



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

PATRONES DE SEDIMENTACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA
RELACIONADOS CON INDICADORES DE DEGRADACIÓN
ARRECIFAL EN AKUMAL, Q.ROO

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

PRESENTA:
MARÍA JULIA NARANJO GARCÍA

TUTOR PRINCIPAL
DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ
FACULTAD DE CIENCIAS UNAM
COMITÉ TUTOR
DR. PAUL BLANCHON
DR. MARTÍN SOTO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
DR. RODOLFO RIOJA NIETO
FACULTAD DE CIENCIAS UNAM
DR. DAVID VALDÉS
DEPARTAMENTO DE RECURSOS DEL MAR CINVESTAV
DRA. ALEJANDRA PRIETO DAVO
FACULTAD DE QUÍMICA UNAM

SISAL, YUCATÁN JUNIO 2016.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



**PATRONES DE SEDIMENTACIÓN Y CALIDAD DEL AGUA
RELACIONADOS CON INDICADORES DE DEGRADACIÓN
ARRECIFAL EN AKUMAL, Q.ROO.**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS

PRESENTA:

MARÍA JULIA NARANJO GARCÍA

DIRECTOR

DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ

COMITÉ TUTOR

DR. PAUL BLANCHON

DR. MARTÍN SOTO

INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA UNAM

DR. RODOLFO RIOJA NIETO

FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

DR. DAVID VALDÉS LOZANO

DEPARTAMENTO DE RECURSOS DEL MAR CINVESTAV

DRA. ALEJANDRA PRIETO DAVO

FACULTAD DE QUÍMICA UNAM

SISAL, YUCATÁN. JUNIO 2016.

I. LISTA DE FIGURAS.....	6
II. LISTA DE TABLAS	10
III. DEDICATORIA	11
IV. AGRADECIMIENTOS.....	12
V. RESUMEN	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. ANTECEDENTES	18
3. MARCO TEÓRICO	22
3.1 Zonación Arrecifal.....	22
3.2 Sedimentos	25
3.2.1 Sedimentación	25
3.2.2 Trampas de sedimentación	26
3.2.3 Tasa de captura de sedimentación	28
3.3 Estado de condición	30
3.4 Calidad del agua: Nutrientes	32
3.4.1 Nitritos y Nitratos.....	33
3.4.2 Amonio.....	34
3.4.3 Fosfatos.....	34
3.5 Enfermedades coralinas	35
3.5.1 Infección Ciliada del Caribe (ICC)	35
3.5.1 Enfermedad de Puntos Blancos (PB)	37
3.5.2 Enfermedad de Banda Amarilla (EBA)	38
3.5.3 Salud comprometida en corales duros (SC).....	39
3.5.4 Enfermedad de Puntos Oscuros (PO).....	40
4. JUSTIFICACION	41

5. HIPOTESIS	42
6. OBJETIVO GENERAL	42
7. OBJETIVOS PARTICULARES.....	42
8. MATERIALES Y MÉTODOS	43
8.1 Área de estudio	43
8.2 Trabajo en Campo.....	48
8.2.1 Trampas de Sedimento	48
8.2.2 Caracterización de las comunidades arrecifales.....	49
8.2.3 Toma de Muestras Para Análisis de Calidad del Agua	54
8.3 Trabajo en laboratorio	56
8.3.1 Procesamiento del Sedimento.....	56
8.3.2 Método para estimar la tasa de captura de sedimentación.....	56
8.3.3 Método para la caracterización de las comunidades arrecifales.....	57
8.3.4 Incidencia de Enfermedades coralinas.....	58
8.3.5 Análisis Multivariados	58
9. RESULTADOS.....	60
9.1 Caracterización de las comunidades bentónicas	60
9.1.1 Temporada de secas	62
9.1.2 Temporada de lluvias.....	65
9.1.3 Temporada de nortes.....	68
9.1.4 Análisis de Abundancia Relativa de la cobertura coralina	71
9.1.5 Enfermedades Coralinas.....	76
9.2 Tasa de captura de sedimento.....	81
9.3 Calidad del agua	85
9.3.1 Parámetros fisicoquímicos	85

9.3.2 Nutrientes	87
9.3.3. Análisis Multivariados	104
9.3.3.4. Indicadores Biológicos.....	104
9.3.3.5 Indicadores Fisicoquímicos.....	111
Resumen de resultados	122
10. DISCUSIÓN	123
11. CONCLUSIONES.....	130
12. Literatura consultada.....	132
ANEXOS.....	140

I. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sección transversal que muestra la relación de flujo de aguas subterráneas en costas de piedra caliza. (modificado de Shaw, 1997).....	16
Figura 2. Diagrama de la zonación arrecifal representativa de Akumal, donde el frente arrecifal está compuesta por fondos duros/zona de transición, cordilleras y canales someros, y la zona de pendiente arrecifal está compuesta por cordilleras y canales profundos. Tomado de: http://realreefs.sisal.unam.mx (Garza Pérez, 2012).....	22
Figura 3. a) Toma representativas de la zona de Transición dominada por octocorales y fondos duros. b) Frente arrecifal dominado por cordilleras y canales someros (hasta 8 m de profundidad) , así como por fondos dominados por corales masivos. c) la pendiente arrecifal en Akumal, dominada por cordilleras y canales profundos. Fotos: Garza Pérez.....	24
Figura 4. Diagrama de una trampa de sedimentos con detalle en el los parámetros que aborda (Modificada a partir de Storlazzi <i>et al.</i> 2004).....	27
Figura 5. Relación de indicadores de estructura y función arrecifal. A la derecha se presentan los indicadores esperados y a la izquierda los no deseados (Garza-Pérez, 2012).....	31
Figura 6. Tomada de Croquet et al. (2006). Aspecto general de las bandas de ciliados con diferentes densidades en a. <i>E. fastigiata</i> , b. <i>O. faveolata</i> , c. <i>P. furcata</i> , d. <i>U. Tenuifolia</i> , e. <i>A. palmata</i> , f. <i>A. cervicornis</i> , g. <i>D. Labyrinthiformis</i> , h. Detalle de una agrupación de ciliados en <i>P. asteroides</i>	36
Figura 7. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Puntos Blanco (PB) en <i>A. Acropora palmata</i> ; B. lesiones de la enfermedad de puntos blancos en <i>A. palmata</i>	37
Figura 8. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Banda Amarilla (EBA). C. Lesión de forma circular y D. Lesión en forma de banda en <i>M. annularis</i>	38
Figura 9. Tomada de Underwater Cards for Assessing Coral Health on Caribbean Reefs, 2008. Lesiones por salud comprometida en corales duros.....	39
Figura 10. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Puntos oscuros (PO). E. Lesiones de la enfermedad de puntos negros en <i>Stephanocoenia michelinii</i> , F. Lesiones de PO en <i>Siderastrea Siderea</i>	40
Figura. 11 Ubicación espacial de Akumal, Quintana Roo. *imagen modificada de Lang (2003).....	45
Figura 12. Mapa de los sitios de las trampas de sedimento. La Zona de Transición (ZT) representada con puntos rojos presenta un rango de profundidad de 8.2 a 10.3 metros. El Frente arrecifal (F) en puntos amarillos presenta una rango de profundidad de 10.9 a 16.4 metros y la Pendiente arrecifal (P) en puntos verdes presenta una profundidad de 15.5 a 20.1 metros.....	47
Figura. 13. (A) Trampa de sedimento colocada a 110 cm del sustrato Foto. Garza-Pérez (2013). (B) Diseño de Storlazzi (2004) donde se muestra la turbulencia generada por el flujo de agua en el tubo de PVC de la trampa de sedimento.....	48
Figura 14. Cambio de trampas de sedimento mensual en el arrecife de Akumal, Q.Roo. Foto. Garza Pérez (2013).....	49
Figura 15. Método de filmación de videotransectos (Foto Garza-Pérez, 2013).....	50
Figura 16. a) Procesamiento de las muestras de agua en laboratorio, b) Filtrado de las muestras, preparación de reactivos y c) curva de calibración para análisis de N y F.....	54
Figura 17. a y b) Procesamiento y extracción y empaquetado de sedimento <i>in situ</i> , c y d) secado, pesado y empaquetado de los sedimentos en laboratorio.	56
Figura 18. Ejemplo de la disposición sistemática de los puntos en el monitor de alta resolución para la identificación de cobertura en cada cuadro a lo largo de los videotransectos.....	58
Figura 19. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	63

Figura 20. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de frente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	64
Figura 21. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	65
Figura 22. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	66
Figura 23. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de frente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	67
Figura 24. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	68
Figura 25. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	69
Figura 26. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	70
Figura 27. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).....	71
Figura 28. Promedio de Colonias para cada zona arrecifal en Akumal Q. Roo.....	73
Figura 29. Abundancia relativa de especies en la Zona de Transición arrecifal de Akumal Q. Roo.....	74
Figura 30. Abundancia relativa de especies en la Zona de Frente arrecifal de Akumal Q. Roo.....	75
Figura 31. Abundancia relativa de especies en la Zona de Pendiente arrecifal de Akumal Q. Roo.....	76
Figura 32. Enfermedades registradas en el Arrecife de Akumal Quintana Roo.....	78
Figura 33. Grafica de cajas: Porcentaje de Incidencia y desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de secas. Grafica de Pasteles: Porcentaje de Enfermedades presentes.....	79
Figura 34. Grafica de cajas: Porcentaje de Incidencia/desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de lluvias. Grafica de Pasteles: Porcentaje de Enfermedades presentes.....	80
Figura 35. Grafica de cajas: Porcentaje de Incidencia/desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de lluvias. Grafica de Pasteles: Porcentaje de Enfermedades presentes.....	81
Figura 36. Grafica de cajas y bigotes de transectos a lo largo del tiempo. Promedios y desviación estándar de cada transecto: T1= 15.23 ± 11.01, T2= 24.44± 13.98, T3= 9.78 ± 8.79 y T4= 18.47±11.85.....	82
Figura 37. Diagrama de dispersión de los datos promedio de la tasa de captura de sedimento para cada trampa durante el periodo de muestreo.....	83
Figura 38 Grafica de cajas y bigotes de la Tasa de captura de sedimentación (Tcs) por cada mes de muestreo.....	84
Figura 39. Grafica de cajas y bigotes de la Tasa de captura de sedimentación (Tcs) promedio por transecto. Transecto (1)= 2.72 mg/m ² , transecto (2)= 7.28, transecto (3)= 1.82 y transecto (4)= 3.82. La línea roja señala la media general = 4.03, D.E.= 9.53, gl=3, n=676.....	85

Figura 40. Grafica de cajas y bigotes de la Tasa de captura de sedimentación (T_{cs}) promedio por zona. $ZT= 8.85 \pm 15.4 \text{ mg/m}^2$, $F= 2.93 \pm 4.18$, y $P= 0.94 \pm 1.36$. La línea roja señala la media general de 4.03, $gl=2$, $n=676$	86
Figura 41. Promedios y desviación estándar de parámetros fisicoquímicos durante temporada secas, lluvias y nortes.....	87
Figura 42. Grafica de caja y bigotes de la concentración de amonio entre temporadas. Valor de $p= 0.0241$ y $H=7.45$. La línea roja representa el valor de la media general.....	89
Figura 43. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de amonio (μM) a través del tiempo.....	90
Figura 44. Grafica de caja y bigotes de la concentración de nitrito entre temporadas. Valor de $p= 0.0243$ y $H=7.42$. La línea roja representa el valor de la media general.....	91
Figura 45. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitritos (μM) a través del tiempo.....	92
Figura 46. Grafica de caja y bigotes de la concentración de nitrato (μM) entre temporadas. Valor de $p= 0.0007$ y $H=14.47$. La línea roja representa el valor de la media general.....	93
Figura 47. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitrato (μM) a través del tiempo.....	94
Figura 48. Grafica de caja y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) entre temporadas. Valor de $p<0.0001$ y $H=36.04$. La línea roja representa el valor de la media general.....	95
Figura 49. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) a través del tiempo.....	96
Figura 50. Grafica de caja y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) entre temporadas. Valor de $p<0.0006$ y $H=14.73$ La línea roja representa el valor de la media general.....	97
Figura 51. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) a través del tiempo.....	98
Figura 52. Grafica de caja y bigotes de la concentración de fósforo total (μM) entre temporadas. Valor de $p<0.4131$ y $H=1.76$ La línea roja representa el valor de la media general.....	99
Figura 53. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de fósforo tota (μM) a través del tiempo.....	100
Figura 54. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de amonio (μM) a través del tiempo.....	101
Figura 55. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitrito (μM) a través del tiempo.....	102
Figura 56. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitrato (μM) a través del tiempo.....	103
Figura 57. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) a través del tiempo.....	104
Figura 58. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) a través del tiempo.....	105
Figura 59. Grafica de cajas y bigotes de la concentración de fósforo total (μM) a través del tiempo.....	106
Figura 60. Grafica de cajas y bigotes de la concentración (μM) de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) a través del tiempo. Valor de $p<0.05$, $H=54.104$. Se observan diferencias significativas entre los meses de muestreo.....	107
Figura 61. Valor de $p<0.05$, $H=61.1926$. Se observan diferencias significativas entre los transectos.....	107
Figura 62. Diagrama MDS de las todas estaciones durante el periodo de muestreo por zona arrecifal y transecto, a partir de los indicadores biológicos: coberturas bentónicas e incidencia de enfermedades. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	109

Figura 63. Diagrama MDS de todas las estaciones durante el periodo de muestreo (abril 2013-junio2014) a partir de los indicadores biológicos: coberturas bentónicas e incidencia de enfermedades. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	109
Figura 64. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas pardas A.P. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	110
Figura 65. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas filamentosas A.F. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	110
Figura 66. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas coralinas incrustantes A.Cori. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	111
Figura 67. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la incidencia en enfermedades I.Enf. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.07.....	111
Figura 68. Diagrama MDS de todas las estaciones durante el periodo de muestreo por zona arrecifal y transecto, a partir de los indicadores fisicoquímicos: Tasa de captura de sedimento () y nutrientes (NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , NT, PO ₄ , FT, NID). Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	115
Figura 69. Diagrama MDS de todas las estaciones durante el periodo de muestreo (abril 2013-junio2014) a partir de los indicadores fisicoquímicos: tasas de captura de sedimento (Tcs) y nutrientes (NH ₄ , NO ₂ , NO ₃ , NT, PO ₄ , FT, NID). Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	116
Figura 70. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la tasa de captura de sedimento de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	117
Figura 71. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la concentración de amonio de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	117
Figura 72. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la concentración de nitrógeno total de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	117
Figura 73. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la concentración de nitrato total de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	118
Figura 74. Diagrama MDS de comportamiento de la Tasa de captura de sedimento por porcentaje de cobertura coralina. Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	119
Figura 75. Diagrama MDS de comportamiento de las Tasas de captura de sedimento respecto a la incidencia de enfermedades (%).Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	119
Figura 76. Diagrama MDS de comportamiento de la concentración de Amonio (uM) respecto a la incidencia de enfermedades (%).Similitud de Bray-Curtis, estrés:0.1.....	120
Figura 77. Triplot RDA variables ambientales, especies y estaciones. Variables ambientales: TCS= tasa de captura de sedimento, DIN= nitrógeno inorgánico disuelto, NO ₂ = nitrito, NO ₃ = nitrato, PO ₄ = fosfato, FT= fósforo total, °C= temperatura de agua de fondo, NT= nitrógeno total y variables especies: Cob_Alga= cobertura de algas y Incidenc= % incidencia de enfermedades. Las estaciones para mayo_2013 están representadas del 2-13, agosto_2013: 14-24, octubre_2013: 25-36, febrero_2014: 37-48, marzo_2014: 49-60, mayo_2014: 61-71, junio_2014: 72-83.....	126

II. LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tasas de sedimentación para diferentes arrecifes (modificada de Rogers 1990 y Razo 1998).....	29
Tabla 2. Grupos Funcionales para Identificación de Organismos Arrecifales Bentónicos y Sustratos Inertes (Garza Pérez, 2004).....	51
Tabla 3. Resumen de las muestras obtenidas durante el periodo de muestreo.....	61
Tabla 4. Porcentajes de cobertura promedio de grupos taxonómicos dominantes en un ciclo anual. CC= Cobertura Coralina y CA= Cobertura de Algas.....	62
Tabla 5. Promedio y desviación estándar de la comunidad coralina en las diferentes zonas arrecifales.....	72
Tabla 6. Análisis de similarid de una vía (ANOSIM) para el tiempo de muestreo de los indicadores biológicos.....	112
Tabla 7. Indicadores abióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.....	113
Tabla 8. Indicadores bióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.....	114
Tabla 9. Análisis de similarid de una vía (ANOSIM) para el tiempo de muestreo de los indicadores fisicoquímicos.....	121
Tabla 10. Indicadores abióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.....	122
Tabla 11. Indicadores abióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.....	123
Tabla 12. Análisis de Redundancia (RDA). Eigenvalores de los cuatro ejes y valores de correlación de variables ambientales (Tcs, nutrientes y temperatura) y las variables especies (cobertura de algas y porcentaje de incidencia de enfermedades).....	124

III. DEDICATORIA

A mis padres.
A mi Chino.

IV. AGRADECIMIENTOS

Agradezco CONACyT por la beca 517059/289549 y al proyecto CONACyT Ciencia Básica 2011 “Desarrollo de mapas arrecifales de alta resolución espacial como precursores para modelación dinámica espacialmente explícita.” Clave 165791.

Agradezco al Programa PIESACOM de la UMDI-Sisal, Facultad de Ciencias, UNAM, por el apoyo y capacitación.

Agradezco al Centro Ecológico Akumal-(Paul Sánchez e Iván Penié), al Akumal Dive Center (Gerardo Orozco) por las facilidades otorgadas para este proyecto de investigación.

Agradezco al laboratorio de Química Marina del CINVESTAV- IPN Unidad Mérida por el apoyo brindado, así como al laboratorio de Química de la UAS de la Facultad de Química de la UNAM.

Agradezco al comité de evaluación de tesis por su apoyo: Dr. Rodolfo Rioja, Dr. Sergio Valdés, Dr. Paul Blanchon, Dr. Alejandra Prieto y al Dr. Martín Soto.

Agradezco al Dr. Rodrigo Garza por su apoyo, guía, entusiasmo y amistad.

Mi entera gratitud y respeto a mis compañeros: M. en C. Araceli López-Patoni, Adán Aranda, Biol. Ana Molina, por su apoyo en campo, por que sin ustedes esta tesis no hubiera sido posible.

Agradecimiento técnicos:

Quiero agradecer especialmente a la M. en C. Korynthia López Aguiar de la Facultad de Química de la UNAM por el apoyo en análisis de nutrientes en agua. A la Quim. Elizabeth Real de León y a la M. en C. Silvia Granados Puerto, del Laboratorio de Química Marina del Departamento de Recursos del Mar del CINVESTAV- IPN Unidad Mérida por el apoyo en análisis de sedimentos marinos.

V. RESUMEN

Una de las principales fuentes de presión sobre los arrecifes de coral está asociada al aumento de nutrientes y a la sedimentación. En el Caribe mexicano, estos factores asociados a la alta conectividad de aguas freáticas con el mar y a las descargas de aguas residuales, se han asociado a cambios fisicoquímicos y biológicos al sistema arrecifal alterando el estado de condición de los arrecifes. El arrecife de Akumal forma parte del sistema de arrecifes bordeantes de Quintana Roo y del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) y fue el primer desarrollo turístico de la zona costera continental del Caribe mexicano. En esta zona, el turismo es la principal actividad económica y el impacto asociado al desarrollo costero ha alterado los sistemas acuáticos. La finalidad de este estudio fue medir la variación espacio-temporal de las tasas de captura de sedimentación (t_s) y evaluar la calidad del agua en un ecosistema de arrecifes de coral durante un ciclo anual, mediante el uso de trampas de sedimento colocadas a diferentes profundidades (7-20 m). Se estimó; que, durante el periodo de estudio, el arrecife estuvo expuesto a tasas de sedimentación de 0.13 a 83.7 mg/cm²/día. El 86% de las muestras presenta $t_s \leq 10$ mg/cm²/día que corresponden a arrecifes no sometidos a estrés por actividad humana, el 13% de las muestras presentaron de 10 a 50 mg/cm²/día que confieren al arrecife estrés moderado a severo y sólo el 1% de las muestras sobrepasan los 50 mg/cm²/día considerado un nivel crítico. Así mismo, se utilizó la técnica de videotransectos para caracterizar la comunidad bentónica y estimar la cobertura coralina e incidencia de enfermedades y se obtuvo que en promedio la cobertura bentónica esta dominada por algas pardas y filamentosas representando en ocasiones más del 50% de la cobertura total, mientras que sólo el 5-9% corresponde a corales pétreos. La especie más abundantes corresponden a *Undaria agaricites* con una cobertura del 20.81% del total de corales, *Orbicella faveolata* con 15.61% y *Siderastrea siderea* con 13.02%. Se registraron 5 enfermedades durante el tiempo de muestreo en las cuales sólo el 10.16% de las colonias resultaron afectadas. Las enfermedades registradas fueron: infección ciliada del caribe (ICC), banda blanca (BB), puntos morados (PM), puntos blancos (PB) y banda amarilla (BA). Por último se colectaron muestras de agua del fondo marino para medir concentraciones de nutrientes. El amonio (NH⁴-N) fluctuó entre los 0.022 y 0.399 y registró un promedio anual de 0.107 mg/L, los nitritos (NO²) fluctuaron entre los 0.0002 y 0.0158 con un promedio anual de 0.0092 mg/L, los nitratos (NO³) fluctuaron entre los 0.089 y 0.397 con un promedio anual de 0.220 mg/L. En general el amonio registró valores más altos en temporada, en contraste con los valores de nitratos y nitritos que presentaron los valores más elevados durante la temporada de lluvias que corresponde con el aumento de escorrentías y precipitaciones de la zona. Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian elevadas concentraciones de amonio, nitritos y nitratos, lo que puede generar un impacto negativo en el arrecife de coral por problemas de eutrofización.

Palabras clave: arrecife coralino, sedimentación, nutrientes, indicadores de condición arrecifal.

1. INTRODUCCIÓN

El arrecife de coral es el ecosistema con mayor variedad de especies y además el más diverso del medio marino (Wilkinson 2002, Stone *et al.*, 2011), Es probablemente, el sistema más productivo del mundo en términos de biomasa (Hughes, 1989). Estos sistemas proveen un hábitat para un sinnúmero de especies sirviendo de refugio, como zona de alimentación, crecimiento y reproducción; además poseen la función de mantener la interacción entre la zona costera y oceánica (Nybakken 1993). Los arrecifes de coral constituyen formaciones biológicas complejas, con una gran heterogeneidad espacial y diversidad de hábitats. La estructura y forma de los arrecifes coralinos es el resultado del balance entre el crecimiento arrecifal por parte de organismos que producen y conforman su estructura dura y su destrucción por parte de organismos que la erosionan y destruyen (Lewis, 1981). Los arrecifes son reconocidos como ecosistemas complejos (Connell *et al.* 1997, Jackson y Johnson 2000, Edmunds 2002) y su permanencia está fuertemente influenciada por una multitud de procesos climáticos, hidrodinámicos y ecológicos (Rice y Hunter, 1992). Las corrientes transforman las condiciones oceanográficas ocasionando fluctuaciones en la temperatura y la salinidad, o llevando a la superficie elementos minerales que favorecen la fotosíntesis (Vegas, 1980). Existen otros fenómenos naturales que afectan el ecosistema arrecifal, algunas de estos son las tormentas y huracanes, los altos niveles de irradiación, transparencia del agua y la aportación de sedimentos (Done 1982, Anthony *et al.* 2007), sin embargo el efecto en la comunidad arrecifal depende de la frecuencia e intensidad del fenómeno.

Las actividades humanas han alterado considerablemente el paisaje en las áreas costeras. La extensión de la urbanización y actividad humana representan impactos localizados como contaminantes, escorrentía, pesca y uso recreativo de los arrecifes, esta situación se presenta en más de del 70% de los arrecifes en México considerados en un índice de salud arrecifal de malo a crítico (HRI, 2012).

Los arrecifes de coral modernos consisten en una estructura básica formada principalmente por corales escleractinios (Tunnell *et al.*, 2010). Una característica notoria de los arrecifes coralinos modernos es la amplia variabilidad que presentan tanto en su morfología, como en los patrones de distribución y abundancia de la comunidad coralina que los coloniza. Esta variabilidad es

resultado de un complejo proceso de interacciones tanto geológicas como biológicas. En términos del proceso de desarrollo de un arrecife moderno, existen dos componentes temporales principales: uno de largo plazo determinado por la historia geológica de una localidad y otro de mediano plazo, que resulta de cambios en la estabilidad climática y tasas de ascenso del nivel del mar, durante la transgresión Holocénica (Jordán, 1987). Las diferentes expresiones que la comunidad coralina tiene a nivel local reflejan por tanto, no sólo el resultado de las interacciones ecológicas del presente, sino también un complejo componente histórico, independientemente de que una comunidad compleja tiene diferentes vías de integración (May, 1974).

Los arrecifes modernos del Caribe poseen una importancia a nivel mundial por la presencia de formación arrecifal que va desde el norte de la Península de Yucatán hacia el sur llegando frente a las costas de Belice y Honduras. Este arrecife es una barrera discontinua y es conocido como el gran cinturón de arrecifes del Atlántico (Chávez e Hidalgo, 1988) o como más recientemente se le ha llamado, La Barrera Arrecifal Mesoamericana. La costa del estado de Quintana Roo posee características geomorfológicas y biológicas únicas en el país, por su asociación con manglares (MacKenzie, 2001) y por la naturaleza cárstica de la Península de Yucatán que permite las filtraciones de agua al manto freático, que a su vez tiene conexiones directas con el mar mediante grietas y ojos de agua (Roy, 2004). El flujo de ríos o canales subterráneos provenientes del manto freático acarrean estos nutrientes y descargan en el océano alcanzando a permear los ecosistemas ahí inmersos (Rosenberg & Kushmaro, 2011).

Hasta tiempos recientes, muchos de los principales ecosistemas arrecifales habían estado lejos de los centros de población humana y en lugares de difícil acceso. Esta situación ha cambiado y la biota arrecifal esta comenzando a resentir el impacto de una variedad de actividades humanas que son potencialmente destructivas (Chávez e Hidalgo, 1988; Chávez y Tunnell, 1993). Actualmente, cerca del 40 % de la población mundial vive dentro de los 100 kilómetros de la costa (Constanza *et al.* 1997; GEO4/UNEP 2007). La contaminación del agua subterránea en las zonas costeras, la falta de infraestructura, en combinación con actividades agrícolas, industriales, pesqueras y turísticas no reguladas puede conducir a una rápida degradación de los recursos y hábitats costeros (Knee *et al.* 2010; Hernández-Terrones *et al.* 2011).

La naturaleza cárstica del acuífero de la Península de Yucatán está dada por las características de las rocas calizas y depósitos de litoral de alta permeabilidad y transmisibilidad, por las fracturas en

la roca que favorecen el flujo de agua y forma a su vez conductos de dilución de diversas magnitudes; la recarga es del orden de los $25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$ (Back and Hanshaw 1970). El agua fluye en el subsuelo a través de cenotes y cavernas (Back and Hanshaw 1970) ya que la topografía de la Península carece de escurrimientos superficiales (ríos). El flujo subterráneo que tiene lugar bajo estas condiciones se encuentra conectado casi directamente con lagunas y el mar, y alimenta subsecuentemente el medio acuático en el área aportando nutrientes y elementos producto de las actividades en tierra. El transporte de contaminantes en un acuífero cárstico depende tanto de las propiedades del contaminante, como de la temporada climática y las interacciones diagenéticas (Bakalowicz, 2005). Beddows *et al.* (2002), ha descrito el acuífero costero de Quintana Roo, como "un acuífero de porosidad triple", lo cual sugiere que el flujo de agua subterránea debe ser considerado a través de una matriz de fracturas y un sistema de cuevas interconectadas. De acuerdo con Shaw (1997) y Beddows *et al.* (2007), el acuífero se encuentra estratificado de acuerdo a la densidad del agua, con una porción de agua dulce más fresca que cubre una zona de agua salina más caliente, (Fig.1).

Akumal, así como las lagunas de Xel Ha, Chemuyil, Yalkuito y Xaak, es considerado uno de los principales puntos de salida de aguas subterráneas que fluyen desde el interior de la Península de Yucatán (Shaw, 1997).

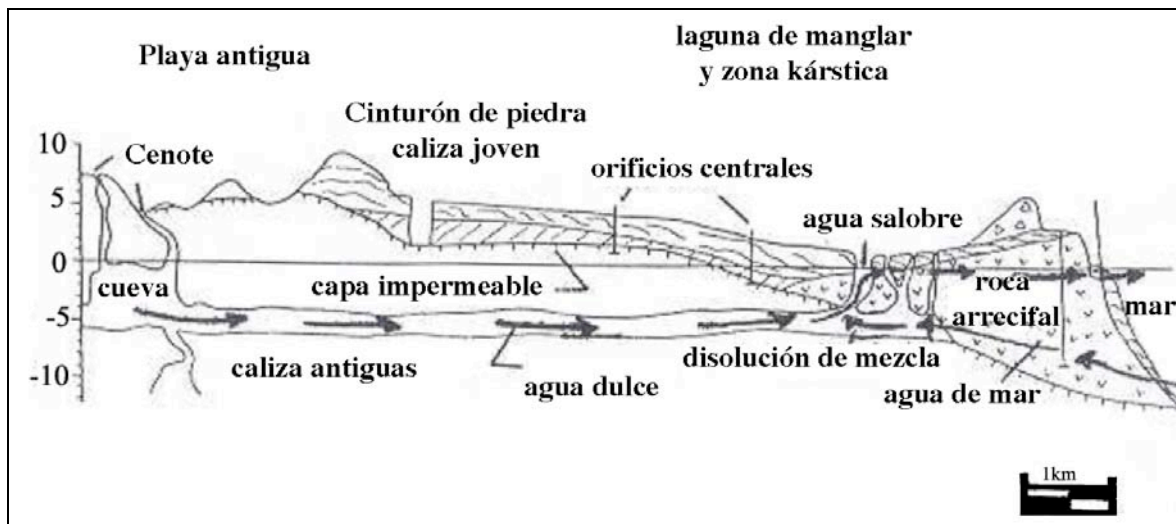


Figura 1. Sección transversal que muestra la relación de flujo de aguas subterráneas en costas de piedra caliza. (Modificado de Shaw, 1997).

El ecosistema se encuentra amenazado debido a la presión ejercida por el crecimiento económico, poblacional y de infraestructura urbana. El desarrollo es particularmente rápido en la costa oriental de la Península de Yucatán, donde la tasa de crecimiento de la población ha llegado a más del 14% anual en algunas zonas (Hernández-Terrones *et al.* 2011). La contaminación del agua subterránea es una de las consecuencias de esta actividad (Lapointe *et al.* 1990) y la falta de infraestructura de tratamiento de aguas residuales y el mal funcionamiento de la existente, hace que las descargas de aguas residuales sean fuente de contaminación del acuífero, (Hernández-Terrones *et al.*, 2011), eutrofizando el ambiente costero y fomentando la proliferación de vegetación submarina e incluso la invasión algal en los arrecifes, humedales costeros, bosques de manglar y aguas litorales en general (Chérubin *et al.*, 2008, Bryant *et al.*, 1998, Paytan *et al.*, 2006 y Young *et al.*, 2007). Muchos de los impactos tanto naturales como antropogénicos tienen efectos obvios e inmediatos, tales como la fragmentación de colonias coralinas al punto de la mortalidad total. Además, algunos de estos efectos y sus impactos pueden ser difíciles de comprender y cuantificar (Raymundo & Harvell, 2008). Uno de estos efectos y que además, ha ido aumentando en intensidad y frecuencia desde hace 30 años, es la incidencia de enfermedades coralinas; ocasionando pérdida en el tejido vivo coralino y cambios significativos en la estructura de la comunidad, en la diversidad de especies y de otros organismos asociados (Beeden *et al.* 2008). Debido a la incidencia de lesiones y al estado de condición que han presentado los corales, los científicos y tomadores de decisiones han declarado a los arrecifes en estado de crisis a nivel mundial (Veron *et al.* 2009; Wilkinson 1998, 2000, Wilkinson *et al.* 2009).

2. ANTECEDENTES

En las últimas décadas, los arrecifes de coral de todo el mundo han experimentado una disminución significativa atribuible a uno o más factores que naturales y antropogénicos (Harvell *et al.* 1999, 2005, 2007; Hoegh-Guldberg 1999; Ostrander *et al.* 2000; Hayes *et al.* 2001; Jackson *et al.* 2001; Gardner *et al.* 2003; Hughes *et al.* 2003; Pandolfi *et al.* 2003; Weil *et al.* 2003; Willis *et al.*, 2004; Weil 2004; Sutherland *et al.* 2004; Wilkinson 2006; Rogers y Miller 2006; Hoegh-Guldberg *et al.* 2007; Lesser *et al.* 2007; Rogers *et al.* 2008a, b; Miller *et al.* 2009; Cróquer y Weil 2009b). El efecto de cada factor o combinación de factores, varía dentro de cada región y a través del tiempo. Un informe reciente indica que el 32% de los corales escleractinios enfrentan un alto riesgo de extinción debido principalmente al blanqueamiento y las enfermedades que parecen positiva y significativamente correlacionadas a la elevada temperatura del agua del mar y aún más agravadas por factores de estrés antropogénicos locales (Carpenter *et al.* 2008), como el enriquecimiento de nutrientes, deforestación (Epstein *et al.* 1998; Carey 2000; Harvell *et al.* 2004, 2007, 2009; Weil 2004; Bruno *et al.* 2003, 2007; Hoegh-Guldberg *et al.* 2007), sedimentación (Littler & Littler, 1996) y contaminación fecal (Patterson *et al.*, 2002).

En las últimas décadas los arrecifes coralinos del Caribe han sufrido pérdidas significativas en la cobertura de corales constructores (ej. *Acropora palmata* y *A. Cervicornis*) debido a la frecuencia e intensidad de enfermedades coralinas (Weil, 2001).

Los acropóridos eran los constructores arrecifales más abundantes e importantes en la región, y al disminuir la densidad de estas especies, se transformó la arquitectura arrecifal, convirtiéndose en arrecifes con estructuras más planas y menos complejas (Gladfelter 1983, Álvarez-Fillip *et al.* 2009). Por otra parte, la mortalidad masiva del erizo negro *Diadema antillarum* (Weil, 2004), provocó una disminución en las tasas de herbivoría y como efecto asociado, una proliferación de macroalgas en toda la región (Goldberg & Wilkinson, 2004).

Los estudios respecto a la sedimentación y sus efectos en las comunidades coralinas son muy escasos y tienden a ser de carácter geomorfológico (Soledispa, 2007). Existen otra serie de trabajos para el área terrestre. Los causados por dragado y escorrentías provenientes de las

actividades humanas (Rogers, 1985), así como a el cambio de uso de suelo, y deforestación (Gonzales-Lozano, 2006).

Dada la importancia de la sedimentación en las comunidades coralinas se han realizado estudios en el Indo Pacífico (Mapstone *et al.* 1989, Stafford-Smith 1993, Fabricius y Wolanski 2000) y en el Caribe (Hunte y Wittenberg 1992, Whittenberg y Hunte 1992), el Pacífico central (Storlazzi *et al.* 2004; Storlazzi *et al.* 2009a), en el Océano Indico (Chazottes, 1996; Chazottes *et al.* 2008) y escasos en el Pacífico Oriental (Cortés y Risk 1985, Storlazzi, Presto y Logan, 2007), así como experimentos en laboratorio que han explorado la eficiencia de las formas de las trampas y la velocidad del flujo (Gardner, 1980a; Butman, 1986; Butman *et al.* 1986; White J. 1990; Bale, 1998; Nodder y Alexander, 1999).

En México, el estudio de Ochoa-López *et al.* (1998) en Islas Revillagigedo documenta el impacto del aporte de sedimentos hacia las comunidades coralinas. Por otra parte Granja-Fernández y López- Pérez (2008) evalúan la tasa de sedimentación y su variación espacio-temporal en seis localidades de Bahías de Huatulco, Oaxaca en el Pacífico mexicano.

Dentro de los trabajos relevantes que tratan diversos aspectos de la sedimentación se pueden mencionar el de Sttaford-Smith (1993) que exploró la relación entre el rechazo y la tolerancia a la sedimentación en corales de la gran Barrera Australiana. Otros autores señalan que la sedimentación interfiere con los procesos ecológicos y la estructura de la comunidad de corales pétreos (Sttaford-Smith 1993, Ochoa- López *et al.* 1998), reduce la capacidad de respiración, captura de alimento y fotosíntesis (Szmant-Froelich *et al.* 1981, Abdul-Salem y Porter 1988, Stafford-Smith y Ormond 1992), incrementa la demanda de energía para la remoción activa del (Stafford-Smith y Ormond 1992, Riegl y Branch 1995), daña los pólipos en sentido mecánico (Rogers 1990) y bloquea el intercambio agua-tejido del coral afectando el metabolismo del par simbiote (Jordán-Dahlgren 1989). Además, la sedimentación afecta también al resto de la comunidad béntica, reduciendo el espacio disponible para el forrajeo y el movimiento, y altera la topografía del sustrato (Rogers 1990).

Pérez y Vargas (2008) utilizaron trampas de sedimentos para medir la tasa de sedimentación espacio-temporal del Sistema Arrecifal Veracruzano. A su vez Sofonia y Kenneth (2008) evaluaron el estrés por sedimentación producto de eventos de escorrentías, dragado y resuspensión en los arrecifes de coral de Australia utilizando trampas de sedimentos en

laboratorio. Chazottes *et al.* (2008) abordó el tema de los depósitos de sedimentos y partículas en resuspensión resultado de procesos de bioerosión y diferentes niveles de eutrofización en arrecifes de Madagascar, lo que le permitió realizar una comparación entre la composición de los sedimentos del fondo arrecifal y las partículas en suspensión.

En cuanto estudios de evaluación de condición y caracterización arrecifal, Aronson *et al.* (1994) presentaron un programa de monitoreo en arrecifes de Belice, Jamaica y Florida. Carleton y Done (1995) cuantifican la comunidad bentónica en diferentes arrecifes de la Gran Barrera Arrecifal de Australia. Bak y Nieuwland (1995) estudiaron los cambios en la cobertura de corales escleractínios durante 20 años en las Antillas Holandesas, comparando los cambios estructurales en la comunidad a profundidades de 10 m, 20 m, 30 m y 40 m. Se basaron en series fotográficas de cuadrados permanentes y observaron que la diversidad disminuyó a través de los años independiente de la profundidad. Osborne y Oxley (1997) propusieron el método de videotransectos y el uso de Grupos Morfo-Funcionales (y categorías asociadas al sustrato) como herramientas para la evaluación a gran escala de comunidades bentónicas arrecifales. Aronson y Swanson (1997) examinaron diferentes arrecifes de coral en el Caribe y realizaron análisis univariados y multivariados de varios descriptores ecológicos arrecifales como cobertura de corales y cobertura de algas. Murdoch y Aronson (1999) cuantificaron la variación en la cobertura de corales duros a lo largo de la región Arrecifal de Florida. McField *et al.* (2001), mediante un análisis multifactorial determinaron la estructura de la comunidad en la barrera arrecifal de Belice. Los datos se obtuvieron por videotransectos y encontraron que existen diferencias significativas en la estructura de la comunidad entre sitios expuestos a oleaje y corrientes. Bauer y Kendall (2010) llevaron a cabo una caracterización de los arrecifes de coral, los contaminantes y los patrones de distribución de nutrientes en un arrecife de Puerto Rico, encontrando que las algas filamentosas y macroalgas presentaron los porcentajes más altos de cobertura y una cobertura de coral duro baja con un promedio de 3.4%. En el Caribe se han llevado a cabo estudios sobre estado de condición y caracterización arrecifal, Fenner (1988) caracterizó los arrecifes de Isla Cozumel con el método de transectos fotográficos e identificó 51 especies.

Jordán (1988) menciona que en el Caribe la mayor parte de la información que se utiliza para comprender la dinámica de la comunidad bentónica en los arrecifes es obtenida del análisis orientado a la identificación de las especies clave en la comunidad.

Horta-Puga y Carricart-Ganivet (1993), describen brevemente los arrecifes coralinos del Golfo de México y del Caribe, registrando un total de 152 especies, 42 en el Pacífico y 97 para el Atlántico. Gutiérrez *et al.* (1993a) publicaron un plan de manejo para el sistema arrecifal de Sian Ka'an, dando a conocer los límites de la Reserva y formaciones coralinas. En ese mismo año Gutiérrez *et al.* (1993b) realizaron una comparación entre los arrecifes de Veracruz y Quintana Roo. Tunnell *et al.* (1993), realizó una caracterización ecológica en una porción del Sudoeste de Quintana Roo, logrando por medio de censos visuales describir un perfil característico del lugar y definir zonas arrecifales. Muñoz-Chagín *et al.* (1993), hacen una descripción del arrecife Akumal, incluyendo una lista sistemática de los corales, así como un análisis de su distribución batimétrica, observaron la presencia de 33 taxa de escleractínios. Maldonado (1998), describió la estructura del paisaje arrecifal de Mahahual, Quintana Roo; obteniendo un total de doce paisajes, definiendo como esta estructurado el arrecife. Aguilar, (1998) describió la geomorfología general y estructura de la Comunidad de Corales Escleractinios en el Arrecife de Mahahual, Quintana Roo. Cáceres (1999), realizó una descripción del arrecife Boca Paila, ubicado dentro de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo utilizando el videotransecto como técnica de muestreo. Membrillo-Venegas (1999) a partir del análisis de videotransectos realizó una descripción de 12 paisajes arrecifales en la laguna del arrecife Alacranes, Yucatán, México. Chávez (1997), analiza el impacto de dos técnicas; el transecto fotográfico, en el estudio del bentos y los censos visuales para peces en 7 arrecifes del Caribe Mexicano y propone un número de muestra óptimo por estrato de profundidad. Steneck y Lang (1998) utilizando el protocolo AGRRA analizaron diferentes aspectos del arrecife obteniendo bajas tasas de mortalidad reciente entre 0-25% en el arrecife de Akumal, asimismo Garza-Pérez (1999, 2004) lo realizó a través de la caracterización y evaluación de la estructura de la comunidad arrecifal mediante el análisis de videotransectos y datos *in-situ*, de donde obtuvo valores de cobertura de Grupos Taxonómicos y de Substrato (GTS) y determinó el estado de condición arrecifal como “estresado y proclive a la degradación” de acuerdo a la alta cobertura algal de hasta 60% en algunas estaciones. En 2012, Healthy Reefs realizó la evaluación del estado de condición de la comunidad arrecifal con base en cuatro indicadores: Cobertura coralina, cobertura de macroalgas, peces herbívoros y peces de interés comercial y obtuvo que cerca del 70% de los sitios evaluados en el Caribe Mexicano se encuentran dentro del índice de salud pobre o crítico. (Healthy Reefs, 2012).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Zonación Arrecifal

La formación arrecifal de Akumal es de tipo bordeante (Wilkinson *et al* 2009). Un arrecife bordeante puede dividirse en laguna arrecifal, arrecife anterior, cresta, zona de transición, cordilleras y canales, bancos de arena y pendiente arrecifal (Fig. 2), o sólo en laguna, frente y pendiente (Garza Pérez, 2004; Díaz, 2005). Las diferentes zonas arrecifales presentan características heterogéneas, creando diferentes hábitats dominados por comunidades adaptadas al tipo e intensidad de los factores físicos ambientales de la zona (Jordán, 1993; Garza Pérez, 2004; Tunnell *et al.*, 2007). Este arrecife se caracteriza por tener contar con una formación arrecifal considerable (Jordán, 1993b).

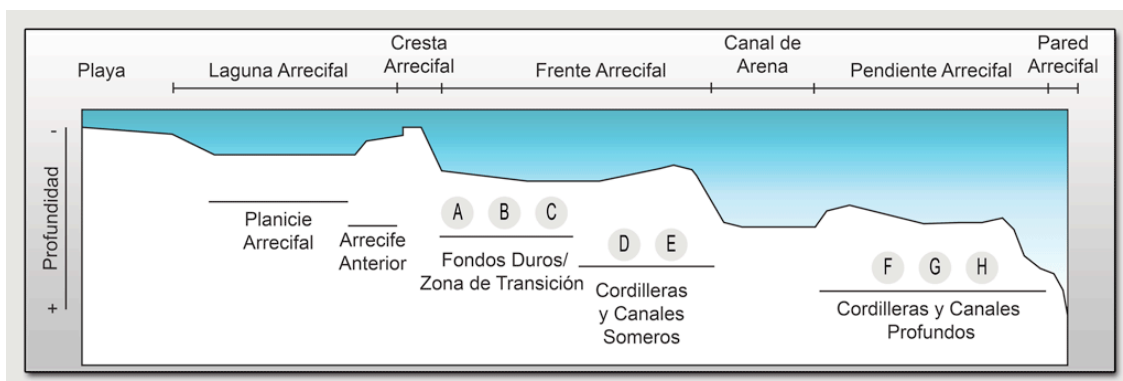


Figura 2. Diagrama de la zonación arrecifal representativa de Akumal, donde el frente arrecifal está compuesta por fondos duros/zona de transición, cordilleras y canales someros, y la zona de pendiente arrecifal está compuesta por cordilleras y canales profundos. Tomado de: <http://realreefs.sisal.unam.mx> (Garza Pérez, 2012).

La laguna arrecifal está dominada por camas de pastos marinos, arenales y parches coralinos. Como división entre la laguna arrecifal y el frente arrecifal se encuentra una cresta arrecifal que puede presentar de un desarrollo incipiente (en forma de parches coralinos) a un desarrollo muy conspicuo. Siguiendo a la cresta puede existir una zona de transición arrecifal de variable extensión caracterizada por ser una planicie de pavimento calcáreo con escasa cobertura de macroalgas, presencia de octocorales, y pequeñas colonias de coral escleractinio de forma domo e incrustante, canales de arena y sistemas de macizos. En esta zona de transición es donde los sistemas de macizos y cordilleras comienzan a desarrollarse, a partir de los 6m de profundidad (Fig. 3a, b y c).

Los macizos y cordilleras del primer escalón de la pendiente arrecifal (o arrecife frontal) son estructuras de mediano a alto desarrollo con una importante actividad de acreción arrecifal, dominados generalmente por corales escleractíneos, octocorales y algas (Fig. 3b). Como característica de los arrecifes de este sistema, existe un canal de arena separando el primer escalón del segundo en la pendiente arrecifal. El segundo escalón de la pendiente arrecifal (Fig. 3c) se caracteriza por presentar las estructuras más desarrolladas (con mayor complejidad topográfica) y con mayor cobertura de coral escleractinio. (Garza Pérez, 2004).



Figura 3. a) Tomas representativas de la zona de Transición dominada por octocorales y fondos duros. b) Frente arrecifal dominado por cordilleras y canales someros (hasta 8 m de profundidad), así como por fondos dominados por corales masivos. c) Pendiente arrecifal en Akumal, dominada por cordilleras y canales profundos. Fotos: Garza Pérez.

3.2 Sedimentos

Los sedimentos marinos son considerados como el reservorio último de una gran cantidad de sustancias y elementos eliminados en cuerpos de aguas costeros, particularmente sustancias contaminantes como compuestos clorados y metales pesados y constituyen un microambiente protector para las bacterias (Mann & Jazier, 1991), por lo que los corales pueden ser afectados por el sedimento suspendido o acumulado sobre la superficie de las colonias resultando en un factor de estrés (Kenneth, 2008).

Los sedimentos se caracterizan a menudo de manera descriptiva y por tipo de textura (por ejemplo, arena, arcilla limos) o por el tamaño medio de grano. La clasificación textural a menudo refleja la composición y los acontecimientos que se produjeron durante la erosión, el transporte y la depositación (Folk y Ward, 1957; Friedman, 1979; Bui *et al.*, 1990).

Arrecifes con un historial de altas cargas de sedimentos tienden a estar dominados por unas pocas especies de coral tolerantes (Sofonia y Kenneth, 2008).

En el área de Akumal, los sedimentos varían de arenas finas, medianas y gruesas. Considerando que la composición de los sedimentos de la zona prevalece un porcentaje alto de microorganismos cuya concha o testa es de composición calcárea, recibe el nombre de biocalcarenita (Díaz-Ruiz, 2002). Este sedimento es depositado mecánicamente y está conformado por restos de organismos marinos como algas coralinas y ciertos foraminíferos (Logan, 1969).

3.2.1 Sedimentación

La sedimentación constituye un proceso marino que se produce como resultado de diversas causas: la resuspensión y transporte de sedimento provocados por fenómenos meteorológicos como tormentas y huracanes (MacIntyre *et al.* 1987, Rogers *et al.* 1991, Hubbard 1992, Scoffin 1993). En ambos casos, el proceso está considerablemente regulado por el perfil batimétrico del fondo y la granulometría del sedimento. Otra causa es la erosión terrestre y el transporte de sedimento al mar inducidos por la precipitación pluvial (Cortés y Risk 1985, Craik y Dutton 1987, Hands *et al.* 1993, Hodgson 1993, MacIntyre *et al.* 1993), las descargas de efluentes (Loya 1976, Cortés y Risk 1985, Cortés 1993; Katwijk *et al.* 1993, McClanahan y Obura 1997, Barrera-Escorcía 2004) y las actividades humanas derivadas del desarrollo turístico y actividades costeras (Barrera-Escorcía 2004, Fermán *et al.* 2006). La sedimentación por dragado y

escorrentía constituye una de las mayores fuentes potenciales de degradación de los arrecifes provenientes de las actividades humanas en el Caribe y el Pacífico (Johannes 1975, Dahl 1985, Rogers 1985). En el Atlántico occidental, el Caribe y el Pacífico, las actividades de dragado asociadas a la construcción de hoteles, condominios y carreteras ha destruido arrecifes, camas de pastos marinos y manglares (Endean 1976, Jaap 1984, Dahl 1985, Salvat 1987, White 1987, Torres-Alvarado y Calva- Benítez, 2012). Dichas actividades intensifican los procesos de azolvamiento y eutrofización, afectando la integridad de los ambientes arrecifales (Littler & Littler 1984, Tomascik y Sander 1987, Grigg y Dollar 1990, Szmant 2002).

3.2.2 Trampas de sedimentación

Una trampa de sedimentos es un contenedor desplegado en la columna de agua con el objetivo de proporcionar una muestra representativa del material que se decanta a través de esa columna de agua antes de que pase a una profundidad mayor y en última instancia a la parte inferior del fondo marino o lacustre (White, 1990).

De acuerdo con White (1990) y Storlazzi *et al.* (2004) en su revisión de la literatura demuestran que las trampas cilíndricas por encima del lecho marino son el diseño más eficiente, ya que disminuye considerablemente el efecto de sobreestimación, como resultado de la resuspensión del sedimento del fondo, propia de entornos energéticos que normalmente caracterizan a los arrecifes de coral, (por ejemplo, Ogston *et al.* 2004; Storlazzi *et al.* 2004, 2009b.). Las trampas pueden proporcionar información útil acerca de la magnitud relativa de la dinámica de los sedimentos si son utilizadas adecuadamente (Storlazzi *et al.* 2004). Es importante destacar que la mayor parte de la literatura publicada sobre trampas de sedimentos durante la última mitad del siglo XX es dirigida a trampas pequeñas en relación con la altura de la columna de agua en aguas profundas, relativamente elevadas sobre el mar o el suelo de un lago. Gardner (1980a, b) y Butman (1986) concluyeron que la tasa de captura de partículas de una trampa es una función del tiempo de residencia y el patrón de circulación dentro de la trampa. Estos son controlados por un número de variables independientes que describen la geometría de la trampa y los parámetros adicionales que describen tanto el fluido y las partículas arrastradas en el líquido.

No existe una norma absoluta para las mediciones de flujo debido a que el flujo de partículas vertical en el océano es el resultado de procesos complejos. Por lo tanto, todos los intentos de

comprender la variabilidad temporal y espacial del flujo de partículas se basan en la suposición de que las trampas de sedimentos estiman el flujo de partículas verticales razonablemente bien (Scholten et al, 2001).

Los parámetros de la trampa que pueden ser controlados son la altura (H), diámetro de la boca de la trampa (D), la altura de la boca de la trampa por encima del sustrato (Z_0) y la separación entre las trampas (Fig. 4).

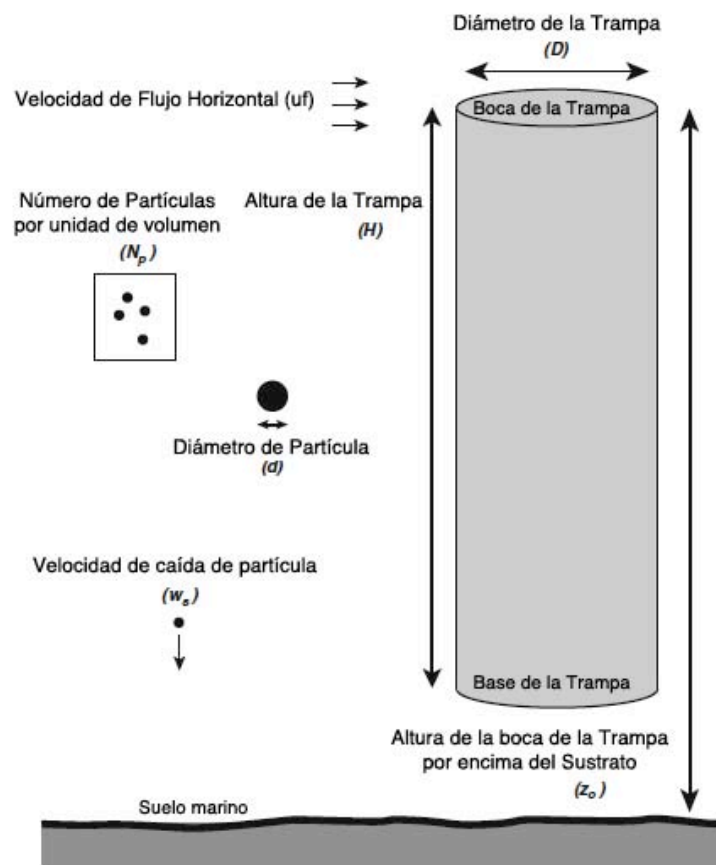


Figura 4. Diagrama de una trampa de sedimentos con detalle en el los parámetros que aborda (Modificada a partir de Storlazzi *et al.* 2004).

Varios autores sugieren que las trampas de sedimento deben tener una relación longitud/ancho cercano a 10, y todas las trampas utilizadas en el estudio deben tener el mismo tamaño y altura sobre el fondo marino adyacente (Gardner *et al*, 1983; Blanco, 1990; y Jurg, 1996; Storlazzi *et al*, 2004; Storlazzi 2009; Bothner *et al*, 2006).

3.2.3 Tasa de captura de sedimentación

La tasa de captura de sedimentación para este estudio está basada en la eficiencia de captura de la trampa (Storlazzi, 2004), la cual consiste únicamente en las partículas que entran verticalmente a través de la columna de agua en la trampa sin tomar en cuenta la corriente, la velocidad de flujo, la profundidad y la morfología de las partículas (Gardner, 1980; Baker *et al*, 1988;.. Silver *et al*, 1998), por lo que la tasa de captura de sedimentación sólo podrá proporcionar una estimación del flujo de partículas vertical (Yu *et al*. 2001) y no medir la sedimentación neta de sitio (Storlazzi, 2004).

Los datos sobre las tasas de sedimentación son especialmente importantes para los arrecifes vulnerables a la sedimentación procedente de operaciones de dragado y de la erosión. Recogiendo muestras en y sobre el substrato, se puede estimar el sedimento que es resuspendido y transportado a lo largo del fondo, así como el sedimento que se asienta, proveniente de la columna de agua.

Los registros de tasas de sedimentación en arrecifes no sometidos a estrés por actividades humanas son $<10 \text{ mg}^* \text{ cm}^{-2} * \text{ día}^{-1}$ y las tasas superiores a $100 \text{ g/m}^2/\text{d}$ se asocian con un número menor de especies de coral, coral muerto y disminución de la producción neta (Rogers, 1990). De acuerdo con Pastorok y Bilyard (1985), tasas de sedimentación de 10 a $50 \text{ mg}^* \text{ cm}^{-2} * \text{ día}^{-1}$ imprimen al medio condiciones de estrés de moderadas a severas, alcanzando el nivel crítico al rebasar los $50 \text{ mg}^* \text{ cm}^{-2} * \text{ día}^{-1}$ (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de tasas de sedimentación para diferentes arrecifes (modificada de Rogers 1990 y Razo 1998).

Lugar	Tasas (mg cm ⁻² d ⁻¹)	Profundidad	Referencia
Jamaica (Discovery Bay)	0.5 - 1.1 (trampas 50 cm arriba del sustrato)	4 m	Dodge et al. (1974)
St Thomas, USVI	0.1± 0.1—1.6 ± 0.7	3-5m	Rogers (1982)
Puerto Rico	1-15	9-33m	Cintron et al. (1974)
Puerto Rico	2.5± 0.9—2.6± 1.2	4m	Rogers (1983)
Costa Rica (Cahuita)	30--360	n.d.	Cortes & Risk (1984)
Barbados	<10 a> 40	n.d.	Tomascik & Sander (1985)
Barbados	5 -10 (5cm arriba del sustrato)	13.5 - 45m	Ott (1975)
Akumal (México)	10—394	10m	Razo, (1999)

3.3 Estado de condición

Determinar el estado de condición de un arrecife de coral ha sido objeto de diversos estudios en el Caribe (Garza-Pérez 1999, Aronson y Precht 2001, Lang 2003, Garza-Pérez 2004, García-Salgado *et al.* 2006; Garza-Pérez, 2011, entre muchos otros). El estado de condición de los corales está fuertemente influenciado por una multitud de procesos climáticos (impacto de huracanes, estrés térmico, tormentas), hidrodinámicos (movimientos de las masas de agua), ecológicos (herbivorismo) y antropogénicos (contaminación, pesca, etc.).

Los métodos de evaluación de estado de condición arrecifal (ej. AGRRA, Healthy Reefs) se basan en criterios de clasificación medibles como indicadores de salud del arrecife coralino. Los indicadores son parámetros o medidas de un ecosistema que proveen información de su condición. Ayudan a definir el concepto abstracto de salud de un ecosistema a números tangibles, definidos rigurosamente, mediante los cuales se puede evaluar su desarrollo. Estos métodos de evaluación consideran crítico obtener múltiples indicadores de la relación corales-algas-peces para caracterizar adecuadamente el complejo vínculo que existe entre ellos: (1) Tamaño y mortalidad parcial de los corales constructores de arrecifes; (2) Abundancia relativa de los principales tipos de algas; y (3) La abundancia y tamaño de las especies clave de peces. En el caso del estado de condición de los principales corales escleractínios se utilizaron como indicadores la composición de especies, el tamaño de la colonia, la mortandad, el reclutamiento, las enfermedades, el blanqueamiento, la depredación y la cobertura coralina entre otros (Healthy reefs, 2012). La cobertura de coral duro vivo es un indicador del estado de condición y la cobertura de coral enfermo y muerto del grado de deterioro en el ecosistema (Risk, 1979; Rogers *et al.*, 1983; Núñez-Lara y Arias-González, 1998; Bastida-Zavala *et al.*, 2000; Beltrán-Torres *et al.*, 2003; Acosta-González, 2005), Fig 5.



- * % de Cobertura de Coral Duro
- * Riqueza de especies de Coral
- * Densidad y Tamaño de Colonias Coralinas
- * Densidad de reclutas coralinos
- * Presencia de especies coralinas raras
- * Diversidad de Morfotipos
- * Complejidad Topográfica



- * % de Cobertura de Algas Pardas y filamentosas
- * % de Coral Muerto Reciente
- * Densidad de Colonias Muertas en Pie
- * Incidencia de Enfermedades coralinas
- * Presencia de blanqueamiento
- * Densidad de esponjas incrustantes, tunicados y gusanos flabeliformes
- * Incidencia de lesiones por depredación en Corales



Figura 5. Relación de indicadores de estructura y función arrecifal. A la derecha se presentan los indicadores esperados y a la izquierda los no deseados (Garza-Pérez, 2012).

3.4 Calidad del agua: Nutrientes

La calidad del agua puede ser considerada como una medida idónea para un uso particular seleccionado basado en características físicas, químicas y biológicas. Para determinar la calidad del agua, se deben medir y analizar las características del agua, tales como la temperatura, contenido de minerales disueltos, y el número de bacterias. Estas características seleccionadas se comparan entonces con las normas y directrices numéricas para decidir si el agua es adecuado para un uso particular (USGS, 2014).

La vida en el ambiente acuático está determinada por la calidad y las características del agua, todo cambio en ella involucra cambios en la biota y en su composición físico-química (Walsh-Perú, 2009), y el origen de los contaminantes que se encuentran en los mares es muy diverso (SEMARNAT, 2005). Las fuentes de contaminación de la zona costera se han definido de acuerdo a la procedencia de los contaminantes, como fuentes puntuales y fuentes difusas. Las Fuentes puntuales, son aquellas que se pueden identificar físicamente con precisión; por ejemplo, toda tubería, canal, túnel, o pozo. Las fuentes difusas son las que no pueden identificarse con precisión, como la escorrentía de la zona agrícola (Ongley, 1997; US-EPA, 1997; de Jonge *et al.*, 2002). La contaminación del agua procedente de fuentes difusas, es el resultado de un amplio grupo de actividades humanas, donde los contaminantes no tienen un punto preciso de ingreso en los cursos de agua que los reciben; la contaminación se presenta cuando el agua discurre sobre la superficie del terreno (escorrentía) y al percolar por el subsuelo, arrastra los contaminantes y los agrega finalmente a aguas superficiales, costeras y subterráneas, por lo que son más difíciles de identificar, medir y controlar (Ongley, 1997; US-EPA, 1997; de Jonge *et al.*, 2002). Los contaminantes que ingresan a los litorales son diversos, por ejemplo, el petróleo e hidrocarburos, los plásticos, los pesticidas, las aguas residuales domésticas e industriales, los desechos radioactivos, los efluentes térmicos, las bacterias y los nutrientes (nitrógeno y fósforo, principalmente), (US-EPA, 1997; NRC, 2000).

Debido a que los arrecifes de coral prosperan en condiciones oligotróficas, la eutrofización es una cuestión de gran importancia. En general, el aumento de los niveles de nutrientes pueden dar lugar a la alteración del equilibrio del sistema arrecifal, de manera que cuando los nutrientes superan el valor umbral, las algas dominan la competencia por espacio con los corales (Lapointe, 1997). Además, los nutrientes tienen efectos nocivos sobre los corales, asociados a la incidencia

de enfermedades coralinas (Carreiro-Silva et al., 2009; Mueller *et al.*, 2014), y la integridad del crecimiento de coral y la calcificación (Risk, 2014). Los nutrientes son compuestos inorgánicos de nitrógeno y fósforo utilizados principalmente por los productores primarios para la elaboración de biomasa durante la fotosíntesis. El nitrógeno en el ambiente acuático se presenta en forma de nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y amonio (NH_4^+), el fósforo se encuentra básicamente como ortofosfatos (PO_4^{3-}). La concentración de los nutrientes en el ambiente acuático depende en gran medida de los aportes naturales (mineralización de la materia orgánica) y antropogénicos (aguas residuales, tratadas y escurrimientos de zonas agrícolas) (Hallock, 1990).

3.4.1 Nitritos y Nitratos

El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de la vida acuática. Si un recurso hídrico recibe descargas de aguas residuales domésticas, el nitrógeno estará presente como nitrógeno orgánico amoniacal, el cual, en contacto con el oxígeno disuelto, se irá transformando por oxidación en nitritos y nitratos. Este proceso de nitrificación depende de la temperatura, del contenido de oxígeno disuelto y del pH del agua. En los sistemas acuáticos los materiales nitrogenados tienden a transformarse en nitratos, los cuales son muy solubles en agua debido a la polaridad del ion. Los nitritos también solubles en agua, se transforman naturalmente a partir de los nitratos, ya sea por oxidación bacteriana incompleta del nitrógeno en los sistemas acuáticos y terrestres o por reducción bacteriana. El ion nitrito es menos estable que el ion nitrato. Es muy reactivo y puede actuar como agente oxidante y reductor, por lo que sólo se lo encuentra en cantidades apreciables en condiciones de baja oxigenación. Esta es la causa de que los nitritos se transformen rápidamente para dar nitratos y que, generalmente, estos últimos predominen en las aguas, tanto superficiales como subterráneas. Esta reacción de oxidación se puede efectuar en los sistemas biológicos y también por factores abióticos. (OMS, 1996, EPA, 2000).

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados, incluyendo el amoníaco, y la contaminación causada por la acumulación de excretas humanas y animales pueden contribuir a elevar la concentración de nitratos en agua. Generalmente, los nitratos son solubles, por lo que son movilizados con facilidad de los sedimentos por las aguas superficiales y subterráneas (Castro, 1987).

3.4.2 Amonio

El Amonio es el producto final de la reducción de las sustancias orgánicas e inorgánicas nitrogenadas y debe su origen a: nitrógeno atmosférico, por fijación química, proteínas animales o vegetales, por putrefacción mediante acción bacteriana y reducción de nitritos. El amonio se encuentra en cantidades notables cuando el medio es fuertemente reductor. En un medio oxidante, el ion amonio se transforma en nitrito. Se le considera un constituyente normal de las aguas superficiales y está íntimamente relacionado con descargas recientes de desagües. Cuando su concentración es mayor de 0,1 mg/L podría constituirse en un indicador de contaminación por aguas residuales domésticas o industriales. El amonio es un micronutriente para microorganismos y algas en los sistemas de distribución. Su presencia en el agua favorece la multiplicación de estos (OMS, 1996, EPA, 2000).

3.4.3 Fosfatos

Las especies químicas de fósforo más comunes en el agua son los ortofosfatos. Es común encontrar fosfatos en el agua. Son nutrientes de la vida acuática, y limitantes del crecimiento de las plantas. Sin embargo, su presencia está asociada con la eutrofización de las aguas, con problemas de crecimiento de algas indeseables, con acumulación de sedimentos, entre otros. La fuente principal de los fosfatos orgánicos son los procesos biológicos. Otra fuente importante de fosfatos en las aguas superficiales son las descargas de aguas que contienen como residuo detergentes comerciales. (EPA, 2000).

3.5 Enfermedades coralinas

Una enfermedad es cualquier deterioro a la salud que resulta en disfunción fisiológica e implica una interacción entre un anfitrión, un agente, y el medio ambiente (Coral Disease Handbook, 2008).

Las enfermedades de coral son alteraciones morfológicas, estructurales y funcionales de cualquier parte de la colonia, se describen por su morfología, coloración, formas y lesiones que causan (Work *et al.* 2006), sin embargo la causa de estas lesiones es desconocida en la mayoría de las enfermedades (Richardson 1998, Sutherland *et al.* 2004), así como la variabilidad espacial y temporal de la incidencia de estas enfermedades (Weil, 2000). Hasta la fecha, 18 enfermedades de corales, que afectan al menos 150 corales escleractinios, gorgonias, e hidrozoos zooxantelados, se han descrito desde el Caribe hasta el Indo-Pacífico. Estas enfermedades están asociadas con patógenos como bacterias, cianobacterias, hongos y protistas y con los factores de estrés abiótico incluyendo la temperatura elevada del agua de mar, la sedimentación, la eutrofización y la contaminación. En el mar Caribe se reportan principalmente nueve enfermedades, Banda Blanca tipo I y II, Plaga Blanca tipo I, II y III, Banda Negra, Viruela Blanca, Banda Amarilla, y Puntos Oscuros (Sutherland *et al.*, 2004), así como la Infección Ciliada del Caribe comúnmente confundida con la enfermedad de banda negra o bandas oscuras (CRTR, 2008).

3.5.1 Infección Ciliada del Caribe (ICC)

El primer reporte de esta enfermedad lo documentó Croquer *et al.*, (2006); y es causada por un ciliado del género *Halofolliculina sp.* que afecta a 25 especies de seis familias de corales escleractinios del Caribe (*Acroporidae*, *Agaricidae*, *Astrocoeniidae*, *Faviidae*, *Meandrinidae* and *Poritidae*). Estos ciliados pueden constituir un nuevo síndrome que se suma a las enfermedades para el Caribe (Green & Bruckner 2000; Weil 2004; Sutherland *et al.* 2004), y representa una potencial amenaza adicional a los corales constructores de la región. Estos protozoos son patógenos muy comunes y pueden distribuirse tanto en ecosistemas terrestres como marinos (Harvell *et al.* 1999; Gómez-Gutiérrez *et al.* 2002). Para el Caribe todavía no se sabe el mecanismo de transmisión de estos ciliados ni la tasa de mortalidad de los tejidos que producen en diferentes especies de corales. Es posible que la transmisión se produzca directamente a partir de la columna de agua o por contacto directo entre las colonias infectadas y susceptibles, y la

susceptibilidad puede depender de la presencia del daño anterior / lesiones en las colonias (Croquer *et al.*, 2006). La Infección se presenta en forma de banda oscura, o en forma de manchas, dispersas o densas formada por ciliados en el borde de la colonia o mezclado con tejido vivo (Fig. 6), esta infección es a menudo confundida con la enfermedad de banda negra o bandas oscuras (CRTR, 2008).

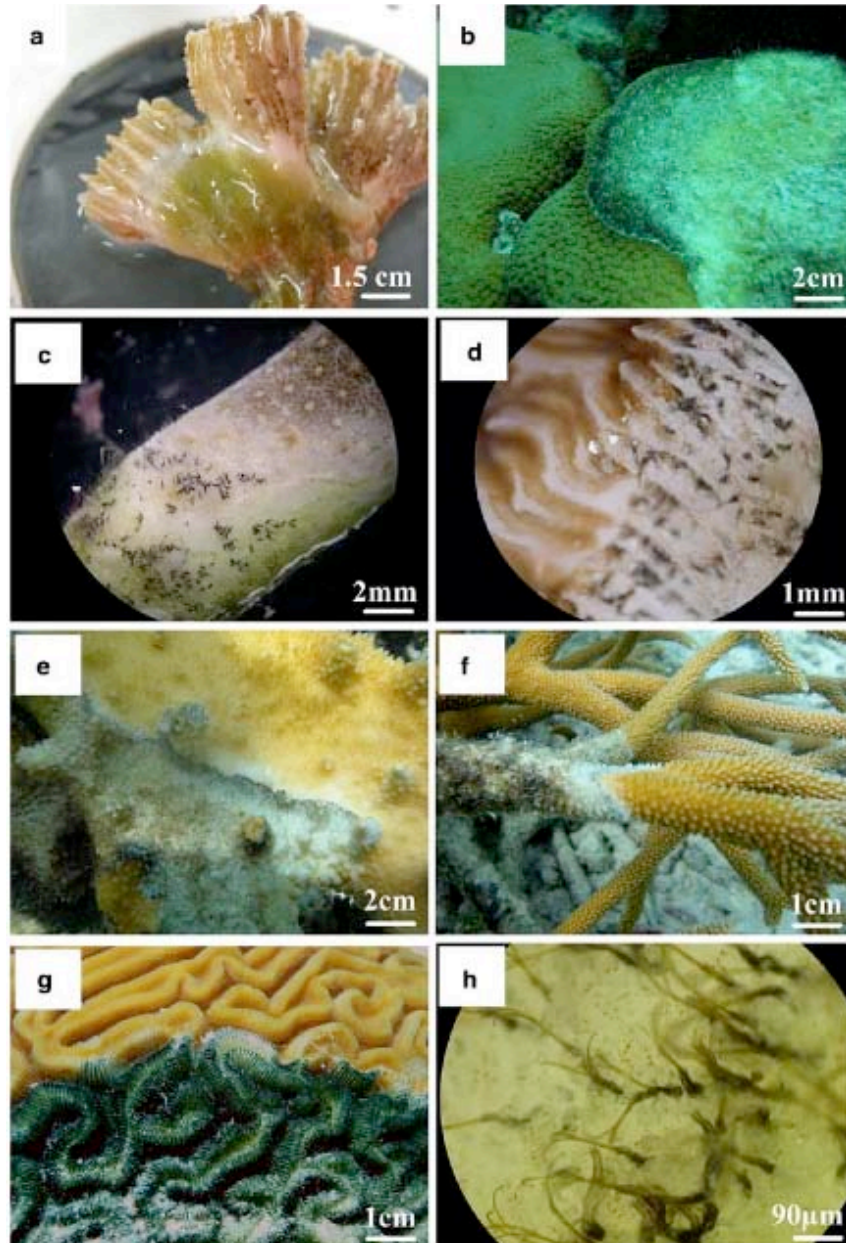


Figura 6. Tomada de Croquet *et al.* (2006). Aspecto general de las bandas de ciliados con diferentes densidades en a. *E. fastigiata*, b. *O. faveolata*, c. *P. furcata*, d. *U. Tenuifolia*, e. *A. palmata*, f. *A. cervicornis*, g. *D. Labyrinthiformis*, h. Detalle de una agrupación de ciliados en *P. asteroides*.

3.5.1 Enfermedad de Puntos Blancos (PB)

La enfermedad de la viruela blanca o puntos blancos también conocida como serriatosis en acropóridos (Patterson *et al.* 2002) o necrosis en parches (Bruckner y Bruckner, 1997a), su primer registro fue documentado en 1996 en los arrecifes de Key West, Florida (Holden, 1996), y se ha observado en todo el Caribe (Porter *et al.* 2001, Rodríguez-Martínez *et al.* 2001, Santavy *et al.* 2001, Patterson *et al.* 2002). La enfermedad afecta exclusivamente *Acropora palmata* y es causada por las bacterias fecales muy comunes pertenecientes a la especie *Serratia marcescens* (Sutherland, 2004) y es comúnmente confundida con blanqueamiento, enfermedad de banda blanca, plaga blanca y otros síndromes (CRTR, 2008). *Serratia marcescens* es una bacteria Gram-negativa clasificada como bacterias coliformes y miembro de la familia *Enterococcus bacteriaceae*. Se encuentra en las heces de seres humanos y otros animales y en el agua y suelo (Grimont & Grimont 1994). Los corales afectados por PB se caracterizan por presentar manchas blancas en formas irregulares y el esqueleto recientemente expuesto rodeado de tejido vivo con pigmentación normal (Fig. 7), la tasa de pérdida de tejido es rápida con un promedio de $2.5 \text{ cm}^2 \text{ d}^{-1}$.

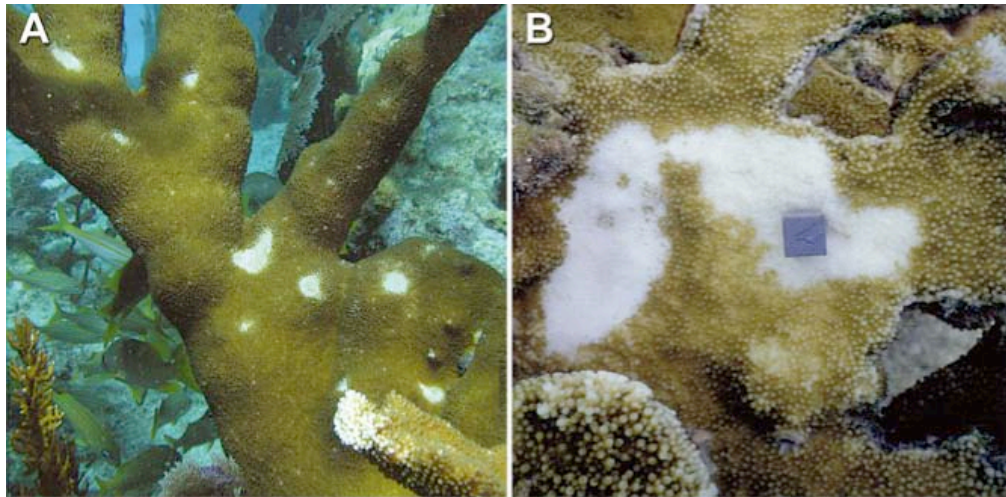


Figura 7. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Puntos Blanco (PB) en A. *Acropora palmata*; B. lesiones de la enfermedad de puntos blancos en *A. palmata*.

3.5.2 Enfermedad de Banda Amarilla (EBA)

La enfermedad se ha reportado en todo el Caribe desde 1994 (Santavy y Peters 1997, Santavy *et al* 1999, Cervino *et al* 2001, Garzón-Ferreira *et al* 2001, Toller *et al.*, 2001, Weil *et al.* 2002), afecta a 11 especies de corales escleractinios entre ellos los *Montastrea*, *Colpophyllia*, *Orbicella* y *Diploria*. El patógeno causante de la enfermedad es *Vibrio* y las lesiones se caracterizan por presentar tejido blanco en anillos concéntricos (Fig. 8), o en forma de bandas en los bordes de la colonia (CRTR, 2008). La tasa de pérdida de tejido por EBA es de aproximadamente 0.6 cm mo⁻¹ (Cervino *et al.* 2001).

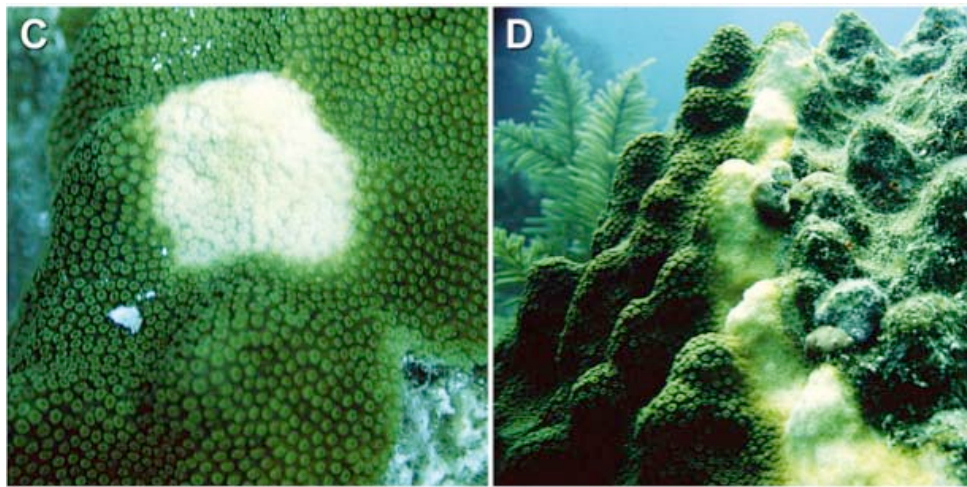


Figura 8. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Banda Amarilla (EBA). C. Lesión de forma circular y D. Lesión en forma de banda en *M. annularis*.

3.5.3 Salud comprometida en corales duros (SC)

Esta enfermedad presenta tejido con señales de mortalidad reciente en forma de manchas, bandas o anillos en áreas irregulares de diferentes tamaños y formas, regularmente el tejido puede estar desprendiéndose de la estructura del esqueleto y a veces puede llegar a presentar una banda oscura de bacterias (Fig. 9). El patógeno es desconocido al igual que la tasa de pérdida de tejido y afecta a 16 especies de corales como *Montastraea*, *Orbicella*, *Siderastrea*, *Agaricia*, *Diploria*, *Dendrogyra*, *Mycetophyllia*, (CRTR, 2008).

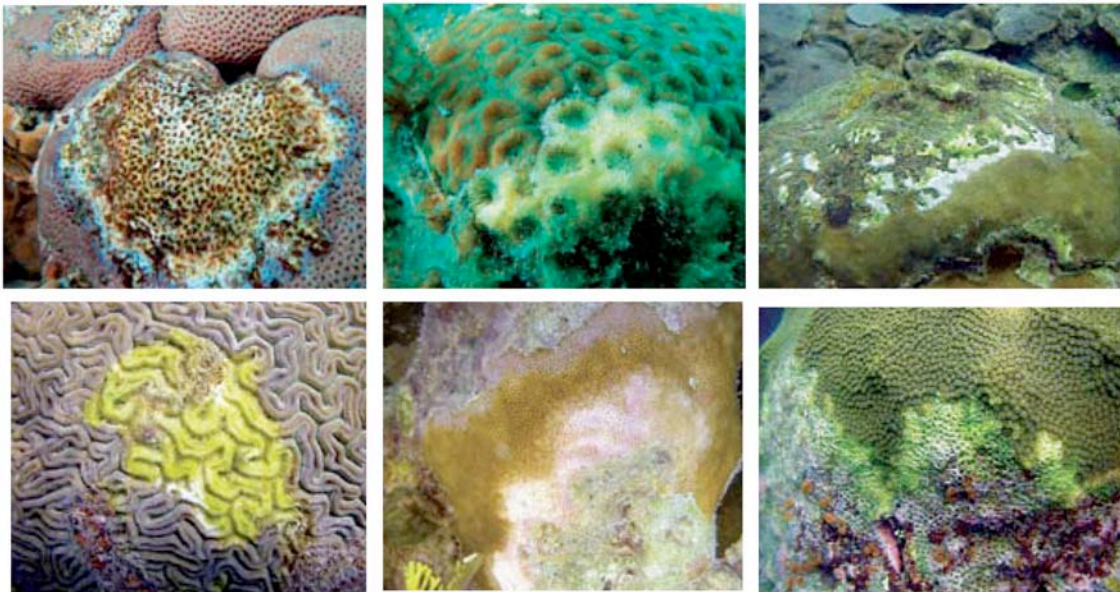


Figura 9. Tomada de Underwater Cards for Assessing Coral Health on Caribbean Reefs, 2008. Lesiones por salud comprometida en corales duros.

3.5.4 Enfermedad de Puntos Oscuros (PO)

La enfermedad de puntos oscuros fue documentada a principios de 1990 en Colombia y actualmente afecta a todo el Caribe (Goreau *et al.* 1998, Cervino *et al.* 2001, Garzón-Ferreira *et al.* 2001, Gil-Agudelo & Garzón-Ferreira 2001, Weil *et al.* 2002), y se presenta en 16 especies de coral, comúnmente en *Siderastrea*, *Montastrea*, *Orbicella*, *Colpophyllia* y *Stephanocoenia* (CRTR, 2008). La enfermedad se caracteriza por presentar manchas oscuras, púrpura ó marrón (Fig. 10) de forma irregular en el tejido vivo, (Goreau *et al.* 1998). La enfermedad de PO puede estar asociada con necrosis de los tejidos y/o causando depresión de la superficie de la colonia (Cervino *et al.* 2001). Cuando se asocia con la pérdida de tejido, una macha puede expandirse en forma de un anillo oscuro que separa el tejido el esqueleto muerto del tejido vivo (Goreau *et al.* 1998). El agente causal de la enfermedad es desconocido (Sutherland, 2004).

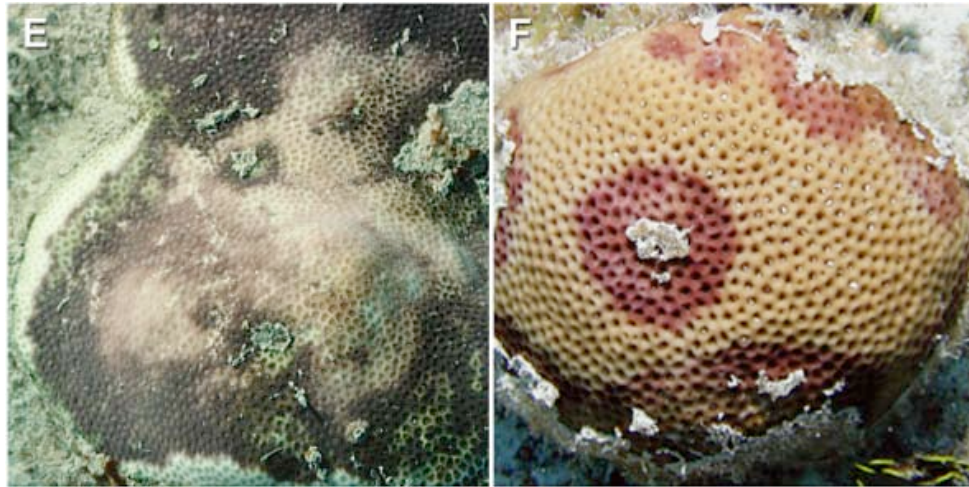


Figura 10. Tomada de Sutherland (2004). Enfermedad de Puntos oscuros (PO). E. Lesiones de la enfermedad de puntos negros en *Stephanocoenia michelinii*, F. Lesiones de PO en *Siderastrea Siderea*.

4. JUSTIFICACION

El estudio de las tasa de captura de sedimento y concentración de nutrientes en el arrecife y su relación con el estado de condición arrecifal ha sido poco explorado en los arrecifes de Quintana Roo.

Akumal presenta un acelerado desarrollo en la zona costera y capta una cantidad considerable de los turistas de la Riviera Maya, además cuenta con el establecimiento de asentamientos urbanos lo que provoca el cambio de uso de suelo, actividades de construcción y dragado, así como de actividades humanas propias del turismo como: el buceo, snorkel, pesca y navegación, y sobre todo, el deterioro de la calidad del agua por escorrentías, filtraciones y aguas negras (Barrera & Nahimira, 2004).

En este contexto es importante realizar una caracterización de las tasas de sedimentación (expresadas en términos de eficiencia de captura de sedimento) y la incidencia de enfermedades coralinas, ya que estas piezas de información permitirán tener una línea base que sirva como referencia al evaluar el estado de condición del arrecife.

5. HIPOTESIS

Los patrones espacio-temporales en la incidencia de enfermedades coralinas y cobertura de macroalgas estarán relacionados a las tasas de captura de sedimentos y calidad del agua.

6. OBJETIVO GENERAL

- Determinar y caracterizar la variación espacio-temporal de la tasa de captura de sedimento y nutrientes y explorar su efecto sobre la incidencia de enfermedades y cobertura de macroalgas como indicadores de degradación arrecifal y el estado de condición de la comunidad coralina en general.

7. OBJETIVOS PARTICULARES

- Determinar espacial y temporalmente la tasa de captura de sedimento en tres zonas arrecifales en temporada de secas, lluvias y nortes.
- Determinar espacial y temporalmente la concentración de nutrientes en tres zonas arrecifales para cada temporada climática.
- Determinar la incidencia de enfermedades coralinas en cada temporada climática.
- Cuantificar la mortalidad reciente de la comunidad coralina en cada temporada climática.
- Evaluar y comparar el estado de salud arrecifal en cada temporada climática.
- Explorar la relación entre la tasa de captura de sedimentación definida para cada zona y sector del arrecife y nutrientes con el estado de condición de las colonias coralinas.

8. MATERIALES Y MÉTODOS

8.1 Área de estudio

La región del Caribe Mexicano presenta un relieve muy escaso y se caracteriza por la ausencia de ríos superficiales, resultado de la naturaleza Kárstica del terreno, característico de la Península de Yucatán. La acumulación de aguas pluviales en la matriz rocosa, ocasiona una diferencia de niveles hidrostáticos que determina un flujo subterráneo de tierra al mar. El promedio anual de descarga de agua subterránea en la Península de Yucatán, por encima de los 20° de Latitud Norte, se ha estimado en 8.6 millones de m³ por km de costa al año (INE, 2000). En Akumal, cada día se vierten al mar más de 30 mil galones de agua contaminada con materia fecal procedentes de fosas sépticas (Lang & Shaw, 1997).

El clima en la región es cálido, subhúmedo con temporadas de lluvia marcadas; corresponde a un clima intermedio entre los tipos Aw1(x') (i') g y el Aw2" (i). La temperatura del aire promedio anual es de 31.2 °C. La temperatura máxima ronda alrededor de 32.3°C en el verano y la mínima de 26.6 °C en el invierno (SMN, 2012). Se reconocen tres periodos climáticos con relación a la dirección y velocidad de las corrientes, intensidad del viento, temperatura ambiental, y precipitación pluvial: 1) época de secas (febrero- mayo), 2) época de lluvias (junio a septiembre) y 3) época de “nortes” con lluvias ocasionales de octubre- febrero) (Díaz-Ruiz *et al.* 2000a y b, 2002). Los vientos dominantes son los alisios y se presentan de febrero a julio, provenientes del sureste con velocidades de 10 km/hr en promedio y hasta 30 km/hr durante perturbaciones tropicales. Durante los meses de invierno se presentan vientos del norte, los cuales pueden alcanzar velocidades entre 80 a 90 km/hr lo que hace descender la temperatura local considerablemente, provocando lluvias, grandes oleajes y marejadas. A su vez, las costas de Quintana Roo presentan un alto grado de incidencia de fenómenos meteorológicos de distintos tipos e intensidades. Debido a su ubicación geográfica esta zona es la de mayor concurrencia de huracanes del país. Estos meteoros se generan de junio a noviembre, siendo agosto y septiembre los meses con más alta presencia (CONANP, 2007).

La corriente oceánica principal es el ramal de la corriente de Yucatán, que fluye paralela al borde de la plataforma continental en dirección al Norte, con velocidades máximas de 4 a 5 nudos. La circulación del agua presenta un flujo neto de sur a norte con una dominancia en dirección norte-

noroeste y sur-sureste. El régimen de mareas en el área corresponde al tipo mixto semidiurno, de baja amplitud (promedio entre 10 y 20 cm). Las olas son generadas por los vientos alisios. Durante la época de nortes el conjunto de vientos N-NO y SE genera un oleaje considerable. En la laguna arrecifal las olas son bajas ya que la barrera arrecifal funciona como un eficiente disipador de la energía del oleaje; se ha llegado a medir una altura de 0.14 m en la zona de playa y un periodo de aproximadamente 2 segundos (INE, 2000).

El sistema arrecifal de Akumal se localiza en la costa oriental de la Península de Yucatán frente al Mar Caribe. Se ubica entre los 20°24' latitud norte y 87°19' longitud oeste, en el estado de Quintana Roo (Fig. 11). Forma parte del sistema de arrecifes bordeantes de Quintana Roo (Garza-Pérez, 2004) y tiene una longitud aproximada de 7 km cubriendo un área de 33.25 km².

De acuerdo a Moore *et al.* (1992), tres tipos de agua se encuentran en las regiones alrededor de Akumal. En primer lugar el agua dulce que proviene de la lluvia que se infiltra a través de las aberturas y canales en el lecho de piedra caliza, convirtiéndose en el agua subterránea (Hanshaw y Back, 1980). Con el tiempo, el agua se ha disuelto en una red de canales que transportan el agua subterránea al mar desde las profundidades de la Península de Yucatán. El agua dulce tiene una temperatura de entre 26 y 27 grados centígrados (°C), y un contenido de oxígeno disuelto entre 0 y 50 por ciento de saturación de la zona costera. El segundo tipo de agua que se encuentra en el subsuelo es el agua de mar. El agua salobre es el tercer tipo de agua encontrado a lo largo de la costa. Esta agua se deriva principalmente por la mezcla de agua de mar y de agua dulce (Back *et al.*, 1979; Moore *et al.* 1992).

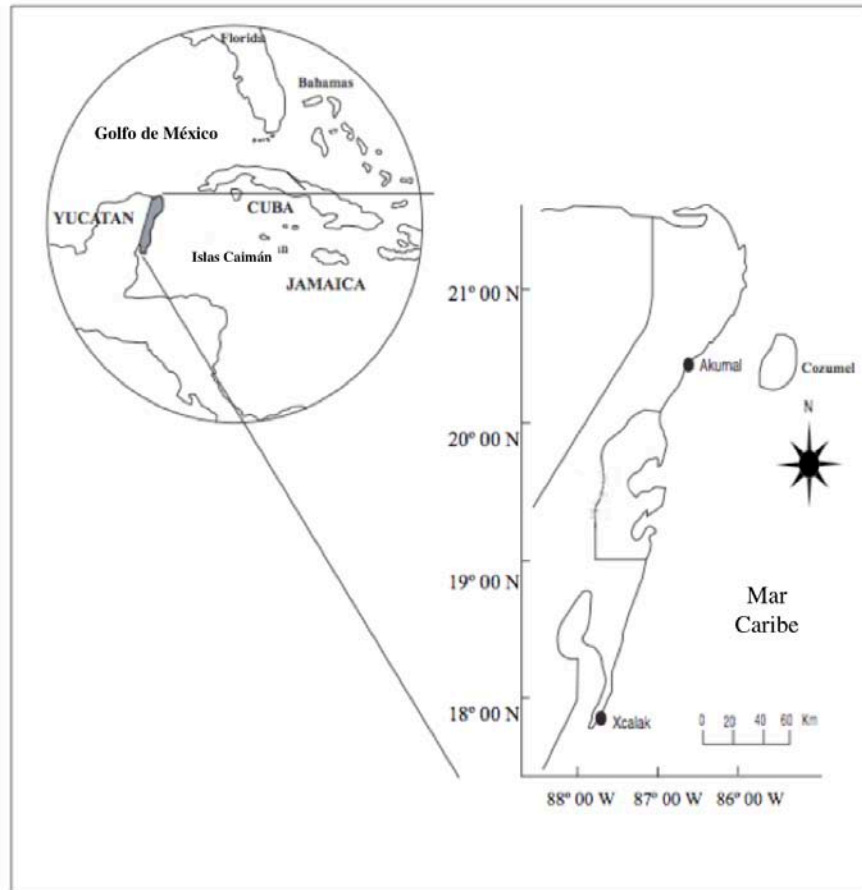


Figura. 11 Ubicación de Akumal, Quintana Roo (imagen modificada de Lang, 2003).

El sistema arrecifal de Akumal está constituido por tres principales áreas arrecifales, las cuales varían en tamaño, distancia de la línea de costa (800-3500 m), complejidad coralina, vientos predominantes (E-SE) y circulación del agua (flujo neto S-N). La Bahía de Akumal tiene aproximadamente 4 km. de longitud de 100 a 800 m de la línea de costa y una profundidad promedio de 3.5 m, presenta influencia marina, arena media a muy gruesa, de mal clasificada a bien clasificada, simétricos hasta muy simétricos hacia gruesos y mesocúrticos (Márquez-García, 2002) y grandes extensiones de pastos marinos e importantes parches de coral aislados. La Bahía de Media Luna, con una longitud de 3.0 km., tiene de 500-3000 m, de ancho y profundidad máxima de 4.0 m, es una zona de fondo arenoso-rocoso con influencia marina, predominancia de arenas gruesas moderadamente clasificadas, asimétricos y mesocúrticos (Márquez-García, 2002). La laguna de Yalkú tiene una longitud promedio de 800 m, y una profundidad promedio menor a los 6 m, se caracteriza por la presencia de áreas rocosas cubiertas de algas y comunidades

coralinas (Díaz-Ruiz *et al.* 2001b, Díaz-Ruiz *et al.* 2002, Cano-Quiroga 2004) y aportes de agua dulce; de fondo blando, arena fina a gruesa mal clasificada, asimétrica hacia gruesos mesocúrticos (Márquez-García, 2002).

Bahía Príncipe cuenta con una cresta arrecifal conspicua con algunos quebrados y su profundidad oscila entre los 0.5 a 4 metros, cuenta con extensos parches arrecifales en las puntas norte y sur y el tamaño de grano es grueso.

8.1.2 Diseño Muestral

El área de estudio se dividió en cuatro zonas asociadas a áreas identificadas con influencia de filtraciones de agua dulce desde el manto freático, representadas por cuatro transectos perpendiculares a la costa (Fig.12). En cada transecto se colocaron tres trampas de captura de sedimento. El posicionamiento de las trampas a lo largo de los transectos se definió de acuerdo a la zonación arrecifal de Akumal, que está relacionada al gradiente batimétrico y a la distancia desde la costa (Tabla 2). El muestreo comprende desde abril 2013 al mes de junio del 2014.

Red de Trampas de Sedimiento Akumal 2013

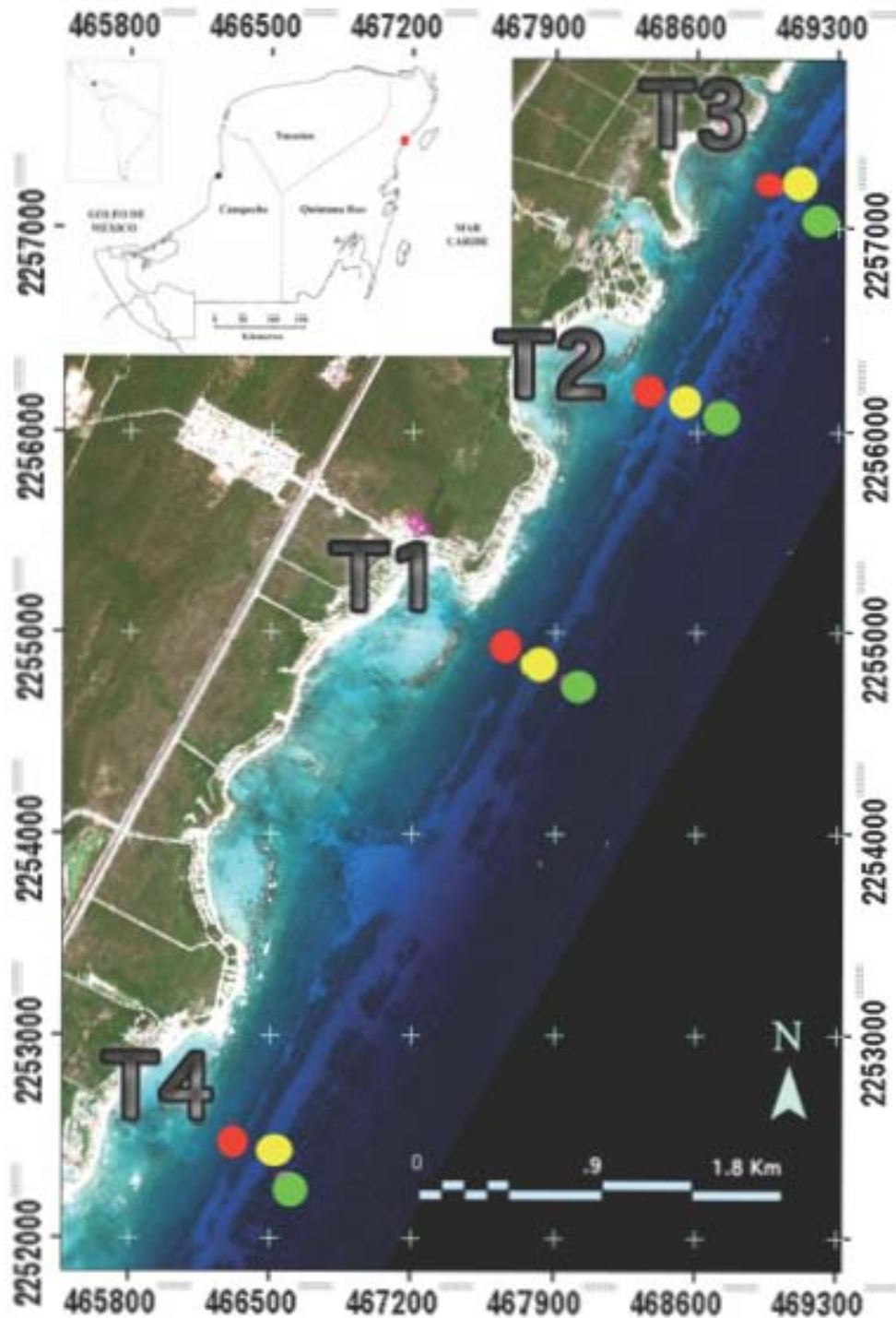


Figura 12. Mapa de los sitios de las trampas de sedimento. La zona de transición (ZT) representada con puntos rojos presenta un rango de profundidad de 8.2 a 10.3 metros. El frente arrecifal (F) en puntos amarillos presenta una rango de profundidad de 10.9 a 16.4 metros y la pendiente arrecifal (P) en puntos verdes presenta una profundidad de 15.5 a 20.1 metros.

8.2 Trabajo en Campo

8.2.1 Trampas de Sedimento

Con base en el diseño de Storlazzi, (2004) y Gardner (1980ab) se diseñaron trampas de sedimentos. Éstas constan de 6 replicas o tubos de PVC de 45 cm de alto (L) por 2.5" de diámetro de la boca (D), el diseño de la trampa coloca la boca de los tubos a una distancia del sustrato (Z) de 110 cm (Fig. 13A), con lo anterior se evitó que partículas resuspendidas del fondo entraran dentro de la trampa causando una sobreestimación de la tasa de sedimentación. Para evitar la intrusión de organismos como peces e invertebrados se colocó cerca a la boca de la trampa una malla de PVC de .5mm de haz de luz, para disminuir la turbulencia que es generada al chocar el flujo de agua contra la trampa, generando remolinos (eddies) turbulentos y que pueden influir sobre las partículas que recién están cayendo en la trampa pudiendo ser removidas, (Fig.13B).

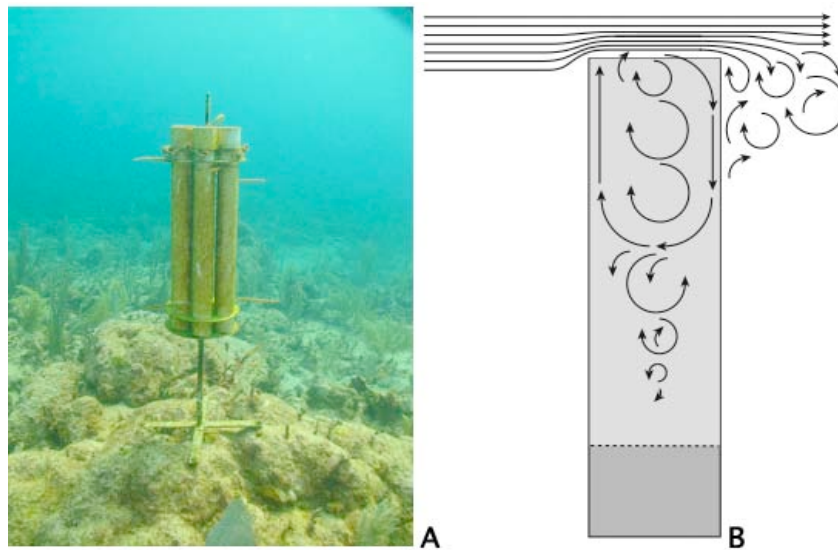


Figura. 13. (A) Trampa de sedimento colocada a 110 cm del sustrato Foto. Garza-Pérez (2013). (B) Diseño de Storlazzi (2004) donde se muestra la turbulencia generada por el flujo de agua en el tubo de PVC de la trampa de sedimento.

Las trampas de captura de sedimento se cambiaron mensualmente durante el tiempo de muestreo. Cada trampa permaneció sumergida entre 29 y 31 días.



Figura 14. Cambio de trampas de sedimento mensual en el arrecife de Akumal, Q.Roo. Foto. Garza Pérez (2013).

8.2.2 Caracterización de las comunidades arrecifales

La caracterización arrecifal se puede llevar a cabo con diferentes métodos los cuales realizan descripciones visuales del sistema, se identifican la mayor cantidad de organismos bentónicos del sitio obteniendo un listado taxonómico, en el caso de los corales hasta el nivel de especie. El método de videotransecto (Fig. 15) permite respaldar y visualizar repetidas veces la información que de estos se obtienen, además de que no alteran el sistema arrecifal (García-Salgado M, 2006, Aronson *et al.*, 1997). A partir de una caracterización de las comunidades arrecifales se pueden estimar la mayoría de los indicadores para evaluar su estado de condición. Para caracterizar la comunidad bentónica es necesario obtener el porcentaje de cobertura de componentes vivos y no

vivos, de los grupos funcionales y del sustrato (Tabla 2). La densidad de colonias de coral, su condición así como su abundancia, son datos que nos permiten caracterizar la comunidad arrecifal (Almada-Villela, 2003; McField y Kramer, 2007).



Figura 15. Método de filmación de videotranssectos (Foto Garza-Pérez, 2013)

Tabla 2. Grupos Funcionales para Identificación de Organismos Arrecifales Bentónicos y Sustratos Inertes (Garza Pérez, 2004).

Grupo Funcional: Coral Escleractinio (Coral Duro)	
Ramoso/ Ramificado	Género <i>Acropora</i> , <i>A. palmata</i> , <i>A. cervicornis</i> , <i>A. prolifera</i> .
Digitiforme	Especies Comunes: <i>Madracis decactis</i> , <i>M. fromosa</i> , <i>M. auretenra</i> , <i>Porites porites</i> formas: <i>porites</i> , <i>divaricata</i> y <i>furcata</i> Especies raras: <i>Cladocora arbuscula</i> , <i>Oculina robusta</i> , <i>O. tenella</i> , <i>O. diffusa</i> .
Masivo/Domo	Género <i>Montastraea</i> , <i>M. annularis</i> , <i>M. cavernosa</i> , <i>M. franksi</i> , <i>M. faveolata</i> , <i>Solenastrea bournoni</i> , <i>S. hyades</i> , <i>Siderastrea siderea</i> , <i>Stephanocoenia intersepta</i> , <i>Porites astreoides</i>
Incrustante	Especies Comunes: <i>Dichocoenia stokesii</i> , <i>Favia fragum</i> , <i>Siderastrea radians</i> , <i>Undaria agaricites</i> formas <i>agaricites</i> y <i>purpurea</i> ó <i>unifacial</i> , <i>Undaria humilis</i> , <i>Madracis pharensis</i> , <i>Madracis senaria</i> , Especies Raras: <i>Porites colonensis</i>
Cerebro	Género <i>Diploria</i> , <i>D. strigosa</i> , <i>D. clivosa</i> , <i>D. labrynthiformis</i> , <i>Colpophyllia nathans</i> , <i>Isophyllia sinuosa</i> , <i>Isophyllastrea rigida</i> , <i>Meandrina meandrites</i> , <i>M. jacksoni</i> , <i>Manicina areolata</i> .
Folioso	<i>Undaria tenuifolia</i> , <i>Undaria agaricites</i> forma <i>carinata</i> ó <i>bifacial</i> , <i>A. fragilis</i> , <i>A. lamarcki</i> , <i>A. grahamae</i> , <i>A. undata</i> , <i>Helioseris cucullata</i> .
Carnoso/ Rugoso	Género <i>Mycetophyllia</i> , Especies comunes: <i>M. aliciae</i> , <i>M. ferox</i> , <i>M. lamarckiana</i> , Especie rara: <i>M. reesi</i> .
Disco / Plato	Género <i>Scolymia</i>
Copa/Flor	<i>Eusmilia fastigiata</i> , <i>Mussa angulosa</i> .
Pilar	<i>Dendrogyra cylindrus</i>
Grupo Funcional: (Hidrocorales)	
Coral de Fuego	Genero <i>Millepora</i> , Especies comunes: <i>M. alcicornis</i> , <i>M. complanata</i> Especie rara: <i>M. squarrosa</i>
Coral Encaje	<i>Stylaster roseus</i>

Grupo Funcional: Octocorales (Corales Blandos)	
Digitiforme	<i>Briareum asbestinum</i>
Ramoso/ Arbustivo	Género <i>Pseudoplexaura</i> , Género <i>Muricea</i> , Género <i>Plexaurella</i> . Especies comunes: <i>Plexaura homomalla</i> , <i>Plexaura flexuosa</i> , <i>Eunicea succinea</i> , <i>Eunicea mammosa</i> , <i>Iciligorgia schrammi</i> , <i>Muricea muricata</i> , <i>M. pinnata</i> , <i>Pterogorgia guadalupensis</i> , <i>P. anceps</i> Especies raras: <i>E. calyculata</i> , <i>E. fusca</i> , <i>M. elongata</i> , <i>M. laxa</i> , <i>Pterogorgia citrina</i> .
Pluma	Género <i>Pseudeptergorgia</i> , <i>P.americana</i> , <i>P. bipinnata</i> , <i>Muriceopsis flavida</i>
Abanico	<i>Gorgonia flabellum</i> , <i>G. ventalina</i> , <i>G. marieae</i> .
Incrustante	<i>Erythropodium caribaeorum</i> , <i>Briareum asbestinum</i> (forma <i>incrustante</i>)
Grupo Funcional: Esponjas	
Incrustantes	Género <i>Cliona langae</i> , <i>C. varians</i> , <i>Calix podatypa</i> , <i>Neofibularia nolintangere</i> , <i>Ectyoplasia ferox</i> , <i>Siponodictyon coralliphagum</i> .
Columna	Especies comunes: <i>Aplysina cauliformis</i> , <i>Iotrochota birtulata</i> Especie rara: <i>Aplysina fulva</i>
Tube	Especies comunes: <i>Aplysina fistularis</i> , <i>A. archeri</i> , <i>Pseudocerata crassa</i> , <i>Agelas conifera</i> , <i>Verongula reiswigi</i> . Especie rara: <i>Aplysina lacunosa</i> ,
Vaso	Especies comunes: <i>Callyspongia vaginalis</i> , <i>C. plicifera</i> , <i>Niphates digitalis</i> , <i>Cribochalina vasculum</i> , <i>Geodia neptuni</i> , <i>Xetospongia muta</i> . Especie rara: <i>Verongula gigantea</i> ,
Semiesférica	Especies comunes: <i>Ircinia strobilina</i> , <i>I. felix</i> Especie rara: <i>Speciospongia vesparium</i> ,
Grupo Funcional: Algas	
Macroalgas Pardas	Géneros <i>Dyctiota</i> , <i>Padina</i> , <i>Turbinaria</i> , <i>Sargassum</i> , <i>Lobophora variegata</i> , <i>Styopodium zonale</i> .
Macroalgas Verdes	Géneros <i>Avranvillea</i> , <i>Penicillus</i> , <i>Caulerpa</i> , <i>Valonia</i> , <i>Udotea</i> , <i>Acetabularia</i> , <i>Ventricaria</i> .

Grupo Funcional: Algas	
Calcáreas Articuladas	Género <i>Halimeda</i>
Filamentosas	Parches o tapetes conspicuos de algas del Phylum <i>Cyanophyta</i> , Géneros <i>Gelidiella</i> , <i>Ceramium</i> , <i>Polysiphonia</i> , <i>Wrangelia</i> (Rodofitas) Géneros <i>Feldmannia</i> , <i>Sphacelaria</i> (Feofitas)
Calcáreas Rojas	Géneros <i>Amphiroa</i> , <i>Galaxaura</i> , <i>Jania</i> , <i>Neogoniolithon</i> .
Macroalgas Rojas	Géneros <i>Asparagopsis</i> , <i>Chondria</i> , <i>Dasya</i> , <i>Eucheuma</i> , <i>Gracilaria</i> , <i>Halymenia</i> ,
Coralinas / Incrustantes	Phyllum <i>Rhodophyta</i> , Géneros <i>Galaxaura</i> , <i>Jania</i> , <i>Amphiroa</i> , <i>Porolithon</i>
Grupo Funcional: Pastos Marinos	
Pastos Marinos	<i>Thalassia testudinum</i> , <i>Syringodium filiforme</i> , Género <i>Halophila</i> , <i>Halodule wrightii</i> .
Grupo Funcional: Zoántidos y Tunicados	
Zoántidos	<i>Playthoa caribeourm</i> , <i>P. grandis</i> , <i>Zoanthus pulchellus</i> , <i>Epizoanthus cutressi</i> , Género <i>Parazoanthus</i>
Tunicados	<i>Didemnum vanderhorsti</i> , <i>Trididemnum solidum</i> , Géneros <i>Clavelina</i> , <i>Eudistoma</i> , <i>Botrylloides</i> , <i>Distalpia</i> , entre otros.
Sustratos Inertes	
Arena	Arena gruesa en grandes camas o acumulada en grietas o hendiduras.
Sedimento	Sedimento calcáreo fino (arcillas y lodos) en grandes camas o acumulado en grietas o hendiduras. En zonas de alta sedimentación puede llegar a cubrir substratos rocosos.
Pavimento Calcáreo / Roca	Substrato desnudo o relativamente desnudo de carbonato de calcio y/o colonias coralinas muertas erectas, puede presentar una ligera película de microalgas y/o sedimento.

8.2.3 Toma de Muestras Para Análisis de Calidad del Agua

Las muestras de agua de fondo fueron colectadas mensualmente. Se utilizó una botella tipo Corning de 50 ml y se llenó de agua de fondo en cada estación donde había una trampa. Se tomaron dos muestras por cada estación. Simultáneamente se colectó una muestra de agua para medir parámetros fisicoquímicos *in situ* con una sonda multiparamétrica ISY modelo Pro 2030. Las muestras se congelaron *in situ*.

Para el análisis de las muestras de agua en laboratorio (Fig. 16), estas se descongelaron y se filtraron la mitad de las muestras con filtros de microfibra de vidrio Whatman de 47mm. A la mitad de las muestras se les aplicó análisis de especies del nitrógeno (amonio, nitrito, nitratos) y fosfatos. Con la otra mitad de las muestras se aplicaron análisis de Nitrógeno (N) y Fósforo (F) Total y se midió el pH.



Figura 16. a) Procesamiento de las muestras de agua en laboratorio, b) Filtrado de las muestras, preparación de reactivos y c) curva de calibración para análisis de N y F.

El nitrógeno amoniacal se analizó con el método de la sal de fenol (4500-NH₃ D), el cual se basa en la reacción del amoníaco, hipoclorito y fenol, catalizada por una sal manganosa, para formar un compuesto azul intenso (indofenol) que se determina en el espectrofotómetro a 630 nm. Los nitritos se procesaron con la técnica colorimétrica (4500-NO₂-B), en la cual se desarrolla un colorante azo púrpura rojizo, producido a pH 2.0-2.5, por acoplamiento de sulfanilamida. La intensidad del color se lee a 543 nm. Los nitratos se determinaron como nitritos previa reducción en una columna de cadmio. Los ortofosfatos se evaluaron con el método del ácido ascórbico (4500-PE), que se fundamenta en la reacción del molibdato de amonio y el tartrato antimonil potásico, en un medio ácido con los ortofosfatos para formar un ácido heteropoliácido fosfomolibdico que se reduce a azul de molibdeno, de color intenso por el ácido ascórbico y se lee a 880 nm (APHA, 1989). Para determinar Nitrógeno y Fósforo total, se utilizó la misma técnica de determinación de nitritos y fosfatos. Las muestras pasaron previamente por un proceso de digestión hasta alcanzar una temperatura de 121° a 10 libras de presión por 30 minutos.

8.3 Trabajo en laboratorio

8.3.1 Procesamiento del Sedimento

El sedimento de las trampas se extrajo de los tubos de PVC en bolsas ziploc, las cuales se etiquetaron y congelaron. Posteriormente el sedimento fue procesado, secado y pesado en laboratorio (Fig. 17).



Figura 17. a y b) Procesamiento y extracción y empaquetado de sedimento *in situ*, c y d) secado, pesado y empaquetado de los sedimentos en laboratorio.

8.3.2 Método para estimar la tasa de captura de sedimentación

La tasa de captura de sedimentación (m_d), se calculó mediante la medición de la masa total de los sedimentos en la trampa (M_{SDT}), dividida por el área de la boca trampa (A) por la duración del período de sumersión (t) (Storlazzi, 2009).

$$m_d = \frac{M - M_{SDT}}{At}$$

Donde A es el área del vaso receptor, constante e igual a 20.25 cm y t es el número de días que la trampa permaneció sumergida.

8.3.3 Método para la caracterización de las comunidades arrecifales

Los videotransectos de cada estación se analizaron detalladamente con una plantilla transparente de 13 puntos marcados y distribuidos de manera homogénea colocada sobre la pantalla del monitor (Fig. 18). Se observaron 40 cuadros de video (pausas) a intervalos regulares a lo largo de los 50m del videotransecto, con un total de 520 puntos registrados por cada videotransecto, analizándose un área aproximada de 12m². Este método ha sido probado ser suficiente para caracterizar cualquier ambiente bentónico (Aronson y Swanson, 1997; Osborne y Oxley, 1997; Membrillo-Venegas, 1999; Hernández-Landa, 2004; Garza Pérez, 2004; Acosta-González, 2005). La mayoría de los organismos bentónicos se identificaron a nivel de grandes grupos taxonómicos. Sin embargo, los corales escleractíneos e hidrocorales se identificaron al nivel taxonómico de especie. De igual manera se identificaron las enfermedades presentes en las colonias coralinas.



Figura 18. Ejemplo de la disposición sistemática de los puntos en el monitor de alta resolución para la identificación de cobertura en cada cuadro a lo largo de los videotransectos.

8.3.4 Incidencia de Enfermedades coralinas

Para evaluar las enfermedades coralinas presentes se tomaron datos *in situ* sobre las lesiones y enfermedades observadas en los videotransectos en cada una de las 12 estaciones definidas, los cuales fueron evaluados cuadro por cuadro en un monitor de alta resolución y determinando las enfermedades presentes en base a la guía modificada del Coral Disease Handbook de Raymundo *et al.* (2008) y Underwater Cards for Assessing Coral Health on Caribbean Reefs, (2008).

La incidencia total se estimó sumando el número total de colonias por especie por enfermedad, dividido entre el número total de colonias registradas para todas las estaciones. De la misma manera se estimó la incidencia de enfermedades para cada zona y transecto del arrecife y se obtuvieron el promedio y la desviación estándar.

La incidencia de enfermedades se contabiliza por la presencia de lesiones asociadas a enfermedades en el tejido coralino a nivel de colonias, es decir si una colonia presenta una o varias lesiones, se registra como una colonia afectada.

8.3.5 Análisis Multivariados

Para medir la relación entre las variables ambientales se realizó un Análisis de Redundancia utilizando el software CANOCO 4.5. El análisis de redundancia (RDA) es la extensión de la regresión múltiple para el modelo de datos de respuesta multivariada. El RDA fue propuesto por Rao (1964), sin embargo este análisis fue redescubierto por Wollenberg (1977). Redundancia es sinónimo de la varianza explicada. Este análisis es asimétrico por que: “Y” es la tabla de respuesta de las variables y, “X” es la tabla de las variables explicativas. Es decir que la ordenación de “Y” está limitando de alguna manera el resultado de la ordenación de los vectores, los cuales son combinaciones lineales de las variables en “X”. En este análisis cada vector de ordenación es una proyección unidimensional de la distribución de los objetos en un espacio que preserva las distancias euclidianas (Legendre & Legendre, 1998; Leps & Petr, 2003).

Con el fin de observar si existen diferencias entre las variables bióticas (coberturas bentónicas) y abióticas (tasa de captura de sedimento, nutrientes, incidencia de enfermedades) en las tres temporadas climáticas se realizó un análisis de escalamiento multidimensional no paramétrico (MDS) (Kruskal y Wish, 1978). El propósito del MDS es construir un mapa o configuraciones de las muestras, a partir de varias dimensiones específicas, y plasmado en dos dimensiones. La

interpretación se da en términos de valores relativos de similitud entre un grupo y otro. Dicha interpretación da la pauta para realizar una representación gráfica de las muestras, y el rango de similitud es sólo información usada por un MDS de ordenación exitoso. De tal manera que la escala de las distancias entre las muestras en el mapa coincide con el rango de correspondencia de similitud, tomado de la matriz de similitud triangular. El valor del estrés <0.05 es indicativo de una representación veraz sin posibilidad de interpretación errónea (una representación perfecta sería probablemente una con un estrés <0.01 dado que las iteraciones numéricas frecuentemente terminan cuando el estrés se reduce bajo este valor. Un estrés <0.1 corresponde a una buena interpretación sin posibilidad de error. Un estrés <0.2 todavía da una representación potencial y útil en dos dimensiones y finalmente un estrés >0.3 indica que los puntos están cercanos a ser arbitrariamente representados en dos dimensiones. Clarke y Warwick. (2001):

Se realizó un análisis de similitud (ANOSIM) para determinar la significancia estadística en el tiempo entre zonas arrecifales y las coberturas bentónicas, así como el número e incidencia de enfermedades para cada estación por mes de muestreo. Esta prueba se basa en permutaciones simples no-paramétricas aplicada a la matriz de similitud (Clarke y Gorley, 2006). El grado de diferencia se mide mediante el test estadístico R, la cual toma valores entre $-1 < R < 1$, cuando las muestras son similares entre ellas $R=1$, R se encuentra generalmente cerca del cero, cuando no hay diferencias, R se encuentra cerca de -1 cuando hay diferencias.

Finalmente, un análisis SIMPER de todos los indicadores fue empleado para reconocer las estaciones más importantes en términos de su aportación a los valores de similitud. Todos estos análisis se realizaron en el paquete estadístico PRIMER 6.0 (Clarke & Warwick, 1994).

9. RESULTADOS

9.1 Caracterización de las comunidades bentónicas

Durante el tiempo de muestreo que comprende de abril del 2013 a junio del 2014 se muestrearon 12 estaciones de las cuales se obtuvieron 84 videotransectos (uno por cada estación asociada a una trampa de sedimentos, 28 por cada una de las zonas arrecifales: Zona de transición, Frente arrecifal y Pendiente arrecifal. Los videotransectos se realizaron bimensualmente. En la tabla 3 se muestran la relación de los datos obtenidos en cada mes de muestreo, salvo en la temporada de nortes (noviembre a enero) donde las condiciones climáticas no fueron las optimas para salir a campo.

Tabla 3. Resumen de las muestras obtenidas durante el periodo de muestreo
TCS= Tasa de captura de sedimento, VIDEOS= Videotransectos, Aguas= muestras de agua de fondo marino y Paramétricos= Datos fisicoquímicos de agua *in situ*.

Año	Mes	TCS	Video	Agua	Paramétricos
2013	marzo				
2013	abril	x	x		
2013	mayo	x		x	x
2013	junio	x	x	x	
2013	julio	x		x	
2013	agosto	x	x	x	x
2013	septiembre	x		x	x
2013	octubre	x	x	x	x
2013	noviembre				
2013	diciembre				
2014	enero				
2014	febrero	x	x	x	x
2014	marzo	x	x	x	x
2014	abril				
2014	mayo	x	x	x	x
2014	junio	x	x	x	x
2014	julio				
2014	agosto	x	x	x	x

A través del análisis de los videotransectos por puntos se obtuvo el porcentaje de la cobertura bentónica así como de sustratos inertes.

Con un análisis continuo de los videos se obtuvieron número de colonias, y enfermedades presentes en corales pétreos, con estos datos se obtuvo la densidad, abundancia y riqueza coralina así como la incidencia de enfermedades coralinas.

Para obtener los resultados de las coberturas por temporada se utilizó el promedio de dos meses representativos para cada temporada de acuerdo a la disponibilidad de los videos: (abril 2013 y marzo 2014) para secas, (junio 2013 y agosto 2013) para lluvias y (octubre 2013 y febrero 2014) para nortes.

En promedio la cobertura del arrecife esta dominada por algas pardas y filamentosas para todas las temporadas, representando mas del 50% de la cobertura total (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentajes de cobertura promedio de grupos taxonómicos dominantes en un ciclo anual. CC= Cobertura Coralina y CA= Cobertura de Algas.

Zona	Profundidad(m)	CC %	Temporada de secas	Temporada de Lluvias	Temporada de Nortes
			CA %	CA %	CA %
ZT	8.5 a 10.3	4.13	60.9	65.3	55.9
F	10.9 a 14.9	12.50	72.8	71.2	69.5
P	15.5 a 19.8	10.77	76.4	73.1	72.6

9.1.1 Temporada de secas

En la zona de transición tres grupos funcionales fueron los más representativos, la cobertura de algas pardas fue el grupo que tuvo mayor cobertura con $38\% \pm 1.0$, sedimento con $18\% \pm 9.2$ y algas filamentosas con $14\% \pm 7.1$.

La cobertura de coral duro fue de $5\% \pm 1.3$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 65% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos funcionales registrados en la zona de transición arrecifal (Fig.19).

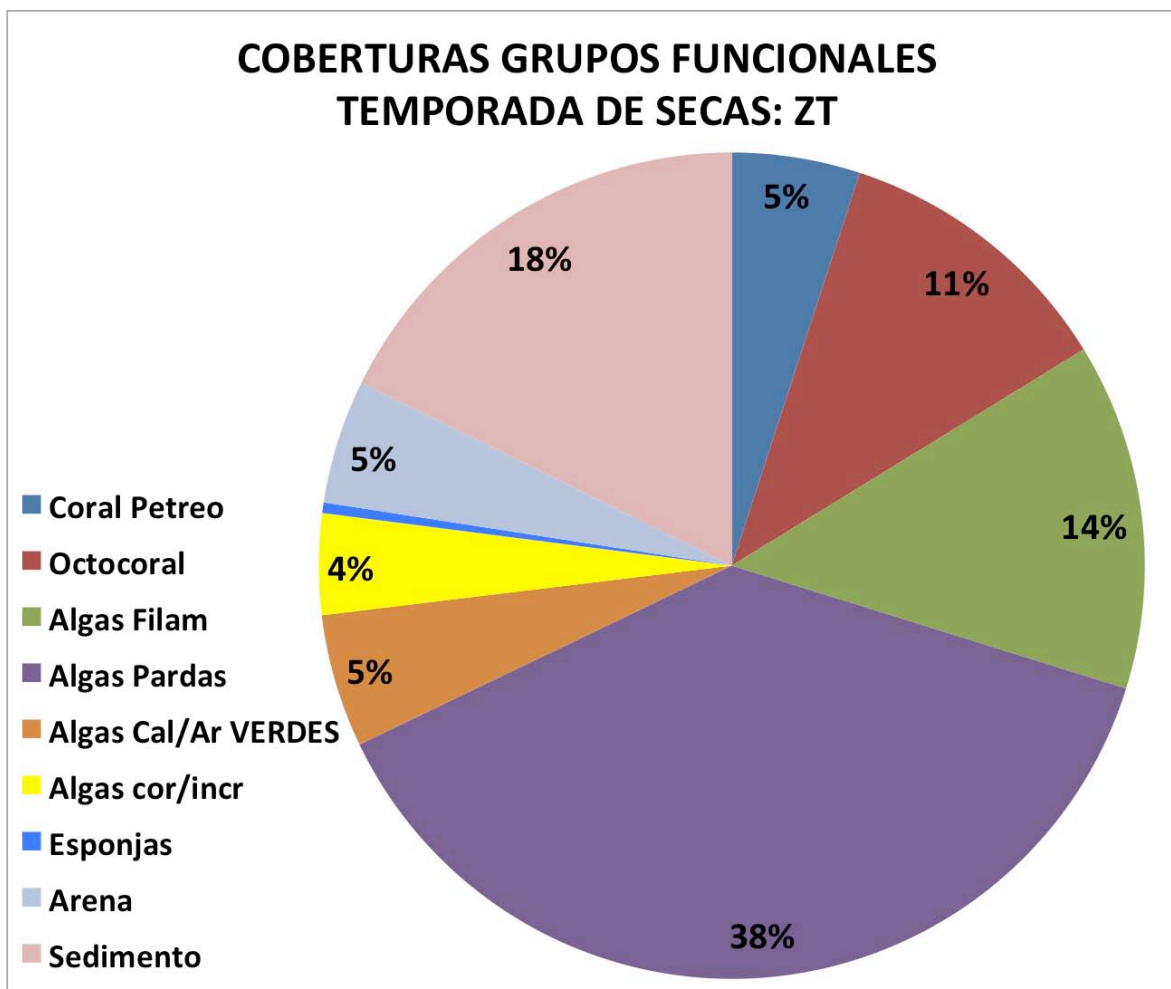


Figura 19. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona del frente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas pardas con $44\% \pm 25.3$, algas filamentosas con $19\% \pm 14.2$ y octocoral con $11.3\% \pm 0.4$.

La cobertura de coral duro fue de $7\% \pm 2.6$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 73% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 20).

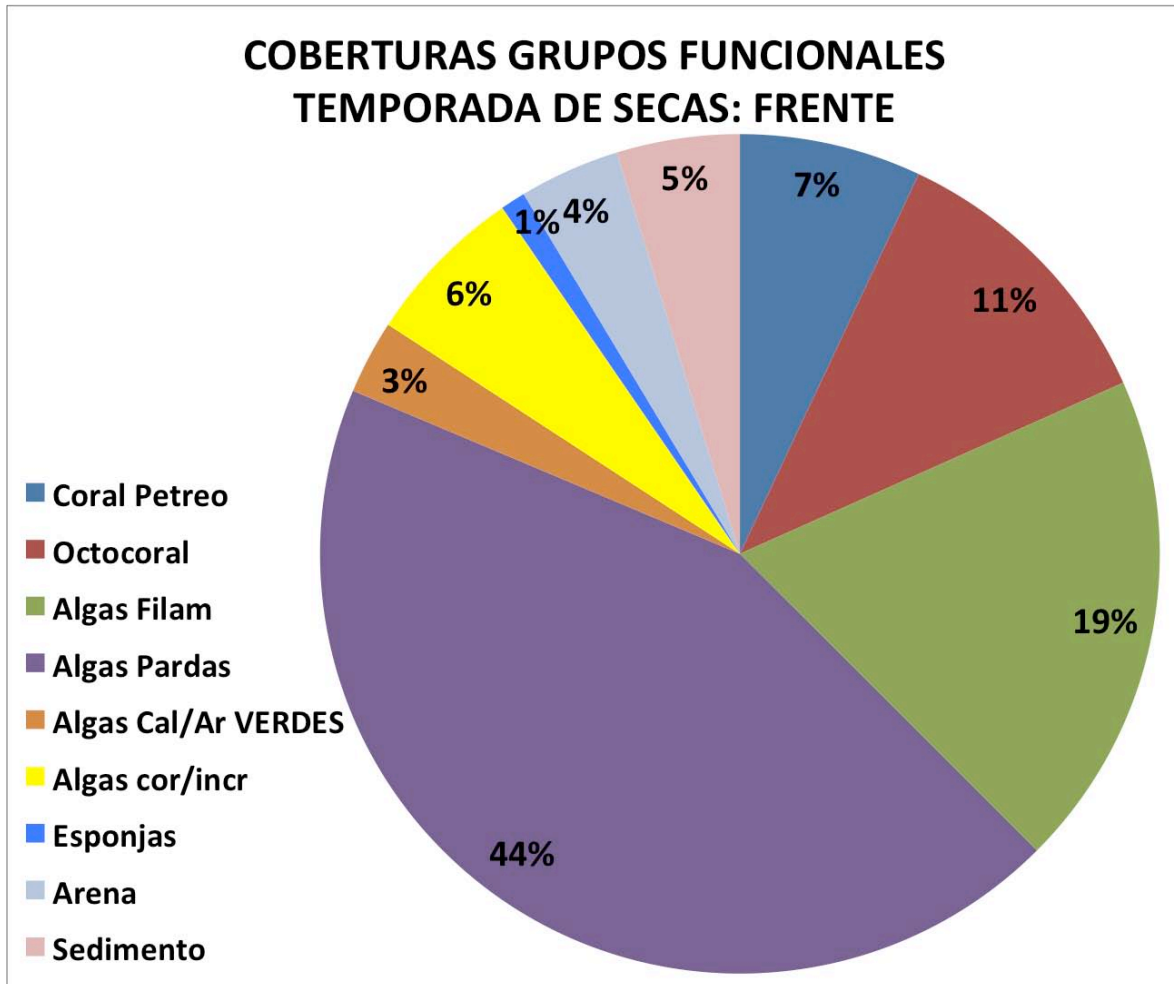


Figura 20. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de frente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona de la pendiente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas pardas con $55\% \pm 8.2$, algas filamentosas con $12.8\% \pm 4.7$ y octocoral con $14.3\% \pm 4.0$.

La cobertura de coral duro fue de $8.7\% \pm 1.3$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 76% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 21).

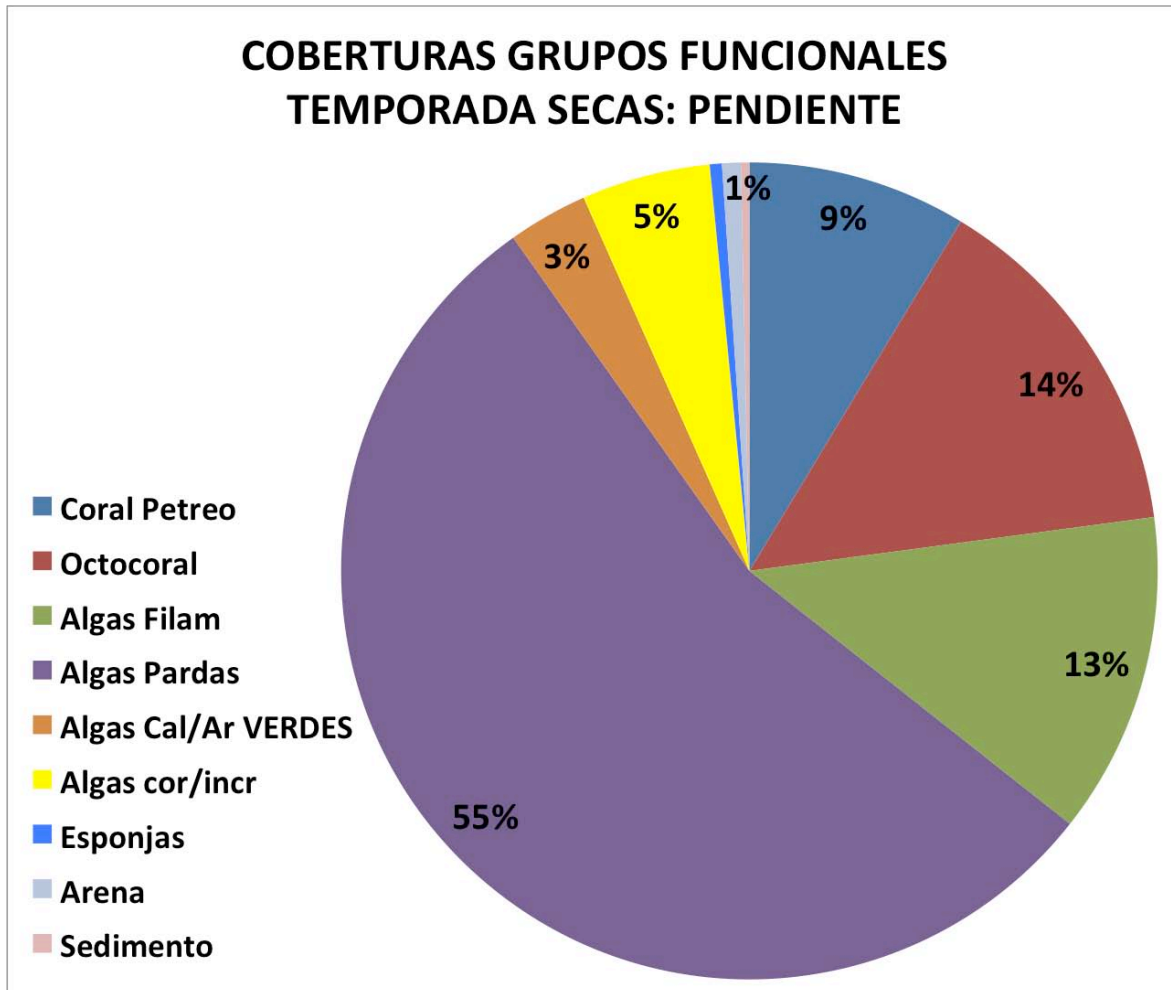


Figura 21. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de secas en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

9.1.2 Temporada de lluvias

En la zona de transición arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas filamentosas con $22\% \pm 3.7$, algas pardas con $19\% \pm 8.4$, y octocoral con $16\% \pm 2.7$.

La cobertura de coral duro fue de $5\% \pm 2.7$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 66% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 22).

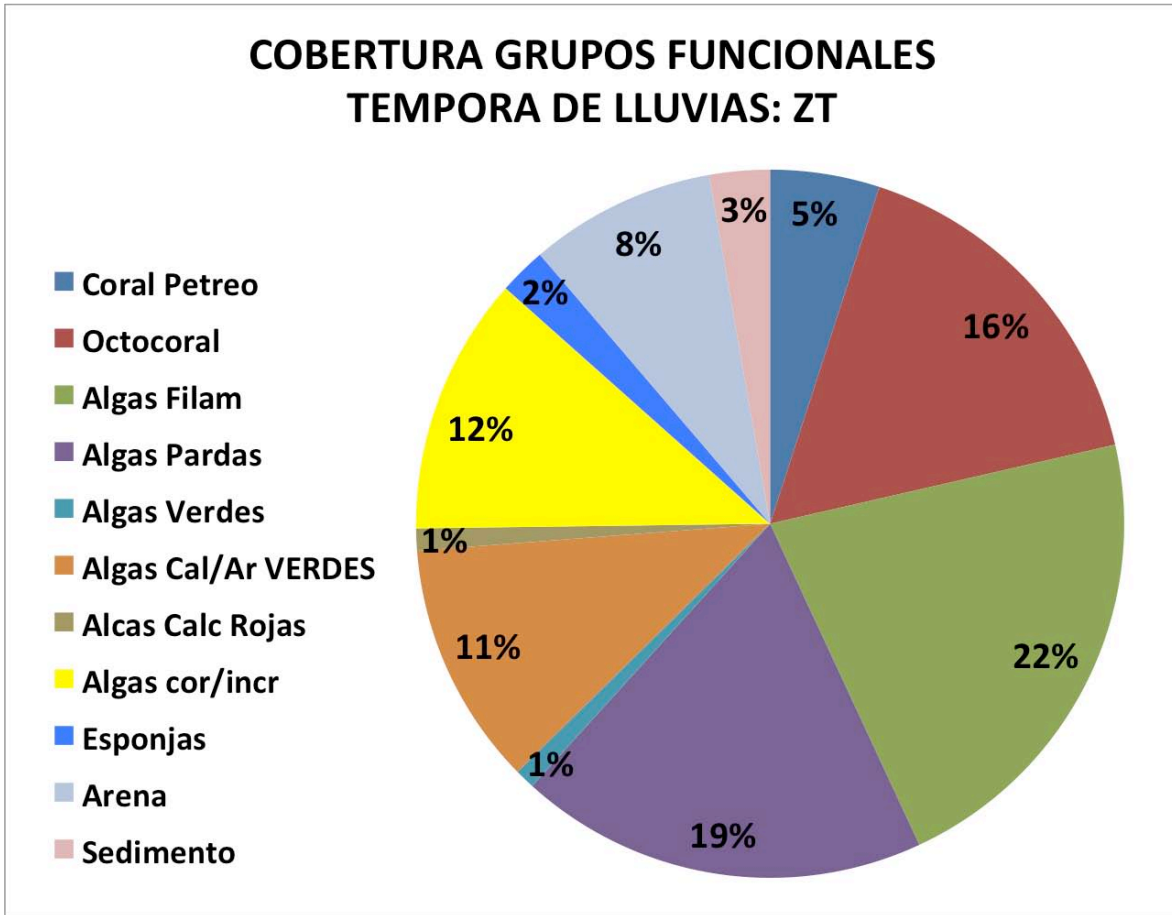


Figura 22. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona de frente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas pardas con 41 ± 23.4 , algas filamentosas con 19 ± 12.1 y octocoral con 16 ± 1.9 .

La cobertura de coral duro fue de 7 ± 3.7 . De manera conjunta el grupo de algas representó el 75% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 23).

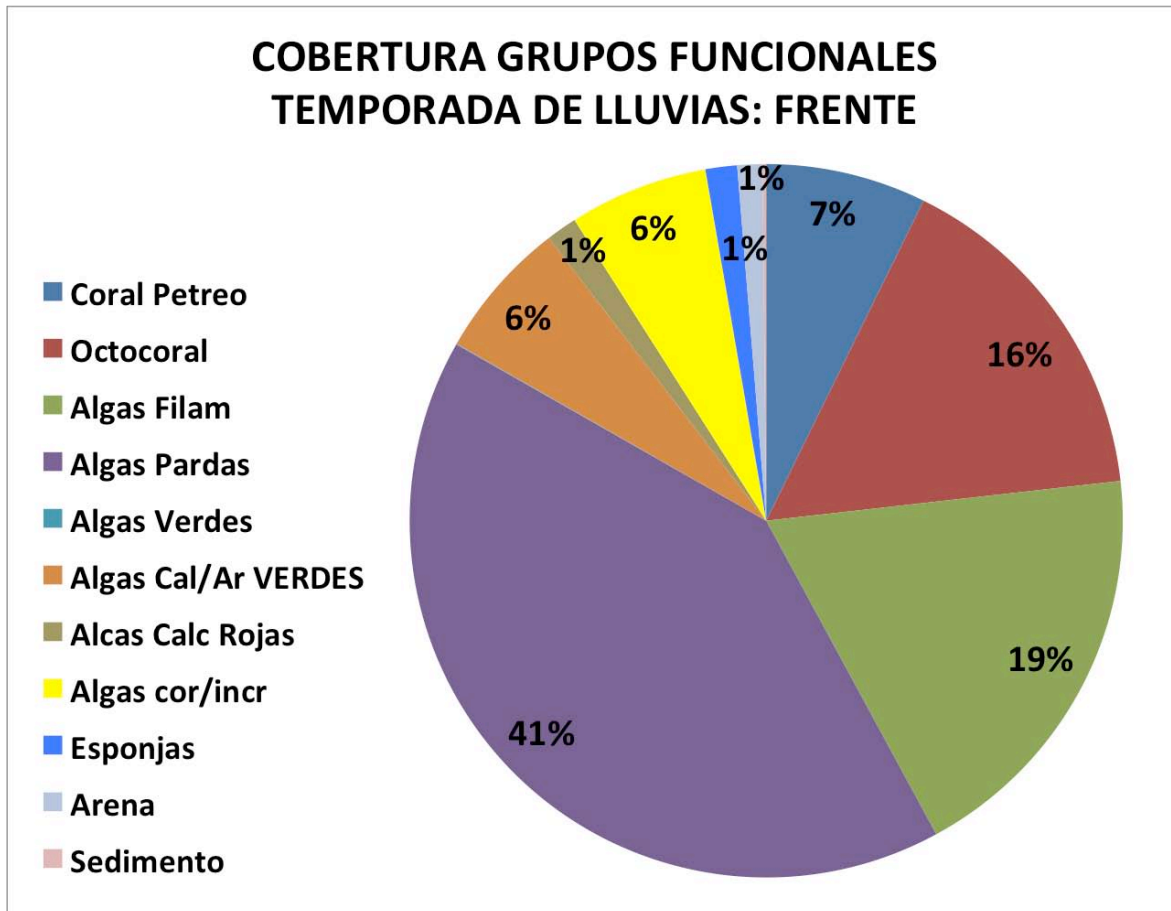


Figura 23. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de frente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona de pendiente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas pardas con $60\% \pm 5.5$ octocoral con $17\% \pm 2.3$ y algas coralinas incrustantes con $5\% \pm 3.2$.

La cobertura de coral duro fue de $9\% \pm 1.7$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 74% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 24).

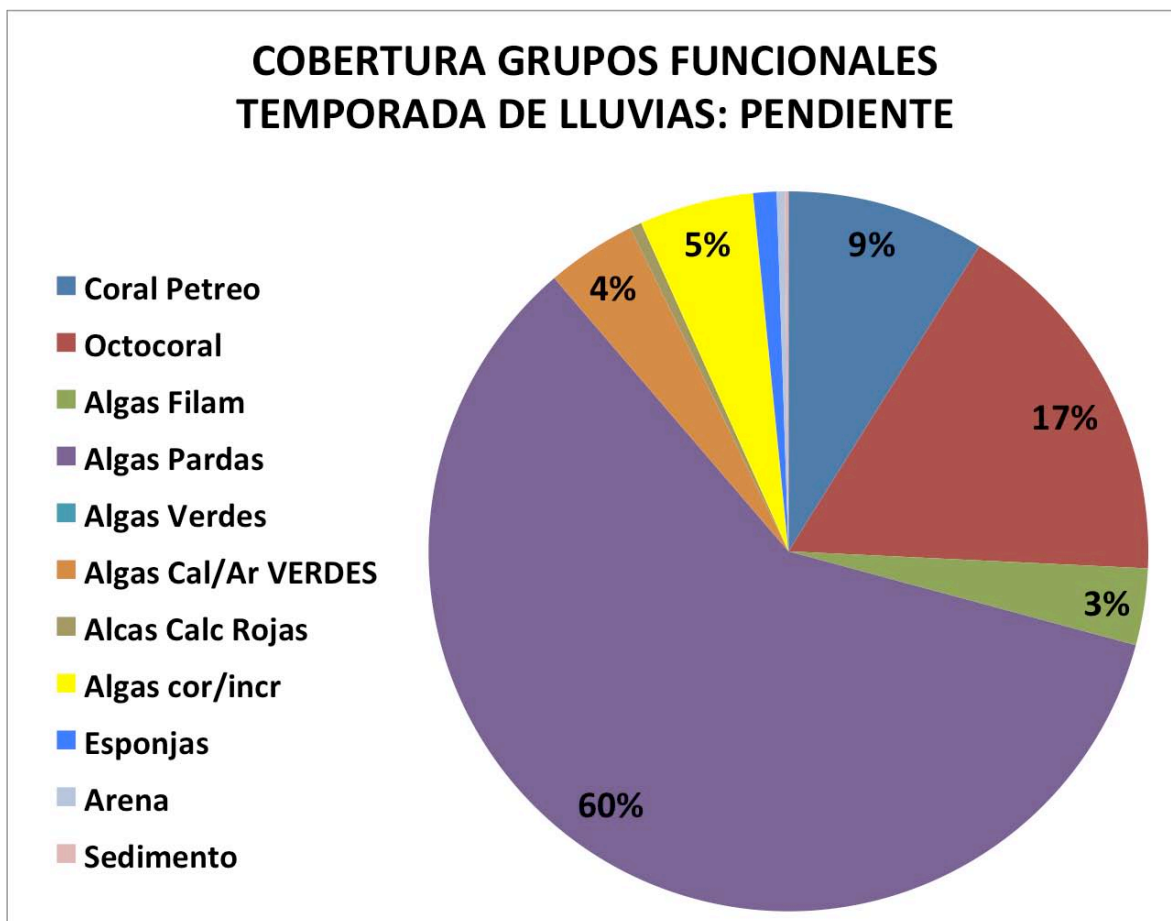


Figura 24. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de lluvias en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

9.1.3 Temporada de nortes

En la zona de transición arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas filamentosas con $33\% \pm 9.2$, algas pardas con $9\% \pm 1.7$, y octocoral con $9\% \pm 1.7$.

La cobertura de coral duro fue de $5\% \pm 1.4$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 57% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 25).

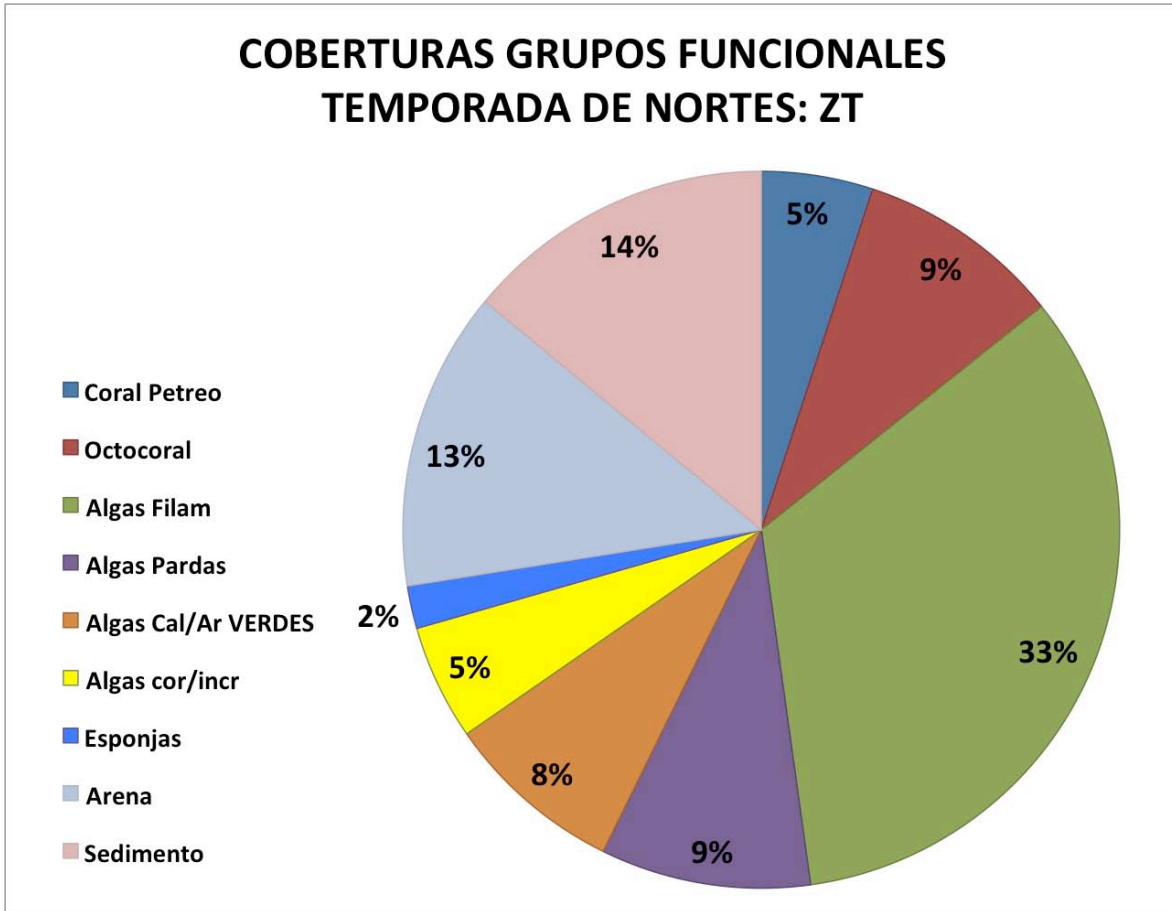


Figura 25. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de transición arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona de frente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas filamentosas con $31\% \pm 22$, algas pardas con $28.4\% \pm 31$ y octocoral con $13.7\% \pm 4.4$.

La cobertura de coral duro fue de $7\% \pm 4$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 75% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 26).

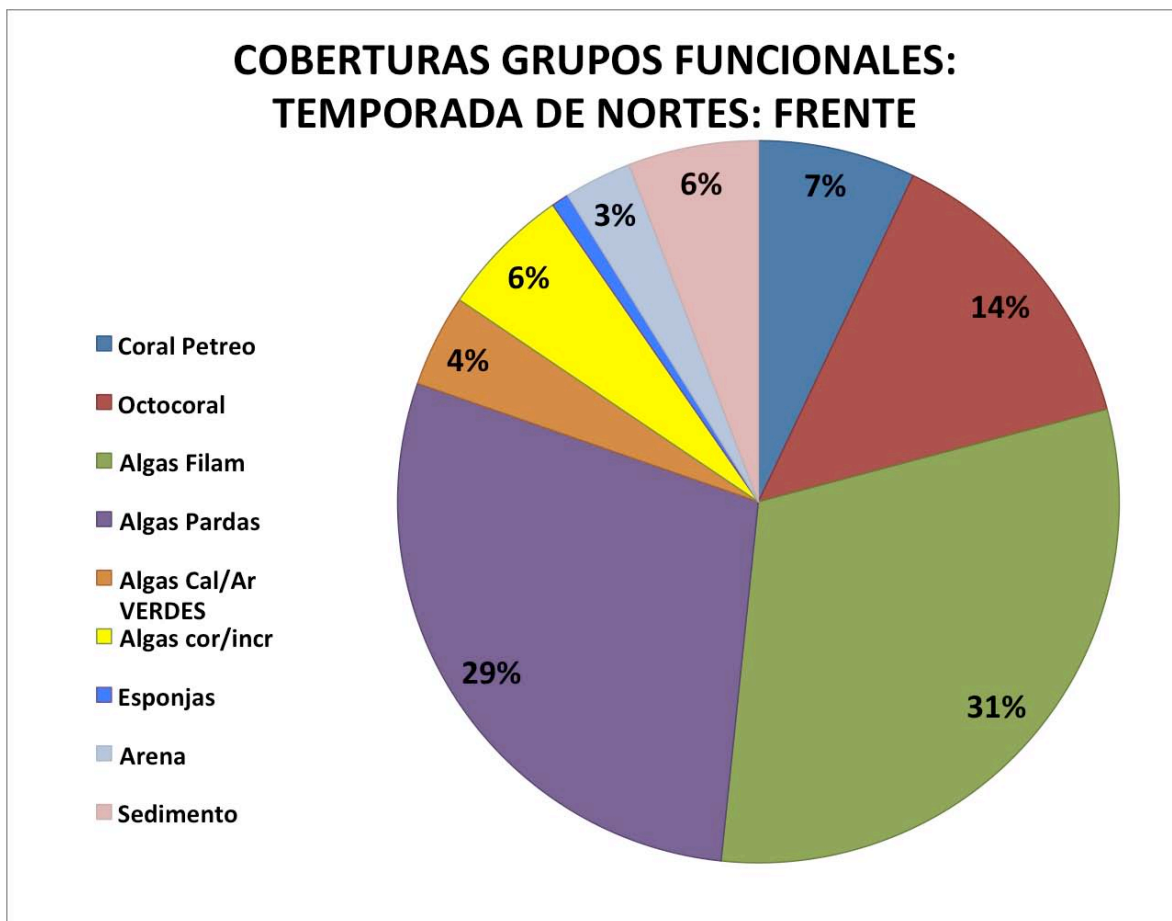


Figura 26. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de frente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

En la zona de pendiente arrecifal los grupos funcionales más representativos fueron algas pardas con $63\% \pm 9.6$ octocoral con $15\% \pm 1.7$ y algas filamentosas con $6\% \pm 7$.

La cobertura de coral duro fue de $9\% \pm 4.6$. De manera conjunta el grupo de algas representó el 75% de la cobertura total con respecto al resto de los grupos registrados en la zona de frente arrecifal (Fig. 27).

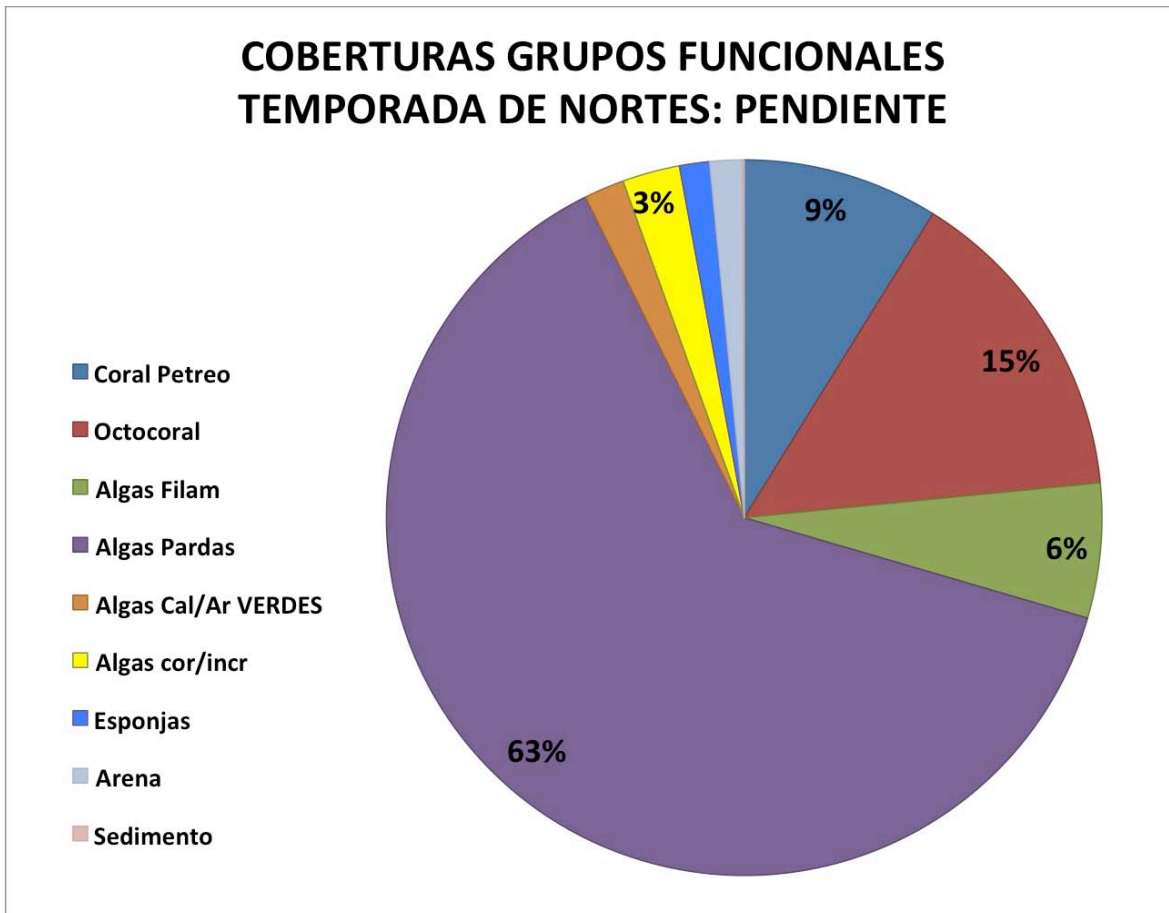


Figura 27. Coberturas de los grupos funcionales durante la temporada de nortes en la zona de pendiente arrecifal de Akumal, Q.Roo. (Algas Filam= algas filamentosas, Algas Cal/Ar VERDES= algas calcáreas y articuladas verdes, Algas cor/incr= algas coralinas e incrustantes).

9.1.4 Análisis de Abundancia Relativa de la cobertura coralina

De acuerdo a que se espera que la comunidad coralina no presente fluctuaciones significativas en el periodo de muestreo, y para homogenizar la utilización de datos para extraer resultados, se tomó como muestreo base el mes de Junio 2013, del cual se obtuvieron datos constantes de todas las variables fisicoquímicas y biológicas. Las fluctuaciones están determinadas por los porcentajes de macroalgas de cada temporada. En cada estación se realizó el conteo de corales hasta el nivel de especie.

En total se registraron 1239 colonias con una desviación estándar promedio de 45.05, con un máximo de 182 y mínimo de 36 colonias en promedio para las tres zonas (Tabla 5). La riqueza específica promedio que se obtuvo fue de 28 especies, siendo *Undaria agaricites* la especie más abundante, que representó el 20.74% de los corales.

Tabla 5. Promedio y desviación estándar de la comunidad coralina en las diferentes zonas arrecifales.

Zona	Transición Arrecifal	Frente Arrecifal	Pendiente Arrecifal	Promedio Total
	(Col/Transecto)	(Col/Transecto)	(Col/Transecto)	(Col/Transecto)
Abundancia relativa	52.75±13.07	129.25±37.64	127.75±27.45	103.25±45.05
Densidad de Colonias (Col/m ²)	1.75±0.43	4.30±1.25	4.25±0.91	3.44±1.50

Se observa en promedio que la zona con mayor número de colonias es el frente (129.75 ± 13.07), seguido por la pendiente (127.75 ± 27.45) y transición (52.75 ± 13.07) respectivamente (Fig. 28).

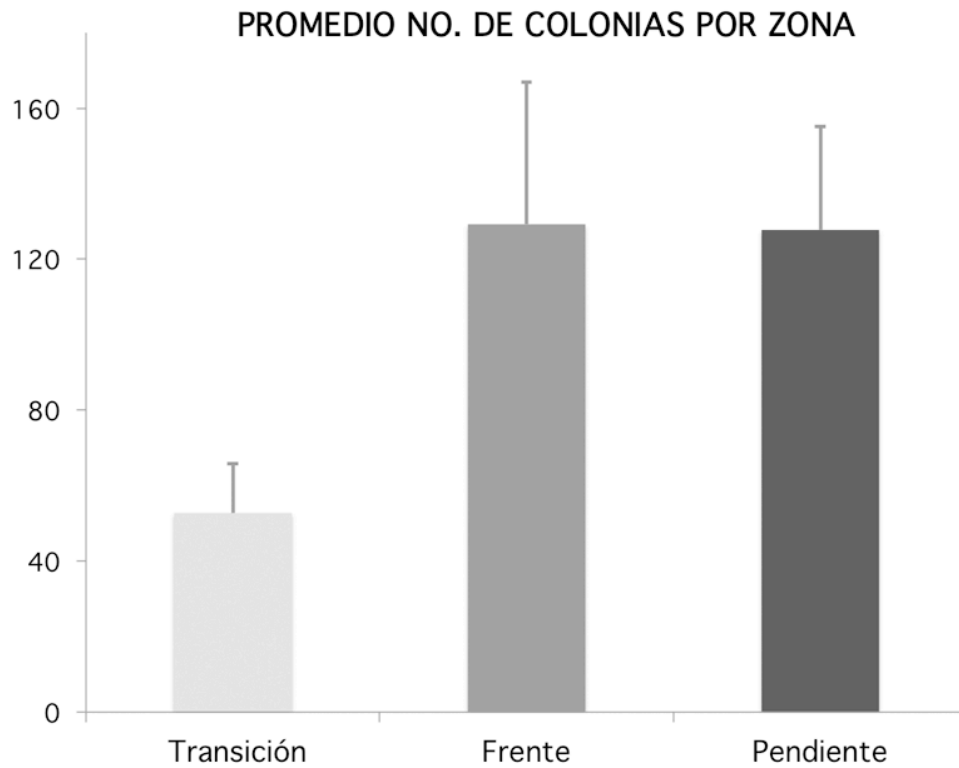


Figura 28. Promedio de colonias para cada zona arrecifal en Akumal Q. Roo.

La zona de transición registró un total de 211 colonias de coral y una riqueza específica de 20 especies. La especie con mayor abundancia es *Siderastrea siderea* con 48 colonias que representan el 22.74% del total de los corales. En esta zona tres especies representan más del 50% de la cobertura coralina total y son *Siderastrea siderea* con 12%, *Orbicella faveolata* con 8.25% y *Porites astreoides* con 7.5% (Fig. 29).

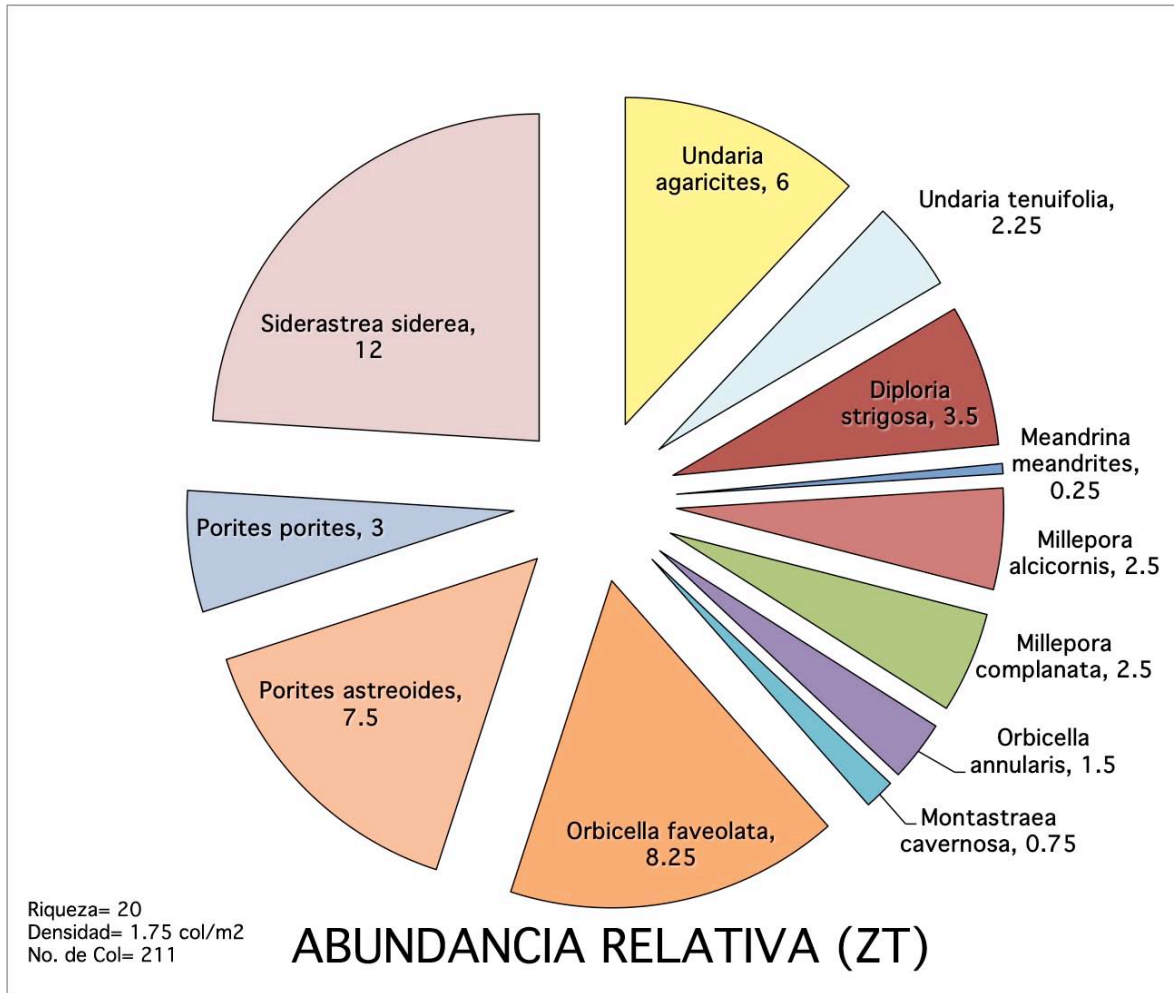


Figura 29. Abundancia relativa de especies en la zona de transición arrecifal de Akumal Q. Roo.

La zona de frente arrecifal registró un total de 517 colonias de coral y una riqueza específica de 20 especies. La especie con mayor abundancia es *Undaria agaricites* con 123 colonias que representan el 23.79% del total de los. En esta zona tres especies representan cerca del 50% de la cobertura coralina total y son *Undaria agaricites* con 30.75% y *Orbicella faveolata* con 17.5% (Fig. 30).

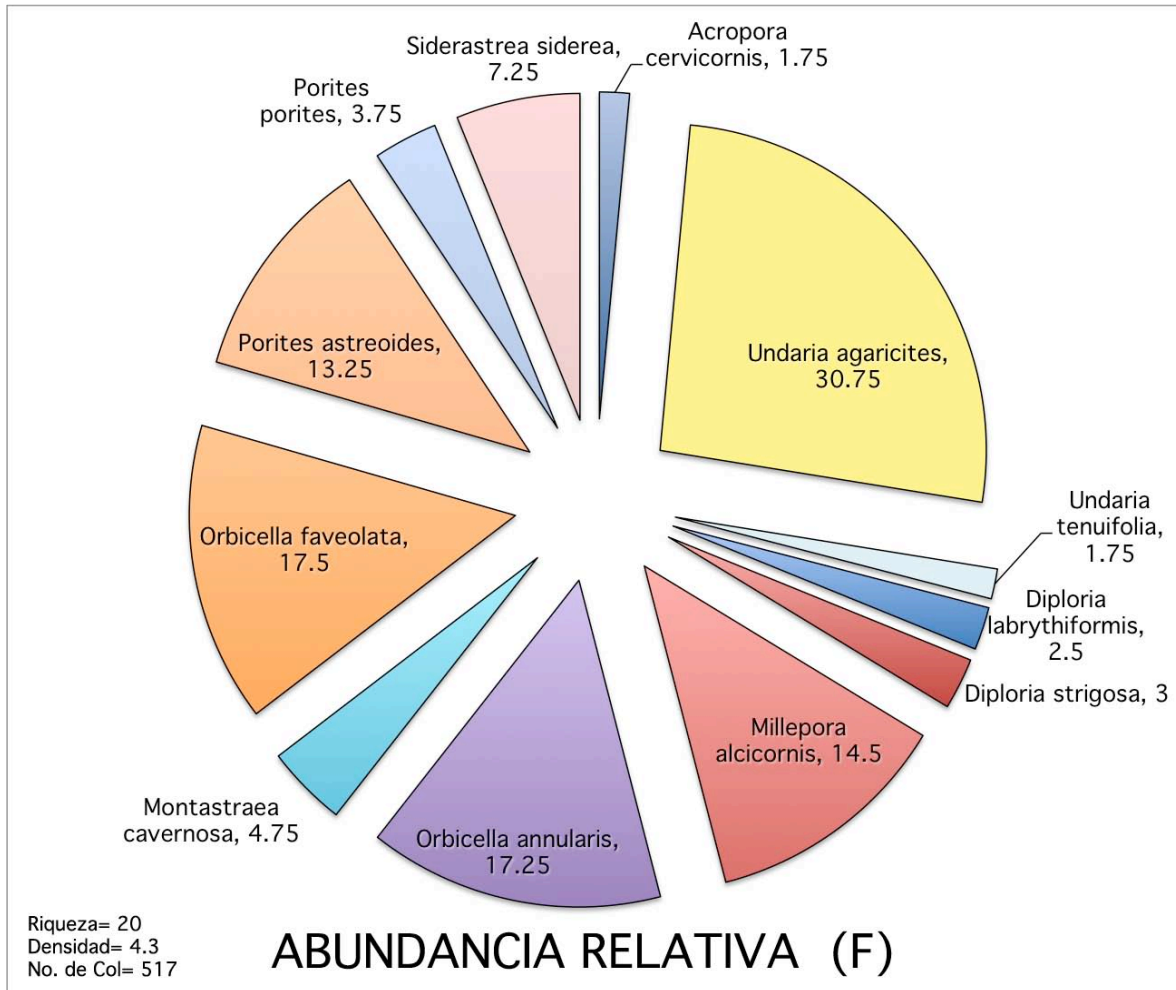


Figura 30. Abundancia relativa de especies en la zona de frente arrecifal de Akumal Q. Roo.

La zona de pendiente arrecifal registró un total de 511 colonias de coral y una riqueza específica de 24 especies. La especie con mayor abundancia es *Undaria agaricites* con 110 colonias que representan el 21.52 % del total de los corales. En esta zona tres especies representan más del 50% de la cobertura coralina total y son *Undaria agaricites* con 27.5%, *Orbicella faveolata* con 26% y *Porites astreoides* con 17% (Figura 31).

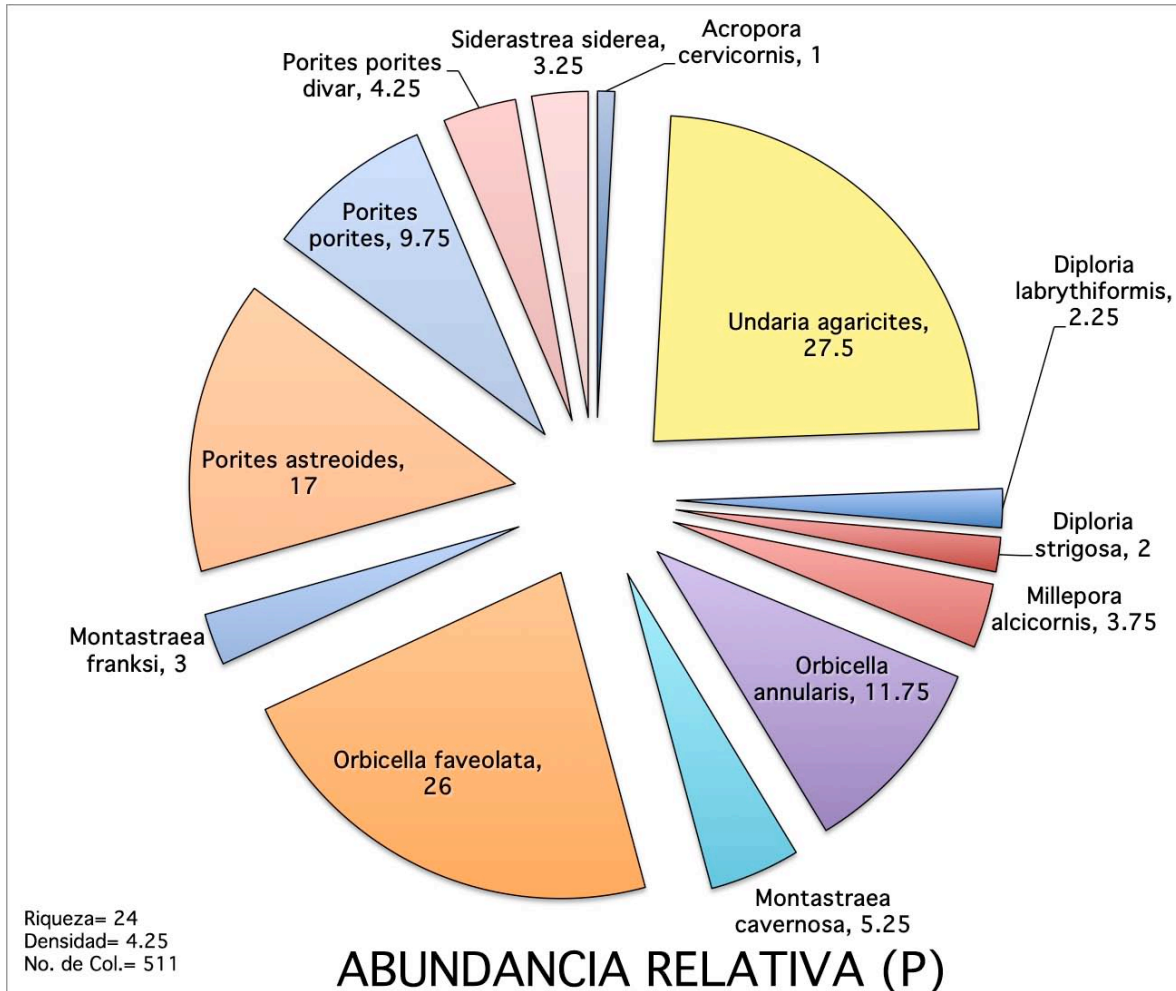


Figura 31. Abundancia relativa de especies en la zona de pendiente arrecifal de Akumal Q. Roo.

9.1.5 Enfermedades Coralinas

A partir del conteo continuo de videos se obtuvo la proporción de colonias enfermas para cada videotranssecto para las tres zonas en el tiempo de muestreo y fueron registradas 6 enfermedades: Infección Ciliada del Caribe (ICC), Banda Amarilla (EBA), Puntos Blancos (PB), Puntos Oscuros (EPO), Salud Comprometida (SC) y (WP) Viruela Blanca (Fig. 32).



Figura 32. Enfermedades registradas en el arrecife de Akumal Quintana Roo.

Se calculó el promedio de enfermedades para cada zona por temporada. Para la temporada de secas la zona de transición registró el mayor porcentaje de colonias enfer con 24 % de prevalencia 23.51% con la enfermedad Infección Ciliada del Caribe y 0.51% con la enfermedad de Puntos Oscuros (EPO). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de transición corresponde a *Siderastrea siderea* con un promedio y desviación estándar de 27.25 ± 13.76 de colonias enfermas. La zona de Frente registro 5.7% de colonias enfermas, de las cuales el 5.43% corresponde a la enfermedad ICC y 0.27% corresponde a la Enfermedad de Banda Amarilla (EBA). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en zona de frente corresponde a *Undaria agaricites* con un promedio y desviación estándar de 23 ± 11.69 de colonias enfermas. Para la zona de pendiente sólo se registró el 4.6% de colonias enfermas de las cuales el 2.54% corresponde a la enfermedad ICC, 1.82% corresponden a la enfermedad EBA y 0.22% corresponde a la enfermedad PB. (Fig. 33). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de pendiente corresponde a *Porites porites* con un promedio y desviación estándar de 19.25 ± 20.41 de colonias enfermas.

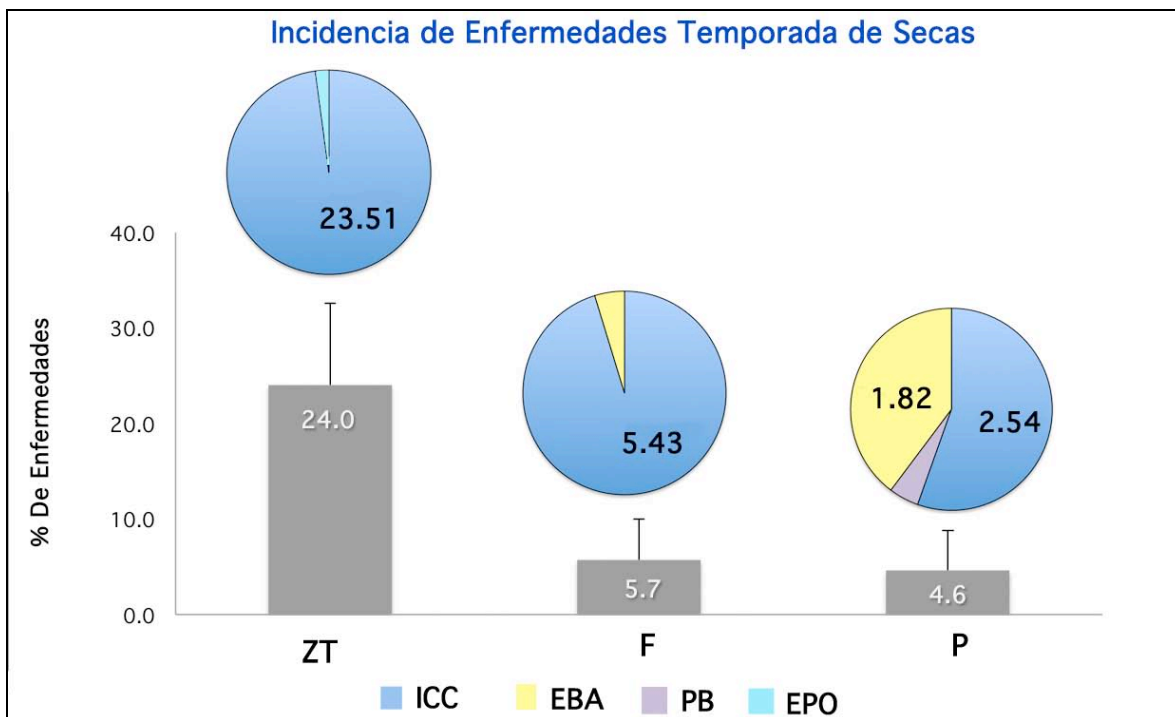


Figura 33. Gráfica de cajas: porcentaje de incidencia y desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de secas. Gráfica de pasteles: porcentaje de enfermedades presentes.

Para la temporada de lluvias la zona de transición presentó 7.2% de las colonias totales enfermas, de las cuales la enfermedad con mayor porcentaje de incidencia corresponde a ICC con 5.57%, EBA con 1.25%, PB y WP con 0.29% y con la menor incidencia EPO con 0.14%. La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de transición corresponde a *Siderastrea siderea* con un promedio y desviación estándar de 16.75 ± 7.33 de colonias enfermas. La zona de frente presentó el mayor porcentaje de incidencia de enfermedades con 8.0% del total de las colonias, 4.33% para ICC, 3.65% para EBA y 0.18% para PB. La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en zona de frente corresponde a *Undaria agaricites* con un promedio y desviación estándar de 30.87 ± 12.76 de colonias enfermas. Para la zona de pendiente se registró 4.6% de colonias enfermas, de las cuales el 2.44% corresponde a ICC y 1.52% a EBA (Fig. 34). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de pendiente corresponde a *Undaria agaricites* con un promedio y desviación estándar de 25.87 ± 7.07 de colonias enfermas.

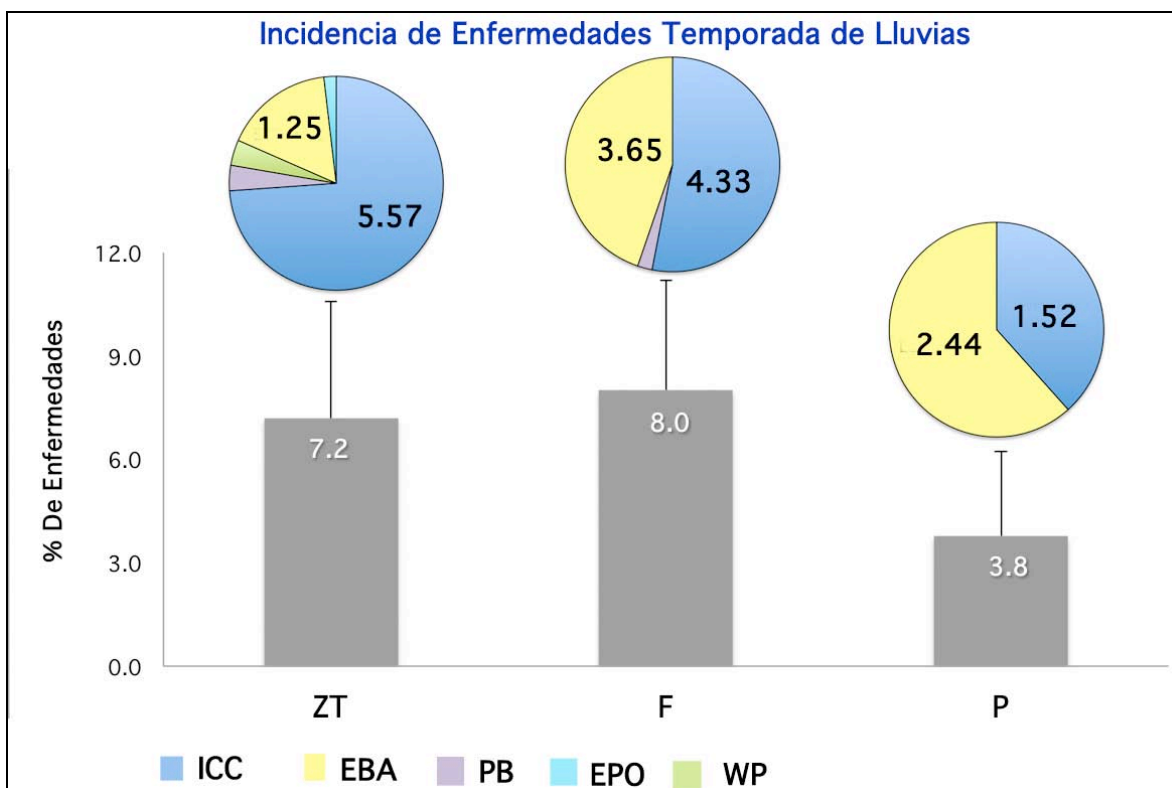


Figura 34. Gráfica de cajas: porcentaje de incidencia/desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de lluvias. Gráfica de pasteles: porcentaje de enfermedades presentes.

Para la temporada de nortes en la zona de transición del total de las colonias se registraron un 23.2% de coral con enfermedades, del cual 21% corresponde a ICC, 1.7% a EBA, .77% a BB y el 0.14% corresponde a WP y EPO (Figura 9). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de transición corresponde a *Siderastrea siderea* con un promedio y desviación estándar de 19.25 ± 7.64 de colonias enfermas. La zona de frente presentó 7.7% de incidencia de enfermedades, 5.83% para ICC, 0.75% para EBA, 0.77% para BB, 0.60% para SC, 0.29% para EPO, 0.23% para PB y 0.078% para WP. La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en zona de frente corresponde a *Orbicella faveolata* con un promedio y desviación estándar de 15.5 ± 5.55 de colonias enfermas. Para la zona de Pendiente se registró 4.6% de colonias enfermas, de las cuales el 2.32% corresponde a EBA, 1.11% a SC, 0.9% a BB, 0.21% a ICC, 0.13% a PB y 0.09% a WP. (Fig. 35). La especie que presentó mayor porcentaje de colonias enfermas en la zona de pendiente corresponde a *Undaria agaricites* con un promedio y desviación estándar de 26.37 ± 18.15 de colonias enfermas.

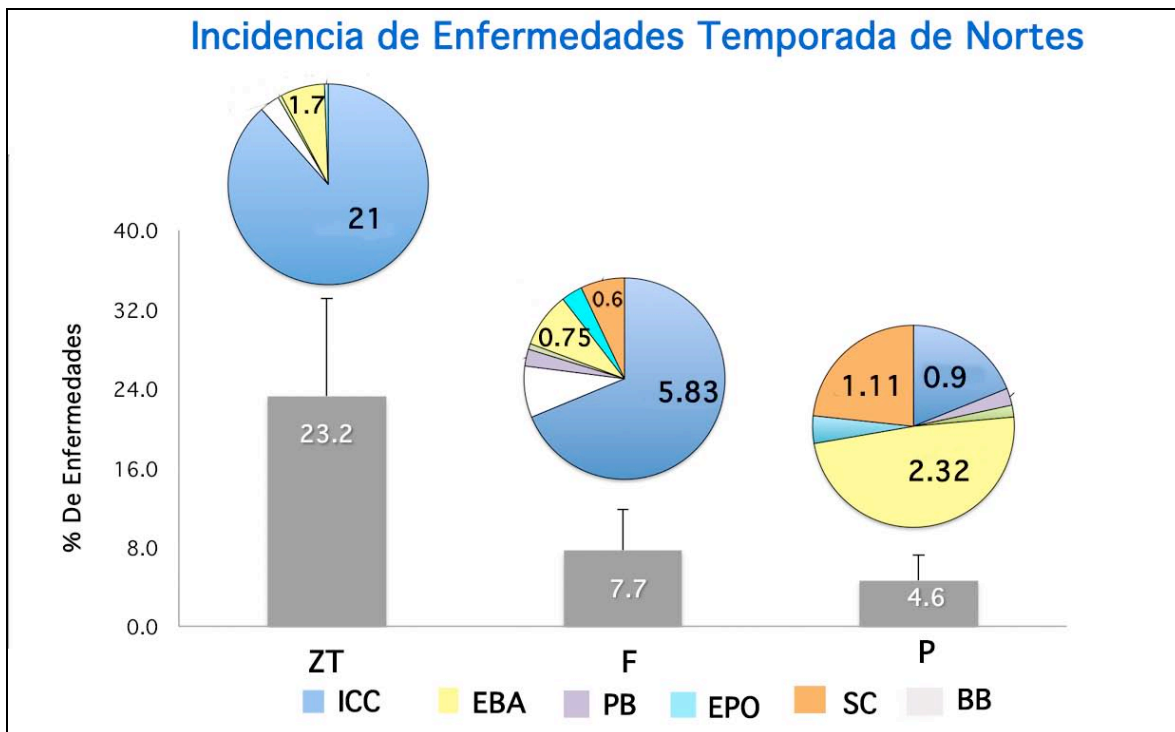


Figura 35. Gráfica de cajas: porcentaje de incidencia/desviación estándar de colonias enfermas para cada zona en la temporada de lluvias. Gráfica de Pasteles: Porcentaje de Enfermedades presentes.

De manera general y para observar el cambio en la incidencia de enfermedades de cada transecto en un ciclo anual se realizó una prueba estadística no paramétrica de Kruskal-Wallis y se obtuvo un valor de $p= 0.374$ y $F= 3.114$, dado que el valor de p es mayor o igual a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre las medianas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 36).

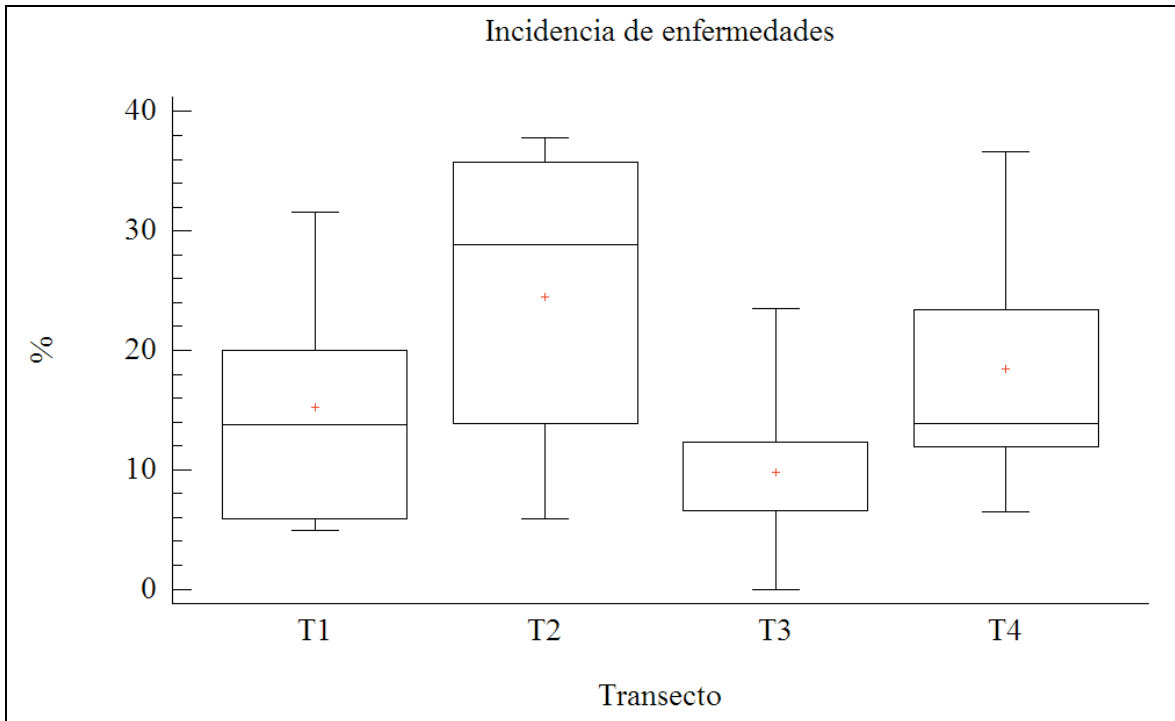


Figura 36. Gráfica de cajas y bigotes de transectos a lo largo del tiempo. Promedios y desviación estándar de cada transecto: T1= 15.23 ± 11.01 , T2= 24.44 ± 13.98 , T3= 9.78 ± 8.79 y T4= 18.47 ± 11.85 .

9.2 Tasa de captura de sedimento

A lo largo del trabajo de campo se recolectaron 744 muestras de sedimento. Se obtuvo un promedio del sedimento total recolectado de cada trampa y se calculó la tasa de captura de sedimento (T_{cs}). El rango de valores promedios observados es de 0.15 a 60.49 mg/m^2 con un promedio anual de 3.92 mg/m^2 y desviación estándar de 8.9 mg/m^2 (Fig. 37).

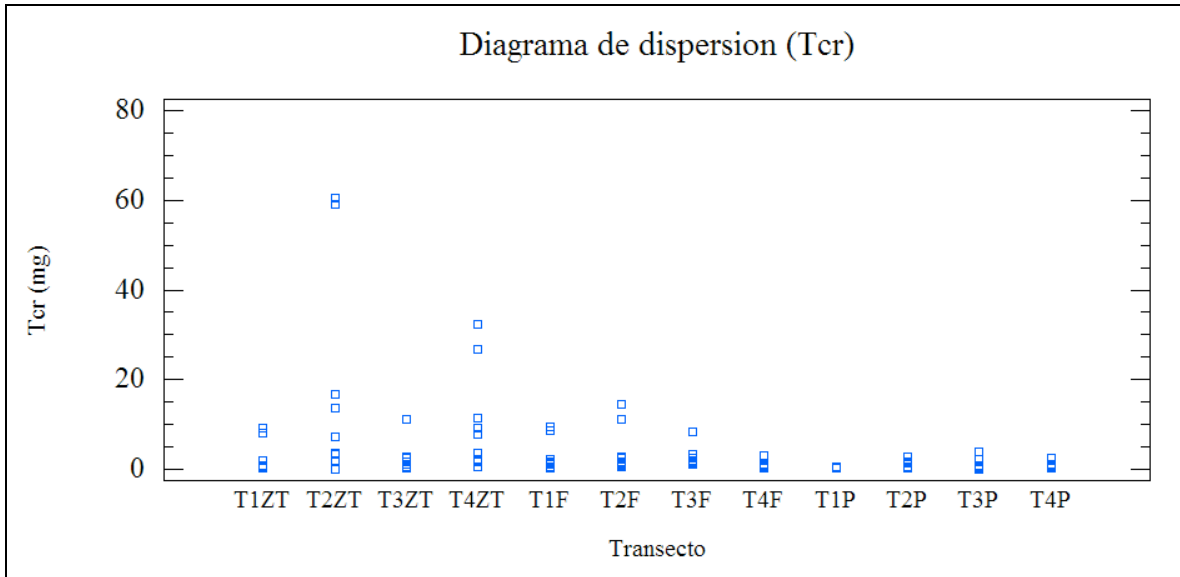


Figura 37. Diagrama de dispersión de los datos promedio de la tasa de captura de sedimento para cada trampa durante el periodo de muestreo.

Para observar el comportamiento temporal de las tasas de captura de sedimento se aplicó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis (InfoStat, v. 2013), y se obtuvo un valor de $p= 0.028$; dado que el valor de p de la prueba es menor a 0.05, hay una diferencia significativa entre las medianas de los meses de muestreo en el 95% del nivel de confianza (Fig.38). Los meses que registraron las tasas de captura de sedimentación más altas corresponden a septiembre del 2013 con un promedio de 11.40 mg/m^2 y marzo del 2014 con un promedio de 10.81 mg/m^2 , a su vez, los meses con el menor registro de captura corresponden a Octubre del 2013 con un promedio de 0.74 mg/m^2 y Mayo con un promedio de 1.08 mg/m^2 (Anexo 2). Para determinar qué medianas son significativamente diferentes se aplicó una prueba de rangos múltiples. Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: septiembre13, octubre13, marzo14 y mayo14 (Anexo 3).

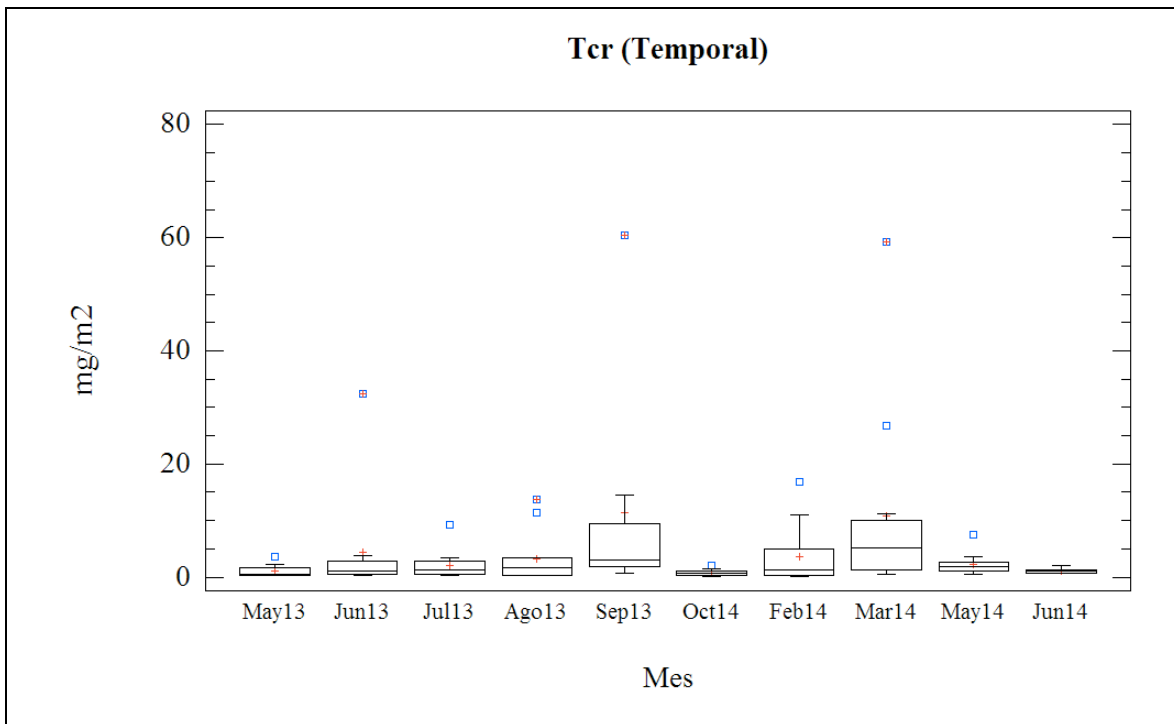


Figura 38 gráficas de cajas y bigotes de la tasa de captura de sedimentación (T_{cs}) por cada mes de muestreo.

Para observar el comportamiento espacial de las tasas de captura de sedimento se aplicaron análisis estadísticos por transecto y por zona y se obtuvieron los siguientes resultados:

El transecto que presentó mayor Tcs fue el 2 con una media de 7.28 ± 15.73 , seguido por el transecto 4= 3.85 ± 7.75 , transecto 1= 2.72 ± 4.22 y transecto=3 1.82 ± 1.86 (Anexo 4). Se aplicó un análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis y se obtuvo un valor de $p= 0.0013$; dado que el valor de p de la prueba es menor a 0.05, hay una diferencia significativa entre las medianas de los transectos en el 95% del nivel de confianza (Fig.39).

Para determinar qué medianas son significativamente diferentes se aplicó una prueba de rangos múltiples y según el análisis estadístico el transecto 2 es el único que presenta diferencias significativas en el 95% del nivel de confianza (Anexo 5).

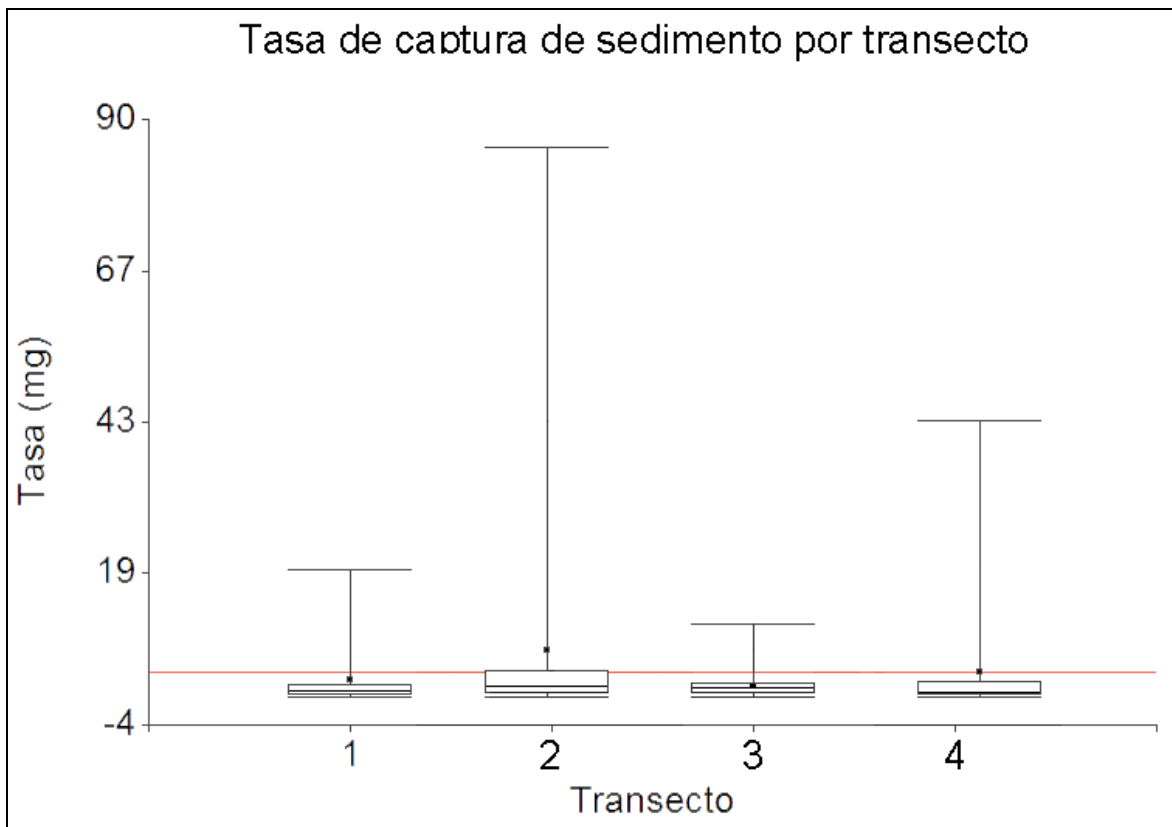


Figura 39. Gráfica de cajas y bigotes de la tasa de captura de sedimentación (Tcs) promedio por transecto. Transecto (1)= 2.72 mg/m^2 , transecto (2)= 7.28 , transecto (3)= 1.82 y transecto (4)= 3.82 . La línea roja señala la media general = 4.03 , D.E.= 9.53 , $gl=3$, $n=676$.

Por zona se observó de manera general que los transectos ubicados en la zona más somera (ZT) presentan las tasas de captura de sedimentación más elevadas con un promedio de 8.65 mg/m^2 , seguidos por los transectos ubicados en el Frente arrecifal (F) con un promedio de 2.93 mg/m^2 y con las tasas más bajas los transectos ubicados en la pendiente arrecifal (P) con un promedio de 0.94 mg/m^2 (Anexo 6). Para observar si se presentaban diferencias estadísticamente significativas de las Tcs entre zonas arrecifales se aplicó un análisis de Kruskal- Wallis y se obtuvo un valor de $p < 0.0001$; ya que el valor es inferior a 0.05, hay una diferencia estadísticamente significativa entre las medias en el 95,0% del nivel de confianza (Fig.40). Para determinar qué medianas son significativamente diferentes se aplicó una prueba de rangos múltiples y los resultados muestran que cada zona presentó diferencias estadísticamente significativas en el 95% del nivel de confianza (Anexo 7).

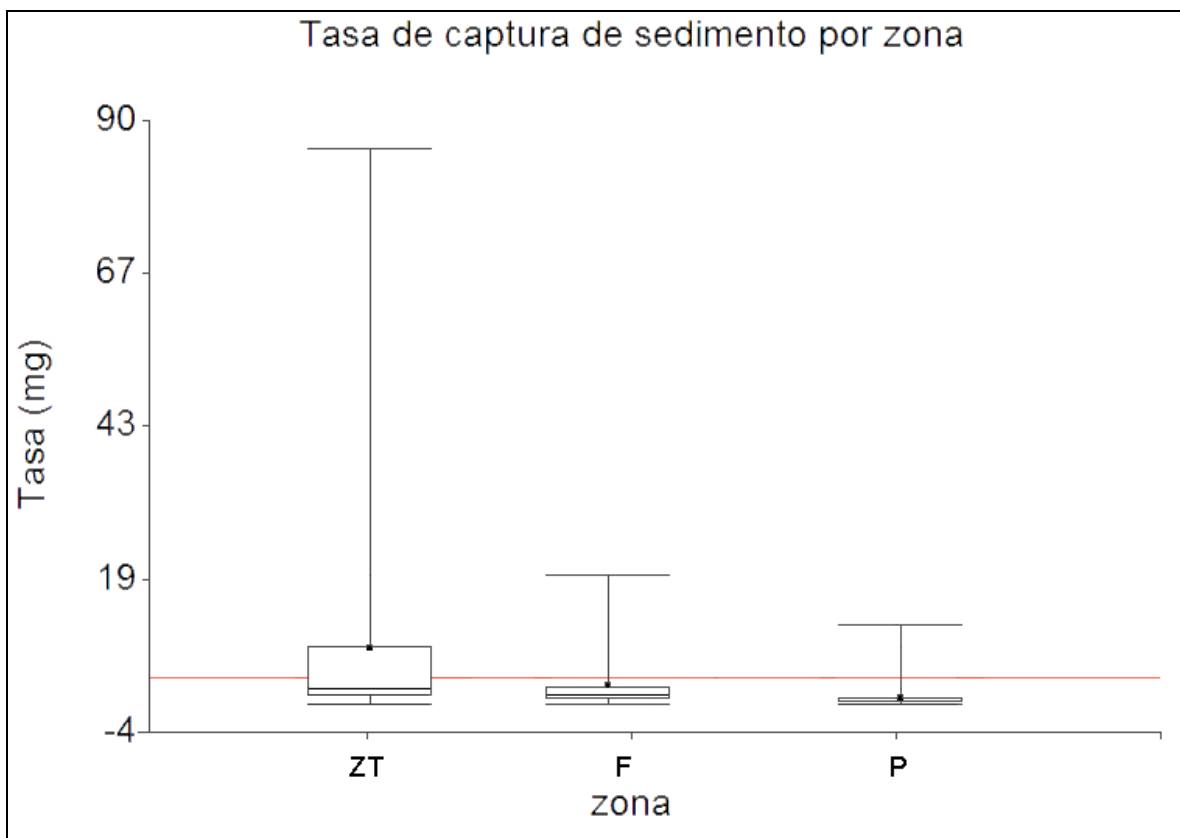


Figura 40. Gráfica de cajas y bigotes de la tasa de captura de sedimentación (Tcs) promedio por zona. ZT= $8.85 \pm 15.4 \text{ mg/m}^2$, F= 2.93 ± 4.18 , y P= 0.94 ± 1.36 . La línea roja señala la media general de 4.03, $g1=2$, $n=676$.

9.3 Calidad del agua

9.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Se realizó un promedio general donde se incluyen los meses de muestreo y las zonas arrecifales y se obtuvo para la temporada de secas un valor promedio para temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de 30.81 ± 3.75 , salinidad (ups) 30.01 ± 7.28 , oxígeno disuelto (mg/l) de 5.55 ± 0.095 , pH (\log_{10}) de 8.36 ± 0.05 y saturación de oxígeno (%) de 90.17 ± 13.30 . Para la temporada de lluvias el valor promedio de temperatura fue de 28.87 ± 61.95 , salinidad de 33.94 ± 6.25 , oxígeno disuelto de 5.81 ± 0.73 , pH de 8.49 ± 0.06 y saturación de oxígeno de 90.58 ± 7.89 . Para la temporada de nortes el valor promedio de temperatura fue de 27.76 ± 1.42 , salinidad de 30.97 ± 4.87 , oxígeno disuelto de 6.38 ± 1.06 , pH de 8.47 ± 0.05 y saturación de oxígeno de 87.62 ± 9.96 (Fig. 41). Las diferencias significativas que se presentaron en la temporada de secas estuvieron dadas por el pH, mientras que en la temporada de lluvias las diferencias estuvieron dadas por la salinidad y finalmente en la temporada de nortes las diferencias estuvieron dadas por la temperatura y el oxígeno disuelto.

Asimismo, se realizó el promedio de las variables fisicoquímicas por Zonas. El registro de salinidad anual promedio y desviación estándar para la zona de transición fue de 32.28 ± 8.47 , en la zona de Frente fue de 31.48 ± 5.81 , en la zona de Pendiente fue de 32.22 ± 5.26 . Los niveles de oxígeno disuelto anual promedio y desviación estándar para la zona de transición fueron de 6.03 ± 0.93 mg/L, en la zona de Frente de 5.71 ± 0.85 mg/L y en la zona de Pendiente de 5.79 ± 0.98 mg/L. El pH anual promedio y desviación estándar para la zona de transición fue de 8.45 ± 0.08 , en la zona de Frente de 8.44 ± 0.09 y en la zona de Pendiente de 8.44 ± 0.10 .

La temperatura anual promedio y desviación estándar para zona de transición fue de 29.68 ± 2.87 $^{\circ}\text{C}$, en la zona de Frente de 29.16 ± 2.94 y en la zona de Pendiente de 29.07 ± 2.80 . Los niveles de saturación de oxígeno anual promedio y desviación estándar para la zona de transición fue de 93.42 ± 10.03 , en la zona de Frente de 87.35 ± 9.02 y en la zona de Pendiente de 88.81 ± 9.71 (Fig.41).

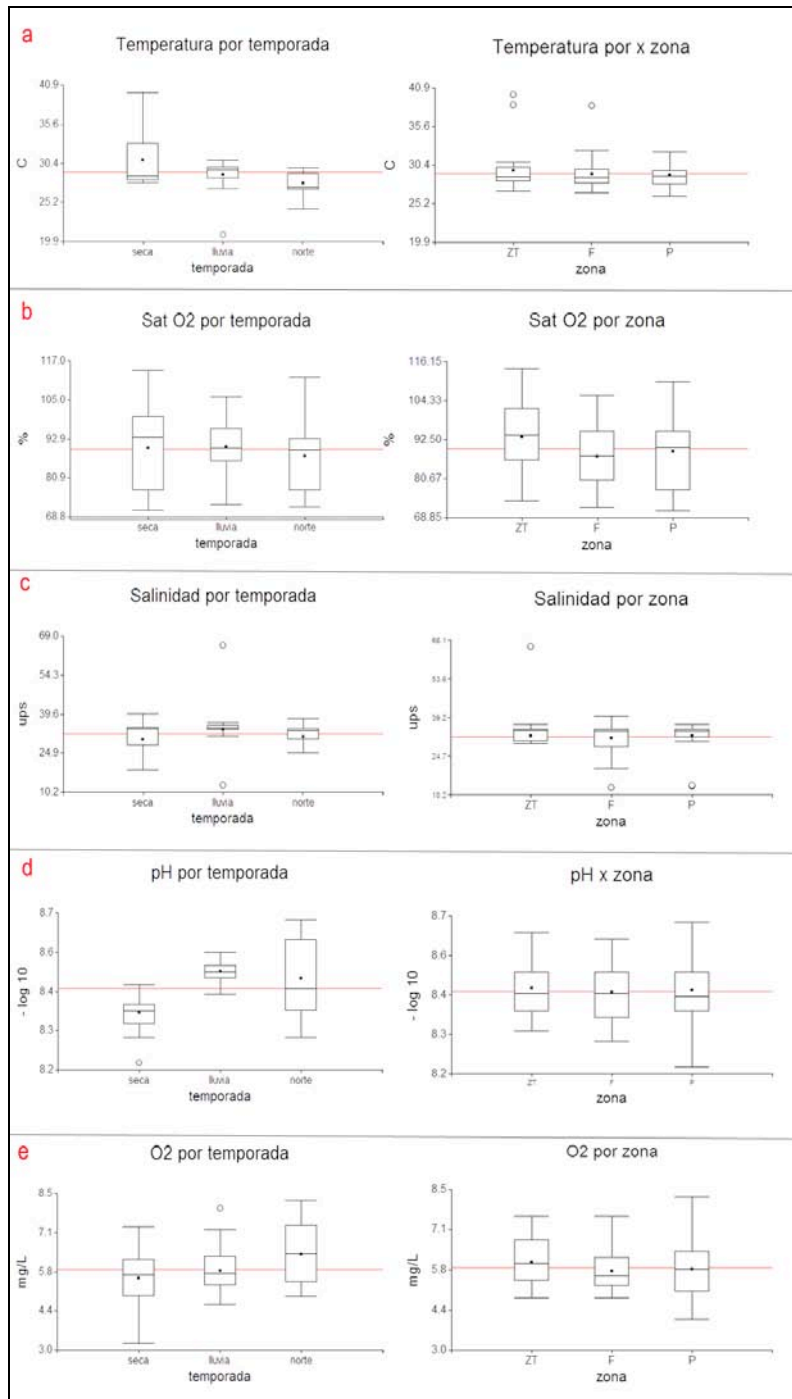


Figura 41. Valores fisicoquímicos por temporada (izquierda) y por zona (derecha). A) temperatura por temporada: media=29.3, D.E.= 2.85 p=0.0008, temperatura por zona media=29.3 D.E.=2.85 p=0.674. Sat O2 por temporada: media=89.78, D.E.= 9.95 p=0.392, Sat O2 por zona: media=89.78, D.E. 9.95 p= 0.047. Salinidad por temporada: media=31.99, D.E.= 6.57, p= 0.0035, Salinidad por zona: media=31.99, D.E.= 6.57, p= 0.956. pH pr temporada: media=8.44, D.E.= 0.09, p= 0.0001, pH por zona: media= 8.44, D.E.= 0.09, p= 0.770. O2 por temporada: media=5.84, D.E.=0.92, p= 0.0180, O2 por zona: media= 5.84, D.E.= 2.85, p=0.674.

9.3.2 Nutrientes

Se realizaron análisis de Nutrientes inorgánicos disueltos (NH_4 , NO_2 , NO_3 y PO_4) y particulados (NT y FT) en muestras de agua de fondo asociadas a una trampa de sedimentos.

Las concentraciones de amonio (NH_4) en ~ 41 % de todas las muestras estaban por arriba de 10 μM . Los niveles fluctuaron de manera significativa ($p < 0.05$) de acuerdo a los meses de muestreo. No se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en las concentraciones de NH_4 entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 12.77 ± 11.93 , las concentraciones NH_4 durante la temporada de nortes fueron consistentemente más altas que la temporada de secas y lluvias y se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre temporadas (Fig. 42). Las temporadas que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron la de lluvias y nortes (Anexo 8).

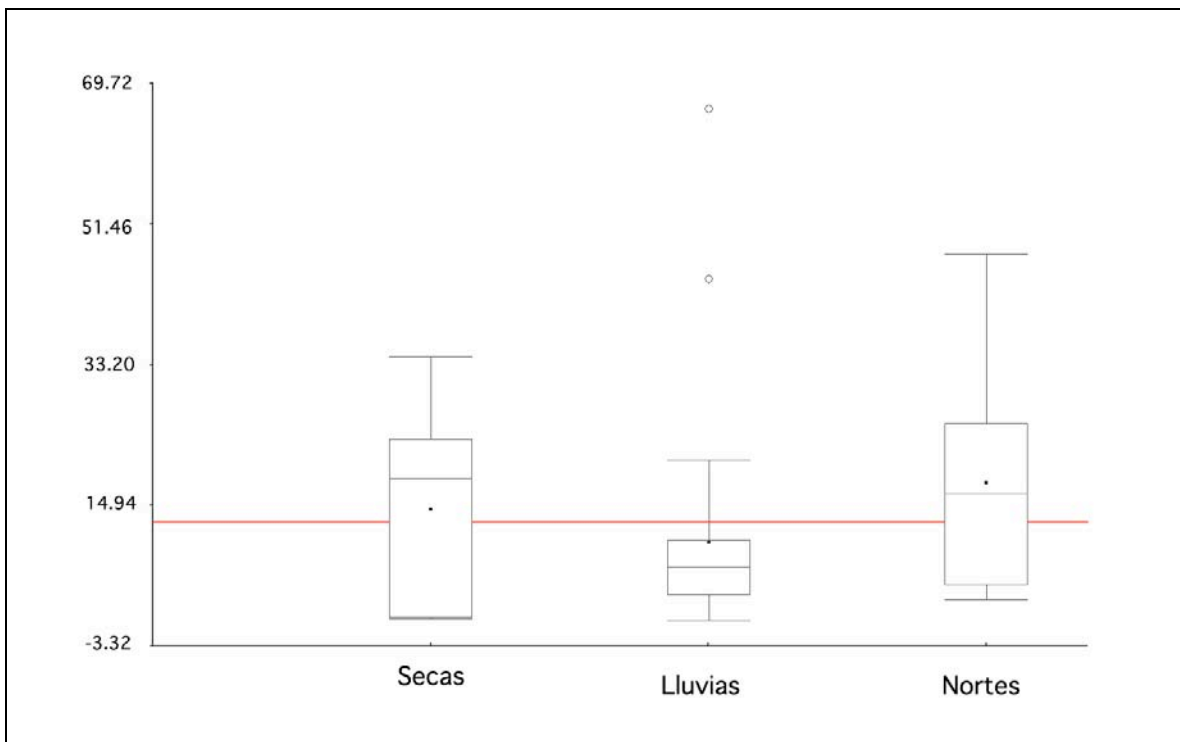


Figura 42. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de amonio entre temporadas. Valor de $p = 0.0241$ y $H = 7.45$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de NH_4 , para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de amonio (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 13.14 ± 11.91 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H = 109.113$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 43). Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: marzo14, abril14, junio14 y febrero14 (Anexo 9).

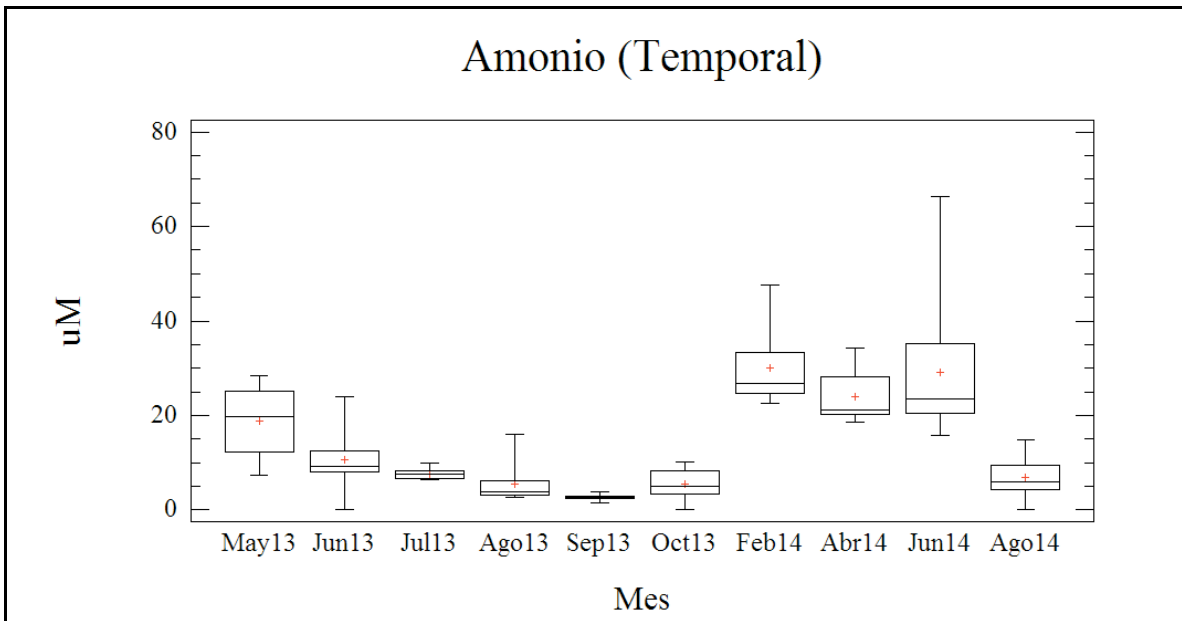


Figura 43. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de amonio (μM) a través del tiempo.

Las concentraciones de Nitrito (NO_2) en $\sim 87\%$ de todas las muestras estaban por arriba de $5\ \mu\text{M}$. Los niveles fluctuaron de manera significativa de acuerdo a los meses de muestreo. No se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de NO_2 entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 0.73 ± 0.29 , las concentraciones NO_2 durante la temporada de nortes fueron consistentemente más altos que la temporada de secas y lluvias (Fig. 44). Las temporadas que presentaron diferencias fueron secas y nortes (Anexo 10).

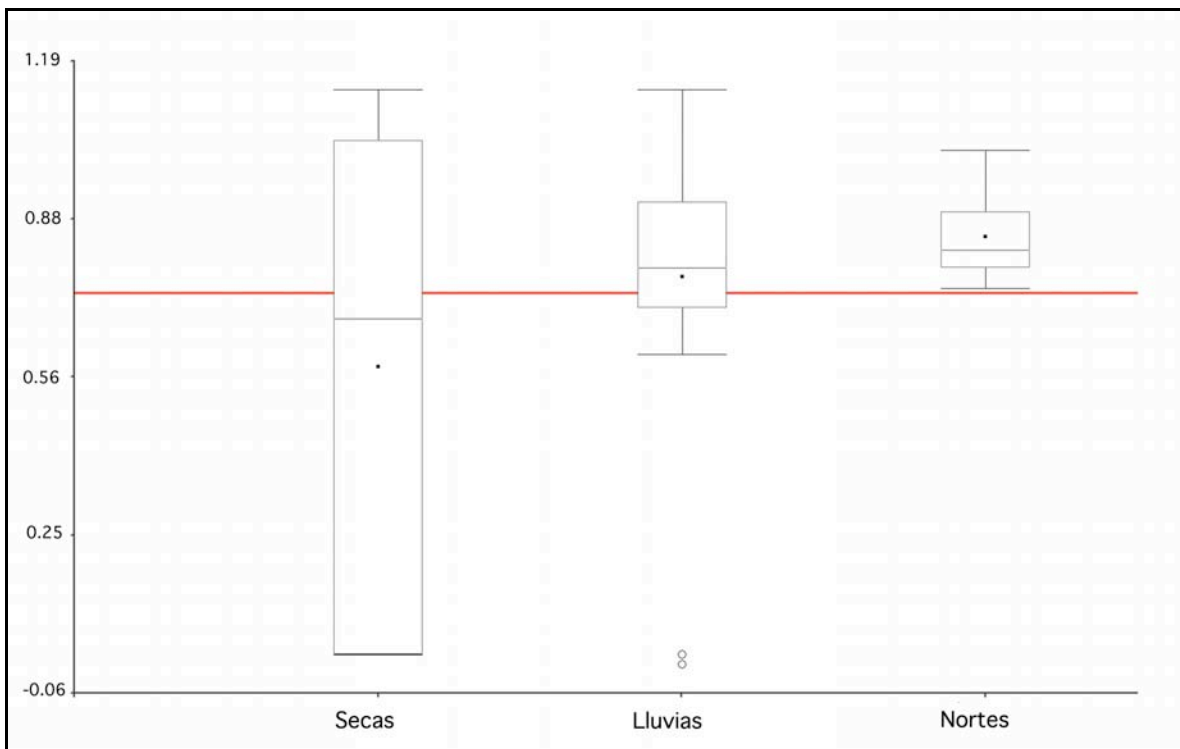


Figura 44. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de nitrito entre temporadas. Valor de $p=0.0243$ y $H=7.42$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de NO₂ para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de nitrito (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.73 ± 0.28 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H = 110.88$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 45). Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: mayo13 y abril14 (Anexo 11).

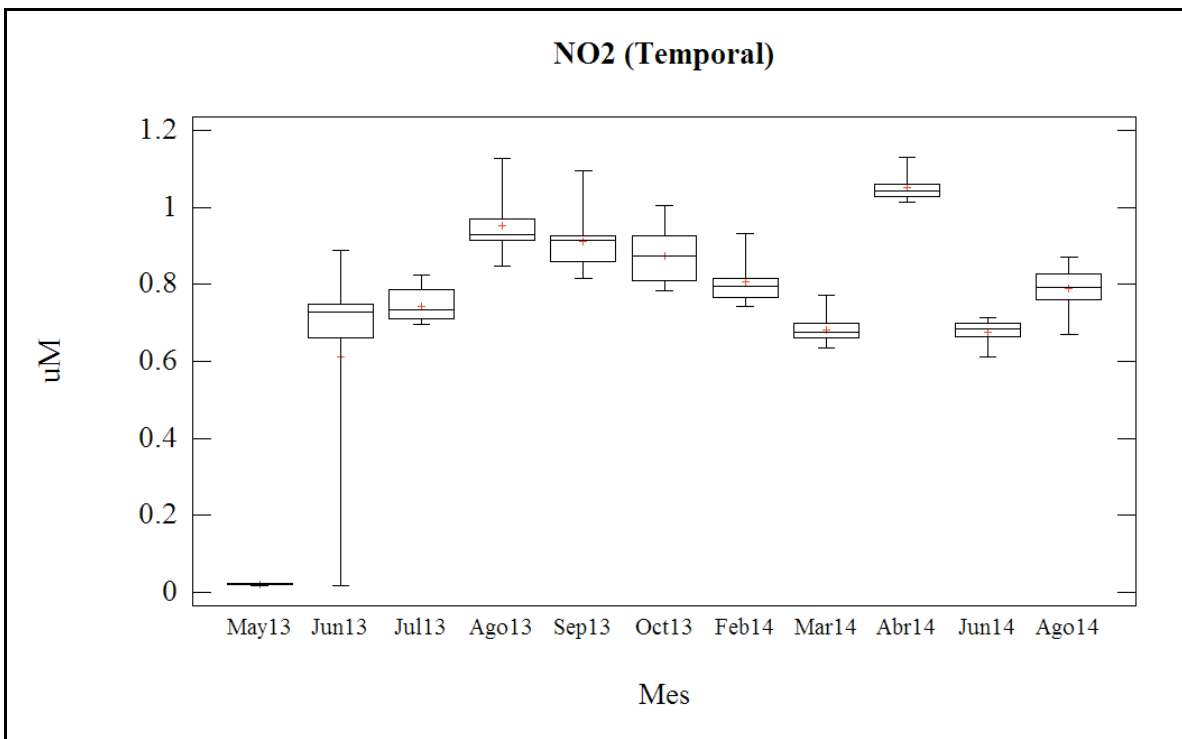


Figura 45. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitritos (μM) a través del tiempo.

Las concentraciones de Nitrato (NO_3) en ~ 53 % de todas las muestras estaban por arriba de 25 μM . Los niveles fluctuaron de manera significativa de acuerdo a los meses de muestreo. No se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de NO_3 entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 30.63 ± 18.56 . Las concentraciones NO_3 durante la temporada de secas fueron consistentemente más altos que la temporada de lluvias y nortes y se observaron diferencias estadísticamente significativas entre temporadas (Fig. 46). La temporada que presentó diferencias estadísticamente significativas fue la temporada de nortes (Anexo 12).

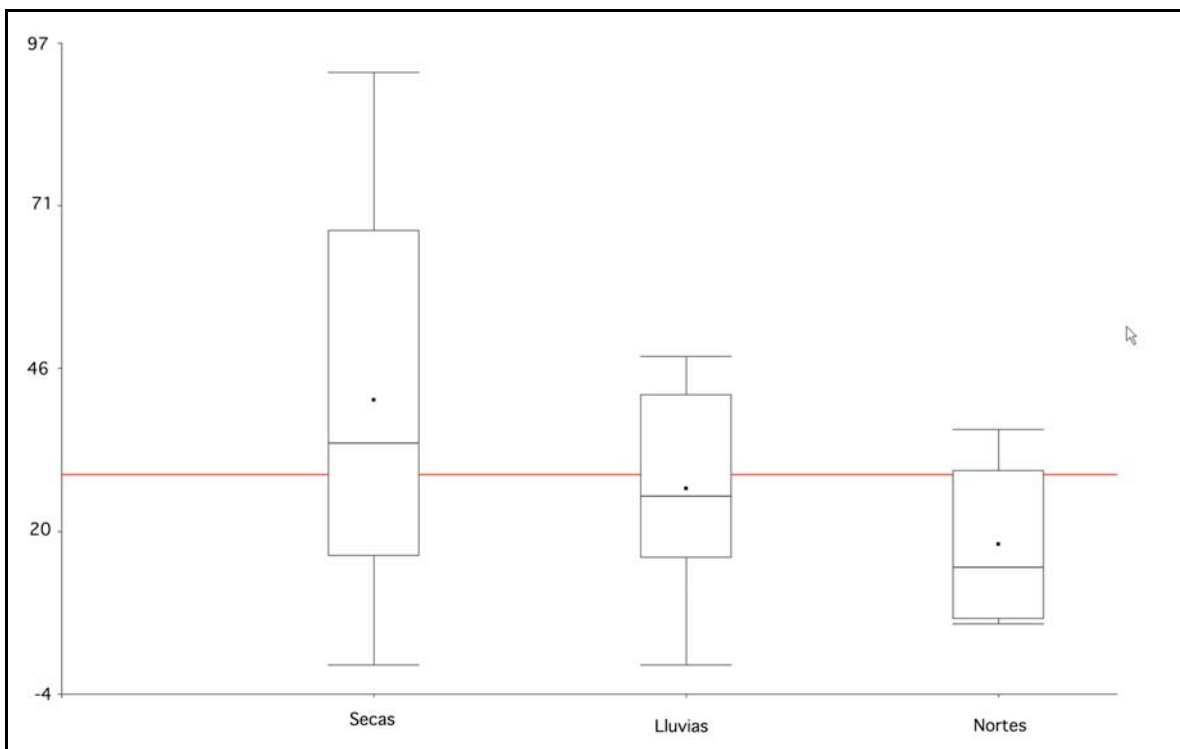


Figura 46. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de nitrato (μM) entre temporadas. Valor de $p= 0.0007$ y $H=14.47$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de NO₃ para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de nitrato (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 30.63±18.56, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H = 114.35$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 47). Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: Octubre13 y Marzo14 (Anexo 13).

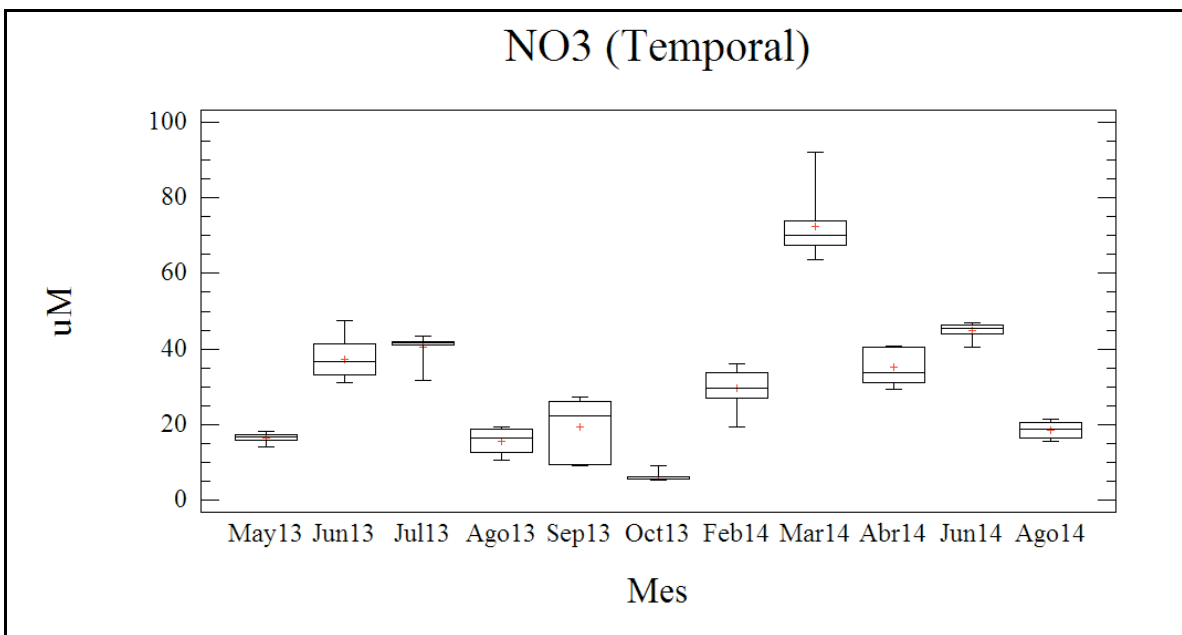


Figura 47. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitrato (μM) a través del tiempo.

Las concentraciones de Nitrógeno Total (NT) en ~ 66 % de todas las muestras estaban por arriba de 40 μM . Los niveles fluctuaron de manera significativa de acuerdo a los meses de muestreo. No se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de NT entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 44.73 ± 14.91 , las concentraciones NT durante la temporada de secas fueron consistentemente más altos que la temporada de lluvias y nortes y se observaron diferencias estadísticamente significativas entre temporadas (Fig. 48). La temporada que marco las diferencias estadísticamente significativas fue la temporada de nortes (Anexo 14).

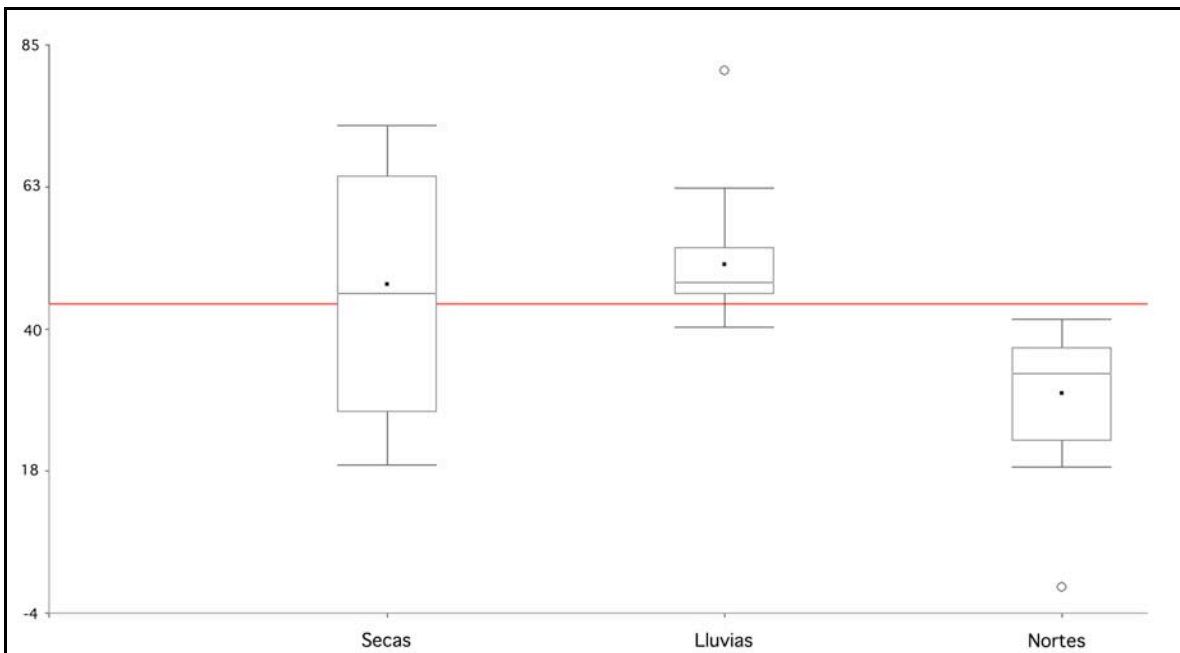


Figura 48. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) entre temporadas. Valor de $p < 0.0001$ y $H=36.04$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de NT para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de nitrógeno total (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 45.20 ± 14.25 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H = 82.27$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 49). Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: mayo13, octubre13, marzo14 y abril14 (Anexo 15).

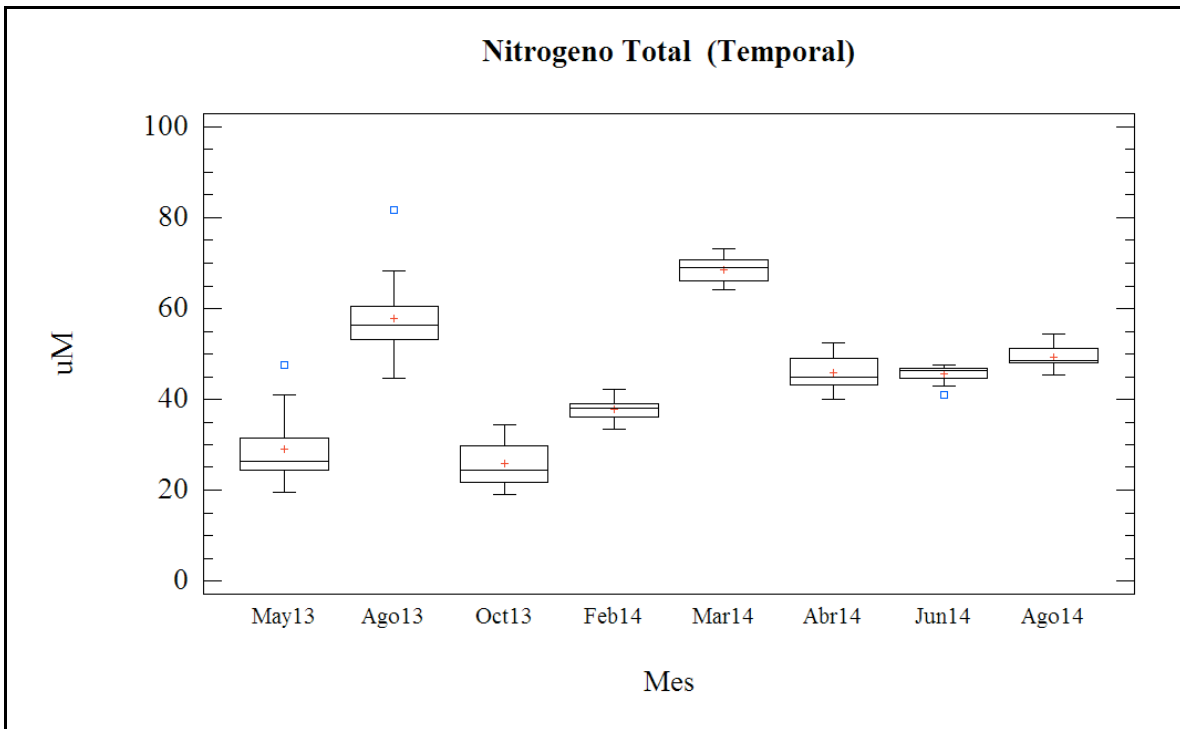


Figura 49. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) a través del tiempo.

Las concentraciones de fosfatos (PO₄) fueron en general bajas y ~ 56 % de todas las muestras estaban por debajo de 1 μM. Las concentraciones fluctuaron de manera significativa de acuerdo a los meses de muestreo, siendo el mes de octubre donde alcanzaron su punto máximo. No se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de PO₄ entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 0.93±0.76. Las concentraciones PO₄ durante la temporada de nortes fueron consistentemente más altos que la temporada de secas y lluvias y se observaron diferencias estadísticamente significativas entre temporadas (Fig. 50). La temporada que presentó diferencias estadísticamente significativas fue la temporada de nortes (Anexo 16).

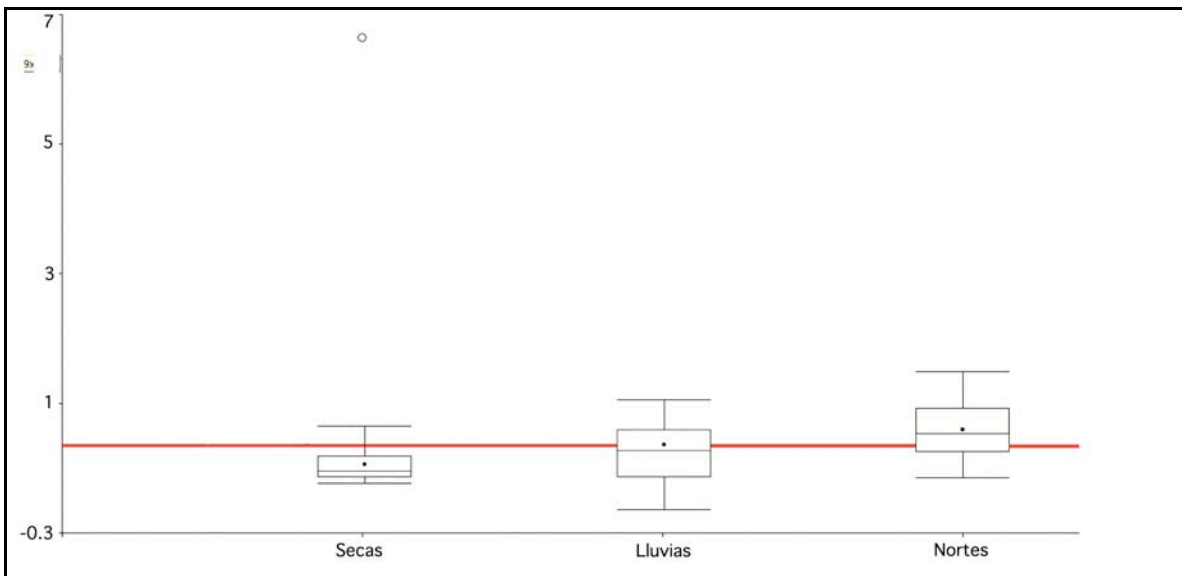


Figura 50. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) entre temporadas. Valor de $p < 0.0006$ y $H = 14.73$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de PO₄ para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de fosfatos (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.94±0.75, se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H=860.91$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 51). Los meses que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: septiembre13, octubre13, abril14 y agosto14 (Anexo 17).

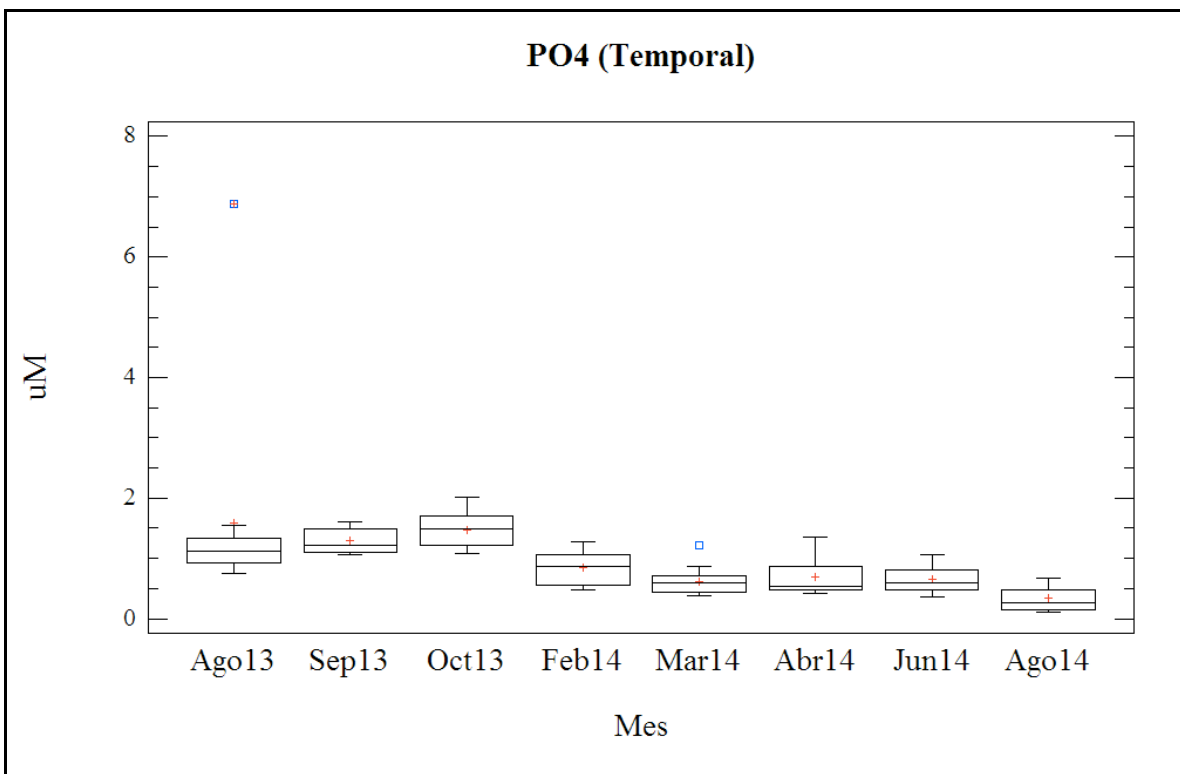


Figura 51. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) a través del tiempo.

Las concentraciones de fósforo total (FT) en ~ 70 % de todas las muestras estaban por debajo de 1 μM . En general las concentraciones de fósforo fueron bajas. Los niveles fluctuaron de manera significativa de acuerdo a los meses de muestreo. No se detectaron diferencias significativas en las concentraciones de FT entre transectos. Se analizaron los datos por temporada y se obtuvo un promedio de 0.64 ± 0.72 . Las concentraciones FT durante la temporada de nortes fueron consistentemente más altas que la temporada de secas y lluvias y no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre temporadas (Fig. 52).

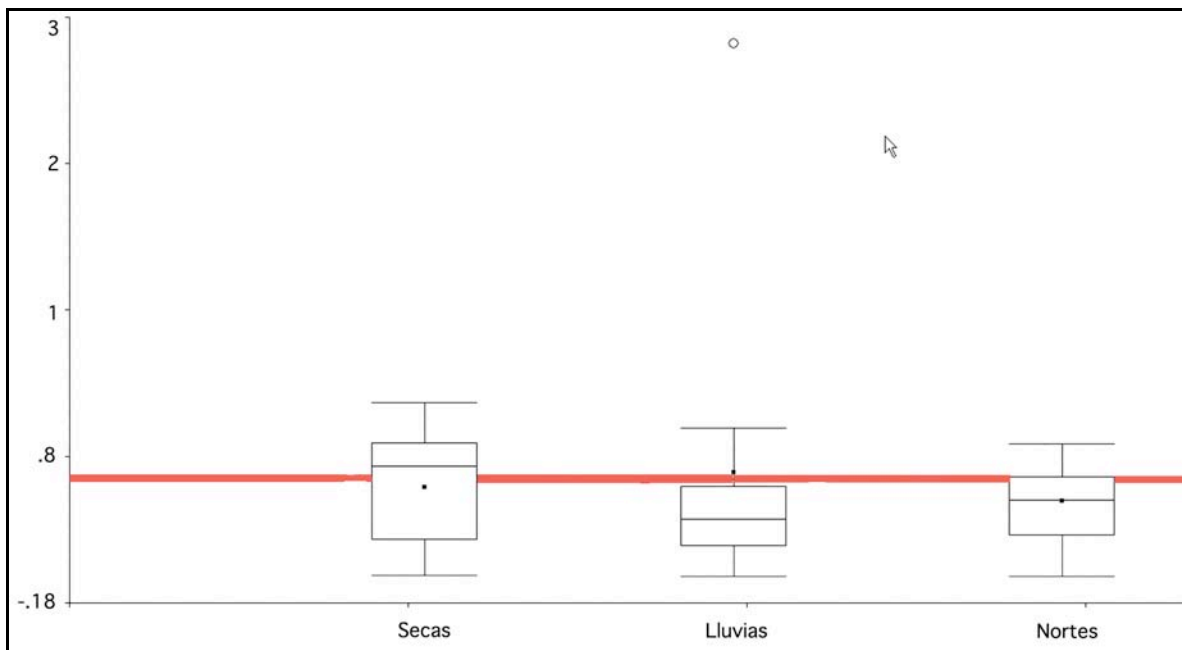


Figura 52. Gráfica de caja y bigotes de la concentración de fósforo total (μM) entre temporadas. Valor de $p < 0.4131$ y $H = 1.76$. La línea roja representa el valor de la media general.

Se calculó el promedio anual para las concentraciones de FT para observar el cambio temporal y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de fósforo total (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.73 ± 0.72 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p < 0.001$ y $H=51.24$, dado que p es menor a 0.05 las diferencias entre meses son estadísticamente significativas en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 53). Los meses de muestreo que presentaron diferencias estadísticamente significativas fueron: julio13 y abril14 (Anexo 18).

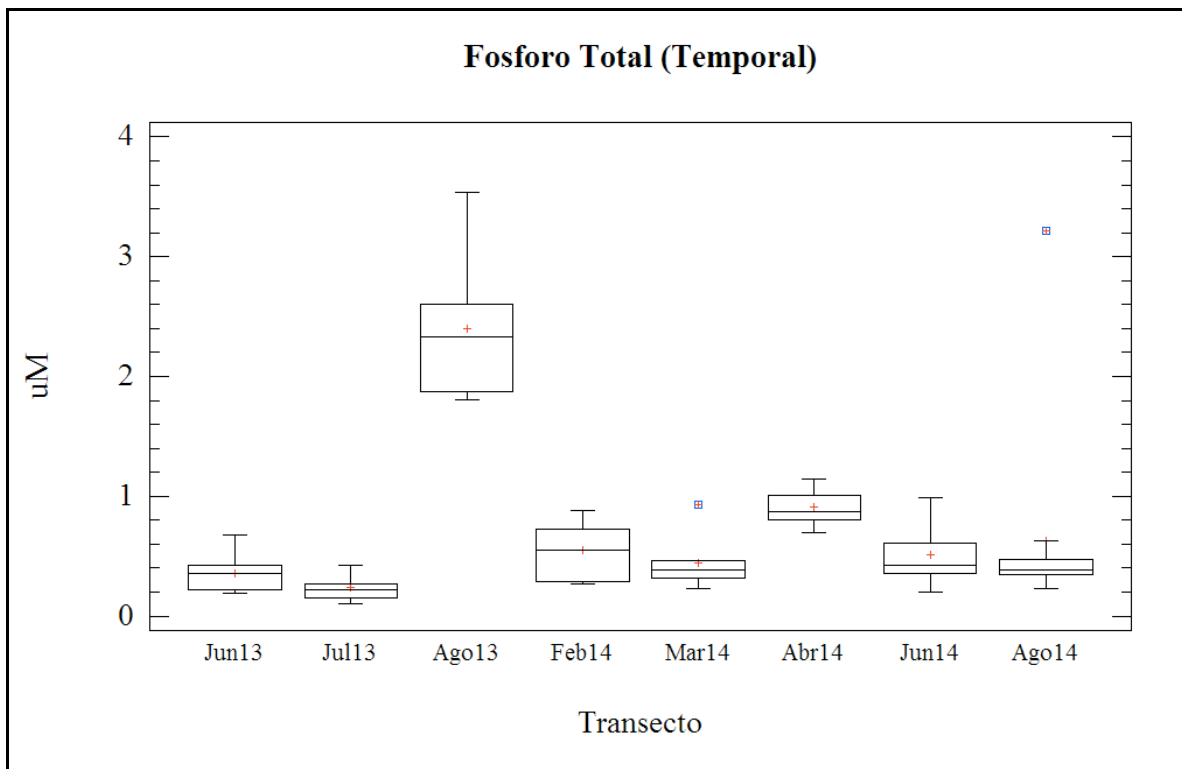


Figura 53. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de fósforo tota (μM) a través del tiempo.

De igual manera se obtuvo el promedio anual por transecto para observar el cambio espacial y se obtuvo lo siguiente: Las concentraciones de amonio (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 13.06 ± 11.90 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.998608$ y $H=1.96728$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 54). Las concentraciones de nitrito (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.73 ± 0.28 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.99837$ y $H=2.0337$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Figura 55). Las concentraciones de nitrato (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 31.39 ± 18.55 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.999398$ y $H=1.64915$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 56).

Las concentraciones de nitrógeno total (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 45.20 ± 14.25 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.997601$ y $H=2.21209$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Fig. 57). Las concentraciones de fosfatos (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.94 ± 0.75 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.958415$ y $H=4.35345$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Figura 58). Las concentraciones de fósforo total (μM) presentaron un promedio y desviación estándar de 0.738 ± 0.726 , se realizó una prueba de Kruskal-Wallis donde se obtuvo un valor de $p=0.714987$ y $H=7.9812$, dado que p es mayor a 0.05 no hay diferencias estadísticamente significativas entre los transectos en el 95.0% del nivel de confianza (Figura 59).

Además de los análisis de las tres especies de nitrógeno inorgánico individuales, también se analizó la suma para observar tendencias en el nitrógeno inorgánico total disuelto (DIN). La variación observada en las concentraciones de DIN (Fig. 60) está estrechamente relacionada con las fluctuaciones detectadas en las concentraciones de NH_4 , que era la principal especie de nitrógeno inorgánico durante casi todos los meses. El análisis de varianza indicó diferencias significativas entre los meses de muestreo. Los valores medios DIN en Akumal son 32.48 ± 23.94 y mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los meses de muestreo (Fig. 61).

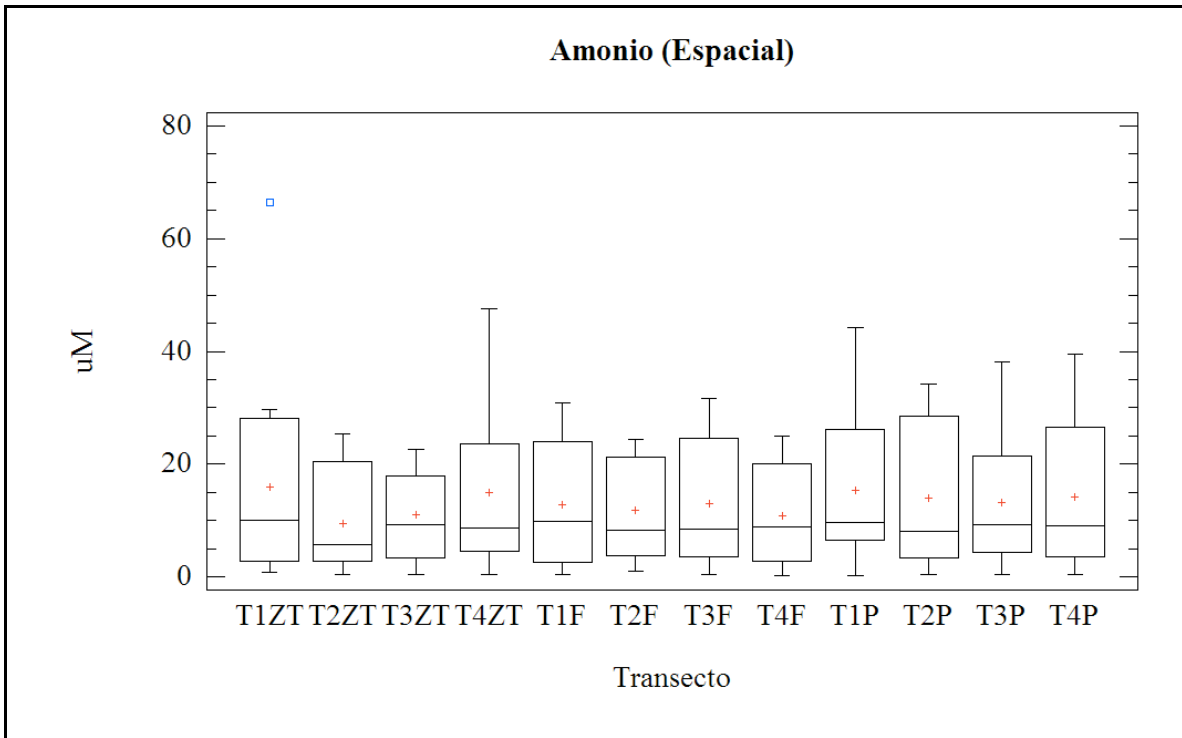


Figura 54. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de amonio (μM) a través del tiempo.

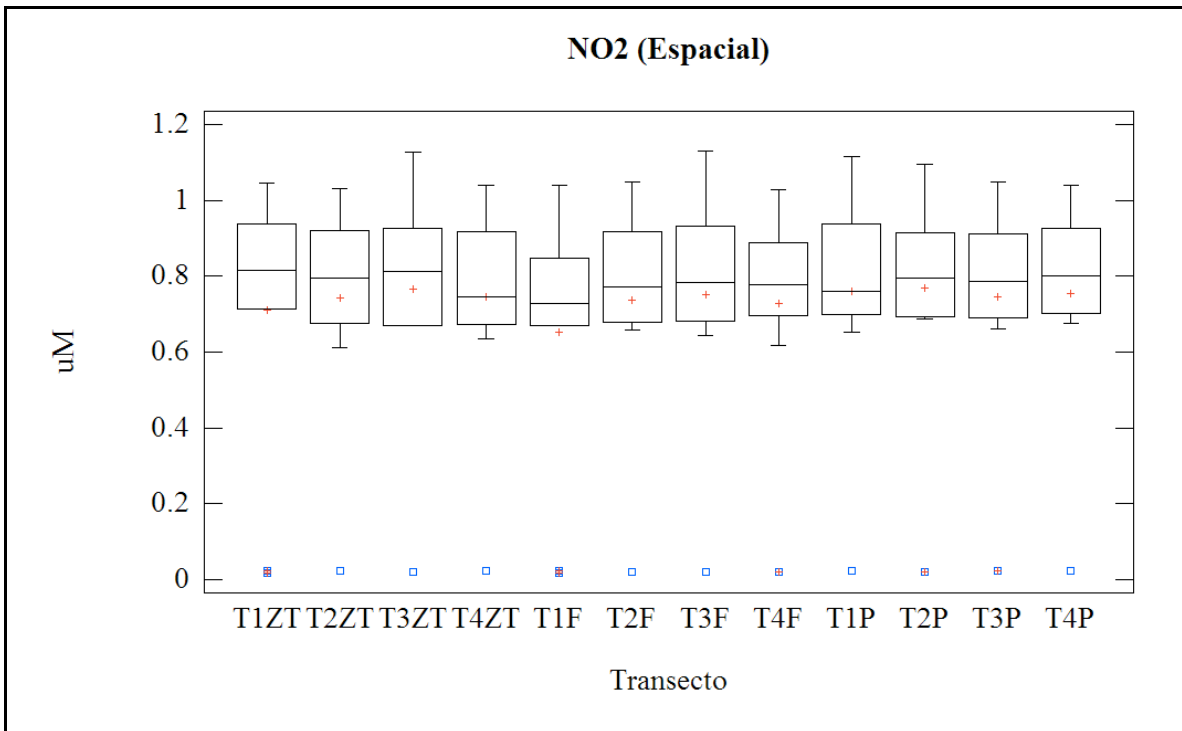


Figura 55. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitrito (μM) a través del tiempo.

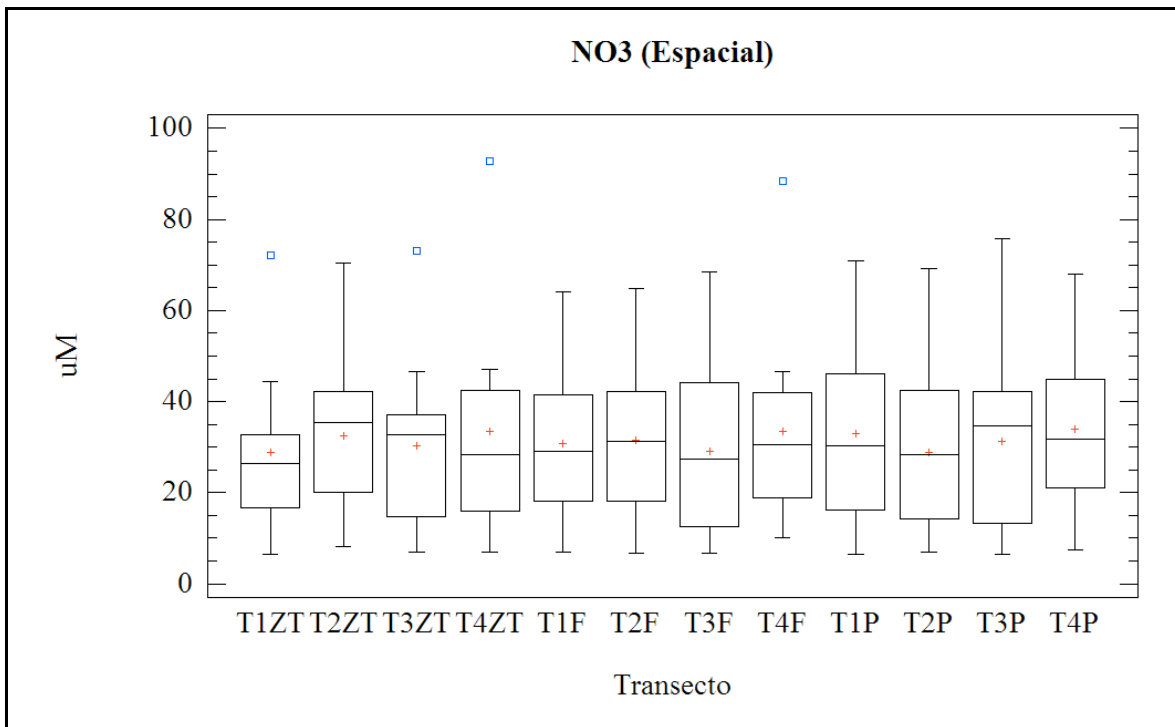


Figura 56. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitrato (μM) a través del tiempo.

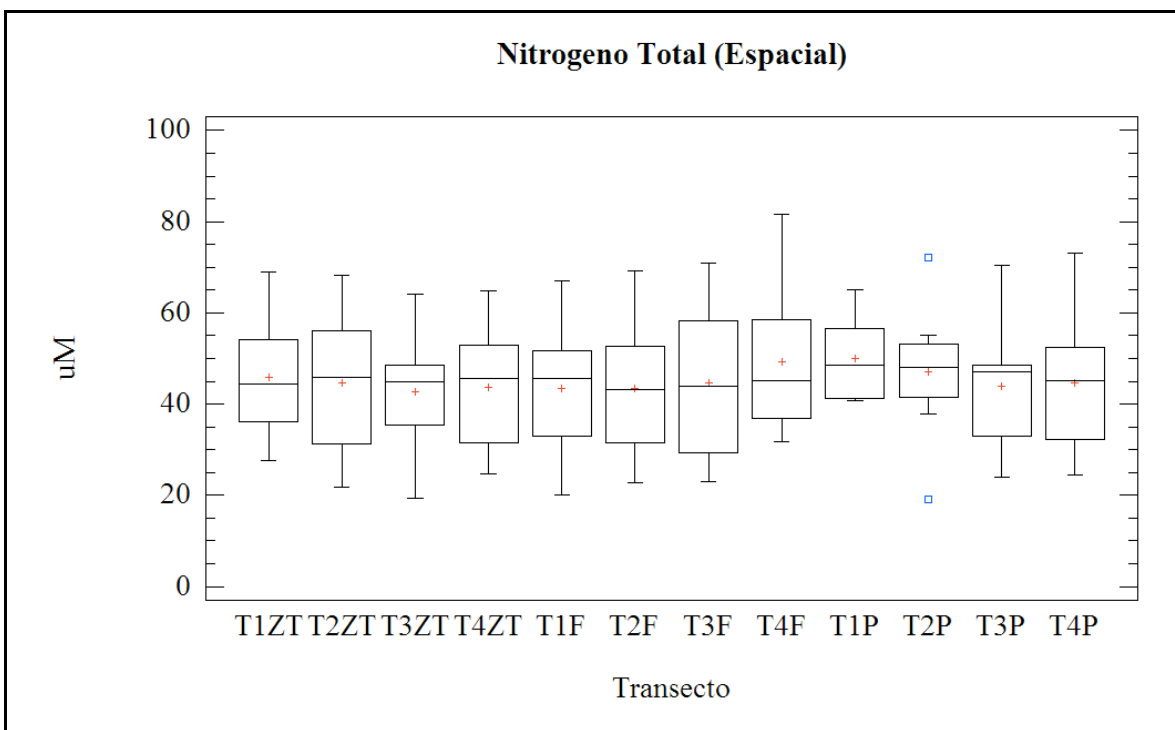


Figura 57. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de nitrógeno total (μM) a través del tiempo.

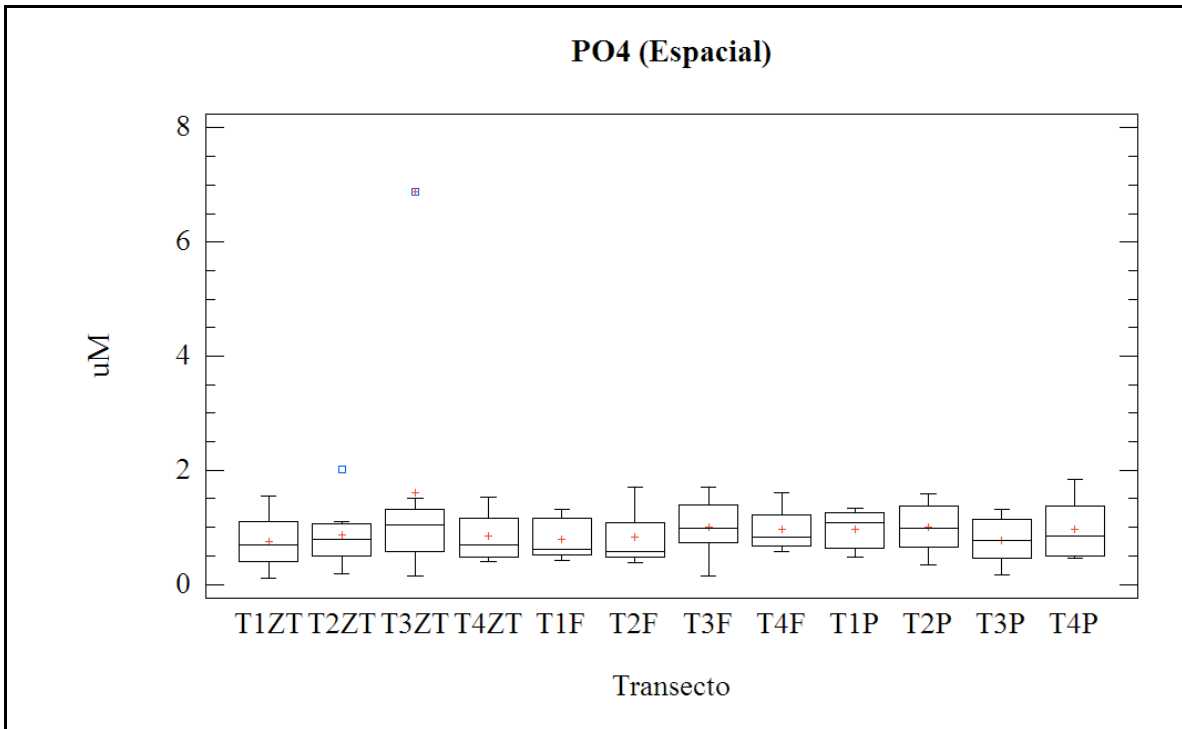


Figura 58. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de fosfatos (μM) a través del tiempo.

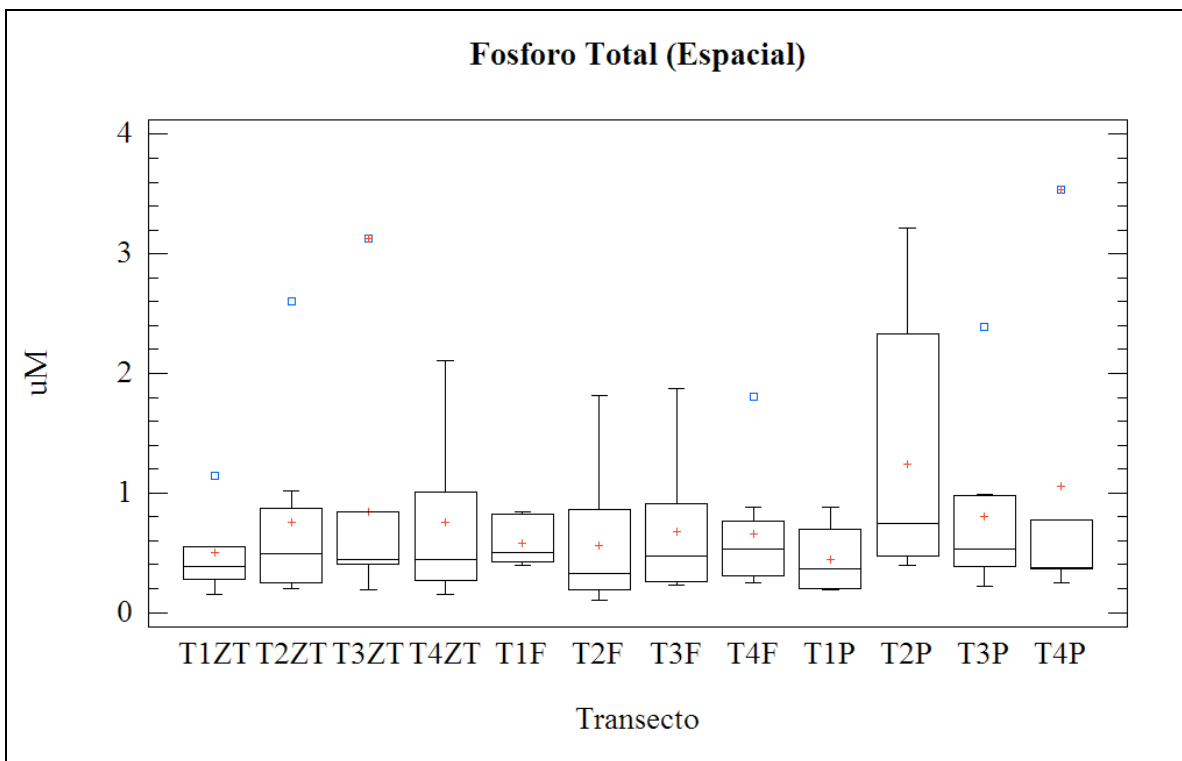


Figura 59. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración de fósforo total (μM) a través del tiempo.

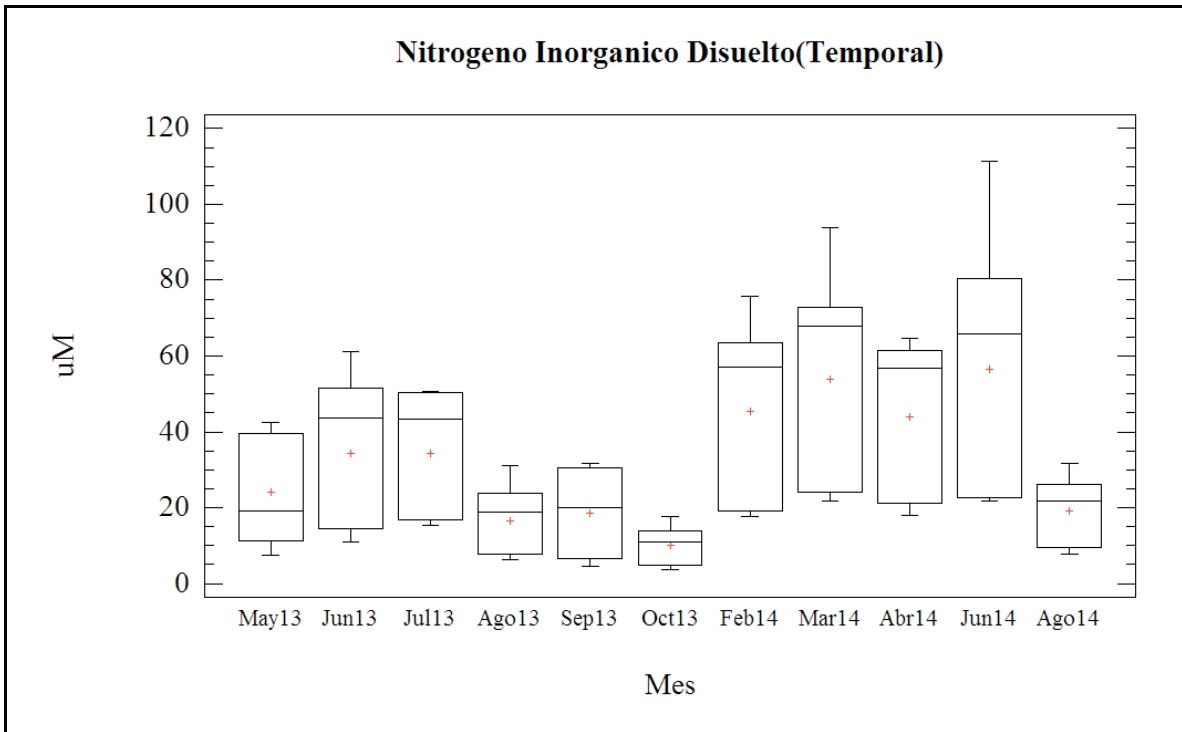


Figura 60. Gráfica de cajas y bigotes de la concentración (μM) de Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) a través del tiempo. Valor de $p < 0.05$, $H=54.104$. Se observan diferencias significativas entre los meses de muestreo.

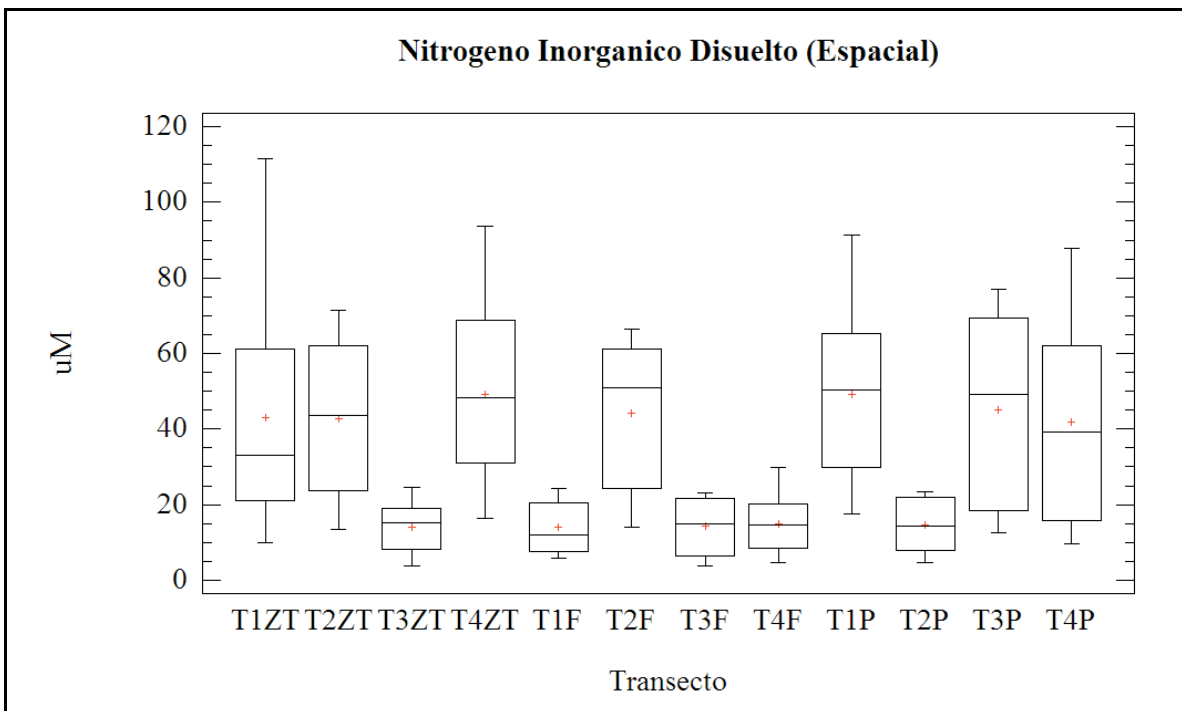


Figura 61. Valor de $p < 0.05$, $H=61.1926$. Se observan diferencias significativas entre los transectos.

9.3.3. Análisis Multivariados

Se realizaron análisis multivariados para variables biológicas y fisicoquímicas de manera independiente. Para establecer el comportamiento de cada una de las estaciones por zona arrecifal y transecto con cada uno de los indicadores evaluados se realizó un análisis de escalamiento multidimensional (MDS). Para detectar diferencias significativas se realizó un análisis de similitud (ANOSIM). Para reconocer los indicadores que contribuyeron a marcar las diferencias se aplicó un análisis SIMPER. Finalmente y con el fin de integrar las variables biológicas y fisicoquímicas, se realizó un análisis de redundancia (RDA) y así corroborar el comportamiento individual de los indicadores y la manera en la que influyen de acuerdo a la temporalidad y zonación arrecifal.

9.3.3.4. Indicadores Biológicos

Análisis de Escalamiento Multidimensional (MDS)

Los indicadores biológicos (coberturas bentónicas e incidencia de enfermedades) no mostraron grandes variaciones espaciales (Fig.62), ni variaciones temporales (Fig. 63). El comportamiento de los indicadores: Cobertura de algas pardas, algas filamentosas, coralinas incrustantes e incidencia de enfermedades (Fig. 64, 65 ,66 y 67), se pueden observar con mayor claridad en los diagramas generados por el MDS con un valor de estrés de 0.07, al asociarse de acuerdo a la zonación arrecifal y al tiempo de muestreo.

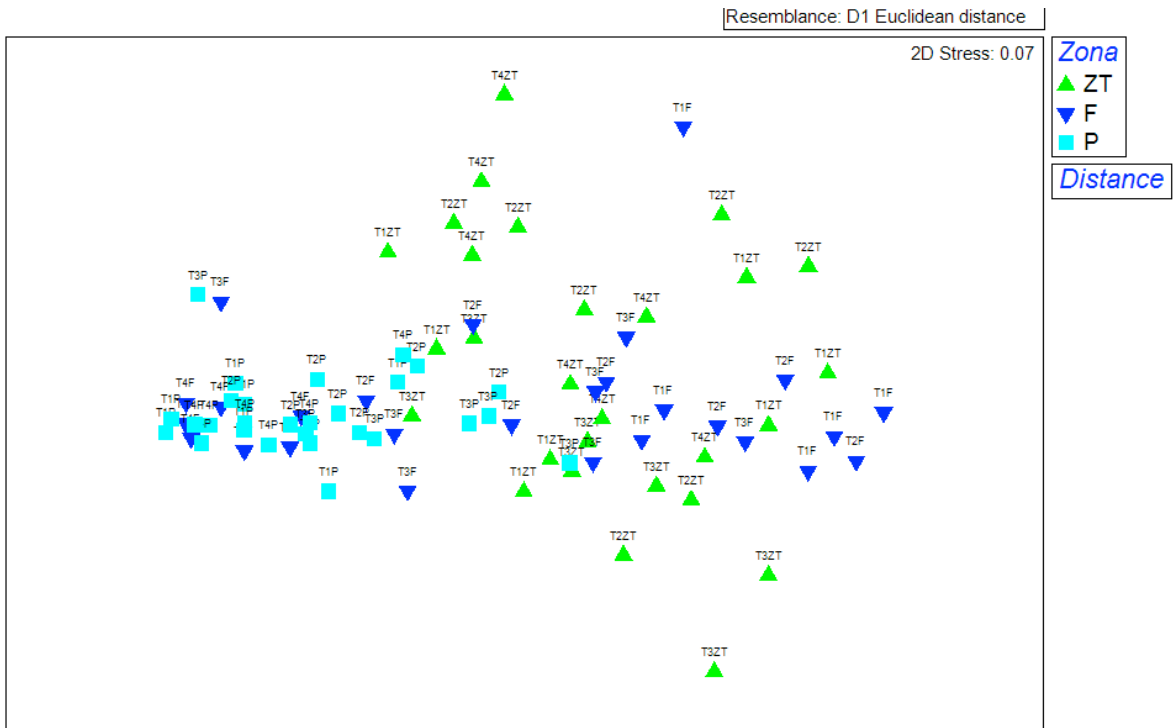


Figura 62. Diagrama MDS de las todas estaciones durante el periodo de muestreo por zona arrecifal y transecto, a partir de los indicadores biológicos: coberturas bentónicas e incidencia de enfermedades. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

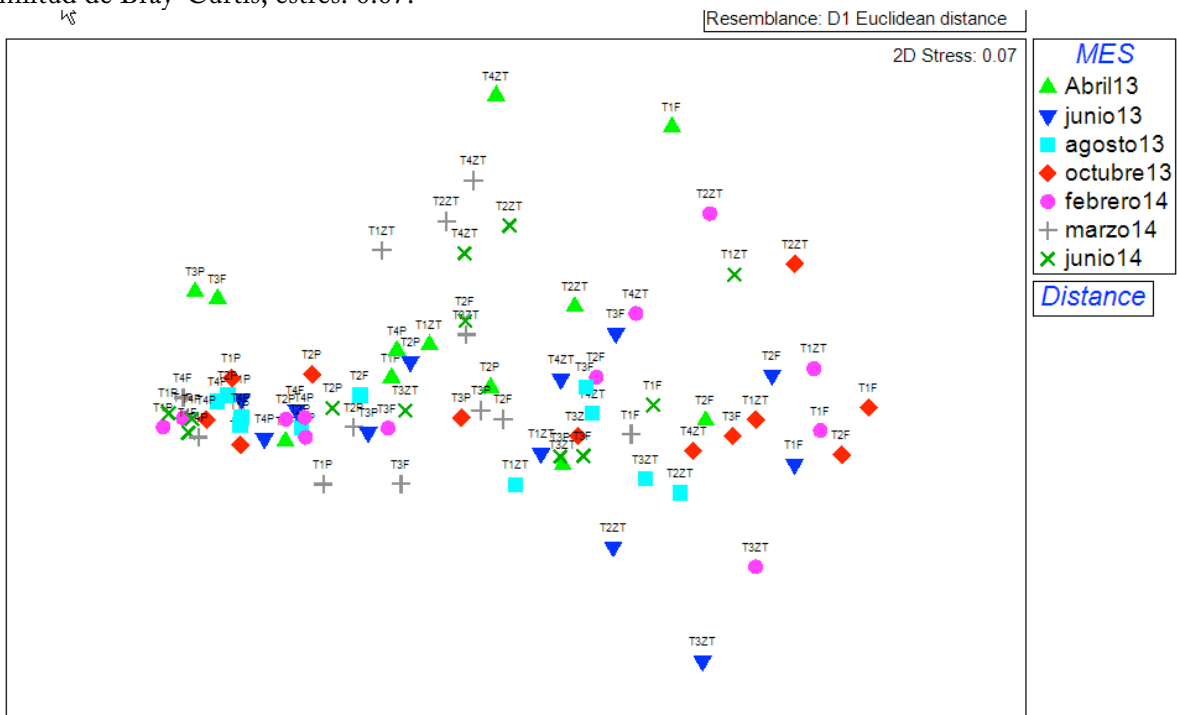


Figura 63. Diagrama MDS de todas las estaciones durante el periodo de muestreo (abril 2013-junio 2014) a partir de los indicadores biológicos: coberturas bentónicas e incidencia de enfermedades. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

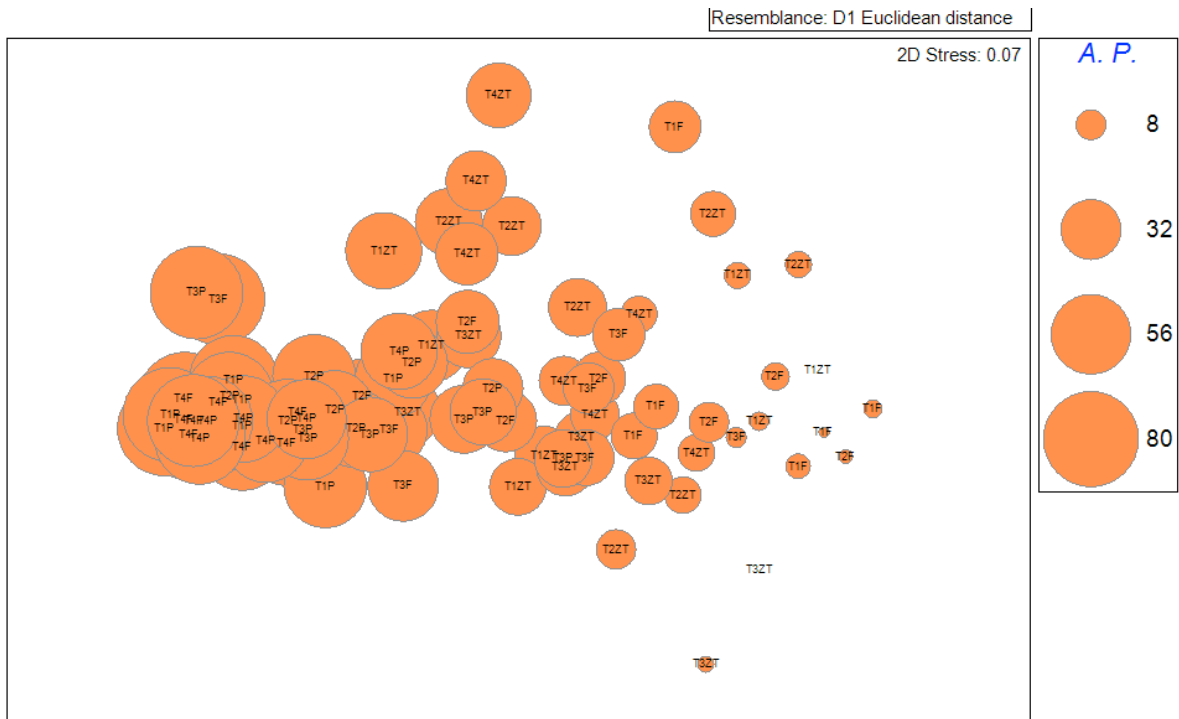


Figura 64. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas pardas A.P. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

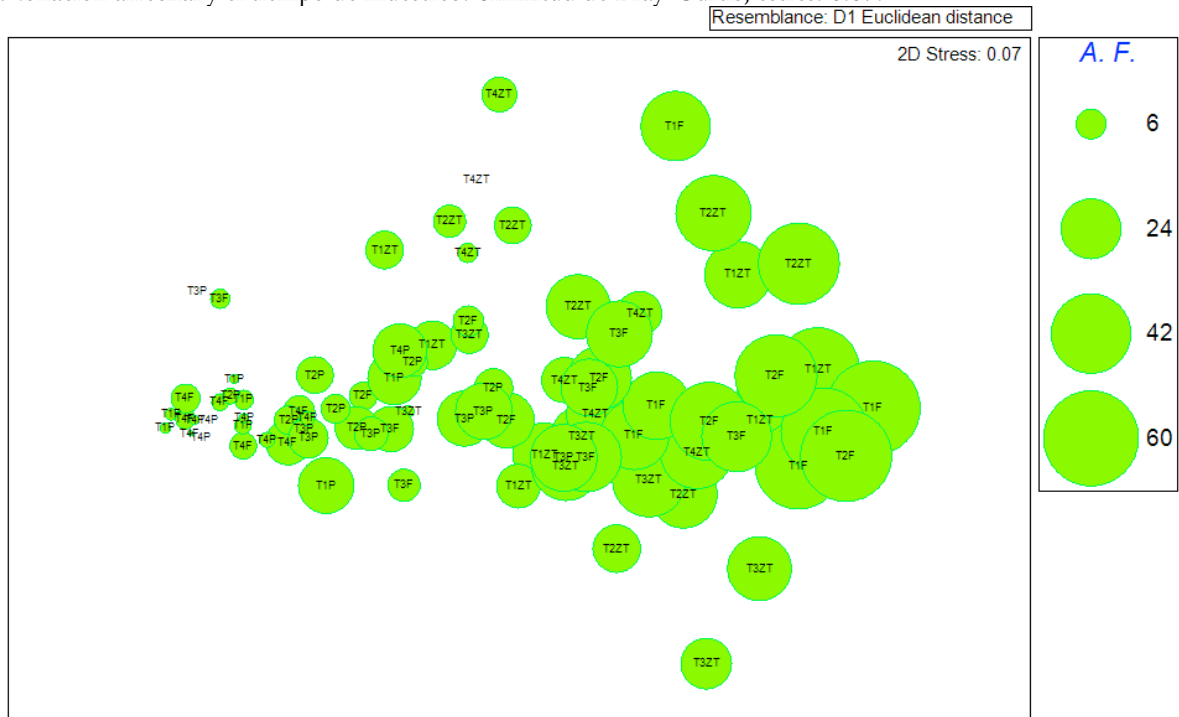


Figura 65. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas filamentosas A.F. (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

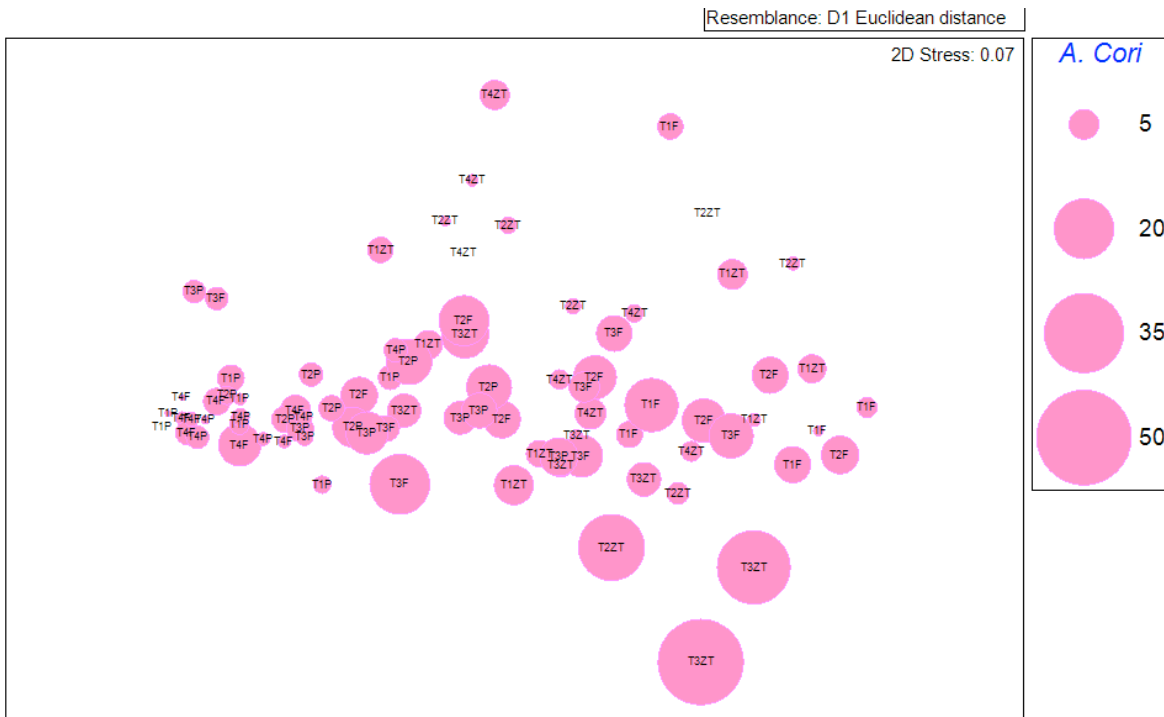


Figura 66. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la cobertura de algas coralinas incrustantes *A. Cori.* (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

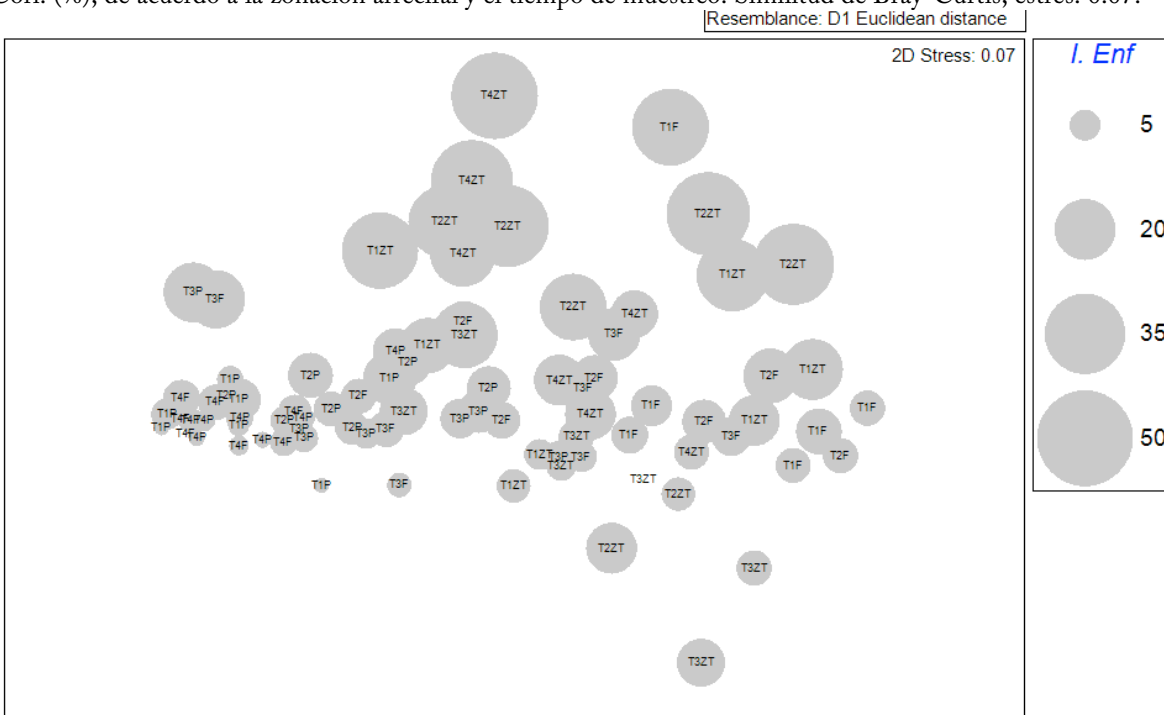


Figura 67. Diagrama MDS. Los círculos muestran la asociación de la incidencia en enfermedades *I. Enf.* (%), de acuerdo a la zonación arrecifal y el tiempo de muestreo. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.07.

Análisis de Similaridad de una vía (ANOSIM)

Se realizó un análisis de similaridad para determinar las diferencias en la cobertura bentónica por zona arrecifal., así como el número e incidencia de enfermedades. En este caso se realizaron 999 permutaciones en cada análisis. Con un valor de $R= 0.0111$ y $p=1\%$, no se encontraron diferencias significativas en el tiempo entre las zonas arrecifales y las coberturas (Tabla 6).

Tabla 6. Análisis de similaridad de una vía (ANOSIM) para el tiempo de muestreo de los indicadores biológicos.

Grupos	R estadístico	Nivel de Significancia %	Permutaciones posibles	Permutaciones actuales	>= Número observado
Junio13- agosto13	-0.006	37.7	1352078	999	376
Junio13- octubre13	-0.02	50	1352078	999	499
Junio13- febrero14	-0.044	76.1	1352078	999	760
Junio13- marzo14	0.019	25	1352078	999	249
Junio13- junio14	-0.049	83.6	1352078	999	835
Agosto13- octubre13	0.036	20.6	1352078	999	205
Agosto13- febrero14	-0.005	38.9	1352078	999	388
Agosto13- marzo14	0.027	23.4	1352078	999	233
Agosto13- junio14	-0.023	49.8	1352078	999	497
Octubre13- febrero14	-0.037	65.4	1352078	999	653
Octubre13- marzo14	0.143	3.8	1352078	999	37
Octubre13- junio14	0.039	20.4	1352078	999	203
Febrero14- marzo14	0.045	15.1	1352078	999	150
Febrero14 junio14	-0.041	71.3	1352078	999	712
Marzo14- junio14	-0.039	66.6	1352078	999	665

Análisis SIMPER

También se realizó un análisis SIMPER para establecer la contribución de cada indicador en el tiempo de muestreo. Este análisis muestra los indicadores bióticos en términos de su aportación a los valores de similaridad en el tiempo de muestreo por transecto (Tabla 7). El análisis muestra que el transecto que aporta más similaridad es el 4 con un porcentaje de similaridad de 64.05% y la similitud esta dada por la cobertura de algas pardas (AP) con un porcentaje de similaridad de 72.01% y una contribución de 72.01%.

Tabla 7. Indicadores abióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listados en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.

Transecto 1		
Porcentaje de similitud= 53.74%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
A.P.	37.55	37.55
A.F	26.93	64.48
No. Enf	14.08	78.57
I. Enf	12.26	90.83
Transecto 2		
Porcentaje de similitud= 60.03%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
A.P.	37.83	37.83
A.F.	18.81	56.64
No. De Enf	16.59	73.23
I. Enf	14.65	87.88
A. Cori	6.52	94.4
Transecto 3		
Porcentaje de similitud= 62.04%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
A.P.	43.28	43.28
A.F.	20.64	63.92
No. De Enf	10.79	74.71
I. Enf	10.15	84.87
A. Cori	8.95	93.81
Transecto 4		
Porcentaje de similitud= 64.05%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
A.P.	72.01	72.01
No. De Enf	10.26	82.27
I. Enf	6.65	88.92
A.F	4.59	93.51

Entre zonas arrecifales la del frente arrecifal (P) fue la que presentó mayor porcentaje de similitud con 75.85% y la similitud esta dada por las coberturas de algas pardas con un porcentaje de similitud de 77.33% y un porcentaje de contribución de 77.33% (Tabla 8).

Tabla 8. Indicadores bióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listados en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.

ZT		
Porcentaje de similitud= 60.42%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
A.P.	26.11	26.11
A.F.	24.74	50.85
I. Enf	20.08	70.93
No. De Enf	15.11	86.04
A. CarV	9.49	95.53
F		
Porcentaje de similitud= 57.63%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
A.P.	38.24	38.24
A.F.	24.02	62.27
No. De Enf	15.38	77.65
I. Enf	10.1	87.74
A. Cori	7.69	95.44
P		
Porcentaje de similitud= 75.85%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
A.P.	77.33	77.33
No. De Enf	7.39	84.72
I. Enf	5.25	89.97
A.F.	4.47	94.44

9.3.3.5 Indicadores Físicoquímicos

Análisis de Escalamiento Multidimensional (MDS)

El análisis MDS muestra el ordenamiento de las estaciones en cuanto a los siguientes indicadores: tasa de captura de sedimento, y nutrientes (figura 36), correspondientes cada una de las estaciones para cada zona arrecifal, con un valor de estrés de 0.1, suficiente para interpretar la distribución de los datos. Los indicadores no mostraron grandes variaciones espaciales (Fig.68), pero si temporales (Fig. 69).

El comportamiento de los indicadores: Tasa de captura de sedimento y nutrientes (Fig. 70 a 73), se pueden observar con mayor claridad en los diagramas generados por el MDS con un valor de estrés de 0.1, al asociarse de acuerdo a la zonación arrecifal y al tiempo de muestreo.

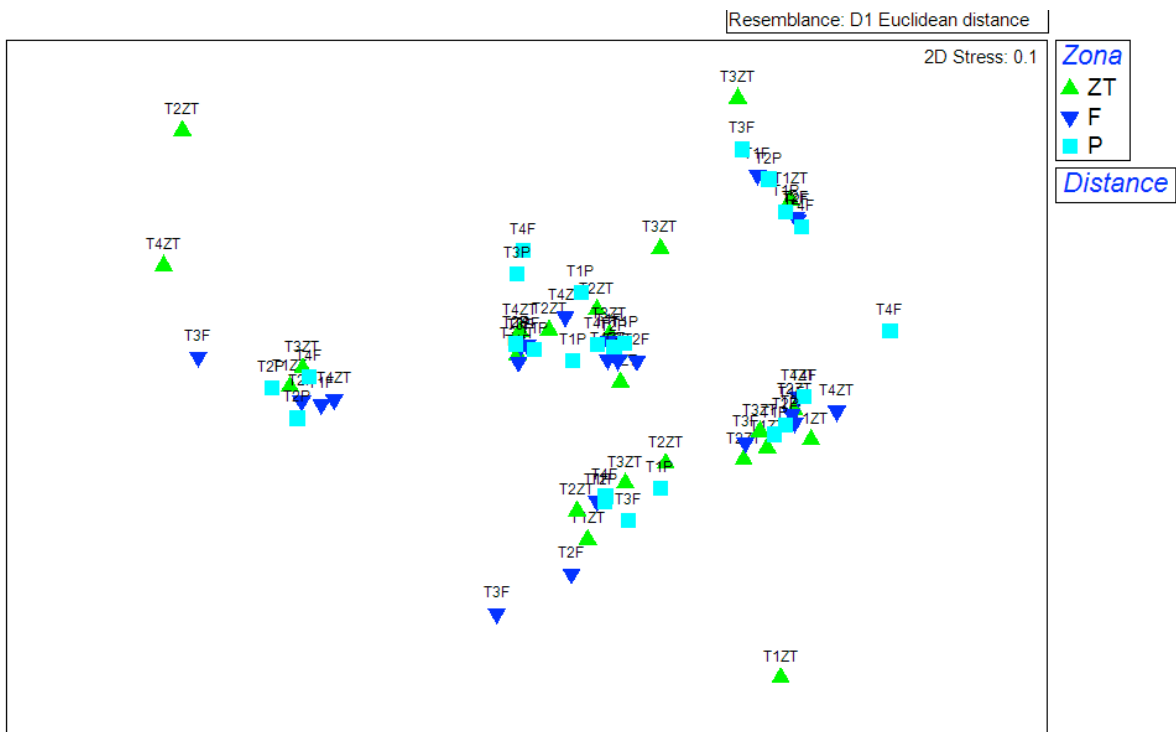


Figura 68. Diagrama MDS de todas las estaciones durante el periodo de muestreo por zona arrecifal y transecto, a partir de los indicadores físicoquímicos: tasa de captura de sedimento (Tcs) y nutrientes (NH₄, NO₂, NO₃, NT, PO₄, FT, NID). Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.1.

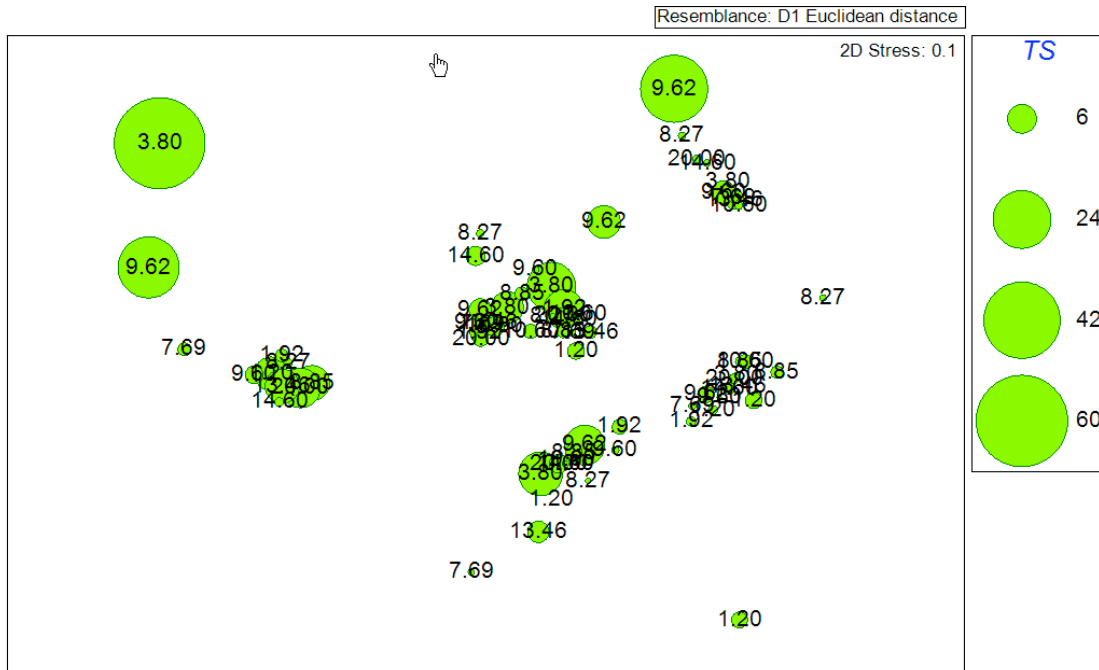


Figura 74. Diagrama MDS de comportamiento de la Tasa de captura de sedimento por porcentaje de cobertura coralina. Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.1.

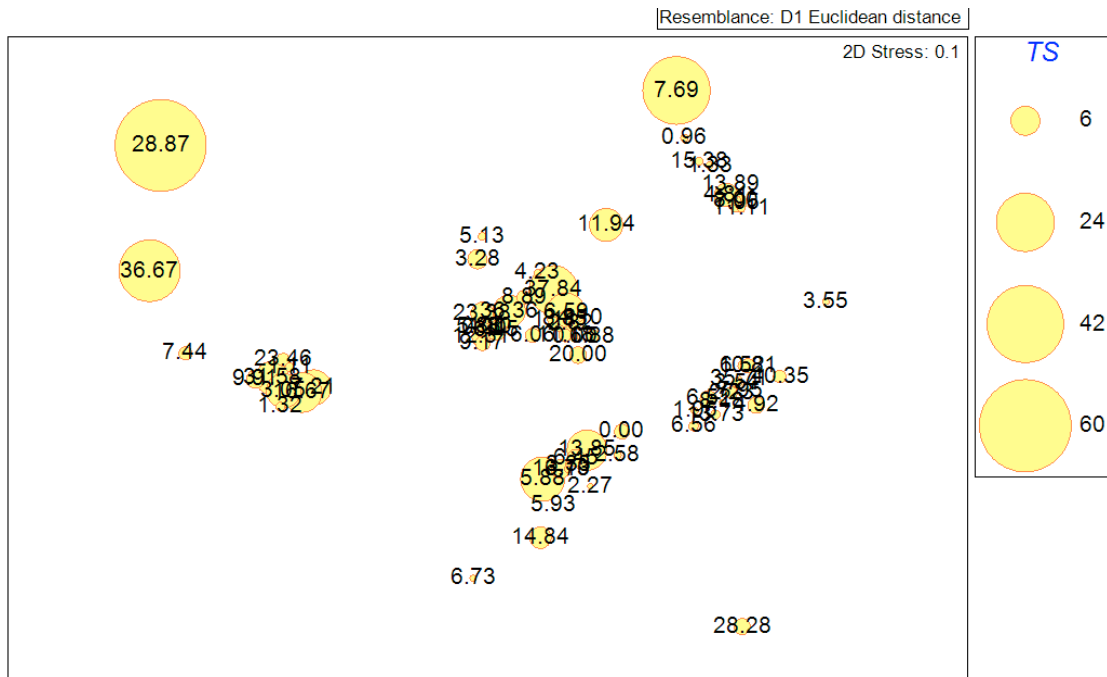


Figura 75. Diagrama MDS de comportamiento de las Tasas de captura de sedimento respecto a la incidencia de enfermedades (%). Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.1.

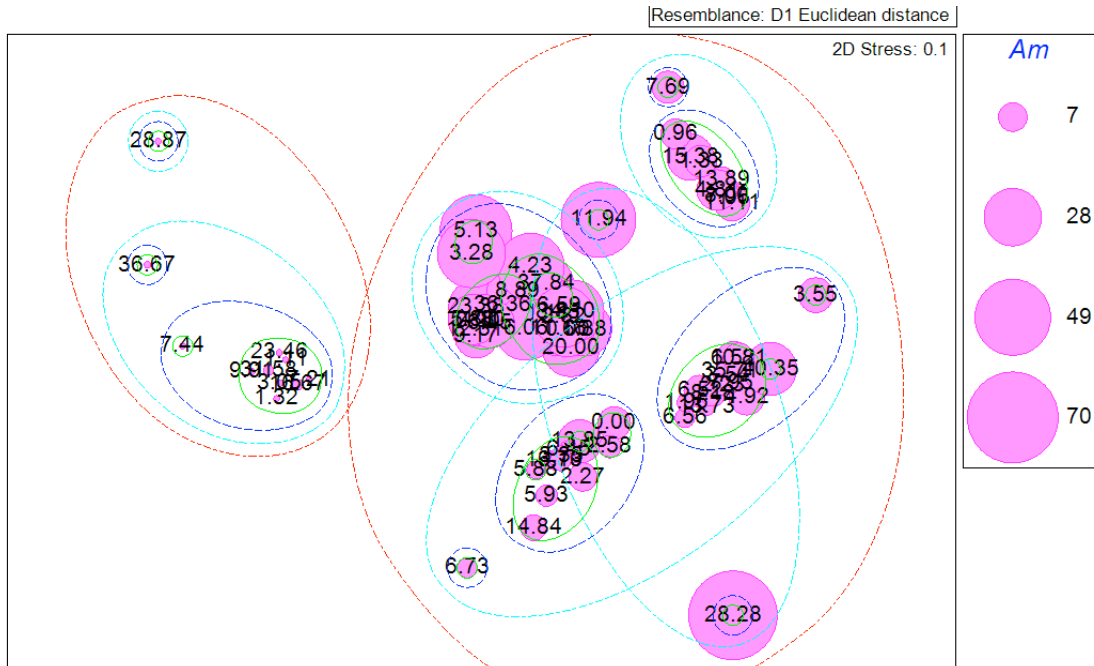


Figura 76. Diagrama MDS de comportamiento de la concentración de Amonio (uM) respecto a la incidencia de enfermedades (%). Similitud de Bray-Curtis, estrés: 0.1.

Análisis de Similaridad de una vía (ANOSIM)

Se realizó un análisis de similaridad para determinar las diferencias en los parámetros fisicoquímicos por zona arrecifal. En este caso se realizaron 999 permutaciones en cada análisis. Con un valor de $R = 0.765$ y $p = 1\%$, se encontraron diferencias significativas en el tiempo entre las zonas arrecifales y las tasas de captura de sedimento y concentración de nutrientes (Tabla 9).

Tabla 9. Análisis de similaridad de una vía (ANOSIM) para el tiempo de muestreo de los indicadores fisicoquímicos.

Grupos	R estadístico	Nivel de Significancia %	Permutaciones posibles	Permutaciones actuales	>=Numero observado
junio13-agosto13	0.888	0.1	1352078	999	0
junio13-octubre13	0.656	0.1	352716	999	0
junio13-febrero14	0.821	0.1	1352078	999	0
junio13-marzo14	0.968	0.1	1352078	999	0
junio13-junio14	0.79	0.1	1352078	999	0
agosto13-octubre13	0.7	0.1	1352078	999	0
agosto13-febrero14	0.866	0.1	1352078	999	0
agosto13-marzo14	0.851	0.1	1352078	999	0
agosto13-junio14	0.764	0.1	1352078	999	0
octubre13-febrero14	0.991	0.1	1352078	999	0
octubre13-marzo14	0.961	0.1	1352078	999	0
octubre13-junio14	0.857	0.1	1352078	999	0
febrero14-marzo14	0.827	0.1	1352078	999	0
febrero14-junio14	0.535	0.1	1352078	999	0
marzo14-junio14	0.619	0.1	1352078	999	0

Análisis SIMPER

También se realizó un análisis SIMPER para establecer la contribución de cada indicador en el tiempo de muestreo. Este análisis muestra los indicadores abióticos en términos de su aportación a los valores de similaridad en el tiempo de muestreo por transecto (Tabla 10).

El análisis muestra que el transecto que aporta más similaridad es el 3 con un porcentaje de 61.4% y la similaridad esta dada por la concentración de Nitrógeno total (NT) con un porcentaje de 49.39% y una contribución de 49.39%.

Tabla 10. Indicadores abióticos que causan la similaridad en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.

Transecto 1		
Porcentaje de similitud= 54.12%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
NT	52.22	52.22
NO3	25.27	77.48
Am	18.7	96.19
Transecto 2		
Porcentaje de similitud= 59.68%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
NT	40.85	40.85
NO3	40.22	81.06
Am	13.79	94.85
Transecto 3		
Porcentaje de similitud= 61.4%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
NT	49.39	49.39
NO3	34.88	84.26
Am	10.97	95.24
Transecto 3		
Porcentaje de similitud= 57.08%		
Indicadores	Contribución %	%Ac
NT	44.49	44.49
NO3	38.82	83.31
Am	11.99	95.31

Entre zonas arrecifales la del frente arrecifal (F) fue la que presentó mayor porcentaje de similitud con 59.73% y la similitud esta dada por el indicador de nitrógeno total con un porcentaje de similitud del 45.71% y una contribución de 45.71%. Tabla 11.

Tabla 11. Indicadores abióticos que causan la similitud en el tiempo de muestreo basados en la similitud de Bray-Curtis. Los indicadores están listadas en orden ascendente de acuerdo al porcentaje de contribución. La columna de la derecha (% Ac) refleja el porcentaje acumulativo de contribución de cada cobertura.

ZT		
Porcentaje de similitud= 57.73%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
NT	53.1	53.1
NO3	28.07	81.18
Am	11.76	92.93
F		
Porcentaje de similitud= 59.73%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
NT	45.71	45.71
NO3	36.24	81.95
Am	13.78	95.73
P		
Porcentaje de similitud= 58.79%		
	Contribución	
Indicadores	%	%Ac
NT	40.31	40.31
NO3	40.11	80.41
Am	15.56	95.97

Análisis de Redundancia (RDA)

Se realizó un análisis de todas las muestras entre indicadores fisicoquímicos (Tcs, nutrientes y temperatura) y los indicadores biológicos (cobertura de algas y porcentaje de incidencia de enfermedades). Los eigenvalores se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Análisis de Redundancia (RDA). Eigenvalores de los cuatro ejes y valores de correlación de variables ambientales (Tcs, nutrientes y temperatura) y las variables especies (cobertura de algas y porcentaje de incidencia de enfermedades).

Ejes	1	2	3	4	Varianza total
Eigenvalor	0.14	0.025	0.613	0.222	1
Valores de correlación > especies/ambientales >	0.457	0.275	0	0	
% Varianza acumulada					
Especies	14	16.5	77.8	100	
Especies/ambientales	84.9	100	0	0	
Suma de eigenvalores					1
Suma de eigenvalores canónicos					0.165

La mayoría de las estaciones (60%) agrupadas en el eje superior e inferior izquierdo tienen una importante asociación con la cobertura de algas, la temperatura y el fósforo total. El 42% de las muestras agrupadas en estos ejes coinciden con las muestreadas durante la temporada de nortes (febrero_2014) y la mayoría de las estaciones corresponden a la zona de transición.

Las estaciones agrupadas en el eje superior e inferior derecho, tienen una importante asociación con la tasa de captura de sedimento (TCS), a las diferentes especies de nitrógeno (AMONIO, DIN, NO₂ y NO₃) y al porcentaje de incidencia de enfermedades. El 40% de las estaciones presentes corresponden a las del frente arrecifal y el 38% de las muestras agrupadas en estos ejes coinciden con las muestreadas durante la temporada de secas (mayo_2013).

Se observó que la concentración de amonio y la tasa de captura de sedimento son las variables que más contribuyen a la variación espacio-temporal de los indicadores asociados a la degradación arrecifal en Akumal (Fig. 77).

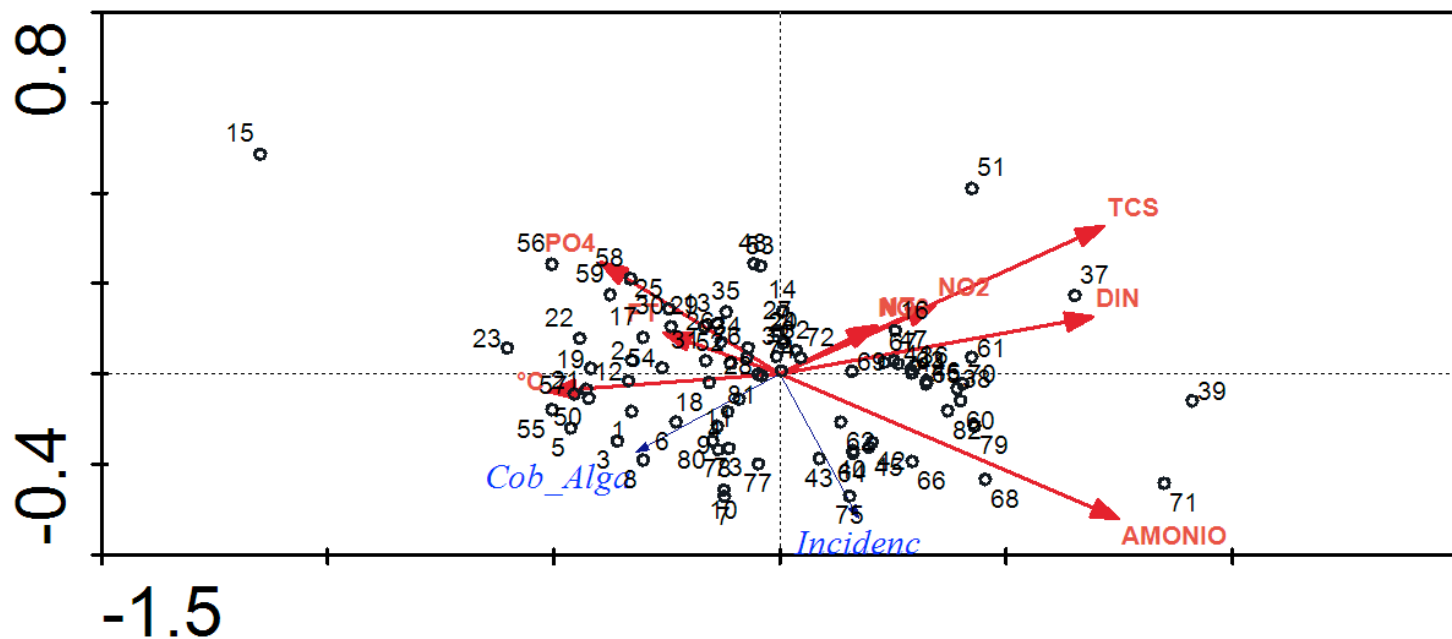


Figura 77. Triplot RDA variables ambientales, especies y estaciones. Variables ambientales: TCS= tasa de captura de sedimento, DIN= nitrógeno inorgánico disuelto, NO2= nitrito, NO3= nitrato, PO4= fosfato, FT= fósforo total, °C= temperatura de agua de fondo, NT= nitrógeno total y variables especies: Cob_Alga= cobertura de algas y Incidenc= % incidencia de enfermedades. Las estaciones para mayo_2013 están representadas del 2-13, agosto_2013: 14-24, octubre_2013: 25-36, febrero_2014: 37-48, marzo_2014: 49-60, mayo_2014: 61-71, junio_2014: 72-83.

Resumen de resultados

Durante el periodo de estudio, el arrecife estuvo expuesto a tasas de sedimentación de 0.13 a 83.7 mg/cm²/día, sólo el 13% de las muestras presentaron de 10 a 50 mg/cm²/día que confieren al arrecife estrés moderado a severo y el 1% de las muestras sobrepasan los 50 mg/cm²/día considerado un nivel crítico. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas espacio-temporales; a nivel de zona, la zona de transición, frente y pendiente presentaron diferencias; a nivel de transecto, las diferencias estuvieron dadas por el transecto 2; a nivel temporal las diferencias estuvieron dadas por los meses de septiembre13, octubre13, marzo14 y mayo14.

La cobertura bentónica estuvo dominada por algas pardas y filamentosas representando en ocasiones más del 50% de la cobertura total, mientras que sólo el 5-9% corresponde a corales pétreos. La especies más abundantes corresponden a *Undaria agaricites* con una cobertura del 20.81% del total de corales, *Orbicella faveolata* con 15.61% y *Siderastrea siderea* con 13.02%. De acuerdo a lo observado en los censos visuales de los videotransectos, se obtuvo una mayor cobertura coralina en la zona del frente (12.5%), pendiente (10.77%) y zona de transición (4.13%) respectivamente, las pruebas estadísticas no arrojaron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la cobertura coralina por zonas arrecifales ($p=0.139$).

El amonio (NH⁴-N) fluctuó entre los 0.022 y 0.399 y registró un promedio anual de 0.107 mg/L; se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para la temporada de lluvias y nortes en los meses de febrero14, marzo14, abril14 y junio14. Los nitritos (NO²) fluctuaron entre los 0.0002 y 0.0158 con un promedio anual de 0.0092 mg/L; se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para la temporada de secas y nortes en los meses de mayo13 y abril14. Los nitratos (NO³) fluctuaron entre los 0.089 y 0.397 con un promedio anual de 0.220 mg/L; se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas para la temporada de nortes en los meses de octubre13 y marzo14. En general el amonio registró valores más altos en temporada, en contraste con los valores de nitratos y nitritos que presentaron los valores más elevados durante la temporada de lluvias que corresponde con el aumento de escorrentías y precipitaciones de la zona. Los resultados obtenidos en esta investigación evidencian elevadas concentraciones de amonio, nitritos y nitratos, lo que puede generar un impacto negativo en el arrecife de coral por problemas asociados a eutrofización

10. DISCUSIÓN

Los arrecifes coralinos del Caribe han sufrido una degradación masiva desde principios de los años 80 debido a una extensa variedad de impactos relacionados a actividades humanas. Las consecuencias de estos impactos incluyen el colapso de las poblaciones coralinas, el incremento de macroalgas, eventos de blanqueamiento masivo y brotes de enfermedades, afectando de esta manera la resiliencia de los arrecifes coralinos frente a fenómenos naturales, como los huracanes (Jackson *et al.* 2012). Gardner *et al.* reportaron para el 2003 que la cobertura de corales vivos en el Caribe había sido reducida de una media del 50% en los años 70 a tan sólo 10% en la actualidad. Para el arrecife de Akumal, Garza-Pérez (1999) reporta una cobertura coralina de 23.3% y alta cobertura algal de 28.14%, por su parte López-Patoni reportó para el 2000 una cobertura coralina promedio de 16.75% y cobertura de macroalgas de 15.05%, para el año 2010 reportó una cobertura coralina de 10.60% y cobertura de macroalgas de 39.66% .

De manera similar para el presente estudio se estimó que la comunidad bentónica en el arrecife de Akumal está dominada por el grupo de las macroalgas con un promedio del 68.48% de la cobertura bentónica total y un promedio en la cobertura coralina del 7.85%. Esto implica una disminución de la cobertura coralina de 66% en un período de 13 años. De acuerdo a las zonas arrecifales se observaron coberturas coralinas promedio, en la zona de frente arrecifal (12.5%), posteriormente la pendiente (10.77%) y por último la zona de transición (4.13%), sin embargo las diferencias no son estadísticamente significativa ($p=0.139$). Los resultados observados concuerdan con los resultados obtenidos por López-Patoni en la misma zona en el 2010 y con Borges-Souza (2003) que reportan porcentajes similares a los obtenidos en este estudio para un arrecife de Mahahual siendo el frente la zona arrecifal con la mayor cobertura coralina. De acuerdo a Sorokin (1993), alrededor del 16% de las coberturas coralinas son consideradas arrecifes en buena condición. Perry *et al.* (2013) reportan que una cobertura menor al 10% se convierte en una amenaza potencial para el decline del arrecife, por lo que podemos decir que de acuerdo a la baja cobertura coralina, el arrecife de Akumal se encuentra en estado crítico. Esto coincide con lo reportado por López-Patoni en su trabajo del 2010 con base en un análisis decadal (2000-2010) donde establece que el arrecife de Akumal se encuentra en nivel crítico.

La especie *Undaria agaricitis* es la especie dominante con 21% del total de las especies coralinas registradas. Otras especies dominantes son *Orbicella faveolata* con un promedio del 17% de la

cobertura total, *Porites astreoides* con 12.58%, *Orbicella annularis* con 10.16% y *Siderastrea siderea* con el 7.5%. Borges-Souza (2003) reportó que la comunidad bentónica en el arrecife Akumal estaba dominada por *Orbicella annularis*, *Undaria agaricites* y *Siderastrea siderea* como los principales componentes estructurales. Hernández-Landa (2004) reportó como géneros dominantes a *Diploria* y *Montastrea* y para el 2014 López-Patoni reportó como géneros dominantes a *Siderastrea* (19%), *Undaria* (16%), *Porites* (12%). Otros estudios en la región del Caribe, principalmente en arrecifes someros, presentan similares patrones de distribución y composición específica (Liddell *et al.*, 1987; Jordán, 1989; Muñoz-Chagín *et al.*, 1993; Bak *et al.*, 1995; McField, 2001), reportando alta abundancia de macroalgas, alta mortalidad coralina y poca cobertura de tejido escleractinio vivo (Garza-Pérez, 1999; Ruiz-Zárate, 2000, Hernández-Landa, 2001). Los arrecifes de coral son un grupo diverso y presentan una amplia gama de respuestas a los cambios ambientales, y mientras las poblaciones de algunas especies de coral probablemente disminuyan, otros pueden permanecer estables o incluso aumentar (Alvarez-Filip *et al.* 2013). En 1973, Milleman reporta que el 90% de la biomasa de coral pertenecía a seis géneros *Orbicella*, *Acropora*, *Porites*, *Diploria* y *Pseudodiploria*, *Siderastrea* y *Undaria*. En 1998, Steneck y Lang reportan al arrecife de Akumal en buena condición con tasas de mortalidad bajas, coberturas de coral vivo relativamente altas y abundancia de especies coralinas, lo que contrasta con este estudio donde sólo cuatro géneros fueron los más representativos y en el que se obtuvieron una alta cobertura algal y baja cobertura coralina. Algunas de las razones que se han considerado en la disminución de los corales y crecimiento de algas son las actividades recreativas, pesca, y contaminantes asociados con las descargas de agua subterránea en la zona costera de Akumal, (Mullen *et al.* 2006; Alvarez-Filip *et al.* 2009). La capacidad de los organismos de resistir enfermedades puede estar determinada por condiciones ambientales fisiológicas, nutricionales y, posiblemente, factores genéticos (Santavy *et al.*, 1999; Peters, 1984). Antonius (1981b), reconoció que las especies de corales en el Caribe muestran diferentes susceptibilidades a las enfermedades. Esto puede estar relacionado con diversos factores, como la capacidad de cada especie de resistir diferentes patógenos, la variabilidad espacio-temporal de parámetros ambientales y la capacidad de resistir dicha variaciones. Para este estudio la incidencia de enfermedades promedio fue de 9.81%. Según Healthy Reefs (2012) este porcentaje se encuentra dentro del intervalo de los valores críticos (Anexo 19). Se pudo registrar el comportamiento

temporal de la incidencia de las enfermedades, asociado a los diferentes regímenes de aporte de agua freática durante las temporadas. En la figura 31, se puede apreciar el aumento de la incidencia de las enfermedades después de la temporada de lluvias y durante la temporada de secas. Durante la temporada de secas se registró un promedio de incidencia de enfermedades del 11.45%, el cual disminuyó en la temporada de lluvias con un valor promedio de 6.32%, y alcanzó los valores máximos durante la temporada de nortes con un valor promedio de 11.84%. Respecto a la distribución espacial, se observó que las estaciones con mayor porcentaje de incidencia de enfermedades es en la zona de transición. Esta zona presenta los registros más altos en cuanto a Tcs, presenta el porcentaje más bajo en cuanto a cobertura coralina y presenta las concentraciones más altas de nitrógeno inorgánico disuelto (NID), éste último se utiliza en este estudio como proxy de la magnitud de la actividad antropogénica en la zona costera. Diversos estudios han encontrado que muchos de los patógenos causantes de las enfermedades coralinas están directamente correlacionadas a los desechos fecales humanos provenientes de las aguas residuales (Lipp *et al.* 2002, Lipp & Griffin 2004, Kaczmarzsky *et al.* 2005, Vos & Richardson 2006) las cuales además de crear condiciones para la aparición de epizootias, propician el crecimiento de algas filamentosas y macroalgas pardas debido al enriquecimiento de nutrientes que generan (Thacker 2001, Szmant 2002, Mutchler, *et al.* 2007, Vermeij *et al.* 2010). Baker *et al.* (2010) analizaron *Gorgonias* spp. de Akumal mostrando que éstas se encontraban relativamente enriquecidas de $\delta^{15}\text{N}$. Los valores de $\delta^{15}\text{N}$ estuvieron positivamente correlacionados con los recuentos de enterococos fecales del agua de mar; lo que confirma que estos enriquecimientos están asociados con las aguas residuales y no con la desnitrificación en sedimentos que aportaría $\delta^{15}\text{N}$ de NO_3^- mediante el transporte de agua subterránea como proponen Mutchler *et al.* (2007).

Por su posición fisiográfica en la franja litoral, el arrecife de Akumal está expuesto a un ambiente dinámico con resuspensión y acumulación natural de sedimento. Las tasas de captura de sedimento observadas en el sitio fluctuaron en el intervalo 0.13 a 83.7 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{día}$, sólo el 14% del total de las muestras presentaron una tasa de captura de más de 10 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{día}$ y corresponde a la zona de transición del transecto 2 y 4. La tasa de captura de sedimento en la zona del frente y pendiente arrecifal estuvieron por debajo del nivel crítico de 10 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{día}$.

Como regla general, una tasa de sedimentación de más de 10 mg/cm²/día, se cita frecuentemente como umbral de la sedimentación que puede causar daños al coral (Rogers, 1990), alcanzando el nivel crítico al rebasar los 50 mg/cm²/día (Pastorok y Bilyard, 1985).

Los valores más altos registrados coinciden con la temporada de lluvias (septiembre) y nortes (febrero y marzo), por lo que se asume que el arrecife está expuesto a los efectos de eventos climáticos puntuales (precipitación y fuertes vientos) y la resuspensión y depositación del sedimento pueden responder rápidamente a dichos eventos. Esto concuerda con Patiño (2013), el cual menciona que las tasas de captura de sedimento más altas fueron registradas durante el mes de marzo (13 a 298 mg/cm²/día) en un arrecife frontal de Xcalac, Quintana Roo. Asimismo los trabajos reportados para el arrecife Veracruzano en el 2008, también señalan que existe un ciclo en las tasas de sedimentación y de manera similar en este estudio, las menores tasas de captura se observaron durante la temporada de secas, las cuales se empiezan a incrementar durante la temporada de lluvias y alcanzan los valores máximos en la temporada de nortes (Pérez-España, 2008). La tasa de captura de sedimento en la zona del frente y pendiente arrecifal estuvieron por debajo del nivel crítico de 10 mg/cm²/día. Para cuantificar las tasas de sedimentación de manera correcta, es necesario conocer si los resultados obtenidos son compatibles con la tasa real de depositación. Kozerski (2002) y Buesseler et al. (2007) afirman que existe un error instrumental, asociado a metodologías que se aplican en los trabajos relacionados a tasas de sedimentación y este error debe ser determinado. Dicha determinación escapa a los fines de este trabajo por la cantidad tan pequeña de sedimentos capturados en promedio en todas las estaciones durante este estudio. Como se mencionó anteriormente, en el arrecife predominan las algas con una cobertura combinada entre algas pardas y filamentosas de aproximadamente 68%. Rogers (1990) encontró que las algas son capaces de comenzar a crecer en sólo días sobre corales que tienen acumulación de sedimento ya sea por su configuración, como *Acropora palmata*, o porque tengan depresiones o hendiduras donde se acumule el sedimento. Sin embargo, observamos que en el arrecife predominan las especies de coral resistentes a la sedimentación. En los estudios efectuados por Rogers (1990) en Puerto Rico, se encontró que los corales resistentes a la sedimentación son los corales de tipo cerebro *Diploria* y *Colpophyllia*, al igual que *Siderastrea*, *Montastrea*, *Orbicella* y *Porites porites*, mientras que *A. Palmata* no se considera resistente. La zona de transición arrecifal, es decir, la más somera fue la que presentó los valores más altos de sedimentación con un

promedio de 8.48 mg/cm²/día en comparación con la zona más profunda o Pendiente arrecifal con un promedio de 0.85 mg/cm²/día. Hernández *et al.*, (2009), señalan que la tasa de acumulación de sedimento en los arrecifes de coral cercanos a la costa es, por lo general, más alta que en los arrecifes lejanos a ésta, además de que las diferencias que hay en la tasa de captura de sedimento entre zonas está dada por su configuración y topografía (Ortiz y de la Lanza, 2006). La zona de transición además de presentar las tasas de captura de sedimento más altas, presentó la cobertura más baja de coral pétreo (5%) y los valores más bajos en cuanto a complejidad topográfica (0.22), así como los niveles más altos en prevalencia de enfermedades. Stoddart (1969) menciona que uno de los efectos de una pendiente suave es la acumulación de sedimento libre producido por la continua degradación de múltiples organismos arrecifales, además de que el sedimento en ausencia de una trama arrecifal que lo estabilice, es fácilmente resuspendido, transportado y vuelto a depositar por efecto del oleaje (Jordan, 1988). Otros estudios realizados en el Sistema Arrecifal Mesoamericano, mencionan una posible relación de las elevadas tasas de captura de sedimento (58 mg/cm²/día) con su proximidad a áreas con mucho tráfico en las rutas normales de buceo y esnórquel, mientras que el resto de los sitios registraron un promedio de 4 a 11 mg/cm²/día (McField, *et al.* 2007). A pesar de que en diversos experimentos de laboratorio y campo evidencian que los niveles subletales y letales de estrés asociados a la sedimentación varían entre especies y localidades en función de la tolerancia, capacidad de rechazo activo y pasivo de sedimento, tipo de sedimento, tamaño y disposición de la colonia (determinantes para la remoción activa); además del posible incremento en la tolerancia fisiológica a los sedimentos por parte de los corales pétreos de la zona (Bak y Elgershivzen 1976, Rogers 1990, Stafford- Smith 1993, Fabricius y Wolanski 2000, Anthony *et al.* 2007, Fabricius *et al.* 2007), la cantidad de sedimento registrado en el arrecife de Akumal durante el periodo de monitoreo en el 86% de las muestras no confiere un nivel de estrés por sedimentación crítico a los corales.

Stafford-Smith (1993) indica que la supervivencia de corales en condiciones de sedimentación por arriba de 200 mg cm⁻² día⁻¹ sólo se presenta mediante una tasa de rechazo de sedimentos alta vía modificaciones morfológicas, el desarrollo de arrecifes en zonas turbulentas, una alta inversión energética durante el rechazo activo de sedimento, así como el incremento en la tolerancia fisiológica al sedimento. Finalmente se observó que la tasa de captura de sedimento disminuye con la profundidad.

En cuanto a los nutrientes, se observó de manera general que los valores registrados de las diferentes formas nitrogenadas sobrepasaron los reportados para otros ambientes arrecifales (Furnas *et al.*, 1997; Jompa y McCook, 2002; Voss y Richardson, 2006). Particularmente el nitrato fue el más abundante, seguido por el amonio. El amonio representa el principal problema de calidad de agua en la zona, ya que las concentraciones cuantificadas superaron no sólo el máximo permisible ($0.27 \mu\text{M}$) establecido por la Legislación Mexicana (CNA, 2003), para la protección a la vida acuática en aguas costeras y estuarios, sino también el valor que se considera crítico para la vida acuática ($0.29 \mu\text{M}$). Por su parte los valores de nitratos para la protección de la vida acuática es de $2.8 \mu\text{M}$, para este estudio se registraron valores por arriba de los $80 \mu\text{M}$. En otros trabajos (Bell 1992, Hazen & Sawyer 1994, Lapointe 1999, Lapointe *et al.* 2004) la suma de las diferentes formas del nitrógeno inorgánicos (NID) registraron concentraciones mayores a $1 \mu\text{M}$ y concluyen que estas concentraciones favorecen efectos negativos a corales escleractíneos como alteraciones bioquímicas y de simbiosis, aumento en la biomasa de zooxantelas, sugiriendo que al volverse más abundantes, utilizan más CO_2 para la fotosíntesis, y reducen la disponibilidad de carbono para la calcificación (Marubini & Davies 1996, Marubini & Atkinson 1999, Fabricius 2005). Diversos modelos se han utilizado para resumir el papel de los nutrientes en la estructura de los corales (Littler & Littler 1984, Birkeland 1987, Steneck & Dethier 1994) pudiendo predecir de los tres que con el enriquecimiento de nutrientes se incrementa la dominancia de las macroalgas. Esta relación es la que Szmant (2002) menciona como el principal factor para culpar a la degradación del arrecife con el enriquecimiento de nutrientes, ya que se ha comprobado, que otros resultados de la eutrofización son cambios en la estructura de la comunidad, prevalencia de enfermedades, mortalidad de corales, cambios en las condiciones hidrológicas naturales, entre otros (Thacker *et al.* 2001, Bruno *et al.* 2003, Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira 2006).

En este trabajo se obtuvo un promedio anual y desviación estándar de NID $32.48 \pm 23.94 \mu\text{M}$ superando el nivel crítico para la vida acuática. Según Kinsey y Davies (1979), el fosfato es considerado perjudicial para los corales al ser un inhibidor del crecimiento coralino. Sin embargo, las concentraciones encontradas son inferiores a las reportadas por los autores ($2 \mu\text{M}$), por lo que las concentraciones de fósforo y fosfatos registradas para el arrecife de Akumal no representan ningún riesgo para la vida acuática. Con base en los resultados de los análisis estadísticos

multivariados, se exploró el aporte de cada indicador en la estructura de la comunidad arrecifal. Con el MDS se pudo observar que no hay agrupación de los sitios de muestreo en base a su cobertura bentónica lo cual indica que este aspecto los sitios son similares. En contraste a lo anterior, los indicadores fisicoquímicos mostraron claramente una asociación entre la concentración de nutrientes y tasas de captura de sedimento de acuerdo con la zona y el mes de muestreo, estas diferencias significativas fueron definidas con un ANOSIM y encontramos diferencias significativas entre cada mes de muestreo. El análisis SIMPER muestra los indicadores más importantes en términos de su aportación a los valores de similitud en el tiempo de muestreo y se encontró que la concentración de Nitrógeno Total (NT) es el indicador que más aporta similitud en el periodo de muestreo. A través del RDA se corroboró el comportamiento individual de los indicadores, y la manera en que influyen en la distribución espacio-temporal de las muestras, y se observó que la distribución de los datos esta determinada por la concentración de amonio, la suma de las especies de nitrógeno (NID) y las tasas de captura de sedimento. La zona estudiada fue considerada como zona eutrofizada, ya que los valores de las concentraciones de los nutrientes (NH_4 , NO_2 y NO_3) se registraron por arriba del límite permitido por las normas nacionales e internacionales. Las zonas eutrofizadas en sistemas acuáticos pueden incrementar la balanza competitiva a favor de las macroalgas, especialmente si las densidades de herbívoros son bajas (McCook *et al.* 2001), promueven el desarrollo, mantenimiento y proliferación de los productores primarios (fitoplancton, algas bentónicas, macrófitos), contribuyendo al muy extendido fenómeno de la eutrofización de los ecosistemas acuáticos (Wetzel, 2001; Anderson *et al.*, 2002; Smith, 2003; EEA, 2005), por lo que las concentraciones de amonio y nitratos determinados en la zona de estudio representan un factor que favorece la eutrofización.

11. CONCLUSIONES

- El deterioro actual en el arrecife de Akumal se ha incrementado desde finales de los años 80 e intensificado en las últimas décadas, desde el evento de la enfermedad de banda blanca que redujo significativamente las poblaciones de corales acropóridos (*Acropora palmata* y *A. cervicornis*), la mortalidad masiva del erizo negro *Diadema antillarum*, y el blanqueamiento masivo que ocurrió entre 1998 y 2000 que afectó principalmente a *Orbicella faveolata* y a *O. annularis*. Aunado a esto el acelerado desarrollo urbano en la zona de la Riviera Maya pasó de 100,000 habitantes en 1982 a 1,325,578 en el 2010, y hubo un aumento de 192% en la modificación de la zona costera terrestre para la construcción de infraestructura turística del 2000 al 2011. La descarga de aguas residuales sin tratamiento que se generan en estos asentamientos y que han ocasionado cambios en la calidad del agua, repercuten de manera negativa en la condición del arrecife. Esto, asociado a las actividades que se desprenden del turismo como la pesca, buceo, snorkel, campos de golf, y la naturaleza cárstica de la región que es altamente vulnerable a todo tipo de contaminación han dado como resultado una disminución del 33.69% en la cobertura coralina, de un 23.3% en el 1999 a sólo 7.8% para el año 2013.
- La tasa de captura de sedimento anual fue de 3.92 mg/m² y sólo el 14% de las muestras registraron valores iguales o mayores al máximo permitido 10 mg/m². En este sentido, la cantidad de sedimento registrado en el arrecife de Akumal durante el periodo de monitoreo, en el 86% de las muestras, no sobrepasa el nivel de estrés crítico a los corales. Sin embargo, se observaron diferencias espacio-temporales en las tasas de captura de sedimento.
Se observó un ciclo en las tasas de sedimentación, con las menores tasas de captura en la temporada de secas y un aumento durante la temporada de lluvias hasta alcanzar un valor máximo en temporada de nortes. Asimismo, hubo una disminución en la tasa de captura de sedimento con la profundidad.

- La concentración de nutrientes (NID) superó 32 veces el límite permitido por las normas nacionales e internacionales para la protección de la vida acuática (CNA, 2003 y EPA, 2008).
- La distribución espacial del porcentaje de incidencia de enfermedades coralinas podría estar asociada tanto a la distancia de la costa, como a las fuentes principales de flujo de agua freática identificados en las lagunas, presentándose mayor incidencia en las zonas someras del arrecife y disminuyendo en la pendiente.
- Se observó un incremento de la incidencia de enfermedades asociado a un aumento de la concentración de nutrientes, principalmente del amonio. Este aumento probablemente esté relacionado con el incremento del flujo de agua freática.
- El estado de condición en que se encuentran el arrecife evaluado con base en los siguientes indicadores: la cobertura coralina (%) , cobertura de algas (%) e incidencia de enfermedades (%), obtuvo un índice de 1.33 por lo que se encuentra catalogado como un arrecife en nivel crítico (Anexo 19).

12. Literatura consultada

- A., Monroy-Ríos, E. 2011. Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems. *Water, Air and Soil Pollution*. 218 (1-4): 517-528 DOI: 10.1007/s11270-010-0664-x *Oceanography*, 55(3): 1105-1122
- Adey, W.H. 1978. Coral morphogenesis: a multidimensional model. *Science* 202:831-837
- Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos-EPA. Estándares del Reglamento Nacional Primario de Agua Potable. EPA 815-F-00-007, 2000.
- Allgeier J.; Layman C.; Mumby P. Y D. Rosemond. 2014. Consistent nutrient storage and supply mediated by diverse fish communities in coral reef ecosystems. *Global Change Biology* , 20, 2459–2472 pp.
- Almada-Villela, P, C, P.F. Sale, G. Gold-Bouchot y B. Kjerfve, 2003. Manual of methods for the Mesoamerican barrier reef system synoptic monitoring program. Mesoamerican barrier reef system project. Belize. 146 pp.
- Alvarez-Filip, L., Carricart-Ganivet, J.P., Horta-Puga, G. & Iglesias-Prieto, R. 2013. Shifts in coral-assembly composition do not ensure persistence of reef functionality. *Sci. Rep.* 3, 3486; DOI:10.1038/srep03486.
- Alvarez-Filip, L., Dulvy, N.K., Gill, J.A., Côté, I.M., Watkinson, A.R. 2009. Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceeding of the Royal Society B* 276: 3019-3025.
- Anderson , D.M., Glibert, P.M. y Burkholder, J.M. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries* 25: 704-726.
- Anthony, K.R.N., S.R. Connolly & O. Hoehg-Guldberg. 2007. Bleaching, energetic, and coral mortality risk: Effects of temperature, light, and sediment regime. *Limnol. Oceanogr.* 52: 716-726.
- Antonius A (1981) The 'band' diseases in coral reefs. *Proc 4th Int Coral Reef Symp Philippines* 2:7–14.
- Aranda-Cicerol N. 2001. "Alimentando al mundo, envenenando al planeta: eutrofización y calidad de agua. *Avance y Perspectiva*". México, 20: 293-303 pp.
- Aronson R.B., D.W. Swanson. 1997. "Video surveys of coral reefs: uni- and multivariate applications". *Proc 8th Intl Coral Reef Symp, Panama* 2:1441-1446.
- Aronson R.B., P.J. Edmunds, W.F. Pretch, D.W. Swanson & D.R. Levitan. 1994. "Large-scale, long-term monitoring of caribbean coral reefs: simple, quick, inexpensive techniques". *Atoll Res. Bull.* 421, 19pp.
- Back, W. Handshaw B. 1970. Comparison of Chemical Hydrogeology of the Carbonate Peninsulas of Florida and Yucatan. *Journal of Hydrology* 10: 330-368.
- Bak, R. P. M. and G. Nieuwland. 1995. Long-term Change in Coral Communities Along Depth Gradients Over Leeward Reefs in the Netherlands Antilles. *Bulletin of Marine Science.* 56(2): 609-619 pp.
- Baker D., Eric Jordán-Dahlgren, Miguel Angel Maldonado, C. Drew Harvell. 2010. Sea fan corals provide a stable isotope baseline for assessing sewage pollution in the Mexican Caribbean. *Limnol. Oceanogr.*, 55(5), 2139–2149.
- Bale AJ. 1998. Sediment trap performance in tidal waters: Comparison of cylindrical and

conical collectors. *Cont Shelf Res* 18:1401–1418.

- Bauer, L.J. and M.S. Kendall (eds.). 2010. *An Ecological Characterization of the Marine Resources of Vieques, Puerto Rico Part II: Field Studies of Habitats, Nutrients, Contaminants, Fish, and Benthic Communities*. NOAA Technical Memorandum NOS NCCOS 110. Silver Spring, MD. 174 pp.
- Beddows P.A, Smart P.L, Whitaker F.F, Smith S.L. 2002. Density stratified groundwater circulation on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico, in: J.B. Martin, C.M. Wicks and I.D. Sasowsky, eds., *Hydrogeology and Biology of Post Paleozoic Carbonate Aquifers*, Special Publication 7. Karst Waters Institute.
- Beddows P.A, Smart P.L., Whitaker F.F. & Smith S.L. 2007. Decoupled fresh–saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity *Journal of Hydrology*, 346, 18– 32.
- Bothner MH, Reynolds RL, Casso MA, Storlazzi CD, Field ME. 2006. Quantity, composition and source of sediment collected in sediment traps along the fringing coral reef off Molokai, Hawaii. *Mar Pollut Bull* 52(9):1034–1047.
- Bruno et al. 2009. Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral Reefs. *Ecology*, 90(6), 1478–1484 pp.
- Buesseler O.; Antla A.; Chen M.; Fowler S.; Gardner W.; Gustafsson O.; Harada K.; Michaels A.; Loeff M.; Sarin M.; Stelnberg D.; & T. Trull. 2007. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. *Journal of Marine Research*, 65, 345–416.
- Butman CA, Grant WD, Stolzenbach KD, 1986. Prediction of sediment trap biases in turbulent flows: A theoretical analysis based on observations from the literature. *J Mar Res* 44:601–644.
- Butman CA. 1986. Sediment trap biases in turbulent flows: Results from a laboratory flume study. *J Mar Res* 44:645–693.
- Caribbean. Proc. 8th Int. Coral Reef Sym 2. México. 1465-1470 pp.
- Carlton RG, Richardson LL (1995) Oxygen and sulfide dynamics in a horizontally migrating cyanobacterial mat: black band disease of corals. *FEMS Microbiol Ecol* 18: 155–162.
- Carreiro-Silva, M., McClanahan, T.R., Kiene, W.E., 2009. Effects of inorganic nutrients and organic matter on microbial euendolithic community composition and microbioerosion rates. *MEPS* 392, 1–15.
- Castro de Esparza, María Luisa. *Parámetros físico-químicos que influyen en la calidad y en el tratamiento del agua*. Lima, CEPIS, 1987.
- Cervino J, Goreau TJ, Nagelkerken I, Smith GW, Hayes R. 2001. Yellow band and dark spot syndromes in Caribbean corals: distribution rate of spread cytology and effects on abundance and division rate of zooxanthellae. *Hydrobiologia* 460:53–63
- Chávez, E. A. 1997. Sampling Design for the Study of Yucatan Reefs, Northwestern
- Chávez, E. A. y E. Hidalgo. 1998. Los arrecifes coralinos del caribe noroccidental y Golfo de México en el contexto socioeconómico. *An. Ins. Cienc. Del Mar. y Limnología*. UNAM. 15 (1): 167-176.
- Chávez, E. A. y J. W. Tunnell Jr. 1993. Needs for management and conservation of the southern Gulf of Mexico. Vol. 2: 2040-2053. Proc. 8th Symposium on Coastal and Ocean

Management. New Orleans, Louisiana.

- Chazottes *et al.* 2008. Sediment characteristics in reef areas influenced by eutrophication-related alterations of benthic communities and bioerosion processes. *Marine Geology* 250, 114-127.
- Chazottes V. 1996. Estudio experimental de bioerosión y génesis sedimentológica en arrecife: efectos de la eutrofización (Isla de la Reunión, Océano indico). *C. R. Acad. Sci. Paris* 323, 787–794.
- Chérubin, L.M., Kuchinke, C.P., Paris, C.B. 2008. Ocean circulation and terrestrial runoff dynamics in the Mesoamerican region from spectral optimization of SeaWiFS data and a high resolution simulation. *Coral Reefs* 27: 503-519.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, CONANP. 2007. Programa de Conservación y manejo, Parque Nacional Tulum.
Community Structure in the Belize Barrier Reef Complex. *Bulletin of Marine*
- Connell, J.H., T.P. Hughes & C.C. Wallace. 1997. A 30-year study of coral abundance, recruitment, and disturbance at several scales in space and time. *Ecol. Monogr.* 67: 461-488.
- Constanza, R., d’Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O’Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, G.R., Sutton, P. y van der Belt, M. 1997. The value of the world’s ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260
- Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program (CRTR). 2008. Ernesto Weil & J. Hooten. The University of queensland, St Lucia, Australia.
- Cortés, N.J & M.J. Risk. 1985. A reef under siltation stress: Cahuita, Costa Rica. *Bull. Mar. Sci.* 36: 339-356.
- Cróquer A., Bastidas C., Lipscomp D. Rodríguez-Martínez R. & E. Jordan-Dahlgren. 2006. First report of folliculinid ciliates affecting Caribbean scleractinian corals. *Coral Reefs*, 25:187-191.
- DÍAZ-RUIZ, S., E. CANO-QUIROGA, R. ORTEGA-BERNAL, R. MARTÍNEZ-OLVERA Y A. AGUIRRE-LEÓN, 2002. Parte peces, *In*: Informe Final- Segunda Etapa, Proyecto de investigación “Caracterización Ecológica del Sistema Arrecifal Coralino de Akumal, Caribe Mexicano”. LIEC-CBS-UAMI (IF-SE), México, 178 pp.
- Done, T.J. 1982. Patterns in the distribution of coral communities across the central Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 1: 95–107.
- Edinger, E.N., Limmon, G.V., Jompa, J., Widjatmoko, W., Heikoop, J.M., Risk, M.J., 2000. Normal coral growth rates on dying reefs: are coral growth rates good indicators of reef health? *Mar. Pollut. Bull.* 40, 404–425.
- Edmunds PJ (1991) Extent and effect of black band disease on a Caribbean reef. *Coral Reefs* 10:161–165.
- Edmunds, P.J. 2002. Long-term dynamics of coral reefs in St. John, US virgin Islands. *Coral Reefs* 21: 357- 367.
- EEA. 2005. *Source apportionment of nitrogen and phosphorus inputs into the aquatic environment.* Environmental Assessment Report No 7. European Environment Agency, Copenhagen.
- Fenner, D.P. 1988. Some Leeward Reefs and Corals of Cozumel, Mexico. *Bulletin of Marine Science.* 42(1): 133-144.

- Fermán J.L., C. Arredondo, A. García & J. Seingier. 2006. “La regionalización marino-costera, base para el ordenamiento” en Córdova y Vázquez A., F. Rosete, G. Enríquez & B. Hernández (coordinadores) *Ordenamiento ecológico marino. Visión temática de la regionalización*. INE-SEMARNAT, 57-66 pp. 226pp.
- Gardner T.; Côte I.; Grant A.; Watkinson A. (2003). Long-term región-wide declines in Caribbean corals. *Science* 301: 958-960 pp.
- Gardner WD. 1980a. Sediment trap dynamics and calibration: A laboratory evaluation. *J Mar Res* 38:17–39.
- Garza-Pérez J.R. 1999. “Análisis comparativo de cuatro comunidades coralinas arrecifales del Caribe Mexicano”. Tesis que presenta para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la Especialidad de Biología Marina. Departamento de Recursos del Mar. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). Unidad Mérida. 60 pp.
- Garzón-Ferreira J, Gil-Agudelo DL, Barrios LM, Zea S. 2001. Stony coral diseases observed in southwestern Caribbean reefs. *Hydrobiologia* 460:65–69
- Gonzalez-Lozano. 2006. Evaluación de la contaminación en sedimentos del área portuaria y zona costera de Salina Cruz, Oaxaca, México. INCI vol.31 no. 9. Venezuela.
- Gonzalez, M.A. y Torruco D. 2002. Sponges and Macroalgae distribution in Akumal, coastal reef in the Mexican Caribbean. *Avicenia*, 14/15: 16-22.
- Goreau TJ, Cervino J, Goreau M, Hayes R and 14 others. 1998. Rapid spread of diseases in Caribbean coral reefs. *Rev Biol Trop* 46:157–171
- Grigg R.W., Dollar S.J. 1990. Natural and anthropogenic disturbance on coral reefs. *Coral reefs*, 25: 439-452.
- HAAS, CH.N., J.B. ROSE. & CH. P. GERBA. 1999. Quantitative Microbial Risk Assessment. J. Willey & Sons Inc., New York, 449 pp.
- Hallock, P. Coastal pollution and coral communi- ties. *Bull. Amer. Litt. Soc.* 19: 15-18, 1990.
- Hallock, P., 2005. Global change and modern coral reefs: new opportunities to understand shallow-water carbonate depositional processes. *Sediment. Geol.* 175, 19–33.
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, 2011. Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water Air Soil Pollut*, 218:517-528.
- Hol Chan Marine Reserve. 1991. Semi-annual Report to Fisheries Department and WWF. Belize Fisheries Department, Princess Margaret Dr., Ciudad de Belice, Belice.
- Horta-Puga, G. y J.P. Carricart-Ganivet, 1993. Corales pétreos recientes (Milleporina, Stylasterina y Scleractinia) de México. Pp. 66-80. In *Biodiversidad Marina y Costera de México*. S.I Salazar Vallejo y N. E. González. (eds) Quintana Roo, CONABIO-CIQRO. 865 pp.
- Hunte, W & M. Wittenberg. 1992. Effects of eutrophication and sedimentation on juvenile corals. II. Settlement. *Mar. Biol.* 114: 625-631.
- Jackson, J.B.C & K.G. Johnson. 2000. Life in the last few million years. *Paleobiology (Supl.)* 26: 221-235.

- Jompa, J. y L. J. McCook. 2002. The effects of nutrients and herbivory on competition between a hard coral (*Porites cylindrica*) and a brown alga (*Lobophora variegata*). *Limnol. Oceanogr.* 47: 527-534.
- Jordán-Dahlgren, E. 1989. Efecto de la morfología del sustrato en el desarrollo de la comunidad coralina. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. Univ. Nal. Auton. México* 16: 105-117.
- Kleypas, J. 2001. An experiment for all seasons. *Science* 293: 624-627.
- Knee, K.L., Street, J.H., Grossman, E.E., Boehm, A.B., Paytan, A. 2010. Nutrient inputs to the coastal ocean from submarine groundwater discharge in a groundwater-dominated system: relation to land use (Kona coast, Hawaii, USA). *Limnology and*
- Lang J.C. (2003). "Status of Coral Reefs in the Western Atlantic: Results of Initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Assessment (AGRRA) Program". Atoll research bulletin no. 496. 625 pp.
- Lapointe, B.E., 1997. Nutrient thresholds for eutrophication and macro-algal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnol. Oceanogr.* 42, 1119– 1131.
- Lewis, J. B. 1981. Coral reef ecosystems. En: A. R. Longhurst (Ed.) *Analysis of marine ecosystems*. Academic Press, London. pp. 127 – 159.
- Litter M. M. & D. S. Litter 1984. "Models of tropical reef biogenesis: The contribution of algae". *Progress in Phycological Research* (3): 323-364 pp.
- Littler MM, Littler DS. 1996. Black band disease in the South. Pacific. *Coral Reefs* 15:20.
- Logan W. 1969. Carbonate sediments and Reefs, Yucatán Shelf, Mexico. George Banta company, INC. Menasha, Wisconsin. 36-41 pp.
- López-Pérez, R.A., L.M. Hernández-Ballesteros & T. Herrera-Escalante. 2002. Cambio en la dominancia de la comunidad arrecifal en Chachacual, Bahías de Huatulco, Oaxaca. *Ciencia y Mar* 16: 33-38.
- Loya, Y. 1976. Effects of water turbidity and sedimentation on the community structure of Puerto Rican corals. *Bull. Mar. Sci.*, 26, 450-66.
- Mapstone, B.D., J.H. Choat, R.L. Cumming & W.G. Oxley. 1989. The fringing reefs of Magnetic Island: benthic biota and sedimentation; a baseline survey. Great Barrier Reef Marine Park Authority Townsville, Queensland, Australia.
- Mcfield M.D, P Hallock and W.C. Jaap. 2001. *Multivariate Analysis of Reef*
- McField, M. y P. Richards Kramer. 2007. *Healthy Reefs for Healthy People: A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region. (Arrecifes Saludables para Gente Saludable: Guía de indicadores de salud de los arrecifes y bienestar social en la región del Sistema Arrecifal Mesoamericano)*. Con las contribuciones de M. Gorrez y M. McPherson. 208 pp.
- Montalvo F. Y Perigó E. 2006. Concentraciones de nutrientes y eutrofización en arrecifes coralinos de los archipiélagos Los Canarreos y Sabana-Camagüey. IV Taller Internacional Contaminación y Protección del Medio Ambiente. <http://hdl.handle.net/1834/2084>.
- Mueller, B., De Goei, J.M., Vermeij, M.J.A., Mulders, Y., Van der Ent, E., Ribes, M., Van Duyl, F.C., 2014. Natural diet of coral-excavating sponges consists mainly of Dissolved Organic Carbon (DOC). *PLoS One* 9 (2).
- Muñoz-Chagín , R.F. y G. de la Cruz-Aguero. 1993. Corales del Arrecife de Akumal,

- Quintana Roo. pp 761-771. In: Biodiversidad Marina y Costera de México. S.I. Salazar-Vallejo y N.E. González (eds.) Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865 pp.
- Mutchler, T., Dunton, K.H., Townsend-Small, A., Fredriksen, S., Rasser, M.K. 2007. Isotopic and elemental indicators of nutrient sources and status of coastal habitats in the Caribbean Sea, Yucatan Peninsula, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 449-457.
 - Nardin A., Trento A. y Alvarez A. 2009. Cálculo de la tasa de sedimentación en el Río Salado (Sante Fe). Cuarto simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. Salta, Argentina.
 - Nodder SD, Alexander BL .1999. The effects of multiple trap spacing, baffles, and brine volume on sediment trap efficiency. *J Mar Res* 57:537-559
 - Nybakken, J.W. 1993. *Marine biology: an ecological approach*. Harper, Nueva York, EEUU.
 - Ochoa-López, E., H. Reyes-Bonilla & J. Ketchum-Mejía. 1998. Daños por sedimentación a las comunidades coralinas del sur de la Isla Socorro, Archipiélago de Revillagigedo, México. *Cien. Mar.* 24: 233-240.
 - Ogston AS, Storlazzi CD, Field ME, Presto MK. 2004. Currents and suspended sediment transport on a shallow reef flat: South-central Molokai, Hawaii. *Coral Reefs* 23:559-569.
 - Olsen, C. Cutshall, N. & Larsen I. 1982. Pollutant-particle associations and dynamics in coastal marine environments. A review. *Mar. Chem.* 11:501-533
 - OMS. *Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health criteria and other supporting information*. Segunda edición. Ginebra, 1996.
 - Pastorok R. Y Bilyard G. 1985. Effects of sewage pollution on coral reef communities. *Mar Ecol Progr Ser.* 21: 175-189.
 - Patterson KL, Porter JW, Ritchie KB, Polson SW, Mueller E, Peters EC, Santavy DL, Smith GW. 2002. The etiology of white pox a lethal disease of the Caribbean elkhorn coral *Acropora palmata*. *Proc Natl Acad Sci USA* 99:8725 – 8730.
 - Paytan, A., Shellenbarger, G., Street, J., Gonnesa, M., Davis, K., Young, M., Moore, W. 2006. Submarine groundwater discharge, an important source of new inorganic nitrogen to coral reef ecosystems. *Limnology and Oceanography* 51: 343-348.
 - Pérez España, H. y J. M. Vargas Hernández, 2008. Caracterización ecológica y monitoreo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano: Primera Etapa. Universidad Veracruzana. Centro de Ecología y Pesquerías Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM002. México D. F.
 - Razo Amoroz. I. 1999. El sedimento como factor de mortalidad en corales escleractinios de un macizo arrecifal de la costa de Quintana Roo. Tesis que presenta para obtener el grado de Maestro en Ciencias en la Especialidad de Biología Marina. Departamento de Recursos del Mar. Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). Unidad Mérida. 59 pp.
 - Rice, S. Y Hunter C. 1992. Effects of suspended sediment and burial on scleractinian corals from West Central Florida patch reefs. *Bull Mar Sci* 51: 429-442.
 - Risk, M.J., MacGeachy, J.K., 1978. Aspects of erosion of modern Caribbean reefs. *Rev. Biol. Trop.* 26, 85-105.
 - Roff G. & J. Mumby. 2012. Global disparity in the resilience of coral Reefs. *Trends in*

Ecology and Evolution, Vol. 27, No. 7.

- Rogers, C.S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 62: 185-202.
- Rose, C.S., Risk, M.J., 1985. Increase in *Cliona delitrix* infestation of *Montastrea cavernosa* heads on an organically polluted portion of the Grand Cayman fringing reef. *Mar. Ecol.* 6, 345–363.
- Santavy DL, Peters EC, Quirolo C, Porter JW, Bianchi CN. 1999. Yellow-blotch disease outbreak on reefs of the San Blas Islands Panama. *Coral Reefs* 18:97
- Santavy DL, Peters EC. 1997. Microbial pests: coral disease research in the western Atlantic. *Proc 8th Int Coral Reef Symp Balboa* 1:607–612
Science. 69(2): 745-758.
- Smith, V.H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: a global problem. *Environ. Sci. Pollut. R.* 10:126-139.
- Sofonia J.J. y Kenneth R.N. 2008. High-sediment tolerance in the reef coral *Turbinaria mesenterina* from the inner Great Barrier Reef lagoon (Australia). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 78, 748-752.
- Soledispa B. 2007. Características de la sedimentación marina litoral comprendida entre la puntilla de Santa Elena y Punta Ancón, Provincia de Santa Elena. *Acta oceanográfica del Pacífico.* Vol 14, no.1. Ecuador.
- Stafford-Smith, M.G & R.F.G. Ormond. 1992. Sediment rejection mechanisms of 42 species of Australian scleractinian corals. *Aust. J. mar. Freshwat. Res.* 43: 683-705.
- Stafford-Smith, M.G. 1993. Sediment-rejection efficiency of 22 species of Australian scleractinian corals. *Mar. Biol.* 115: 229-243.
- Steneck, R.S., M.H. Graham, B.J. Bourque, D. Corbett, J.M. Erlandson, J. Estes, M.J. Tegner. 2002. Kelp forest ecosystems: biodiversity stability, resilience and future. *Environmental Conservation.* 29:436-459.
- Storlazzi CD, Field ME, Bothner MH, Presto MK, Draut AE . 2009b. Controls on sediment dynamics in a coral reef embayment: Hanalei Bay, Kauai. *Mar Geol* 264:140–151.
- Storlazzi CD, Ogston AS, Bothner MH, Field ME, Presto MK. 2004. Wave and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: South-central Molokai, Hawaii. *Cont Shelf Res* 24(12):1397–1419.
- Storlazzi CD, Presto MK, Logan JB . 2009a. Coastal circulation and sediment dynamics in War-in-the-Pacific National Historical Park, Guam. Measurements of waves, currents, temperature, salinity, and turbidity: June 2007–January 2008. USGS Open- File Report 2009-1195 <http://pubs.usgs.gov/of/2009/1195/>.
- Storlazzi CD, Presto MK, Logan JB, Field ME. 2010. Coastal circulation and sediment dynamics in Maunaloa Bay, Oahu, Hawaii. Measurements of waves, currents, temperature, salinity, and turbidity: November 2008–February 2009. USGS Open-File Report 2010-1217 <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1217/>.
- Strickland J. D. H. y Parsons, R.T. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis. Bulletin 167. Second Edition. Fisheries Research Board of Canada. Ottawa. 310 pp.
- Suess, E. 1980. Particulate organic flux in the ocean surface, productivity and oxygen utilization. *Nature* 288: 260-263.

- Sutherland KP., W. Porter y C. Torres. 2004. Disease and Immunity in Caribbean and Indo-Pacific Zooxanthellate Corals. *Marine Ecology Progress Series* V. 266: 273-302.
- Szmant A.M. 2002. "Nutrient Enrichment on Coral Reefs: Is it a major cause of coral reef decline?". *Estuaries*. Vol. 25, No 4b, p. 743-766.
- Szmant-Froelich, A., V. Johnson, T. Hoehn, J. Battey, G.J. Smith, E. Fleischmann, J. Porter, D. Dallmeyer. 1981. The physiological effects of oil-drilling muds of the Caribbean coral *Montastrea annularis*. *Proc. 4th int. coral Reef Symp.* 1: 163-168.
- Toller WW, Rowan R, Knowlton N. 2001. Repopulation of zooxanthellae in the Caribbean corals *Montastraea annularis* and *M. faveolata* following experimental and disease-associated bleaching. *Biol Bull* 201:360–373.
- Vásquez-Domínguez, E. 2003. Diversidad y distribución de crustáceos y equinodermos y su relación con niveles de sedimentación en arrecifes coralinos. *Rev. Biol. Trop.* 51: 183-194.
- Vega-Thurber et al. 2013. Chronic nutrient enrichment increases prevalence and severity of coral disease and bleaching. *Global Change Biology*.
- Vegas, V.M. 1980 Introducción a la Ecología del Bentos Marino. Monografía 9. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Uruguay. 98pp.
- Weil E, Urreiztieta I, Garzón-Ferreira J. 2002. Geographic variability in the incidence of coral and octocoral diseases in the wider Caribbean. *Proc 9th Int Coral Reef Symp Bali* 2:1231–1237
- Weil E., C.S. Rogers. 2011. Coral reef diseases in the Atlantic-Caribbean. *Coral reefs: An ecosystem in transition*. Springer. 465-491pp.
- Weil, E. 2004. Coral Reef Diseases in the Wider Caribbean. In *Coral Health and Diseases*, ed. E. Rosenberg, and Y. Loya, 35-68. Springer-Verlag. New York .
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology, 3rd edition*. Academic Press, New York.
- White J. 1990. The use of sediment traps in high-energy environments. *Mar Geophys Res* 12:145–152.
- Wilkinson C, Green A, Almany J, Dionne S. 2003. Monitoring coral reef marine protected areas, Version 1. A practical guide on how monitoring can support effective management of MPAs. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia and IUCN Global Marine Program, Gland 1196, Switzerland.
- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan & M. Padilla. 2009. "Ecorregiones marinas de América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental" Montreal, 200 pp.
- Young, M.B., Gonneea, M.E., Fong, D.A., Moore, W.S., Herrera-Silveira, J., Paytan, A. 2008. Characterizing sources of groundwater to a tropical coastal lagoon in a karstic area using radium isotopes and water chemistry. *Marine Chemistry* 109: 377-394.
- Yund, P.O.; Gaines, S.D. and Bertness, D.D. 1991. Cylindrical tube traps for larval sampling. *Limnology and Oceanography* 36: 1167-1177.

ANEXOS

Anexo 1. Identificación y Coordenadas de las trampas de sedimento

Transecto	Zona	Profundidad (m)	Coordenadas N/E (UTM)
T1	(ZT) Transición	10.36	467685/2254908
T1	(F) Frente	14.94	467802/2254833
T1	(P) Pendiente	19.81	467964/2254752
T2	Transición	8.23	468400/2256189
T2	Frente	10.97	468519/2256160
T2	Pendiente	16.76	468705/2256109
T3	Transición	8.53	468992/2257215
T3	Frente	11.89	469073/2257233
T3	Pendiente	15.54	469209/2257070
T4	Transición	12.5	466335/2252474
T4	Frente	16.46	466540/2252412
T4	Pendiente	20.12	466589/2252291

Anexo 2. Medidas de resumen de T_{cs} (mg) para periodo de muestreo.

fecha	N	Media	D.E.	Mín	Máx	Mediana	H	p
Ago_13	63	3.47	4.70	0.09	17.57	1.55	115.63	<0.0001
Feb_14	60	3.09	5.48	0.10	23.56	0.52		
Jul_13	66	2.08	2.73	0.08	11.45	1.00		
Jun_13	65	4.40	9.43	0.06	43.20	1.21		
Jun_14	71	1.11	0.63	0.16	2.78	1.02		
Mar_14	68	11.45	18.71	0.00	86.02	3.02		
May_13	71	1.09	1.07	0.08	4.39	0.57		
May_14	71	2.30	2.69	0.25	12.43	1.41		
Oct_13	63	0.77	0.64	0.03	2.57	0.66		
Sep_13	54	11.39	18.24	0.41	66.62	3.38		

Anexo 3. Prueba de comparación entre medianas de Tcs por mes. Medianas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Fecha	Rangos
Oct_13	207.35 A
May_13	246.99 A B
Feb_14	269.67 A B C
Jun_14	291.45 B C D
Jul_13	310.69 C D E
Ago_13	333.60 C D E
Jun_13	335.89 D E
May_14	353.82 E
Mar_14	461.41 F
Sep_13	473.20 F

Anexo 4. Medidas de resumen de Tcs (mg) por transecto.

Variable	transecto	N	Media	D.E.	Medianas	gl	H	p
Tasa(mg)	1.00	162	2.72	4.22	0.99	3	15.64	0.0013
Tasa(mg)	2.00	179	7.28	15.73	1.69			
Tasa(mg)	3.00	153	1.82	1.86	1.43			
Tasa(mg)	4.00	182	3.85	7.75	0.86			

Anexo 5. Prueba de comparación entre medianas de Tcs por transecto. Medianas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Transecto.	Rangos
1.00	310.88 A
4.00	315.90 A
3.00	340.77 A
2.00	384.53 B

Anexo 6. Medidas de resumen de Tcs (mg) por zona.

Variable	zona	N	Medias	D.E.	Medianas	gl	H	p
Tasa (mg)	F	232	2.93	4.18	1.41	2	149.85	<0.0001
Tasa (mg)	P	233	0.94	1.36	0.53			
Tasa (mg)	ZT	211	8.65	15.40	2.50			

Anexo 7. Prueba de comparación entre medianas de Tcs por zona. Medianas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Zona.	Rangos
P	220.08 A
F	362.11 B
ZT	443.31 C

Anexo 8. Prueba de diferencia de medianas entre temporadas (NH4). Medianas con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Temporada	Rangos
LLUVIAS	59.27 A
SECAS	69.78 A B
NORTES	83.27 B

Anexo 9. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (NH4). donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas (P>0.05).

Mes/Año.	Rangos
marzo:2014	9.50 A
septiembre:2013	23.83 A B
agosto:2013	44.00 B C
octubre:2013	48.88 B C
agosto:2014	53.71 B C
julio:2013	55.21 C
junio:2013	69.54 C D
mayo:2013	93.92 D E
abril:2014	105.92 E
junio:2014	109.33 E
febrero:2014	117.67 E

Anexo 10. Prueba de diferencia de medianas entre temporadas (NO2), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas (P>0.05).

Temporada	Rangos
SECAS	54.99 A
LLUVIAS	66.10 A B
NORTES	82.23 B

Anexo 11. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (NO2), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas (P>0.05).

Mes/Año.	Rangos
mayo13	10.50 A
junio14	32.25 A B
marzo14	33.21 A B C
junio13	41.67 B C
julio13	50.63 B C D
agosto14	63.38 C D E
febrero14	74.21 D E F
octubre13	92.25 E F G
septiembre13	100.58 F G H
agosto13	108.58 G H
abril14	124.25 H

Anexo 12. Prueba de diferencia de medianas entre temporadas (NO3), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas (P>0.05).

Temporada	Rangos
NORTES	43.17 A
LLUVIAS	66.78 B
SECAS	81.50 B

Anexo 13. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (NO3), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Mes/Año.	Rangos
octubre13	13.58 A
mayo13	33.17 A B
agosto13	38.13 A B
agosto14	40.04 A B C
septiembre13	48.67 B C D
junió13	69.75 C D E
febrero14	72.75 D E
abril14	84.83 E F
julio13	92.00 E F
junió14	112.08 F G
marzo14	126.50 G

Anexo 14. Prueba de diferencia de medianas entre temporadas (NT), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Temporada	Rangos
NORTES	19.92 A
SECAS	53.00 B
LLUVIAS	63.06 B

Anexo 15. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (NT), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Mes/Año	Rangos
octubre13	10.92 A
mayo13	18.00 A
febrero14	28.92 A B
junió14	49.00 B C
abril14	51.92 C
agosto14	63.96 C D
agosto13	76.21 D E
marzo14	89.08 E

Anexo 16. Prueba de diferencia de medianas entre temporadas (PO4), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Temporada	Rangos
SECAS	34.33 A
LLUVIAS	47.32 A
NORTES	65.02 B

Anexo 17. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (PO4), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Temporada	Rangos				
agosto14	12.46	A			
marzo14	31.25	A	B		
junio14	33.96	A	B		
abril14	37.42		B		
febrero14	48.08		B	C	
agosto13	67.38			C	D
septiembre13	75.50				D
octubre13	81.96				D

Anexo 18. Prueba de diferencia de medianas entre meses de muestreo (FT), donde los valores con una letra en común no muestran diferencias significativas ($P>0.05$).

Mes/año	Rangos				
Julio>2013	23.00	A			
Marzo>2014	30.08	A	B		
Junio>2013	33.75	A	B		
Agosto>2014	48.96		B	C	
Febr>2014	52.21		B	C	
Junio>2014	52.21		B	C	
Agosto>2013	70.08			C	D
Abril>2014	77.71				D

Anexo 19. Rango de los indicadores de estado de condición arrecifal, propuesto por Healthyreefs (2012). Tomado de López-Patoni (2014).

Indicadores	Muy bien	bien	regular	mal	crítico
Valores	5	4	3	2	1
Cobertura de coral (%)	≥ 40	20-39.9	10-19.9	5-9.9	< 5
Cobertura de macroalgas (%)	0-9	1.0-5.0	5.1-12.0	12.1-25	>25
Incidencia de enfermedades Caribe en general (%)	0-1.0	1.1-1.9	2.0-3.9	4.0-6.0	>6.0

Índice integrado de salud arrecifal

Muy bien	> 4.2-5
Bien	> 3.4-4.2
Regular	> 2.6-3.4
Mal	> 1.8-2.6
Crítico	1-1.8

