intervienen directamente en el reciclaje de nutrientes y almacenando diversas formas de carbono en sus rizomas, raíces y en el suelo (Oreska et al., 2017). Por ello se consideran reservorios de “carbono azul” con una capacidad de almacenamiento de hasta cuatro veces más que las plantas terrestres (Howard et al., 2014). Este carbono azul proviene de los restos de biomasa aérea y subterránea de los propios pastos marinos, de organismos bentónicos como bivalvos y gasterópodos y de las macro algas como las del género *Halimeda* y *Udotea* (van der Heide et al., 2012). Se incluyen a manglares y marismas, los cuales en conectividad con los PM componen un sumidero de carbono con rangos de acumulación sedimentaria de hasta 1713 g C m⁻² contra 13 g de C m⁻² para un bosque boreal (McLeod et al., 2011); siendo este servicio ambiental un factor de gran importancia en la mitigación del cambio climático (Fourqurean et al., 2012). Esto significa que con la destrucción de 522 Mg CO₂ por ha al año de biomasa de PM y sedimento

superficial, se podrían liberar hasta 330,000,000 toneladas de CO₂ gaseoso a la atmosfera anualmente resultante de la oxidación del carbono orgánico contenido en el sistema de raíces (Oreska et al., 2017).

1.1.1 CARACTERISTICAS DE LOS PASTOS MARINOS

Thalassia testudinum (*Tt*) es una especie con distribución altamente asociada a la radiación (van Tussenbroek et al., 2006), es por ello que se desarrolla en ambientes tropicales y subtropicales (Spalding et al., 2003). Es una especie persistente en el tiempo debido a sus gruesos y fuertes rizomas que penetran más de 20 cm en el suelo, así mismo, tiene resistencia fisiológica alta, pero recuperación lenta (Kilminster et al., 2015). Crece en aguas claras muy someras (de menos de 2 m) y a mayores profundidades sin rebasar los 15 m (van Tussenbroek et al., 2010), prefiriendo los suelos fangosos y arenosos (Kennedy et al., 2010). Por lo general crece cerca de manglares y/o arrecifes de coral e interactúa con estos ecosistemas (Hogarth, 2007). Sus rametos y su madurez sexual se alargan en comparación de las especies colonizadoras y las oportunistas, como los son *Halodule wrightii* (*Hw*) y *Syringodium filiforme* (*Sf*), respectivamente. Esta última especie presentan rangos intermedios en las características de las colonizadoras y persistentes, sin embargo, se inclinan a la similitud con las especies colonizadoras. Estas similitudes también se observan porque ambas generalmente forman manchones interrumpidos por zonas sin vegetación uno del otro, también llamados manchones transitorios debido a que no persisten en el tiempo como lo hacen los llamados manchones duraderos. Los cuales pueden pasar de ser uno al otro según cambios favorables o desfavorables en la tolerancia de una u otra especie al medio donde se desarrollan. Los manchones duraderos pueden morir por efectos medioambientales y permitir la colonización rápida de otra especie causando una variación temporal en la composición, abundancia y fenología a diferentes escalas (Kilminster et al., 2015).

Halodule wrightii (*Hw*), tiene un aspecto similar a *Tt*, con la diferencia que sus dimensiones son considerablemente más pequeñas y sus rizomas son superficiales, esta especie se encuentra en aguas someras (menos de 2m) y profundas (de hasta 7 m) prefiriendo los suelos fangosos y arenosos. Su presencia es discreta comparada con la de *Tt*. *Hw* coloniza espacios perturbados como puertos, salidas de aguas negras o ríos y tiene un rápido crecimiento (Marbá et al., 1994), aunque *Hw* no es constante en el tiempo como lo es *Tt*. *Syringodium filiforme* (*Sf*) es una especie particular por sus hojas huecas con aspecto

de popote, se ha observado que estas crecen desde áreas someras hasta profundidades de más de 7 m y es considerada oportunista (Kilminster et al., 2015).

1.2 RELACIONES AMBIENTALES CON LA DISTRIBUCIÓN DE LA VAS

La distribución de los PM está fuertemente ligada a la heterogeneidad espacial (Short et al., 2001). Las fluctuaciones físico-químicas están determinadas por las mareas, la claridad de agua, los nutrientes, la sedimentación, el viento, la profundidad, el tipo de sustrato, la presencia de poblaciones de peces y de organismos bentónicos, o algún evento catastrófico alterando la distribución de la especie (Bin Zhu et al., 2003). Los nutrientes en columna de agua y agua intersticial son absorbidos por los tejidos de las plantas (Libes, 2011) y son de gran importancia para su salud (Mijangos, 2018). Derivan de la descomposición de materia orgánica viva y muerta (detritus) en la columna de agua y en el agua intersticial (Kilminster et al., 2006) y sus concentraciones están muy por debajo de las que necesitan las plantas terrestres (Lee et al., 2007; Holmer y Olsen, 2002). Estos nutrientes se forman como resultado de procesos de mineralización, principalmente en el agua intersticial contenida en los sedimentos debido a la descomposición de elementos orgánicos presentes en el medio principalmente por la actividad bacteriana (van Tussenbroek et al., 2006). La fluctuación de estos nutrientes depende de las temporadas climáticas. Por ejemplo, la temporada de nortes permite el movimiento de la masa oceánica y el levantamiento de los sedimentos moviéndolos y redistribuyéndolos en otras direcciones, favoreciendo la fertilización del suelo (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009). En temporada de nortes se pierde calidad en el agua por efectos de los vientos y las corrientes, restringiéndolos de la luz, además se incrementa la profundidad por elevación del nivel del mar. Sin embargo, Mijangos (2018) observó en la Reserva de la Biosfera de los Petenes que la temporada de nortes es muy importante porque sus efectos se ven reflejados en la temporada de secas la cual presenta mayores concentraciones de nutrientes favoreciendo la productividad de la VAS. Además de los nutrientes, una buena productividad de la VAS depende de la correcta absorción de luz por parte de las hojas reflejándose en la distribución, y abundancia de VAS (Kantún-Manzano et al., 2018). Los pastos marinos pueden ser muy tolerantes a fluctuaciones en las variables ambientales, ya que estas son muy cambiantes y no son uniformes a lo largo del año (Lee y Dunton, 2000). Un déficit o un exceso en los nutrientes, principalmente nitrógeno (nitritos, nitratos y amonio) y fósforo (orgánico e inorgánico) y de los parámetros físico-químicos como temperatura, salinidad, pH y oxígeno durante un día puede disminuir las tasas de productividad y limitar expansión de las praderas (Hemminga y Duarte, 2008). Por ejemplo, la temperatura puede causar daños en las estructuras fotosintéticas de plantas (Lee et al., 2007).

Las comunidades de VAS pueden no ser estables si los rangos de salinidad son muy amplios, representando un factor estresante y en la variación de la composición florística, sobre todo si tomamos en cuenta la variación temporal e interanual (Patrick et al., 2017). En ausencia de oxígeno, el fósforo y el amonio no se degradan y perjudica las funciones metabólicas de los PM (Fourqurean et al., 2015). El pH, suele tener fluctuaciones diarias y alterar los procesos metabólicos por cambios en la disponibilidad de CO₂ disuelto, condición que deriva en un patrón de respuesta diverso según la especie (Invers et al., 1997).

1.3. DISTRIBUCIÓN DE LA VEGETACIÓN ACUÁTICA SUMERGIDA

Los pastos marinos se extienden por aguas costeras poco profundas de los océanos del mundo con excepción del antártico (Fig. 1). Se ha calculado que los PM ocupan 0.2 % de la costa (Howard et al., 2014) y aún no se conocen las extensiones en muchas partes del mundo. Se han identificado 10 grandes regiones en el mundo con presencia de pastos marinos (Short et al., 2007). La Región I denominada Pacífico Norte, la Región II de Chile, la Región III del Atlántico Norte, la Región IV del Caribe, la V del Suroeste Atlántico, la Región VI del Mediterráneo, la región VII del Sureste Atlántico, la Región VIII de Sudáfrica, la región IX del Indo-Pacífico y la región 10 del Sur de Australia (Short et al., 2001). Las regiones con menos conocimiento sobre la distribución de los PM es la tropical y la Indo-Pacífica (Koedsin et al., 2016). De acuerdo con Short et al. (2007), México se ubica en la región I y IV, denominada también región Pacífico Norte y caribeña respectivamente con siete géneros de los 13 géneros que se han reportado a nivel mundial (Short et al., 2007). De estos siete géneros, tres se encuentran en ambas regiones. En la región I se consideran especies de ambientes templados y los géneros dominantes son *Zostera* y *Phyllospadix* mientras que en la región IV se localizan 3 géneros dominantes *Thalassia*, *Syringodium* y *Halodule* consideradas tropicales (Orth et al., 2006).

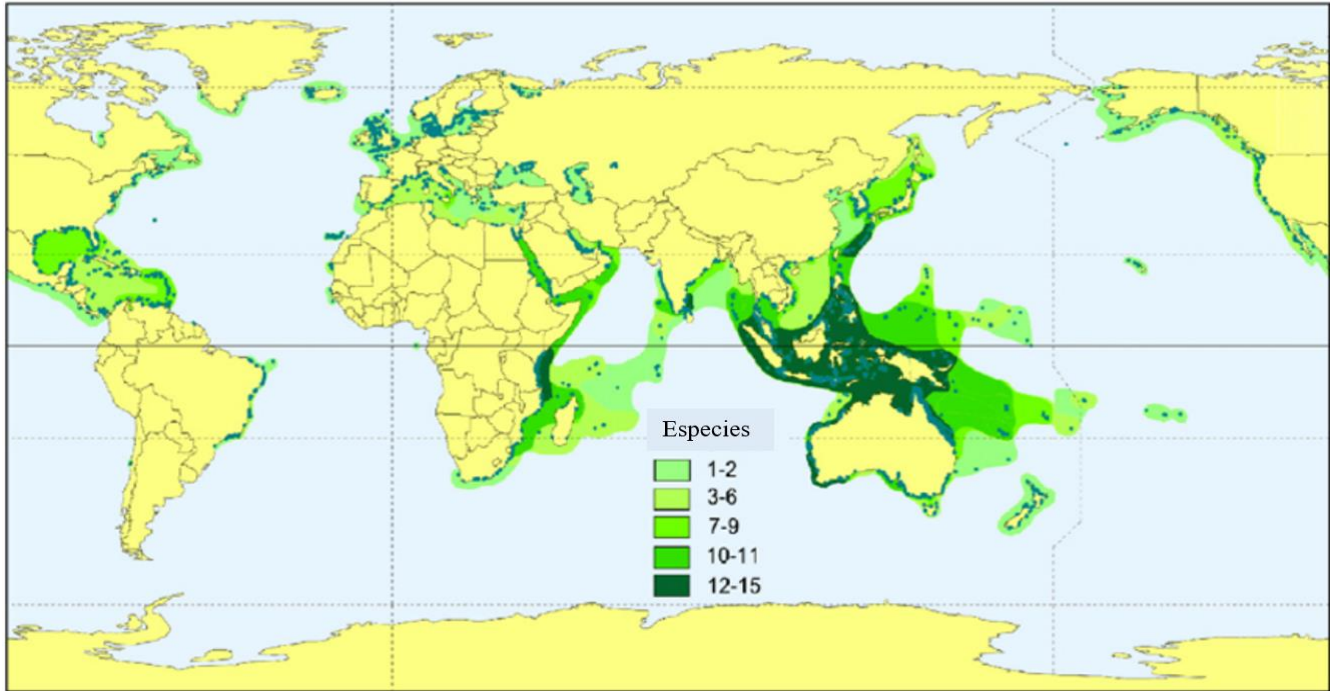


Figura 1. Distribución global de pastos marinos (Short et al., 2007)

En el Golfo de México y Caribe la VAS se distribuye desde Laguna Madre en Tamaulipas (Fig. 2A; Rahneemofar et al., 2018) hasta el estado de Quintana Roo (Fig. 2L; Espinosa-Avalos, 1996; Gallegos et al., 2017). En el estado de Veracruz las poblaciones han disminuido en los últimos años (Fig. 2B, C) y las coberturas que presentan son escasas y fragmentadas en comparación con las praderas de VAS del estado de Campeche (Gallegos, 2010b), en donde se distribuyen de manera continua desde la costa de Champotón extendiéndose dirección norte-este por la costa de la Reserva de la Biosfera de Los Petenes (Fig. 2E-G). Se presentan en la Reserva de la Biosfera de Celestún en el estado de Yucatán, en donde comienza a restringirse su presencia (Fig. 2H). La VAS en este último estado es discontinua desde la costa de Sisal hasta Puerto Progreso (Fig. 2I). En Dzilam de Bravo y San Felipe también se registró una importante presencia de VAS (Fig. 2J, K; Palafox-Juárez y Liceaga-Correa, 2017; Kantún-Manzano et al., 2018). Por último, en el estado de Quintana Roo (Fig. 2L) se distribuye desde la Laguna de Yalahau y costa de Isla Holbox continuando la extensión por el sur del estado hasta Akumal, restringiendo paulatinamente su cobertura de norte a sur por la barrera arrecifal del mar Caribe (Gallegos et al., 2017).

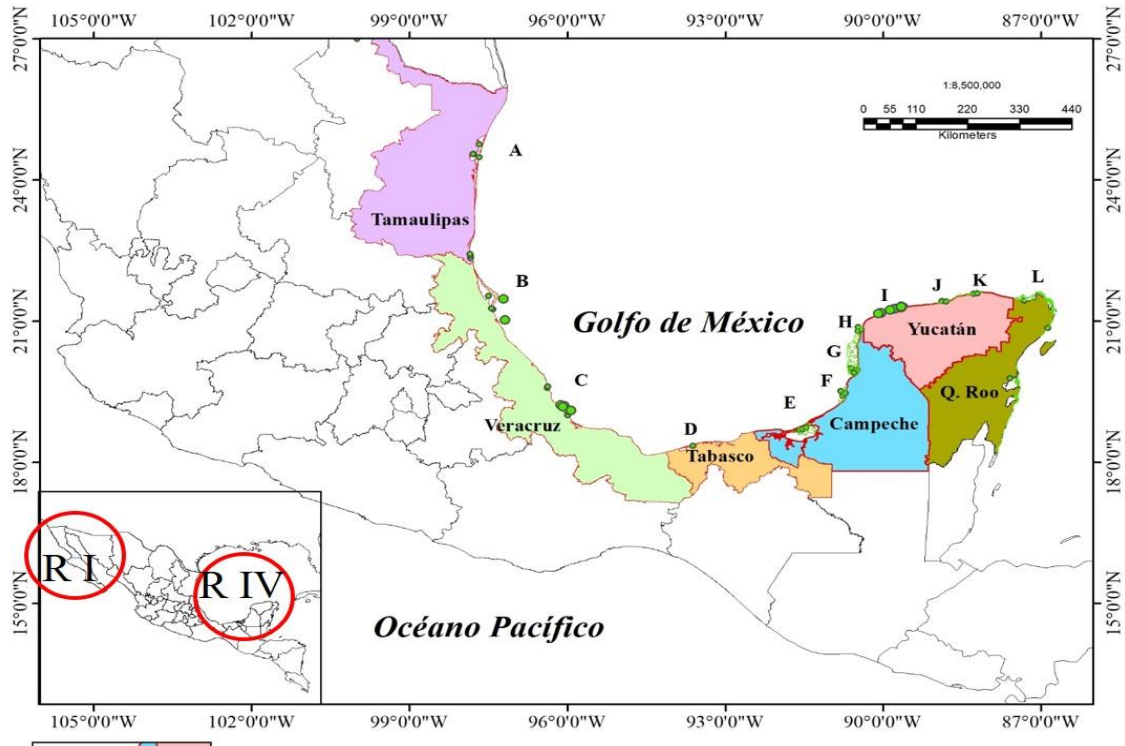


Figura 2. Distribución de la vegetación acuática sumergida en el Golfo de México. R I corresponde a la región I Pacífico Norte y R IV corresponde a la región IV caribeña.

La información preliminar acerca de su distribución, nos daba una idea de donde se encontraban los pastos marinos, no obstante, la extensión de la VAS en Campeche era prácticamente desconocida. Se desconocía que variables ambientales están explicando su patrón de distribución espacial. Para obtener la distribución de la VAS en la Reserva de la Biosfera de los Petenes fue necesario el uso de la tecnología de percepción remota, ya que de otra manera hubiera representado un esfuerzo de muestreo mucho mayor por la gran extensión (McKenzie et al, en Short et al., 2001). La complementariedad de metodologías de percepción remota hidroacústica y satelital fue indispensable para definir los patrones de distribución espacial, ya que con una u otra de manera independiente no lo hubiéramos conseguido. Los videos grabados durante los transectos y las verificaciones *in situ* permitieron reconocer la composición florística del sitio con mayor detalle. Con la información de estaciones de monitoreo en donde se registraron variables fisicoquímicas e información puntual sobre la VAS se determinaron las relaciones que están definiendo la extensión y la cobertura de la composición florística del sitio. Con este trabajo pretendemos contribuir con la información mínima necesaria con mejores bases científicas para la toma de decisiones en temas de interés

público y político, para el uso y manejo de este ecosistema costero (Kilminster et al., 2015).

1.4 ANTECEDENTES

Muy ligado a los patrones de distribución de la especie en el espacio está la concentración de nutrientes disponibles y los cambios en los parámetros fisicoquímicos. Hale y colaboradores (2004) recopilaron los cambios y pérdidas en las comunidades de pastos marinos de las costas de Big Bend, Florida entre los años 1974 a 2000. En este estudio se observó que las poblaciones de *Thalassia testudinum* (*Tt*) fueron sustituidas por las de *Syringodium filiforme* (*Sf*) y *Halodule wrightii* (*Hw*) en un 16%, mientras que las poblaciones de estas últimas especies, ganaron territorio en un 19% y 23% respectivamente. Esto se debió a que las condiciones de luz, los sedimentos y nutrientes cambiaron debido a los vertimientos de aguas residuales a la línea de costa por el desarrollo urbano. Estos investigadores se dan cuenta que *Tt* es una especie que requiere condiciones mayores de luz que *Sf* y *Hw* y que estas dos últimas especies requieren de mayores concentraciones de nutrientes que *Tt*. Observaron que el cambio se dio mayormente en la zona norte del área estudiada en donde la turbidez es mayor debido a la presencia de salida de aguas negras, fitoplancton y que el acumulamiento de nutrientes favorecen a *Hw*. Al mismo tiempo se dieron cuenta que el cambio en *Tt* fue de zonas más someras a zonas más profundas.

Christiaen et al. (2016) reportaron una relativa estabilidad de las praderas de *Z. japónica*, *Phyllospadix scouleri* y *P. serrulatus*. en diferentes subregiones del Hood Canal en Washington del año 2003 al año 2014. Las tasas de mayor cambio se observaron en sitios con influencia de aguas descargadas de zonas antropogénicas, lo cual indica niveles bajos de calidad de agua, menor presencia de oxígeno disuelto y presencia de bacterias coliformes fecales. Estos cambios en el agua estructuran a la vegetación en manchones transitorios que hacen más vulnerable a *Z. marítima* versus *Z. japónica*, debido a que esta última coloniza rápidamente espacios disponibles. Esta distribución en manchones transitorios es más susceptible a no resistir a hidrodinámicas naturales y/o las concentraciones de sulfatos y amonio en exceso o en déficit que los manchones de mayor tamaño o de distribución continua.

Campbell y Fourqurean (2013) en Florida Keys determinaron un aumento de 25% de la productividad primaria con enriquecimiento de dióxido de carbono (CO₂) en manchones de *Thalassia testudinum*. Se argumenta que este aumento en la productividad puede solucionar el problema de la acidificación de los océanos por incremento en el CO₂ atmosférico. Por otra parte, midieron las concentraciones de Nitrógeno

inorgánico disuelto (NID) y fósforo inorgánico disuelto (FID) por movimientos de corrientes determinando que las concentraciones disminuyen espacialmente las cuales fueron significativamente menores y menos variables cuando la biomasa de VAS era alta y por el contrario en manchones con baja biomasa se encontraron muy altas concentraciones de estos compuestos. La velocidad de flujo de corrientes es 57% menor con presencia de VAS derivando en menor volumen de agua con NID y PID transportada a la VAS. Se ha observado que la VAS tiene la capacidad de bajar las concentraciones de NID mediante la asimilación autótrofa y la desnitrificación mientras que para el caso de PID su concentración depende de los gradientes de salinidad, la cual generalmente varía en los meses de descarga de los ríos por precipitación. También se observó que estos nutrientes no limitan el crecimiento de VAS ya que estas pueden cubrir sus requerimientos nutricionales a través del agua intersticial contenida en los sedimentos. Lo anterior sugiere que VAS comparte nutrientes con fitoplancton y otros organismos bentónicos (Gurbisz et al., 2017).

La percepción remota (PR) es una técnica de toma de datos de un espacio geográfico a distancia mediante la emisión de energía electromagnética (Caloz y Collet, 1997). Existen dos herramientas utilizadas en el análisis de VAS medidas a través de ondas electromagnéticas, los satélites y sonares hidroacústicos (Ecosondas) (Avalos, 2012). Ambas fuentes de datos junto con verificaciones puntuales son utilizadas en conjunto como estrategia metodológica para la detección de fondo marino (Fornes et al., 2006). Nos permiten analizar patrones en grandes distancias (Biosonics 2008) e identificar con menor error los elementos del fondo que solo con una sola fuente de datos, con una mayor fiabilidad de la información (Fornes et al., 2006).

Estas técnicas de percepción remota han sido utilizadas para el estudio de VAS a nivel global, en Australia, Estados Unidos de América, España, Francia, India y Turquía. Por ejemplo, Koedsin et al., (2016) clasificaron la composición florística en un área pequeña de 1.5 km² cubierta por tres especies de pastos marinos utilizando imágenes WorldView-2 y verificando con fotocuadrantes de alta resolución (1m) en aguas someras del Sur de Tailandia. En el estudio realizado en el Lago de Mogan, Turquía por Dogan et al. (2009) elaboraron mapas de la composición de especies de pastos marinos en un área de 5.8 km² con imágenes Quickbird. Este último satélite también fue utilizado por Lyons et al. (2011) para mapear 200 km² de pastos marinos en Moreton Bay, Australia. Los mapas elaborados en estos tres estudios resultaron muy detallados debido a las altas resoluciones espaciales y radiométricas de los satélites. La menor

extensión espacial de los estudios mencionados redundó en mayor detalle en sus mapeos. Fornes et al. (2006) clasificaron a *Posidonia oceánica* y algunos tipos de sedimento con imágenes Ikonos en menos de 1 km² y verificaron con una ecosonda biosonics DE-4000. Se encontraron muchas coincidencias en la información analizada bajo ambas metodologías y un error mínimo en la clasificación supervisada.

En México las tecnologías de percepción remota en conjunto, fueron utilizadas para el mapeo de los hábitats bentónicos de Puerto Morelos en el Estado de Quintana Roo aplicando imágenes WorldView-2 y una ecosonda SyQwest Bathy 500 DF con la cual se obtuvo la batimetría del fondo marino (Cerdeira-Estrada et al., 2012). Con la incorporación de información adicional como la batimetría mejora la precisión de la información generada (Lyons et al., 2011). En la misma zona de estudio Brigitta I. Van Tussenbroek y colaboradores (2017) reportan cartografía de la cobertura de la VAS durante 8 años de seguimiento en un área de 200 m de costa. Sin embargo, la fuente principal de la información no se obtuvo con percepción remota. Otro estudio destacado en México con imágenes satelitales Landsat ETM+ para identificar VAS es el realizado por Palafox-Juárez y Licea-Correa (2017) en aguas someras de la costa de Yucatán. Este estudio abarca un área extensa de 4,644 km² apoyándose en 294 sitios de verificación de campo y video-transectos, pero no clasifica a las diferentes especies de pastos marinos del sitio. Cuevas et al. (2013), se enfocaron en cuantificar el movimiento de dunas en aguas someras de la costa de Yucatán a través de una conjunción de metodologías de percepción remota con imágenes satelitales Landsat ETM, datos de un perfilador sísmico de fuente hidroacústica y un análisis sedimentológico. En este estudio se publica información referente a la dinámica en la distribución de los pastos marinos a través del movimiento de dunas, sin embargo, no se enfoca en cartografiar su área de distribución por especie. El tema de cartografía de PM para muchas partes del país no se ha generado porque en México es muy reciente el uso combinado de metodologías con este tipo de sonares hidroacústicos e información satelital para el estudio en la VAS en aguas costeras por la dificultad que representa la columna de agua en comparación con los estudios terrestres.

1.5 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Qué relaciones se pueden encontrar entre las variables ambientales y el patrón de distribución espacial de la VAS en la RBLP?

1.6 OBJETIVOS

GENERAL

Determinar la relación de algunas variables ambientales con los patrones de distribución espacial de la vegetación acuática sumergida (VAS) en la Reserva de la Biosfera “Los Petenes” (RBLP), Campeche.

PARTICULARES

1. Analizar las relaciones de los patrones de distribución espacial de VAS con algunas variables ambientales.
2. Analizar los patrones de distribución espacial de la VAS en la RBLP detectada por percepción remota

CAPÍTULO 2. ÁREA DE ESTUDIO

La Reserva de la Biosfera de los Petenes” (RBLP) se decretó el 24 de mayo de 1999 como Área Natural Protegida (ANP) con una extensión total de 2,828.57 km². La zona terrestre incluye los municipios de Calkiní, Hecelchakán, Tenabo y Campeche del estado de Campeche (Rivera-Arriaga y Villalobos-Zapata, 2005), así como la zona costera marina del Golfo de México (área de estudio) abarca una extensión de 1,817.64 km². El área de estudio se ubica entre las coordenadas extremas xMín, yMín 90° 49' 49.08”, 19° 51' 42.12” y xMáx, yMáx 90° 27' 6.48”, 20° 38' 8.16” (Fig. 3). La RBLP es considerada un área biogeográfica única a nivel nacional junto con la Reserva de la Biosfera Ría Celestún y la Reserva Estatal El Palmar. En conjunto estas áreas se denominan ecorregión por la importante flora vascular mesoamericana y su alta diversidad de fauna (Rivera-Arriaga y Villalobos-Zapata, 2005). Esta ecorregión fue declarada sitio RAMSAR el 2 de febrero de 2004, como humedal de importancia nacional e internacional (CONANP, 2006).

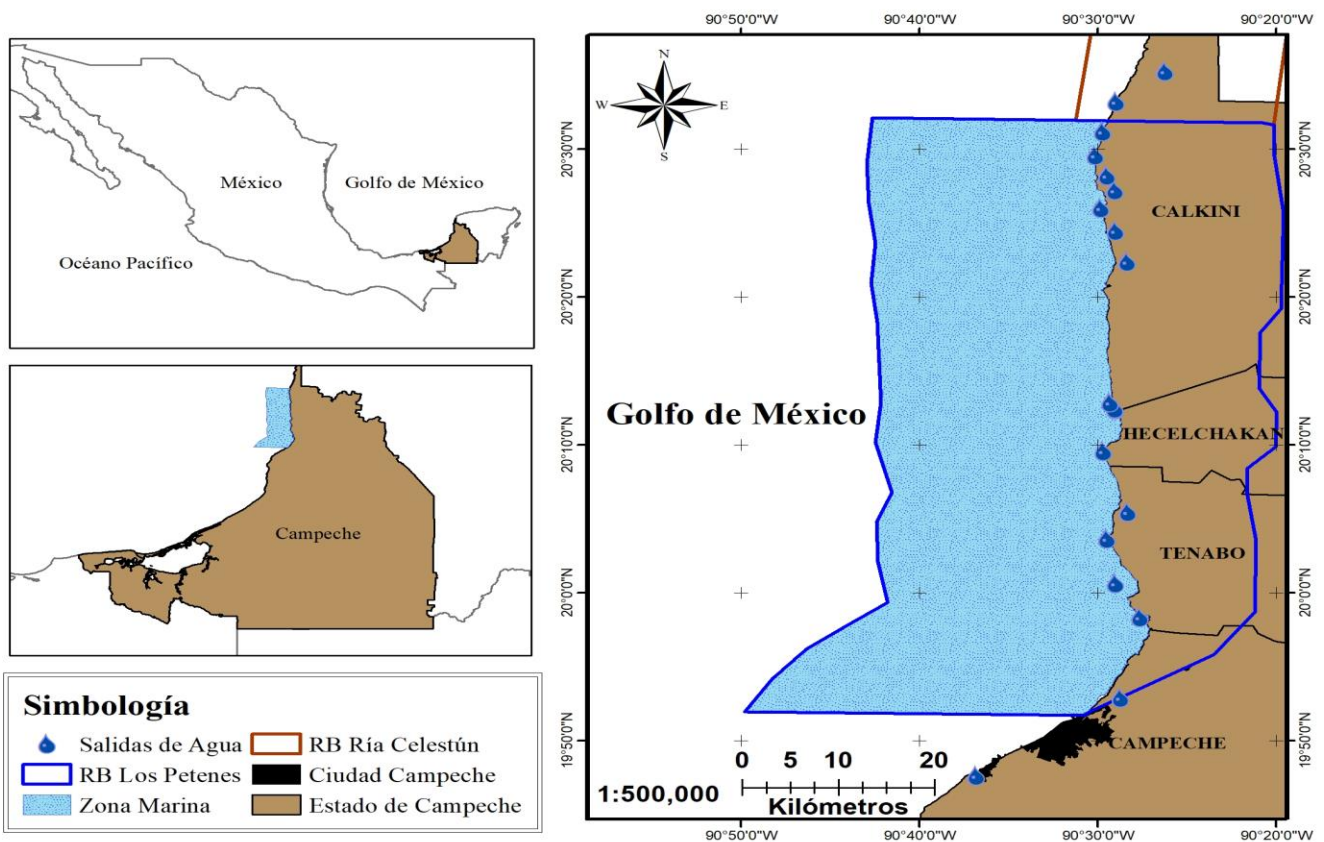


Figura 3 . Ubicación y delimitación de la zona marina estudiada en la RBLP, Campeche, México. En el mapa se muestran los aportes puntuales de agua dulce.

La reserva se ubica dentro de las regiones prioritarias de México como categorías de Regiones Prioritarias Terrestres No. 145, Regiones Marinas Prioritarias No. 102 y Áreas de importancia para la Conservación de Aves-AICAS (Agraz et al., 2012).

Los “Petenes”, son hábitats conformados por islas de vegetación de especies arbóreas de mangle, chechén, cedro, caoba, higueras rodeados de agua salobre y se encuentran altamente asociados a los pastos marinos (Fuentes et al., 2014). La RBLP está conformada por una plataforma de estratos sedimentarios marinos de rocas carbonatadas (CaCO_3) de pendiente ligera no mayor a 10 m (Ayala-Pérez et al., 2016). Cuenta con suelos arenosos como regosol calcáreo; suelos halomórficos como solonchac e histosol; suelos someros y pedregosos como rendzina; y suelos arcillosos oscuros como gleysol. El manto freático en la costa es superficial, aflorando en forma de ojos de agua o manantiales por las características de origen cárstico de la península de Yucatán (CONANP, 2006).



Figura 4. Especies de pasto marino del Golfo de México.

4A *Thalassia testudinum*. 4B *Syringodium filiforme*. 4C *Halodule wrightii*

En La zona marina de la RBLP se desarrollan 3 especies de PM, *Thalassia testudinum* perteneciente a la familia Hydrocharitaceae. *Syringodium filiforme* y *Halodule wrightii*. (*Tt*, *Sf*, *Hw*, Fig. 4A, 4B y 4C), las cuales pertenecen a las familia Cymodoceae (Hartog y Kuo, 2007). Mezcladas entre las praderas de PM crecen macro algas en su mayoría del género *Caulerpa paspaloides van wudermannii*. (Fuentes et al., 2014) y de los géneros *Avrainvillea*, *Penicillus*, *Halimeda* y *Udotea* (Pacheco, 2009). Estos géneros son compartidos con la VAS de las costas del estado de Yucatán (Palafox-Juárez y Liceaga-Correa, 2017). Esta pradera se considera como uno de los sitios con la mejor estructura, diversidad, vigor y la mayor superficie de cobertura de VAS del país (Gallegos, 2010b).

El clima en la RBLP es cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw) (García, 1988). Los vientos provenientes del norte se presentan de noviembre a marzo con masas de aire frío y seco, mientras que las suradas (vientos con dirección sur) se exhiben de abril a mayo con vientos húmedos y cálidos (Gío, 1996).

En la costa del Estado de Campeche, sobre todo en su extremo norte se puede encontrar una combinación de mareas mixtas semidiurnas y mareas diurnas que pueden provocar interacciones sedimentarias y fluctuaciones en la concentración de nutrientes y parámetros fisicoquímicos (Grivel Piña, 1992).

Los parámetros físico-químicos del agua son pH promedio de 7.5 para la RBLP (Fuentes et al., 2014), no es mayor a 8.5 durante todo el año (Mijangos, 2018). La salinidad fluctúa entre 24 y 35 ups (unidades prácticas de salinidad) para *Thalassia testudinum*, dato que está dentro de los rangos reportados por van Tussenbroek et al. (2006). La salinidad alcanza valores máximos de hasta de 43 ups debido a la evaporación de la superficie marina y O₂ disuelto de 8 a 8.22 mg/l (Wilson y Dunton, 2018). La temperatura media anual según datos de CONANP (2006) es de 26.7° a 27.8°C, aunque se reportaron rangos de 21° a 30°C para la reserva con mayo como el mes más cálido (Fuentes., 2014) y en el análisis de datos normalizados con valores de 30 años del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) la temperatura promedio máxima es de 29.9 °C en marzo y la mínima de 24 °C en enero. La precipitación de los últimos 30 años para la región de los Petenes mostró que la precipitación máxima se presenta en el mes de agosto (193.2 mm) y la precipitación mínima en marzo (12 mm); (Fig. 5).

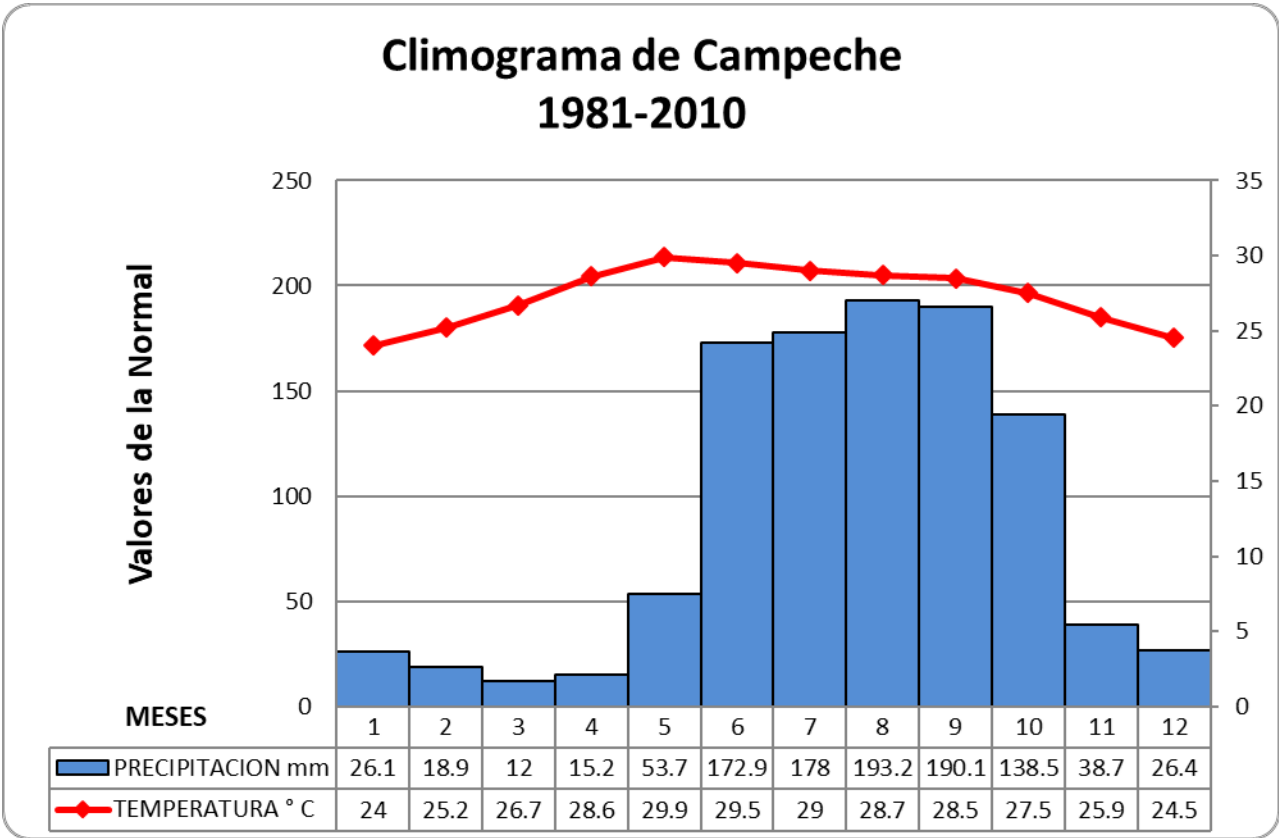


Figura 5. Climograma para la zona de estudio (fuente de datos: Sistema Meteorológico Nacional).

CAPITULO 3. MÉTODOS

3.1 REGISTROS DE VARIABLES AMBIENTALES

3.1.1 TRABAJO DE CAMPO

Se tomaron en cuenta 38 estaciones de colecta (n=82) en donde se registraron las variables ambientales (Figura. 6), se adicionaron los valores de los porcentajes de cobertura (área de 0.5 m²) obtenidos a través de las verificaciones *in situ* y se identificó la composición florística en cada medición. La tabla 4A localizada al final en el Anexo se detalla la información referente a las coberturas de las especies y las variables ambientales que se analizaron. La cobertura 0% representó la ausencia de la especie mientras que las presencias de *Tt*, *Sf*, *Hw* y macroalgas (MA) fueron representadas según su porcentaje (%) de cobertura por área del cuadrante (0.5 m²). Se estimó la concentración de nutrientes, para investigar si dichos nutrientes están influyendo en el crecimiento de las praderas en la zona de estudio. Para la determinación de nutrientes en la columna de agua, se colectó agua con una bottella de tipo *Van Dor* posicionada de manera horizontal a 2 m y en áreas someras a la profundidad intermedia. El agua fue filtrada, guardada y congelada para su posterior análisis en laboratorio. Para la determinación de nutrientes en agua intersticial (amonio (NH₄) y fosforo total PT_s) el suelo marino fue extraído con un núcleo de 5.5 cm de diámetro y 30 cm de largo del cual se separaron 50 g del contenido, las cuales fueron congeladas y transportadas al laboratorio para su posterior análisis. Las muestras de sedimento fueron centrifugadas a 4000 rpm durante 30 min en un ambiente anóxico (Lee y Dunton, 2000). El sobrenadante resultante se separó evitando tomar sedimento, el agua obtenida se filtró con filtros Whatman (GF/F) (Mutchler y Hoffman, 2017). Se determinaron las concentraciones de nutrientes totales, Nitratos + Nitritos (NO₃ + NO₂) y Fosforo total (PT) en agua intersticial con un HACH (DR3900) en unidades micro molar (µm) a través de colorimetría siguiendo las recomendaciones de Stricklan y Parson (1972).

Para conocer las condiciones abióticas de la VAS de la RBLP fueron registradas la temperatura del agua superficial, potencial de iones Hidrogeno (pH) y la salinidad, en cada estación de monitoreo, las cuales se registraron con una sonda multiparametrica comercial (YSI 556 MPS) a medio metro de profundidad. Se utilizaron los valores totales anuales del 2013 y 2016 (Tabla 1) de 3 temporadas climáticas del año (lluvias, secas y nortes) (Carrillo et al., 2009) promediándolos sin tomar en cuenta la temporalidad. La razón de generalizar esta información se debe a que aún no contábamos con suficientes datos de dichas variables en el sitio. Con esta información se realizó el análisis de componentes principales detallado en resultados.

NT_a corresponde a la suma de Nitritos y Nitratos en columna de agua, PT_a corresponde a formas fosfatadas inorgánicas en columna de agua, NH₄_s corresponde al contenido de amonio en agua intersticial, PT_s corresponde a formas fosfatadas inorgánicas en agua intersticial. T_C refiere a la temperatura en grados Celcius del agua, pH, salinidad. La abreviatura P/A corresponde a presencias analizadas como porcentajes de cobertura (%) de las especies *Thalassia testudinum* (Tt), *Syringodium filiforme* (Sf), *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MA) y a las ausencias de la especie.

Con la base de datos obtenida se realizó un análisis de componentes principales (ACP) en el software “Statistica” para determinar las variables importantes para la distribución de la cobertura de la VAS. Durante este análisis, las variables se inter-correlacionan de forma lineal y perpendicular con respecto a un eje vectorial cuyo centroide o centro de gravedad es la suma de cuadrados de los valores de cada variable y la distancia al origen se proyecta usando una matriz que acomoda las variables bilinealmente haciéndolas rotar en diferentes ángulos y acomodándolas de mayor a menor inercia de importancia (Tabachnick y Fidell, 2013). Mediante este análisis se descartaron estadísticamente las formas nitrogenadas en agua, el fósforo en agua, la temperatura y el O₂, ya que no explicaron la distribución de la VAS.

Tabla 1. Variables ambientales registradas en 2 periodos anuales (2013, 2016) en 38 estaciones de monitoreo.

Año Colecta		Temporada	Variable Ambiental		Abreviatura	Unidades	P/A
Monitoreo	2013	Anual	Nutrientes en Columna de Agua	Nitrógeno Total	NT_a	Micromolar	Cobertura % <i>Tt</i> <i>Sf</i> <i>Hw</i> Ma
				Fósforo Total	PT_a		
			Nutrientes en Agua Intersticial	Amonio	NH4_s		
				Fósforo Total	PT_s		
	2016		Fisico-químicos	Temperatura	T_C	° C	
				Iones Hidrógeno	pH	Adimensional	
				Salinidad	Sal	Adimensional	
			Variable Física	Profundidad	Z	Metros	

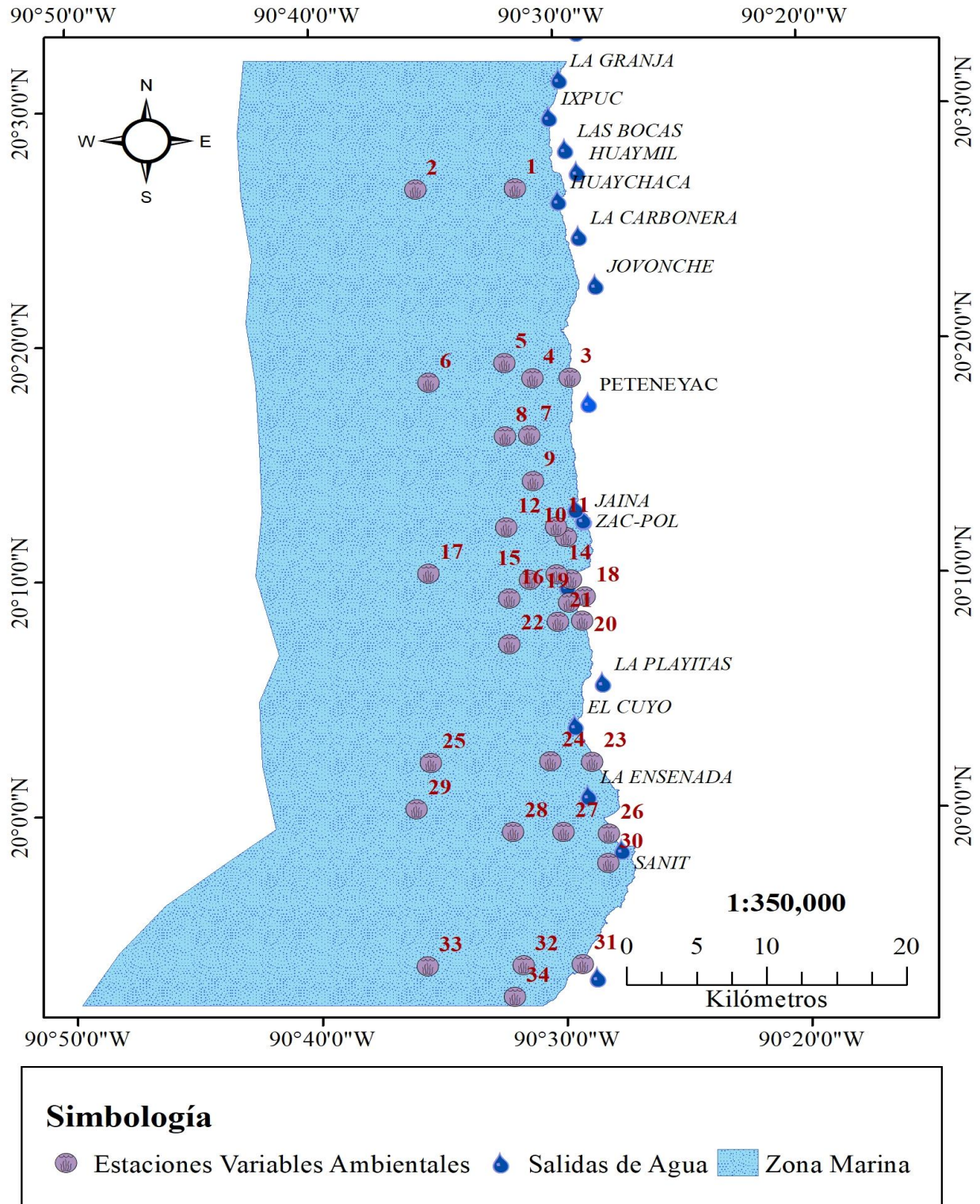


Figura 6. Localización de las 38 estaciones de monitoreo en la RBLP con mediciones de las variables ambientales durante los años 2013 y 2016.

3.2 REGISTRO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS CON PR HIDROACÚSTICA

3.2.1. TRABAJO DE CAMPO

La extensión de la VAS de la RBLP fue registrada con una ecosonda hidroacústica modelo Biosonics DT-X que incluye un GPS, con el propósito de obtener con mayor precisión las posiciones donde se ubica la VAS. Es importante mencionar, que la señal de la ecosonda no distingue entre géneros o especies de VAS, sólo se puntualiza la presencia o ausencia (p/a) de las plantas (Fairbanks y Norris, 2004). La ecosonda se instaló en una embarcación de mediana altura de 12 metros de eslora, con motor fuera de borda con capacidad de 60 caballos de fuerza (Fig. 7A). El transductor debe estar sumergido a una profundidad mínima alrededor de 50 cm (Winfield et al., 2007). Conforme se avanza en el transecto, se registra la posición geográfica. La separación de un registro a otro es de 2 a 5 m. Esto depende de la velocidad con la que avanza la embarcación por de las condiciones de oleaje y viento. Trabaja a una frecuencia de 430 kHz con 6.4 x 6.4 grados de apertura (Sabol, 2003).

La velocidad de navegación fue de 3-6 km/hr en zonas muy someras (menos de 2 m) o con presencia de oleaje y en zonas bajas rocosas en donde quedaría varada la embarcación. En zonas tranquilas sin obstáculos con profundidad de más de 2 m, la velocidad de navegación fue de 5-10 km/hr (Fairbanks y Norris, 2004). La información se registra verticalmente (Fig. 7B; Winfield et al., 2007) a una velocidad de sonido de 1,540 m/s, a través de los pulsos que recorren la columna de agua hasta rebotar con algún objeto (Eco E1: primera fase) (VBT, 2007) y recibe las señales de sonido (ecos: E1' y E2). La longitud de pulso es de 0.4 m por segundo. Para obtener datos precisos del registro, la ecosonda es calibrada con los valores de la temperatura, pH y la salinidad del medio acuático cada vez que se utiliza, ya que se asume que las condiciones ambientales son distintas en cada sitio y temporada. Estos parámetros fueron medidos con una sonda multiparamétrica YSI 556 MPS utilizada en el trabajo de campo para el registro de variables ambientales.

Se definió una malla de registro en forma de una “red regular” con transectos perpendiculares (PE) y paralelos (PA) a la costa (Caloz y Collet, 1997) con una distancia entre ellos de 2 a 3 km aproximadamente. Los transectos trazados perpendicularmente a la costa alcanzaron hasta 24 km de distancia, en donde la vegetación ya era escasa o ausente, y el recorrido paralelo a la costa de 70 km lineales, con lo cual se cubrió casi en su totalidad la extensión máxima de la parte marina de la RBLP (Fig. 8) Estos transectos

extremos se establecieron con la finalidad de cubrir los límites de distribución de la VAS. En total se recorrieron 1,271.18 km lineales. Los datos fueron registrados en diferentes periodos del año del 2011 al 2017.

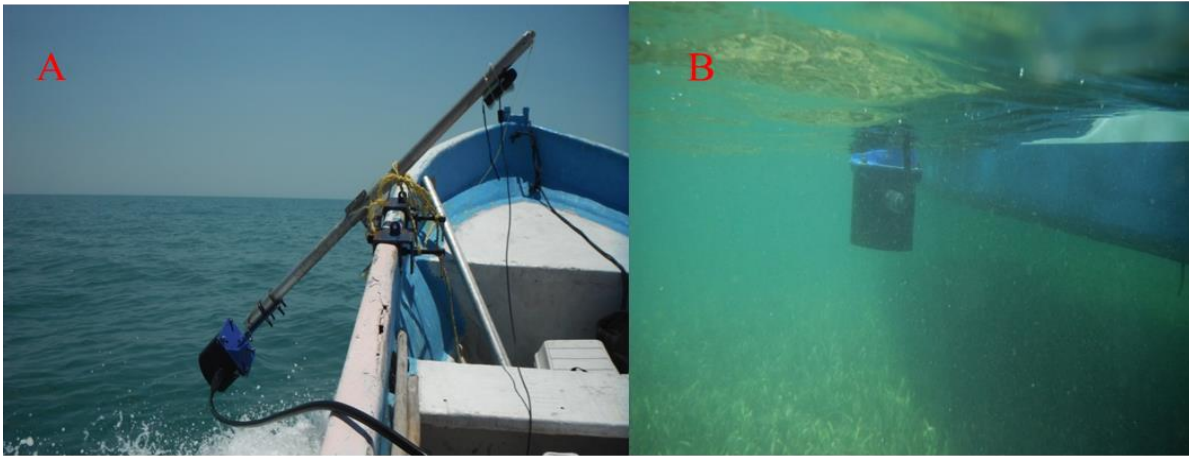


Figura 7. A Ecosonda instalada en embarcación. B. Ecosonda registrando la VAS en la RBLP.

La base de datos de la ecosonda hidroacústica se resume en la Tabla 1A (en Anexo) donde detalla la información de las distancias de los transectos perpendiculares y paralelos, el número de pings (muestra acústica compuesta por 10 pulsos) registrados y las posiciones geográficas de cada uno e información sobre la calibración de la ecosonda antes de iniciar cada transecto.

La muestra acústica (Hamilton, 2001) de la base de datos de la ecosonda hidroacústica, contiene 364,030 registros puntuales con promedios de variables como el porcentaje de cobertura, el promedio de altura de la planta y el de la profundidad.

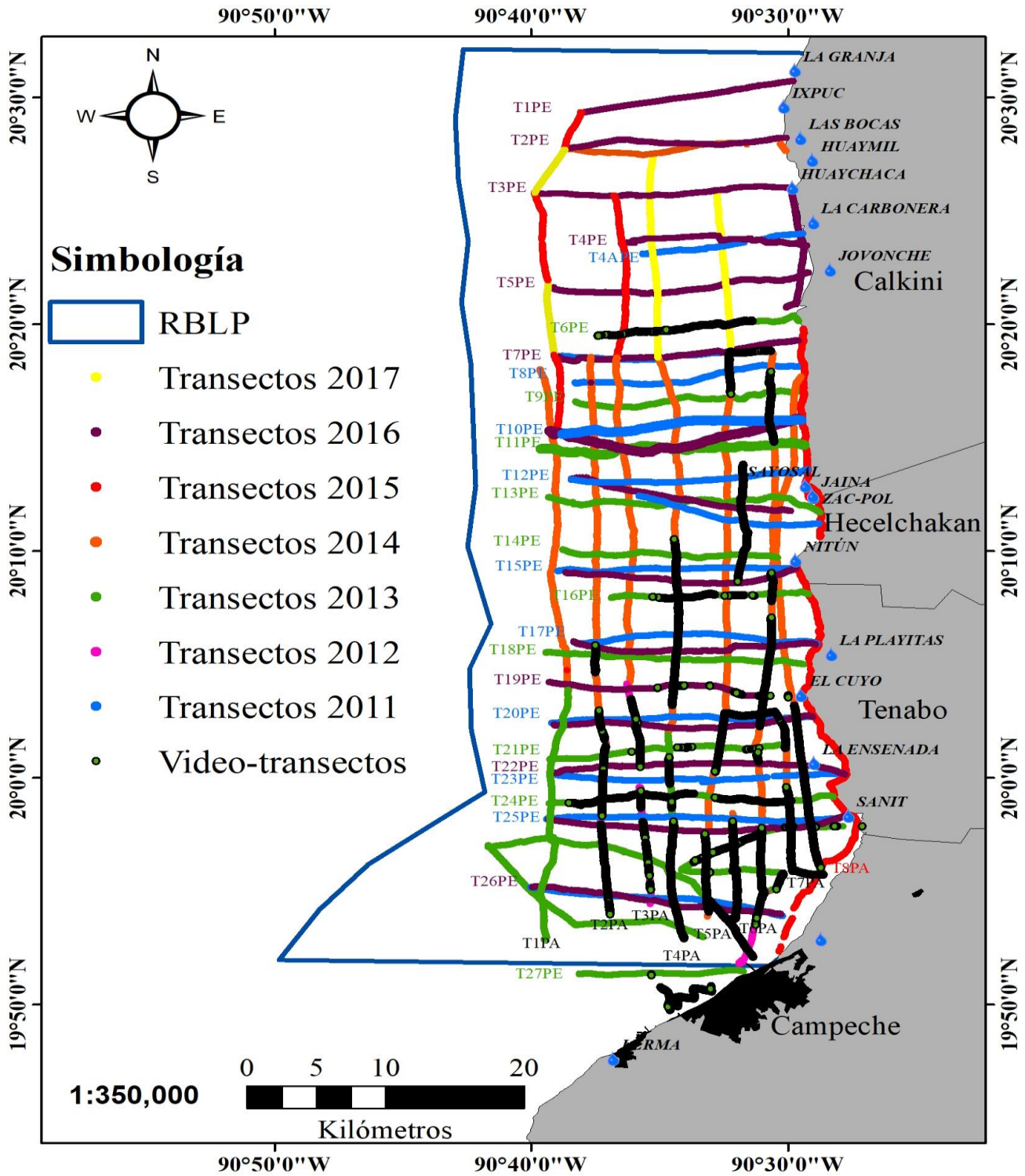


Figura 8. Registros de la VAS colectados con la ecosonda mediante transectos perpendiculares (PE) y paralelos (PA) a la costa (“red regular”) y elaborados entre los años 2011 y 2017.

Se utilizó el software de captura de datos Visual Acquisition Vers.1.0 (VA) el cual nos muestra en tiempo real un ecograma (Fig. 9). El ecograma es una representación gráfica del perfil marino y provee información sobre la altura, cobertura de la vegetación y profundidad. Los ecogramas se guardan en archivos independientes con formato (.dt4), de esa forma es posible visualizarlos individualmente. Los ecogramas fueron analizados para elaborar posteriormente la clasificación supervisada de las clases de VAS con datos satelitales, por ello resultaron indispensables para la determinación de la composición florística. Del lado derecho de la figura 8 se observan los transectos realizados con la ecosonda de la RBLP. Del lado izquierdo, el rango de colores verdes limón corresponde al reflejo de la altura de la VAS y en rango de colores amarillo-naranja se observa el fondo marino (lo más profundo). En el eje izquierdo del ecograma se aprecia la escala numérica correspondiente a los decibeles o a la intensidad de sonido. En el eje derecho se aprecia la escala numérica en metros correspondiente al rango de profundidad. El eje superior muestra el número de los pings emitidos durante ese transecto, este número a su vez funciona como un identificador único de los datos.

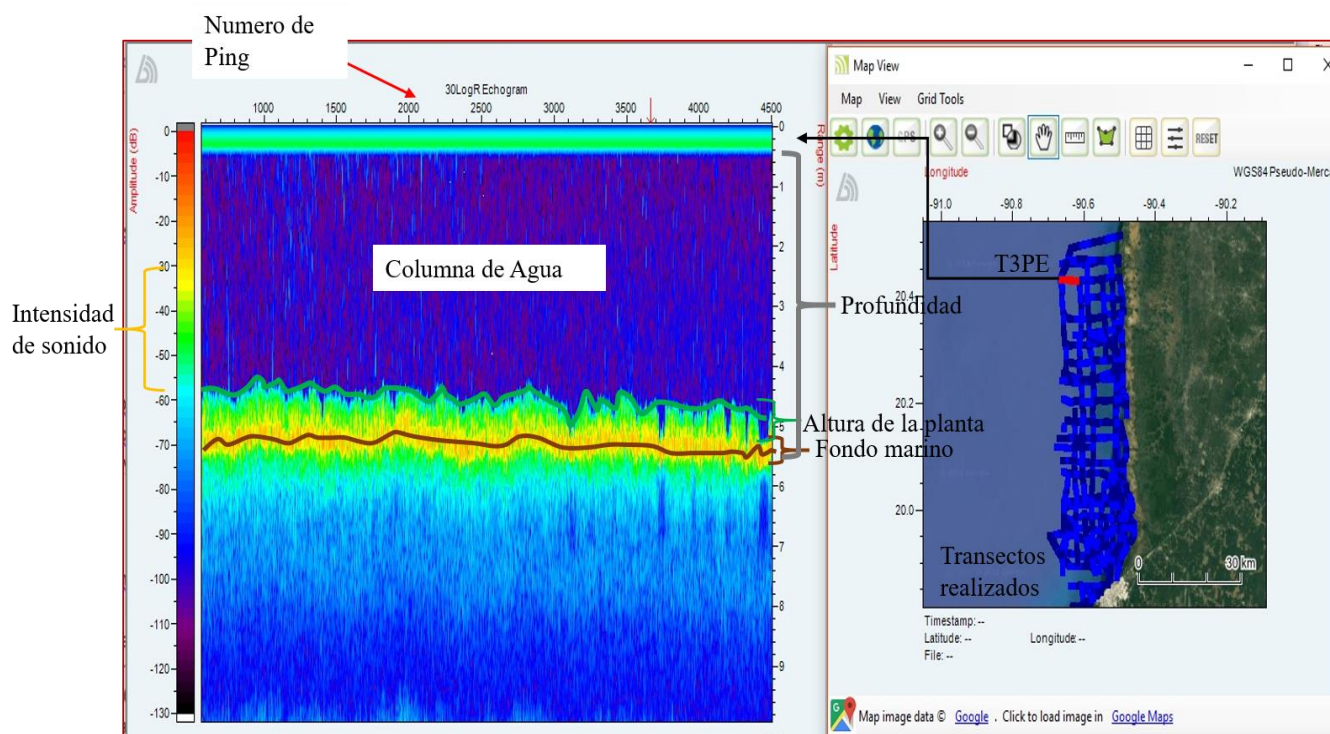


Figura 9. Ecograma con información de la VAS.

Con la ecosonda hidroacústica también es posible clasificar el tipo de grano de los sedimentos por medio de la rugosidad (E1) y la dureza (E2) (Greenstreet et al., 1997; Hamilton, 2001) a 30 cm de profundidad (Sabol, 2001; Bin Zhu et al., 2007). El método B4 o de dimensión fractal (DF) es utilizado para detectar la complejidad de la forma del grano sedimentario por medio de la geometría de la partícula, así pues, un menor valor de DF refiere a suelos blandos (Tipo 1) y un DF mayor a los más duros (Tipo 3) (Biosonics, 2008, VBT Manual, 2007). Tipo 2 representa un valor intermedio entre Tipo 1 y Tipo 3. De toda la información antes descrita, se obtuvo una sola base de datos que fue complementada con la información de los videos que a continuación se describe.

Como validación en campo, se usó una cámara submarina (SeaViewer) que registraba la vegetación al mismo tiempo que la ecosonda, con la cual se verificaron las composición de la VAS. De la información de los videos se obtuvo una base de datos independiente, la cual se encuentra resumida en Tabla 2A en el Anexo (Biosonic, 2012), siguiendo la metodología de toma de datos que utilizaron Kendrick et al. (2002). Las coordenadas de un GPS manual Marca Garmin Oregon 550, adicional al que registra la información de la ecosonda, fueron utilizadas para sincronizar los videos tomados con la cámara sumergible a lo largo de los transectos y trayectos. En zonas donde la vegetación era visible desde la embarcación, se identificaba visualmente su composición florística y se capturaron “waypoints” (puntos de referencia) con el mismo GPS Oregon. Estas observaciones apoyaron el muestreo con la ecosonda. Posteriormente se procesaron los registros de los videos grabados para asignarles un código de presencia/ausencia (P/A) de VAS en cada posición a lo largo del recorrido y relacionarlos con los ecogramas (Norris et al., 1997; Norris y Fraser, 2007). Así mismo, se adicionó una columna a la base de datos de los videos en donde se identificó el porcentaje de cobertura de la VAS en la imagen del video y la composición florística, registrada continuamente en forma visual (Tabla 2A Anexo).

Ambas bases de datos independientes (la de la ecosonda hidroacústica y la de los videos) fueron unidas para generar una sola base de datos.

Otra base de datos diferente fue generada a partir de las verificaciones *in situ* (n=143) a través de buceos distribuidos en toda la zona marina de la RBLP. En ella se encuentran las posiciones geográficas de los de 10 mediciones en un cuadrante hecho con tubo de PVC de los cuales fueron promedias las coberturas de VAS identificadas, alturas y la profundidad, esta información se encuentra resumida en Tabla 3A en el Anexo. Las verificaciones *in situ* se efectuaron cada 3-5 Km por transecto (Fig. 10). Los valores de Base de datos fueron utilizados posteriormente para evaluar la exactitud del mapa de clases de VAS detectadas con la imagen satelital Sentinel 2A.

Adicionalmente, fueron utilizados los porcentajes de cobertura de VAS para asociarlas a la información de la base de datos con las variables ambientales registradas en 38 estaciones de monitoreo. Estos 38 sitios de monitoreo son adicionales a las verificaciones *in situ*. Esos sitios son coincidentes espacialmente o se encontraban de 50 a 100 m de distancia de las verificaciones *in situ*. Por lo tanto, la base de datos fue utilizada en el análisis de componentes principales de las variables ambientales para encontrar la relación de algunas variables con la presencia de las coberturas de VAS. Esta información se encuentra disponible en Tabla 4A en el Anexo.

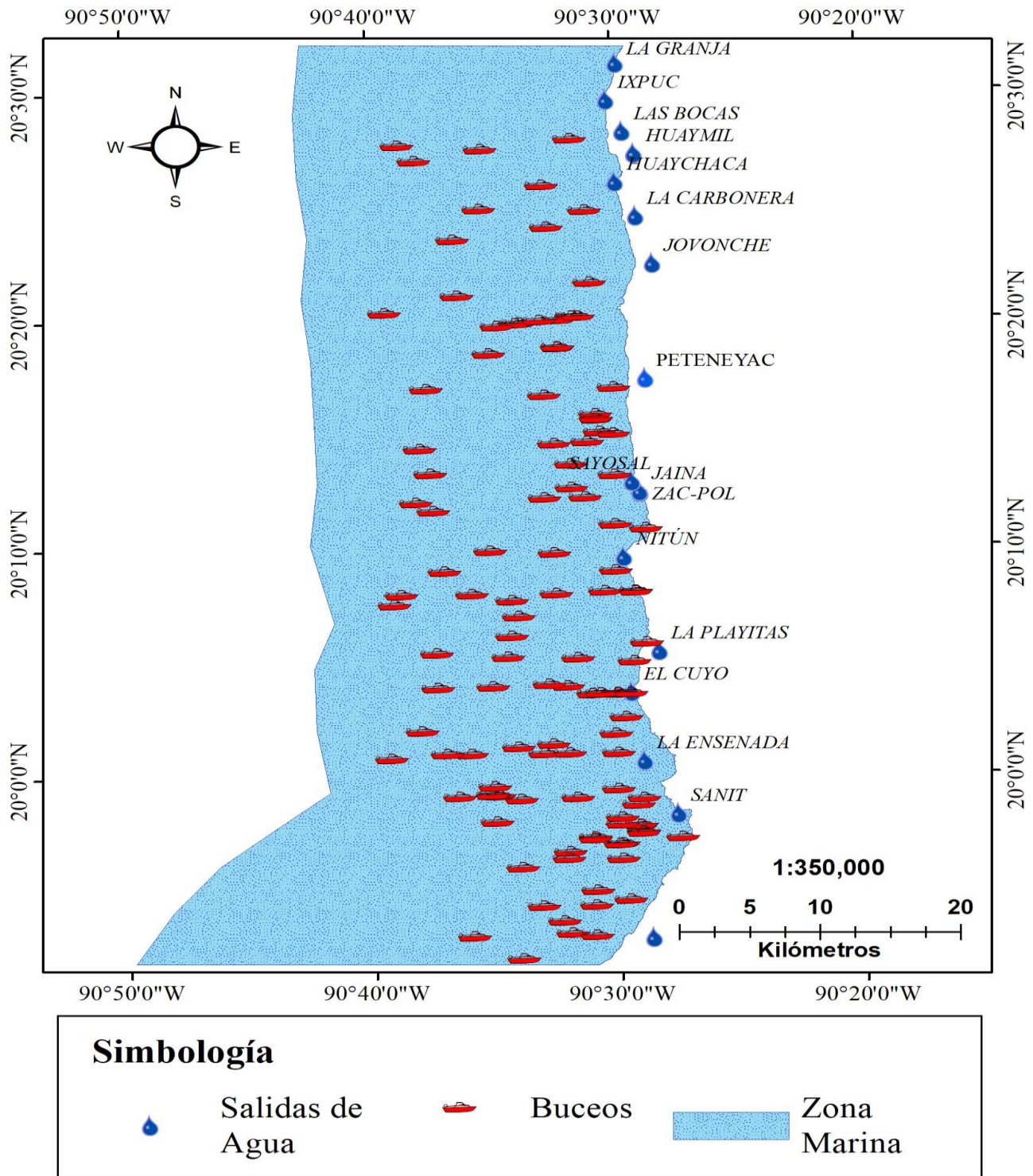


Figura 10. Verificaciones in situ de la composición y cobertura de la VAS en la RBLP mediante buceos.

3.3. TRABAJO DE GABINETE

3.3.1 INTERPOLACIÓN DE VARIABLES COLECTADAS CON LA ECOSONDA HIDROACÚSTICA

Se usó la herramienta *Geostatistical Analyst de ARCGIS 9.1.* para representar las características de los datos de las variables profundidad y altura de la planta, colectadas con la ecosonda hidroacústica. Se aplicaron métodos de interpolación con el propósito de modelar el espacio geográfico del fondo marino de la RBLP (Caloz y Collet, 1997). La interpolación es una estrategia metodológica para generar nueva información a partir de la ya existente (Rossi et al., 1992).

Los puntos espaciales fueron utilizados para generar las isolíneas de la batimetría del fondo marino y de la altura de la VAS. Estas isolíneas, a su vez sirvieron para crear las superficies con variaciones continuas reinterpoladas con el método de redes triangulares conocido como TIN por sus siglas en inglés (Triangulated Interpolation Networks).

Primero, el método de interpolación Kriging Ordinario ha sido ampliamente utilizado en trabajos de geoestadística para representar variables espaciales y requiere de datos independientes que nos permiten definir patrones (Maxwell et al., 2009). Se determina la dependencia espacial mediante un variograma, el cual describe la continuidad espacial de los datos tomados para estimar valores de los puntos no muestreados (Valley et al., 2005). El interpolador genera superficies continuas a partir de datos dispersos para análisis y representación de la información colectada. Estos nuevos valores derivan de los puntos de colecta con menor distancia entre ellos, para que a partir de ellos se represente el gradiente de la información hidroacústica en la RBLP; se usó el modelo esférico porque presentó un menor error en las mediciones con un ángulo de tolerancia y amplitud de la banda (Greenstreet et al., 1997), así como el número de intervalos de distancia (10 *lags*). Se utilizó la función polinómica de segundo grado o cuadrático, esta ecuación es la que mejor funciona para superficies que presentan un relieve variado. Se eligió el número de vecinos (10 puntos) a tener en cuenta en la interpolación, estos tuvieron más peso en la asignación del nuevo valor, es decir, el porcentaje de valor se le asignará al lugar de la predicción. Finalmente se obtuvo una superficie (mapa raster) con el que derivaron las isolíneas transformándolas a vectores. Estos vectores fueron categorizados en 10 intervalos de valores equivalentes (de 0.5). A partir de estos vectores se construyeron nuevos valores por medio del método TIN (Triangular Interpolation

Network) para generar el modelo digital de elevación con la misma resolución espacial que la imagen satelital (20 m) y con un mayor número de categorías de valor con el propósito de “suavizar” la superficie construida. Para construir el modelo raster 3D se utilizó ArcScene 10.3, las capas de la profundidad, las alturas de la planta y la clasificación supervisada de Sentinel 2 (Fig. 18).

En el trabajo de gabinete se utilizaron las diferentes bases de datos que fueron unidas para complementar la información. Para fines prácticos se les denominaron Base 1, Base 2 y Base 3.

La Base 1 fue utilizada con dos propósitos. Por un lado, para la interpolación de datos de profundidad y altura de la planta utilizando el Método de Kriging Ordinario en ArcMap 9.1. Estos resultados se describen en el apartado 4.2.1. donde se explica el procedimiento de obtención de estas capas de información. Para este propósito fueron utilizadas las muestras de los datos completos (364,030 registros puntuales). El segundo propósito fue la generación del mapa de clases de VAS detectadas con Sentinel 2A en la que los registros se redujeron a una selección aleatoria de 7,800 puntos distribuidos en la zona de estudio. Estos puntos representan la información de la composición florística de los videos y de los ecogramas. Algunos de los videos y de los ecogramas no resultaron útiles para describir la composición florística debido a que no eran claros por la turbidez del agua y resultaba confuso interpretar la información. Para el caso de las interpolaciones de las variables profundidad y altura de la planta, no era relevante la especie de VAS por ello se utilizaron todos los registros, contrariamente al caso del mapa de clases de VAS en donde era indispensable conocer la especie en particular. Con la selección aleatoria se caracterizaron las clases de VAS con las variables estimadas por la ecosonda hidroacústica (profundidad, altura de la planta, cobertura y tipo de sedimento) en el software *STATISTICA*.

3.3.2 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS

3.2.2.1 PRE-PROCESAMIENTO

Se descargó una escena satelital Sentinel 2A (S-2A) con fecha del 29 de marzo del 2017 del portal de Copernicus de la agencia espacial europea (ESA). Esta imagen fue elegida por ser de las pocas disponibles para la zona de estudio y encontrarse libre de nubes en su gran mayoría. La Tabla 2 muestra las características de la imagen elegida para este trabajo.

Se realizó un pre-procesamiento de la imagen para eliminar el ruido que pudiera generar en la clasificación por partículas suspendidas como aerosoles, vapor de agua, otros gases de efecto invernadero, que dificultan la visibilidad en la imagen (Chuvieco, 2002); la imagen también está afectada por nubes, brillo y el ángulo del sol al momento de la toma de la imagen (Carruthers et al., 2011). Para reducir esos efectos antes del proceso de clasificación, se utilizó el programa SNAPdesktop para aplicar el algoritmo Sen2cor diseñado por la ESA para la misión Sentinel-2A.

Tabla 2. Información referente a la imagen utilizada para la clasificación de la VAS en la RBLP *fuentes:* (<https://scihub.copernicus>).

Sensor	Cor. Atm.	Fecha Imagen
Sentinel 2A (S-2A)	Sen2cor	29/03/2017
Bandas S-2A	Longitud de onda central (nm)	Resolución espacial (m)
1. Costa aerosol	443	60
2. Azul	490	10
3. Verde	560	10
4. Rojo	665	10
5. Infrarojo cercano (NIR)	705	20
6. Infrarojo cercano (NIR)	740	20
7. Infrarojo cercano (NIR)	783	20

Para la corrección atmosférica se aplicó el algoritmo denominado TOA (Top-of-Atmosphere, siglas en inglés) el cual toma en cuenta nubes (p.e. cirrus), vapor de agua y el espesor óptico de gases denominado AOT (Aerosol Optical Thickness, siglas en inglés) convirtiendo los valores a través de una tabla de transferencia radiativa a BOA (Bottom-of-Atmosphere, por sus siglas en inglés). Con ello, se transformaron los datos crudos de Nivel 1C (niveles digitales ND) a reflectancias (Nivel-2A). El resultado son imágenes atmosféricamente corregidas y remuestreadas a una resolución de 20 m conservando el mismo nivel de precisión de geolocalización. Los datos contienen indicadores de calidad y probabilidad de presencia de nubes y nieve denominados mapas de confianza (Louis et al., 2016). Por último, se aplicó un proceso de normalización de datos, para regularizar las reflectancias a una escala de 0 a 1. Donde 0 es

un valor nulo de reflectancia y 1 es toda la energía reflejada. Esto debido a la definición que presenta S-2A en su resolución radiométrica (32bits) dándonos valores con precisión de hasta 4 dígitos decimales (<https://scihub.copernicus>).

Se realizó una clasificación supervisada utilizando la Base 1 (n=7,800) con el Semi-automatic Classification Plugin (SCP) de QGIS 2.18.11. (Congedo, 2017). Se unieron las bandas espectrales que aportaban información de la VAS (1 a la 7) para obtener una imagen multiespectral y se recortó a los límites de la zona marina de la RBLP.

Se definieron áreas de entrenamiento para el clasificador a partir de la Base 1. Las áreas de entrenamiento son una selección de píxeles que contienen información de la reflectancia recibida por el sensor satelital Sentinel 2A al momento de la captura de la imagen. Esta reflectancia de los objetos de la tierra es denominada comportamiento espectral o “huella espectral” de los mismos (Chuvieco y Huete, 2009). Según comportamiento particular del objeto alcanzado por el sensor, se definen los píxeles con la misma reflectividad o similar comportamiento espectral (Índice de similitud Bray-Curtis). Para dicha selección, se tomó en cuenta un radio de distancia espectral de 0.05 unidades de reflectividad expresada en porcentaje (%). Apoyándonos de la Base 1, a esas áreas de entrenamiento se les asignó una clase de VAS monoespecífica o mixta según sus características espectrales. Las clases informacionales de VAS identificadas por medio de las reflectancias captadas por el satélite Sentinel 2A (S-2A) se decidieron con base en la separabilidad de las firmas espectrales, en función de la composición específica observada durante los registros con la ecosonda hidroacústica, los videos y las verificaciones *in situ* y se organizaron en las siguientes clases de VAS:

- ✓ Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt)
- ✓ Clase 2: *Siringodium filiforme* (Sf)
- ✓ Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA)
- ✓ Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA)
- ✓ Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP)
- ✓ Clase 6: Sin clasificar (S/Clasificar)

Una vez definidas las clases de VAS, se hizo una exploración de los algoritmos disponibles en el plugin

SCP, el que tuvo un resultado más próximo a lo observado en campo y de acuerdo a las referencias (áreas de entrenamiento) fue el de máxima probabilidad, que además es el más utilizado en trabajos de clasificación supervisada (Congedo, 2017). El algoritmo agrupa píxeles de acuerdo a los datos generados en el proceso de entrenamiento asignándolos a categorías definidas que representan las clases de VAS a partir de aquellos píxeles con reflectancias definidas en las áreas de entrenamiento. Se aplicó un “filtro de mayoría” con un área mínima cartografiable de 100 m² con la finalidad de limpiar la imagen de píxeles clasificados aisladamente, efecto también llamado “sal y pimienta” (Chuvienco, 2002). Una vez generado el mapa de distribución de las clases de VAS, se eligió una paleta de colores que representará las clases de VAS. A través de una matriz de porcentaje de similitud Bray-Curtis conocimos las clases que mejor diferencian de las que se confunden entre ellas. Este análisis contempla similitudes en la reflectancia entre grupos de clases (Fyfe, 2003) e identifica aquellas bandas que mejor representan la diferenciación de la huella espectral de las clases de VAS (Palafox-Juárez y Liceaga-Correa, 2017). Cada banda tiene un porcentaje de similitud con su respectiva clase y uno de disimilitud entre clases. Un porcentaje alto indica alta similitud entre firmas espectrales.

La Base 2 (n=143) resultado de las verificaciones *in situ*, fue utilizada para determinar la exactitud de la clasificación de la VAS. Se generó una matriz de confusión entre los puntos de muestreo de los buceos y el producto resultante de la clasificación supervisada. A partir de la matriz de confusión se estimó la exactitud global del mapa (Tabla 4). Se identificaron los valores sobreestimados de una clase ó los errores de comisión que son aquellos que se clasifican incorrectamente según la información de referencia, y los de omisión, aquellos que resultan subestimados al clasificarse en otras clases diferentes a los puntos de control. Con este análisis podemos determinar el grado de exactitud, cuales son las categorías que se confunden entre ellas y obtener una estimación del intervalo en el que oscila el valor de referencia (Fornes et al., 2006). Finalmente, se realizó la prueba estadística de Kappa, la cual considera la probabilidad de que los aciertos en el mapa puedan deberse al azar dado el tamaño de muestra (Chuvienco, 2002).

Después de generar la clasificación con Sentinel 2A, se extrajo una muestra con el plugin “point sampling tool” en QGIS a la Base 1 (n=7,800) para asociarle a cada uno de los puntos la clase de VAS coincidente espacialmente, además de la ya asociada con los videos. Con esta nueva base de datos de clases de VAS (Base 4) se realizó una caracterización general de las variables profundidad y altura de la planta que nos proporciona la ecosonda para describir con mayor detalle la pradera de la VAS en la RBLP. Con ello

logramos identificar la profundidad a la cual se presentan cada una de las clases de VAS, la altura de la planta promedio, los porcentajes de cobertura y tipo de sedimento en el que crecen cada una de las clases de VAS. La información fue analizada en el software STATISTICA.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 RELACIÓN DE VARIABLES AMBIENTALES CON LAS COBERTURAS DE LAS ESPECIES DE VAS.

Las variables ambientales relevantes en el análisis de componentes principales (ACP) se muestran en la Tabla 3, la profundidad reportada para la RBLP coincide con van Tussenbroek et al. (2006) para *Thalassia testudinum* (Z; media 2.32, D.E. 0.95). La profundidad no es significativamente diferente en un año según lo observado por el equipo de pastos de la UAM-I. Se ha adquirido respuestas a amplias concentraciones de fósforo en agua intersticial (PT_s) en diferentes especies de pastos marinos. El fósforo total en agua intersticial en la RBLP obtuvo una media de 27.86 (D.E.+/- 18.57) coincide con las altas oscilaciones reportadas por (Lee y Dunton 2000). Los iones de hidrógeno (pH) son moléculas que permiten llevar a cabo reacciones químicas indispensables para la obtención de carbono inorgánico disuelto disponible para los pastos marinos (Hemminga y Duarte, 2008). La media para el pH RBLP es de 8.25 (D.E.+/- 0.24) reportada como la ideal para *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceánica* y *Zostera noltii* (Invers et al. (1997). La condición de salinidad ideal para el crecimiento de las praderas de PM es de 35 según Ralph y Burchett (1998). La RBLP presenta una mayor salinidad con 39 (D.E. +/- 2.57) y alcanza un máximo de 43.19, lo cual representa una alta oscilación de valores.

Tabla 3. Estadística descriptiva de las variables ambientales registradas en la RBLP en las 38 estaciones de monitoreo (Base 3). Profundidad (Z), Fósforo total en agua intersticial (PT_s), potencial de iones Hidrogeno (pH), y la salinidad (sal).

Abreviatura	Variable Ambiental	Unidades	N	Media	Min.	Máx.	Desviación Estándar.
(Z)	Profundidad	metros	82	2.32	1.02	4.83	0.95
(PT_s)	Fósforo Total en agua intersticial	micromolar		27.86	3.46	91.9	18.57
(pH)	Iones de Hidrógeno (H ⁺)	micromolar		8.25	7.7	8.97	0.24
(Sal)	Salinidad	Unidades prácticas de salinidad		39.43	31	43.19	2.57

El factor 1 en el ACP alcanzó 34.26 % de varianza total, el factor 2 se conformó por una varianza total de 23.05 y el factor 3 obtuvo 15.09 % de la varianza total. Los tres factores sumaron 72.40 % de la varianza total acumulada (Tabla 4). Las variables de tabla 5 explicaron de mejor manera las coberturas de las especies de VAS de la RBLP con valores altos de coeficientes de relación.

Tabla 4. Matriz del análisis de componentes principales. Factores o grupos generados a partir de las variables ambientales.

Factor	Eigenvalues	Varianza Total (%)	Varianza acumulada (%)
1	2.74	34.26	34.26
2	1.84	23.05	57.31
3	1.21	15.09	72.40

Los valores resaltantes del factor 1 fueron la profundidad (*Z*) con un coeficiente de relación de 0.80, porcentaje de cobertura de *Sf* (% Cob *Sf*) con 0.83, el porcentaje de cobertura de *Tt* (% Cob *Tt*) con 0.74 y cobertura de algas (% Cob *MCsp*) con un valor cercano a 0.7 (0.65). Este valor (0.7) es considerado un buen estimador según Tabachnick y Fidell (2013) con un nivel mínimo suficiente de variación total en el análisis de componentes principales.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de variables ambientales analizadas en el ACP. En rojo se observan los valores de las variables ambientales representativas en el ACP. Fósforo total en agua intersticial, potencial de hidrogeno, salinidad porcentaje de cobertura de *Tt*, porcentaje de cobertura de *Sf*, cobertura de *Hw* y porcentaje de Macroalgas (*PT_s*, *pH*, *sal*, % cob *Tt*, % cob *Sf*, % cob *Hw*, y % cob *MCsp*. respectivamente).

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Z	-0.80	0.37	-0.08
PT_s	-0.16	-0.70	0.35
pH	-0.36	-0.76	0.11
Sal	-0.47	-0.71	-0.20
% Cob <i>Tt</i>	0.74	-0.15	0.04
% Cob <i>Sf</i>	-0.83	0.27	0.40
% Cob <i>Hw</i>	-0.23	-0.12	-0.93
% Cob <i>MCsp</i>	0.65	-0.17	0.05

Como resultado se obtuvo una alta relación positiva lineal entre la profundidad (*Z*) y la cobertura *Sf* y por el contrario es negativa para la cobertura *Tt* y la de cobertura de macroalgas (Fig. 11A). Para el factor 2, no se refleja una relación entre las coberturas. Mientras que para el caso de la cobertura de *Sf* el vector del fósforo en agua intersticial (*Pt_s*), se aproxima ligeramente (Fig. 11B). Los coeficientes correspondientes fueron de 0.70, 0.76 y 0.71 respectivamente. Por último, el porcentaje de cobertura de *Hw* (% Cob *Hw*)

destacó en el factor 3 con 0.93 con relación negativa con la salinidad, principalmente (ver Figura 11 C) este vector también muestra relación inversa con la cobertura de Sf. Otra variable relevante para esta última especie fue fósforo total en agua intersticial (PT_s).

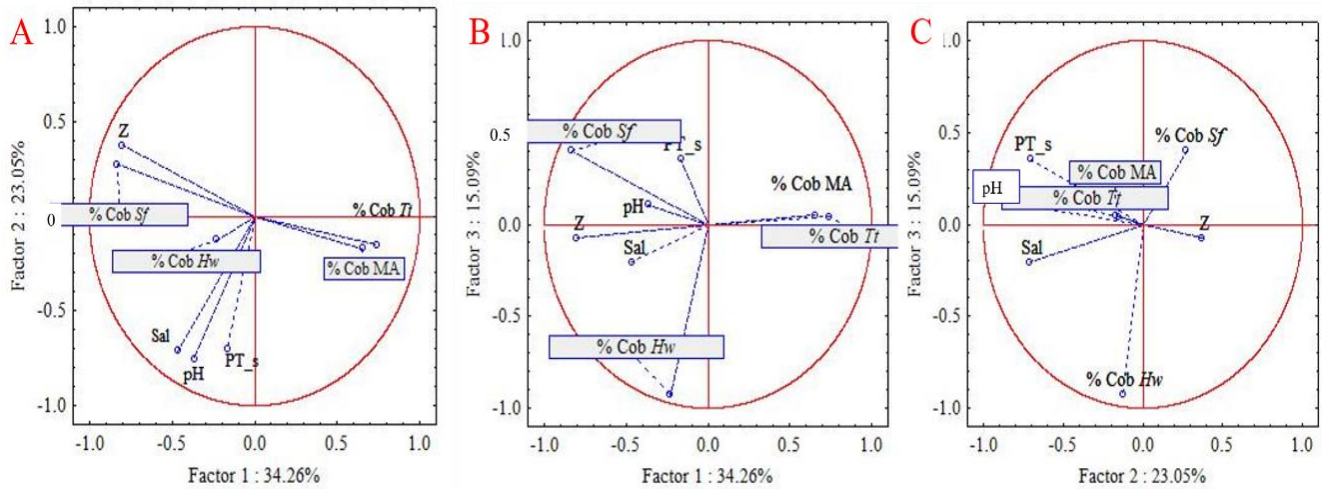


Figura 11. Vectores correspondientes al factor 1, 2 y 3 resultantes del análisis de componentes principales de las variables ambientales (Tabla 6). Fósforo total en agua intersticial, potencial de hidrogeno, salinidad, porcentaje de cobertura de *Tt*, porcentaje de cobertura de *Sf*, cobertura de *Hw* y porcentaje de Macroalgas (PT_s, pH, sal, % cob *Tt*, % cob *Sf*, % cob *Hw*, y % cob MCsp. respectivamente)

4.1.1 VARIABLE PROFUNDIDAD

Una buena productividad de la VAS depende de la correcta absorción de luz por parte de las hojas reflejándose en la distribución y abundancia (Kantún-Manzano, et al, 2018). Cuando hay gran cantidad de sedimentos suspendidos, o exceso de nutrientes en el agua como por ejemplo el nitrógeno, penetra poca luz en la columna de agua, y por ende aumenta el crecimiento y acumulación de plantas epifitas y plancton. Según (Gallegos, 2010a) para la RBLP se ha observado que la presencia de epifitas es muy homogénea entre *Tt* y *Sf*. Y según Mijangos (2018) las hojas de *Thalassia testudinum* de la RBLP no se encuentra limitadas por luz ni por nutrientes como el nitrógeno, en todo caso la RBLP se encuentra limitada por fósforo en agua intersticial y solo se ve afectada la cobertura de *Hw*. La cual crece principalmente cerca de la ciudad de Campeche y en los afloramientos de agua dulce en donde justamente se puede presentar la menor transparencia del agua y la mayor fluctuación en los rangos de los valores de los parámetros físico-químicos por descargas de agua subterránea (Kantún-Manzano et al., 2018). En ambientes cercanos

a la costa, la VAS está constantemente recibiendo aportes detríticos sobre todo cuando estos crecen cerca de un río o del mangle. Por lo que las fluctuaciones en los parámetros fisicoquímicos son mayores que aquellos que crecen en la zona más alejadas, provocando que los manchones presenten formas transitorias tal como se reflejó en la cobertura de *Tt* y *MxTtA*. Esto induce a cambios en su distribución, crecimiento y cobertura, pero no significa que aquellos que crecen en zonas más expuestas al oleaje y profundas no presenten este patrón, pero esto puede deberse a otras variables (Kilminster et al., 2015). A diferentes latitudes en la Tierra los requerimientos de luz solar también varían entre especies (Lee et al., 2007). Para *Hw*, *Sf* y macroalgas se ha observado que se requieren menor cantidad de luz *Tt* (Hotaling-Hagan et al., 2017, Carter y Knapp, 2000). Estas observaciones de ven reflejadas en las profundidades a las que están creciendo cada una de las especies en la RBLP, por un lado, *Tt* en lo menos profundo y por el otro *Sf* en la mayor profundidad.

4.1.2 FÓSFORO TOTAL EN AGUA INTERSTICIAL

Lee y Dunton (2000) reportaron en la bahía de Corpus Christi, Texas USA, 24 micromolar (μM) de fósforo en agua intersticial y en la Laguna madre, estado de Tamaulipas, México se registraron 15 μM de fósforo en agua intersticial mientras que para la RBLP se reportó una media de 27.86 (D.E. 18.57), estos valores son muy variantes entre sitios. Sin embargo, los pastos marinos pueden ser muy tolerantes a fluctuaciones. Aseguran sus concentraciones son menores a las reportadas por Short et al. (1990) y Fourqueran y Zieman, (1992). Lee y Dunton (2000) enriquecieron el medio ambiente de los pastos marinos con fertilizantes nitrogenados y fosfatados notando un incremento en la densidad de los haces de las hojas de los PM que con respecto la concentración control (3 μM). Concluyen que hay poco efecto en el crecimiento de hojas y en la biomasa; sin embargo, se observaron plantas más pequeñas en Laguna madre que en la bahía de Corpus Christi justo donde fue más baja la concentración de fósforo. Al menos en las especies *Tt* y *Sf*, no se encontró que de territorios ocupados por una u otra estuvieran separados por causa por las concentraciones de los parámetros físico-químicos medidos. Solo *Hw* mostró ser más sensible a este parámetro.

4.1.3 PH Y SALINIDAD

El suelo de naturaleza kárstica con descargas de agua dulce del sitio altera la alcalinidad (presencia de iones hidrógeno) y las sales disueltas reflejándose en la menor cobertura de *Hw* (Kantún-Manzano et al., 2018). La condición de salinidad ideal para el crecimiento de las praderas de PM es de 35 ups según Ralph y Burchett (1998). No obstante, los pastos se han adaptado fisiológicamente para tolerar un rango de 5-45 ups, como es el caso de *Halophila ovalis* con la cual se experimentaron diferentes condiciones de salinidad por debajo y por arriba de este promedio en Sydney con buenas respuestas y poco daño en su estructura fotosintética.

Kantún-Manzano et al., 2018 determinaron un promedio menor de salinidad en un sitio con descargas de agua subterránea que en sitio sin presencia de descargas en Yucatán. En Dzilam de Bravo (donde hay descargas de agua subterránea) determinaron 34.7 de salinidad y en el sitio de control (retirado a 15 km de Dzilam de Bravo), se presentó una salinidad promedio de 23.1 ups y este último sitio presentó valores homogéneos de salinidad que en el sitio con descargas de agua subterránea. Para la RBLP, el promedio de salinidad fue mucho mayor que el reportado por ellos para Yucatán (39.43; D.E. 2.57) y resultó determinante en la presencia de *Hw*. No obstante, a estas diferencias se puede decir que para la RBLP la menor salinidad se encontraría en las zonas cercanas a los aportes de agua dulce mientras que en zonas más profundas y/o lejanas a estos aportes de agua presentarían mayores valores de salinidad. Esto nos puede indicar que la salinidad en la RBLP puede llegar a ser muy alta causando estrés en la VAS sobre todo la que se desarrolla en áreas de la zona media de la reserva resultando en la variación de la composición florística, sobre todo si tomamos en cuenta la variación temporal e interanual (Patrick et al., 2017). Otra desventaja de estrés en las hojas de los pastos marinos puede ser que la condición reproductiva de los PM se ve afectada y reflejada en la diversidad de los mismos con valores de salinidad fuera de los rangos óptimos (Kahn y Durako, 2006). En las regiones costeras se presentan cambios en la salinidad debido a la descarga de agua y de las lluvias frecuentes y/o por huracanes, alterando el afluente y la cuenca (Ralph, 1998).

En Port Phillips Bay en Australia, se ha observado que existe un balance entre las salidas de agua costeras y la evaporación manteniendo los niveles de salinidad en media anual de 34.6-36.8 para datos colectados del 2008 al 2011, no obstante, en periodos de secas y lluvias si existe una variación en los niveles (Crockett

y Keough, 2014). Recientemente en la costa de Louisiana se determinó que la salinidad es un importante predictor de las tasas de acumulación de carbono a largo plazo. Se observaron descensos significativos en la acumulación de carbono a corto plazo con aumento de la salinidad media anual de las aguas superficiales (Baustian et al., 2017).

Invers et al. (1997) publicaron variaciones diarias entre 8 a 9 de pH de la cobertura de *Cymodocea nodosa*, *Posidonia oceánica* y de *Zostera noltii*. En valor máximo de 9, estas especies disminuyeron su potencial fotosintético por cambios en la disponibilidad de CO₂ disuelto. La RBLP presentó 8.25 (D.E. +/-0.24) por lo que se podría intuir que no es el caso que presentó Invers et al. (1997).

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS CLASES DE VAS DETECTADAS POR PERCEPCIÓN REMOTA HIDROACÚSTRICA.

4.2.1 PROFUNDIDAD Y ALTURA DE LA PLANTA

En la caracterización las variables profundidad y altura de la planta, en todas las clases digitales de VAS, presentaron diferencia significativa. Sin embargo, las que presentaron las mayores diferencias fueron las clases 1 (*Tt*), 2 (*Sf*) y 3 (*MxTtA*). Las medias de la profundidad para la cobertura de *Tt* y *MxTtA* reflejan que se encuentran en las zonas más someras de la RBLP (Fig. 12, 1A) (-1.91 hasta -2.24 m; D.E. 0.52-0.80 m; Tabla 6A en Anexos). La clase 2 de (*Sf*) que se encuentra en las zonas más profundas con un rango mínimo de -1.60 a uno máximo de - 5.38 m (D.E. 0.74). Mientras que las clases 4 (*MxPA*) y 5 (*MxPP*) se presentan indistintamente a todas las profundidades desde los mínimos de 0.83m a los máximos valores de -5.15 m (D.E. +- 1.10 y 0.98 respectivamente). Estos resultados tienen relevancia en los altos porcentajes de cobertura obtenidos para todas las clases de VAS ya que la profundidad está relacionada con la claridad del agua, por lo que una buena penetración de luz permite una expansión de la VAS a mayores profundidades (Bin Zhu et al., 2007).

Las alturas de la planta es un indicador del espacio ocupado verticalmente y una variable que se relaciona con la profundidad y la claridad del fondo marino (Maceina et al., 1984). Las alturas de la planta en la RBLP son significativamente diferentes y los valores mínimos de la altura de la VAS la presentan las clases *Tt* y *MxTt* con de 0.22 m y 0.25 m respectivamente (Figura 12; 2B). A menor altura de la planta menor profundidad, este es el caso de la zona cercana al manglar donde estas clases se están desarrollando.

De forma inversa, a mayor profundidad mayor altura de la planta, el valor máximo lo alcanzó la clase de *Sf* con 1.15 m (Tabla 6A en anexo); las variaciones en la altura de la planta de la clase 4 (MxPA) reflejan la presencia de la mayor diversidad de especies sobre todo de macroalgas que son las que presentan diversos tamaños, generalmente de menor altura que los pastos marinos. La clase 5 (MxPP) presenta un rango amplio de variaciones en la altura de la planta (0.10-0.65 m) pero estos valores son menores que los de la clase 4, reflejando la presencia solo de pastos marinos, principalmente de *Tt* y de *Sf*, las cuales en su forma monoespecífica, resultaron con valor de medias dentro de estos mismos rangos de variación.

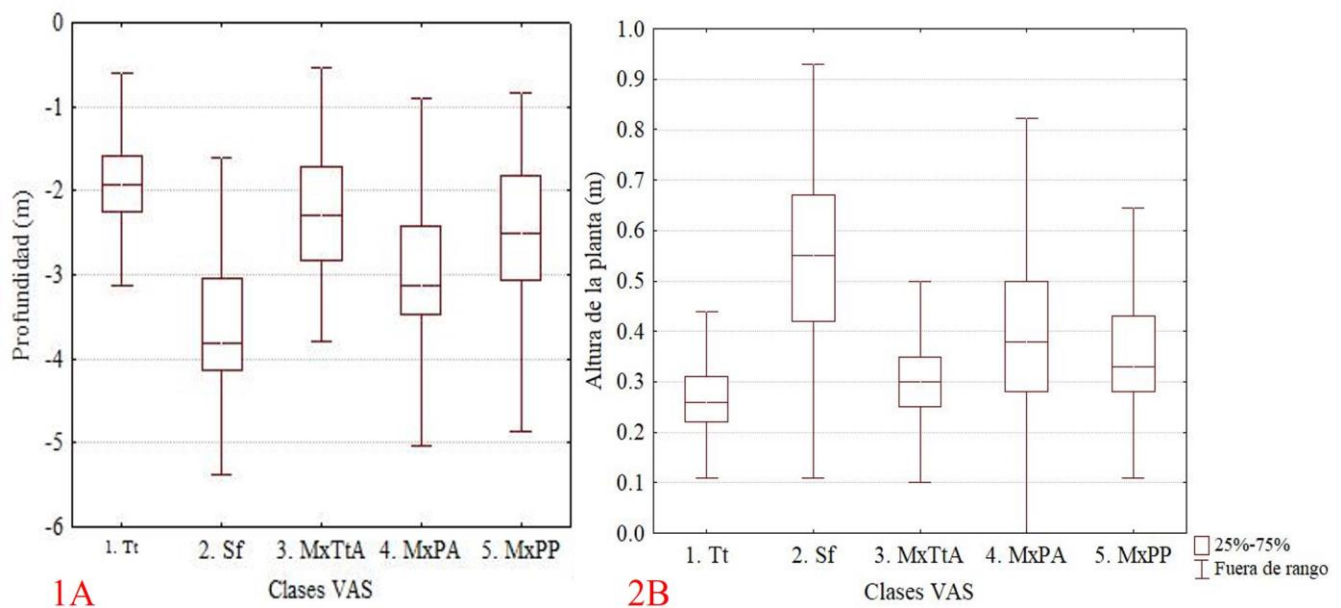


Figura 12. Distribución de las variables profundidad (1A) y altura de la planta (2B) por clases de VAS. En el eje X se observa Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*), Clase 2: *Syringodium filiforme* (*Sf*), Clase 3: *Tt* y macroalgas (*MxTtA*), Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y macroalgas (*MxPA*) y Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (*MxPP*). En 1A. En el eje Y. Observamos el gráfico de “caja y bigotes” con la tendencia central que presentaron cada una de las Clases a diferentes profundidades. En el eje Y. En 2B se señalan las diferencias en la tendencia central para la variable altura de la planta en cada una de las clases.

4.2.2 COBERTURA DE LA VAS

En cuanto a la cobertura de la VAS, las frecuencias (F) son altas pero muy variables para todas las clases de VAS. Todas las clases presentan altas frecuencias de cobertura, de 10% a 100%. Sin embargo, las mayores frecuencias de cobertura varían en un intervalo de 55 a 100%. Lo que nos indica que la cobertura fue muy continua para todas las clases de VAS con muy abundante dosel, mientras que por el contrario las frecuencias más bajas (10 a 55 porcentaje de cobertura) las presentan las clases 1 y 3, lo cual nos indica que si hay espacios con manchones transitorios sobre todo en la parte menos profunda pegada a la costa donde se detectaron estas dos clases (Figura 13). A una distancia de 10 km en dirección a mar adentro, en donde domina las clases 2 (*Sf*), 4 (MxPA) y 5 (MxPP), esta es el área con mayor cobertura. La cobertura de VAS en la RBLP fue lo que se detectó con percepción remota, tal como fue el caso de las especies *Enhalus acoroides* (*Ea*), *Thalassia hemprichii* (*Th*) y *Halophila ovalis* (*Ho*) las cuales fueron diferenciadas por su mayor grado de porcentaje de cobertura, biomasa y profundidad (Koetsin et al., 2016). Otra característica con la que se identificó la especie *Halophila ovalis* fue por las diferencias en la morfología en comparación con *Ea* y *Th*. Caso contrario al de *Halodule wrightii* en la RBLP, la cual no se pudo identificar. La extensa cobertura tanto de *Tt* como de *Sf* y las profundidades de la RBLP influyeron en diferenciarlas con buena fiabilidad.

F

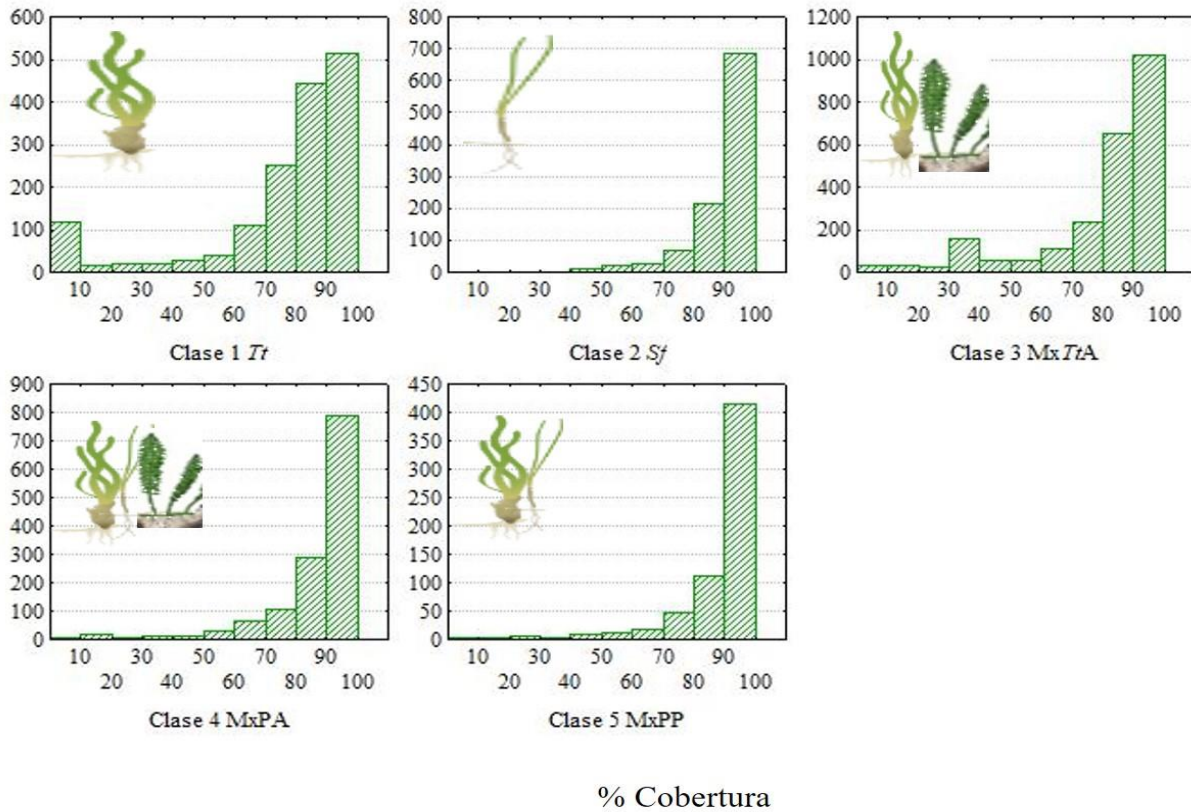


Figura 13. Porcentaje de cobertura encontrada en cada clase de VAS, según frecuencias observadas (F). Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt), Clase 2: *Syringodium filiforme* (Sf), Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA), Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP).

La extensión en la cobertura de la VAS está relacionada con variables horizontales y verticales de la columna de agua y las redes tróficas tienen complejos cambios de respuesta al medio ambiente (Thiesfeld et al., 1989). La variable cobertura presenta cambios a través del tiempo, variando año con año la según las condiciones en los alrededores, como muestra el caso de Sodus Bay en Estados Unidos de América. Estudio realizado por Bin Zhu et al. (2007), en donde aumentó la cobertura en 5 y 5.3 km² entre 1999 al 2001, y disminuyó para 2002, justo lo ganado solo 3 años antes. Los autores atribuyen un cambio en la profundidad justo en este último año lo cual les permitió observar la relación que existe entre profundidad y área de cobertura de VAS.

4.2.3 TIPO DE GRANO SEDIMENTARIO

Los tipos de grano sedimentario más frecuentes en la RBLP son las arenas formadas de compuestos carbonatados característicos de la zona de estudio (Valdez-Cruz, 2016). Las partículas suspendidas de la columna de agua son filtradas a través del follaje del pasto quedando atrapados y acumulándose lentamente. Esto mejora el suelo permitiendo el secuestro de carbono (Kennedy et al, 2010). En la Figura 14 se muestra la distribución del tipo de grano sedimentario (TGS) que se identificó para cada clase de VAS con la ecosonda hidroacústica. Los TGS quedaron representados de la siguiente manera:

- 1: Tipo de grano sedimentario fino
- 2: Tipo de grano sedimentario medio
- 3: Tipo de grano sedimentario grueso

Clases 1 (*Tt*) y 3 (*MxTtA*) se desarrollan en sedimentos clasificados de acuerdo con la dimensión fractal de Tipo 2 y 3 en contraste con clase 2 (*Sf*), la cual prefiere los suelos con texturas menos complejas (Tipo 1). Las clases 4 (*MxPA*) y 5 (*MxPP*) se presentan en los 3 tipos de sedimentos indistintamente. Una parte importante del tipo de grano sedimentario 2 y 3 es que se presentó en todas las Clases de VAS, excepto en *Sf*. Lo cual nos indica que la distribución del tipo de sedimento es homogénea en toda la zona de estudio con excepción en la parte central de la reserva donde crece *Sf*. Los análisis de laboratorio llevados a cabo por el equipo de pastos marinos de la UAM-I han determinado que la distribución de los sedimentos en la RBLP es primordialmente arenas de medias a gruesas (Valdez-Cuz., 2016). La presencia de estos tipos de sedimento es coincidente con las características geomorfológicas y con la composición florística de la zona de estudio, tal como observó Brandes et al. (2002) en su análisis de sedimentos encontraron acumulación de carbonatos de origen de biomasa de macroalgas como *Halimeda*, *Penicilium*, *Udotea* y de diversos grupos bentónicos mismas especies que componen la RBLP. El sedimento es un elemento que describe diferencias entre hábitat (Crockett y Keough, 2014). La estructura y la forma de las macrófitas aumentan la complejidad del hábitat, desempeñando un papel crucial en la promoción de la colonización de los invertebrados asociados. Estos organismos por lo general son más abundantes en sedimentos con VAS que en suelos desnudos. Se ha observado que hay una variación de la composición de estos organismos según el tipo de grano y la composición vegetal del manchón. Por ejemplo, en plantas de mayor tamaño y estructuralmente más complejas, se presentan comunidades meiofaunales distintas que

aquellos que se encuentran bajo plantas pequeñas y simples (Liao et al., 2015).

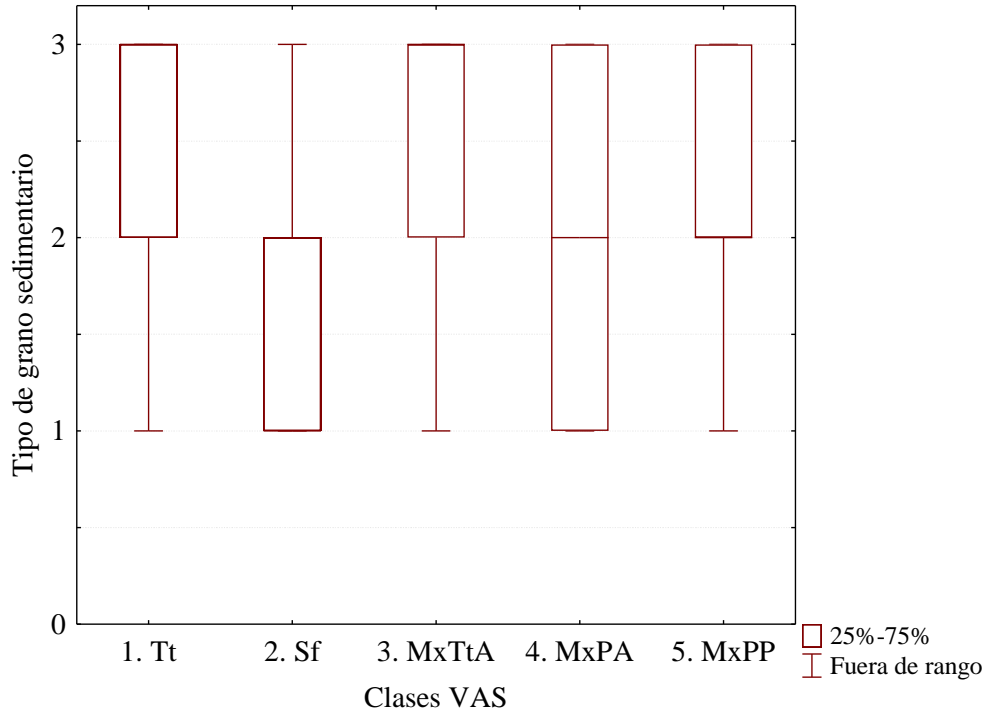


Figura 14 . Distribución de las categorías de TDS por clase de VAS.

4.3 INTERPOLACIÓN DE PROFUNDIDAD Y ALTURA DE LA PLANTA CON LA ECOSONDA HIDROACÚSTICA

En las siguientes páginas se muestran los resultados del proceso de interpolación de las variables profundidad y altura de la planta. En Fig. 15 se muestra la batimetría del fondo marino en la RBLP obtenida de los transectos paralelos y perpendiculares realizados con la ecosonda hidroacústica (Base 1 registros completos). Los colores café claro pertenecen a las zonas menos profundas o someras correspondientes con las clases *Tt* y *MxTt* y por el contrario los tonos oscuros a las zonas con mayor profundidad correspondientes con las clases 2, 4 y 5 (*Sf*, *MxPA* y *MxPP*), respectivamente. Los valores de profundidad muestran incrementos graduales en el relieve por al menos 24 km lejos del manglar y es muy homogéneo. La Fig. 16 señala la altura de la VAS obtenida con la ecosonda hidroacústica en la RBLP. En

colores verde limón claros a oscuros corresponden a las zonas de menor altura de la planta coincidentes con la menor profundidad y con las clases Tt y $MxTt$ y por el contrario los tonos azul claro a oscuro corresponden a las zonas con mayor altura de la planta y con la mayor profundidad en donde se hayan plantas de la clase Sf . Es justo al centro de la zona marina de la RBLP (azul oscuro) donde se encuentra los valores máximos en ambas variables.

La superficie continua de las variables profundidad y altura de la planta representan bien la información visualmente, sin embargo, no fue de utilidad para relacionar los patrones de distribución espacial porque la información no mostró estructura espacial (Hengl, 2007). El interpolador calcula valores entre puntos alejados, no obstante, entre más lejanos se encuentren entre sí, el error de medición se incrementa y la información puede llegar a ser inconsistente y poco confiable (Calbk et al., 2002). Este tipo de estrategias metodológicas por interpolación sirven encontrar patrones de distribución espacial (Maxwell et al, 2009). Sin embargo, tienen mejores resultados en pequeñas extensiones para contar con la menor distancia entre puntos vecinos y mayor distribución de la información para tener una mejor aproximación espacial (Hengl, 2007). Para el caso de la RBLP no fue de utilidad esta metodología por la enorme extensión que es difícil de cubrir. Los variogramas no mostraron autocorrelación espacial (Greenstreet et al., 1997; Caloz y Collet, 1997) porque los transectos paralelos y perpendiculares de la red regular realizada en la RBLP, aún se encuentran muy separados entre sí (2 a 3 km) para obtener una superficie con representatividad espacial cercana a la realidad. Aún a pesar de ello se consideró que las superficies creadas por el interpolador, representan bien lo observado en los años de muestreo en el campo. Es por ello, que se muestran los resultados en este apartado únicamente con fines de visualización.

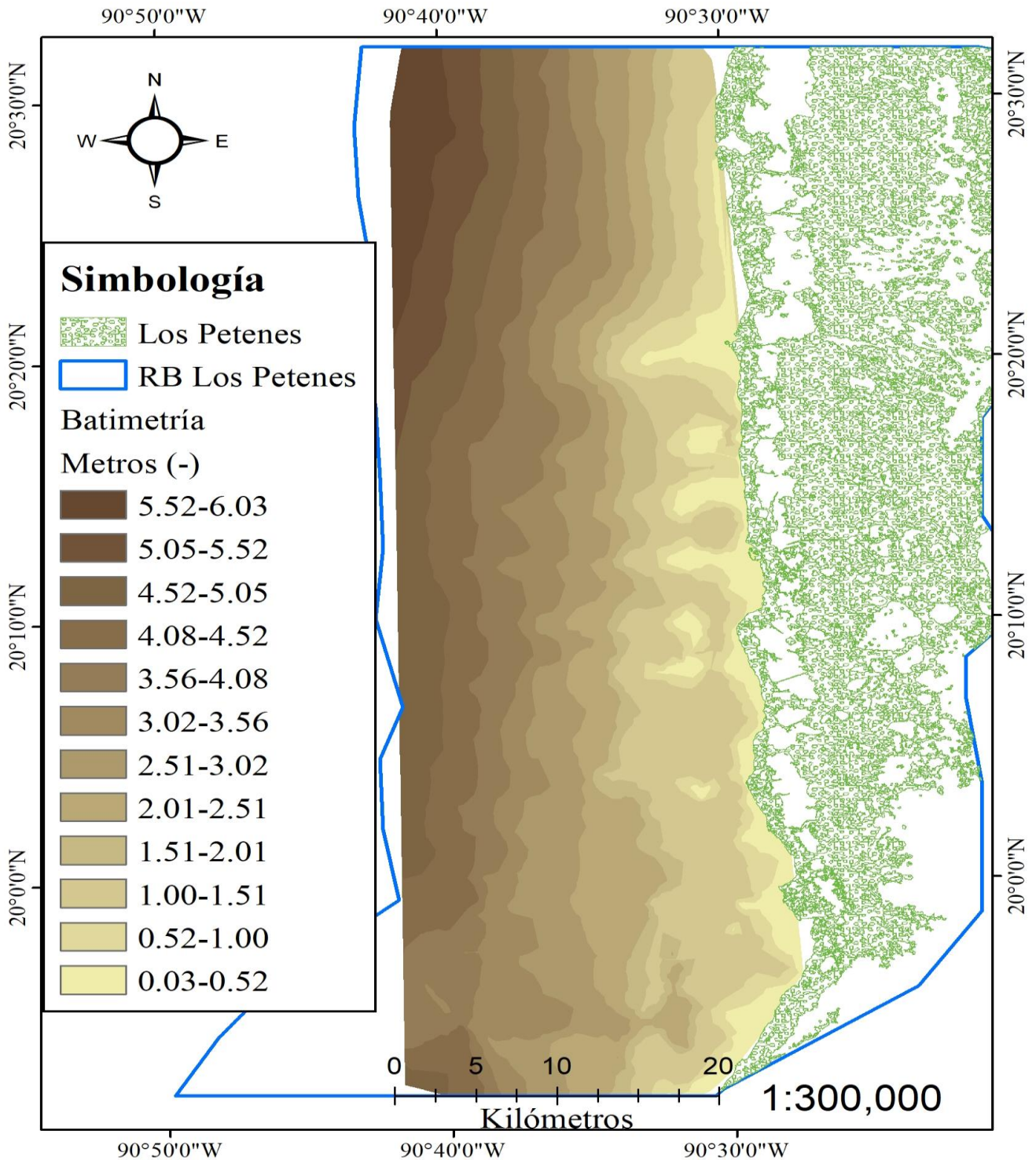


Figura 15. Batimetría del fondo marino en la RBLP obtenida de los transectos paralelos y perpendiculares por medio de interpolación de datos. Los colores café oscuro corresponden a las zonas menos profundas y por el contrario los tonos claros corresponden a las zonas con mayor profundidad.

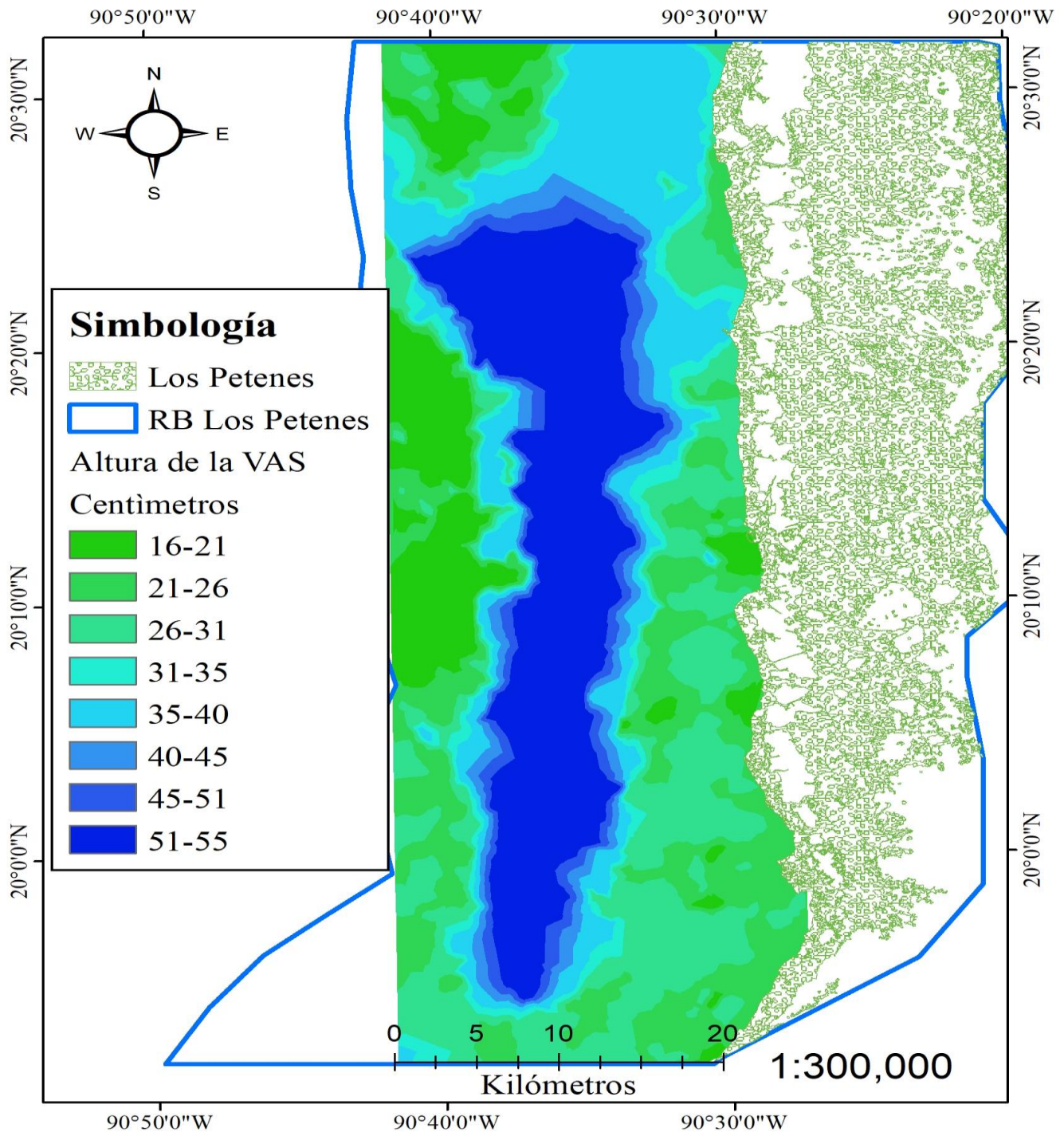


Figura 16. Altura de la VAS en la RBLP obtenida de los transectos paralelos y perpendiculares por medio de interpolación de datos. Los colores verdes limón claros a oscuros corresponden a las zonas menor altura de la planta y por el contrario los tonos azul claro a oscuro corresponden a las zonas con mayor altura de la planta.

4.4 PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA VAS EN LA RBLP

La extensión de la VAS en la RBLP es de 1,514 km² correspondiente al 83% del total de la zona marina de la reserva. La extensión de la VAS de la RBLP es tan grande que corresponde a 56% de la suma calculada por Gallegos et al. (2012) para todo el estado de Veracruz, Laguna de Términos y Champotón en el estado de Campeche, Dzilam de Bravo y San Felipe en el estado de Yucatán. La VAS en casi todo el estado de Quintana Roo desde Laguna de Yalahau y Cabo Catoche bajando por el sur del estado hasta Akumal, incluidas las islas del caribe mexicano como Cozumel, Mujeres y Contoy (Gallegos et al., 2017) corresponde a una cuarta parte de la calculada para la RBLP. La extensa distribución de la VAS en la RBLP nos indica que es un área que resguarda al menos la mitad de carbono contenido en todas las áreas con presencia de VAS en el Golfo de México (Gallegos et al., 2012). Lo anterior tiene relevancia en el almacenamiento de carbono azul en la reserva. Oreska y colaboradores (2017) en la bahía de Chesapeake en los Estados Unidos de América calcularon 1,200 toneladas más de carbono orgánico en áreas cubiertas por pasto marino en los primeros 12 cm del suelo que aquellas con suelo desnudo. En su análisis determinaron que las áreas tributarias al manglar tienen mayor contenido de carbono orgánico y es ahí donde se acumula la mayor cantidad. No obstante, esta acumulación depende de ciertos factores como fondo marino, del patrón de la pradera y la época del año. En la RBLP el fondo marino presenta una pendiente ligera por lo que la profundidad se incrementa gradualmente conforme se aleja del litoral cubierto por manglar. Lo anterior es un factor que hace posible que el carbono orgánico se encuentra bien distribuido a lo largo de la pradera. La temporada de nortes provoca que haya movimientos de masa oceánica permitiendo que se distribuyan los sedimentos y con ello que se fertilice el suelo permitiéndoles extenderse. (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009). Otra cosa relevante en el contenido de carbono en praderas de VAS es el patrón de continuidad de la extensión provocando una mayor uniformidad de estos sedimentos que en aquellas praderas que son transitorias. Adicionalmente, Kilminster et al. (2015) y Oreska et al. (2017) manifiestan que aquellas praderas que son continuas y extensas reflejan la persistencia de la vegetación a lo largo del tiempo y por lo tanto mayor edad como es el caso de *Thalassia testudinum* (*Tt*). Tomando en consideración esta condición de *Tt* y que se encuentra bien distribuida en la RBLP podríamos especular que es un área productiva y rica en alto contenido de carbono azul (McLeod et al., 2011). La continuidad y la gran extensión de los pastos en la reserva también se atribuye a la ubicación geográfica, ya que las corrientes y vientos son tenues comparados con los que presenta el mar caribe permitiendo que sea un área que favorezca el crecimiento. De igual modo, la hidrodinámica del agua

dentro y fuera del manchón difiere significativamente. A mayor turbulencia y movimiento menor acumulación de Corg pero generalmente la densidad de cobertura provoca la atenuación de las corrientes y permite una mayor acumulación (Oreska et al., 2017).

Las Clases de VAS resultantes de la identificación espectral con Sentinel 2A (S-2A) son:

- ✓ Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*): Separación espectral correcta para identificar a esta especie monoespecífica.
- ✓ Clase 2: *Siringodium filiforme* (*Sf*): Separación espectral correcta para identificar a esta especie monoespecífica.
- ✓ Clase 3: *Tt* y *macroalgas* (*MxTtA*): Separación espectral suficiente entre la composición mixta de *Tt* y macroalgas, por lo que se asimilaron como ambas.
- ✓ Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y *macroalgas* (*MxPA*): Insuficiente separabilidad entre la combinación de especies de VAS. Esta clase aglutina a las 3 especies de pastos marinos y macroalgas.
- ✓ Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (*MxPP*): Insuficiente separabilidad entre especies de PM. Esta clase aglutina a las 3 especies.
- ✓ Clase 6: *Sin clasificar* (*S/Clasificar*): Insuficiente información espectral y de campo que permita detectar VAS.

El comportamiento espectral o “huella espectral” de las distintas clases de VAS se muestran en líneas en las 7 primeras bandas del sensor Sentinel 2A (Fig. 17). En general, el patrón de respuesta espectral fue muy similar para todas las clases de VAS tal como observó Thorhaug et al. (2007) en Florida para las mismas especies trabajadas en esta investigación. Los rangos de porcentaje de reflectancia reportados por estos autores (0.03-0.04%), así mismo, los obtenidos por Fyfe (2003) en Australia para *Zostera capricorni*, *Posidonia australis* y *Halophila ovalis* son bajos comparados por los reportados en la RBLP (0.05-0.17%). Esto debido a la reflectividad que provocó la columna de agua sobre todo en la banda azul, en donde se encuentran los valores máximos detectados por Sentinel 2A (0.09 y 0.17 de %).

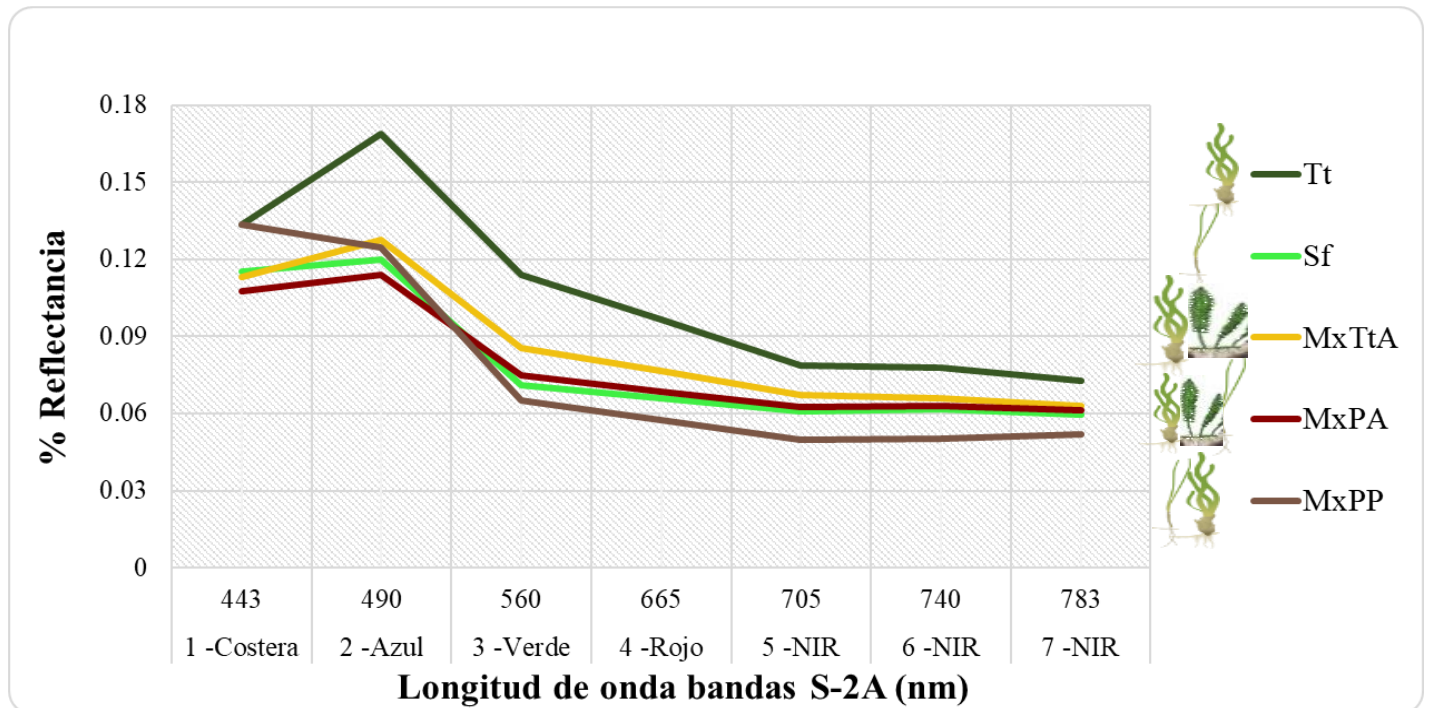


Figura 17. Porcentaje de reflectancia de los promedios de las firmas espectrales de las Clases de VAS detectadas con S-2A en las diferentes bandas del espectro electromagnético. Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt), Clase 2: *Syringodium filiforme* (Sf), Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA), Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP).

La variación en los porcentajes de reflectancias reportados en la figura 17 y los porcentajes de estos autores, en primer lugar, se debe a la diferencia en las técnicas de obtención de las firmas espectrales. La mayor absorción de la luz se presentó en mediciones con un espectrómetro de hojas con especies adaptadas a condiciones de laboratorio en longitudes de onda por arriba de 680 nm (banda roja e infraroja) y los mínimos valores de reflectancia se presentaron en la banda azul (Hochberg et al., 2003), mientras que en condiciones *in situ*, la turbidez del agua provocó la dispersión de la luz y se reflejó en valores mayores de reflectancia en esta misma banda. No hay duda alguna que las reflectancia obtenidas con la imagen Sentinel 2A, muestran principalmente la columna de agua. Otra posibilidad es que el sensor está reflejando información sobre la presencia de fitoplancton y epifitas, las cuales se detectan con mayor éxito con percepción remota en comparación que los PM por su ubicación por encima de estos en la columna de agua (Fyfe, 2003), incluso las partículas sedimentarias, llegan a detectarse mejor que los PM (Hochberg et al., 2003). No obstante, la información de campo nos permitió entrenar al algoritmo de máxima

probabilidad (Lyons et al., 2011). Este algoritmo, es un buen estimador paramétrico ampliamente utilizado en clasificación supervisada (Chuvieco, 2002, Koetsin et al., 2016, Congedo, 2017) y el que mejor resultados generó en los patrones de distribución de la VAS en la RBLP. Palafox-Juárez y Licea-Correa (2017) también mejoraron los resultados de su clasificación de sustratos y vegetación acuática sumergida con video-transectos en el estado de Yucatán.

La especie que no fue posible diferenciar espacialmente y espectralmente de manera monoespecífica en las imágenes S-2A fue *Hw*. En los recorridos de campo si fue localizada en la parte intermareal sobre todo cerca de las poblaciones de *Tt* y/o de *MxTtA*. Por su relación con *Tt*, *Hw* quedó englobada en las clases 1 y 3 por encontrarse cercana a estas dos clases de VAS que se presentan mayormente en la línea costera y aquellas plantas de *Hw*, sobre todo en las zonas más profundas, aproximadamente a 20 km de distancia de la costa, quedaron englobadas en la clase 4 y clase 5 (*MxPA* y *MxPP*) debido a que también fue observada compartiendo espacio tanto con *Tt* como con *Sf*.

Si hubo diferencias importantes en el comportamiento espectral de las clases de VAS en la RBLP sobre todo para las clases 1 y 3 (*Tt* y *MxTtA*), esto debido a la presencia de macroalgas en la clase 3. La huella espectral es diferenciable en ambos grupos de VAS, sobre todo para el caso de la macroalga del género *Halimeda sp.*, (Thorhaug et al., 2007). Esto se debe a las diferencias en el tipo de estructuras fotosintéticas y a las diferentes concentraciones de clorofila-*a* presentes en sus hojas. Lyons et al., (2011) demostraron que el comportamiento reflectivo fue significativamente afectado por las temporadas climáticas porque la presencia de pigmentos en las diferentes especies de VAS varía durante el año.

La mayor separación de la huella espectral en ambos trabajos, Thorhaug et al., (2007) en USA y Fyfe (2003) en Australia, se detectó dentro del rango visible, pero fue mayor a partir de la longitud de onda de 520 a 530 nm y 580 a 600 nm (banda verde y roja), caso similar a lo que detectó Sentinel 2A con la diferencia que para el caso de la banda azul y verde presentó los valores más altos mientras que los valores mínimos en la respuesta espectral variaron de 0.05-0.08 % en las bandas 5 a 7 (rojo e infrarojo cercano, centradas en las ondas 705, 740 y 783 nm respectivamente, resolución espacial 20 m) caso similar a lo que determinó Fornes et al. (2006) con las reflectancias de *P. oceánica* y del suelo rocoso las cuales fueron menores en dichas bandas en un análisis muy similar al desarrollado en esta tesis, bajo la complementariedad de metodologías (satelital e hidroacústica). Es decir que, la huella espectral obtenida en laboratorio no hay manera de obtener valores altos de reflectividad en la banda azul mientras que en la detección satelital es inevitable por la presencia de la columna de agua con fitoplancton y material

sedimentario. En general para todas las clases de VAS, la máxima separación espectral se presentó en el rango del espectro visible, aunque según Fyfe (2003) la diferenciación espectral significativa entre especies de pasto marino solo se da en una pequeña región del color verde del espectro visible. La matriz de porcentaje de similitud Bray-Curtis (Tabla 6) indica alta similitud entre firmas espectrales (100% en la diagonal amarilla) y las disimilitudes entre clases se muestran debajo de la diagonal amarilla. En rojo se resaltan las clases con mayor similitud Bray-Curtis. En esta matriz se observan las comparaciones entre cada una de las clases de VAS. La clase 2 (*Sf*) y la clase 5 (MxPP) obtuvieron 94.31%, seguida de clase 2(*Sf*) y 4 (MxPA) (93.54%) y la clase 3 (Mx*Tt*) y la clase 4 (MxPA) (92.37%), así pues, significa que tienen la mayor similitud espectral y por lo tanto las clases mixtas fueron las que confundió el algoritmo al momento de clasificar las clases de VAS.

Tabla 6 Índice de similitud encontrado entre las respuestas espectrales de las diferentes clases detectadas con S-2A. Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*), Clase 2: *Syringodium filiforme* (*Sf*), Clase 3: *Tt* y macroalgas (Mx*TtA*), Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (MxPP).

% de Similitud entre Clases (Bray-Curtis)					
Clases	1. <i>Tt</i>	2. <i>Sf</i>	3.Mx <i>TtA</i>	4. MxPA	5. MxPP
1. <i>Tt</i>	100	-	-	-	-
2. <i>Sf</i>	77.54	100	-	-	-
3.Mx <i>TtA</i>	87.57	88.99	100	-	-
4. MxPA	80.13	93.54	92.37	100	-
5. MxPP	77.41	94.31	85.11	88	100

Hubo menor confusión espectral o la mayor disimilitud para las clases 4 y 5 (88%). Entre clase 1 y 3 (*Tt* y *MxTtA*) la disimilitud fue de 87.57%, clase 1 y clase 2 fue de 77.54%, y las clases 1 y 5 obtuvieron 77.41%. A menor porcentaje de similitud mayor diferenciación espectral. Lo anterior explica que la mejor diferenciación espectral o menor confusión espectral se presentó para las clase 1 (*Tt*) y 5 (MxPP) y para la clase 1 (*Tt*) y 2 (*Sf*). La mayor confusión espectral resultó entre clases 2 (*Sf*) y 5 (MxPP).

4.5 DISTRIBUCIÓN DE CLASES POR SUPERFICIES

En la clasificación obtenida, la dos primeras clases muestran la cobertura de las especies de pastos marinos dominantes, *Thalassia testudinum* (*Tt*) y *Syringodium filiforme* (*Sf*), que en conjunto suman de manera monoespecífica con 34 % del área cubierta por VAS en la RBLP (Fig. 18). La clase 3 es una asociación mixta de *Tt* y de macroalgas cubriendo 15% del área. Otros géneros con importante cobertura, además de *Caulerpa sp.*, es *Udotea*, *Avrainvillea*, *Penicillus* y *Halimeda*, coincidente con lo reportado por Callejas (2002); Pacheco et al., (2009) para la región de estudio. La vegetación mixta de *Tt* y/o *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) con macroalgas corresponde con 30% de la superficie cubierta (clase 4) y la asociación que engloba a todas las especies de pasto marino, cubren 21% del área cubierta (clase 5).

La Clase 1 abarca 139 km², es frecuente desde el sur de la reserva hasta Sayosal (20.213765°, 90.488490°). Los manchones se ubican cercanos a la ciudad de Campeche extendiéndose en dirección norte a lo largo de la zona costera dentro de una franja de 4 a 6 km paralela a la costa, cercanas a los aportes de agua dulce, similar patrón que fue observado para la VAS en Yucatán (Palafox-Juárez y Liceaga-Correa, 2017). Estas áreas dejan de ser monoespecíficos de *Tt* desde Sayosal a 2 km al norte de las ruinas de Jaina (al centro de la zona marina). A partir de este punto comienza a dominar la clase 3 (MxTtA). La clase 2 (*Sf*) representa un área larga, duradera y densa de la especie *Syringodium filiforme* correspondiente a 360 km² de extensión total de la zona de estudio. El área se encuentra ubicada únicamente en la parte central de la reserva cubriendo en una franja de 5 a 7 km de ancho, siguiendo un patrón continuo de sur a norte ocupando la zona de estudio casi en su totalidad. Estos PM se encuentran perpendicularmente a la línea costera con una distancia de 7 a 9 km aproximadamente, al oeste a continuación de los parches de la clase 1 (*Tt*) y clase 3 (MxTtA).

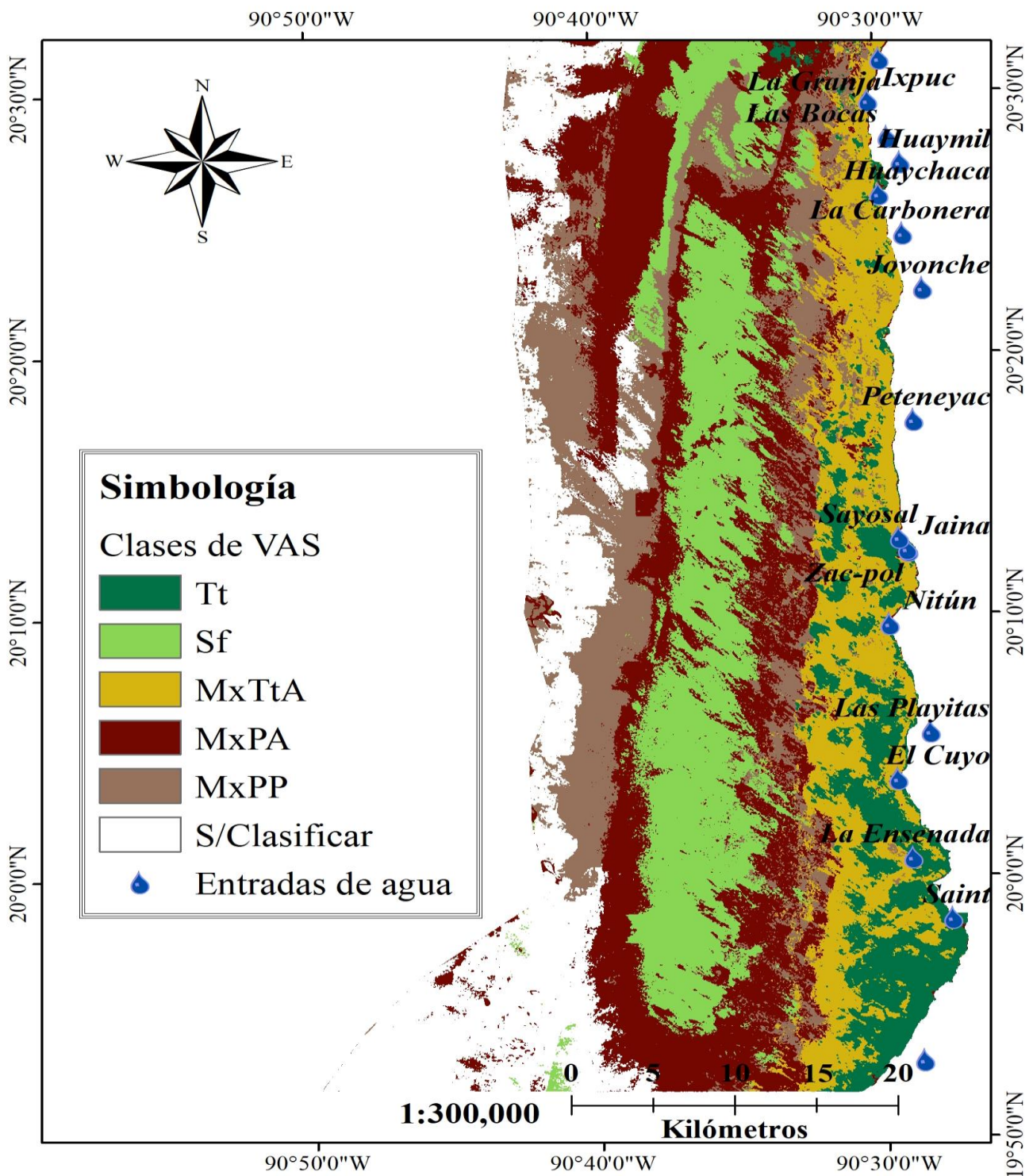


Figura 18. Mapa de los patrones de distribución espacial de la vegetación acuática sumergida. Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt), Clase 2: *Syringodium filiforme* (Sf), Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA), Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP).

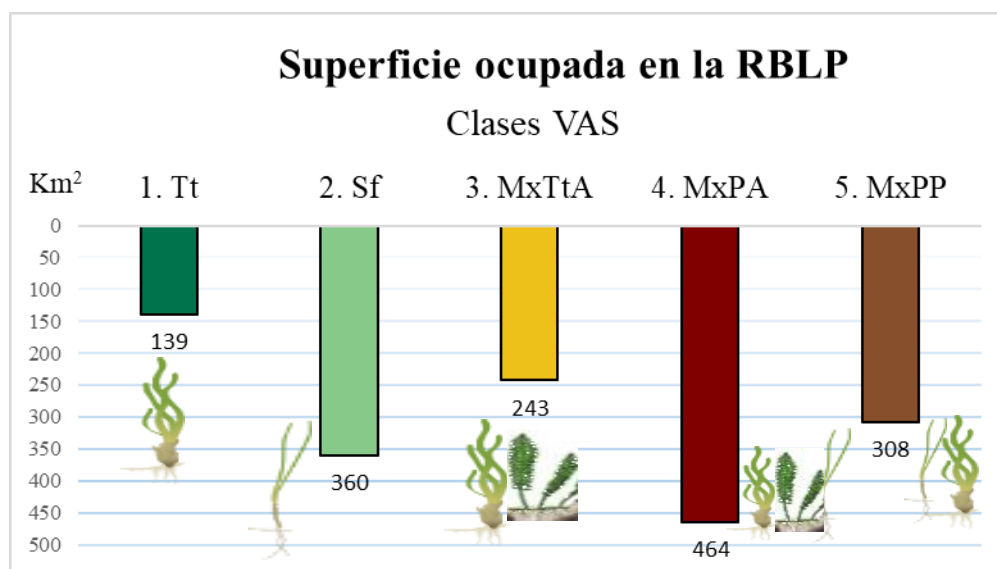


Figura 19. Superficies calculadas (Km²) de las clases de VAS. Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*), Clase 2: *Siringodium filiforme* (*Sf*), Clase 3: *Tt* y macroalgas (*MxTtA*), Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y macroalgas (*MxPA*) y Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (*MxPP*).

La clase 3 representa una mezcla de *Tt* y de macroalgas (*MxTtA*), principalmente *Caulerpa sp.* Los manchones ocupan 13% del espacio con una superficie equivalente a 243 km² (Fig. 19). La cobertura de esa clase es continua, y cubre toda la reserva de sur a norte con una franja paralela a la costa siguiendo los aportes de agua, separada únicamente por la presencia de la clase 1 (*Tt*); Las macroalgas comparten el espacio con *Tt* de manera mayormente continua a partir de Sayosal (al centro de la zona marina) hasta el límite norte de la reserva, en la frontera con la reserva de la biosfera de Celestún, en donde, observaron Palafox-Juárez y Liceaga-Correa (2017) mayor presencia de macroalgas que de pastos marinos. En la parte sur de la reserva no se presenta esta clase (*MxTtA*) en los límites terrestres; es entre “La Ensenada” (20.009784, 90.483109) y “El Cuyo” (20.059863, 9090.491294) al sur de la reserva, donde comienza a presentarse la clase 3 (*MxTtA*) en la orilla de la costa extendiéndose en dirección norte hasta La Granja (20.519033, 9090.495438). Clase 3 (*MxTt*) se encuentra apartada de los límites terrestres de 2 a 3 km sobre todo en la parte sur en donde se encuentra mezclada con la clase 1 (*Tt*).

La clase 4 (MxPA) es una asociación de las especies *Tt* y *Sf*, y en algunas zonas de la costa está presente en menor proporción la especie *Hw*, con las macroalgas del género *Caulerpa sp.*, principalmente. Esta clase ocupa un área de 464 km² correspondiente a 25% del área total. Se ubica bordeando los límites del parche mono específico de *Sf* como si este grupo formara una zona transitoria de división entre la clase 2 (*Sf*) y las clases 1 y 3 (*Tt* y MxTtA). Esta clase (MxPA) tiene una extensión continua al sur de la reserva y en ambos bordes (este y oeste) cercado a *Sf*. No obstante, esta comunidad se dispersa en dirección sur-norte en mayor medida en el borde este, mientras que el borde oeste se mantiene continuo de sur a norte casi cubriendo en su totalidad a la clase de *Sf*.

Por último, la clase 5 (MxPP) corresponde a una composición de *Tt*, *Sf*, y en menos proporción de *Hw*, ocupando 308 km² de superficie correspondiente a 17% del área total. Esta última asociación de especies, la observamos mayormente en el borde oeste de la reserva. Esta clase tiende a copiar el patrón espacial de la clase 4 (MxPA) como si este a su vez fuera una barrera reforzando los bordes externos de la zona de transición entre las clases 4 y 2. Se encuentra distribuida esparcidamente por toda la reserva, principalmente al centro y hacia el mar profundo. En la línea costera se ubican manchones de menor tamaño de composición de *Tt-Hw* en zonas menos profundas cercanas a la ciudad de Campeche y en las salidas de agua “Saint” y “La Ensenada” principalmente. Por otra parte, en zonas más profundas (de 5 a 7 m), comparten el espacio las 3 especies de PM (MxPP) en algunos manchones transitorios. Hemos observado combinaciones únicamente de *Tt-Hw*, pero muy escasa como si comenzaran a establecerse en nuevos terrenos. Se observaron algunos otros manchones de esta misma combinación con *Caulerpa prolifera*. Por la falta de diferenciación espectral de estas composiciones de VAS, fueron agrupadas en la clase MxPP. Finalmente, casi un 11% del total del área marina de la RBLP no fue clasificado debido a falta de información de campo.

Para evaluar la exactitud de la clasificación se elaboró una matriz de confusión entre los datos de las verificaciones *in situ* y las clases de VAS (Tabla 7). El número total de sitios evaluados fue de 143, de los cuales 112 (diagonal en sombreado color gris) corresponden a las coincidencias de ambas fuentes de datos. En el total general se encuentran las sumas correspondientes a los datos asignados de las verificaciones *in situ* y aquellas clases particulares que no fueron coincidentes con la clasificación. La relación entre aciertos y errores en las columnas representa la exactitud del productor mientras que por el contrario la relación entre aciertos y errores en las filas corresponden la exactitud del usuario. El error de omisión corresponde a una sobre estimación de cada clase por parte del algoritmo y se relacionan con los errores de comisión.

Tabla 7. Matriz de confusión para evaluar la exactitud de la clasificación derivada de datos de S-2A. Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*), Clase 2: *Siringodium filiforme* (*Sf*), Clase 3: *Tt* y macroalgas (*MxTtA*), Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y macroalgas (*MxPA*) y Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (*MxPP*).

Datos clasificados a partir de la Imagen Satelital Sentinel 2A							(n)	Exactitud del productor (%)	Error Omisión (%)
Verificaciones <i>in situ</i>	Clases de VAS	1. <i>Tt</i>	2. <i>Sf</i>	3. <i>MxTtA</i>	4. <i>MxPA</i>	5. <i>MxPP</i>			
	1. <i>Tt</i>	44		11	1	3	58	76	24
	2. <i>Sf</i>		15		1	1	17	88	12
	3. <i>MxTtA</i>	2		21	4	1	28	75	25
	4. <i>MxPA</i>		2		22	4	28	79	21
	5. <i>MxPP</i>	1			1	10	12	83	17
Total general	47	17	32	29	18	143	Fiabilidad %	78	
Exactitud del usuario (%)	94	88	66	76	56		Int. Confianza	2.96	
Error Comisión(%)	6	12	34	24	44		Kappa(%)	71	

La fiabilidad de la clasificación digital de VAS de la RBLP fue de 78% con +/- 2.96 de intervalo de confianza y con un valor de coeficiente Kappa de 71%. Es decir, que el 29% de la clasificación es incierta y puede ocurrir por cuestiones de casualidad (Chuvieco, 2002). El error de usuario más alto (44%) corresponde a la clase 5 (*MxPP*) y el más bajo (6%) a la clase 1 (*Tt*). Por otra parte, el error de omisión más alto corresponde a la clase *MxTtA* con 25% y el más bajo a clase 2 (*Sf*) con 12%. En el estudio de Fornes et al., (2006) la exactitud de la clasificación que generaron para *Posidonia oceánica* y algunos

tipos de sedimento resultó satisfactoria según la “matriz de confusión” con fiabilidad de 84% y coeficiente Kappa de 52% con imágenes Ikonos y con una ecosonda Biosonics DE-4000. Koetsin et al. (2016) obtuvieron una clasificación para las especies *Enhalus acoroides* (*Ea*), *Thalassia hemprichii* (*Th*) y *Halophila ovalis* (*Ho*) con un valor de fiabilidad y coeficiente kappa de 90.67% y 84% respectivamente. Este estudio se llevó a cabo con imágenes WorldView-2 y fue validada con fototransectos. La especie *Halophila ovalis* resultó con el menor valor de precisión por su morfología pequeña, caso similar al que ocurre en esta investigación con la especie *Hw*. Por otra parte, aquellas asociaciones mixtas de las dos primeras especies (*Ea*, *Th*) fueron confundidas por crecer en manchones transitorios con poca biomasa lo que provoca que esta se confunda con el suelo desnudo, la señal se vuelve difusa por la presencia de elementos orgánicos e inorgánicos (Fyfe, 2003). Las imágenes satelitales WorldView-2 también fueron utilizadas para clasificar los hábitats bentónicos en aguas someras del ecosistema arrecifal del Caribe mexicano con una exactitud global de 82.3% (Cerdeira-Estrada et al. 2012). En Moreton Bay, Australia, Lyons et al. (2011) detectaron con imágenes Quickbird la cobertura y composición florística de *Halophila ovalis*, *Cymodocea rotundata*, *Halophila spinulosa*, *Syringodium isoetofolium*, *Zostera muelleri* y *Halodule uninervis* y tipos de sedimento con el algoritmo de máxima probabilidad. En su estudio obtuvieron 50% de exactitud en su clasificación, determinando que la reflectancia de los PM variaba de acuerdo a la profundidad y a la densidad de la cobertura. Ellos enfrentaron problemas de confusión principalmente en sus clases con coberturas bajas y suelo desnudo con los mayores errores de omisión y por el contrario con las coberturas altas el error fue menor. Los ejemplos anteriores resultaron en una mayor confiabilidad de la información debido a las altas resoluciones espaciales y radiométricas de los sensores que utilizaron y en las pequeñas áreas de pasto marino que detectaron a diferencia de la magnitud de la extensión que presenta la RBLP. La resolución espacial de S2A es mayor sin embargo resultó adecuada para detectar los patrones de distribución espacial de esta gran extensión de pasto marino en la reserva.

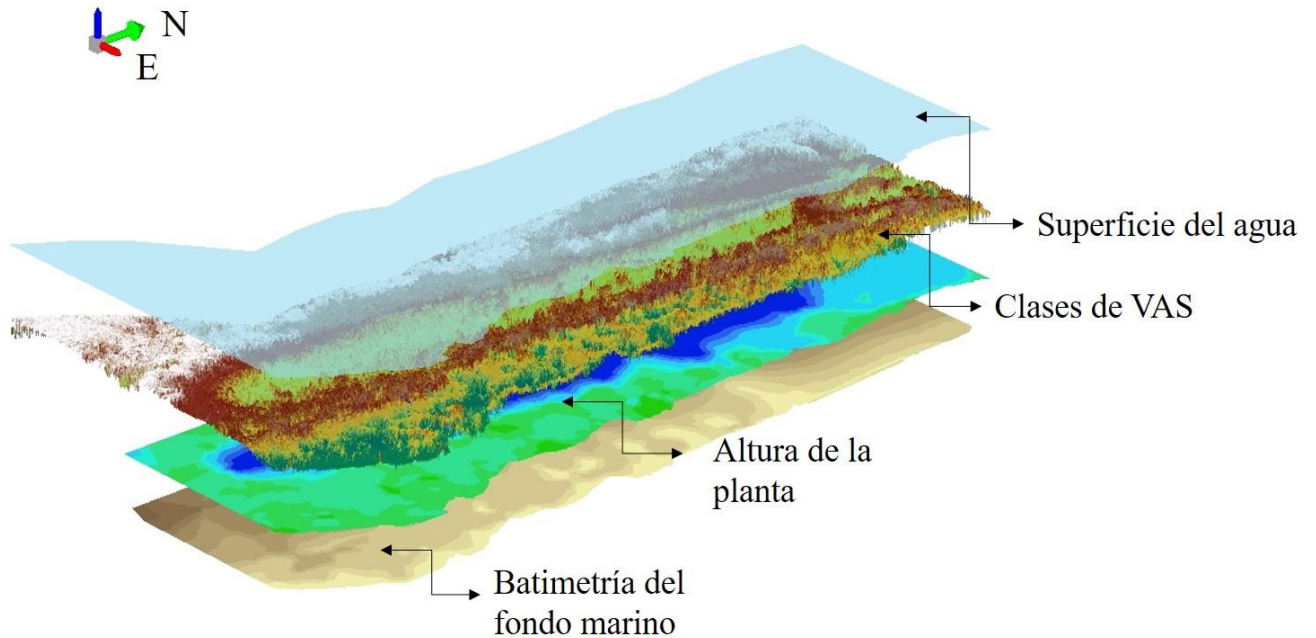


Figura 20. Modelo en 3D del perfil marino en el sitio de estudio construido con la información de percepción remota.

La Fig. 20 conjunta las capas de información de profundidad y altura de la planta antes mencionadas y el mapa de los patrones de distribución espacial de la VAS obtenido de la imagen satelital Sentinel 2A en un modelo 3D que representa el perfil marino verticalmente en la RBLP. La capa superior fue colocada con fines de representación del agua marina por encima de las plantas, pero esta no representa ninguna información proveniente de percepción remota.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En esta investigación se determinaron los patrones de distribución espacial de la vegetación acuática sumergida (VAS), los cuales se visualizaron extendiéndose en dirección sur-norte (latitudinal) a lo largo de la zona costera siguiendo las salidas de agua dulce. La zona marina de la Reserva de la Biosfera de los Petenes (RBLP) es un humedal único de importancia a nivel nacional por que se compone de las praderas sumergidas con la mayor cobertura y continuidad hasta ahora encontradas en todo el Golfo de México y mar caribe.

Las metodologías aplicadas representan una primera exploración valiosa en la determinación de la VAS en zonas someras del Golfo de México, consideradas difíciles de trabajar por la naturaleza de sus aguas comparativamente más turbias que las del mar caribe.

De las variables ambientales analizadas, la profundidad es el factor determinante que separa a las distintas coberturas de las especies. Por otra parte, la explicación potencial que reveló el análisis de componentes principales para diferenciar a la cobertura de *Hw* son las variables salinidad, pH y fósforo total en agua intersticial. Esto es normal en una región costera donde las descargas de aguas dulce, la variación estacional y las lluvias son frecuentes.

Los rangos en las variables físico-químicas reportados en esta tesis se encuentran dentro de los reportados por otros autores para las mismas especies, por lo que de manera general concluimos que los nutrientes en la columna de agua y en agua intersticial son absorbidos eficientemente por los tejidos de los PM manteniendo un equilibrio en las concentraciones, la claridad del agua y permitiendo un sistema ecológico limpio con la suficiente penetración de luz para que se desarrollen las praderas de pasto marino.

Las condiciones hidrológicas y medioambientales son importantes para la distribución y abundancia de PM. Si la calidad y las condiciones químicas del agua son bajas, la población de la VAS disminuye o muere. Es evidente que en la RBLP se presentan estas variaciones a lo largo del año. No obstante, los resultados sugieren que la zona marina de la Reserva de la Biosfera de los Petenes se encuentra en buen estado de salud.

RECOMENDACIÓN

Un primer avance de este estudio es conocer y entender mejor la importancia de cuidar estas praderas, ya que contribuir a su deterioro podría representar una pérdida de la biodiversidad asociada y un recurso con servicios de alto valor. Debemos asegurar que este sumidero de carbono, no libere grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera con una mala planeación, evaluación o una incorrecta toma de decisión que conlleve a su destrucción. Con este tipo de acciones podemos contribuir en los esfuerzos que México está haciendo en su compromiso con el grupo intergubernamental de expertos en la mitigación del cambio climático con la reducción de dióxido de carbono en la atmosfera a futuro. Adicionalmente con estudios de línea base como el que se presentó en esta tesis tenemos mayores posibilidades de conservación con mejores bases científicas para el uso y manejo de este ecosistema costero.

REFERENCIAS

Agraz, C.M.H.; J. Osti S.; C.A. Chan K.; E. Chan C.; D. Gómez R.; G. Requena P. y J. E.Reyes C. (2012). Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: Campeche. Universidad Autónoma de Campeche. Centro de Ecología Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México. Informe Final SNIB- CONABIO. Proyecto FN010. México, D.F.

Armando Fuentes, S., Gallegos, M. E., y Mandujano, M. C. (2014). Demography of *Caulerpa paspaloides* var. *wudermanni* (Bryopsidales: Caulerpaceae) in the coastal zone of Campeche, México. *Revista de Biología Tropical*, 62(2), 729-741.

Avalos Piña, K. 2012. Percepción Remota y sus aplicaciones a la evaluación de la calidad del agua. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM.

Batiuk, R. A., Bergstrom, P., Kemp, M., Koch, E. W., Murray, L., y Stevenson, J. C. (2000). Chesapeake Bay submerged aquatic vegetation water quality and habitat-based requirements and restoration targets: a second technical synthesis. Report for the US EPA, Chesapeake Bay Program Annapolis, Maryland. CBP/TRS 245/00 EPA 903-R-00-014.

Baustian, M. M., Stagg, C. L., Perry, C. L., Moss, L. C., Carruthers, T. J., y Allison, M. (2017). Relationships Between Salinity and Short-Term Soil Carbon Accumulation Rates from Marsh Types Across a Landscape in the Mississippi River Delta. *Wetlands*, 1-12.

Bin Zhu, Dean G. Fitzgerald, Susan B. Hoskins, Lars G. Rudstam, Christine M. Mayer, y Edward L. Mills. 2007. Quantification of Historical Changes of Submerged Aquatic Vegetation Cover in Two Bays of Lake Ontario with Three Complementary Methods. *Journal of Great Lakes Research* 33(1):122-135.

Biosonics Inc, 2007. VBT Guide. Versión 1.12 whit Depth Normalization. Seattle, WA, USA.

Biosonics Inc, 2008. Guía de uso de EcoSAV Software Seattle, WA, USA.

Biosonic. 2012. Assessment of Digital Sonar Technology to map Eelgrass (*Zostera marina*) in the San Juan Islands. Seattle, WA: *Biosonic, Inc.*

Biosonics Inc. 2016. Guía de uso de Visual Habitat Software. Seattle, WA, USA.

Brandes, H. G., Silva, A. J., y Walter, D. J. (2002). Geo-acoustic characterization of calcareous seabed in the Florida Keys. *Marine Geology*, 182(1-2), 77-102.

Callejas, M. 2002. Macroalgas bentónicas de las costas de Tabasco y Campeche. Informe final de Servicio Social, Hidrobiología, UAM-Iztapalapa.

Caloz, R., y Collet, C. (1997). Geographic information systems (GIS) and remote sensing in aquatic botany: methodological aspects. *Aquatic botany*, 58(3-4), 209-228.

Calbk, M.E., D. White, y A.R. Kiester. 2002. Assessment of spatial autocorrelation in empirical models in ecology. In M. Scott, P. Heglund, M. Morrison, M. Rafael, B. Wall, and J.Hoffer, eds. *Predicting Species Occurrences: Issues of Scale and Accuracy*. Island Press. Washington, DC.

Carrillo, L., Palacios-Hernández, E., Ramírez, A. M., y Morales-Vela, B. (2009). Características hidrometeorológicas y batimétricas. *El sistema ecológico de la bahía de Chetumal/Corozal: costa occidental del Mar Caribe*, 12-20.

Carruthers, T.J.B., Longstaff, B. J., Dennison, W.C. Abal, E.G. y Aioi. K. (2011). Measurement of light penetration in relation to seagrass. In: F. Short, R. Coles y C. Short, ed., *Global Seagrass Research Methods*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands.

Carter, G. A., y Knapp, A. K. (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American journal of botany*, 88(4), 677-684.

Campbell, J. E., & Fourqurean, J. W. (2013). Effects of in situ CO₂ enrichment on the structural and chemical characteristics of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Marine Biology*, 160(6), 1465-1475.

Cerdeira-Estrada, S., Heege, T., Kolb, M., Ohlendorf, S., Uribe, A., Muller, A, Garza, R; Ressler, R.; Aguirre, R.; Mariño, I.; Silva, R. y Martell, R. (2012, July). Benthic habitat and bathymetry mapping of shallow waters in Puerto Morelos reefs using remote sensing with a physics based data processing. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International* (pp. 4383-4386). Munich, Alemania

Chuvieco Salinero, E., y Salinero, E. C. (2002). Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Ariel Ciencia. 1ª Edición. Barcelona, España pp. 586.

Chuvieco, E. y A. Huete. (2009). Fundamentals of satellite remote sensing, Boca Ratón, FL, USA: CRC press, 2010.

CONANP (2006). Programa de Conservación y Manejo. Reserva de la Biósfera Los Petenes. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Campeche, México.

Congedo, L. (2016). Semi-automatic classification plugin documentation. *Release*, 4(0.1), 29.

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., Farber, S., y Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.

Christiaen, B., Lehrter, J. C., Goff, J., y Cebrian, J. (2016). Functional implications of changes in seagrass species composition in two shallow coastal lagoons. *Marine Ecology Progress Series*, 557, 111-121.

Christiaen, B., Dowty, P., Ferrier, L., Gaeckle, J., Berry, H., Stowe, J., & Sutton, E. (2016). Puget Sound submerged vegetation monitoring program 2014 report. *Nearshore Habitat Program, Washington Department of Natural Resources, Aquatic Resources Division, Olympia WA. Available for download at: <http://www.dnr.wa.gov/programs-and-services/aquatics/aquatic-science/nearshorehabitat-publications>.*

Crockett, P. F., y Keough, M. J. (2014). Ecological niches of three abundant *Caulerpa* species in

Port Phillip Bay, southeast Australia. *Aquatic botany*, 119, 120-131.

Crockett, P. F., & Keough, M. J. (2014). Ecological niches of three abundant *Caulerpa* species in Port Phillip Bay, southeast Australia. *Aquatic botany*, 119, 120-131.

Cuevas, E., Liceaga-Correa, M., Arellano-Méndez, L., Rincón-Sandoval, L. A., Mexicano-Cíntora, G., Euán-Ávila, J. I., Hernández-Nuñez, H., y Mulsow, S. (2013). Análisis espacial y temporal de campos de dunas submarinas en la costa de Yucatán, México. *Revista de biología marina y oceanografía*, 48(1), 99-113.

Daily, G. C., Matson, P. A., y Vitousek, P. M. (1997). Ecosystem services supplied by soil. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems, 113-32.

Den Hartog, C. (1970). The sea-grasses of the world (Vol. 59, No. 1-4). North-Holland Pub. Co.

Den Hartog, C., y Kuo, J. (2007). Taxonomy and biogeography of seagrasses. In *Seagrasses: biology, ecology and conservation* (pp. 1-23). Springer, Dordrecht.

Dewsbury, B. M., Bhat, M., y Fourqurean, J. W. (2016). A review of seagrass economic valuations: Gaps and progress in valuation approaches. *Ecosystem Services*, 18, 68-77.

Dogan, O. K., Akyurek, Z., y Beklioglu, M. (2009). Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using quickbird satellite data. *Journal of Environmental Management*, 90(7), 2138-2143.

Duarte, C. M., y Cebrian, J. (1996). The fate of marine autotrophic production. *Limnology and Oceanography*, 41(8), 1758-1766.

Espinosa-Avalos, J. (1996). Distribution of seagrasses in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Bulletin of marine science*, 59(2), 449-454.

Fairbanks, C., y Norris, J. G. (2004). Whatcom County submerged aquatic vegetation survey methods. Fairbanks Environmental Services. *Inc Marine Resources Consultants*.

Falkowski, P. G., y Raven, J. A. (2013). *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press.

Fornes, A., Basterretxea, G., Orfila, A., Jordi, A., Alvarez, A., y Tintore, J. (2006). Mapping *Posidonia oceanica* from IKONOS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), 315-322.

Fourqurean JW y Zieman JC, Powell GVN (1992). Phosphorus limitation of primary production in Florida Bay—evidence from C–N–P ratios of the dominant seagrass *Thalassia testudinum*. *Limnol Oceanogr* 37(1):162–171

Fourqurean, J. W., Duarte, C. M., Kennedy, H., Marbà, N., Holmer, M., Mateo, M. A., Apostolaki, E. T., Kendrick, G.A., Krause-Jensen, D y Serrano, O. (2012). Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature geoscience*, 5(7), 505.

Fourqurean, J., Beverly, J., Boone Kauffman, J., Kennedy, H., Lovelock, C., Megonigal, J. P., (Faiz) Rahman, A., Saintilan, N., Simard, M., Alongi, DN., Cifuentes, M., Copertino, M., Crooks, S., Duarte, C., Emmer, I., Giri, C., Herr, D., Hutahaeon, A., Kairo, J., Laffoley, D., Marbà, N., Morris, J., Murdiyarso, D., Quesada, M., Ralph, P., Serrano, O., Valdes, J.L., y Wagey, T. 2015. Coastal Blue Carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes and seagrass meadows. Conservación Internacional (CI), Intergovernmental Oceanographic Commission UNESCO (IOC-UNESCO), International Union for Conservation of Nature (IUCN).Ed.

Grenz, C., Fichez, R., Silva, C. Á., Benítez, L. C., Conan, P., Esparza, A. C. R., Lionel, D., Díaz Ruíz, S., Douillet, P., Gallegos Martínez. M. E., Jean-Francois, G., Gutierrez Mendieta, F. J., Origel-Moreno, M., Marquez Garcia, A. Z., Muñoz Caravaca, A., Pujo-Pay, M., Torres Alvarado, R. Y Zavala-Hidalgo, J (2017). Benthic ecology of tropical coastal lagoons: Environmental changes over the last decades in the Términos Lagoon, Mexico. *Comptes Rendus Geoscience*, 349(6), 319-329.

Herrera-Silveira, J.A., Morales-Ojeda, S.M., 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Mar. Pollut. Bull.* 59, 72-86.

Hochberg, E. J., Atkinson, M. J., & Andréfouët, S. (2003). Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 85(2), 159-173.

Hogarth, P. (2007). *The biology of mangroves and seagrasses*. Oxford. New York. 304 pp.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., Telszewski, M. (eds.) (2014). *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.

Fyfe, S. K. (2003). Spatial and temporal variation in spectral reflectance: Are seagrass species spectrally distinct? *Limnology and Oceanography*, 48(1part2), 464-479.

Gallegos, M.M., Hènandez, C.G., García, P.R., Marquez, L.G. Pérez-Espinosa, I., y Valdez-Cruz, F. 2012. Indicadores del estado de las comunidades de Pastos Marinos en la zona costera del Golfo de México susceptible de ser impactada por hidrocarburos derramados por la plataforma Horizon operada po BP. Informe Final Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. INECC.

Gallegos, C. L., y Moore, K. A. (2000). Factors contributing to water-column light attenuation. p. 16–27. *In* R. A. Batiuk, P. Bergstrom, W. M. Kemp, E. Koch, L. Murray, J. C. Stevenson. R. Bartleson, V. Carter, N. B. Rybicki, J. M. Landwehr, C. Gallegos, L. Karrh, M. Naylor, D. Wilcox, K. A. Moore, S. Ailstock, and M. Teichberg (eds.), *Chesapeake Bay Submerged Aquatic Vegetation Water Quality and Habitat-based Requirements and Restoration Targets: A Second Technical Synthesis*. U.S. Environmental Protection Agency, Chesapeake Bay Program, Annapolis, Maryland.

Gallegos, M.E. (2010a). Efectos del cambio climático sobre las praderas de pastos marinos. En: Botello, A.V.; S. Villanueva-Fragoso; J. Gutiérrez y J.L. Rojas G. (Eds). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 189-210 pp.

Gallegos, M.E. (2010b). Pastos Marinos. En: *La Biodiversidad en Campeche: Estudio de Estado*. Villalobos-Zapata, G. J., y J. Mendoza V. (Coord.). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Campeche, Universidad Autónoma

de Campeche, El Colegio de la Frontera Sur. México. 204-209 pp.

Gallegos-Martínez, M., G. Hernández-Cardenas, I. Pérez-Espinosa, R. Andreas-Ressl, (2017). Comunidad de Pastos marinos del Caribe Mexicano, 2017, edición: 1. Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad y Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México, Mexico.

García, E. (1988). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köpen para Adaptarlo a las Condiciones de la Republica Mexicana. 4ª. *Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.*

Gío Argáez, R. (1996). *Campeche y sus recursos naturales* (No. CA/333.707264 G5).

Grivel Piña, F. (1992). Tablas de Predicción de Mareas. Puertos del Golfo de México y Mar Caribe. *Datos Geofísicos Serie A. Oceanografía. Inst. Gofis. Univ. Nal. Autón. México.*

Greenstreet, S. P., Tuck, I. D., Grewar, G. N., Armstrong, E., Reid, D. G., y Wright, P. J. (1997). An assessment of the acoustic survey technique, RoxAnn, as a means of mapping seabed habitat. *ICES Journal of Marine Science*, 54(5), 939-959.

Gurbisz, C., Kemp, W. M., Cornwell, J. C., Sanford, L. P., Owens, M. S., y Hinkle, D. C. (2017). Interactive Effects of Physical and Biogeochemical Feedback Processes in a Large Submersed Plant Bed. *Estuaries and Coasts*, 1-16.

Hamilton, L. J. (2001). Acoustic seabed classification systems (No. DSTO-TN-0401). Defence Science And Technology Organisation Victoria (Australia) Aeronautical And Maritime Research Lab.

Hernández, A. L. M., y van Tussenbroek, B. I. (2014). Patch dynamics and species shifts in seagrass communities under moderate and high grazing pressure by green sea turtles. *Marine Ecology Progress Series*, 517, 143-157.

Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping* (Vol. 52). Hengl.

Hemminga M.A. y C.M. Duarte. (2008). *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press, New York. 298 pp.

Hotaling-Hagan, A., Swett, R., Ellis, L. R., y Frazer, T. K. (2017). A spatial model to improve site selection for seagrass restoration in shallow boating environments. *Journal of environmental management*, 186, 42-54.

Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M., & Pidgeon, E. (2014). Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses.

Invers, O.; J. Romero y M. Pérez. (1997). Effects of pH on seagrass photosynthesis: a laboratory and field assessment. *Aquatic Botany*. 59:185-194.

Kahn, A. E., y Durako, M. J. (2006). *Thalassia testudinum* seedling responses to changes in salinity and nitrogen levels. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 335(1), 1-12.

Kantún-Manzano, C. A., Herrera-Silveira, J. A., y Arcega-Cabrera, F. (2018). Influence of Coastal Submarine Groundwater Discharges on Seagrass Communities in a Subtropical Karstic Environment. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 1-8.

Kendrick, G., Aylward, M., Crawley, K., y Hegge, B. (2001). Use of towed video to accurately map seagrass assemblages in shallow water (< 10 m) in Owen Anchorage and Cockburn Sound, Western Australia. In *Video sensing of the size and abundance of target and non-target fauna in Australian fisheries-a national workshop* (p. 131).

Kendrick, G. A., Aylward, M. J., Hegge, B. J., Cambridge, M. L., Hillman, K., Wyllie, A., y Lord, D. A. (2002). Changes in seagrass coverage in Cockburn Sound, Western Australia between 1967 and 1999. *Aquatic Botany*, 73(1), 75-87.

Kennedy, H., Beggins, J., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Holmer, M., Marbà, N., y Middelburg, J. J. (2010). Seagrass sediments as a global carbon sink: Isotopic constraints. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(4).

Kenworthy, W. J., Cosentino-Manning, N., Handley, L., Wild, M., y Rouhani, S. (2017). Seagrass response following exposure to Deepwater Horizon oil in the Chandeleur Islands, Louisiana (USA). *Marine Ecology Progress Series*, 576, 145-161.

Kilminster, K. L., Walker, D. I., Thompson, P. A., y Raven, J. A. (2006). Limited nutritional benefit to the seagrass *Halophila ovalis*, in culture, following sediment organic matter enrichment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68(3), 675-685.

Kilminster, K., McMahon, K., Waycott, M., Kendrick, G. A., Scanes, P., McKenzie, L., y Glasby, T. (2015). Unravelling complexity in seagrass systems for management: Australia as a microcosm. *Science of the Total Environment*, 534, 97-109.

Koedsin, W., Intararuang, W., Ritchie, R. J., y Huete, A. (2016). An integrated field and remote sensing method for mapping seagrass species, cover, and biomass in southern Thailand. *Remote Sensing*, 8(4), 292.

Lee, K. S., y Dunton, K. H. (2000). Effects of nitrogen enrichment on biomass allocation, growth, and leaf morphology of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Marine Ecology Progress Series*, 39-48.

Lee, K. S., Park, S. R., y Kim, Y. K. (2007). Effects of irradiance, temperature, and nutrients on growth dynamics of seagrasses: a review. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1-2), 144-175.

Liao, J. X., Yeh, H. M., y Mok, H. K. (2015). Meiofaunal communities in a tropical seagrass bed and adjacent unvegetated sediments with note on sufficient sample size for determining local diversity indices. *Zoological Studies*, 54(1), 1-10.

Libes, S., 2011. Introduction to marine biogeochemistry. Academic Press

Louis, J., Debaecker, V., Pflug, B., Main-Knorn, M., Bieniarz, J., Mueller-Wilm, U., Cadau, E. y Gascon, F. (2016). Sentinel-2 Sen2Cor: L2A Processor for Users. In *Proceedings Living Planet Symposium 2016* (pp. 1-8). Spacebooks Online.

Lyons, M., Phinn, S., y Roelfsema, C. (2011). Integrating Quickbird multi-spectral satellite and field data: mapping bathymetry, seagrass cover, seagrass species and change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007. *Remote Sensing*, 3(1), 42-64.

Marbà, N., Gallegos, M. E., Merino, M., y Duarte, C. M. (1994). Vertical growth of *Thalassia testudinum*: seasonal and interannual variability. *Aquatic Botany*, 47(1), 1-11.

Maceina, M. J., Shireman, J. V., Langeland, K. A., y Canfield Jr, D. E. (1984). Prediction of submersed plant biomass by use of a recording fathometer. *Journal of Aquatic Plant Management*, 22, 35-38.

Maxwell, D. L., Stelzenmüller, V., Eastwood, P. D., y Rogers, S. I. (2009). Modelling the spatial distribution of plaice (*Pleuronectes platessa*), sole (*Solea solea*) and thornback ray (*Raja clavata*) in UK waters for marine management and planning. *Journal of Sea Research*, 61(4), 258-267.

McKenzie, L., Finkbeiner, M. and Kirkman, H. (2001). Methods for mapping seagrass distribution. In: F. Short, R. Coles y C. Short, ed., *Global Seagrass Research Methods*, 1st ed. Amsterdam, The Netherlands.

McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, w. h., y Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10), 552-560.

Mijangos, H. I. A. 2018. Análisis de la productividad de *Thalassia testudinum* Banks ex Kôenig y su relación con los factores ambientales de la Reserva de la Biósfera los Petenes, Campeche. Tesis de maestría: Universidad Autónoma Metropolitana Iztapala, México.

Mutchler, T., y Hoffman, D. K. (2017). Response of seagrass (*Thalassia testudinum*) metrics to short-term nutrient enrichment and grazing manipulations. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 486, 105-113.

Norris, J. G., Wyllie-Echeverria, S., Mumford, T., Bailey, A., y Turner, T. (1997). Estimating basal area coverage of subtidal seagrass beds using underwater videography. *Aquatic Botany*, 58(3-4), 269-287.

Norris, J. G., Fraser, I. E., y Lear, C. (2007). Eelgrass Mapping Along The Elwha Nearshore June and September 2006. *Signature (James G. Norris)*.

Oreska, M. P., McGlathery, K. J., y Porter, J. H. (2017). Seagrass blue carbon spatial patterns at the meadow-scale. *PloS one*, 12(4),

Orth, R. J., Carruthers, T. J., Dennison, W. C., Duarte, C. M., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G.A., Kenworthy, W. J., Olyarnik, S., Short, F. T. Waycott, M. y Williams, S.L. (2006). A global crisis for seagrass ecosystems. *Bioscience*, 56(12), 987-996.

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 & coastal management*, 136, 185-195.

Pacheco M.C., Pacheco-Ruíz, I., Ramos, J., Cetz-Navarro, N. P. y Soto J. L. 2009. Presencia del género *Caulerpa* en Bahía de San Francisco de Campeche, Cam. *Hidrobiológica* 19 (3), 57-69.

Patrick, C. J., Weller, D. E., Orth, R. J., Wilcox, D. J., y Hannam, M. P. (2017). Land use and salinity drive changes in SAV abundance and community composition. *Estuaries and Coasts*, 1-16

Plotnick, R. E., Gardner, R. H., Hargrove, W. W., Prestegard, K., & Perlmutter, M. (1996). Lacunarity analysis: a general technique for the analysis of spatial patterns. *Physical review E*, 53(5), 5461.

Rahnemoonfar, M., Rahman, A. F., Kline, R. J., & Greene, A. (2018). Automatic Seagrass Disturbance Pattern Identification on Sonar Images. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1-10.

Ralph, P. J. (1998). Photosynthetic responses of *Halophila ovalis* (R. Br.) Hook. f. to osmotic stress. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 227(2), 203-220.

Ralph, P. J., y Burchett, M. D. (1998). Photosynthetic response of *Halophila ovalis* to heavy metal stress. *Environmental Pollution*, 103(1), 91-101.

Ray D. Valley, Melissa T. Drake and Charles S. Anderson. 2005. Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic Botany* 81: 13-25.

Rivera-Arriaga, E., y Villalobos-Zapata, G. J. (2005). The coastal zone of Campeche, Mexico: Opportunities for implementing an integrated coastal management framework. *Journal of coastal research*, 184-190.

Rossi, R. E., Mulla, D. J., Journel, A. G., y Franz, E. H. (1992). Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence. *Ecological monographs*, 62(2), 277-314.

Rozas, L. P., y Odum, W. E. (1988). Occupation of submerged aquatic vegetation by fishes: testing the roles of food and refuge. *Oecologia*, 77(1), 101-106.

Sabol, B. (2003). Operating instructions manual for the acoustic-based submersed aquatic plant mapping system. *US Army Engineer Research and Development Center, paper available at: www.biosonicsinc.com/doc_library/docs/ACOE_Operating_Instructions_SAV.pdf. Accessed March, 28, 2008.*

Silva, R., Martínez, M. L., Hesp, P. A., Catalan, P., Osorio, A. F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., y Georges Govaere. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research*, 71(sp1), 1-16.

Schneider, P., Monteoliva, A., y Burczynski, J. Aquatic Habitat Monitoring And Mapping: Digital Hydroacoustics As A Paramount Tool For Assessing Fish, Plankton, Submerged Aquatic Vegetation, And Classification Of Bottom Substrate. *Confederación Hidrográfica del Duero y Confederación Hidrográfica del Guadiana. Ministerio de Medio Ambiente, Reserva Natural de las Marismas de Santoña y Noja. Red electrica de España.*

Short FT, Dennison WC, y Capone DG (1990) Phosphorus-limited growth of the tropical seagrass *Syringodium fillorne* in carbonate sediments. *Mar Ecol Prog Ser* 62:169-174.

Short, Frederick. T., y Robert G. Coles (Eds.). (2001). Global seagrass research methods. *Elsevier SCIENCE B.V., Amsterdam.*

Short, F., Carruthers, T., Dennison, W., y Waycott, M. (2007). Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1-2), 3-20.

Spalding, M.D.; M. Taylo; C. Ravilious; F. Short y E. Green. (2003). Global overview. The distribution and status of seagrasses. In: Green E & F.T. Short (eds) World Atlas of Seagrasses. University of California Press. 5-26 pp.

Strickland, J.D.H. y Parsons T.R. (1972). A Practical handbook of seawater analysis. *Fisheries Research Board Canadian Bulletin 167*. (2^a Ed).

Thayer, G. W., Kenworthy, W. J., y Fonseca, M. S. (1984). *Ecology of Eelgrass Meadows of the Atlantic Coast: a community profile* (No. FWS/OBS-84/02). National Marine Fisheries Service, Beaufort, NC (USA). Beaufort Lab.; Virginia Univ., Charlottesville (USA). Dept. of Environmental Sciences.

Thiesfeld, S. L. (1989). Utilization of aquatic macrophytes by largemouth bass (*Micropterus salmoides*), bluegill sunfish (*Lepomis macrochirus*), and yellow perch (*Perca flavescens*) in Devils Lake, Oregon (Doctoral dissertation, University of Washington).

Thorhaug, A., Richardson, A. D., y Berlyn, G. P. (2007). Spectral reflectance of the seagrasses: *Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme* and five marine algae. *International Journal of Remote Sensing*, 28(7), 1487-1501.

Tabachnick, B. G. y Fidell, L. S (2013). Using multivariate statistics.

Valley, R. D., Drake, M. T., y Anderson, C. S. (2005). Evaluation of alternative interpolation techniques for the mapping of remotely-sensed submersed vegetation abundance. *Aquatic botany*, 81(1), 13-25.

Van der Heide, T., Govers, L. L., de Fouw, J., Olf, H., Van der Geest, M., van Katwijk, M. M., Piersma, T., van de Koppel, J., Silliman, B. R., Smolders, A. J.P y van Gils, J. A. (2012). A three-stage symbiosis forms the foundation of seagrass ecosystems. *science*, 336(6087), 1432-1434.

van Tussenbroek, B.I.; J.A. Vonk; P.L. Erftemeijer; J.J. Middelburg y J.C. Zieman. (2006). Thebiology of *Thalassia*: Paradigms and recent advances in research. In: Larkum, A.W.D.; R.J. Orth and C.M. Duarte (Eds.). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Springer. 409-439 pp.

Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, J., Fourqurean, J. W., Kenneth, L.H., Hughes, A.R. Kendrick, G. A. Judson Kenworthy, Short, F.T., y Susan L. Williams (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(30), 12377-12381.

Wilson, Sara y H. Dunton, Kenneth. 2018. Hypersalinity During Regional Dought Drives Mass Mortality of the seagrass *Syringodium filiforme* in subtropical Lagoon. *Estuaries and Coasts*. 41: 855-865.

Winfield, I. J., Fletcher, J. M., y James, J. B. (2007). Seasonal variability in the abundance of Arctic charr (*Salvelinus alpinus* (L.)) recorded using hydroacoustics in Windermere, UK and its implications for survey design. *Ecology of Freshwater Fish*, 16(1), 64-69.

Zhu, B., Fitzgerald, D. G., Hoskins, S. B., Rudstam, L. G., Mayer, C. M., y Mills, E. L. (2007). Quantification of historical changes of submerged aquatic vegetation cover in two bays of Lake Ontario with three complementary methods. *Journal of Great Lakes Research*, 33(1), 122-135.

Paginas web

<http://thebluecarboninitiative.org/blue-carbon/#co2>

<http://www.teebweb.org/->

<https://www.wbcsd.org/>

<http://www.conabio.gob.mx>

<https://scihub.copernicus>

ANEXO

A continuación, en las siguientes páginas se detalla información de las bases de datos utilizadas en este análisis para la determinación de los objetivos planteados en esta tesis, mencionadas en el capítulo 2 y 3.

La Tabla 1A de izquierda a derecha se describen las columnas con la información de los transectos (ID) paralelos (PA) y perpendiculares (PE; T Dir.) y algunos trayectos irregulares trazados en el área de estudio, la fecha de colecta, la salida de agua más cercana, la distancia (Dis.) a la salida de agua más cercana. Dirección cardinal (Dir.) a la salida de agua más cercana. La longitud del transecto recorrido en Kilómetros lineales (Long.), (N) es el número de pings totales por transecto (T Dir), la posición geográfica del punto de partida (LatDD y LongDD inicial) y punto de final (LatDD y LongDD final). El número de verificaciones realizadas en cada transecto y los parámetros fisicoquímicos utilizados para la calibración de la ecosonda (VBT Manual, 2007). Temperatura (°T), Salinidad (Sal), pH (iones H⁺). (Ver Fig. 4)

Tabla 1A 1 Información sobre los transectos perpendiculares y paralelos trazados con la ecosonda hidroacústica del 2011 al 2017.

T Dir.	ID	Fecha	Salida agua cercana	Dis.	Di r.	Long. T(m)	N	LatDD inicial	LongDD inicial	LatDD Final	LongDD Final	Ver	°T	Sal	pH
Perpendiculares (PE) a la costa de Norte a Sur	T1	02/05/ 2016	La granja	950	N	15,803	6832	20.51214	90.49703	20.488335	90.634994	-	29.71	40	8.17
	T2	22/02/ 2014	Las bocas	0	N	12,750	2836	20.46661	90.5323	20.46231	90.64349	2	23.3	39	8.47
	T2 A	02/05/ 2016	Las bocas	0	N	16,277	8397	20.47052	90.50139	20.46221	90.644965	1	29.71	40	8.17
	T3	11/08/ 2016	Huaychaca	0	N	19,027	7608	20.43321	90.49825	20.43016	90.664644	1	31.67	36.8 9	8.05
	T4	06/09/ 2011	La carbonera	600	N	11,915	2464	20.40008	90.49052	20.39566	90.51747	-	-	-	-
	T4 A	19/04/ 2016	La carbonera	1,655	N	13,984	7944	20.39137	90.4889	20.392552	90.608178	1	27.71	40	8.2
	T5	11/08/ 2016	Jovonche	0	N	19,064	7946	20.3713	90.48698	20.360537	90.652232	-	31.67	36.8 9	8.05
	T6	08/04/ 2013	Jovonche	4,512	N	15,173	3253	20.33869	90.49566	20.32504	90.62329	2	25	40	8.3
	T7	27/07/ 2011	-	-	N	14,673	2981	20.31633	90.51734	20.31007	90.64717	1	-	-	-
	T7 A	12/08/ 2016	-	-	N	18,141	8015	20.32143	90.49351	20.310737	90.651811	-	31.5	36.2 9	8.03
	T8	27/07/ 2011	-	-	N	17,075	3080	20.30164	90.48974	20.29053	90.63843	-	-	-	-
	T9	08/04/ 2013	-	-	N	17,164	4573	20.28273	90.49092	20.273646	90.6382	2	25	40	8.3
	T10	28/07/ 2011	-	-	N	17,600	3488	20.2627	90.49168	20.25237	90.64629	1	-	-	-
	T11	09/04/ 2013	Sayosal	3,474	C	19,749	2915	20.24449	90.49011	20.24183	90.66055	3	25.62	40	8
T11 A	12/08/ 2016	Sayosal	5,715	C	19,335	10100	20.26376	90.49276	20.254804	90.654724	-	31.5	36.2 9	8.03	

T12	28/07/ 2011	Sayosol	1,313	C	17,445	3267	20.22644	90.48744	20.21919	90.64078	-	-	-	-
T13	10/04/ 2013	Jaina y Zac-pol	1,463	C	20,484	5186	20.19504	90.47951	20.2062	90.65572	3	25.46	40	8.21
T13 A	28/07/ 2011	Jaina y Zac-pol	2,316	C	13,565	2402	20.18678	90.48022	20.20714	90.59697	1	-	-	-
T13 B	21/02/ 2016	Jaina y Zac-pol	2,000	C	16,503	6873	20.19596	90.49854	20.2195	90.64095	-	-	-	-
T14	10/04/ 2013	Nitun	0	C	15,997	2983	20.16164	90.50679	20.16782	90.64653	2	25.46	40	8.21
T15	29/07/ 2011	Nitun	735	C	17,361	3536	20.15366	90.49516	20.15187	90.64969	1	-	-	-
T15 A	21/02/ 2016	Nitun	772	C	17,241	3536	20.15364	90.49487	20.1509	90.64458	-	22.58	37.9 8	8.51
T16	11/04/ 2013	Nitun	3,155	S	14,734	3801	20.13506	90.48698	20.13211	90.61485	5	25.46	40	8.21
T17	29/07/ 2011	Playitas	421	S	17,889	3700	20.09841	90.48122	20.09969	90.63902	-	-	-	-
T17 A	22/02/ 2016	Playitas	400	S	17,983	6869	20.09999	90.63931	20.09796	90.48252	-	22.58	37.9 8	8.51
T18	05/12/ 2013	El cuyo	2,665	S	19,100	5405	20.08333	90.49004	20.09199	90.6572	4	30.26	33.4 9	8.06
T19	05/12/ 2013	El cuyo	2,213	O	16,374	4274	20.06028	90.5117	20.07032	90.65504	4	30.26	33.4 9	8.06
T20	29/07/ 2011	El cuyo	2,104	S	19,248	3538	20.04477	90.48407	20.5817	90.65353	-	-	-	-
T20 A	22/02/ 2016	El cuyo	2,062	S	19,064	5793	20.04465	90.48421	20.03892	90.65187	-	22.58	37.9 8	8.51
T21	06/12/ 2013	La Ensenada	2,826	S	16,961	3292	20.02416	90.50523	20.01362	90.65464	2	30.26	33.4 9	8.06
T22	20/04/ 2016	La Ensenada	0	S	21,982	12658	20.00242	90.4632	20.003444	90.654545	-	27.7	40	8.2
T23	29/07/ 2011	La Ensenada	2,398	S	22,529	4007	20.00287	90.46327	20.0032	90.65488	-	-	-	-

	T24	20/08/ 2013	La Ensenada	3,240	S	21,275	6843	19.98597	90.47091	19.98089	90.6553	1	30.26	33.4 9	8.06
	T25	30/07/ 2011	Sanit	780	O	21,512	3780	19.4673	90.4673	19.96947	90.65668	1	-	-	-
	T25 A	20/04/ 2016	Sanit	185	O	22,217	10738	19.97194	90.46229	19.969395	90.655442	-	27.7	40	8.2
	T26	30/07/ 2011	Cd. Campeche	5,006	S	20,260	3516	19.89833	90.50378	19.91963	90.66708	-	-	-	-
	T26 A	18/04/ 2016	Cd. Campeche	5,000	S	20,406	12264	19.89961	90.50491	19.919648	90.665832		27.7	40	8.2
	T27	18/08/ 2013	Cd. Campeche	0	S	12,215	2709	19.85767	90.52921	19.85581	90.63583		30.33	34.9 7	8.02
Paralelos (PA) a la costa	T1	09/12/ 2013	Cd. Campeche	18	N O	23,170	4752	19.88098	90.65842	20.06452	90.64284	1	27.17	32.8 4	7.74
		23/09/ 2014	Cd. Campeche	30	N O	28,187	6201	20.28847	90.65724	20.2885	90.65725	3	28.76	36.0 7	8.3
		11/08/ 2016	Huaychaca	18,300	O	17,300	7620	20.27235	90.64824	20.480835	90.637529		31.67	36.8 9	8.05
		18/03/ 2017	Huaychaca	17,100	O	10,623	5706	20.33911	90.65518	20.433695	90.66265	2	25.74	39.3 4	8
	T2	08/12/ 2013	Cd. Campeche	13,261	N O	15,195	2834	20.02665	90.61864	19.899971	90.61558	1	27.17	32.8 4	7.74
		24/09/ 2014	La Ensenada	24,399	O	34,032	7878	20.30922	90.62794	20.1596	90.62533	3	28.76	36.0 7	8.3
	T3	09/12/ 2013	Cd. Campeche	10,780	N O	19,910	3866	20.03466	90.59818	20.03469	90.59819	-	27.17	32.8 4	7.74
		27/06/ 2014	Las playitas	13,853	S O	28,700	6053	20.13698	90.60323	20.13711	90.60323		25.36	40	8.49
		19/03/ 2017	Jovonche	17,063	S O	14,334	6446	20.30838	90.61148	20.427873	90.613065	2	23.63	38.6 4	7.98
T4	08/12/ 2013	Cd. Campeche	6,000	N O	18,140	3853	19.88174	90.56833	20.03132	90.57809		27.17	32.8 4	7.74	
	26/06/ 2014	El cuyo	10,003	O	31,804	6965	20.03337	90.57762	20.30942	90.5846		25.36	40	8.49	

	19/03/2017	Jovonche	15,000	SE	18,098	6803	20.45842	90.5881	20.309004	90.584394	3	23.63	38.64	7.98
	24/02/2014											26.15	32	8.76
T5	25/02/2014	Cd. Campeche	8,974	NO	50,063	10704	20.04732	90.54052	20.0466	90.54061	2	26.03	36.19	8.6
	28/06/2014											25.36	40	8.49
	22/09/2014											28.76	36.76	8.3
	20/03/2017	Jovonche	10,000	SO	14,195	5508	20.43073	90.54669	20.313223	90.537733	2	23.8	38.7	7.84
T6	07/12/2013	Cd. Campeche	0	NO	7,147	1569	19.87321	90.52627	19.86493	90.52921		27.26	23.34	7.96
	17/05/2014	Cd. Campeche	6,306	NO	12,211	8491	19.95553	90.53586	19.95551	90.53586		25.36	40	8.49
	28/06/2014	La Ensenada	3,940	O	35,957	7249	20.01919	90.51914	20.31242	90.51027		25.63	40	8.29
	20/03/2017	Jovonche	8,156	SO	18,378	7935	20.31244	90.51069	20.465512	90.526918	3	23.8	38.7	7.84
T7	21/02/2014	El cuyo	746	O	29,242	5947	20.29488	90.49164	20.05296	90.49585		25.76	31	8.14
	24/02/2014	El cuyo	2,277	O	31,627	7761	19.94369	90.4821	19.94372	90.48211		26.15	32	8.76
T8	20/04/2015											28.9	36	8.2
	21/04/2015	Cd. Campeche	0	N	59,862	14911	19.87226	90.50623	20.30636	90.49081	10	27	36	7.9
	22/04/2015											27	40	8.3
	19/04/2016	Jovonche	4,718	SO	11,104	5295	20.34566	90.50138	20.433475	90.499032		27.71	40	8.2
	11/08/2016											31.67	36.89	8.05

Trayectos irregulares	Tra ck1 PE	17/08/ 2013	Cd. Campeche	617	N	43,067	9734	19.87298	90.52611	19.87294	90.52608	30	34.6 3	8.14
	Tra ck2 PE	07/12/ 2013	Cd. Campeche	0	N O	28,764	6547	19.93259	90.56912	19.93261	90.56909	27.26	23.3 4	7.96

Tabla 2A. Se enlistan los video-transectos registrados en los años 2013 y 2014 con la cámara Seaviewer. De izquierda a derecha se describen las columnas con la fecha de registro del video, la hora con el tiempo de registro, el nombre identificador del video. El transecto correspondiente (T; coincidente con tabla 1A). la posición geográfica del punto de partida del transecto (LatDD y LongDD inicial) y punto de final (LatDD y LongDD final), la longitud del transecto (Long.). Clase, refiere a la comparación de la información de los video-transectos fue con la clase derivada de S-2A. Por último se describió visualmente el porcentaje de cubrimiento de 100 a 75% es Muy Cubierto, de 75% a 50% es cubierto, escasa menor de 25%. (Ver detalles en Fig. 4). La tabla 1A y 2A, sirvieron para la construcción de la base 1 (n=364,030 registros).

Tabla 1A 2. Información de los video-transectos trazados durante los periodos de colecta del 2013 al 2014.

Fecha	Hora	Video	T	LatDD inicial	LongDD inicial	LatDD final	Longitud final	Long.	Clase	Densidad
07/04/ 2013	12:48:01-13:09 :00 p.m	DVD_114927_0	T6PE	20.33582	90.52341	20.33506	90.53165	0.87	MxTtA	Muy cubierto
07/04/ 2013	02:33:17-15:19 :51 p.m.	DVD_133707_0	T6PE	20.33499	90.53192	20.33362	90.53674	2.33	MxPP	Muy cubierto
07/04/ 2013	16:15:05-17:06 :11 p.m.	DVD_152313_0	T6PE	20.33278	90.55294	20.32847	90.57756	2.88	Sf	Muy cubierto
08/04/	12:30:28-12:53	DVD_120448_0	T6PE	20.32924	90.57999	20.32504	90.62331	4.68	Sf	Cubierto

2013	:05 p.m.									
28/06/2014	12:00:00-12:40 :03 p.m	DVD_144128_0	T5PA	20.31361	90.51140	20.28212	90.53741	6.35	MxTtA	Muy cubierto
24/02/2014	12:00:00-13:12 :10 p.m.	DVD_132958_0	T5PA	20.02267	90.50198	20.00455	90.54752	11.45	Tt	Muy cubierto
24/02/2014	07:07:08-07:45 :20 a.m.	DVD_074735_0	T5PA	19.95852	90.55392	19.90167	90.55152	6.33	Tt	Muy cubierto
28/06/2014	12:00:08-13:10 :09 p.m.	DVD_131708_0	T6PA	20.29845	90.51149	20.24680	90.50944	5.91	Tt	Muy cubierto
28/06/2014	03:20:04-16:12 :10 p.m.	DVD_162248_0	T6PA	20.22994	90.52940	20.14427	90.53273	9.84	Tt, Mx TtA	Muy cubierto
28/06/2014	12:00:13-12:15 :20 p.m.	DVD_121432_0	T6PA	20.15059	90.51102	20.12970	90.51087	12.46	MxTtA	Muy cubierto
28/06/2014	09:00:00-12:04 :08 a. m.	DVD_095348_0	T6PA	20.11774	90.51110	20.09535	90.51857	8.99	Tt, Mx TtA	Muy cubierto / escasa
17/05/2014	11:59:09-12:30 :29 p.m.	DVD_122957_0	T6PA	19.96317	90.51748	19.96317	90.51748	5.56	Tt	Muy cubierto
26/06/2014	12: 12:08-12:5 3:13 p.m.	DVD_125046_0	T4PA	20.12449	90.57140	20.17527	90.57395	5.74	Sf	Muy cubierto
26/06/2014	10:12:11-11:15 :10 a.m.	DVD_111556_0	T4PA	20.05347	90.57545	20.12447	90.57137	8.30	Sf/MxP A	Muy cubierto
08/12/2013	11:01:06-11:27 :30 a.m.	DVD_112609_0	T4PA	19.99383	90.56794	20.01372	90.56796	2.43	MxPA	Cubierto

08/12/2013	09:29:23-10:12:12 a.m.	DVD_101040_0	T4PA	19.93453	90.56795	19.98838	90.56793	9.54	Sf/MxP A	Muy cubierto / Cubierto
08/12/2013	08:06:32-08:56:36 a.m.	DVD_085830_0	T4PA	19.88200	90.56780	19.93450	90.56794	5.89	MxTtA	Muy cubierto
06/12/2013	02:02:21-14:40:15 p.m.	DVD_143836_0	T3PA	20.02168	90.58473	19.98922	90.58494	3.86	Sf	Muy cubierto
09/12/2013	14:19:21-14:45:15 p.m.	DVD_144211_0	T3PA	19.96803	90.58491	19.95585	90.58488	1.46	Sf	Muy cubierto
09/12/2013	14:47:23-14:56:13 p.m.	DVD_145544_0	T3PA	19.95235	90.58488	19.92297	90.58483	3.90	Sf/MxP P	Muy cubierto / Cubierto
25/02/2014	09:04:02-09:19:09 a.m.	DVD_091620_0	T2PA	20.02813	90.61905	20.04937	90.62292	2.70	Sf	Muy cubierto
08/12/2013	12:00:09-12:33:39 p. m.	DVD_123034_0	T2PA	20.00072	90.61867	19.97173	90.61868	6.03	Sf/MxP P	Muy cubierto
08/12/2013	12:37:31-14:03:15 p.m.	DVD_140134_0	T2PA	19.96572	90.61869	19.89973	90.60192	7.69	Sf/MxP P	Muy cubierto
11/04/2013	12:14:31-12:56:55 p.m.	DVD_105656_0	T16P E	20.13379	90.52219	20.13284	90.58813	7.50	MxPA/ Sf	Muy cubierto
20/08/2013	10:03:25-10:35:14 a.m.	DVD_103255_0	T24P E	19.98307	90.49798	19.98532	90.54770	5.50	Tt, Mx TtA	Cubierto/ escasa
20/08/2013	11:16:24-11:24:56 a.m.	DVD_115243_0	T24P E	19.98832	90.56123	19.98533	90.60945	5.38	Sf/MxP A	Muy cubierto / Cubierto
20/08/2013	11:24:59-11:55:55 a.m.	DVD_115243_1	T24P	19.98535	90.60975	19.98140	90.64248	3.85	Sf	Muy cubierto

2013	:17 a.m.		E							
17/08/2013	08:54:10-09:18 _20 a.m.	DVD_092033_0	Track 1PE	19.86823	90.52302	19.88852	90.53437	2.66	Tt	Muy cubierto
18/08/2013	09:25:17-09:59 :05 a.m.	DVD_095718_0	Track 1PE	19.88907	90.53477	19.91075	90.55198	3.09	Tt	Cubierto

Tabla 3A. Promedios obtenidos en las verificaciones *in situ* con la profundidad a la cual se colectaron 10 coberturas en un área de 0.5 m² en 143 sitios distintos a través de los buceos distribuidos en toda la zona de estudio en donde se identificó la composición florística a través de porcentajes de cobertura (Cobertura %) y la especie observadas de PM (*Tt*, *Sf*, *Hw*) y Macroalgas (MA). Se consideró 100 a 75% es muy cubierto, de 75% a 50% es cubierto, poco cubierto (50%-25%) y escasa menor de 25% (Seegrassnet, 2011). Adicionalmente en la última columna se promediaron 10 plantas de PM (Ver ubicación de los sitios en la Figura 6).

Tabla 1A 3. Información sobre las verificaciones in situ realizadas a lo largo de los transectos elaborados en la RBLP.

Fecha de colecta	Latitud	Longitud	Profundidad (m)	Cobertura (%) <i>Tt</i>	Cobertura (%) <i>Sf</i>	Cobertura (%) <i>Hw</i>	Cobertura (%) Macroalgas	Altura Promedio VAS
07/04/2013	20.335809	90.523408	2	90	9		7	44.57
07/04/2013	20.332964	90.549663		51	49		8	51.80
08/04/2013	20.278278	90.547306	-	50	50			47.50
09/04/2013	20.244049	90.518252	-	56			29	14.00
09/04/2013	20.242861	90.541031	3	43	50		7	29.00
09/04/2013	20.239611	90.632611	5.4	10	10	10		25.70
10/04/2013	20.203750	90.520472	2	72			12	27.00
10/04/2013	20.203363	90.547851	2.5	40	30		9	34.30
10/04/2013	20.200407	90.635459	-		16	52	9	47.50

10/04/2013	20.165006	90.585446	4		100			57.80
10/04/2013	20.162949	90.541655	2.8	18	63		40	27.70
11/04/2013	20.135074	90.487089	0.5	50			50	14.20
11/04/2013	20.134838	90.507703	2	64			26	23.60
11/04/2013	20.133558	90.541166	1.8	38	35		35	26.30
11/04/2013	20.133519	90.598415	4.2	10	90			45.10
11/04/2013	20.133049	90.646465	5	33	33	33		38.19
05/12/2013	20.083530	90.488500	0.7	30			70	49.10
05/12/2013	20.086220	90.526730	1.4	70				48.60
05/12/2013	20.087280	90.574530	2.7	10	80		3	56.30
05/12/2013	20.090190	90.622800	4		100			64.00
05/12/2013	20.065100	90.622208	4.5	10	90			90.00
05/12/2013	20.065690	90.584890	3.2		90		5	76.40
06/12/2013	20.067330	90.546830	2	20	76		10	56.60
06/12/2013	20.060330	90.511390	1.2	59			29	40.50
06/12/2013	20.016861	90.500250	1.2	67			16	34.10
06/12/2013	20.016750	90.550250	2.3	41			26	34.00
06/12/2013	20.016667	90.600028	3.5		84		10	70.00
06/12/2013	20.013610	90.654500	5.2		5	15	25	27.10
07/12/2013	19.950222	90.450056	1	67			12	39.14
07/12/2013	19.950167	90.500028	2	40			21	32.50
07/12/2013	19.883583	90.516806	2.4	79			14	41.20
08/12/2013	19.866861	90.566861	2.5	78			17	45.60
08/12/2013	19.933417	90.566722	3.5	57			13	46.50
08/12/2013	19.983389	90.566667	3	37	39		12	46.70
08/12/2013	20.016861	90.616861	3.2		100			69.10
08/12/2013	19.883528	90.600083	4		22		18	26.10
09/12/2013	20.033583	90.633333	4.8	20	40		5	38.40
09/12/2013	19.966889	90.583556	3.5	34	40		19	51.50

21/02/2014	20.283583	90.500111	1.5	84			11	27.80
21/02/2014	20.220000	90.500222	2.3	45			27	23.56
21/02/2014	20.150056	90.500222	2.1	51			18	20.50
26/06/2014	20.116694	90.566917	3	19	52			45.70
26/06/2014	20.260889	90.512208	4	14	86		10	75.10
28/06/2014	20.183556	90.500222	2	68			24	
28/06/2014	20.250056	90.500250	1.5	80			11	24.40
28/06/2014	20.016889	90.533583	-	65	30		10	37.80
23/09/2014	20.299870	90.660930	5.3	5	1			29.50
23/09/2014	20.125940	90.651310	5.1	9	14	27		32.60
24/09/2014	20.283500	90.627550	4.8	9	30		11	48.60
24/09/2014	20.221420	90.625620	4.4		46		22	56.70
24/09/2014	20.194190	90.623950	4.7		48	55	10	33.10
22/02/2015	20.450111	90.633472	6.7	40			24	16.10
20/04/2015	19.88271	90.502730	0.5	92			18	12.40
20/04/2015	19.909710	90.493640	1.7	80			15	17.60
20/04/2015	19.954980	90.457470	1.5	100				21.80
20/04/2015	20.134600	90.486850	1	72			25	21.10
21/04/2015	20.097380	90.480090	1	49		43		21.90
21/04/2015	20.060510	90.490960	0.5	23			39	12.70
22/04/2015	20.219810	90.487820	1	69		29	10	15.50
22/04/2015	20.180780	90.479610	1	40		65	14	16.65
24/02/2016	19.983556	90.483361	1.7	98				32.70
24/02/2016	19.916722	90.466778	1	93			5	19.90
25/02/2016	20.150111	90.616750	5	22	89		5	35.70

18/03/2017	20.461400	90.644850	6	73		20		16.90
18/03/2017	20.339220	90.655240	6	32		18	10	22.60
18/03/2017	20.351150	90.605610	4	5	98			59.40
19/03/2017	20.392430	90.608070	4.5		100			62.20
19/03/2017	20.458420	90.588130	4		100			57.10
19/03/2017	20.414680	90.589750	4		100			57.00
19/03/2017	20.308950	90.584380	4		100			57.00
19/03/2017	20.431490	90.547100	3.5	31	68			61.00
20/03/2017	20.400910	90.543790	2	42	58			59.10
20/03/2017	20.360610	90.515140	2	82			14	36.20
20/03/2017	20.413220	90.517950	2	47	41		15	34.40
20/03/2017	20.465600	90.527050	2	66	34			57.00

Tabla 4A. Base de datos resultante de la información de la tabla 3, porcentajes de cobertura (Cobertura %) de la especie observadas de PM (*Tt*, *Sf*, *Hw*) y Macroalgas (MA) tomadas de las verificaciones *in situ* y de las 38 estaciones de monitoreo en donde se medieron las variables ambientales (Ver Fig. 7, Tabla 2). La tabla presenta 82 valores obtenidos para los dos periodos anuales (2013, 2016; Base 3). Estos valores fueron utilizados en el análisis de componentes principales (ACP) para este trabajo (ver apartado de resultados para más detalles). Se detalla información de las posiciones geográficas exactas (LongDD y LatDD), las variables consideradas en este ACP. Profundidad (Z), NT_a corresponde a la suma de Nitritos y Nitratos en columna de agua, PT_a corresponde a formas fosfatadas inorgánicas en columna de agua, NH4_s corresponde al contenido de amonio en agua intersticial, PT_s corresponde a formas fosfatadas inorgánicas en agua intersticial. T_C refiere a la temperatura en grados Celcius del agua, pH, salinidad y coberturas.

Tabla 1A 4. Información de las variables ambientales en dos ciclos anuales (2013 y 2016) colectadas en las 38 estaciones de monitores.

Estación	LongDD	LatDD	Temp (Año colecta)	Z	NT_a	PT_a	NH4_s	PT_s	T_C	Ph	Sal	Cob % Tt	Cob % Sf	Cob % Hw	Cob % MA
1	90.526230	20.442840	LL16	2.56	20.95	1.40	3.01	16.50	30.94	8.03	38.44	32	68	0	0
			S16	2.69	13.46	14.04	1.61	49.84	28.67	8.57	41.10	30	70	0	0
			N16	2.76	14.37	9.18	13.78	7.35	25.17	8.01	37.65	30	70	0	0
2	90.594480	20.442840	LL16	4.64	16.63	38.26	6.34	32.99	30.99	8.01	37.90	0	100	0	0
			LL16	1.67	15.21	41.42	2.26	16.50	31.89	8.65	41.78	80	10	0	10
			S16	1.67	46.34	43.87	20.73	14.39	29.52	8.38	42.02	80	0	10	10
3	90.491140	20.307680	N16	1.17	23.90	10.90	23.90	11.51	27.16	8.12	35.36	50	0	0	50
			LL16	2.34	13.45	30.54	3.87	31.24	30.46	8.69	42.78	50	40	0	10
			S13	2.38	18.50	39.60	36.80	24.39	32.00	7.70	31.00	75	0	0	25
4	90.516680	20.307710	S16	2.49	54.99	31.94	3.54	10.53	28.70	8.53	41.22	50	0	0	50
			N16	1.33	17.34	3.80	16.42	15.87	23.74	8.09	36.90	50	0	0	50
			S13	2.29	7.68	9.14	28.13	54.34	25.62	8.56	39.32	50	40	0	10
5	90.535640	20.319060	LL16	4.12	12.91	44.93	2.15	32.64	30.11	8.79	41.67	0	100	0	0
			S16	4.21	32.39	40.71	2.47	31.94	28.19	8.38	41.43	0	100	0	0
			N16	4.27	14.58	5.42	13.98	6.64	24.66	8.08	38.25	0	100	0	0
7	90.519280	20.267470	S13	2.13	6.88	54.23	122.58	23.46	25.29	8.43	40.24	14	76	0	10
8	90.535830	20.266810	S13	2.65	4.56	64.20	57.48	64.20	25.34	8.27	39.57	50	50	0	0
9	90.517440	20.234860	S13	2.02	23.71	28.40	34.68	28.40	26.36	8.55	39.87	55	0	0	30
			S16	1.11	22.34	32.29	1.83	53.70	28.78	8.23	41.80	70	0	0	25
			N16	1.29	18.67	13.34	17.54	9.99	26.77	8.17	35.53	25	0	0	65
10	90.495320	20.194690	LL16	1.41	20.89	38.26	18.47	35.80	34.77	8.06	31.58	40	0	0	40
			S13	1.55	6.31	14.30	27.83	45.26	25.70	8.34	41.03	45	0	0	30
			S13	1.78	44.26	23.14	52.55	26.47	26.24	8.42	40.08	40	30	0	10
11	90.502060	20.202110	LL16	1.73	24.50	37.56	3.54	15.44	31.11	7.82	38.40	51	0	0	19
			S16	1.58	28.90	21.41	3.87	42.82	28.87	8.21	42.30	50	0	0	50
			N16	1.38	8.20	3.70	7.29	4.00	25.47	8.16	36.48	65	0	0	25

14	90.502360	20.168420	S13	2.25	0.12	153.0 0	101.39	253.0 0	30.12	8.30	41.44	70	0	0	25
15	90.520400	20.164570	LL16	1.84	22.64	28.08	2.58	10.53	30.60	8.06	38.94	60	0	0	20
			S16	1.63	24.96	13.34	1.83	62.47	27.79	8.18	42.27	66	0	0	24
16	90.534560	20.151500	S13	2.31	7.42	91.90	102.36	91.90	27.72	8.35	40.56	30	35	0	35
			LL16	3.63	26.76	2.11	3.22	22.11	30.98	8.20	39.10	0	100	0	0
17	90.589900	20.169920	S16	3.65	38.34	17.90	0.64	49.84	27.96	8.41	41.24	0	100	0	0
			N16	3.61	6.45	34.24	5.50	14.45	24.88	8.13	38.47	0	100	0	0
			S13	1.02	22.84	20.30	45.79	20.30	26.78	8.42	40.59	50	0	0	20
18	90.483330	20.152220	LL16	1.65	24.07	29.83	2.36	44.93	30.66	7.92	42.47	64	0	0	26
			S16	1.15	29.90	15.79	1.18	47.38	29.60	8.46	42.61	35	30	0	35
			N16	1.26	12.69	5.42	11.39	15.57	27.30	8.06	34.12	40	0	0	60
20	90.485250	20.135080	S13	1.02	2.81	34.57	45.88	36.63	28.26	8.53	39.83	65	0	0	25
21	90.501670	20.134420	S13	1.52	7.37	29.00	51.95	22.23	27.64	8.33	41.09	50	0	0	50
22	90.535110	20.118810	S13	2.52	11.72	45.68	46.88	34.76	28.21	8.27	40.70	40	30	0	30
			LL16	1.22	30.09	29.48	8.70	37.56	30.93	8.33	39.03	50	0	0	30
			S16	1.04	25.19	13.69	16.65	44.57	30.04	8.35	40.37	35	0	0	35
23	90.479940	20.034810	N16	1.27	28.11	21.05	27.59	18.31	30.41	7.91	35.91	23	0	0	39
			LL16	1.59	21.00	38.61	1.83	24.92	30.21	8.30	41.73	67	0	0	16
			S16	2.46	49.27	35.80	2.04	54.75	27.04	8.39	41.31	60	0	0	30
24	90.508500	20.035500	N16	2.77	12.24	3.19	10.85	4.00	29.50	8.17	36.96	60	30	0	10
			LL16	3.64	8.64	49.14	7.63	30.54	30.70	8.76	43.19	0	84	0	10
			S16	3.76	53.09	30.54	1.93	49.49	28.88	8.40	42.01	0	90	0	10
25	90.589930	20.035500	N16	3.52	9.66	3.29	9.03	3.90	28.51	8.25	38.82	0	85	15	0
			S13	1.02	22.84	20.30	45.79	20.30	26.78	8.42	40.59	50	0	0	20
26	90.469250	19.983640	LL13	1.67	8.75	1.00	26.05	8.33	31.04	8.16	38.15	98	0	0	0
27	90.500390	19.985170	LL13	2.39	9.24	1.39	32.84	9.35	29.99	8.09	33.74	40	20	0	0
28	90.534610	19.985530	LL13	2.59	7.35	0.67	29.00	21.27	30.70	8.09	36.86	65	30	0	5
29	90.600330	20.002690	LL13	3.77	9.58	0.25	193.97	28.60	30.28	8.24	40.91	0	84	0	16
30	90.470080	19.962540	LL16	1.79	20.13	19.66	3.76	31.94	36.56	8.01	35.97	60	0	0	20
			S16	1.32	26.92	36.50	2.15	51.24	29.56	8.56	41.40	50	0	0	0

			LL16	1.13	14.96	37.91	10.52	71.25	32.70	8.97	38.74	30	0	0	20
31	90.488580	19.891080	S16	1.03	22.33	27.03	4.30	56.51	29.90	8.45	41.73	35	0	35	30
			N16	1.47	12.20	19.73	10.56	19.73	27.81	7.91	36.46	79	0	0	14
32	90.529070	19.891080	LL16	2.61	18.61	21.41	4.73	24.57	30.37	7.92	38.51	50	0	0	50
			S16	2.48	28.36	13.34	1.40	43.17	28.55	8.32	42.01	30	0	0	40
33	90.594540	19.891080	LL16	3.21	19.71	48.79	2.47	13.69	30.81	8.00	40.40	80	0	0	20
			S16	3.02	30.62	17.55	2.04	43.87	28.33	8.30	42.56	25	10	20	25
			N16	3.16	7.53	9.38	7.06	17.29	27.99	8.22	39.17	25	20	0	15
34	90.535440	19.868640	LL13	2.17	10.64	0.45	27.27	3.46	30.40	8.24	39.59	80	0	0	20
35	90.594480	20.442840	S16	4.73	15.11	21.76	3.11	37.56	28.30	8.34	40.93	30	10	30	0
			N16	4.83	35.11	9.99	33.38	11.21	25.10	7.74	39.95	20	0	40	10
36	90.529070	19.891080	N16	2.46	90.29	5.83	89.77	20.34	28.60	8.22	37.71	75	0	0	15
37	90.470080	19.962540	N16	1.33	8.45	14.96	7.66	19.83	29.17	8.24	36.34	100	0	0	0
38	90.520400	20.164570	N16	1.64	8.42	29.17	7.90	10.09	25.75	8.01	37.92	50	0	0	50

Tabla 5A. Superficies ocupadas por la VAS en la zona marina de la RBLP (Km²) con sus correspondientes porcentajes derivados de S-2A y la suma de los pixeles (remuestreo a resolución espacial de 20 m). Clase 1: *Thalassia testudinum* (*Tt*), Clase 2: *Siringodium filiforme* (*Sf*), Clase 3: *Tt* y macroalgas (*MxTtA*), Clase 4: *Tt* y *Sf* y/o *Halodule wrightii* (*Hw*) y macroalgas (*MxPA*) y Clase 5: *Tt* y *Sf* y/o *Hw* (*MxPP*).

Tabla 1A 5 Superficies que ocupan la VAS en la RBLP obtenidas de la clasificación con la imagen Sentinel 2A.

Clases de VAS	SumPixel	%	Área Km²
1. <i>Tt</i>	346,605	8	139
2. <i>Sf</i>	898,938	20	360
3. <i>MxTtA</i>	606,345	13	243
4. <i>MxPA</i>	1,159,839	25	464
5. <i>MxPP</i>	768,873	17	308
6. S/Clasificar	783,449	17	313

Tabla 6A. Estadísticas descriptivas de las variables profundidad y altura de las plantas por cada clase de VAS detectada con S-2A. Profundidad en metros (Z (m)), la altura en centímetros. Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt), Clase 2: *Siringodium filiforme* (Sf), Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA), Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP).

Tabla 1A 6 Información asociada a las variables profundidad y altura de la planta de cada clase de VAS en la RBLP.

Clases VAS	N	Media		Desviación estándar		Mínimos		Máximos	
		Z (m)	Altura (cm)	Z (m)	Altura (cm)	Z (m)	Altura (cm)	Z (m)	Altura (cm)
1. Tt	1636	-1.91	26	-0.52	10	-0.52	22	-3.12	75
2. Sf	1032	-3.61	54	-0.74	18	-1.60	42	-5.38	115
3. MxTt A	2389	-2.24	31	-0.80	10	-0.54	25	-3.80	97
4. MxPA	1360	-3.07	40	-1.10	17	-0.90	28	-6.66	101
5. MxPP	635	-2.56	36	-0.98	14	-0.83	28	-5.76	81

Tabla 7A. Estadísticas descriptivas de las variables cobertura (%Cob) y tamaño de grano sedimentario (CatTGS) por cada clase de VAS detectada con S-2A. Clase 1: *Thalassia testudinum* (Tt), Clase 2: *Siringodium filiforme* (Sf), Clase 3: Tt y macroalgas (MxTtA), Clase 4: Tt y Sf y/o *Halodule wrightii* (Hw) y macroalgas (MxPA) y Clase 5: Tt y Sf y/o Hw (MxPP). CatTGS 1 corresponde a arcilla, CatTGS 2 corresponde a limo y CatTGS 3 corresponde a arena.

Tabla 1A 7 Información asociada a las variables cobertura y tipo de grano sedimentario de cada clase de VAS en la RBLP.

Clases VAS	N	Media		Desviación estándar		Mínimos		Máximos	
		%Cob	Cat TGS	%Cob	Cat TGS	%Cob	Cat TGS	%Cob	Cat TGS
1. Tt	1636	77	2	30	0.66	70	1	100	3
2. Sf	1032	94	1	12	0.72	90	1	100	3
3. MxTt A	2389	84	2	23	0.73	80	1	100	3
4. MxPA	1360	89	2	20	0.84	90	1	100	3
5. MxPP	635	91	2	18	0.79	90	1	100	3



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00047

Matrícula: 2161801370

Patrones de Distribución Espacial de la Vegetación Acuática Sumergida en la Reserva de la Biosfera de los Petenes, Campeche, detectada por percepción remota.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 10:00 horas del día 25 del mes de julio del año 2018 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. LUIS VALDERRAMA LANDEROS
M. EN C. ALMA DELIA TOLEDO GUZMAN
MTRA. MARIA ISABEL CRUZ LOPEZ



ILIANA PEREZ ESPINOSA
ALUMNA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS (ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE)

DE: ILIANA PEREZ ESPINOSA

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

Aprobar

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

REVISÓ
LIC. JULIO CESAR DE LARA ISASSI
DIRECTOR DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

DR. JESUS ALBERTO OCHOA TAPIA

PRESIDENTE

DR. LUIS VALDERRAMA LANDEROS

VOCAL

M. EN C. ALMA DELIA TOLEDO GUZMAN

SECRETARIA

MTRA. MARIA ISABEL CRUZ LOPEZ