

# UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

RECOLONIZACIÓN DE MACROALGAS RIZOFÍTICAS EN LA LAGUNA ARRECIFAL

DE PUERTO MORELOS, QUINTANA ROO



TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

CON OPCIÓN EN: ECOLOGÍA MARINA

PRESENTA:

HAZEL MARÍA CANIZALES FLORES

Hermosillo, Sonora

Junio 2014

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## FORMATO DE APROBACIÓN

Los miembros del Comité de Tesis designado para revisar la Tesis de Hazel María Canizales Flores la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito para obtener el Título de Licenciado en Biología con Opción en Ecología Marina.

---

Dr. Brigitta Van Tussenbroek Ribbingk  
Director de Tesis

---

Dr. Alf Enrique Meling López  
Sinodal Secretario

---

Biól. Norberto Miguel Ángel Pastén Miranda  
Sinodal

---

Dr. Rafael Riosmena Rodríguez  
Suplente

## **DEDICATORIA**

*Con mucho cariño a toda mi familia, gracias por brindarme su apoyo y su amor aun estando tan lejos de casa, ya que sin ustedes no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Gracias por creer en mí y haberse sacrificado tanto para mi crecimiento profesional.*

## AGRADECIMIENTOS

*A la Universidad de Sonora, institución que me dio la formación como bióloga general, así como al Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas.*

*A todos los profesores de la Licenciatura en Biología por ser parte de mi formación académica.*

*Un agradecimiento muy especial al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Puerto Morelos, Q. Roo por haberme apoyado con mi estancias a lo largo de mi tesis de licenciatura.*

*A la Dra. Brigitta I. van Tussenbroek Ribbink por otorgarme la oportunidad y el apoyo al trabajar con ella en este proyecto.*

*A la M. en C. Guadalupe Barba Santos por su apoyo técnico en el laboratorio.*

*A mi comité de tesis. Al Dr. Alf Enrique Meling López, Al Biól. Norberto Miguel Angel Pastén Miranda, Al Dr. Rafael Riosmena Rodriguez, a la M.C. Luz María Yépiz Velázquez y al Dr. Francisco Molina Frenaner, que sin el apoyo de ustedes no hubiera sido posible titularme a tiempo, muchas gracias por sus críticas y el tiempo dedicado a las revisiones de mi trabajo, ayudándome a crecer como profesionista.*

*A mi tío, el Ing. Manuel Balcázar Meza por su apoyo incondicional para la terminación de mi proyecto de tesis.*

*Doy gracias a mi familia por estar a mi lado en cada momento que la necesito, doy gracias a mi mamá por comprenderme y ser mi soporte a través de la distancia.*

*Muchas gracias a Alí por ser mi gran compañero y buen amigo, por ayudarme en mis salidas de campo y procesar muestras y datos conmigo por días enteros.*

*A mis compañeros de laboratorio, y a mis viejos y nuevos amigos, por todos esos buenos momentos y pláticas de aliento.*

## CONTENIDO

<b>FORMATO DE APROBACIÓN</b>	i
<b>DEDICATORIA</b>	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	iii
<b>CONTENIDO</b>	v
<b>LISTA DE TABLAS</b>	vii
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	ix
<b>RESUMEN</b>	xii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>II. ANTECEDENTES</b>	3
II.1. Reproducción de Macroalgas Rizofíticas	3
II.1.1. Reproducción sexual de macroalgas rizofíticas	3
II.1.2. Generalidades de la arquitectura modular en plantas	4
II.1.3. Reproducción clonal de macroalgas rizofíticas	6
II.1.4. Ventajas y desventajas de la clonalidad	7
II.2. Importancia de las Macroalgas Rizofíticas	8
II.3. Pastos Marinos	8
II.4. Macroalgas Rizofíticas Asociadas a los Pastos Marinos	9
II.5. Proceso de sucesión de Macroalgas Rizofíticas y Pastos Marinos	9
II.6. Trabajos Previos	11
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b>	13
<b>IV. OBJETIVO</b>	14
IV.1. Objetivo General	14
IV.2. Objetivos Particulares	14
<b>V. HIPÓTESIS</b>	15
<b>VI. METODOLOGÍA</b>	16
VI.1. Estudio Preliminar de Recolonización de Macroalgas Rizofíticas	16
VI.2. Descripción del Área de Estudio	18
VI.2.1. Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos	18

VI.2.2. Vegetación marina	18
VI.2.3. Sitios de estudio	21
VI.3. Trabajo de Campo	23
VI.3.1. Profundidad de sedimento	25
VI.4. Trabajo de Laboratorio	26
VI.4.1. Registro fotográfico del proceso de reclutamiento	26
VI.4.2. Identificación de especies	26
VI.4.3. Obtención de medidas biométricas	27
VI.5. Análisis de Datos	28
VI.5.1. Índice de diversidad de Margalef	28
VI.5.2. Índice de similitud de Jaccard	29
VI.5.3. Pruebas estadísticas	29
<b>VII. RESULTADOS</b>	<b>30</b>
VII.1. Densidad de Reclutas de Macroalgas Rizofíticas	30
VII.2. Tasa de Reclutamiento de Macroalgas Rizofíticas	35
VII.3. Análisis de Regresión Lineal	39
VII.4. Prueba t de Student	45
VII.5. Índice de Similitud de Jaccard	47
VII.6. Índice de Diversidad de Margalef	49
VII.7. Profundidad de Sedimento	50
<b>VIII. DISCUSIÓN</b>	<b>51</b>
<b>IX. CONCLUSIONES</b>	<b>55</b>
<b>X. RECOMENDACIONES</b>	<b>56</b>
<b>XI. LITERATURA CITADA</b>	<b>57</b>
<b>XII. APÉNDICES</b>	<b>65</b>



## LISTA DE TABLAS

Tabla I	Nombre de las áreas de estudio y que zona le corresponde a cada una de las áreas, así como una breve descripción de cada zona.	22
Tabla II	Listado de las zonas de estudio, así como la distancia a la costa a la que se encuentran y su profundidad correspondiente, de igual forma una descripción más detallada de la vegetación presente en cada zona de muestreo así como la profundidad de sedimento.	22
Tabla III	Especies de macroalgas rizofíticas presentes en Zona 1 del area MU en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y su densidad (ind. m <sup>2</sup> ) tanto del área periférica como adentro de las parcelas a través de un periodo de 34 días.	32
Tabla IV	Especies de macroalgas rizofíticas presentes en Zona 2 del área MU en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y su densidad (ind. m <sup>2</sup> ) tanto del área periférica como adentro de las parcelas a través de un periodo de 34 días.	34
Tabla V	Tasa de reclutamiento de las especies de macroalgas rizofíticas en Zona 1 y su densidad (número de individuos nuevos por 10 m <sup>2</sup> por día) de las parcelas a través de 34 días.	36
Tabla VI	Tasa de reclutamiento de las especies de macroalgas rizofíticas en Zona 2 y su densidad (número de individuos nuevos por 10 m <sup>2</sup> por día) de las parcelas a través de 34 días.	38
Tabla VII	Relación de número de especies de macroalgas rizofíticas en común entre el área periférica y entre las parcelas de las zonas de muestreo.	47
Tabla VIII	Índice de diversidad de Margalef, la tabla muestra datos en la gráfica de figura 19. D <sub>Mg</sub> hace referencia al Índice de Margalef, Z1=Zona 1, Z2=Zona 2, Z3=Zona 3, Z4=Zona4; (P) hace referencia a datos de la periferia de las parcelas, mientras que la ausencia de (P) significa que son datos de los reclutas de macroalgas rizofíticas de cada una de las parcelas.	50

Tabla IX Profundidad del sedimento de acuerdo al área y zona de muestreo.

51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representación esquemática de las partes clonales de un fragmento clonal que muestra el módulo o lámina, rameto, estípe y el grupo rizoidal.	6
Figura 2	Localización de área de estudio. Mapa tomado y modificado de Cruz-Zizumbo et al. 2013.	20
Figura 3	Representación de áreas de muestreo (muelle UNAM y muelle Fiscal) y a las profundidades a las que se encuentran dentro de la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Mapa tomado y modificado de Álvarez-García et al. 1985.	21
Figura 4	Parcela de 30x30 cm fijada al sedimento con ayuda de clavos y cuerdas, marcada con cinta para su identificación para dar seguimiento al crecimiento clonal de las macroalgas rizofíticas.	23
Figura 5	Simulación de una parcela con contorno de PVC para determinar densidad de algas circundantes.	25
Figura 6	Densidad de las macroalgas rizofíticas (ind. m <sup>2</sup> ) agrupadas por género en la periferia y dentro de las áreas experimentales después de 34 días de iniciado el experimento en la Zona 1 del área MU en la Laguna arrecifal de Puerto Morelos.	31
Figura 7	Densidad de las macroalgas rizofíticas (ind. m <sup>2</sup> ) agrupadas por género en periferia y dentro de las parcelas después de 34 días de iniciado el experimento en las Zona 2 del área MU en la Laguna arrecifal de Puerto Morelos.	33
Figura 8	Tasa de reclutamiento (número de individuos nuevos por 10 m <sup>2</sup> por día), de las macroalgas rizofíticas agrupadas por género en la Zona 1 del área MU, Laguna arrecifal de Puerto Morelos.	35

Figura 9	Tasa de reclutamiento (número de individuos nuevos por 10 m <sup>2</sup> por día), de las macroalgas rizofíticas agrupadas por género en la Zona 2 del área MU, Laguna arrecifal de Puerto Morelos. Se excluye el género <i>Udotea</i> para el total de individuos, ya que presentó un gran aumento de densidad inexplicable en el día 28, el resto de las macroalgas no se comportaron de igual manera.	37
Figura 10	Análisis de regresión lineal para la Zona 1 (área MU) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.19$ , $t = 1.09$ , $P = 0.324$ ).	39
Figura 11	Análisis de regresión lineal para la Zona 2 (área MU) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.72$ , $t = 3.56$ , $P = 0.016$ ).	40
Figura 12	Análisis de regresión lineal para la Zona 3 (área MF) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.26$ , $t = 1.32$ , $P = 0.246$ ).	41
Figura 13	Análisis de regresión lineal para la Zona de muestreo 4 (área MF) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.24$ , $t = 1.13$ , $P = 0.322$ ).	42
Figura 14	Densidad de reclutas (ind. m <sup>-2</sup> ) en parcelas de Zona 1 y 2 del área de MU ( $t = 0.98$ , $P = 0.3428$ , $gl = 12$ ).	43
Figura 15	Densidad de reclutas (ind. m <sup>-2</sup> ) en parcelas de Zona 3 y Zona 4 del área de MF ( $t = 5.09$ , $P = 0.0003$ , $gl = 11$ ).	44
Figura 16	Biomasa total de reclutas por m <sup>-2</sup> en parcelas de Zona 1 y Zona 2 del área MU ( $t = 1.17$ , $P = 0.2665$ , $gl = 12$ ). La biomasa total incluye tejido por debajo de y sobre de sedimento, el cual fue descalcificado.	45
Figura 17	Biomasa de reclutas por m <sup>-2</sup> en parcelas de Zona 3 y Zona 4 del área de MF ( $t = 2.89$ , $P = 0.0146$ , $gl = 11$ ). La biomasa total incluye tejido por debajo de y sobre de sedimento, el cual fue descalcificado.	46

- Figura 18 Índice de Similitud de Jaccard entre zonas de muestreo, representando tanto la periferia como los reclutas de cada zona. Z1-Z2 = Zona 1 y Zona 2, Z1-Z3 = Zona 1 y Zona 3, Z1-Z4 = Zona 1 y Zona 4, Z2-Z3 = Zona 2 y Zona 3, Z2-Z4 = Zona 2 y Zona 4, Z3-Z4 = Zona 3 y Zona 4. 48
- Figura 19 Índice de diversidad de Margalef para cada zona de muestreo, representando tanto la periferia como los reclutas de cada zona. Z1= Zona 1, Z2= Zona 2, Z3= Zona 3, Z4= Zona4. 49

## RESUMEN

Varios estudios previos indican que la reproducción asexual es el principal proceso involucrado en el mantenimiento y/o expansión de poblaciones de algas bryopsidales. El objetivo de este trabajo es determinar el proceso de recolonización de macroalgas rizofíticas en cuatro sitios de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo. Como hipótesis se estableció que la densidad y tamaño de los reclutas clonales de macroalgas depende de la composición específica y densidad de macroalgas rizofíticas en el área vecindario, además de las características generales de cada sitios de muestreo. Los sitios para muestreo fueron: el muelle del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM y el muelle fiscal de Puerto Morelos. Dentro de estas 2 Áreas mencionadas se establecieron dos zonas de muestreo. Para cada una de las 4 zonas de estudio resultantes se establecieron 7 parcelas de 30x30 cm. Se encuadró cada parcela con un marco con el fin de determinar una periferia de 10 cm alrededor de la parcela. Las algas rizofíticas que se encontraban en esta periferia fueron contadas e identificadas para determinar la densidad algal circundante. Las algas rizofíticas que crecieron en las parcelas después de un mes de observación se recolectaron y se llevaron al laboratorio para ser procesadas. Para los análisis, tanto de índices como estadísticos, de datos recabados se estimó la diversidad (Margalef), similitud entre sitios (Jaccard), regresión lineal para determinar la relación entre densidad de reclutas y densidad de macroalgas rizofíticas del contorno de la parcela, también se analizaron datos de densidad y biomasa de reclutas con ayuda de una Prueba t. El proceso de reclutamiento es rápido, apareciendo los primeros reclutas después de 8 días iniciado el experimento y se observó que el número de reclutas algales y diversidad dependen de las condiciones del sitio de estudio.

## I. INTRODUCCIÓN

Las algas rizofíticas se anclan en los fondos marinos arenosos o lodosos por medio de tejido del talo especializado, compuesto por rizoides o grupos de rizoides y partículas de sedimento adherido. Las algas marinas que utilizan este tipo de arraigo son principalmente del orden Bryopsidales e incluyen los géneros *Caulerpa*, *Halimeda*, *Penicillus*, *Udotea*, *Rhipocephalus*, *Avrainvillea* y *Cladocephalus* (Littler y Littler, 2000).

Los rizoides son finas ramas incoloras del talo que utiliza para anclarse en sedimentos blandos o sustratos duros. Gracias a cultivos de *Caulerpa prolifera* en laboratorio se han identificado polipéptidos adhesivos que son exudados de los rizoides (Levi y Friedlander, 2004) y se ha observado con microscopía electrónica de barrido la "adhesión mucilaginosa" de las partículas de sedimento a los rizoides de *Halimeda* spp (Multer y Votava, 1992).

Estas algas son grandes productores primarios en todos los mares tropicales y subtropicales de todo el mundo. Crecen en praderas de pastos marinos, así como forman lechos mixtos o monoespecíficos de especies de algas exclusivamente rizofíticas (Bedinger et al., 2013) y están típicamente asociada a los pastos marinos en las lagunas arrecifales del Caribe (Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005). En contraste con los pastos marinos (que tienen raíces, hojas y tallos como todas las angiospermas), las macroalgas tienen pocos tejidos estructurales. Los rizoides tiene una estructura sencilla y por lo tanto, estas algas pueden acoplarse rápidamente a cambios en los sedimentos, mientras mantienen su capacidad de resistencia ante las corrientes (Zieman, 1982). La biomasa aérea de las comunidades algales rizofíticas puede ser muy importante, pero es muy variable en cuanto a la composición de las especies, localización, profundidad, y en cierta medida, la temporada (Bedinger et al., 2013). La mayoría de estas macroalgas son calcáreas, y son importantes productoras de arena calcárea (Van Tussenbroek y Van Dijk, 2007), e importantes productores primarios de carbono orgánico (Zieman, 1982).

Además de los pastos marinos, las macroalgas rizofíticas tienen la capacidad de participar en procesos de sucesión. El papel ecológico de estas macroalgas rizofíticas en la estabilización de los sedimentos es muy importante y ha sido reconocido ya que colonizan

futuros lechos de pastos marinos (Williams, 1990). Después de grandes disturbios, como una fuerte tormenta o un huracán, se erosiona el suelo donde se encuentran las camas de pastos marinos, al disminuir la turbulencia el material en suspensión comienza a depositarse y es cuando se instalan las macroalgas rizofíticas, ya que proveen soporte al sustrato con sus rizoides y de esta forma pueden volver a colonizar los pastos marinos (Zieman, 1982).

La secuencia de colonización vegetativa está determinada por tasas relativas de propagación por estolones y rizomas a través del sedimento y los requerimientos de nutrientes así como recursos de los colonizadores (Williams, 1990). Las macroalgas rizofíticas colonizadoras pueden tolerar bajas concentraciones de nutrientes, y los pastos marinos requieren de más nutrientes pero también son competitivamente superiores explotando recursos nutritivos de los sedimentos (Williams, 1990).

Como la mayoría de las praderas bien desarrolladas del caribe, las praderas de pastos marinos de Puerto Morelos son dominadas por la especie *Thalassia testudinum*, acompañada de *Syringodium filiforme* o *Halodule wrightii*, así como de macroalgas verdes rizofíticas (Van Tussenbroek, 2011). Muchos autores que han estudiado estas praderas omiten mencionar a las algas rizofíticas o no les dan importancia, a pesar de su significativo papel ecológico (Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005), y se sabe muy poco sobre su dinámica y crecimiento. En este trabajo se estudia la recolonización de macroalgas rizofíticas en diferentes áreas de estudio para entender mejor los procesos involucrados en la dinámica de la comunidad de pastos marinos y macroalgas en los sistemas arrecifales de Puerto Morelos, Quintana Roo.



## II. ANTECEDENTES

### II.1. Reproducción de Macroalgas Rizofíticas

#### II.1.1. Reproducción sexual de macroalgas rizofíticas

En general, una condición ambiental favorable para el crecimiento de un alga (es decir, luz óptima, temperatura, nivel de nutrientes y pH adecuado, así como factores bióticos óptimos que difieren de alga de alga) también favorece la reproducción sexual en ella.

A pesar de su importancia para la ecología de las comunidades marinas, la biología básica de la reproducción sexual de muchas macroalgas rizofíticas sigue siendo poco conocida.

Se ha logrado observar que los eventos de reproducción sexual en el campo son escasos. La tasa de colonización por medio de reclutas sexuales probablemente es baja; Van Tussenbroek y Barba (2011) encontraron una densidad de talos  $\sim 0.01 \text{ m}^{-2}$  de reclutas de origen sexual de *Halimeda. incrassata* en un área en proceso de sucesión primaria.

La liberación de gametos de las algas rizofíticas es un proceso muy sincronizado. Durante un período de 20 meses de seguimiento casi diario, Clifton (1997) observó numerosos episodios de reproducción sexual específicos de cada especie de algas bryopsidales en donde cientos de miles de gametos fueron liberados en la columna de agua durante un único y breve Impulso (5-20 min) de actividad reproductiva.

Dentro de las algas bryopsidales, las actividades de reproducción sexual como el desarrollo gametangial se dan normalmente durante la noche. Las descripciones de la gametogénesis en algas verdes tropicales han venido principalmente de estudios de laboratorio de algunas especies representativas, con escasa información sobre la apariencia, distribución, y el desarrollo de algas fértiles en el campo. Existe una escasez de información similar con

respecto a los patrones de tamaño de gametos, el comportamiento de los gametos, y el destino de los cigotos.

## **II.1.2. Generalidades de la arquitectura modular en plantas**

La arquitectura de cualquier organismo se refiere a la forma y reglas de crecimiento que determinan el desarrollo de un individuo adulto. En la arquitectura modular, la construcción del organismo está basada en la repetición de unidades multicelulares o módulos (Hardwick, 1986; Mackie, 1986; Williams, 1986), hasta conformar un organismo generalmente ramificado (Harper y Bell, 1979; Harper, 1981).

La forma modular se determina por reglas (genéticas) de repetición (ramificación) y las diferentes respuestas a cada ambiente (plasticidad fenotípica) (Franco, 1986). Los organismos modulares se desarrollan espacialmente como estructuras sésiles, ancladas por enraizamiento o cementadas a rocas, y su arquitectura refleja las respuestas a las presiones ambientales de las cuales no pueden escapar trasladándose a otros espacios.

El hecho de que el crecimiento modular se da por la repetición de unidades funcionales semiautónomas, implica que durante el desarrollo de un individuo, el ciclo de vida, definido como el programa que va de un cigoto a otro cigoto, se alcanza por una progresión de crecimiento iterativo (Harper, 1985).

Para algunos autores, un módulo, en sentido amplio, es una unidad estructural como cualquier unidad tisular de construcción que es repetida (Harper, 1981; Watkinson y White, 1986); para otros, como Hallé (1986), lo condiciona a que sea un eje de crecimiento. Dyrinda (1986) reduce el concepto a simplemente la noción de bloques repetidos formados a partir de un punto de crecimiento para aplicarlo al estudio de invertebrados marinos.

Estas posiciones diferentes reflejan el tipo de organismo en cuestión (planta, invertebrado, etc.) de los autores y el tipo de trabajo que abordan.

En términos arquitectónicos se reconocen dos tipos de crecimiento:

1) organismos que crecen esencialmente en forma vertical repartiendo sus módulos en capas sobrepuestas que dan eventualmente como resultado un autosombreado (los árboles)

2) organismos que se desarrollan en forma horizontal o lateral, repartiendo sus módulos en o sobre algún sustrato (plantas estoloníferas).

Ambos tipos de crecimiento modular son el producto de un cigoto, y dan como resultado un organismo modular que Harper (1981) llama un "genet".

Existen desde organismos cuyos módulos permanecen físicamente unidos, hasta organismos cuyos módulos son totalmente independientes. En los totalmente dependientes, el individuo estructural (genet) es en su totalidad la unidad ecológica interactuante. En aquellos organismos en los que se da la separación parcial o total, se generan dos niveles de interacción ecológica:

1) el de módulos por separado, y 2) el de subunidades superiores, o de grupos de módulos interactuantes; dichas subunidades se conocen como unidades fisiológicamente integradas o rametos (Harper, 1981; Toumi y Vuorisalo, 1989).

En general, los modelos de crecimiento poblacional y análisis de historias de vida se han realizado tomando como base a organismos unitarios. Los organismos unitarios se desarrollan a partir de un cigoto, y su ciclo de vida comprende las etapas de nacimiento, juventud, reproducción, vejez y muerte. En contraste, los organismos con arquitectura modular se desarrollan a partir del cigoto y por la repetición secuencial de unidades de construcción. Este tipo de construcción tiene diversas consecuencias en aspectos de crecimiento, reproducción y sobrevivencia, las cuales hacen que los organismos modulares tengan propiedades poblacionales que deben ser trabajadas en escalas apropiadas a su arquitectura (Watkinson y White, 1986).

El crecimiento de las poblaciones modulares implica el análisis en dos niveles: el de la población de genets, y el de la población de módulos de un genet.

### II.1.3. Reproducción clonal de macroalgas rizofíticas

Estudios de laboratorio de reproducción vegetativa a través de la extensión de rizoides (Hillis-Colinvaux, 1973; Friedmann y Roth, 1977) o fragmentación del talo (Walters y Smith, 1994), han apoyado la inferencia de que la reproducción asexual es el proceso principal del mantenimiento y/o expansión de las poblaciones de algas bryopsidales (Friedmann y Roth, 1977).

Las plantas con reproducción clonal crecen de forma modular mediante la producción de rizomas y estolones. Cada módulo (o rameto) tiene la capacidad potencial de existir independiente, así que las plantas clonales producen una serie de rametos interconectados (Figura 1) al inicio de su existencia, pero que pueden desprenderse del resto de la planta en etapa más avanzada. Los rametos ocupan un lugar diferente en el plano horizontal (Sutherland y Stillman, 1988). La capacidad de las algas clonales en respuesta a las condiciones ambientales locales influirán en su capacidad para colonizar una zona heterogénea (Hutching, 1988).

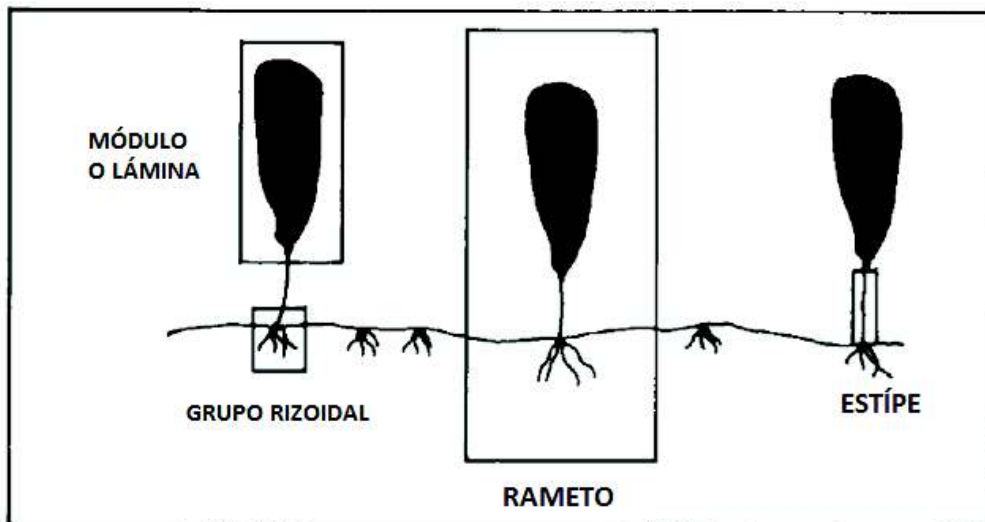


Figura 1. Representación esquemática de las partes clonales de un fragmento clonal de una alga que muestra el módulo o lámina, rameto, estípe y el grupo rizoidal.

Varios estudios previos muestran que algunas plantas clonales disminuyen y/o aumentan de ramificaciones sus estolones con frecuencia en entornos favorables (Ashmun y Pitelka, 1984; Schmid, 1986; Mitchell y Woodward, 1988; de Kroon y Knops, 1990; Alpert 1991; Marbà y Duarte, 1998; Collado-Vides y Robledo, 1999). Estos cambios en la morfología de plantas clonales, han sido interpretados en relación a la disponibilidad de los recursos. En este sentido, se han descrito dos formas de crecimiento para plantas clonales:

La estrategia tipo guerrilla o crecimiento difuso, que permite que las plantas puedan invadir nuevos espacios, se caracteriza por plantas con una serie larga de estolones y rametos menos ramificados, y la estrategia tipo falange que es una forma de crecimiento compacto, el cual se caracteriza por estolones cortos y muy ramificados y rametos altamente ramificados.

El género *Caulerpa* se caracteriza por una extrema variación morfológica. Barilotti (1970) demostró que la morfología de *Caulerpa prolifera* está influenciada por la intensidad de la luz. Posteriormente en un estudio realizado por Calvert (1976) sobre tipos de respuestas de las características morfológicas a la intensidad de iluminación reportaron modificación morfológica interesante en respuesta de alta o baja intensidad de la luz en varias especies de *Caulerpa*.

#### **II.1.4. Ventajas y desventajas de la clonalidad**

Algunos autores consideran que la clonalidad es una adaptación; una opción ecológica que permite alterar diversos atributos de historia de vida a favor de la dispersión de un genotipo en el tiempo y en el espacio. (Mogie y Hutchings, 1990; Mandujano et al., 2001).

Este proceso de dispersión de un genotipo es relativamente poco costoso, ya que no se necesitan los accesorios necesarios de la reproducción sexual (en el caso de plantas terrestres) para atraer a los polinizadores, como la producción de flores y recompensas como néctar, fragancias y polen para poder formar semillas; así mismo, permite mantener genotipos eficientes que han sido exitosos en el medio ambiente (Eguiarte et al., 1999). Sin embargo, la reproducción clonal tiene la desventaja de que las plantas pueden tener una dispersión reducida (en comparación con las semillas), porque generalmente los propágulos clonales son

más grandes y no cuentan con mecanismos desarrollados de dispersión. Esta limitación se puede librar produciendo semillas asexualmente como en la agamosperma o en algunos casos propágulos asexuales muy móviles como los de las especies acuáticas y marinas (Reusch et al., 1998; Richards et al., 2004).

## **II.2. Importancia de las Macroalgas Rizofíticas**

Las algas verdes Bryopsidales son ecológicamente muy importantes en ambientes marinos tropicales, incluyendo arrecifes de coral, lagunas, manglares y praderas de pastos marinos (Bach, 1979; Williams, 1984, 1990). Los grupos más representativos son *Caulerpa*, *Halimeda*, *Penicillus*, *Rhipocephalus* y *Udotea*, comúnmente concurren dentro de estos hábitats, donde su abundante biomasa a menudo las convierte en una importante fuente de alimento, vivienda y fuente de carbonato de calcio (Stoner, 1985).

Las especies de algas Bryopsidales tanto calcificantes como no calcificantes producen metabolitos secundarios (terpenoides) que funcionan como elementos de disuasión contra la herbivoría, y según pruebas de laboratorio muestran acción anti-micótica/fúngica (Paul y Fenical, 1986; Puglisi et al., 2004) y se están probando para usos médicos e industriales (Smit, 2004). Las algas rizofíticas forman un importante sotobosque en lechos de pastos marinos (Stoner y Lewis, 1985), a su vez los hábitats de pastos marinos son de alta prioridad para la conservación debido a su alta biodiversidad, tienen gran importancia en la pesca ya que es el hábitat de algunos peces y otros organismos de importancia económica (Duarte, 2002).

## **II.3. Pastos Marinos**

En el presente se reconocen 72 especies de pastos marinos (Short et al., 2011). El bajo número de especies de angiospermas marinas pudiera dar una falsa idea de un origen evolutivo reciente. La hipótesis más aceptada acerca del origen de las angiospermas marinas, es que

derivaron de plantas terrestres (costeras o dulceacuícolas) que pasaron al mar de forma gradual desde un estadio temprano en la historia de las angiospermas en el Cretácico, último periodo del Mesozoico, hace cerca de 100 millones de años. Se han encontrado registros fósiles de géneros y de especies actuales, como *Thalassia*, que han sido datados del Eoceno, hace alrededor de 56 millones de años (den Hartog y Kuo, 2006). Por lo tanto el origen evolutivo de los pastos marinos y su existencia en el ambiente marino es mucho más reciente que los de las macroalgas, incluyendo las macroalgas rizofíticas. Aunque los pastos marinos tienden a dominar las comunidades de fondos blandos, estas dos clases de plantas marinas muy distintas entre sí siguen coexistiendo en los mares tropicales hasta la fecha.

#### **II.4. Macroalgas Rizofíticas Asociadas a los Pastos Marinos**

En general, se plantea la existencia de relaciones de competencia por la luz y los nutrientes entre los pastos marinos y las macroalgas rizofíticas, aun cuando existen pocos estudios dedicados a este tema. Las acumulaciones de macroalgas dispersas sobre el fondo y las epifitas pueden inhibir el desarrollo de los pastos marinos, debido a que producen sombreado sobre éstos y compiten por los nutrientes (Bulthuis y Woelkerling, 1983), aunque la abundancia de todas estas plantas puede ser controlada por los herbívoros (Thayer et al., 1984). Davis y Fourqurean (2001) encontraron evidencias de interacción competitiva entre *Thalassia testudinum* y la macroalga rizofítica *Halimeda incrassata*, al parecer debido a una competencia por los nutrientes y no por la luz.

#### **II.5. Proceso de Sucesión de Macroalgas Rizofíticas y Pastos Marinos**

Una de las funciones ecológicas sobresaliente de las macroalgas rizofíticas es que actúan como facilitadores para el desarrollo del lecho de vegetación marina dominado por pastos marinos en fondos arenosos o de barro (den Hartog, 1971; Williams, 1990). Los parches de

vegetación que han sido perturbados y que están desprovistos de follaje tienen menor materia orgánica y nutrientes que áreas provistas de vegetación (Dawes et al., 1997). Las macroalgas rizofíticas son capaces de colonizar estas áreas desnudas (generalmente causadas por la deposición de sedimentos y la erosión de las tormentas), mediante la unión a los sedimentos y la adición de materia orgánica a través de sus talos en descomposición, ayudando así al establecimiento de los pastos marinos (Scoffin, 1970; Williams, 1990; Fourqurean y Rutten, 2004).

Las especies de algas rizofíticas son capaces de colonizar áreas recientemente despejadas más rápidamente que los pastos marinos (Williams, 1990; Stafford y Bell, 2006), pero existe poca información sobre este tema en la literatura.

Dentro de las algas rizofíticas existen algunas diferencias específicas entre las especies en cuanto a su tasa de colonización. Patriquin (1975) señaló que especies del género *Udotea* y *Caulerpa* se presentaban primeramente en la secuencia de sucesión precedida de *Halimeda incrassata* que a su vez le sigue *Halimeda opuntia* (estudios realizados en Barbados y Carriacou, Las Antillas).

Después de la colonización inicial por algas rizofíticas y pastos marinos de rápido crecimiento tales como *Halodule wrightii* o *Syringodium filiforme*, las praderas marinas del Caribe llegan a un nivel de maduración total con *Thalassia testudinum* como especie clímax (den Hartog, 1971). El sistema de anclaje de los pastos marinos penetra profundamente en los sedimentos, y en las áreas de poca profundidad de sedimentos se encuentran arraigadas las macroalgas rizofíticas y algunas especies de pastos marinos de sucesión temprana (Birch y Birch, 1984; Zieman et al., 1989). Sin embargo, en muchas áreas con sedimentos adecuados para el crecimiento de los pastos marinos, estos coexisten con las macroalgas rizofíticas (Williams, 1990).

Se ha realizado una cantidad muy limitada de trabajos experimentales sobre las interacciones de las especies nativas de macroalgas rizofíticas con los pastos marinos, mientras que se ha dedicado un poco más de atención a estudiar los impactos de especies invasoras de macroalgas rizofíticas (como *Caulerpa*) sobre los pastos marinos (de Villèle y Verlaque, 1995; Davis y Fourqurean, 2001; Dumay et al., 2002; Taplin et al., 2005).



## II.6. Trabajos Previos

Un estudio clave que describe el proceso de colonización y la coexistencia de las macroalgas rizofíticas y los pastos marinos es el realizado por Williams (1990). En un experimento llevado a cabo en las Islas Vírgenes, al remover la vegetación de parcelas, la recolonización comenzó por algas rizofíticas, las cuales facilitan la acumulación de nutrientes en los sedimentos al estabilizarlos y añadir materia orgánica a partir de la rápida descomposición de sus talos. Meses después empezó la colonización del pasto marino de rápido crecimiento *Syringodium filiforme* y *Thalassia testudinum* llegó alrededor de 30 meses después. En este estudio se demostró la importancia de las algas rizofíticas en la facilitación de la recolonización y colonización de los pastos marinos, ya que en parcelas donde dichas algas fueron removidas, la densidad y biomasa de los pastos fueron menores. La densidad de *T. testudinum* y las tasas de producción de amonio en los sedimentos eran más bajas que en el lecho de vegetación marina circundante no perturbado. Sin embargo, en un estudio a largo plazo, se señaló que una vez que *T. testudinum* se encontraba bien establecida, la abundancia de algas rizofíticas y otros pastos como *S. filiforme* disminuyeron, pero no desaparecieron (Williams 1990). Esto aparentemente contradice un estudio realizado en Bermudas por South (1983) quien encontró que en praderas establecidas, donde se encuentra una mezcla de *T. testudinum* y *S. filiforme*, hay una tendencia hacia la exclusión de algas rizofíticas. Pero Williams (1990) observó que los pastos no reemplazaron a las macroalgas por completo, y la vegetación climax consistió de pastos marinos y macroalgas creciendo juntos.

En otro estudio, Multer (1988) encontró en Antigua que altas densidades de pastos marinos pueden obstaculizar el crecimiento de macroalgas del género *Halimeda*, y plantea la hipótesis que la inhibición de las macroalgas ocurre a cuenta de la reducción de luz y/o competencia por nutrientes. En estudios posteriores, Davis y Fourqurean (2001) investigaron experimentalmente la relación interespecífica entre *T. testudinum* y la macroalga rizofítica *H. incrassata*, manipulando la densidad de las especies. La evidencia de interacción se midió por los cambios en producción y biomasa en un plazo de 4 meses. La presencia de pastos marinos disminuyó el tamaño de los talos de las macroalgas, así como su tasa de crecimiento, pero la

presencia de las macroalgas también tuvo un efecto significativo, aunque menor, sobre los pastos marinos. A partir de sus experimentos sugirieron que el mecanismo de la interacción entre estas especies es la competencia por nitrógeno. La razón de C:N en las hojas de *T. testudinum* fue significativamente menor en los tratamientos de eliminación de algas, es decir, al eliminar las macroalgas los pastos tenían mayor cantidad de nitrógeno disponible (Davis y Forqurean, 2001).

Bedinger et al. (2013) encontraron una profundidad de anclaje menor, en las macroalgas rizofíticas, que la profundidad de las raíces de los pastos marinos concurrentes. Además, la media de la riqueza de macroalgas fue significativamente mayor en las parcelas con <50% de cobertura de pastos marinos, mientras que la media de la riqueza de macroalgas fue significativamente menor en parcelas con  $\geq 50\%$  de cobertura de pastos marinos, sugiriendo que los pastos marinos tienen una influencia negativa sobre las macroalgas rizofíticas.

### **III. JUSTIFICACIÓN**

Las macroalgas rizofíticas tienen un papel ecológico muy importante en las costas tropicales con sedimentos blandos, no solo como facilitadores para la colonización de los pastos marinos, sino también como estabilizadores de sedimento y productores de arena calcárea. Sin embargo, estas algas han sido poco estudiadas y en especial se ha ignorado su existencia en las praderas de los pastos marinos. Una manera de entender la coexistencia de macroalgas rizofíticas con otras plantas marinas, como son los pastos marinos, es estudiar la tasa de recolonización de las macroalgas en diferentes ambientes o áreas de estudio.

## **IV. OBJETIVOS**

### **IV.1. Objetivo General**

Determinar el proceso de recolonización de macroalgas rizofíticas en cuatro sitios de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo

### **IV.2. Objetivos Particulares**

Determinar la tasa de recolonización de macroalgas rizofíticas en dos sitios a través de observaciones semanales por un periodo de un mes

Determinar la densidad de macroalgas rizofíticas colonizadores en parcelas experimentales desprovistas manualmente de todas las algas, en cuatro sitios de muestreo

Obtener parámetros biométricos y la biomasa de las macroalgas rizofíticas recolonizantes en los cuatro sitios de muestreo

## **V. HIPÓTESIS**

La densidad y tamaño de los reclutas clonales de macroalgas rizofíticas depende de su composición específica y densidad en la periferia, además de las características abióticas y bióticas generales de cada uno de los sitios de muestreo.

## **VI. METODOLOGÍA**

### **VI.1. Estudio Preliminar de Recolonización de Macroalgas Rizofíticas**

Previamente al presente estudio de tesis se llevó a cabo un diseño experimental en una de las áreas a considerar para los experimentos de esta tesis, con el fin tener una base de diseño para la futura observación de recolonización algal (Apéndice 1).

En este trabajo previo se utilizaron marcos de PVC de 80 x 80 cm que se fijaron en el sustrato para determinar el área de la parcela para el experimento.

Se retiraron todas las macroalgas y pastos marinos dentro del marco de PVC y se revolvió el sedimento dejando sólo una macroalga central con el fin de observar como recolonizaba de nuevo el interior de la parcela de 80 x 80 cm.

Con ayuda de un cuchillo se cortó alrededor del marco de PVC los rizoides de las macroalgas que quedaban por fuera de la parcela con el fin de que éstas no interfirieran en la observación de la dispersión clonal de la macroalga central de la parcela.

Después de observar por más de un mes las parcelas fijadas en el mar y no obtener algún resultado se decidió rediseñar el experimento para poder utilizarlo como metodología para este trabajo de tesis. El nuevo diseño experimental se explica posteriormente en la parte de metodología.

Las posibles causas a las que se pudo deber la falla del primer diseño de experimento fueron las siguientes:

1. El sitio de posicionamiento de parcelas no fue el adecuado. Había muy poca profundidad de sedimento y alta energía hidrodinámica cuando el viento aumenta.
2. El tamaño de los cuadrantes de remoción era demasiado grande, esto combinado con la posición de las parcelas en una zona de alta energía hidrodinámica resultaba en un sedimento muy suelto o poco estable, evitando así que los rizoides de las macroalgas pudieran desarrollarse rápidamente.

3. Ocurrió una tormenta inesperada y se perdieron algunas de las parcelas y algas arraigadas en el centro de éstas.

## VI.2. Descripción del Área de Estudio

### VI.2.1. Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos

El trabajo se desarrolló en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (Figura 2), perteneciendo al Sistema Arrecifal de la Provincia Geográfica del Caribe, que se extiende a lo largo de la costa oriental de la Península de Yucatán, incluyendo Centro y Sudamérica. Comprende los Arrecifes del Mar Caribe, Bermudas, Bahamas, Florida y los del Golfo de México. Inicia en Cabo Rojo al Sur de Tampico, en el Estado costero de Tamaulipas, México, hasta el Este de Venezuela y Norte del delta Orinoco. En México se localiza en la costa del Estado de Quintana Roo constituyendo la sección Norte del Gran Arrecife Mesoamericano.

### VI.2.2. Vegetación marina

Para la zona marina del Parque Nacional, se han reportado tres especies de pastos marinos, 264 especies de algas y 7 especies de dinoflagelados simbiotes. Según Ruíz-Rentería *et al.* (1998), la vegetación de la laguna arrecifal se puede dividir en tres zonas: Una franja litoral angosta, una zona intermedia amplia, y un área de vegetación en el arrecife Oeste.

La franja litoral mide entre 20 y 50 m de ancho, presenta vegetación bien desarrollada que está dominada por los pastos marinos *Thalassia testudinum* o *Syringodium filiforme*, acompañadas por algas rizofíticas y ocasionalmente plantas de *Halodule wrightii*.

La zona intermedia mide entre 200 y 1000 m de ancho, la vegetación del fondo consiste de *T. testudinum*, *S. filiforme* y algas rizofíticas, aunque en algunos sitios dominan formas de *Lobophora variegata* o *Laurencia intricata*; también es común encontrar áreas arenosas de 10 m<sup>2</sup> a 100 m<sup>2</sup> desprovistas de vegetación.



La zona del arrecife Oeste mide entre 100 y 400 m de ancho, la especie dominante es *T. testudinum*; *S. filiforme* y las macroalgas rizofíticas son menos abundantes en general, aunque hay excepciones.

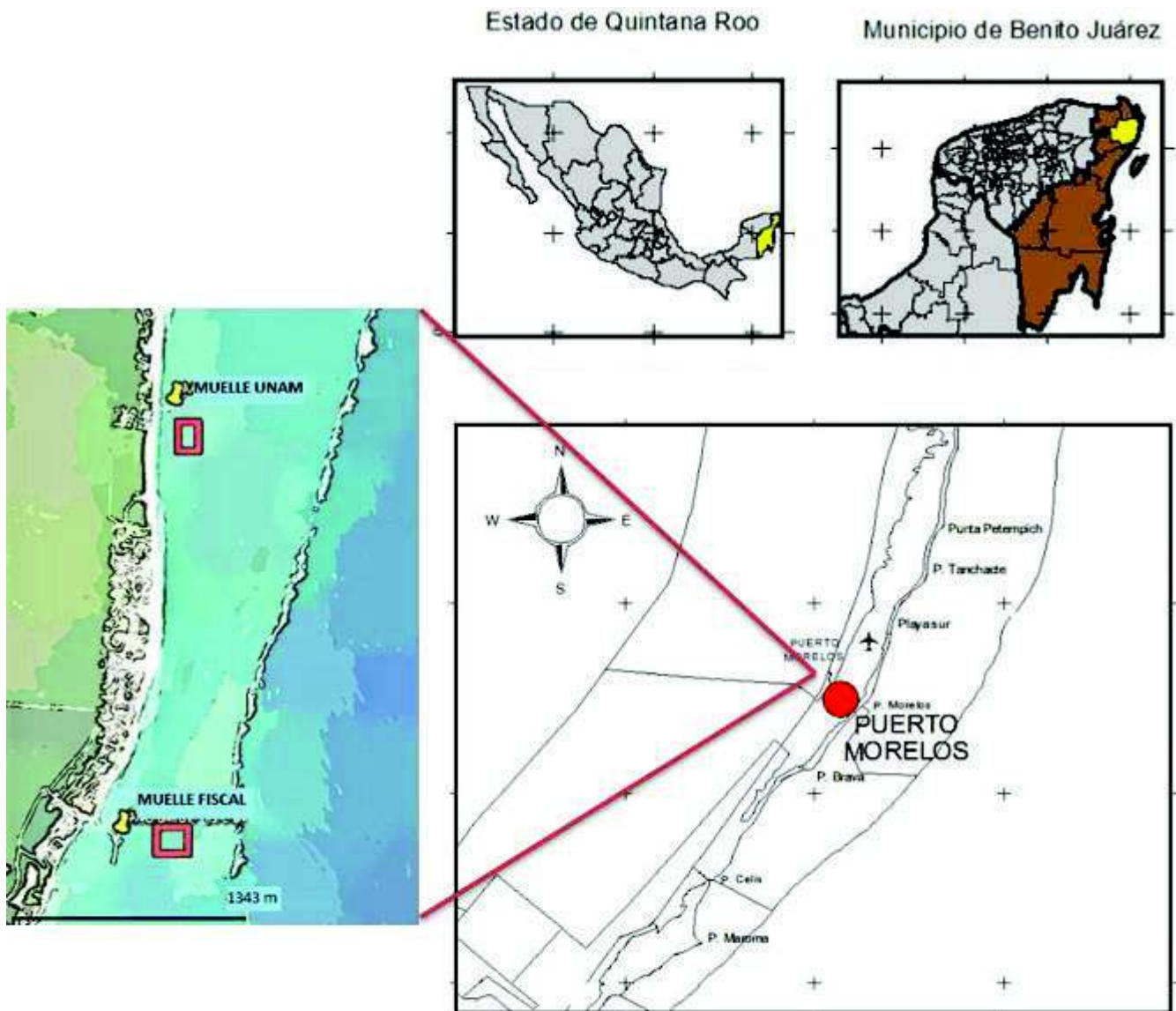


Figura 2. Localización de área de estudio. Mapa tomado y modificado de Cruz-Zizumbo et al. 2013.

### VI.2.3. Sitios de estudio

Los sitios a utilizar para el muestreo fueron (Apéndice 2): el muelle del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM (MU) ( $20^{\circ} 52' N$ ,  $86^{\circ} 52' O$ ) donde una franja de vegetación fue enterrada por completo durante el paso de huracán Wilma en 2005, con una pradera adyacente bien desarrollado. La segunda área está ubicada en el muelle fiscal de Puerto Morelos (MF) ( $20^{\circ} 50' N$ ,  $86^{\circ} 52' O$ ), donde hay una alta incidencia de ramoneo por parte de las tortugas marinas. Las tortugas crean parches de ramoneo dentro la extensa pradera, explotándolos y luego abandonándolos creando un mosaico de parches en distintas etapas de ramoneo y recuperación (Molina-Hernández, 2013).

Dentro de estas 2 áreas mencionadas (MU, MF) se establecieron dos zonas de muestreo, según observaciones preliminares de abundancia general de las macroalgas rizofíticas (en Figura 3, Tabla I y Tabla II).

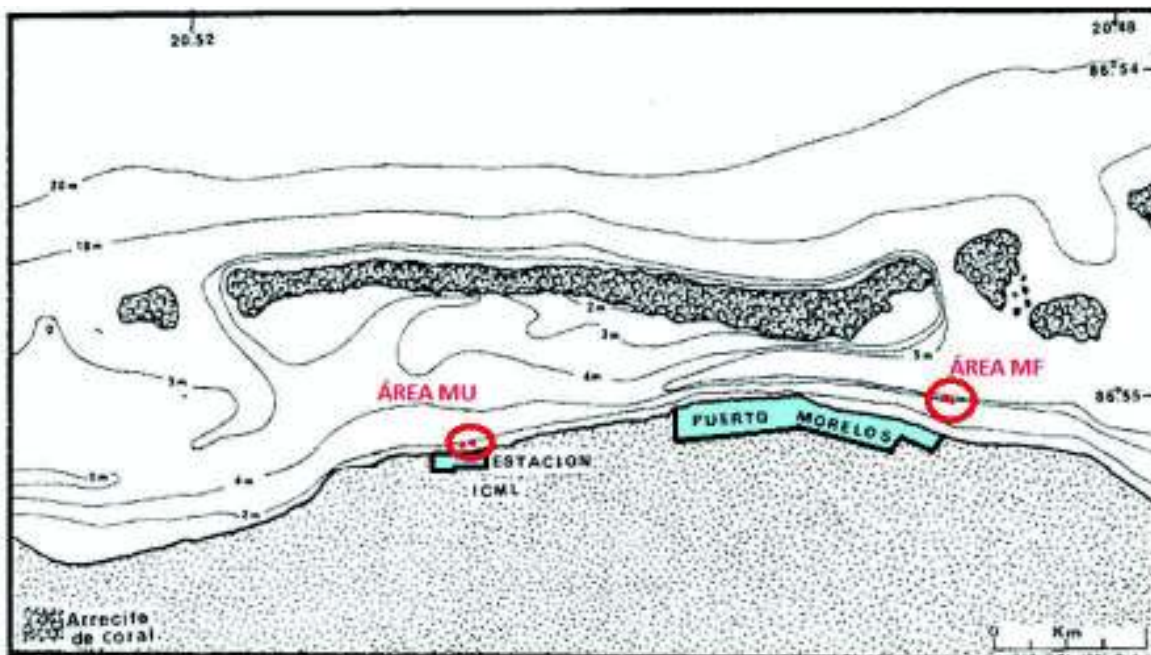


Figura 3. Representación de áreas de muestreo (muelle UNAM y muelle Fiscal) y a las profundidades a las que se encuentran dentro de la laguna arrecifal de Puerto Morelos. Mapa tomado y modificado de Álvarez-García et al., 1985.

Tabla I. Nombre de las áreas de estudio y que zona le corresponde a cada una de las áreas así como una breve descripción de cada zona.

ÁREA	ZONA	DESCRIPCIÓN
Muelle UNAM (MU)	1	Muchas algas
Muelle UNAM (MU)	2	Bastantes algas / diversidad alta
Muelle Fiscal (MF)	3	Más o menos algas /baja diversidad
Muelle Fiscal (MF)	4	Poca abundancia de algas

Tabla II. Listado de las zonas de estudio así como la distancia a la costa a la que se encuentran y su profundidad correspondiente, de igual forma una descripción más detallada de la vegetación presente en cada zona de muestreo así como la profundidad de sedimento.

ZONA	DISTANCIA A LA COSTA (m)	PROFUNDIDAD (m)	VEGETACIÓN
1	30	2	Rara presencia de pastos marinos, alta abundancia de macroalgas rizofíticas. Profundidad de sedimento: de 11 a 15 cm.
2	40	2.5	Moderada abundancia de algas rizofíticas acompañadas de pastos marinos, mayormente <i>T. testudinum</i> . Profundidad de sedimento: de 11 a 15 cm.
3	100	3	<i>T. testudinum</i> , <i>S. filiforme</i> en recuperación de ramoneo por tortuga marina, con una abundancia moderada de macroalgas rizofíticas. Profundidad de sedimento: >30 cm.
4	100	4	Escasa abundancia de macroalgas rizofíticas en una pradera densa de <i>T. testudinum</i> y <i>S. filiforme</i> . Profundidad de sedimento: >30 cm.

### VI.3. Trabajo de Campo

El presente estudio y experimentos *in situ* se realizaron con ayuda de equipo de buceo autónomo.

Para cada una de las 4 zonas de estudio se establecieron 7 parcelas de 30 x 30 cm. Dichas parcelas se colocaron con ayuda de un marco de metal de 30 x 30 cm que se fijó al sustrato por medio de clavos en las esquinas, posteriormente los clavos se unieron con cuerda para fijar las parcelas y el marco de metal se retiró (Figura 4).



Figura 4. Parcela de 30 x 30 cm fijada al sedimento con ayuda de clavos y cuerdas, marcada con cinta para su identificación para dar seguimiento al crecimiento clonal de las macroalgas rizofíticas.

Posteriormente se encuadró cada parcela con un marco de PVC de 50 x 50 cm, con el fin de determinar un contorno de 10 cm alrededor de la parcela. Las algas rizofíticas que se encontraban en este contorno fueron contadas e identificadas para determinar la densidad algal circundante a la parcela (control).

Al terminar el conteo de algas circundantes se retiró el marco de PVC. Finalmente se removieron (o eliminaron) las algas rizofíticas dentro de la parcela de 30 x 30 cm (Figura 5) (Permiso de Pesca de Fomento No. DGOPA.00666.070213.0221). Para identificar las parcelas se les asignó un número en una etiqueta que se colocó en los clavos de la parcela, de igual manera se colocó una pequeña boya para ubicarlas fácilmente bajo el agua.

El total de parcelas fue de 28, es decir, 7 parcelas para cada una de las 4 zonas de muestreo. Primeramente (27 de junio de 2013) se colocaron las 14 parcelas correspondientes a la zona 1 y zona 2 del área muelle UNAM, las cuales recibieron visitas aproximadamente semanales para el monitoreo del crecimiento clonal de macroalgas rizofíticas por medio de registros fotográficos. Posteriormente (31 de julio de 2013) se colocaron las siguientes 14 parcelas correspondientes a la zona 3 y zona 4 del área de muelle fiscal, cuyas observaciones se realizaron sólo durante el inicio y al final del experimento, ya que esta área era de difícil acceso.

Las algas rizofíticas que crecieron en las parcelas después de un mes de observación se recolectaron y se llevaron al laboratorio para ser procesadas. Al mismo tiempo que se recolectaron las algas se tomaron núcleos de sedimento con ayuda de un nucleador de PVC de 10 cm de diámetro, enterrándolo manualmente alrededor de 10 cm en el sedimento.

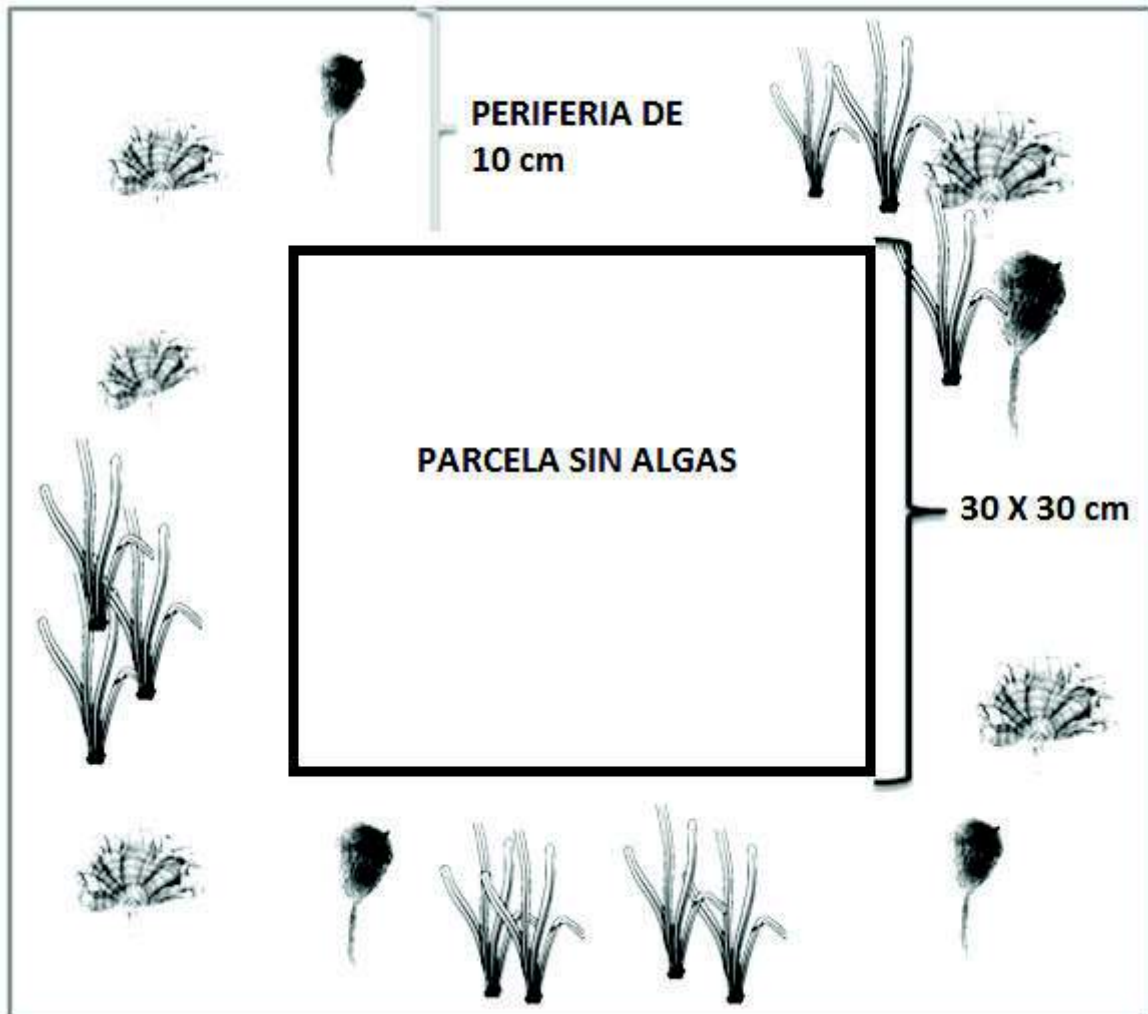


Figura 5. Simulación de parcela con periferia de PVC para determinar densidad de algas circundantes.

### VI.3.1. Profundidad de sedimento

Se determinó la profundidad de sedimento (Tabla II.) con ayuda de una varilla de metal de 40 cm de longitud. Introduciendo la varilla en el sedimento hasta topar con piedra tipo laja.

## **VI.4. Trabajo de Laboratorio**

### **VI.4.1. Registro fotográfico del proceso de reclutamiento**

En el área muelle UNAM, se tomaron fotografías detalladas con distintas cámaras fotográficas digitales comerciales (Apéndice 3). Con la ayuda de un cuadrante auxiliar subdividido en 9 cuadrantes de 10 x 10 cm se logró ubicar cada nuevo recluta durante las visitas semanales, seguir su desarrollo y determinar la especie en las fotografías. Se capturaron los registros de reclutas algales de los cuadrantes en una hoja de Excel y se evaluó la tasa de reclutamiento de los distintas especies.

### **VI.4.2. Identificación de especies**

En el laboratorio de botánica marina del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Puerto Morelos, las muestras colectadas fueron enjuagadas en agua corriente, para limpiarlas de materia orgánica adherida u otros organismos presentes en ellas, posteriormente se colocaron en bolsas ziploc en donde cada bolsa contenía la muestra correspondiente a cada parcela.

Se identificaron las macroalgas con ayuda de guías de campo y claves taxonómicas (Woelkerling, 1976; Littler et al., 2000; Garduño et al., 2002).

Las macroalgas recolectadas se refrigeraron para su conservación mientras se procesaban individualmente.



### **VI.4.3. Obtención de medidas biométricas**

Las algas se colocaron en tablas de plástico sobre la mesa de laboratorio, dividiendo el talo superior del talo bajo tierra (Apéndice 4).

Con una navaja de afeitar se removieron restos de materia orgánica y algas epífitas de la sección superior del talo. La longitud de la lámina se midió con ayuda de una regla de plástico de 30 cm, así como el ancho máximo de la lámina con un vernier de precisión.

Las muestras procesadas (talo superior y rizoide con sedimentos) se colocaron en una estufa de secado a 60 °C por 48 hrs mínimo para determinar su peso seco con ayuda de una balanza analítica Explorer Pro Ohaus.

Se juntaron todos los rizoides por especie de cada parcela. Después de ser pesados, se lavaron y se colocaron por aproximadamente 48 hrs en frascos de vidrio con ácido clorhídrico al 5% para iniciar la descalcificación. Una vez removidos los granos de sedimento calcáreos, se lavaron con cuidado en agua corriente. Al finalizar este paso se colocaron en la estufa nuevamente, a 60 °C por 24 hrs para determinar su peso seco libre de sedimentos.

## VI.5. Análisis de Datos

La diversidad de especies se puede definir como el número de especies en una unidad de área, tiene dos componentes principales, la riqueza (número de especies) y la equitatividad (número de individuos de una sola especie). Generalmente en las evaluaciones biológicas se usan índices de diversidad que responden a la riqueza de especies y a la distribución de los individuos entre las especies.

Con el fin de conocer la riqueza de especies de cada parcela y su periferia, para hacer comparaciones entre ellas, se utilizaron los siguientes índices:

- Índice de Diversidad de Margalef
- Índice de Similitud de Jaccard

### VI.5.1. Índice de diversidad de Margalef

El índice de diversidad de Margalef, es una medida utilizada en ecología para estimar la biodiversidad de una comunidad. Este índice tiene como base la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada, esenciales para medir el número de especies en una unidad de muestra (Margalef, 1969).

Valores de este índice inferiores a 2,0 son considerados como relacionados con zonas de baja biodiversidad y valores superiores a 5,0 son considerados como indicativos de alta biodiversidad. Para el cálculo del índice de Margalef se usa la siguiente fórmula:

$$D_{Mg} = S-1/\ln N$$

Dónde:

$D_{Mg}$  = Índice de Diversidad de Margalef

S = número de especies

N = número total de individuos

### **VI.5.2. Índice de similitud de Jaccard**

Mide la similitud entre dos sitios por medio del número de especies compartidas con el número total de especies exclusivas (Krebs, 1972).

El intervalo de valores para este índice va de 0 cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios, hasta 1 cuando los dos sitios tienen la misma composición de especies. El índice de Jaccard se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I_j = c/a+b-c$$

Dónde:

$I_j$  = Índice de similitud de Jaccard

a = número de especies presentes en sitio A

b = número de especies presentes en sitio B

c = número de especies que comparten ambos sitios (A y B)

### **VI.5.3. Pruebas estadísticas**

Se realizó una prueba de regresión lineal para determinar la relación entre la densidad de reclutas y la densidad de las macroalgas rizofíticas de la periferia de la parcela; este análisis se hizo para cada una de las 4 zonas de estudio.

También se analizaron los datos de densidad, biomasa y volumen subterráneo de los reclutas de macroalgas rizofíticas con ayuda de una Prueba t de Student para determinar las diferencias entre dichos valores son significativas entre zonas de muestreo ( $P = 0.05$ ).

Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Excel del paquete de Microsoft Office.

## VII. RESULTADOS

### VII.1. Densidad de Reclutas de Macroalgas Rizofíticas

La densidad de reclutas aumenta rápidamente, apareciendo los primeros reclutas después de 8 días, aumentando su densidad paulatinamente (Figura 6, Figura 7). Se observó un reclutamiento diferencial entre especies tanto en la zona 1 (Tabla III) como en la zona 2 (Tabla IV). Después de 34 días, la comunidad de reclutas en el interior era distinta de la comunidad periférica. La densidad de todos los grupos algales de los reclutas era más bajas (con excepción de *Penicillus* en Zona I). En zona I, se encontraron reclutas de *Avrainvillea* en los cuadrantes experimentales, mientras que esta macroalga no estaba presente en su periferia (Figuras 6 y Figura 7). *Penicillus lamourouxii*, *P. dumentosus* y *Udotea* spp. (probablemente *Udotea wilsonii*) eran más abundantes en los cuadrantes experimentales que en sus áreas periféricas en la Zona I (Tabla III), mientras que en la Zona II, la densidad de *Halimeda simulans* y *P. lamourouxii* también fue mayor en los cuadrantes experimentales que en la periferia (Tabla IV).

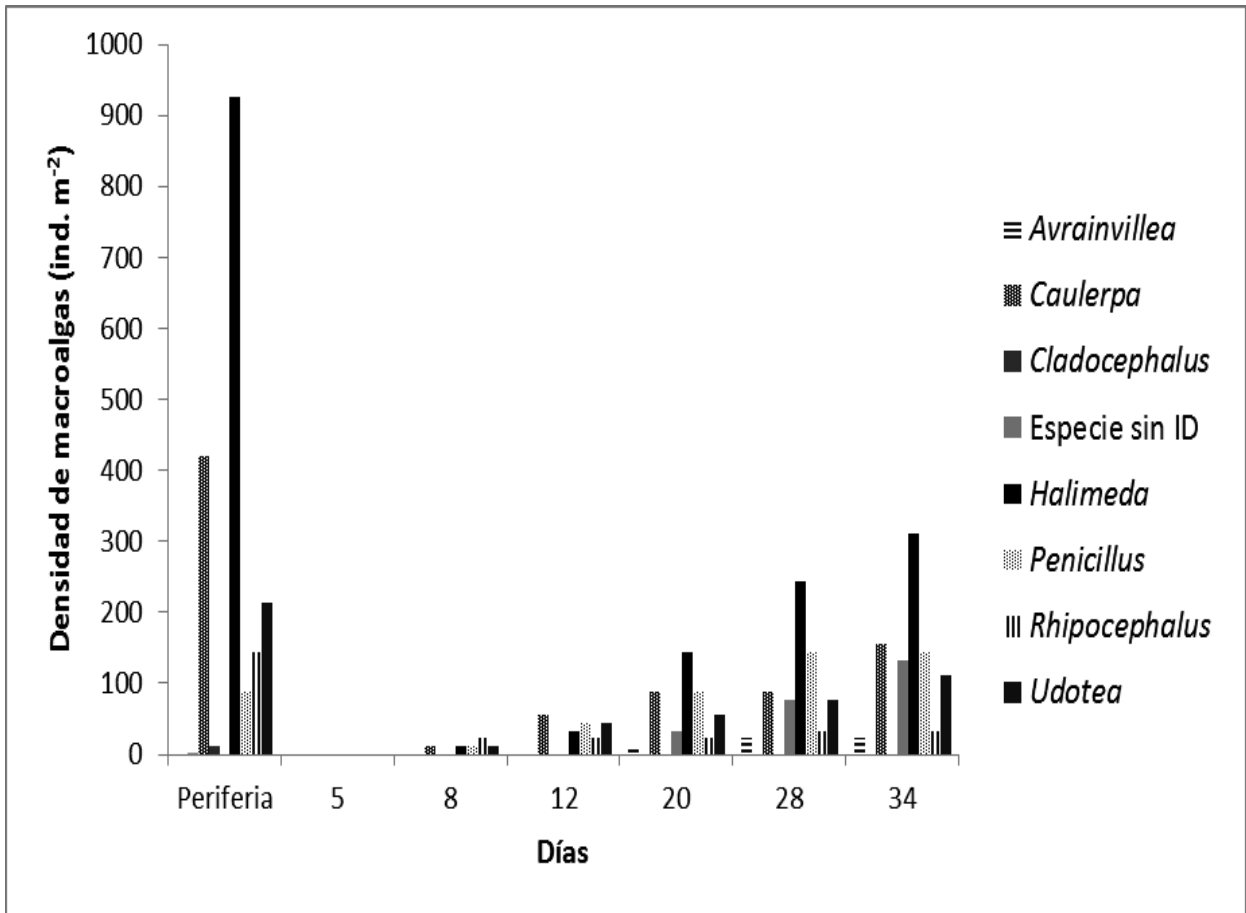


Figura 6. Densidad de las macroalgas rizofíticas (ind. m<sup>2</sup>) agrupadas por género en contorno (periferia) y dentro de las áreas experimentales después de 34 días de iniciado el experimento en la Zona 1 del área MU en la Laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Tabla III. Especies de macroalgas rizofíticas presentes en Zona 1 del area MU en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y su densidad (ind. m<sup>2</sup>) tanto del área periférica como adentro de las parcelas a través de un periodo de 34 días.

ESPECIES	PERIFERIA	Días					
		5	8	12	20	28	34
<i>Avrainvillea</i> spp	0	0	0	0	11	22	22
<i>Caulerpa lanuginosa</i>	419	0	11	56	89	89	156
<i>Cladocephalus</i>							
<i>luteofuscus</i>	13	0	0	0	0	0	0
Especie sin ID	0	0	0	0	33	78	133
<i>Halimeda incrassata</i>	844	0	11	33	122	200	267
<i>Halimeda monile</i>	81	0	0	0	22	33	33
<i>Halimeda simulans</i>	0	0	0	0	0	11	11
<i>Penicillus capitatus</i>	75	0	0	0	22	44	44
<i>Penicillus dumetosus</i>	6	0	0	0	0	11	11
<i>Penicillus lamourouxii</i>	6	0	11	44	67	89	89
<i>Rhipocephalus phoenix</i>	144	0	22	22	22	33	33
<i>Udotea conglutinata</i>	106	0	0	33	44	56	78
<i>Udotea flabellum</i>	94	0	11	11	11	11	11
<i>Udotea</i> spp	13	0	0	0	0	11	22

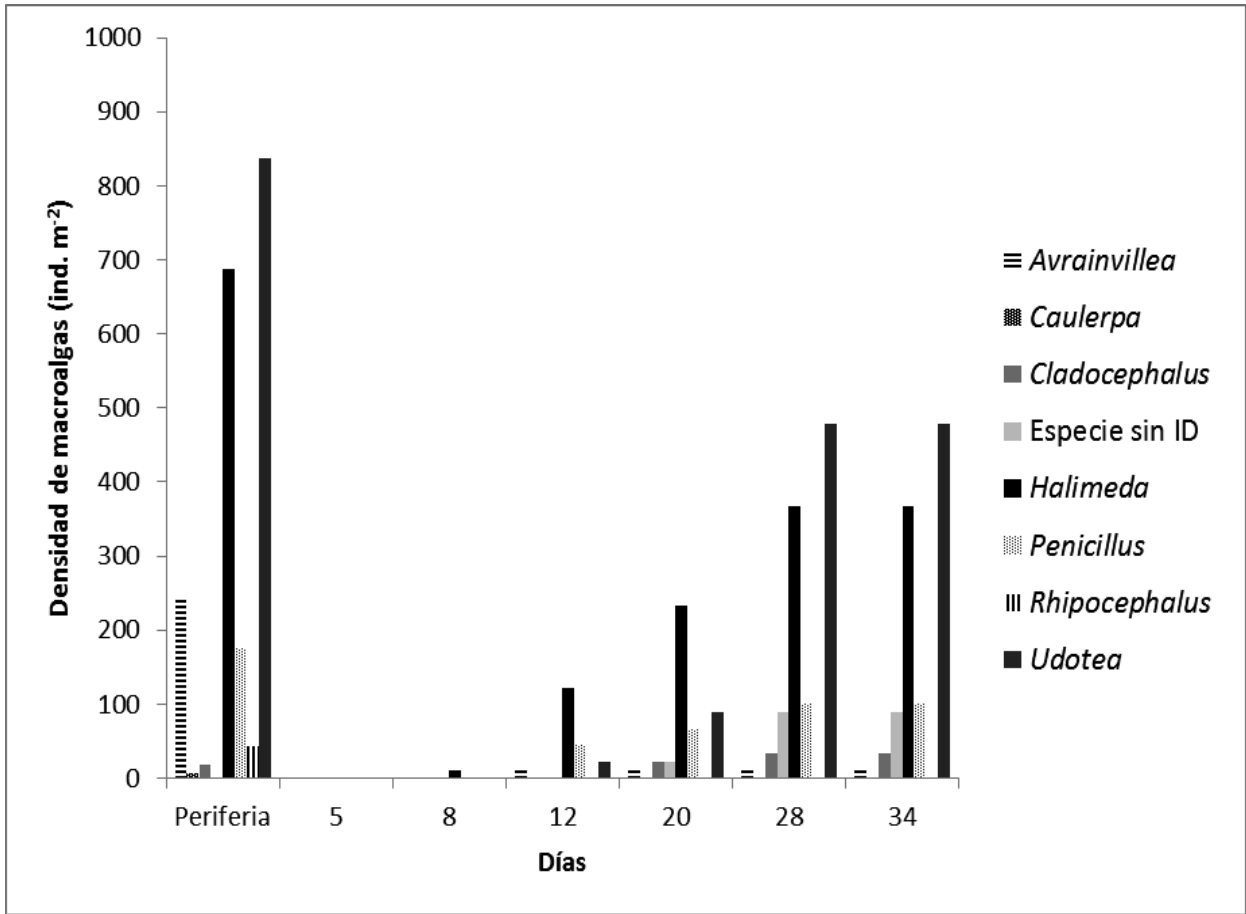


Figura 7. Densidad de las macroalgas rizofíticas (ind. m<sup>2</sup>) agrupadas por género en periferia y dentro de las parcelas después de 34 días de iniciado el experimento en las Zona 2 del área MU en la Laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Tabla IV. Especies de macroalgas rizofíticas presentes en Zona 2 del área MU en la laguna arrecifal de Puerto Morelos y su densidad (ind. m<sup>2</sup>) tanto del área periférica como adentro de las parcelas a través de un periodo de 34 días.

ESPECIES	PERIFERIA	Días					
		5	8	12	20	28	34
<i>Avrainvillea</i> spp	244	0	0	11	11	11	11
<i>Caulerpa prolifera</i>	6	0	0	0	0	0	0
<i>Cladocephalus</i>							
<i>luteofuscus</i>	19	0	0	0	22	33	33
Especie sin ID	0	0	0	0	22	89	89
<i>Halimeda incrassata</i>	569	0	0	100	178	267	267
<i>Halimeda monile</i>	106	0	11	11	22	44	44
<i>Halimeda simulans</i>	13	0	0	11	33	56	56
<i>Penicillus capitatus</i>	113	0	0	22	33	33	33
<i>Penicillus dumetosus</i>	19	0	0	0	0	0	0
<i>Penicillus lamourouxii</i>	31	0	0	11	22	56	56
<i>Penicillus pyriformis</i>	13	0	0	11	11	11	11
<i>Rhipocephalus phoenix</i>	44	0	0	0	0	0	0
<i>Udotea conglutinata</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Udotea flabellum</i>	81	0	0	0	0	11	11
<i>Udotea</i> spp	756	0	0	22	89	467	467



### VII.1.Tasa de Reclutamiento de Macroalgas Rizofíticas

La tasa de reclutamiento de todas las algas en conjunto aumento hasta los 20 – 28 días, para posteriormente declinar después de 28-34 días (Fig. 7, 8). En la Zona 1, *Halimeda* se presenta como el mayor colonizador, mientras que para la Zona 2 lo representa *Udotea* (Figura 8, Figura 9). Se observó una tasa de reclutamiento diferencial entre especies tanto en la Zona 1 (Tabla V) como en la Zona 2 (Tabla VI).

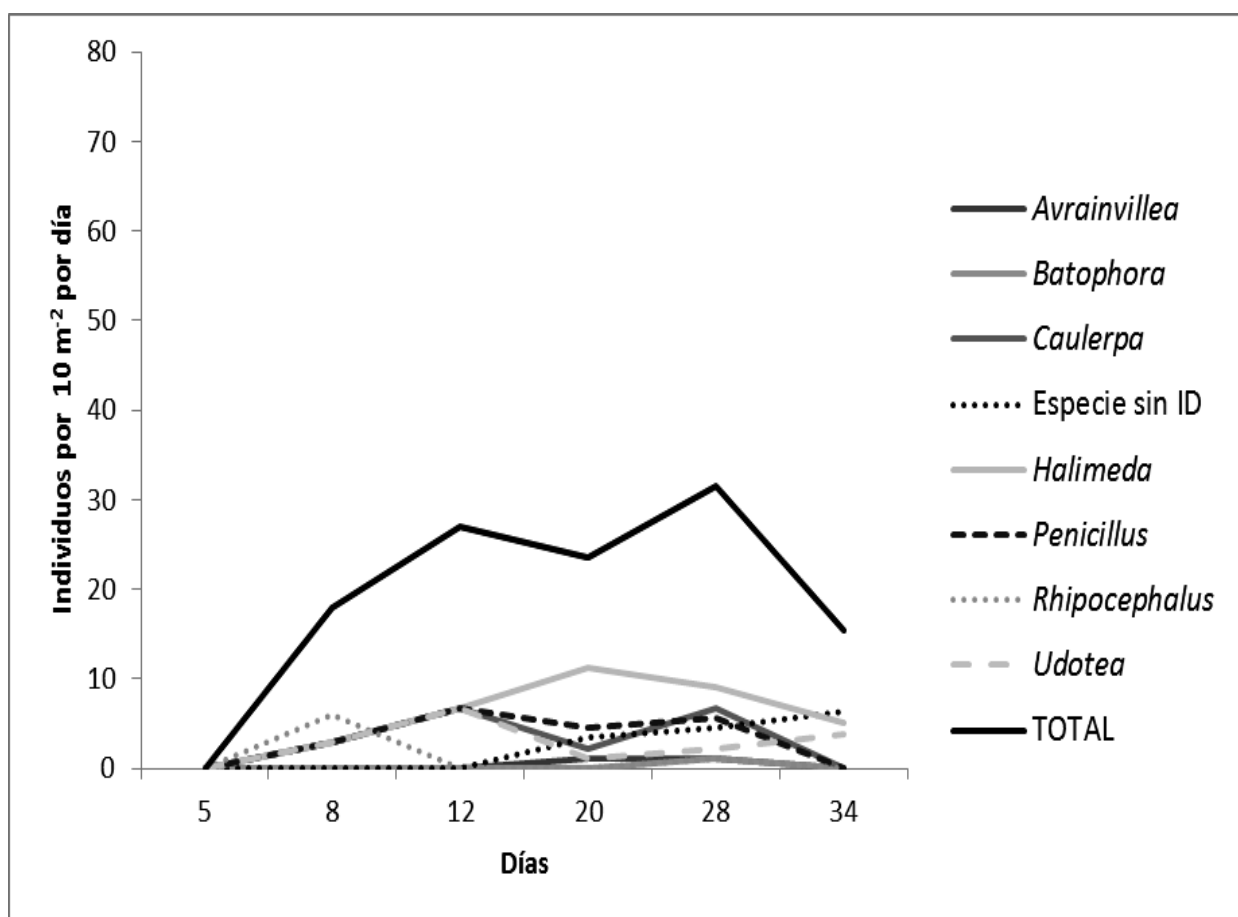


Figura 8. Tasa de reclutamiento (número de individuos nuevos por 10 m<sup>2</sup> por día), de las macroalgas rizofíticas agrupadas por género en la Zona 1 del área MU, Laguna arrecifal de Puerto Morelos.

Tabla V. Tasa de reclutamiento de las especies de macroalgas rizofíticas en Zona 1 y su densidad (número de individuos nuevos por 10 m<sup>2</sup> por día) de las parcelas a través de 34 días.

ESPECIES	Días					
	5	8	12	20	28	34
<i>Avrainvillea</i> spp	0	0	0	1	1	0
<i>Caulerpa lanuginosa</i>	0	9	15	3	8	0
Especie sin ID	0	0	0	4	5	8
<i>Halimeda incrassata</i>	0	9	10	10	8	7
<i>Halimeda monile</i>	0	0	0	3	1	0
<i>Halimeda simulans</i>	0	0	5	0	1	0
<i>Penicillus capitatus</i>	0	0	0	3	3	0
<i>Penicillus dumetosus</i>	0	0	0	0	1	0
<i>Penicillus lamourouxii</i>	0	9	15	3	3	0
<i>Rhipocephalus phoenix</i>	0	18	0	0	1	0
<i>Udotea conglutinata</i>	0	0	15	1	1	3
<i>Udotea flabellum</i>	0	9	0	0	0	0
<i>Udotea</i> spp	0	0	0	0	1	2

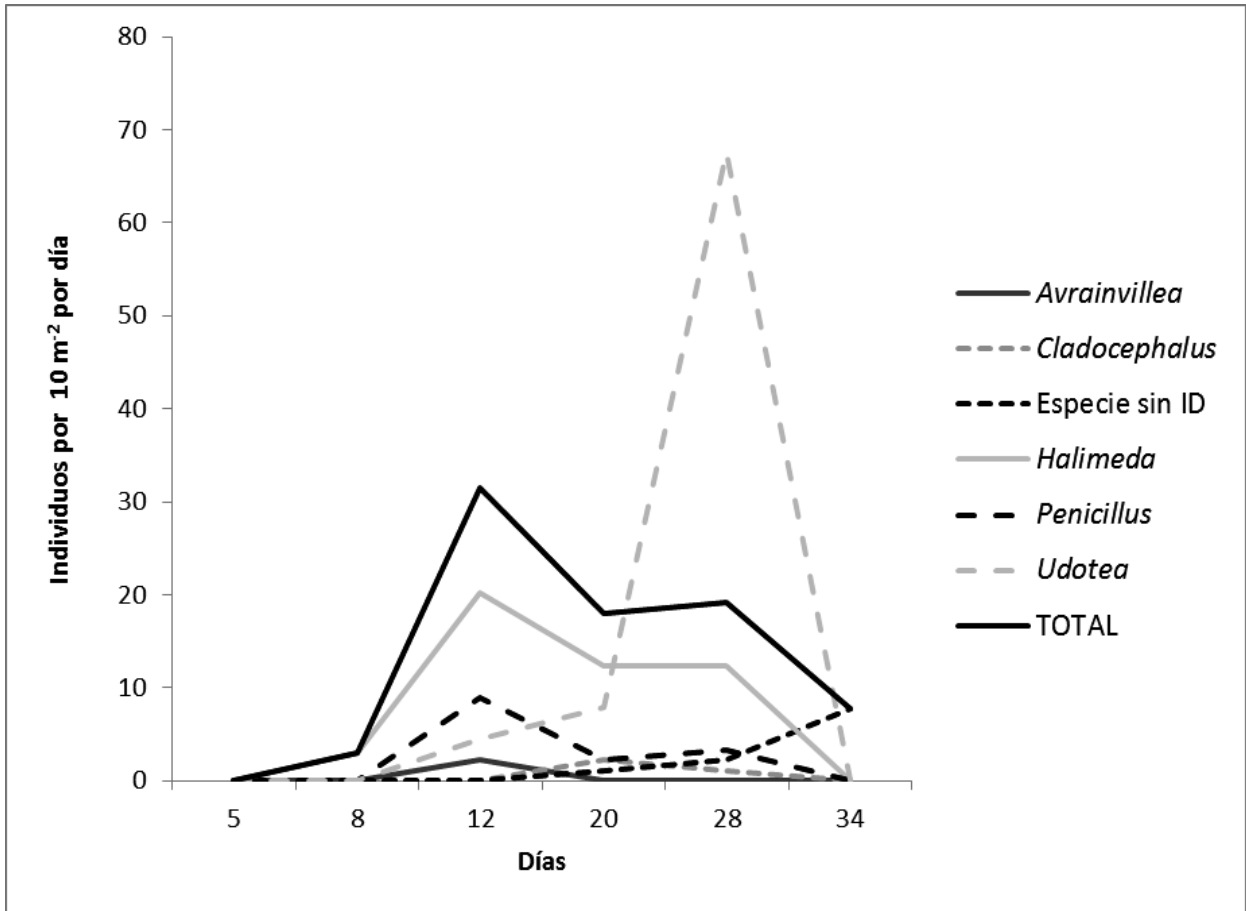


Figura 9. Tasa de reclutamiento (número de individuos nuevos por 10 m<sup>2</sup> por día), de las macroalgas rizofíticas agrupadas por género en la Zona 2 del área MU, Laguna arrecifal de Puerto Morelos. Se excluye el género *Udoatea* para el total de individuos, ya que presentó un gran aumento de densidad inexplicable en el día 28, el resto de las macroalgas no se comportaron de igual manera.

Tabla VI. Tasa de reclutamiento de las especies de macroalgas rizofíticas en Zona 2 y su densidad (número de individuos nuevos por 10 m<sup>2</sup> por día) de las parcelas a través de 34 días.

ESPECIES	Días					
	5	8	12	20	28	34
<i>Avrainvillea</i> spp	0	7	0	0	0	0
<i>Cladocephalus</i>						
<i>luteofuscus</i>	0	0	5	1	0	0
Especie sin ID	0	0	3	3	9	0
<i>Halimeda incrassata</i>	0	54	20	10	0	0
<i>Halimeda monile</i>	0	0	3	1	0	0
<i>Halimeda simulans</i>	0	7	5	3	0	0
<i>Penicillus capitatus</i>	0	14	3	0	0	0
<i>Penicillus lamourouxii</i>	0	7	3	4	0	0
<i>Penicillus pyriformis</i>	0	7	0	0	0	0
<i>Udotea conglutinata</i>	0	0	3	1	0	0
<i>Udotea flabellum</i>	0	0	0	1	0	0
<i>Udotea</i> spp	0	14	15	73	0	0

## VII.2. Análisis de Regresión Lineal

Para tres de las cuatro áreas de estudio no existe una relación significativa entre la densidad de reclutas en los cuadrantes experimentales y la densidad total de las algas en su periferia (Figura 10, Figura 12 y Figura 13). En contraste, en la Zona 2 en el área MU (Figura 11) se detectó una relación significativa.

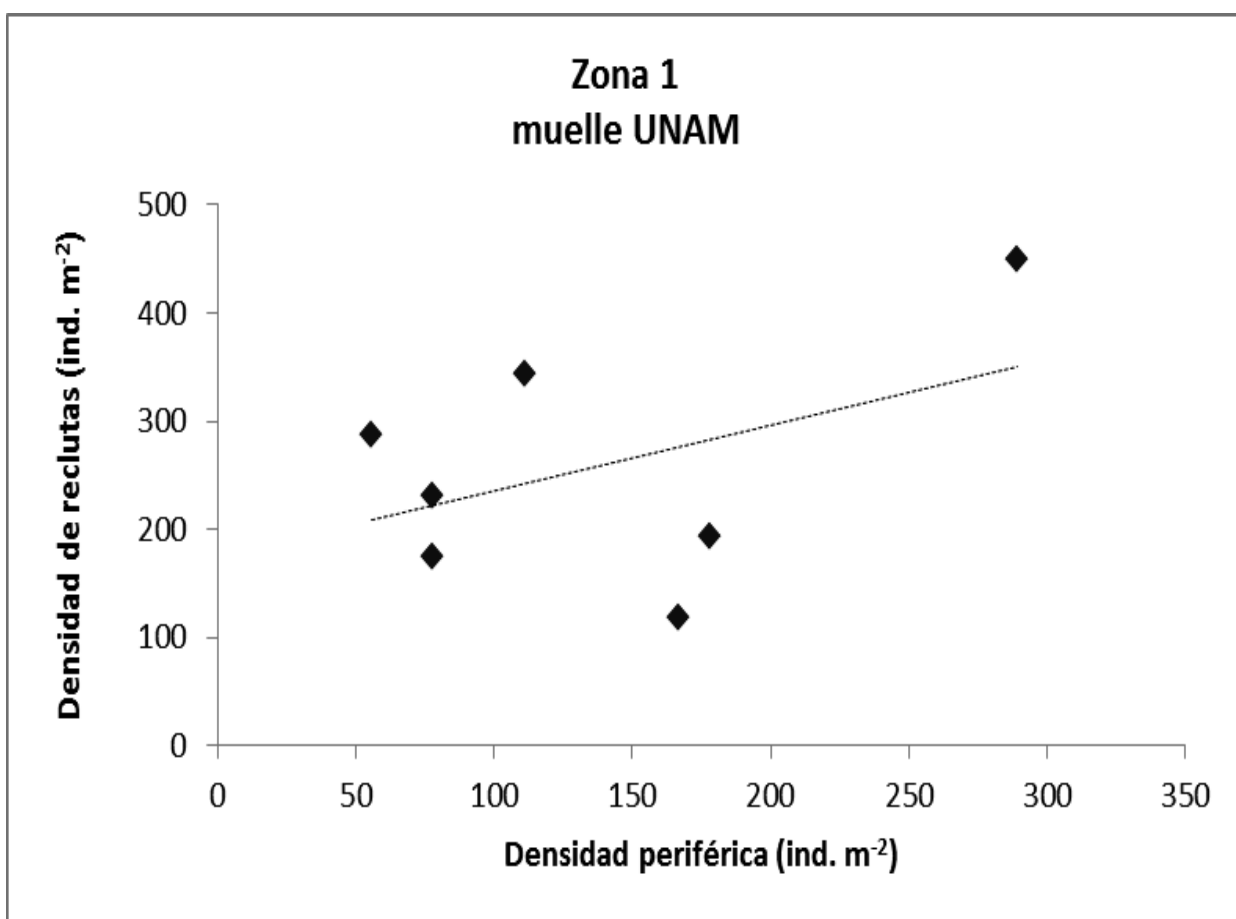


Figura 10. Análisis de regresión lineal para la Zona 1 (área MU) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.19$ ,  $t = 1.09$ ,  $P = 0.324$ ).

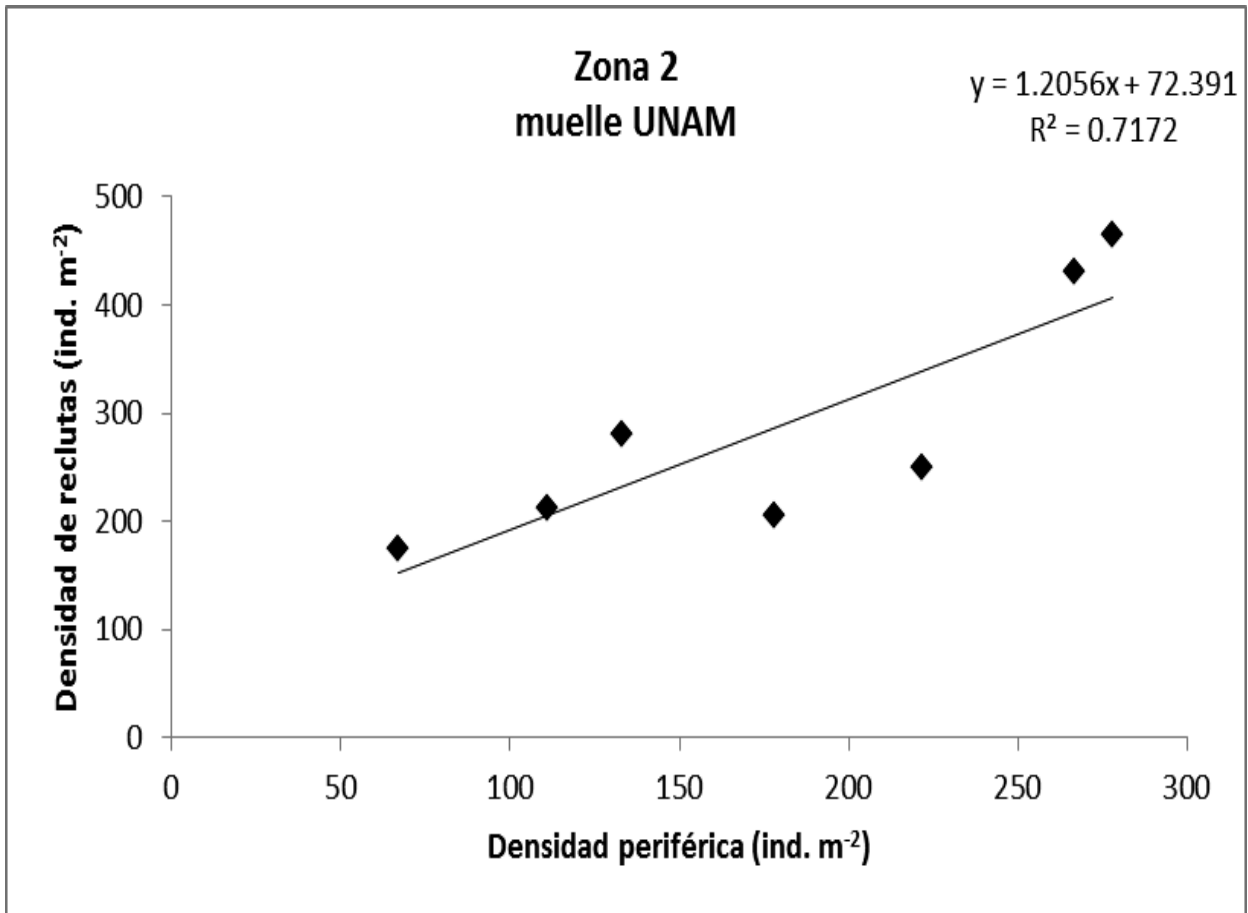


Figura 11. Análisis de regresión lineal para la Zona 2 (área MU) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2$  0.72,  $t=$  3.56,  $P=$  0.016).

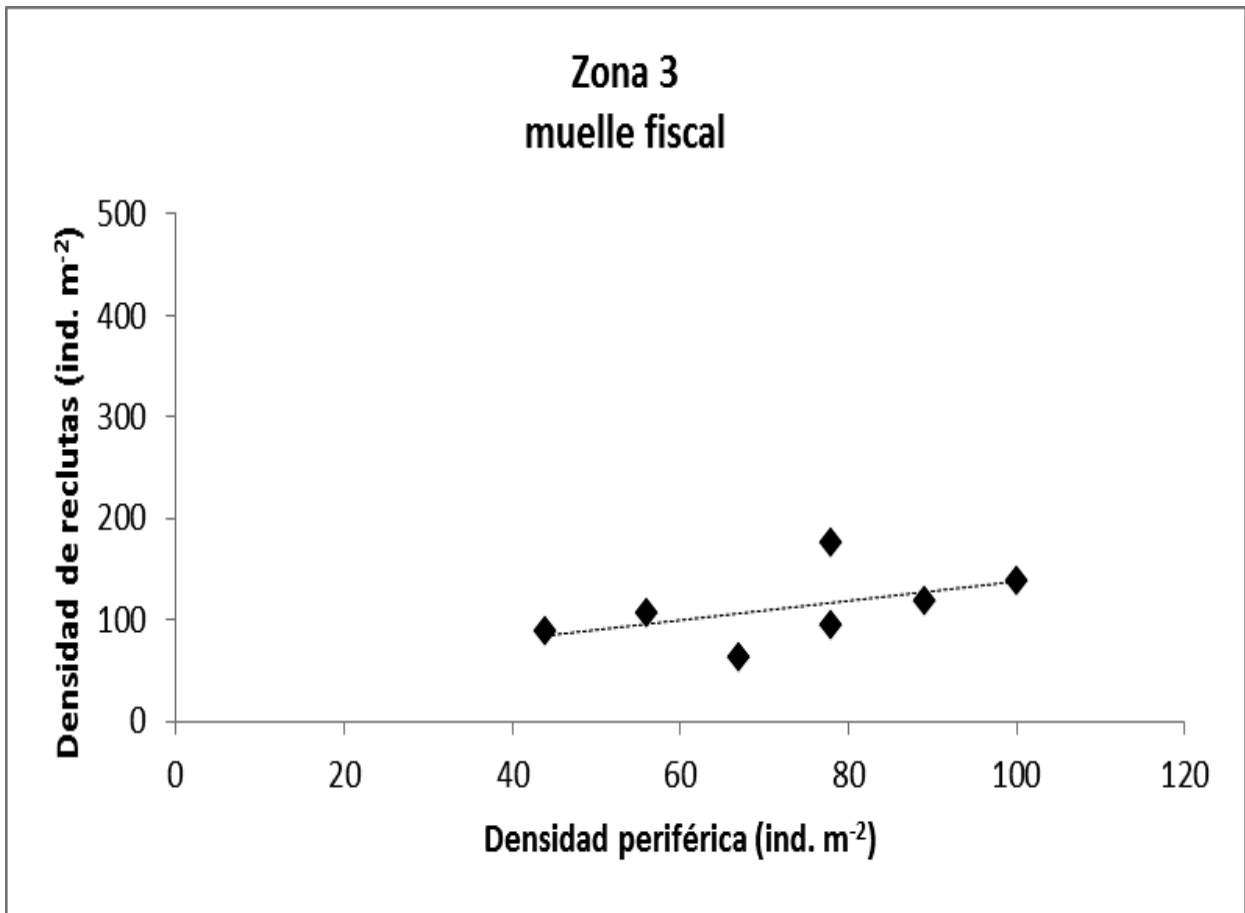


Figura 12. Análisis de regresión lineal para la Zona 3 (área MF) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.26$ ,  $t = 1.32$ ,  $P = 0.246$ ).

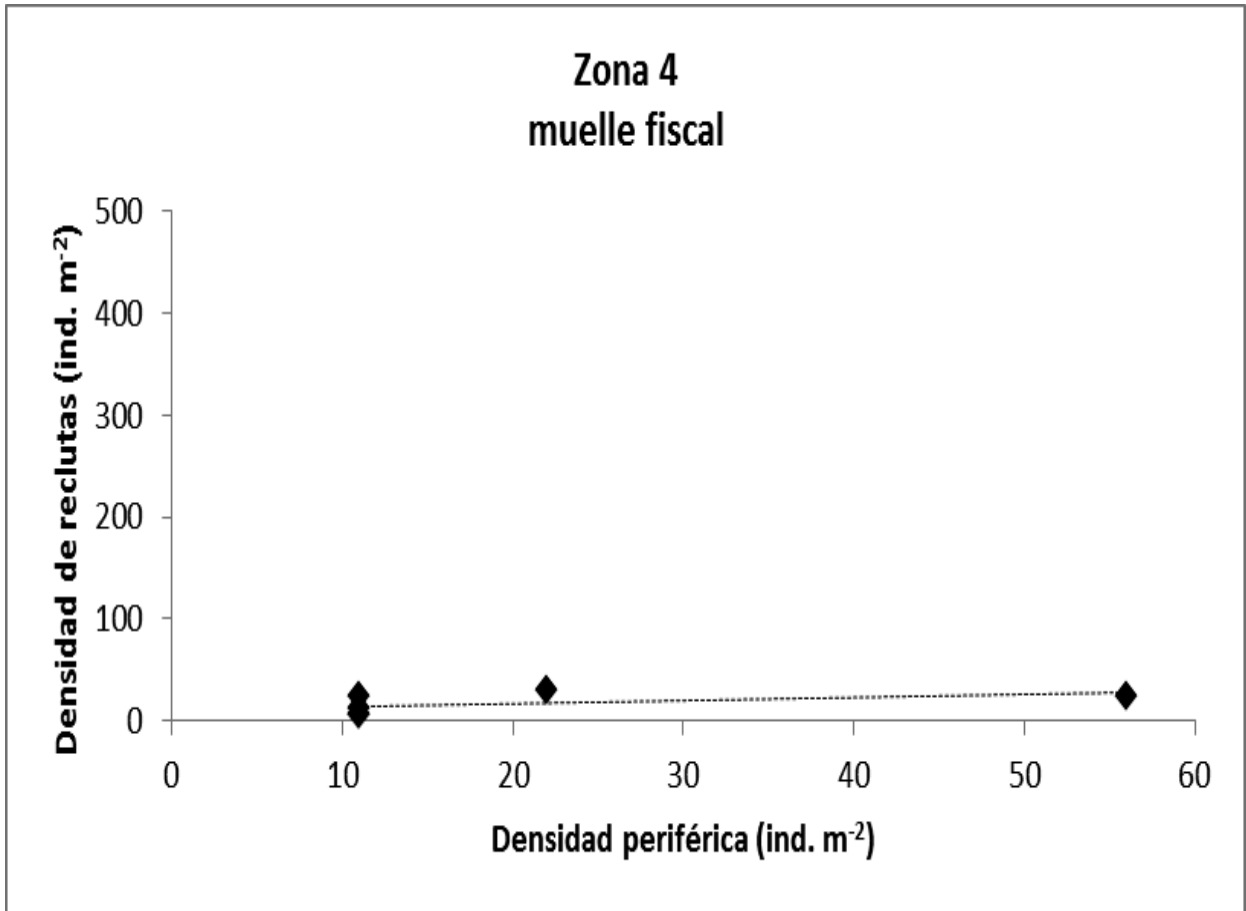


Figura 13. Análisis de regresión lineal para la Zona de muestreo 4 (área MF) donde se contrasta la Densidad de reclutas vs Densidad de algas en el área periférica de las parcelas ( $R^2 = 0.24$ ,  $t = 1.13$ ,  $P = 0.322$ ).



### VII.3. Prueba t de Student

El reclutamiento total de las macroalgas rizofíticas puede depender de las condiciones locales de las distintas zonas. Las diferencias en reclutamiento no fueron significativas en el área muelle UNAM (Figura 14 y Figura 16). Sin embargo, en el área de muelle fiscal, se detectaron diferencias significativas tanto en la densidad de reclutas (Figura 15) como en biomasa (Figura 17), en las diferentes zonas de estudio.

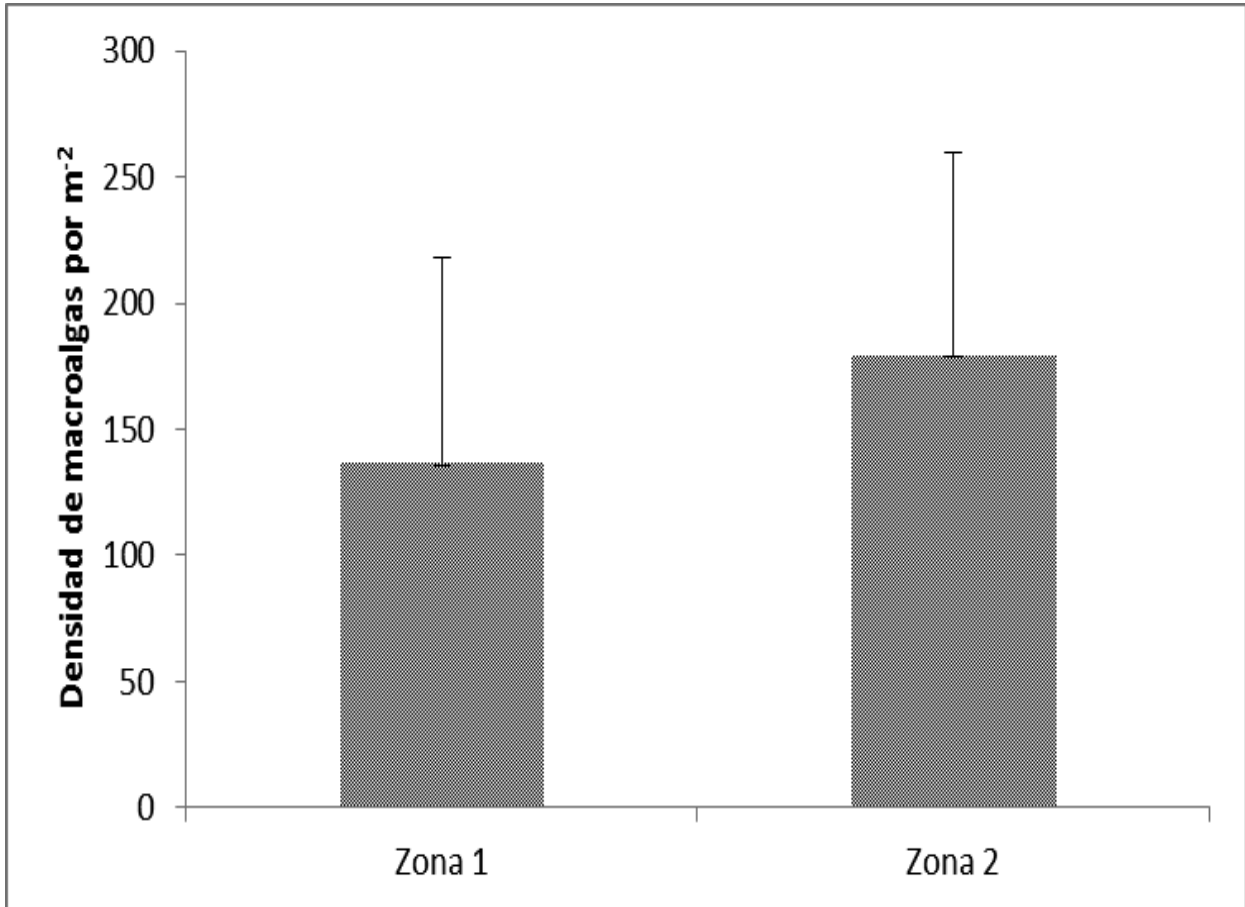


Figura 14. Densidad de reclutas (ind. m<sup>-2</sup>) en parcelas de Zona 1 y 2 del área de MU ( $t = 0.98$ ,  $P = 0.3428$ ,  $gl = 12$ ).

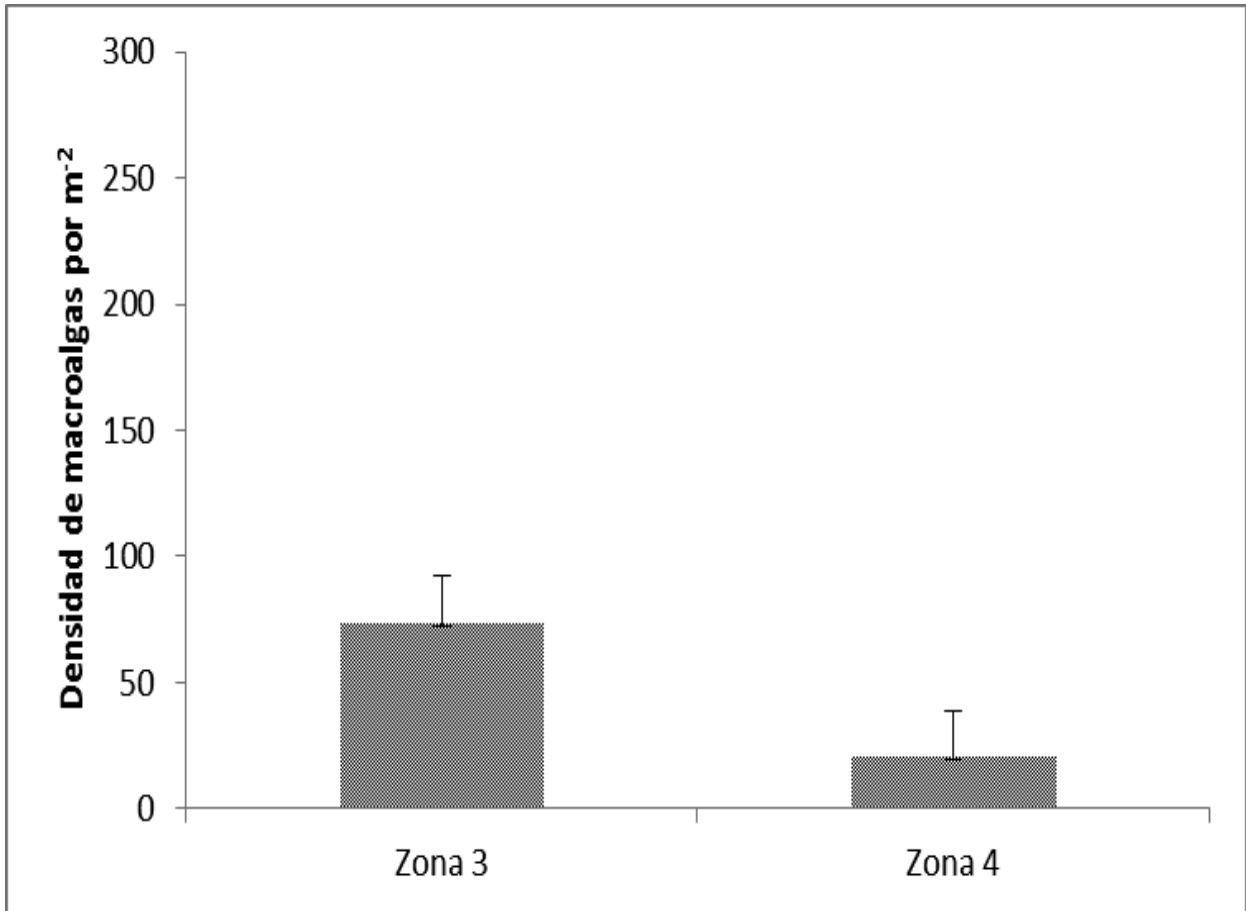


Figura 15. Densidad de reclutas (ind. m<sup>-2</sup>) en parcelas de Zona 3 y Zona 4 del área de MF ( $t = 5.09$ ,  $P = 0.0003$ ,  $gl = 11$ ).

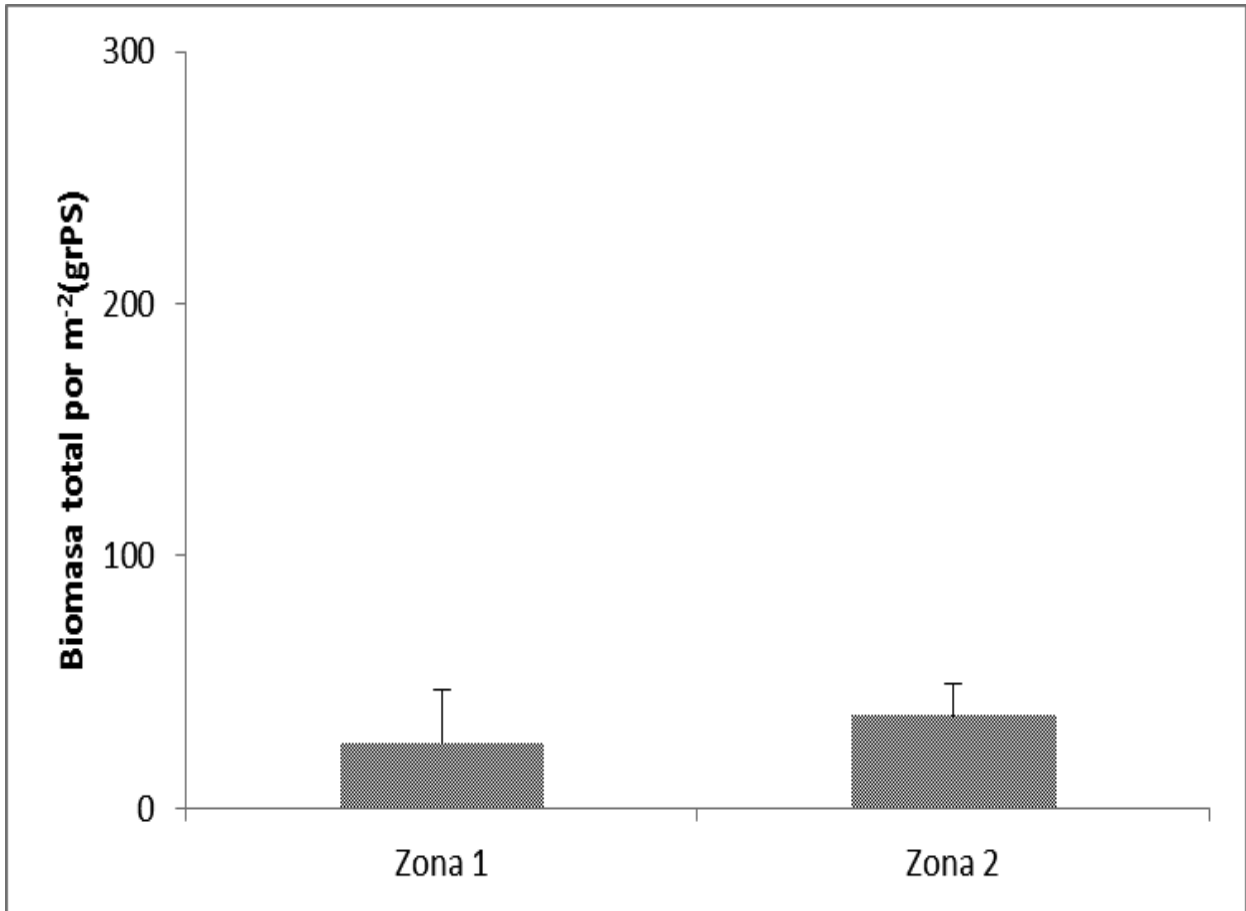


Figura 16. Biomasa total de reclutas por m<sup>2</sup> en parcelas de Zona 1 y Zona 2 del área MU ( $t = 1.17$ ,  $P = 0.2665$ ,  $gl = 12$ ). La biomasa total incluye tejido por debajo de y sobre de sedimento, el cual fue descalcificado.

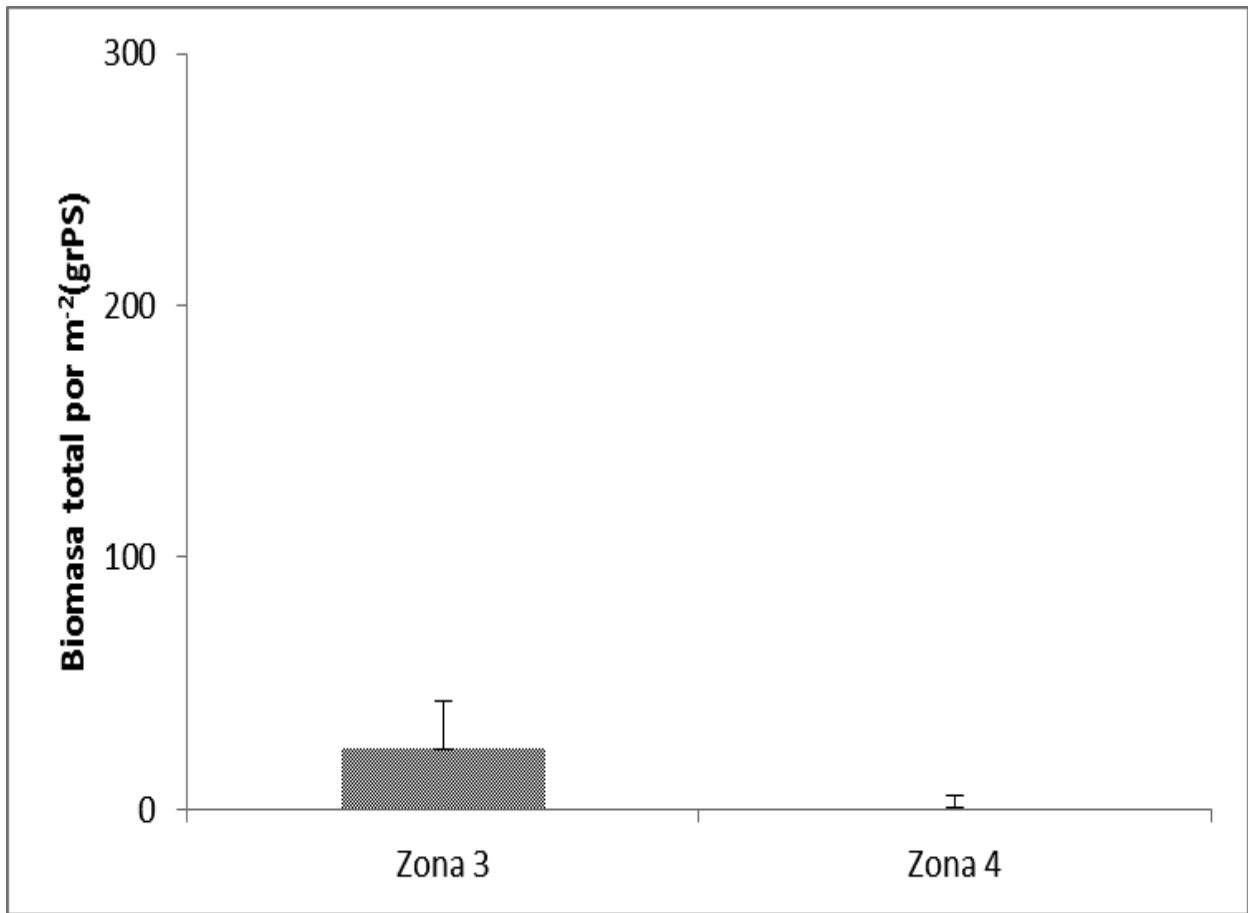


Figura 17. Biomasa de reclutas por m<sup>2</sup> en parcelas de Zona 3 y Zona 4 del área de MF ( $t = 2.89$ ,  $P = 0.0146$ ,  $gl = 11$ ). La biomasa total incluye tejido por debajo de y sobre de sedimento, el cual fue descalcificado.

#### VII.4. Índice de Similitud de Jaccard

En el área MU, las macroalgas rizofíticas de las dos zonas son bastantes similares (tabla VII), y se encontró también una gran similitud en las macroalgas de las parcelas en estas dos zonas (Tabla VIII, ver también Fig. 18). Extrañamente las algas de las dos zonas (3 y 4) del área MF no mostraron un alto grado de similitud (Tabla VII, Figura 18), indicando que las condiciones locales dentro del área afectan en gran medida la composición específica de la comunidad algal. La composición específica de la comunidad algal en las zonas con máxima abundancia de pastos marinos de las dos áreas de estudio (Zona 2 área MU, Zona 4 área MF) mostró poca similitud (Tabla VII, Figura 18) indicando que la presencia de pastos *per se* no influye sobre las especies de algas que se establecen. El mismo patrón fue encontrado en la comparación de las zonas con mínima abundancia de pastos (Zona 1 área MU y Zona 3 área MF)

Tabla VII. Relación de número de especies de macroalgas rizofíticas en común entre el área periférica y entre las parcelas de las zonas de muestreo.

	<b>Periferia</b>	<b>Parcela</b>	<b>Tipo de comparación</b>
Zonas de muestreo	No. de Especies en común	No. de Especies en común	
Z1-Z2	9	7	Zonas dentro área MU
Z1-Z3	2	1	Zonas sin/con poco pasto presente entre área MU y MF
Z2-Z4	5	3	Zonas con máxima abundancia de pasto en área MU y MF
Z3-Z4	2	1	Zonas dentro área MF

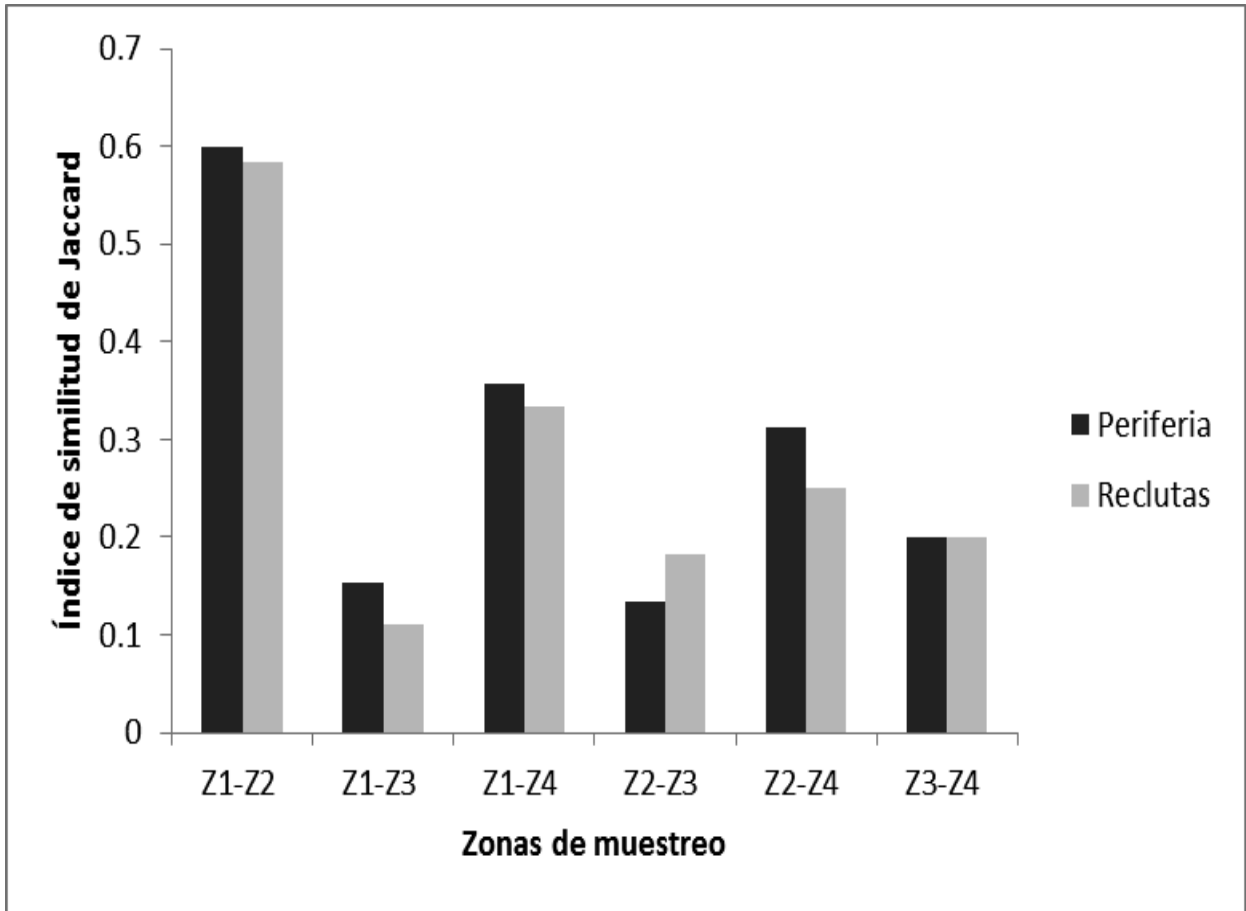


Figura 18. Índice de Similitud de Jaccard entre zonas de muestreo, representando tanto la periferia como los reclutas de cada zona. Z1-Z2 = Zona 1 y Zona 2, Z1-Z3 = Zona 1 y Zona 3, Z1-Z4 = Zona 1 y Zona 4, Z2-Z3 = Zona 2 y Zona 3, Z2-Z4 = Zona 2 y Zona 4, Z3-Z4 = Zona 3 y Zona 4.

## VII.5. Índice de Diversidad de Margalef

En el área MU, la riqueza específica fue casi similar en los cuadrantes experimentales que en su periferia, indicando que la mayoría de las especies lograron recolonizar después de haber sido removidas. Sin embargo, en el Área MF, la riqueza específica de los reclutas fue claramente menor que la de la vegetación circundante (Figura 19, Tabla IX).

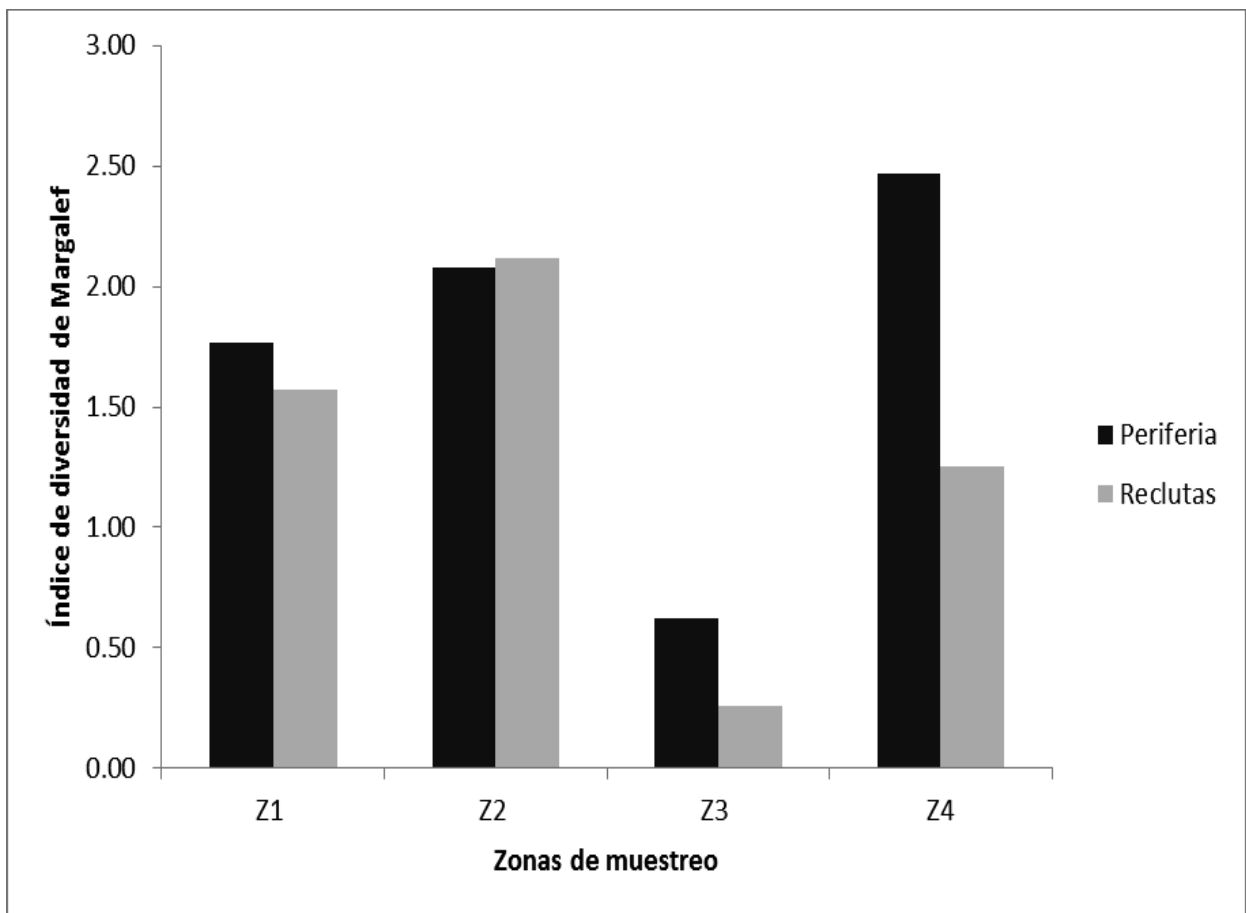


Figura 19. Índice de diversidad de Margalef para cada zona de muestreo, representando tanto la periferia como los reclutas de cada zona. Z1= Zona 1, Z2= Zona 2, Z3= Zona 3, Z4= Zona4.

Tabla VIII. Índice de diversidad de Margalef.  $D_{Mg}$  hace referencia al Índice de Margalef, Z1=Zona 1, Z2=Zona 2, Z3=Zona 3, Z4=Zona4; (P) hace referencia a datos de la periferia de las parcelas, mientras que la ausencia de (P) significa que son datos de los reclutas de macroalgas rizofíticas de cada una de las parcelas.

<b>Zona</b>	<b>No. Ind</b>	<b>No. Spp</b>	<b><math>D_{Mg}</math></b>
Z1(P)	288	11	1.765860813
Z2(P)	322	13	2.07808345
Z3(P)	125	4	0.621334935
Z4(P)	17	8	2.470692867
Z1	86	8	1.571498479
Z2	113	11	2.115333115
Z3	46	2	0.261189257
Z4	11	4	1.251097174

#### **VII.6. Profundidad de Sedimento en las Zonas de Estudio**

La profundidad de sedimento fue mayor en el área MF que en el área MU, sin mostrar diferencias entre las zonas de cada uno de estas áreas (Tabla IX).

Tabla IX. Profundidad del sedimento de acuerdo al área y zona de muestreo.

<b>ZONA</b>	<b>ÁREA</b>	<b>PROFUNDIDAD (cm)</b>
<b>1</b>	MU	11-15
<b>2</b>	MU	11-15
<b>3</b>	MF	>30
<b>4</b>	MF	>30



## VIII. DISCUSIÓN

Las macroalgas arraigadas (rizofíticas) son muy comunes en las lagunas arrecifales del Caribe. La mayoría de estas algas son calcificadas y muchas veces están asociadas con los pastos marinos (UNESCO, 1998; Collado-Vides et al., 2005; Cruz-Palacios y Van Tussenbroek, 2005). Sin embargo, se sabe poco sobre los procesos que determinan su abundancia y a través de este estudio sobre el reclutamiento en diferentes zonas en la laguna arrecifal de Puerto Morelos se logró incrementar el conocimiento sobre este interesante grupo de macroalgas. Las tasas de reclutamiento fueron altas, y en tiempos de máximo reclutamiento (entre 16-28 días) alcanzó tasas de más de 30 nuevos reclutas por día por 10 m<sup>2</sup>. Estos reclutas probablemente fueron clonales, ya que el reclutamiento sexual es un proceso poco común en esta zona, según estudios realizados por Van Tussenbroek y Barba-Santos (2011), donde encontraron una densidad de reclutas sexuales de 0.01 talos m<sup>-2</sup>.

Por ser reclutamiento principalmente de naturaleza clonal, se esperó encontrar una relación significativa entre la abundancia de las algas en las áreas periféricas y las áreas experimentales dentro de las zonas (figuras 10, 11, 12 y 13), pero no se observó relación significativa excepto para la Zona 2 (Figura 11); sin embargo, esta relación se presentó a nivel de zonas, es decir, al comparar los individuos en el área periférica contra el área experimental de cada zona de muestreo, se puede notar una relación en cuanto a la abundancia de macroalgas rizofíticas en la periferia de cada zona y el número de reclutas de la parcela que le corresponde. Claro está que cada sitio de muestreo difiere en cuanto a las especies presentes y en su tasa de reclutamiento, como es el caso de *Halimeda* spp que se encuentra en gran abundancia en la Zona 1 y 2 dentro del área de MU, *Halimeda* es uno de los productores de sedimentos calcáreos más importantes en las lagunas arrecifales, aportando hasta varias toneladas por hectárea por año (Van Tussenbroek y Van Dijk, 2007). A pesar de su importancia ecológica, se sabe poco sobre el ciclo de vida de esta planta. En la Figura 6 y Figura 7, se puede observar que existe una relación entre la densidad de *Halimeda* y *Udotea* del área periférica de la parcela y la densidad de los nuevos reclutas. Esto a diferencia de lo que pasa con *Avrainvillea* que al parecer es mucho más lenta para regenerarse, no pudiendo

observar una relación tan directa de abundancia de este género entre la periferia de la parcela y los reclutas.

Con este estudio se logró entender la mecánica que determina la abundancia y diversidad de las macroalgas, a través de una comparación entre áreas y zonas con distinta cobertura de pastos dentro de las mismas.

Los sitios con mayor diversidad y abundancia de algas rizofíticas tienen una cobertura de media a baja de pastos marinos, y éstos fueron más bajos en la zona con alta cobertura de pastos marinos. En general se observaron valores bajos respecto a la riqueza específica de las especies en las zonas de muestreo, pero ésta fue mayor en las Zona 1 y Zona 2 con un valor de 1.77 y 2.08 respectivamente para el área periférica de las parcelas, a comparación de la riqueza encontrada en las Zona 3 y Zona 4.

Hubo una diferencia notoria entre las áreas de estudio (MU y MF), posiblemente esta diferencia entre áreas de estudio está relacionada con la profundidad de sedimento. La profundidad de sedimento en el área MU era baja y estudios anteriores (Zieman et al., 1989) ya han sugerido que los pastos marinos necesitan una profundidad mínima de arraigo de alrededor de 25 cm para un óptimo desarrollo. Por otro lado, el área MU está en la zona costera y sujeto a disturbios por oleaje que podrá crear aperturas en los densos pastos para permitir la colonización de las macroalgas. En el área MF la profundidad de sedimento fue mayor a 30 cm, suficiente para que los pastos alcancen un desarrollo óptimo, además el área está protegida del oleaje por la cercanía de la barrera arrecifal. Zona 3 en esta área se está recuperando de un periodo de ramoneo intensivo por tortugas, y por ende el pasto marino se encuentra pequeño y poco desarrollado. En esta zona hay poca riqueza específica de macroalgas rizofíticas, pero éstas cuentan con una gran abundancia en forma de parches, mientras que en la Zona 4 donde el pasto marino está totalmente desarrollado, y puede alcanzar más de 30 cm de altura existe muy poca cantidad de macroalgas rizofíticas interactuando, en comparación con el resto de las zonas.

El reclutamiento total de las macroalgas rizofíticas puede depender de las condiciones locales de las distintas zonas, aunque esta diferencia no fue significativa en el área muelle UNAM (Figura 14 y Figura 16), probablemente porque los pastos no estaban en condiciones óptimas para su desarrollo (por la baja profundidad del sedimento), permitiendo el desarrollo de macroalgas. Sin embargo, en el área de muelle fiscal, tanto densidad de reclutas (Figura 15)

como su biomasa (Figura 17), eran distintos en las diferentes zonas de estudio, posiblemente debido a diferencias en la vegetación circundante.

Cuando los pastos marinos se encuentran en desarrollo óptimo son tan densos que crean mucha sombra (Enriquez y Pantoja-Reyes, 2005) quitando la luz a las macroalgas rizofíticas y causando que éstas no se puedan desarrollar óptimamente; por otro lado los pastos compiten por nutrientes con las macroalgas.

Aunque las estructuras de enraizamiento de las algas rizofíticas no son raíces verdaderas (tales como las de angiospermas), consisten en fibras de rizoides, que pueden absorber los nutrientes de los sedimentos (McGlathery et al., 1992). Multer (1988) observó las mayores productividades de macroalgas rizofíticas en áreas de baja a media densidad de pastos marinos, dando evidencia indirecta adicional de la competencia. Es posible que al arraigar los pastos marinos y macroalgas rizofíticas podrían estar compitiendo por nutrientes en el sedimento (y en la columna de agua, pero su concentración es muy baja en áreas oligotróficas como el sitio de estudio). En un experimento de manipulación, Ceccherelli y Cinelli (1997) demostraron que la macroalga invasiva *Caulerpa taxifolia* tiene un impacto negativo sobre la densidad de los pastos marinos en el Mediterráneo, y sugirió que este impacto fue debido a la competencia por nutrientes que se encontraban por debajo del suelo.

El hallazgo de que las algas rizofíticas se desarrollan en áreas de pastos recuperándose del ramoneo de tortuga es interesante y una evidencia potencial de que las tortugas evitan el consumo de las algas. Al parecer los herbívoros en general no prefieren las algas rizofíticas, con algunas excepciones que incluyen a los peces loro. Prácticamente todas las especies de algas Bryopsidales producen terpenoides tóxicos (Paul y Fenical, 1986). La concentración (porcentaje de peso seco) de metabolitos secundarios varía entre especies de alga, así como entre los hábitats de alta y baja herbivoría. Las macroalgas rizofíticas de los lechos de pastos marinos contienen una menor concentración de metabolitos que las de los arrecifes de coral (Paul y Fenical, 1986; Paul y Van Alstyne, 1988). Además de la producción de metabolitos secundarios tóxicos, muchas algas rizofíticas producen aragonita, una forma de cristal de carbonato de calcio. Esta calcificación es externa a la pared celular de las algas y ha sido considerada como una adaptación para la supervivencia en las áreas de alta herbivoría (Friedmann et al., 1972; Littler y Littler, 1980). Entonces posiblemente la herbivoría de

tortugas facilita la existencia de una comunidad algal rizofítica, y este hallazgo amerita más investigación.

## IX. CONCLUSIONES

La tasa de reclutamiento de las macroalgas rizofíticas es muy alta, en 8 días comienzan a aparecer los primeros reclutas.

La diversidad y abundancia de macroalgas rizofíticas fue alta en la zona de MU. Este patrón posiblemente está relacionado con el pobre desarrollo de los pastos marinos debido por la poca profundidad de sedimento.

El número de reclutas algales, en 3 de las 4 zonas, no dependió de la densidad algal de la periferia de las parcelas, es decir, no existe una relación entre la densidad de reclutas en las parcelas y la densidad total de las algas en su periferia, con excepción de la Zona 2 en área MU.

Los géneros *Halimeda* y *Udotea* fueron los más exitosos en recolonizar la Zona 1 y la Zona 2, mientras que en la Zona 3 y Zona 4 los géneros *Penicillus* y *Rhipocephalus* fueron los reclutas más abundantes.

## **X. RECOMENDACIONES**

Realizar un estudio sobre los mecanismos de interacción entre los pastos marinos y las macroalgas rizofíticas.

Estudiar de una manera más a fondo tanto la reproducción sexual como clonal de estas macroalgas, por medio de estudios genéticos como ya se han realizados para los pastos marinos (Valdivia-Carillo, 2011).

Este fue un estudio exploratorio que arrojó varias preguntas sobre mecanismos de interacción de macroalgas rizofíticas y la vegetación circundantes que se podrán explorar en futuros estudios.

## XI. LITERATURA CITADA

- Alpert, P. 1991. Nitrogen sharing among ramets increases clonal growth in *Fragaria chiloensis*. *Ecology* 72: 69-80.
- Álvarez Guillén, H., M.C. García, M. Tapia-García, M., G.J. Villalobos y A. Yáñez-Arancibia. 1986. Prospección ictioecológica de la zona de pastos marinos de la laguna arrecifal en Puerto Morelos, Quintana Roo (Verano 1984): Nota científica. Instituto Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. 13(3):303-322.
- Ashmun, J. y L. Pitelka. 1984. Light induced variation in the growth and dynamics of transplanted ramets of the understory herb *Aster acuminatus*. *Oecología* 64: 25-262.
- Bach, S. D. 1979. Standing crop, growth and production of calcareous siphonales (Chlorophyta) in a South Florida lagoon. *Bulletin of Marine Science* 29:191-201.
- Barilotti, D.C. 1970. Nongenetic morphological variation in *Caulerpa prolifera* (Fürsskal) Lamouroux. M. S. Thesis, University of South Florida. South Florida. U. S.A.
- Bedinger, L. A., S.S. Bell y C.J. Dawes. 2013. Rhizophytic algal communities of shallow, coastal habitats in Florida: components above and below the sediment surface. *Bulletin of Marine Science* 89:1-21
- Birch, W. R. y M. Birch. 1984. Succession and pattern of tropical intertidal seagrasses in Cockle Bay, Queensland, Australia: a decade of observations. *Aquatic Botany* 19:343-367.
- Bulthuis, D. A., J. Woelkerling. 1983. Biomass accumulation and shading effects of epiphytes on leaves of the seagrass, *Heterozostera tasmanica*, In Victoria, Australia. *Aquatic Botany* 16: 137-148.
- Calvert, H. E. 1976. Culture studies on some Florida species of *Caulerpa*: Morphological responses to reduced illumination. *British Phycological Journal*.11: 203-214.
- Ceccherelli, G. y F. Cinelli. 1999. The role of vegetative fragmentation in dispersal of the invasive alga *Caulerpa taxifolia* in the Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series* 182:299-303.
- Clifton, K. E. 1997. Mass spawning by green algae on coral reefs. *Science* 275:1116-1118.

- Collado-Vides, L. y D. Robledo. 1999. Morphology and photosynthesis of *Caulerpa* (Chlorophyta) in relation to their growth form. *Journal of Phycology* 35: 325-330.
- Collado-Vides, L., L.M. Rutten, J. W. Fourqurean. 2005. Spatiotemporal variation of the abundance of calcareous green macroalgae in the Florida Keys: a study of synchrony within a macroalgal functional-form group. *Journal of Phycology* 41:742–752.
- Cruz-Coria, E., L. Zizumbo-Villarreal, N. MonterrosoSalvatierra, y A. L. Quintanilla Montoya. 2013. La transformación de los espacios de vida y la configuración del paisaje turístico en Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Polis, Revista de la Universidad Bolivariana*, 12(34) Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30528135016>.
- Cruz-Palacios, V. y B. I. Van Tussenbroek. 2005. Simulation of hurricane-like disturbances on a Caribbean seagrass bed. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 324: 44-60.
- Davis, B. C., J. W. Fourqurean. 2001. Competition between the tropical alga, *Halimeda incrassata*, and the seagrass, *Thalassia testudinum*. *Aquatic Botany* 71: 217-232.
- Dawes, C. J., J. Andorfer, C. Rose, C. Uranowski y N. Ehringer. 1997. Regrowth of the seagrass *Thalassia testudinum* into propeller scars. *Aquatic Botany* 59:139- 155.
- de Kroon, H. y J. Knoops. 1990. Habitat exploration through morphological plasticity in two chalk grassland perennials. *Oikos* 59: 39-49.
- de Villèle, X. y M. Verlaque. 1995. Changes and degradation in a *Posidonia oceanica* bed invaded by the introduced tropical alga *Caulerpa taxifolia* in the North Western Mediterranean. *Botánica Marina* 38:79-87.
- den Hartog, C. 1971. The dynamic aspect in the ecology of seagrass communities. *Thalassia Jugoslavica* 7:101-112.
- den Hartog, C. y J. Kuo. 2006. Taxonomy and biogeography of seagrasses. En: Larkum, A. W. D., R. J. Orth y C. M. Duarte. (Eds.), *Seagrass: biology, ecology and conservation*. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Duarte, C. M. 2002. The future of seagrass meadows. *Environmental Conservation* 29:192-206.
- Dumay, O., C. Fernandez y G. Pergent. 2002. Primary production and vegetative cycle in *Posidonia oceanica* when in competition with the green algae *Caulerpa taxifolia* and



- Caulerpa racemosa*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom 82:379-387.
- Dyrynda, P. 1986. Defensive strategies of modular organisms. 227- 244 p. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (Eds.), The growth and form of modular organisms. Cambridge University Press, Cambridge.
- Eguiarte, L. E., F. J. Núñez, C. A. Domínguez y C. Cordero. 1999. Biología evolutiva de la reproducción de las plantas. pp. 117-151. Reimpreso en: Núñez-Farfán, J. y L. E. Eguiarte. La evolución biológica. UNAM, CONABIO, México.
- Enriquez S., N. Marba, C. M. Duarte, B. I. Van Tussenbroek y G. Reyes-Zavala. 2001. Effects of seagrass *Thalassia testudinum* on sediment redox. Marine Ecology Progress Series. 102: 187-198
- Enríquez, S. y N. I. Pantoja-Reyes. 2005. Form-function analysis of the effect of canopy morphology on leaf self-shading in the seagrass *Thalassia testudinum*. Oecologia 145: 235-243.
- Fourqurean, J. W. y L. M. Rutten. 2004. The impact of Hurricane Georges on softbottom, back reef communities: site- and species-specific effects in south Florida seagrass beds. Bulletin of Marine Science 75:239-257.
- Friedmann, E. I. y W. C. Roth. 1977. Development of the siphonous green alga *Penicillus* and the Espera state. Botanical Journal of the Linnean Society 74:189-214.
- Friedmann, E. I., W. C. Roth y J. B. Turner. 1972. Calcium oxalate crystals in aragonite-producing green alga *Penicillus* and related genera. Science 177:891- 893.
- Gallegos, M. E., M. Merino, A. Rodríguez, N. Marbà y C. M. Duarte. 1994. Growth patterns and demography of pioneer Caribbean seagrasses *Halodule wrightii* and *Syringodium filiforme*. Marine Ecology Progress Series. 109: 99-104.
- Garduño, G., J. L. Godínez y M. M. Ortega. 2002. Una clave de campo para las algas verdes de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe. AGT Editor, S. A., México D.F.
- Halle, F. 1986. Modular growth in seed plants. 77-88 p. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (Eds.), The growth and form of modular organisms. Cambridge University Press, Cambridge.

- Hardwick, R. 1986. Physiological consequences of modular growth in plants. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (eds) *The growth and form of modular organisms*: 161-174. Cambridge University Press, Cambridge.
- Harper, J. 1981. The concept of population in modular organisms. 53-77. p. En: May R (Ed.), *Theoretical ecology: principles and applications*. Blackwell Scientific Pub. London.
- Harper, J. y A. Bell. 1979. The population dynamics of growth form in organisms with modular construction. 29-52. p. En: Anderson R., B. Turner y L. Taylor (Eds.), *Population dynamics*. Oxford University Press, Oxford.
- Hillis-Colinvaux, L. 1973. Reproduction in the calcareous green algae of coral reefs. *Journal of the Marine Biological Association of India* 14:328-334.
- Hutchings, M. 1988. Differential foraging for resources and structural plasticity in plants. *Trends in Ecology and Evolution*. 3: 200-204.
- Kenworthy, W. J. y G. W. Thayer, G. 1984. Production and decomposition of the roots and rhizomes of seagrasses, *Zostera marina* and *Thalassia testudinum*, in temperate and subtropical marine ecosystem. *Bulletin of Marine Science* 35: 364-379.
- Krebs, C.J. 1972. *Ecology: The Experimental Analysis of Distribution and Abundance*. 2 ed. Harper and Row Publishers Inc., New York.
- Levi, B. y M. Friedlander. 2004. Identification of two putative adhesive polypeptides in *Caulerpa prolifera* rhizoids using an adhesion model system. *Journal of Applied Phycology* 16:1-9.
- Littler, D.S. y M. M. Littler. 2000. *Caribbean Reef Plants*. Washington D.C.: OffShore Graphics.
- Littler, M. M. y D. S. Littler. 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *American Naturalist* 116:25-44.
- Mackie, G. 1986. From aggregates to integrales: physiological aspects of modularity in colonial animals. 175-196. p. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (Eds.), *The growth and form of modular organisms*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Mandujano, M., C. Montana, M. Franco, J. Golubov y A. Flores-Martínez. 2001. Integration of demographic annual variability in a clonal desert cactus. *Ecology* 82:344-359.

- Marba, N. y M. C. Duarte. 1998. Rhizome elongation and seagrass clonal growth. *Marine Ecology Progress Series*. 174: 269-280.
- Margalef, R. 1969. El ecosistema pelágico del Mar Caribe. Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales. 5-36 pp. Referenciada. 23/0672009. Disponible: <http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726221621001&script=scarttext>
- McGlathery, K.J., Howarth, R.W., Marino, R. 1992. Nutrient limitation of the macroalga, *Penicillus capitatus*, associated with subtropical seagrass meadows in Bermuda. *Estuaries Coasts* 15:18–25
- Mitchell, P. F. y F. Woodward. 1988. Response of three woodland herbs to reduce photosynthetically active radiation and low red to far red ratio in shade. *Journals of Ecology*. 76:807- 825.
- Mogie, M. y M. Hutchings. 1990. pp. 3-22. Phylogeny, ontogeny and clonal growth in vascular plants. En: Van Groenendael, J.M y H. de Kroon (eds.), *Clonal growth in plants: regulation and function*. SPB Academic Publishing, The Hague, Netherlands.
- Molina-Hernández, A. L. 2013. Efecto del ramoneo por tortugas marinas sobre las comunidades de pastizales marinos en El Caribe Mexicano. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Puerto Morelos, Quintana Roo, México.
- Multer, H. G. 1988. Growth rate, ultrastructure and sediment contribution of *Halimeda incrassate* and *Halimeda monile*, Nonsuch and Falmouth Bays, Antigua. *Coral Reefs* 6: 179-186.
- Multer, H.G. y W. E. Votava. 1992. New roles for *Halimeda* holdfasts. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Coral Reef Symposium*; UOG Station, Guam: University of Guam Press. p. 887-892.
- Patriquin, D. G. 1972. The origin of nitrogen and phosphorus for growth of the marine angiosperm *Thalassia testudinum*. *Marine Biology* 15: 35-46.
- Patriquin, D. G. 1975. Migration of blowouts in seagrass beds at Barbados and Carriacou, West Indies, and its ecological and geological implications. *Aquatic Botany* 1:163-189.
- Paul, V. J. y K. L. Van Alstyne. 1988. Chemical defense and chemical variation in some tropical Pacific species of *Halimeda* (Halimedaceae, Chlorophyta). *Coral Reefs* 6:263-269.

- Paul, V. J. y W. Fenical. 1986. Chemical defense in tropical green algae, order *Caulerpales*. Marine Ecology Progress Series 34:157-169.
- Puglisi, M. P., L. T. Tan, P. R. Jensen y W. Fenical. 2004. Capisterones A and B from the tropical green alga *Penicillus capitatus*: unexpected anti-fungal defenses targeting the marine pathogen *Lindera thallasiae*. Tetrahedron 60:7035-7039.
- Reusch, T.B.H., W.T. Stam y J.L. Olsen. 1998. Size and estimated age of genets in eelgrass, *Zostera marina*, assessed with microsatellite markers. Marine Biology 133:519-525.
- Richards, C.L., J. L. Hamrick, L. A. Donovan y R. Mauricio. 2004. Unexpectedly high clonal diversity of two salt marsh perennials across a severe environmental gradient. Ecology Letters 7:1155-1162.
- Ruíz-Rentería, F., B. Van Tussenbroek, E. Jordán-Dahlgren. 1998. Puerto Morelos, Quintana Roo, México, pp 57-66. En: B J Kjerfve ed. CARICOMP-Caribbean Coral Reef, Seagrass and Mangrove Sites. UNESCO, Paris.
- Schmid, B. 1986. Spatial dynamics and integration within clones of grassland perennials with different growth form. Proceedings of The Royal Society Of London. London 228: 173-186.
- Scoffin, T. P. 1970. Trapping and binding of subtidal carbonate sediments by marine vegetation in Bimini Lagoon, Bahamas. Journal of Sedimentary Petrology 40:249-273.
- Short, F. T., B. Polidoro, S. R. Livingstone, K. E. Carpenter, S. Bandeirac, J. S. Bujang, A. J. Smit. 2004. Medicinal and pharmaceutical uses of seaweed natural products: A review. Journal of Applied Phycology 16:245-262.
- South GR. 1983. A note on two communities of seagrasses and rhizophytic algae in Bermuda. Botánica Marina 26:243-248.
- Stafford, N. B. y S. S. Bell. 2006. Space competition between seagrass and *Caulerpa prolifera* (Forsskaal) Lamouroux following simulated disturbances in Lassing Park, FL. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 333:49-57.
- Stoner, A. W. 1985. *Penicillus capitatus*: an algal island for macrocrustaceans. Marine Ecology Progress Series 26:279-287.
- Stoner, A. W. y F. G. Lewis. 1985. The influence of quantitative and qualitative aspects of habitat complexity in tropical sea-grass meadows. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 94:19-40.

- Sutherland, W. y R. Stillman. 1988. The foraging tactics of plants. *Oikos* 52: 239-244.
- Taplin, K. A., E. A. Irlandi y R. Raves. 2005. Interference between the macroalga *Caulerpa prolifera* and the seagrass *Halodule wrightii*. *Aquatic Botany* 83:175- 186.
- Thayer, G. W., K. A. Bjondal, J. C. Ogden, S. L. Williams, y J. C. Zieman. 1984. Role of larger herbivores in seagrass communities. *Estuaries* 7: 351-376
- Tuomi, J. y T. vuorlsalo. 1989. ¿What are the units of selection in modular organisms? *Oikos* 54: 227-233.
- UNESCO. 1998. CARICOMP-Caribbean coral reef, seagrass and mangrove sites. Coastal regions and small island papers, vol 3. UNESCO, Paris.
- Valdivia-Carrillo, T. 2011. Estructura clonal u endogamia en dos poblaciones del pasto marino *Thalassia testudinum* de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Puerto Morelos, Quintana Roo, México.
- Van Tussenbroek, B. I. 1995. *Thalassia testudinum* leaf dynamics in a Mexican Caribbean coral reef lagoon. *Marine Biology* 122: 33-40.
- Van Tussenbroek, B. I. 2011. Dynamics of seagrasses and associated algae in coral reef lagoons. *Hidrobiológica* 21: 294-310.
- Van Tussenbroek, B. I. y J. K. Van Dijk. 2007. Spatial and temporal variability in biomass and production of psammophytic *Halimeda incrassata* (Bryopsidales, Chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. *Journal of Phycology* 43: 69-77.
- Van Tussenbroek, B.I. y Barba-Santos, M.G. 2011. Demography of *Halimeda incrassata* (Bryopsidales, Chlorophyta) in a Caribbean reef lagoon. *Marine Biology* 158:7, 1461-1471.
- Walters, L. J. y C. M. Smith. 1994. Rapid rhizoid production in *Halimeda discoidea* Decaisne (Chlorophyta) fragments: a mechanism for survival after separation from adult thalli. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 175:105–20.
- Watkinson, A. y J. White. 1986. Some life-history consequences of modular construction in plants. 31-52. p. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (Eds.), *The growth and form of modular organisms*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Williams, G. 1986. Retrospect on modular organisms. 245-250. p. En: Harper, J., B. Rosen y J. White (Eds.), *The growth and form of modular organisms*. Cambridge University Press. Cambridge.

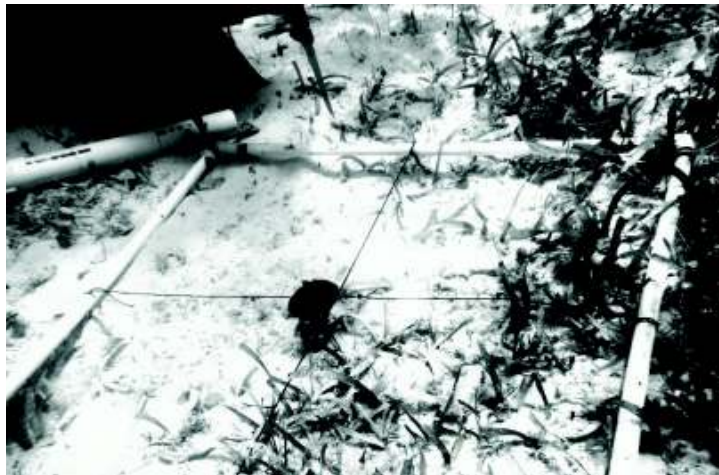
- Williams, S. L. 1984. Uptake of sediment ammonium and translocation in a marine green macroalga, *Caulerpa cupressoides*. *Limnology and Oceanography* 29:374-379.
- Williams, S. L. 1990. Experimental studies of Caribbean seagrass bed development. *Ecological Monographs* 60: 449-469.
- Woelkerling, W. J. 1976. South Florida benthic marine algae. Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Florida.
- Zieman, J. C. 1982. The ecology of the seagrasses of south Florida: a community profile. US Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, Washington, D. C.
- Zieman, J. C., J. W. Fourqurean y R. L. Iverson. 1989. Distribution, abundance and productivity of seagrasses and macroalgae in Florida Bay. *Bulletin of Marine Science* 44:292-311.

## XII. APÉNDICES

**Apéndice 1.** Muestreo para el estudio preliminar de recolonización de macroalgas rizofíticas.



Se utilizaron marcos de PVC de 80x80 para determinar el área de la parcela para el experimento, posteriormente se retiraron todas las macroalgas y pastos marinos dentro del marco de PVC.



Sólo se dejó una macroalgas rizofítica central para a partir de ella estudiar su tasa de reproducción clonal.

**Apéndice 2.** Sitios de estudio. Se puede observar las diferencias de las condiciones de vegetación en las que se encuentra cada uno de los sitios de muestreo.



Zona 1



Zona 2



Zona 3



Zona 4



**Apéndice 3.** Registro fotográfico del proceso de reclutamiento.



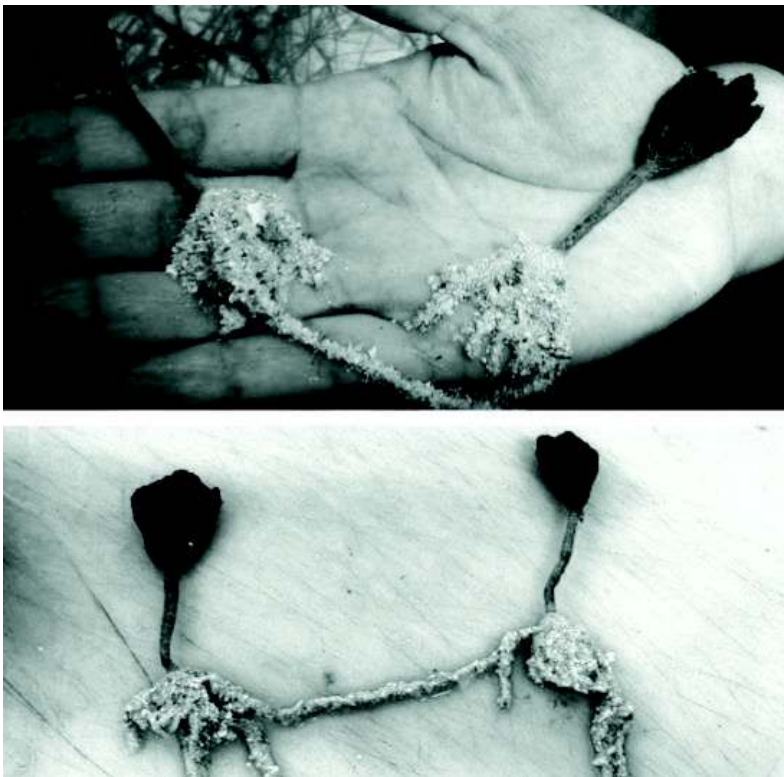
En estas imágenes se muestra el seguimiento fotográfico al proceso de reclutamiento de estas macroalgas rizofíticas (género *Rhipocephalus*) a través de los primeros 5, 8 y 12 días de haber iniciado el experimento.



#### Apéndice 4. Obtención de medidas biométricas



Determinación de medidas como biomasa, peso y dimensiones de los reclutas de macroalgas rizofíticas.



En algunas ocasiones se lograba extraer en campo las macroalgas rizofíticas aun unidas por sus rizoides, señal de dispersión clonal.

Apéndice 5. Factores que influyen en el crecimiento clonal de las macroalgas rizofíticas

### CRECIMIENTO CLONAL

