

Informe final* del Proyecto DM012

Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa

Responsable:	Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán
Institución:	Universidad Autónoma de Baja California Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Dirección:	Carretera Tijuana-Ensenada Km 103, Ensenada, BC, 22860 , México
Correo electrónico:	jose_carriquiry@uabc.mx
Teléfono/Fax:	Tel: 01 (646) 174-46-01 Fax: 01 (646) 174-53-03
Fecha de inicio:	Agosto 31, 2006
Fecha de término:	Abril 21, 2010
Principales resultados:	Hojas de cálculo, cartografía, , fotografías, videotransectos, informe final.
Forma de citar** el informe final y otros resultados:	Carriquiry Beltrán, J. D. 2010. Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa. Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM012. México, D.F.
Forma de citar hoja de cálculo	Carriquiry Beltrán, J. D. 2010. Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa. Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Investigaciones Oceanológicas. Hoja de Cálculo SNIB-CONABIO proyecto No. DM012. México, D.F.

Resumen:

El presente informe incluye las actividades del primer año realizadas por el Proyecto CONABIO DM012. El objetivo básico del proyecto en esta etapa, fue caracterizar y monitorear el bentos en el Parque Arrecifal de Cancún-Nizuc-Isla Mujeres (PIMCN) y el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), así como la caracterización hidrológica de ambos parques y el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC). Con este propósito, se realizaron tres salidas de campo al Caribe Mexicano (23 de noviembre al 12 de diciembre del 2006, del 5 al 19 de mayo y del 2 al 7 de julio del 2007), en donde se hicieron muestreos hidrológicos y ecológico de las comunidades coralinas para cinco localidades arrecifales representativas (Manchones, Cuevones, Chitales, El Bajito y Punta Nizuc) del PIMCN y dos localidades arrecifales (Bonanza y Radio Pirata) del PNAPM. Se presentan los resultados ecológicos obtenidos a partir del método de intercepto de punto (datos cada 20 cm en transectos de 10 m, siguiendo el método propuesto por el SAM). Adicionalmente, se realizó un conteo total de corales, mediciones morfométricas, así como una evaluación de la mortalidad parcial y registro de enfermedades de los corales en los mismos transectos (basados en el protocolo de evaluación rápida del programa Atlantic and Gulf Reef Rapid Assessment (AGRRRA)). Con los datos obtenidos de las variables ecológicas, proponemos un Índice de Salud Arrecifal (ISA), obtenido de la suma de la condición de salud del bentos arrecifal (CSBA), calculado como la proporción de cobertura de los principales constituyentes del bentos respecto a la cobertura de algas carnosas o macroalgas y la condición de salud de los corales (CSC). Los resultados obtenidos del ISA, indican que los arrecifes en mejores condiciones son Cuevones en el PIMCN y la localidad de Radio Pirata en el PNAPM. En contraste, el mismo ISA indica que de los arrecifes estudiados, la localidad de Bonanza en el PNAPM y los arrecifes de El Bajito y Manchones en el PIMCN se encuentran en un nivel de alerta. Durante los mismos periodos se obtuvieron datos hidrológicos de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos), salinidad y temperatura. Los resultados hidrológicos no muestran evidencias de eutrofización en las áreas arrecifales de las ANP del norte del Caribe Mexicano (CM). Los niveles de nutrientes fueron generalmente muy bajos y, a diferencia de otras regiones arrecifales del Caribe, la

concentración promedio de amonio fue más elevada que los nitratos. En esta región, el amonio contribuye entre el 60 a 75% del total de nitrógeno inorgánico disuelto (NID). Por otro lado, la presencia de filtraciones de agua dulce a lo largo de la zona costera no parece ser una fuente significativa de NID, ya que estas no modifican los niveles típicamente bajos de nitrógeno en la zona de arrecifes. Los nutrientes mostraron tendencias espaciales evidentes a partir de áreas específicas donde potencialmente existen aportes de nutrientes de origen antropogénicos. En este caso se encuentran Punta Nizuc en el PIMCN, Bonanza en el PNAPM y el área de los arrecifes Paraíso - Chankanaab en el PNAC. En contraste con las zonas arrecifales, los niveles de nutrientes en el interior de Laguna Nichupté (incluida Laguna Bojórquez) es mucho más elevado. La concentración promedio medida de NID en estas Lagunas (de $14.7 \pm 11.6 \mu\text{M}$ para invierno y de $4.18 \pm 1.98 \mu\text{M}$ para verano) es entre 2 a 7 veces más alto que el promedio de NID medido en Bonanza (PNAPM), localidad donde se midió la concentración promedio más elevada de NID ($2.15 \pm 0.84 \mu\text{M}$) de la zona arrecifal. Estos son resultados esperados ya que el sistema lagunar Nichupté - Bojórquez está expuesto al aporte de aguas residuales y ha mostrado signos evidentes de eutrofización en las últimas décadas. Sin embargo, nuestros resultados no muestran una influencia significativa de este sistema lagunar sobre las características hidrológicas de las zonas arrecifales de la parte externa de las Lagunas. Con el fin de diferenciar las potenciales fuentes de nitrógeno hacia las zonas arrecifales, se analizó la composición isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) en una variedad de macroalgas colectadas en los arrecifes estudiados. Una característica relevante de los resultados, muestra que el $\delta^{15}\text{N}$ es generalmente bajo en las macroalgas de esta región. (<0 a $\sim 2 \text{‰}$); más baja inclusive que el $\delta^{15}\text{N}$ de los nitratos ($\delta^{15}\text{NO}_3$) considerados como la fuente principal de nitrógeno. Por otro lado, el $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de las macroalgas es altamente variable en cada localidad, lo que indica las diferencias en los mecanismos de incorporación de nitrógeno por las diferentes especies en cada localidad. La elevada proporción de amonio en el reservorio del NID y los valores bajos del $\delta^{15}\text{N}$ medido en macroalgas, sugiere que el amonio puede ser la principal fuente de nitrógeno a las macroalgas de la región.

-
- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
 - ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
ÁREA DE GEOQUÍMICA AMBIENTAL**

**INDORME FINAL: PRIMERA ETAPA
PROYECTO CONABIO DM012**

**Monitoreo del bentos, nutrientes e isótopos en relación a la salud
arrecifal de áreas naturales protegidas del norte de Quintana Roo con
mayor vulnerabilidad al cambio de fase arrecifal: Primera Etapa**

RESPONSABLES:

DR. José D. Carriquiry Beltrán, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

DR. Julio A. Villaescusa Celaya, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

COLABORADORES:

DR. Guillermo Horta Puga, UNAM – FESI (MÉXICO, D.F.)

M.C. Pedro G. Castro Castro, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

M.C. Constanza Ricaurte Villota, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

M.C. Juan Pablo D’Olivo Cordero, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

Oc. Luis Roberto Robles Jiménez, IIO – UABC (Ensenada, B.C.)

Rev. 2. Ensenada, B.C., junio 2009

TABLA DE CONTENIDO

Lista de Acrónimos y Abreviaturas Utilizadas	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
Capítulo 1. CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, CANCÚN, NIZUC (PIMCN), PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS (PNAPM) Y PARQUE NACIONAL ARRECIFES DE COZUMEL (PNAC)	3
1.1 Introducción	3
1.2. Cobertura bentónica	6
1.2.1. Cobertura coralina	9
1.2.2. Cobertura de algas	13
1.3. Otros parámetros de las colonias de coral	15
1.3.1. Diámetro de las colonias de coral por localidad	16
1.3.2. Altura de las colonias de coral por localidad	17
1.3.3. Mortalidad de las colonias de coral	18
1.3.4. Porcentaje de individuos enfermos	20
1.4. Estructura de la Comunidad	22
1.4.1. Riqueza de especies	22
1.4.2. Abundancia específica	25
1.4.3. Densidad por especie	29
1.4.4. Parámetros ecológicos	31
1.5. Índice de salud arrecifal (ISA)	34
1.5.1. Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal (CSBA) para el PNIMCN y PNAPM.	35
1.5.1.2. Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal (CSBA) para el PNAC	36
1.5.2. Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC) para el PNIMCN y PNAPM	39
1.5.3. Cálculo del Índice de Salud Arrecifal (ISA)	41
1.6. Sumario y conclusiones del capítulo	43

CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN HIDRÓLOGICA PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, CANCÚN, NIZUC (PIMCN), PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS (PNAPM) Y PARQUE NACIONAL ARRECIFES DE COZUMEL (PNAC)	47
.....	
2.1. Parámetros hidrológicos	47
2.2. Caracterización hidrológica promedio	47
2.3. Distribución espacial de las características hidrológicas	60
2. 4. Sumario y conclusiones del capítulo	67
CAPITULO 3. ISÓTOPOS ESTABLES DE NITRÓGENO ($\delta^{15}\text{N}$) EN MACROALGAS	70
.....	
3.1. Resultados	70
3.2. Sumario y conclusiones del capítulo	80
CAPÍTULO 4. PROPUESTA PLAN DE MONITOREO DE PARÁMETROS ECOLÓGICOS E HIDRÓLOGICOS DE LOS PARQUES PIMCN, PNAPM Y PNAC	83
.....	
4.1. Introducción	83
4.2. Estaciones de muestreo	84
4.3. Periodicidad de muestreo	89
4.4. Métodos de Trabajo	92
5.5. Literatura citada.	95
Anexo I	99
Anexo II	100

LISTA DE ACRONIMOS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS

AGRRA	Atlantic and Gulf Reef Rapid Assessment
BA	Banda Amarilla
BB	Banda Blanca
CM	Caribe Mexicano
CONABIO	Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad
CONANP	Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México
DS	Desviación Estándar
EMRI	Espectrómetro de masas de razones isotópicas
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
$\delta^{15}\text{N}$	Isótopos estables de nitrógeno
IIO	Instituto de Investigaciones Oceanológicas
IS	Índice de Salud Arrecifal
Lat.	Latitud
Long.	Longitud
MB	Mancha Blanca
MN	Mancha Negra
NID	Nitrógeno inorgánico disuelto
n.d.	No detectable
PB	Plaga Blanca
PIMCN	Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Cancún, Nizuc
PMS	Programa de Monitoreo Sinóptico
PNAC	Parque Nacional Arrecifes de Cozumel
PNAPM	Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos
%MP	Porcentaje de mortalidad parcial total
SAM	Sistema Arrecifal Mesoamericano
UABC	Universidad Autónoma de Baja California
UEA CRU	University of East Anglia, Climatic Research Unit
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
YSI	Yellow Springs Instruments

RESUMEN

El presente informe incluye las actividades del primer año realizadas por el Proyecto CONABIO DM012. El objetivo básico del proyecto en esta etapa, fue caracterizar y monitorear el bentos en el Parque Arrecifal de Cancún-Nizuc-Isla Mujeres (PIMCN) y el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), así como la caracterización hidrológica de ambos parques y el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC). Con este propósito, se realizaron tres salidas de campo al Caribe Mexicano (23 de noviembre al 12 de diciembre del 2006, del 5 al 19 de mayo y del 2 al 7 de julio del 2007), en donde se hicieron muestreos hidrológicos y ecológico de las comunidades coralinas para cinco localidades arrecifales representativas (Manchones, Cuevones, Chitales, El Bajito y Punta Nizuc) del PIMCN y dos localidades arrecifales (Bonanza y Radio Pirata) del PNAPM. Se presentan los resultados ecológicos obtenidos a partir del método de intercepto de punto (datos cada 20 cm en transectos de 10 m, siguiendo el método propuesto por el SAM). Adicionalmente, se realizó un conteo total de corales, mediciones morfométricas, así como una evaluación de la mortalidad parcial y registro de enfermedades de los corales en los mismos transectos (basados en el protocolo de evaluación rápida del programa *Atlantic and Gulf Reef Rapid Assessment* (AGRRA)). Con los datos obtenidos de las variables ecológicas, proponemos un Índice de Salud Arrecifal (ISA), obtenido de la suma de la condición de salud del bentos arrecifal (CSBA), calculado como la proporción de cobertura de los principales constituyentes del bentos respecto a la cobertura de algas carnosas o macroalgas y la condición de salud de los corales (CSC). Los resultados obtenidos del ISA, indican que los arrecifes en mejores condiciones son Cuevones en el PNIMCN y la localidad de Radio Pirata en el PNAPM. En contraste, el mismo ISA indica que de los arrecifes estudiados, la localidad de Bonanza en el PNAPM y los arrecifes de El Bajito y Manchones en el PNIMCN se encuentran en un nivel de alerta.

Durante los mismos periodos se obtuvieron datos hidrológicos de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos), salinidad y temperatura. Los resultados hidrológicos no muestran evidencias de eutrofización en las áreas arrecifales de las ANP del norte del Caribe Mexicano (CM). Los niveles de nutrientes fueron

generalmente muy bajos y, a diferencia de otras regiones arrecifales del Caribe, la concentración promedio de amonio fue más elevada que los nitratos. En esta región, el amonio contribuye entre el 60 a 75% del total de nitrógeno inorgánico disuelto (NID). Por otro lado, la presencia de filtraciones de agua dulce a lo largo de la zona costera no parece ser una fuente significativa de NID, ya que estas no modifican los niveles típicamente bajos de nitrógeno en la zona de arrecifes. Los nutrientes mostraron tendencias espaciales evidentes a partir de áreas específicas donde potencialmente existen aportes de nutrientes de origen antropogénicos. En este caso se encuentran Punta Nizuc en el PIMCN, Bonanza en el PNAPM y el área de los arrecifes Paraíso – Chankanaab en el PNAC. En contraste con las zonas arrecifales, los niveles de nutrientes en el interior de Laguna Nichupté (incluida Laguna Bojórquez) es mucho más elevado. La concentración promedio medida de NID en estas Lagunas (de 14.7 ± 11.6 μM para invierno y de 4.18 ± 1.98 μM para verano) es entre 2 a 7 veces más alto que el promedio de NID medido en Bonanza (PNAPM), localidad donde se midió la concentración promedio más elevada de NID (2.15 ± 0.84 μM) de la zona arrecifal. Estos son resultados esperados ya que el sistema lagunar Nichupté – Bojórquez está expuesto al aporte de aguas residuales y ha mostrado signos evidentes de eutrofización en las últimas décadas. Sin embargo, nuestros resultados no muestran una influencia significativa de este sistema lagunar sobre las características hidrológicas de las zonas arrecifales de la parte externa de las Lagunas.

Con el fin de diferenciar las potenciales fuentes de nitrógeno hacia las zonas arrecifales, se analizó la composición isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) en una variedad de macroalgas colectadas en los arrecifes estudiados. Una característica relevante de los resultados, muestra que el $\delta^{15}\text{N}$ es generalmente bajo en las macroalgas de esta región. (<0 a ~ 2 ‰); más baja inclusive que el $\delta^{15}\text{N}$ de los nitratos ($\delta^{15}\text{NO}_3$) considerados como la fuente principal de nitrógeno. Por otro lado, el $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de las macroalgas es altamente variable en cada localidad, lo que indica las diferencias en los mecanismos de incorporación de nitrógeno por las diferentes especies en cada localidad. La elevada proporción de amonio en el reservorio del NID y los valores bajos del $\delta^{15}\text{N}$ medido en macroalgas, sugiere que el amonio puede ser la principal fuente de nitrógeno a las macroalgas de la región.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los arrecifes de coral han sufrido un deterioro acelerado a nivel global en las últimas tres décadas, que se ha reflejado en una reducción en la abundancia de corales, una baja diversidad y una simplificación de la estructura arrecifal (Wilkinson, 2000; Pandolfi et al., 2003; Hughes et al., 2003). Este deterioro es especialmente alarmante en los arrecifes de coral del Gran Caribe. El elevado crecimiento demográfico en la región ha traído en consecuencia un efecto combinado del incremento de la contaminación y una reducción de las poblaciones de herbívoros, por sobrepesca y enfermedades; condiciones que han favorecido un desbalance ecológico, reduciendo la cobertura de corales e incrementando la densidad de macroalgas (Hughes, 1994; McClanahan y Muthiga, 1998; Gardner et al., 2003; Burke y Maidens, 2005). Este desbalance, conocido como cambio de fase, ocurre en un arrecife de coral cuando la cobertura del sustrato por corales escleractinios es reducida a favor de una dominancia por macroalgas, ocasionando que la recuperación de las condiciones originales del arrecife sea aplazada (histérsis) por procesos ecológicos o por condiciones ambientales desfavorables (Hughes, 1994; McManus et al., 2000; Szmant 2002; McManus y Polsenberg, 2004). Algunos autores han propuesto que el aporte de nutrientes (principalmente antropogénicos) puede ser el factor determinante en el cambio de fase, (Lapointe, 1997,1999; Koop et al., 2001), pero los resultados del presente estudio no muestran enriquecimiento de nutrientes en el norte del Caribe Mexicano, a pesar de que los arrecifes si muestran cambios de fase incipientes (dominancia coralina a dominancia algal).

Comparado con los arrecifes del Golfo de México, los estudios publicados sobre los arrecifes de coral del Caribe Mexicano (CM), son notablemente escasos; especialmente los estudios de monitoreo de las condiciones del arrecife a largo plazo. Se han realizado una variedad de monitoreos localizados, así como también programas de investigación para la región (por universidades, agencias gubernamentales y ONG), pero la falta de capacidad de un programa monitoreo continuo, así como la pobre distribución de información entre programas implementados, se ha impedido el avance en el conocimiento de estos sistemas y ha limitado los esfuerzos de conservación. Los pocos estudios de monitoreo realizados recientemente en la región del CM, han mostrado signos alarmantes de deterioro en los arrecifes de coral de la región, que se ha reflejado en una reducción significativa en la cobertura de corales y un incremento importante en la cobertura de macroalgas.

Para llenar estos vacíos de información se planteó el presente proyecto, el cuál tuvo como objetivo caracterizar y monitorear el bentos arrecifal (mediante transectos ecológicos) y las condiciones hidrológicas del Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (PIMCN) y del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM), además la caracterización de las condiciones hidrológicas del Parque Nacional Arrecifal de Cozumel (PNAC). De manera adicional, se planteo el monitoreó isotópico de los tejidos de los corales y algas carnosas, y del agua que los circunda, con la finalidad de identificar el origen de los nutrientes (fertilizantes, descargas residuales de aguas negras, o de origen oceánico transportados remotamente, entre otros) en cada sitio en particular. Todo la información obtenida sirve como un estudio base, permitiendo enfocar los planes de monitoreo de las áreas

marinas protegidas y las acciones de manejo y conservación hacia las zonas que requieran mayor atención.

CAPITULO 1

CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, CANCÚN, NIZUC (PIMCN), PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS (PNAPM) Y PARQUE NACIONAL ARRECIFES DE COZUMEL (PNAC)

1.1. Introducción

Los arrecifes de coral del Caribe mexicano forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) el cuál se extiende desde el norte de la Península de Yucatán hasta las Islas de la Bahía en Honduras. Como tantas áreas de esta barrera arrecifal y del mundo, estos se han visto fuertemente impactados por el crecimiento acelerado, sin políticas de ordenamiento y manejo de la actividad turística, especialmente a partir de mediados de los años 70 en que se consolidó el polo turístico de Cancún. A pesar de que la gran mayoría de los ecosistemas arrecifales de la región se encuentran inmersos dentro de áreas protegidas, su deterioro ha ido en aumento y la necesidad de monitorear su estado se ha hecho evidente.

El conocimiento de su condición actual que sirva de línea base frente a cambios futuros, y a su vez un monitoreo permanente de su estado debido a que los ecosistemas costeros se encuentran en constante cambio (producto del efecto de eventos naturales y/o antropogénicos), permite proponer acciones de manejo y determinar áreas prioritarias de conservación; o bien definir sitios que están sujetos a una sobreexplotación turística o pesquera, o a efectos de contaminación, los cuales

atentan contra los procesos naturales y los delicados equilibrios de los ecosistemas marino-costeros.

Los resultados obtenidos durante los transectos de muestreo en cada uno de los sitios de estudio se resumen en las tablas 1.1 y 1.2. En la tabla 1.1 se muestra que para el PIMCN y PNAPM el número de taxas por arrecife fue de 8 a 20, siendo El Bajito el de mayor número; la talla promedio (diámetro) varió entre 16.07 cm en Cuevones hasta 37.09 cm en Manchones; la densidad total (ind m^{-1}) varió de 0.48 en Bonanza hasta 1.62 en Cuevones; el porcentaje de cobertura estuvo en el rango de 12.4 a 27, siendo la más alta en Manchones; el porcentaje de mortalidad parcial total (%MP) estuvo entre 11.11 en Cuevones hasta 31.25 en Bonanza; el porcentaje de colonias enfermas mostró un amplio rango de variación entre 0 en Radio Pirata y 4.4 en Bonanza. Las enfermedades presentes en los arrecifes son: Banda Amarilla (BA), Banda Blanca (BB), Plaga Blanca (PB), Mancha Blanca (MB) y Mancha Negra (MN)).

En la tabla 1.2 se muestra que para el PNAC el número de taxas por arrecife varió entre 19 y 25, siendo Paso del Cedro la mayor diversidad. El porcentaje de cobertura coralina se encontró en el rango de 10.10% a 21.73%, siendo la mas alta en el arrecife Colombia y la mas baja en el arrecife Yucab. Adicionalmente, se incluyen algunos parámetros ecológicos en ambas tablas (calculados según el anexo I), que pueden ser empleados como una medida preliminar de la condición en que se encuentran los arrecifes investigados.

Tabla 1.1 Resumen de las características ecológicas de las comunidades coralinas de los arrecifes estudiados en el Caribe Mexicano correspondientes a los PIMCN y PNAPM.

		Localidades						
		Manchones ¹	Cuevones ¹	Chitales ¹	El Bajito ¹	Punta Nizuc ¹	Bonanza ²	Radio Pirata ²
<i>Taxas</i>		12	10	8	20	14	13	10
<i>Individuos</i>		113	162	116	116	88	48	75
<i>No transectos</i>		10	10	11	12	10	10	10
<i>Talla (cm)</i>		37.09	16.95	16.07	25.14	27.34	31.9	32.80
<i>Densidad total (ind m⁻¹)</i>		1.13	1.62	1.05	0.97	0.88	0.48	0.75
<i>% Cobertura</i>		27	26.2	16.9	16.2	18.4	12.4	18.3
<i>%MP</i>		30.97	11.11	25.00	25.86	14.77	31.25	26.67
<i>%Enfermedad</i>		0.91	0.63	0.885	2.6	2.27	4.44	0
<i>Enfermedad</i>		<i>BA</i>	<i>MB</i>	<i>MB</i>	<i>PB,MN,Alga</i>	<i>BB</i>	<i>MN,MA</i>
<i>Indices</i>	<i>diversidad</i>	0.79	0.7	0.74	0.85	0.97	0.91	0.93
	<i>dominancia</i>	0.25	0.26	0.22	0.29	0.13	0.16	0.14
	<i>equitabilidad</i>	0.7	0.69	0.82	0.65	0.85	0.82	0.93

¹ PIMCN

² PNAPM

Tabla 1.2 Resumen de las características ecológicas de las comunidades coralinas de los arrecifes estudiados en el Caribe Mexicano correspondientes al PNAC (datos del Proyecto DM007).

		Localidades					
		Paraiso	Chankanaab	Yucab	Paso del Cedral	Dalila	Colombia
<i>Taxas</i>		22	19	22	25	23	23
<i>No transectos</i>		6	6	6	6	6	6
<i>% Cobertura</i>		12.29	14.93	10.10	17.12	16.76	21.73
<i>Indices</i>	<i>diversidad</i>	1.63	1.51	1.46	1.61	1.53	1.79
	<i>uniformidad</i>	0.9	0.88	0.9	0.84	0.83	0.86

1.2. Cobertura bentónica.

Los arrecifes de PIMCN y PNPM presentan diversas coberturas del sustrato como son alga arena, alga roca, arena, coral, roca, Thalassia y otros, siendo alga roca la cobertura de mayor porcentaje en casi todas las localidades, a excepción de Radio Pirata en la cuál la Thalassia (31.1%), es la cobertura del sustrato de mayor importancia (Tabla 1.3).

Tabla 1.3 Porcentaje de cobertura del sustrato para las diferentes localidades estudiadas en los PIMCN y PNAPM.

Cobertura	Manchones	Cuevones	Chitales	El Bajito	Nizuc	Bonanza	Radio Pirata
Alga arena	0	0	6.2	0.8	0.2	13	4.6
Alga roca	48	41.6	42.9	49.3	57.8	28.2	6.9
Arena	0	0	8.9	0.3	0.4	26.6	11.4
Coral	27	26.2	16.9	16.2	18.4	12.4	18.3
Roca	16.4	16.8	11.8	25.8	7	14.2	18.9
Thalassia	0	0	0	0	1.4	0.8	31.1
Otros	8.6	15.4	13.3	7.5	14.8	4.8	8.9

De la misma manera, en el PNAC las coberturas del sustrato están caracterizadas por diferentes elementos, entre los que se encuentran corales, esponjas, gorgonias, algas (en este caso, conjuntando algas coralinas, algas foliosas y cianofitas libres o en tapete) y otros. En todas las localidades del PNAC, el componente de otros sustratos como roca o arena representa el mayor porcentaje de cobertura (Tabla 1.4).

Tabla 1.4 Porcentaje de cobertura del sustrato para las diferentes localidades estudiadas en el PNAC.

Cobertura	Paraiso	Chankanaab	Yucab	Paso del Cedral	Dalila	Colombia
Esponga	10.81	7.40	11.28	17.09	10.57	11.63
Coral	12.30	14.93	10.10	17.12	16.77	21.74
Gorgonia	1.29	0.42	0.63	0.59	0.80	0.28
Algas	24.90	31.07	13.64	17.57	27.08	21.77
Otros	50.71	46.19	64.35	47.63	44.78	44.58

Las localidades del PIMCN presentan coberturas de alga roca mayores al 40%, pero en el PNAPM este sustrato presenta un porcentaje de cobertura más bajo, siendo reemplazado por arena y *Thalassia* en Bonanza y Radio Pirata, respectivamente (Fig. 1.1). Además *Thalassia* es la cobertura que presenta el menor porcentaje en casi todas las localidades, llegando a tener valores tan bajos como 0% en las localidades del PIMCN con excepción de Punta Nizuc.

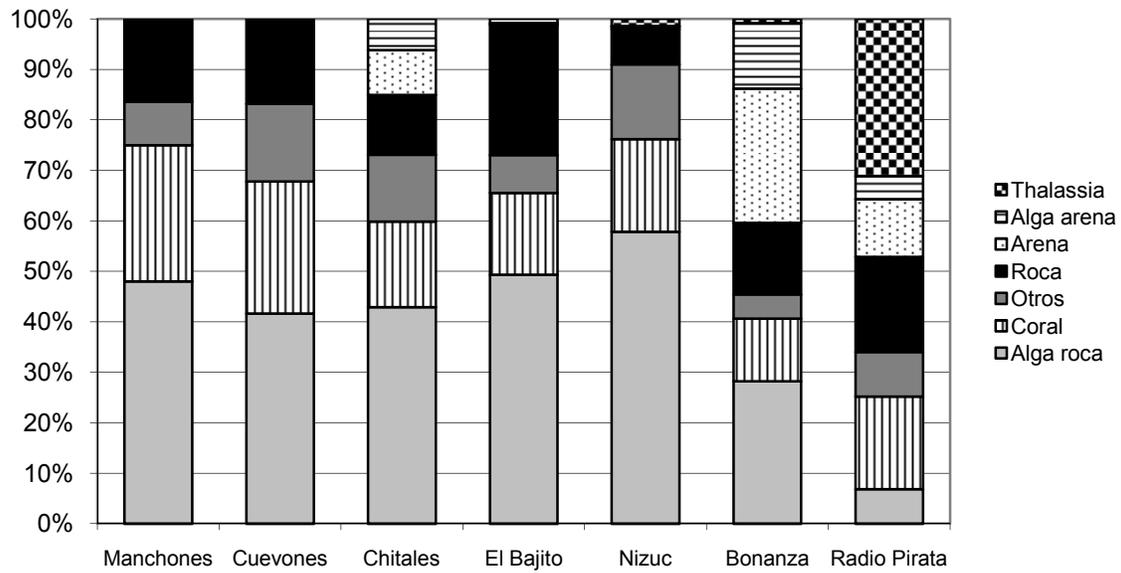


Figura 1.1. Porcentaje de cada tipo de cobertura del sustrato para cada localidad estudiada en PIMCN y PNAPM.

Las localidades del PNAC presentan porcentajes de cobertura de coral entre 10.10% y 21.74% los cuales representan una de las dos principales proporciones de cobertura en el arrecife, ya que las algas son un componente fuerte de cobertura ya que se encuentran entre el 13.64% y 31.07% siendo el porcentaje mas alto en Chankanaab. Para el caso de las esponjas estas representan un porcentaje entre 7.4% y 17.09% y las gorgonias representan un pequeño porcentaje de cobertura en sustrato para todas las localidades menor del 1.5% (Figura 1.2).

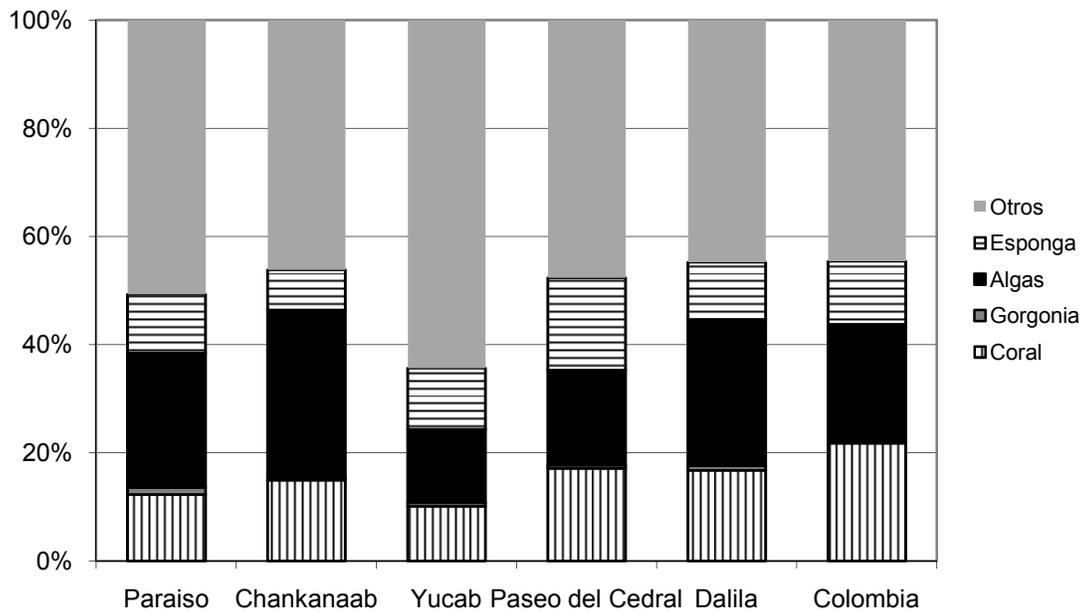


Figura 1.2. Porcentaje de cada tipo de cobertura del sustrato para cada localidad estudiada en el PNAC.

1.2.1. Cobertura Coralina

La cobertura de coral es relativamente baja para todas las localidades de PIMCN y PNAPM, mostrando un promedio global de 19.3% (Fig. 1.3). De estas, la localidad de Manchones presenta la mayor cobertura coralina con un 27% y Bonanza la de menor cobertura con un 12.4%.

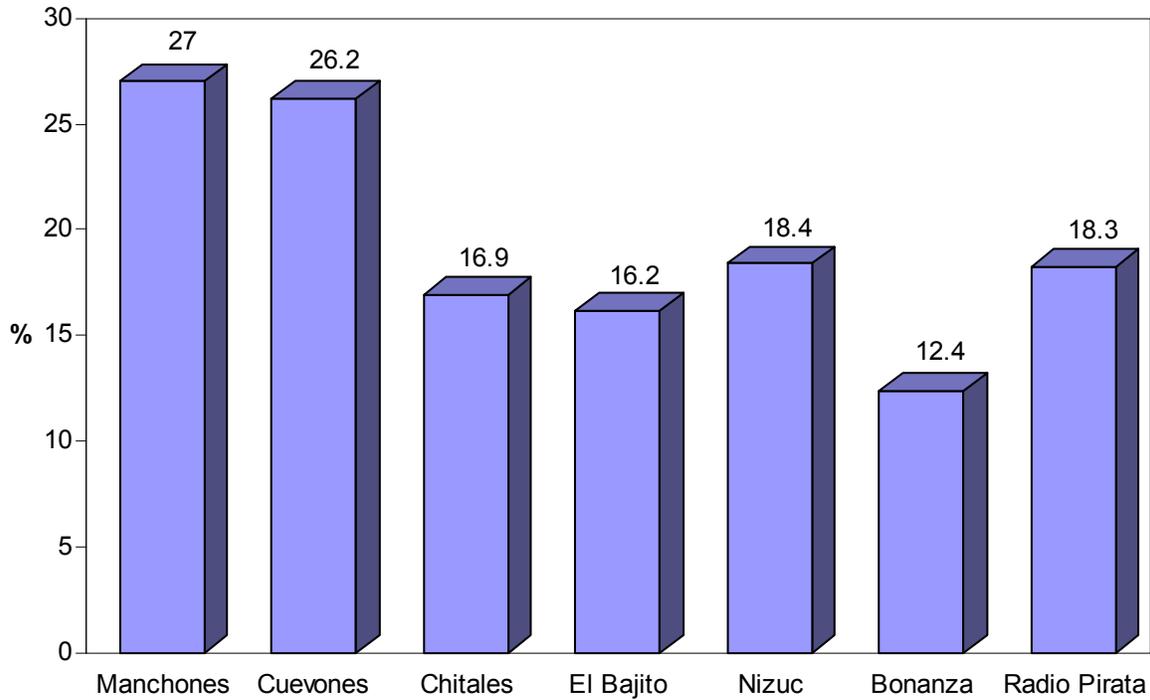


Figura 1.3 Porcentaje de cobertura de coral en las localidades de los PIMCN y PNAPM.

Los resultados de la cobertura relativa por especie para las siete localidades de PIMCN y PNAPM consideradas en este estudio, muestran que la especie de coral que muestra mayor cobertura es *Porites astreoides* (considerando todos los sitios) con un 27.5%, seguida de *Acropora palmata* con un 13%, resaltando que esta especie sólo fue contabilizada en las localidades del PIMCN. El resto de las especies registradas en este estudio, sólo alcanzan una cobertura relativa menor al 10%, destacando *Porites porites* con un 9.7% y *Millepora complanata* y *Siderastrea siderea* con un 9%. Por otro lado, del total de especies registradas, tres de ellas (*Acropora humilis*, *Diploria labyrinthiformis* y *Stephanocoenia intercepta*) presentan una cobertura relativa menor al 1% (Fig. 1.4).

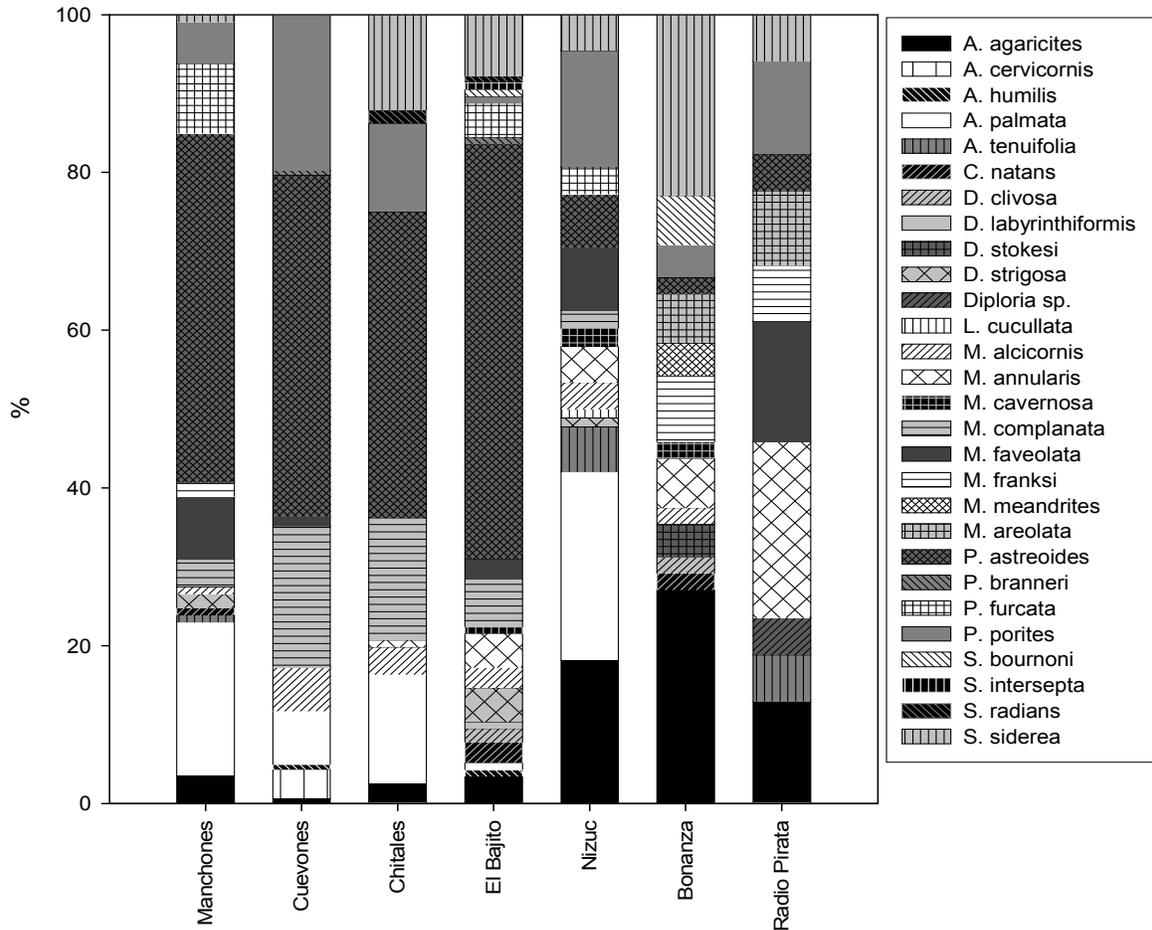


Figura 1.4. Porcentaje de cobertura coralina por especie y arrecife en los PIMCN y PNAPM.

Al igual que en los arrecifes de PIMCN y PNAPM, la cobertura de coral del PNAC es relativamente baja para todas las localidades, con un promedio global de 15.48% (Fig. 1.5), que significa una cobertura mucho ma baja que los primeros. De los arrecifes estudiados, Colombia presenta la mayor cobertura coralina con un 21.73% y el arrecife Yucab la de menor cobertura con un 10.10%.

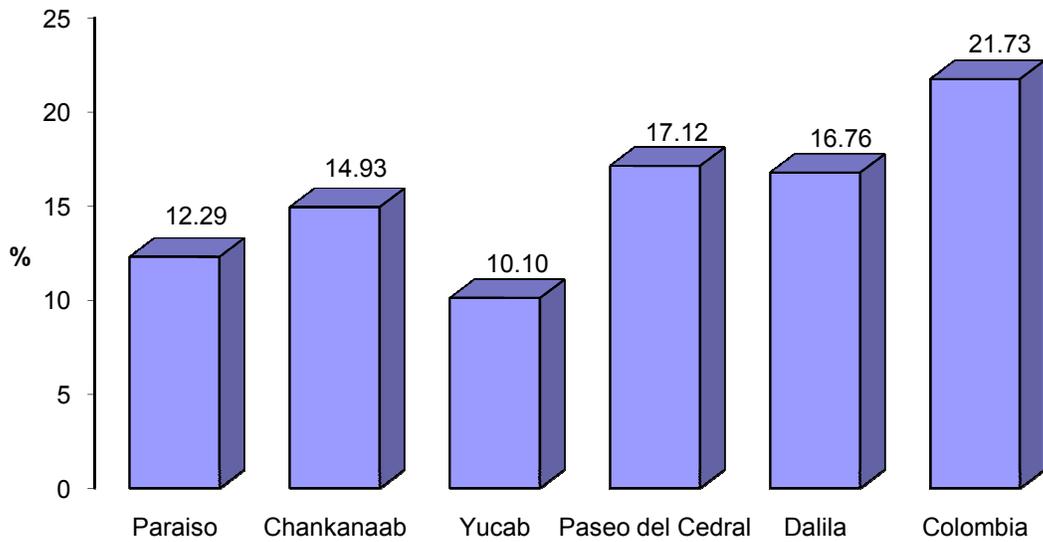


Figura 1.5. Porcentaje de cobertura de coral en las diferentes localidades del PNAC.

Los resultados de la cobertura relativa por especie para las seis localidades del PNAC, muestran que la especie de coral que presenta mayor cobertura es *Agaricia agaricites* (considerando todos los sitios) con un 32.83%, seguida de *Siderastrea siderea* con un 14.33%, *Porites astreoides* con 11.78% y *Montastrea cavernosa* con 10.46%. El resto de las especies registradas en este estudio, sólo alcanzan una cobertura relativa menor al 10%, destacando *Montastrea annularis* con un 6.95% y *Montastrea faveolata* con 4.28%. (Fig. 1.6).

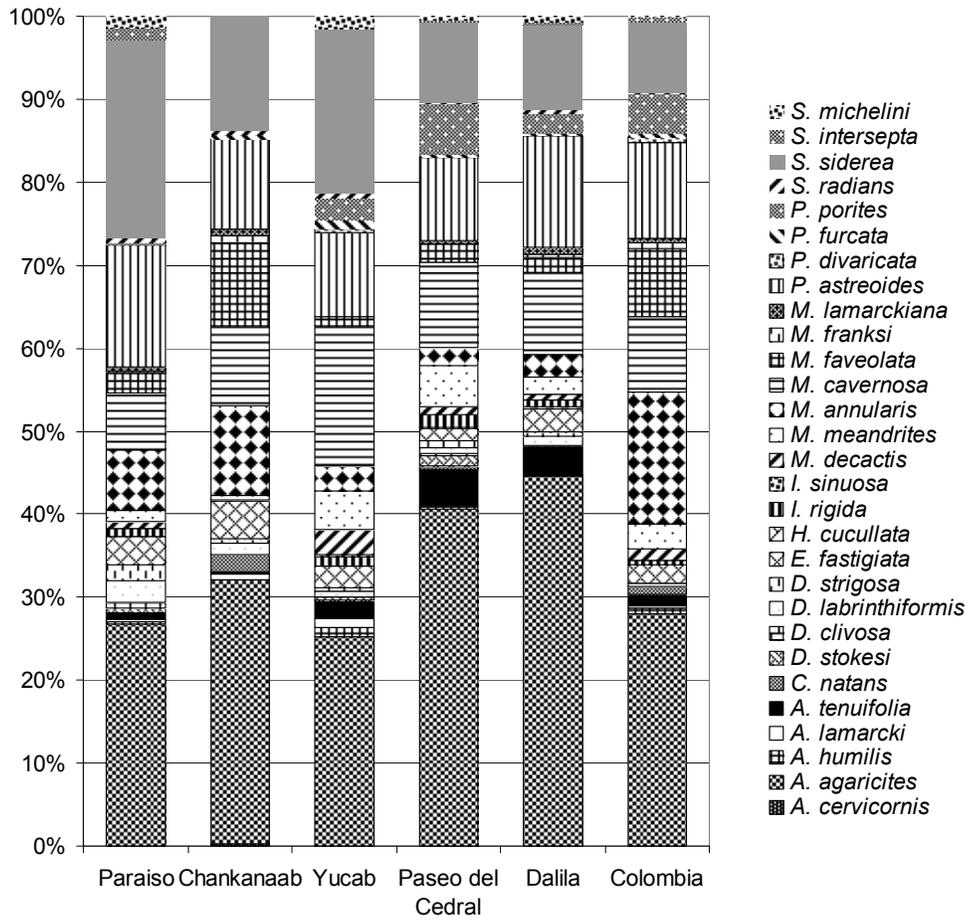


Figura 1.6. Porcentaje de cobertura coralina por especie y arrecife en PNAC.

1.2.2. Cobertura de algas

En los PIMCN y PNAPM al contrario de la cobertura coralina, la cobertura de algas fue alta, con un promedio general de 42.8%. El arrecife con mayor porcentaje de cobertura de algas fue Nizuc, con un 58%, mientras que el de menor fue Radio Pirata, con un 11.4% (Fig. 1.7). Se observó que existe un gradiente de aumento de norte a sur en la cobertura de algas en el PIMCN, con excepción del arrecife Cuevones, el cual se encuentra cerrado al público para cualquier actividad, acción que parece estar dando

resultado en la recuperación del arrecife. A partir de Nizuc, en el PNAPM, el gradiente parece invertirse siendo la zona norte la de mayor cobertura de algas. Es posible que esta distribución en la cobertura de algas sea una respuesta a la influencia de aguas provenientes de las descargas urbanas, principalmente las aportadas por el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, las cuales llegan a los arrecifes de esta zona a través del canal localizado en la zona sur de la laguna.

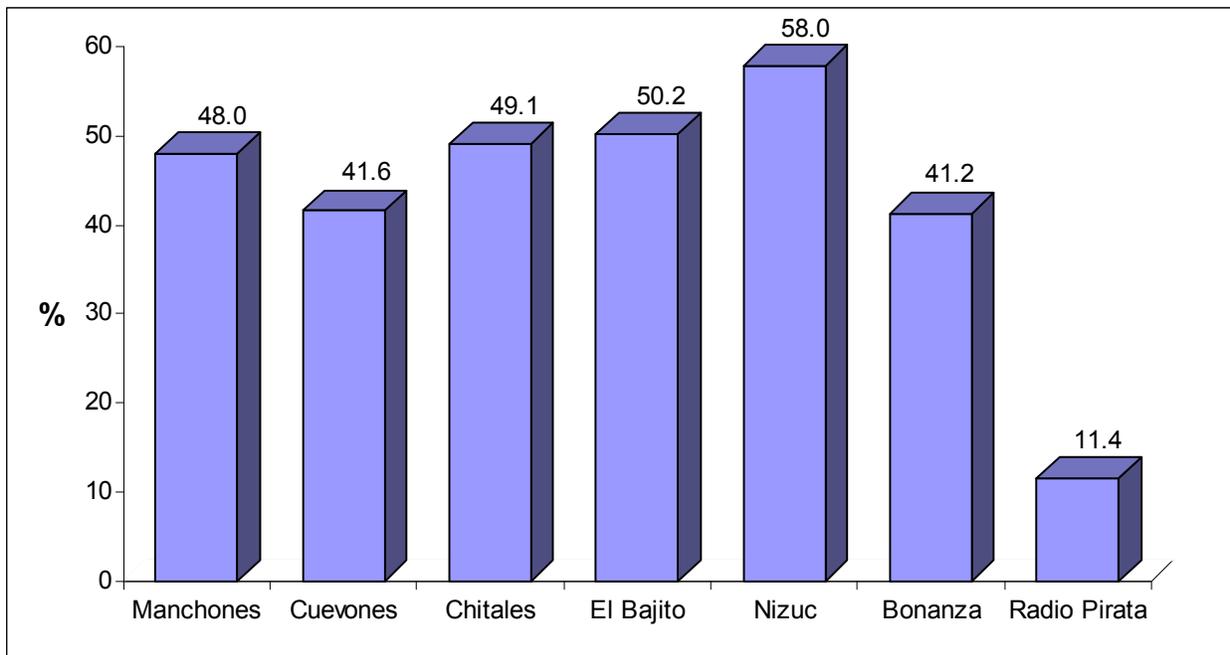


Figura 1.7. Porcentaje de cobertura de algas en las diferentes localidades de los PIMCN y PNAPM.

En el PNAC la cobertura de algas representa el componente del sustrato con el segundo mayor porcentaje de cobertura. Para los seis arrecifes el promedio general de cobertura de algas fue de 22.67%. El arrecife con mayor porcentaje de cobertura de algas fue Chankanaab con 31.07%, mientras que el de menor fue Yucab, con un 13.64%, en general para las 6 localidades del PNAC el porcentaje de cobertura de algas

es bajo comparado con las coberturas de algas promedio encontradas en los PIMCN y PNAPM (Fig. 1.8).

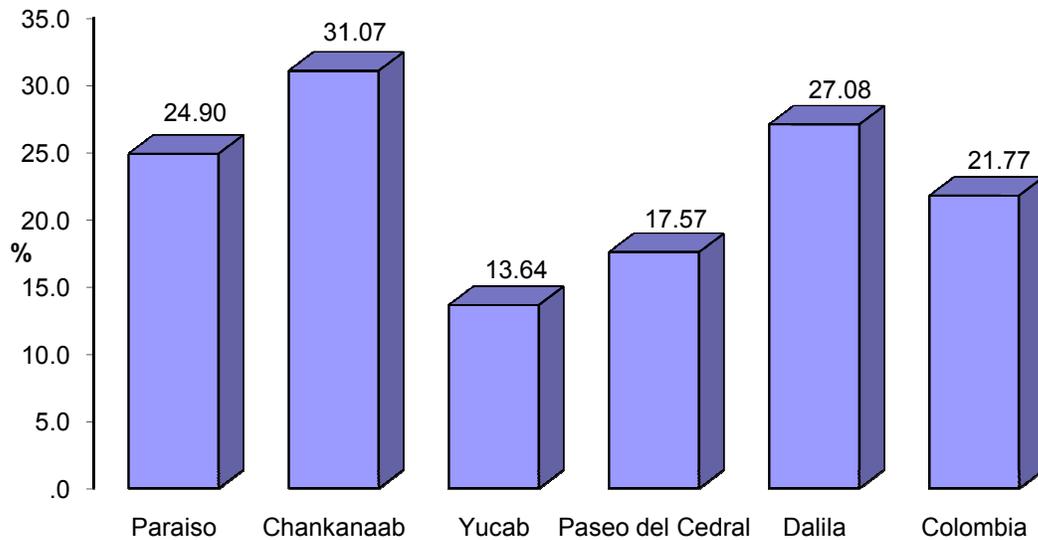


Figura 1.8. Porcentaje de cobertura de algas en las diferentes localidades del PNAC.

1.3. Otros parámetros de las colonias de coral

Otros parámetros evaluados en este estudio fueron el tamaño de las colonias (diámetro y altura), el porcentaje de cobertura de la mortalidad parcial y porcentaje de cobertura de individuos enfermos. El tamaño de las colonias es importante como una medida de la longevidad de las colonias en los arrecifes y permite inferir procesos de asentamiento y crecimiento antiguos o recientes.

1.3.1. Diámetro de las colonias por localidad

El diámetro de las colonias de coral mostró un promedio global de 26.75 cm, siendo Manchones la localidad con colonias de mayor diámetro (promedio de 37.09 cm) y Chitales la de colonias de menor diámetro (promedio de 16.07 cm), seguida de Cuevones (promedio de 16.95%) (Fig. 1.9). Las localidades del PNAPM muestran un promedio de diámetro de las colonias bastante parecido, 31.88 cm en Bonanza y 32.80 cm en Radio Pirata.

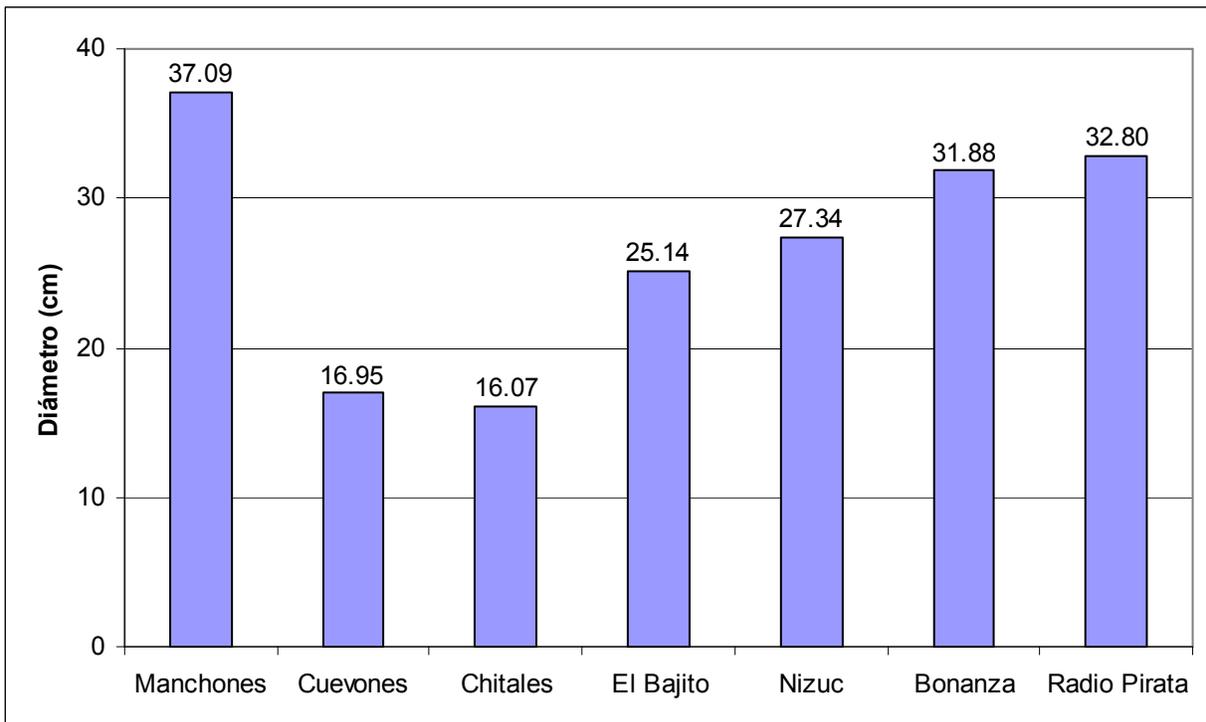


Figura 1.9. Diámetro promedio de las colonias de coral en cada una de las localidades estudiadas de los PIMCN y PNAPM.

1.3.2. Altura promedio de las colonias de coral por localidad

La altura de las colonias de coral mostró un promedio global de 13.08 cm, siendo nuevamente Manchones la localidad con colonias de mayor altura (promedio de 17.18 cm), mientras que Cuevones fue la localidad con colonias de menor altura (promedio de 6.86 cm), seguida por Chitales (promedio de 8.82 cm) (Fig. 1.10). De igual manera que para el diámetro, las localidades del PNAPM muestran un promedio de altura de las colonias bastante parecido, 15.10 cm en Bonanza y 16.43 cm en Radio Pirata.

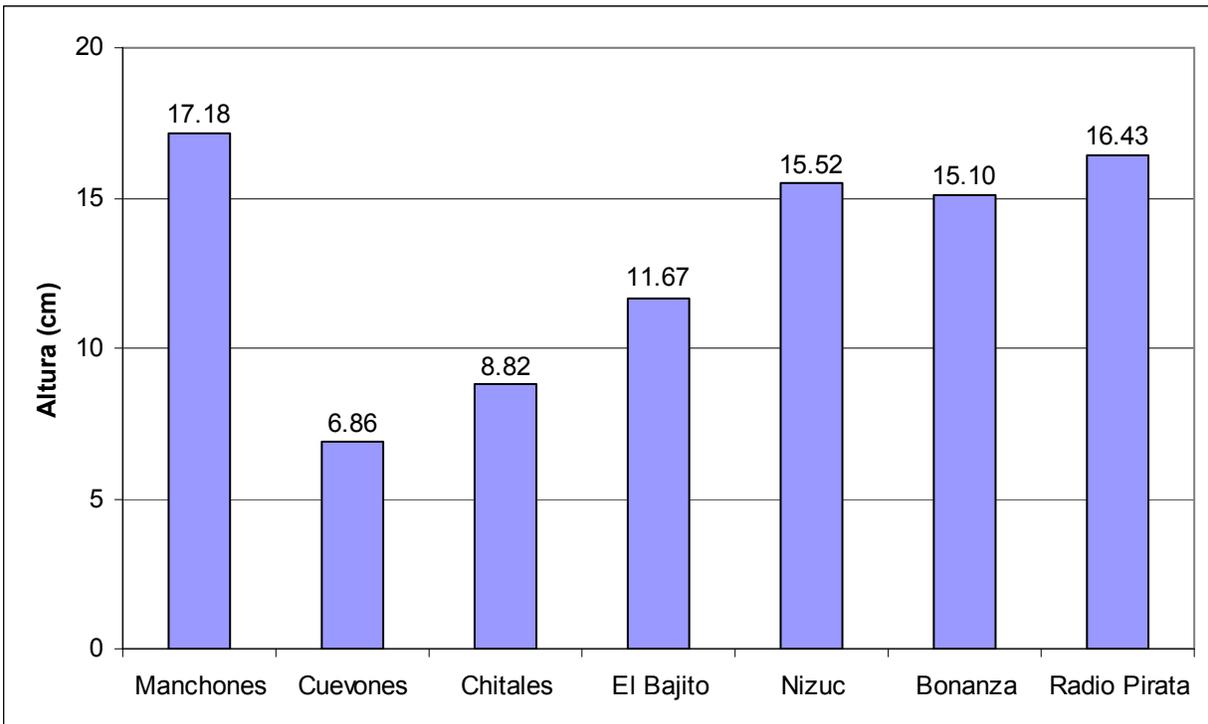


Figura 1.10. Altura promedio de las colonias de coral en cada una de las localidades estudiadas de los PIMCN y PNAPM.

Teniendo en cuenta el diámetro promedio y la altura promedio de las colonias de coral se puede notar que las localidades con colonias de menor tamaño promedio son

Cuevones y Chitales, lo que podría significar procesos recientes de asentamiento y crecimiento, mientras que de manera contraria Manchones es la localidad con colonias de mayor tamaño seguida por Radio Pirata y Bonanza, lo que podría significar procesos de asentamiento y crecimiento menos recientes, es decir colonias de mayor edad.

1.3.3. Mortalidad de las colonias de coral.

La mortalidad parcial de las colonias de coral presentó un promedio global de 23.66%, siendo Bonanza el arrecife con mayor porcentaje de mortalidad parcial total (31.25%), seguido de Manchones (30.97%) y Radio Pirata (26.67%), mientras que Cuevones fue el arrecife con menor mortalidad parcial total (11.11%), seguido de Nizuc (14.77%) (Fig. 1.11). Es importante anotar que las localidades con mayor mortalidad parcial total corresponden con aquellas que mostraron las colonias de mayor tamaño (Manchones, Radio Pirata y Bonanza).

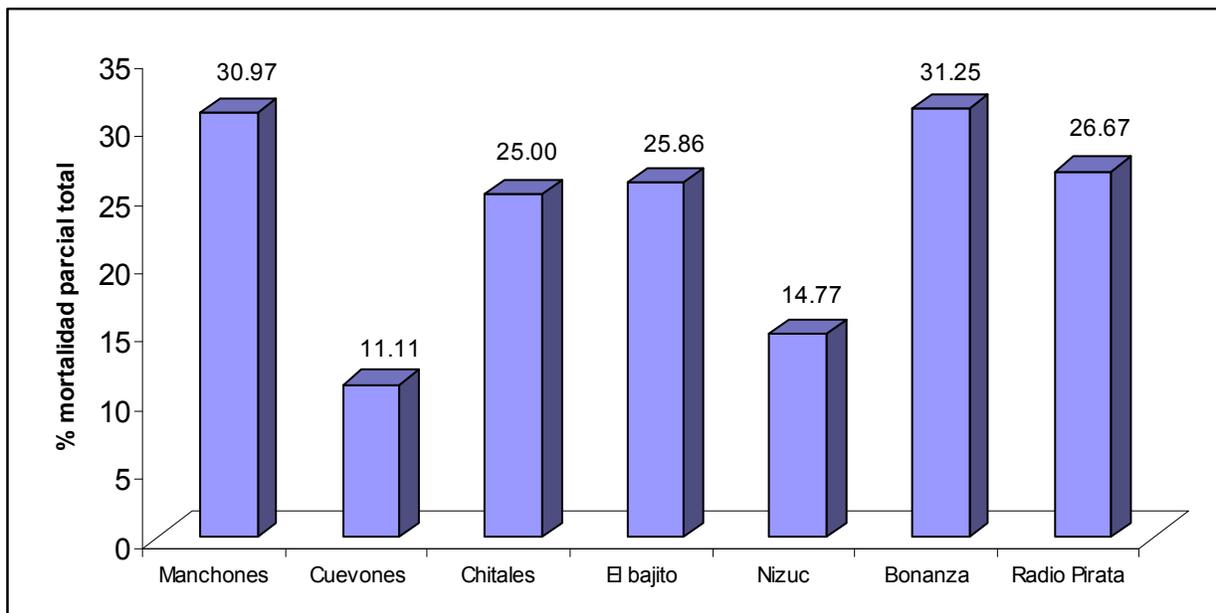


Figura 1.11. Porcentaje de mortalidad parcial total de las colonias de coral para las diferentes localidades estudiadas en los PIMCN y PNAPM.

El porcentaje de mortalidad parcial por especie mostró que *Porites astreoides* es la especie con mayor porcentaje de mortalidad en casi todas las localidades, promedio de 36.34%, seguida de *Siderastrea siderea* (20.14%) y *Acropora palmata* (18.78%), mientras que las especies con menor porcentaje de mortalidad fueron *Colpophyllia natans*, *Diploria clivosa* y *Diploria labyrinthiformis*, todas con un promedio de 3.33%. En Manchones la mortalidad parcial de *P. astreoides* alcanzó el 57.14%, seguida por un 51.72% en Chitales, mientras que la mortalidad parcial más baja de esta especie se presentó en Radio Pirata con un 5% (Tabla 1.5). *S. Siderea* presentó el mayor porcentaje de mortalidad parcial en Bonanza (53.33%) y el más bajo (5%) igualmente en Radio Pirata. *A. palmata* mostró el mayor porcentaje de mortalidad parcial (46.15%) en Nizuc y el mas bajo (3.33%) en El Bajito. También, *Montastraea annularis* presentó porcentaje de mortalidad parcial relativamente alto en Radio Pirata y Bonanza, 25 y 20% respectivamente.

Tabla 1.5. Porcentaje de Mortalidad parcial por especie para cada una de las localidades estudiadas de los PIMCN y PNAPM.

Especie	Radio						
	Manchones	Cuevones	Chitales	El Bajito	Nizuc	Bonanza	Pirata
<i>A. agaricites</i>	2.86			3.33	7.69	6.67	5
<i>A. palmata</i>	5.71	11.11	27.59	3.33	46.15		
<i>A. tenuifolia</i>	2.86						10
<i>C natans</i>				3.33			
<i>D. Stokesi</i>						6.67	
<i>Diploria sp.</i>							5
<i>D clivosa</i>				3.33			
<i>D labyrinthiformis</i>				3.33			
<i>D strigosa</i>	5.71			13.33			
<i>M. areolata</i>							15
<i>M alcornis</i>					7.69		
<i>M. complanata</i>	2.86	11.11	3.45				
<i>M. annularis</i>			3.45	3.33		20.00	25
<i>M. faveolata</i>	8.57	11.11		6.67			5
<i>M. franksii</i>	5.71					6.67	15
<i>P. astreoides</i>	57.14	44.44	51.72	36.67	23.08		5
<i>P. furcata</i>	8.57			6.67			
<i>P. porites</i>		22.22	3.45				10
<i>S. siderea</i>			10.34	16.67	15.38	53.33	5
<i>S. bourmoni</i>						6.67	

1.3.4. Porcentaje de individuos enfermos.

El porcentaje de individuos enfermos mostró que la localidad con menor número de individuos enfermos fue Radio Pirata con 0%, seguida de Cuevones con un 0.63%, mientras que la de mayor número de individuos enfermos fue Bonanza con un 4.44%, seguida por El Bajito (2.6%) (Fig. 1.12).

La comparación entre la mortalidad parcial y el porcentaje de individuos enfermos no muestra una concordancia constante, mientras que en las localidades de Bonanza, Nizuc, El Bajito y Cuevones es buena, se pierde totalmente en Manchones, Chitales y Radio Pirata. En Bonanza el porcentaje de individuos enfermos registrados alcanza un máximo de 4.4%, que coincide con el máximo de mortalidad parcial (31.25%). En contraste, la localidad de Radio Pirata (PNAPM) que alcanzó el tercer valor mas alto en mortalidad parcial (26.67%), no registró colonias enfermas (Fig. 1.12). En general, para el resto de las localidades el porcentaje de individuos enfermos fue menor al 3%, destacando El Bajito y Punta Nizuc, probablemente por ser los arrecifes más cercanos a la costa.

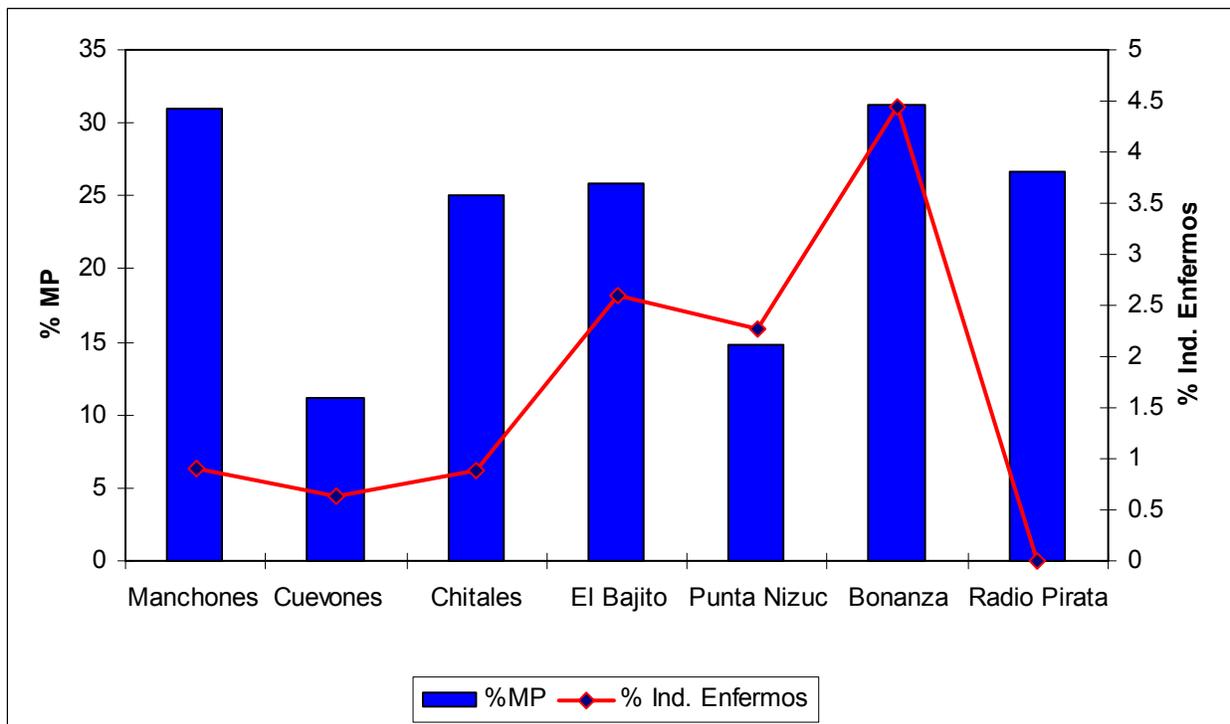


Figura 1.12. Comparación entre el porcentaje de mortalidad parcial total y el porcentaje de individuos enfermos en cada una de las localidades estudiadas de los PIMCN y PNAPM.

1.4. Estructura de la Comunidad

La estructura de la comunidad de corales se estudió teniendo en cuenta la riqueza, abundancia y densidad específica.

1.4.1. Riqueza de especies.

Para los sitios estudiados del PIMCN y PNAPM, se identificaron 28 especies de corales hermatíptico y se muestran enlistadas en la tabla 1.6. El número de especies de coral por localidad varió entre un máximo de 20 especies de corales para el arrecife El Bajito y un mínimo de 9 especies en el arrecife de Chitales, en ambas localidades del PIMCN (Fig. 1.13).

Tabla 1.6. Listado del total de especies de corales pétreos identificados para los PIMCN y PNAPM

1	<i>Acropora cervicornis</i>	15	<i>Millepora alcicornis</i>
2	<i>Acropora humilis</i>	16	<i>Millepora complanata</i>
3	<i>Acropora palmata</i>	17	<i>Montastrea annularis</i>
4	<i>Agaricia agaricites</i>	18	<i>Montastrea cavernosa</i>
5	<i>Agaricia tenuifolia</i>	19	<i>Montastrea faveolata</i>
6	<i>Colpophyllia natans</i>	20	<i>Montastrea franksi</i>
7	<i>Dichocoenia stokesi</i>	21	<i>Porites astreoides</i>
8	<i>Diploria clivosa</i>	22	<i>Porites branneri</i>
9	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	23	<i>Porites furcata</i>
10	<i>Diploria sp.</i>	24	<i>Porites porites</i>
11	<i>Diploria strigosa</i>	25	<i>Siderastrea radians</i>
12	<i>Leptoseris cucullata</i>	26	<i>Siderastrea Siderea</i>
13	<i>Manicina areolata</i>	27	<i>Solenastrea bournoni</i>
14	<i>Meandrina meandrites</i>	28	<i>Stephanocoenia intersepta</i>

El número de especies se reduce de norte a sur en los arrecifes localizados entre Isla Mujeres y Punta Cancún (Manchones, Cuevones y Chitales), para incrementarse en El Bajito (en Punta Cancún) y Nizuc, los cuales se encuentran mas cercanos a la costa y son mas someros. Así mismo, existe una reducción en número de especies de norte a sur en las localidades del PNAPM, Bonanza (14) y Radio Pirata (10) (Fig. 1.13).

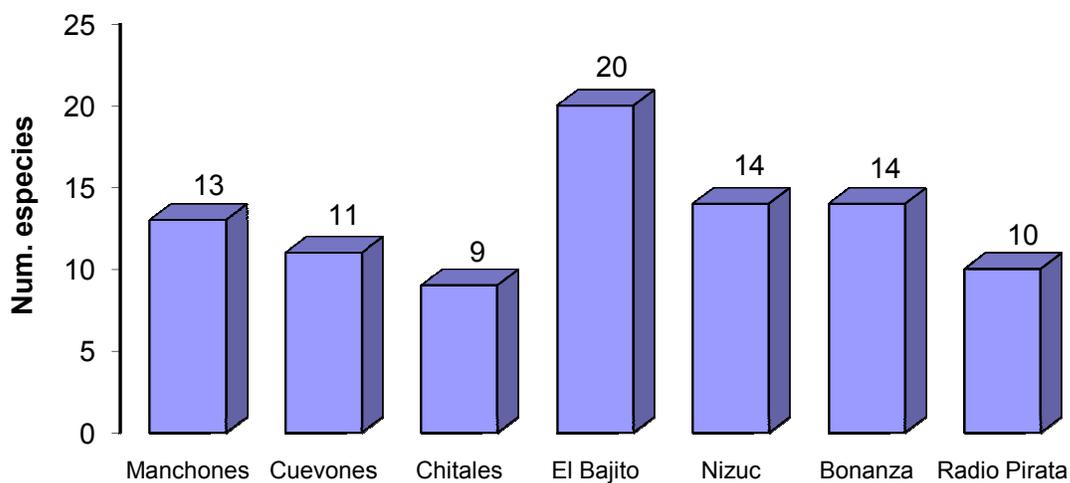


Figura 1.13. Número de especies encontradas para cada una de las localidades estudiadas en PIMCN y PNAPM.

En el PNAC, se identificaron 29 especies de corales hermatípicos (tabla 1.7). El número de especies de coral por localidad varió entre un máximo de 25 especies de corales para el arrecife Paso del Cedral y un mínimo de 19 especies en el arrecife Chankannab (Fig. 1.14).

Tabla 1.7. Listado del total de especies de corales pétreos identificados para el PNAC.

1	<i>Acropora cervicornis</i>	16	<i>Meandrina meandrites</i>
2	<i>Agaricia agaricites</i>	17	<i>Montastrea annularis</i>
3	<i>Agaricia humilis</i>	18	<i>Montastrea cavernosa</i>
4	<i>Agaricia lamarcki</i>	19	<i>Montastrea faveolata</i>
5	<i>Agaricia tenuifolia</i>	20	<i>Montastrea franksi</i>
6	<i>Colpophyllia natans</i>	21	<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>
7	<i>Dichocoenia stokesi</i>	22	<i>Porites astreoides</i>
8	<i>Diploria clivosa</i>	23	<i>Porites divaricata</i>
9	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	24	<i>Porites furcata</i>
10	<i>Diploria strigosa</i>	25	<i>Porites porites</i>
11	<i>Eusmilia fastigiata</i>	26	<i>Siderastrea radians</i>
12	<i>Helioseris cucullata</i>	27	<i>Siderastrea siderea</i>
13	<i>Isophyllastrea rigida</i>	28	<i>Stephanocoenia intersepta</i>
14	<i>Isophyllia sinuosa</i>	29	<i>Stephanocoenia michelini</i>
15	<i>Madracis decactis</i>		

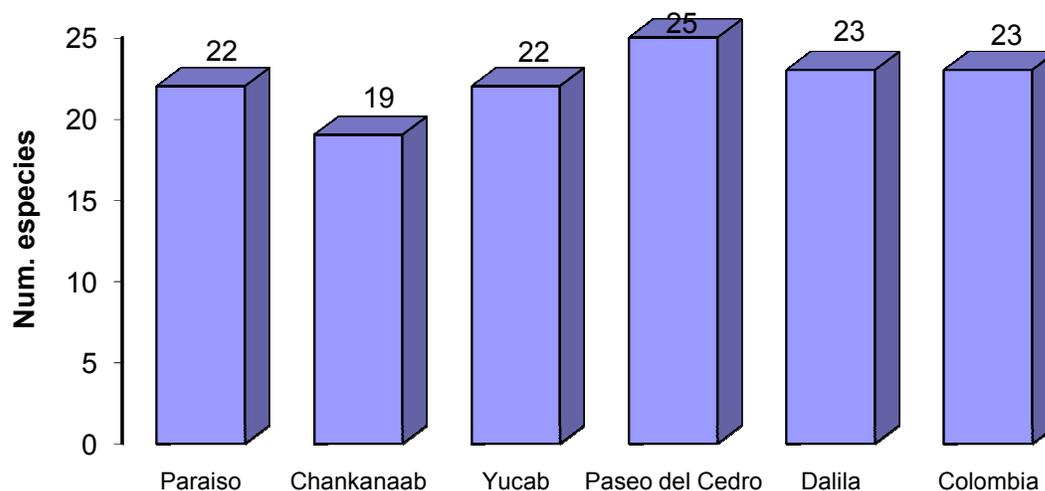


Figura 1.14. Número de especies encontradas para cada una de las localidades estudiadas en el PNAC.

1.4.2. Abundancia específica.

La abundancia coralina (expresada en porcentaje por especie) para cada una de las 7 localidades de PIMCN y PNAPM, mostró que *Porites astreoides* es la especie más abundante en 5 de las localidades, alcanzando un máximo del 52 % para la localidad del Bajito (PIMCN). En contraste, *Porites branneri* solo se encontró en dos localidades (Cuevones y El Bajito) en abundancias menores al 1%, en ambos casos. Es de resaltar que del total de especies identificadas, algunas especies como *Acropora cervicornis*, *Diploria labyrinthiformis*, *D stokesi*, *Leptoseris cucullata*, *Meandrina meandrites* y *Stephanocoenia intercepta* solo se encontraron en una localidad cada una y en porcentajes de abundancia muy bajas, generalmente menores al 5% (Tabla 1.8).

Tabla 1.8. Porcentaje de abundancia por especie coralinas para cada localidad en los PIMCN y PNAPM.

Especies	Manchones	Cuevones	Chitales	El Bajito	Nizuc	Bonanza	Radio Pirata
<i>A. agaricites</i>	3.540	0.617	2.586	3.448	18.1818	27.083	12.941
<i>A. cervicornis</i>		3.704					
<i>A. humilis</i>		0.617		0.862			
<i>A. palmata</i>	19.469	6.790	13.793	0.862	23.8636		
<i>A. tenuifolia</i>	0.885				5.6818		5.882
<i>C. natans</i>	0.885			2.586		2.083	
<i>D. clivosa</i>				1.724		2.083	
<i>D. labyrinthiformis</i>				0.862			
<i>D. stokesi</i>						4.167	
<i>D. strigosa</i>	1.770			4.310	1.1364		
<i>Diploria sp.</i>							4.706
<i>L. cucullata</i>					1.1364		
<i>M. alcicornis</i>	0.885	5.556	3.448	2.586	3.4091	2.083	
<i>M. annularis</i>			0.862	4.310	4.5455	6.250	22.353
<i>M. cavernosa</i>				0.862	2.2727	2.083	
<i>M. complanata</i>	3.540	17.901	15.517	6.034	2.2727		
<i>M. faveolata</i>	7.965	1.235		2.586	7.9545		15.294
<i>M. franksi</i>	1.770					8.333	7.059
<i>M. meandrites</i>						4.167	
<i>M. areolata</i>						6.250	9.412
<i>P. astreoides</i>	44.248	43.210	38.793	52.586	6.8182	2.083	4.706
<i>P. branneri</i>		0.617		0.862			
<i>P. furcata</i>	8.850			4.310	3.4091		
<i>P. porites</i>	5.310	19.753	11.207	0.862	14.7727	4.167	11.765
<i>S. bournoni</i>				0.862		6.250	
<i>S. intersepta</i>				0.862			
<i>S. radians</i>			1.724	0.862			
<i>S. siderea</i>	0.885		12.069	7.759	4.5455	22.917	5.882

La abundancia coralina, en porcentaje por especie, en las 6 localidades estudiadas del PNAC, muestra que *Agaricia agaricites* es la especie más abundante para todos los sitios, alcanzando un máximo del 44.61 % para la localidad del Paso del Cedral. En contraste, del total de especies identificadas, *Diploria clivosa*, *Helioseris cucullata* y *Porites divaricata* se encontraron sólo en dos localidades y en porcentajes de abundancia muy bajas, generalmente menores al 1%. Es de resaltar que *Acropora cervicornis* sólo se encontró en la localidad de Chankanaab, en abundancias menores al 1%; al igual que *Isophyllia sinuosa* para la localidad de Yucab (Tabla 1.9).

Tabla 1.9. Porcentaje de abundancia por especie coralinas para cada localidad en PNAC.

Especies totales	Paraiso	Chankanaab	Yucab	Paso del Cedral	Dalila	Colombia
<i>A. cervicornis</i>		0.24				
<i>A. agaricites</i>	26.72	31.84	25.27	40.61	44.51	27.99
<i>A. humilis</i>	0.29		1.10	0.22		0.65
<i>A. lamarcki</i>	0.29	0.71	1.10	0.22	0.21	0.32
<i>A. tenuifolia</i>	0.86	0.24	2.20	4.32	3.38	1.29
<i>C. natans</i>		2.12		0.43		0.97
<i>D. stokesi</i>	0.57		0.37	1.30	0.21	
<i>D. clivosa</i>	0.57			0.22		
<i>D. labyrinthiformis</i>	2.59	1.42	0.73	0.65	1.05	0.49
<i>D. strigosa</i>	2.01	0.47	0.37	0.86	0.63	
<i>E. fastigiata</i>	3.45	4.48	2.56	1.51	2.74	2.10
<i>H. cucullata</i>				0.22	0.21	
<i>I. rigida</i>	0.86		1.10	1.51	0.84	0.65
<i>I. sinuosa</i>			0.37			
<i>M. decactis</i>	0.86	0.24	2.93	0.86	0.63	1.29
<i>M. meandrites</i>	1.44	0.47	4.76	4.97	2.11	3.07
<i>M. annularis</i>	7.18	10.85	2.93	2.16	2.74	15.86
<i>M. cavernosa</i>	6.90	9.67	16.85	10.36	9.92	9.06
<i>M. faveolata</i>	2.59	9.91	1.10	2.16	1.69	8.25
<i>M. franksi</i>		0.94			0.42	0.65
<i>M. lamarckiana</i>	0.57	0.71		0.43	0.84	0.65
<i>P. astreoides</i>	14.66	10.85	10.26	9.94	13.50	11.49
<i>P. divaricata</i>			0.37			0.65
<i>P. furcata</i>		0.47	1.10	0.43	0.21	0.49
<i>P. porites</i>	0.29	0.00	2.56	6.05	2.53	4.69
<i>S. radians</i>	0.57	0.47	0.73	0.22	0.42	0.16
<i>S. sidereal</i>	23.85	13.92	19.78	9.72	10.13	8.58
<i>S. intersepta</i>	1.44			0.22	0.42	0.49
<i>S. michelini</i>	1.44		1.47	0.43	0.63	0.16

1.4.3. Densidad por especie.

El análisis de la densidad de individuos por especie mostró que *Porites astreoides*, es la especie que muestra mayor número de individuos por metro, llegando a alcanzar una densidad de 0.7 ind. m⁻¹ en el arrecife Cuevones (PIMCN), mientras que la menor densidad para esta especie se encontró en la localidad de Bonanza (0.010 ind. m⁻¹). Por otro lado, *Acropora palmata* muestra densidad moderada en Manchones y Nizuc de 0.220 y 0.210 ind. m⁻¹, respectivamente; pero se encuentra ausente de las localidades del PNAPM (Bonanza y Radio Pirata) (Tabla 1.10). Sólo *Agaricia agaricites*, *P. astreoides* y *P. porites* se encontró en todas las localidades estudiadas.

Tabla 1.10. Densidad por especie (Ind. por especie m⁻¹) para cada una de las localidades estudiadas de los PIMCN y PNAPM.

Especie	Manchones	Cuevones	Chitales	El Bajito	Nizuc	Bonanza	Radio Pirata
<i>A. agaricites</i>	0.040	0.010	0.027	0.033	0.160	0.130	0.110
<i>A. cervicornis</i>		0.060					
<i>A. humilis</i>		0.010		0.008			
<i>A. palmata</i>	0.220	0.110	0.145	0.008	0.210		
<i>A. tenuifolia</i>	0.010				0.050		0.050
<i>C. natans</i>	0.010			0.025		0.010	
<i>D. clivosa</i>				0.017		0.010	
<i>D. labyrinthiformis</i>				0.008			
<i>D. stokesi</i>						0.020	
<i>D. strigosa</i>	0.020			0.042	0.010		
<i>Diploria sp.</i>							0.040
<i>L. cucullata</i>					0.010	0.010	
<i>M. alvicornis</i>	0.010	0.090	0.036	0.025	0.030	0.010	
<i>M. annularis</i>			0.009	0.042	0.040	0.060	0.190
<i>M. cavernosa</i>				0.008	0.020	0.010	
<i>M. complanata</i>	0.040	0.290	0.164	0.058	0.020		
<i>M. faveolata</i>	0.090	0.020		0.025	0.070		0.030
<i>M. franksi</i>	0.020					0.040	0.060
<i>M. meandrites</i>						0.020	
<i>M. areolata</i>							0.080
<i>P. astreoides</i>	0.500	0.700	0.409	0.508	0.060	0.010	0.040
<i>P. branneri</i>		0.010		0.008			
<i>P. furcata</i>	0.100			0.042	0.030		
<i>P. porites</i>	0.060	0.320	0.118	0.008	0.130	0.010	0.100
<i>S. bournoni</i>				0.008		0.030	
<i>S. intersepta</i>				0.008			
<i>S. radians</i>			0.018	0.008			
<i>S. siderea</i>	0.010		0.127	0.075	0.040	0.110	0.050

1.4.4. Parametros ecológicos.

El análisis de la estructura de las comunidades muestra que en general todas las localidades del PIMCN muestran diversidad y dominancia muy parecida, con excepción de Nizuc. Sucede lo mismo en las localidades del PNAPM, cuyos índices se asemejan más a Nizuc (Fig. 1.10). Los valores encontrados muestran que Nizuc es la localidad con mayor índice de diversidad (0.97) y menor dominancia de alguna especie (0.13), seguida de Radio Pirata con diversidad de 0.93 y dominancia específica de 0.14. A pesar de que El Bajito fue la localidad con mayor número de especies reportadas, su diversidad no es tan alta (0.85), pero presentó el más alto índice de dominancia (0.29).

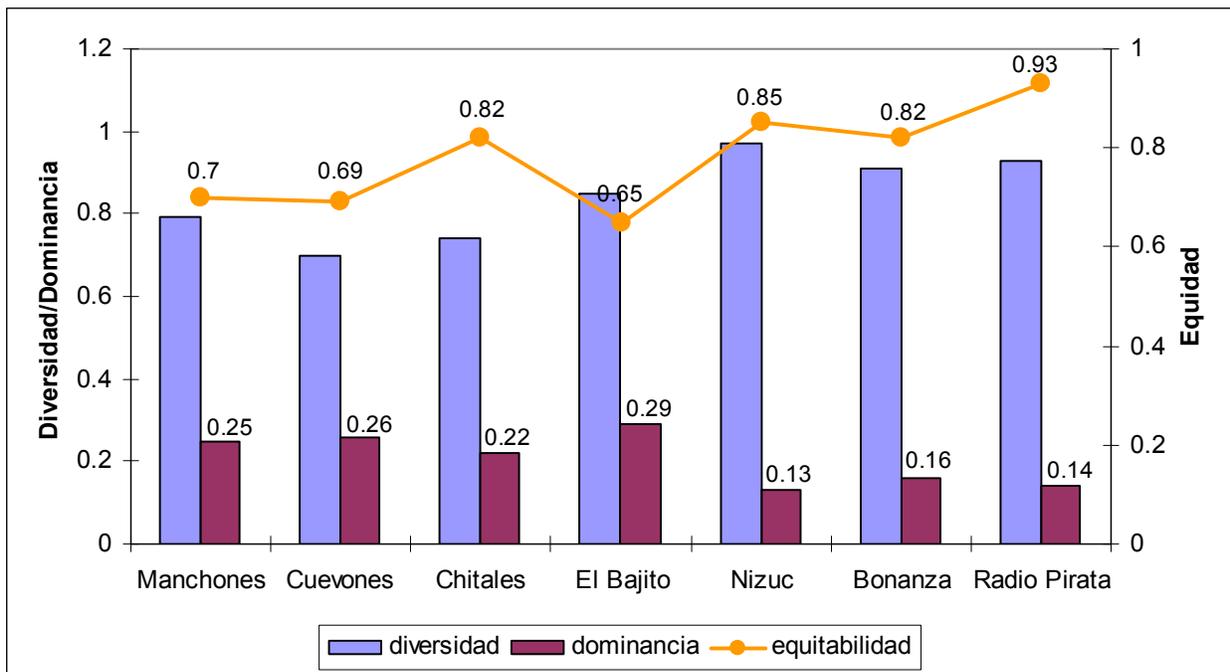


Figura 1.10. Indicadores de la estructura comunitaria de corales hermatípicos del norte del Caribe Mexicano en los PIMCN y PNAPM.

El índice de equidad de Pielou, el cual es una relación entre la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada, muestra que Radio Pirata es la localidad con mayor índice de equidad 0.93, es decir que en esta localidad casi todas las especies tienden a tener la misma abundancia, seguida de Nizuc (0.85). Por el contrario las localidades con menor índice de equidad fueron El Bajito (0.65), Cuevones (0.69) y Manchones (0.7), lo que quiere decir que en estas localidades hay una alta dominancia de una especie (*Porites astreoides*), (Fig. 1.10).

El análisis de similitud de las comunidades (Fig. 1.11), basado en el método de Morisita, distingue dos grupos principales. Uno de ellos lo forman los arrecifes del PIMCN, exceptuando a Punta Nizuc, mientras que el otro grupo esta conformado por las localidades del PNAPM y Punta Nizuc. Dentro de los arrecifes de PIMCN se encuentran a su vez dos grupos, uno formado por Manchones y El Bajito y el otro el formado por Chitales y Cuevones.

Este procedimiento de análisis distingue dos regiones cuyas características ecológicas son muy similares entre sí, y este resultado concuerda bien con lo mostrado por los otros parámetros ecológicos de la comunidad revisados previamente.

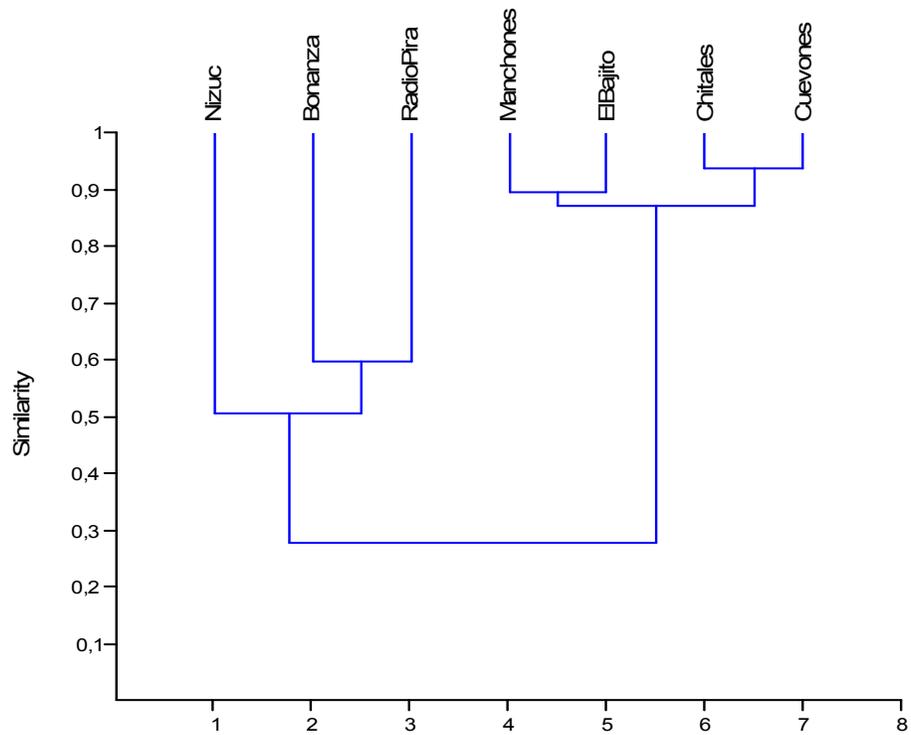


Figura 1.11. Análisis por clusters de la similitud de las comunidades de los PIMCN y PNAPM (donde el valor 1 es la máxima similitud y 0 no similitud).

1.5. Índice de Salud Arrecifal (ISA).

En años recientes se han desarrollado varios programas de monitoreo sistemático de arrecifes coralinos en la región del Caribe Mexicano (CM). Es importante destacar el esfuerzo de monitoreo realizado dentro del programa del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) (Almada-Villela et al. 2003, García-Salgado et al. 2006), estudios individuales previos (Kramer, 2003) y proyectos de monitoreo financiados por la CONABIO que se realizan actualmente (e.g. Proyecto DM07 por Reyes-Bonilla, este estudio). No obstante estos esfuerzos, es difícil establecer una conclusión sobre el estado de salud de los arrecifes del CM; en parte porque la mayoría de los estudios se limitan a proveer información sobre los principales parámetros ecológicos (cobertura de corales, diversidad, cobertura de otros organismos del bentos (esponjas, gorgonias, miléporas, etc.), cobertura de macroalgas, mortalidad (parcial y total) de corales, porcentaje de corales enfermos y discutir sobre las diferencias entre arrecifes. Recientemente se ha publicado un intento de clasificar cuantitativamente la condición de los arrecifes en el Área del SAM (García-Salgado et al. 2006). En este estudio de línea base se propone una clasificación relativamente arbitraria para la cobertura de coral en cinco niveles; partiendo de una condición arrecifal mala, cuando la cobertura de coral es <10%, hasta una condición arrecifal óptima, cuando la cobertura de coral es mayor al 30%. De la misma manera se clasifica en cinco niveles la cobertura de algas, partiendo de una condición arrecifal mala cuando la cobertura de macroalgas es >50%, y en el otro extremo una condición óptima es cuando la cobertura de macroalgas es <20% (García-Salgado et al. 2006). Adicionalmente, los autores proponen una clasificación de cinco niveles para el porcentaje de mortalidad de corales (entre 0 al 98% de mortalidad total). Sin embargo, los autores indican la dificultad de establecer

límites para la mortalidad (buena o mala) ya que un arrecife sano la mortalidad debe ser mínima ya que los corales presentan una longevidad elevada. Por lo tanto, la falta de conocimiento detallado de las causas de mortalidad (naturales o inducidas por el hombre) limita la capacidad de hacer recomendaciones de manejo en cada localidad.

Con el propósito de resumir la información ecológica y obtener información más concluyente sobre el estado que guardan los arrecifes del Caribe Mexicano muestreados en este estudio, proponemos un Índice global de Salud Arrecifal (ISA). El ISA propuesto incluye dos medidas de condición de salud: (1) Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal (CSBA) y (2) Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC). El índice global de salud arrecifal (ISA) se calcula al final, al combinar estos dos recién enunciados y que a continuación se describen.

1.5.1. Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal (CSBA) para el PNIMCN y PNAPM.

Una medida de salud del arrecife puede ser obtenido a partir de la proporción de principales constituyentes del bentos (corales pétreos, gorgonáceas, esponjas, mileporas) con respecto a la abundancia de macroalgas (e.g. García-Salgado et al. 2006). A partir de nuestros datos, el Índice de CSBA se calculó sumando la cobertura de corales pétreos (vivos y sanos) mas la cobertura de los otros constituyentes del bentos (Constituyentes Principales del bentos o CPCB) dividido entre la cobertura de algas carnosas o macroalgas (CA). Este ISA calculado como la razón $CPCB/CA$ varía entre valores mayores a uno cuando la proporción de $CPCB > CA$, lo que indica que el arrecife se encuentra en condiciones relativamente saludables y menores a uno cuando la proporción de $CPCB < CA$, que indica un arrecife dominado por macroalgas, en estado

de estrés o en vías de un cambio de fase. Los valores obtenidos de la razón CPCB/CA fueron posteriormente estandarizados con una función que convirtió los valores de la razón a un dominio de entre 0 y 1.0, asignado 1.0 al valor del arrecife que presentó la razón más alta de CPCB/CA. Este Índice Estandarizado de CSBA es el que se usará en lo sucesivo para las comparaciones entre arrecifes de las ANPS (última columna de la Tabla 1.11).

Tabla 1.11. Índice estandarizado (última columna) de la condición de salud del bentos arrecifal (CSBA), calculado de la proporción entre la cobertura de los principales constituyentes del bentos (CPCB) respecto a la cobertura de macroalgas (CA) para los arrecifes muestreados en este estudio en el PNIMCN y el PNAPM.

Localidad/arrecife	CPCB (%)	CA (%)	CSBA	Índice Estandarizado-CSBA (IE-CSBA)
PNIMCN				
Manchones	35.60	48.00	0.74	0.31
Cuevones	41.60	41.60	1.00	0.42
Chitales	30.18	49.09	0.61	0.26
El Bajito	23.67	50.17	0.47	0.20
Pta. Nizuc	33.20	58.00	0.57	0.24
PNAPM				
Bonanza	17.20	41.20	0.42	0.18
Radio Pirata	27.14	11.43	2.37	1.00

1.5.2. Índice de Condición de Salud del Bentos Arrecifal (CSBA) para el PNAC.

Se realizó el mismo ejercicio usando los datos ecológicos disponibles del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC), generados en ejercicio del proyecto CONABIO

DM007 “Monitoreo complementario de algas, invertebrados y peces en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel: Primera Etapa”, dirigido por el Dr. Reyes Bonilla. Desafortunadamente los resultados de campo generados por este proyecto no son directamente comparables con los nuestros. Este problema se deriva principalmente de que los datos generados de la cobertura de algas reportada en el proyecto DM007, incluye la suma de algas coralinas, algas foliosas y cianofitas libres o en tapete (“turf”), mientras que nuestros datos de cobertura de algas (CA) solo incluye algas carnosas o macroalgas, que constituyen el principal problema en los cambios de fase arrecifal (i.e., los otros tipos de algas son constituyentes normales de un arrecife, mientras que las algas carnosas son más una evidencia directa de efectos antropogénicos en el arrecife, por lo que al combinarlos se pierde el rastro cuantitativo de este tipo de algas “diagnósticas”). Considerando esta limitación, en la Tabla 1.12 se muestra la razón $CPCB/CA$, calculada para los arrecifes estudiados del PNAC.

Tabla 1.12. Índice de la condición de salud del bentos arrecifal (CSBA*) calculado como la razón entre la cobertura de los principales constituyentes del bentos (CPCB) respecto a la cobertura de macroalgas (CA) [CPCB/CA], para los arrecifes muestreados en el PNAC y reportados en por el proyecto CONABIO DM007. El asterisco en CSBA* (empleado en el PNAC) indica que no es exactamente el mismo que CSBA (empleados en los arrecifes de PNIMCN y el PNAPM) debido a que el valor de CA se midió diferente en el campo (ver texto para explicación).

Arrecife	CPCB (%)	CA* (%)	CSBA*	Índice Estandarizado-CSBA* (IE-CSBA)
Paraiso	24.38	24.90	0.98	0.41
Chankanaab	22.74	31.07	0.73	0.31
Yucab	22.01	13.64	1.61	0.68
Paso del Cedral	34.80	17.57	1.98	0.83
Dalila	28.13	27.08	1.04	0.44
Colombia	33.64	21.77	1.55	0.65

Es posible que la proporción de algas coralinas y cianofitas libres incluidas en el parámetro de CA* (%) de la tabla 1.12 puedan constituir una proporción menor respecto al total de las algas; no obstante, esta proporción es variable y puede llegar a tener un efecto significativo sobre la razón CPCB/CA. Como es evidente, el efecto de incluir las coberturas de algas coralinas y cianofitas libres a la cobertura de algas carnosas (macroalgas) se incrementa, cuando la cobertura de algas totales se reduce. En consecuencia, recomendamos que los datos de CSBA* para el PNAC, sean interpretados con cautela. **NOTA: Recomendamos que para los monitoreos futuros del bentos en el PNAC, las algas carnosas deben cuatificarse por separado para poder evaluar directamente el impacto antropogenico en el sobrecrecimiento de algas en los arrecifes.**

1.5.2. Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC) para el PNIMCN y PNAPM.

Como medida de salud de los corales se calculó la proporción entre cobertura de coral vivo (CCV) respecto a la suma de las cobertura de coral muerto (CCM) más la cobertura de coral enfermo (CCE). Esta proporción la proponemos como una medida que nos indica la condición de salud en que se encuentran sólo los corales pétreos y, al no considerar los otros constituyentes del bentos, esta puede considerarse relativamente independiente del estado de salud del arrecife. Con los datos de cobertura, porcentaje de mortalidad y porcentaje de enfermedades calculamos un índice de condición de salud de los corales (CSC) como la razón $[CCV/(CCM+CCE)]$. De igual manera que el CSBA mostrado en la sección previa, los datos generados de la razón CSC fueron estandarizados con una función que generó valores en un rango entre 0 y 1.0, asignándosele el valor de 1.0 al arrecife que presentó el valor de CSC mas alto, lo que indica que existe una proporción muy baja de corales con problemas de mortalidad y enfermedades, respecto a la cobertura total de corales vivos. Previo al cálculo de la razón, los porcentajes de mortalidad y de enfermedades, que se muestran en las Tabla 1.1, fueron convertidos a porcentaje respecto a la cobertura de coral vivo. Los resultados se muestran en la Tabla 1.13.

Tabla 1.13. Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC), calculada como la razón entre la cobertura de coral vivo (CCV) respecto a la suma de las cobertura de coral muerto (CCM) más la cobertura de coral enfermo (CCE), para los arrecifes del PNIMCN y PNAPM.

Localidad	CCV(%)	Mort.(%)	MRCCV(%)	Enf.(%)	ERCCV	CSC	Indice Estandarizado-CSC (IE-CSC)
PNIMCN							
Manchones	27.00	30.97	8.36	0.91	0.25	3.14	0.37
Cuevones	26.20	11.11	2.91	0.63	0.17	8.52	1.00
Chitales	16.91	25.00	4.23	0.89	0.15	3.86	0.45
El Bajito	16.17	25.86	4.18	2.60	0.42	3.51	0.41
Pta. Nizuc	18.40	14.77	2.72	2.27	0.42	5.87	0.69
PNAPM							
Bonanza	12.40	31.26	3.88	4.44	0.55	2.80	0.33
Radio	18.29	26.67	4.88	0.00	0.00	3.75	0.44
Pirata							

CCV(%): Porcentaje de cobertura de coral vivo.

Mort (%): Porcentaje de mortalidad parcial (ver Tabla 1.1)

MRCCV(%): Porcentaje de mortalidad parcial respecto al porcentaje de cobertura de coral vivo.

Enf(%): Porcentaje de cobertura de corales enfermos (ver Tabla 1.1)

ERCCV(%): Porcentaje de cobertura de corales enfermos respecto a la cobertura de coral vivo.

CSC: Índice de Condición de Salud de Corales = $CCV / (MRCCV + ERCCV)$

Rango: Clasificación en rango asignando como proporción con respecto al valor más alto de CSC.

A diferencia del cálculo de Índice de Condición de Salud del Arrecife (CSBA), el Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC) no puede ser calculado para los arrecifes del PNAC, debido a que los datos proporcionados por el proyecto DM007 no registraron el porcentaje de coral muerto, ni el porcentaje de corales enfermos. **NOTA: Recomendamos que para los monitoreos futuros del bentos en el PNAC en el proyecto DM007, el porcentaje de coral muerto y el porcentaje de corales enfermos deben ser registrados por separado para poder evaluar directamente el cambio en la salud de los arrecifes en función de la salud de los corales. De esta**

manera, los índices de salud para todas las ANP's podrán ser comparativos entre si, al basar sus índices en los mismos parámetros del bentos medidos en el campo.

1.5.3. Cálculo del Índice de Salud Arrecifal (ISA).

Después de contar con una medida de la condición de salud del bentos arrecifal (CSBA) y una medida Índice de Condición de Salud de los Corales (CSC); sumando ambos Índices para obtener el Índice de Salud Arrecifal (ISA), quedando como

$$ISA = CSBA + CSC$$

Debido a que tanto el CSBA, así como el CSC, fueron estandarizados en un rango de valores de 0 a 1, entonces el rango de variación del ISA se encuentra entre 0 y 2. Bajo esta consideración, entre más sano se encuentre el arrecife, el valor del ISA tendería a 2; en contraste, el valor del ISA tendería a cero conforme el la salud del arrecife se deteriore. De acuerdo con los resultados del estudio de caracterización de los arrecifes de PNIMCN y PNAPM, los valores del ISA calculados se muestran en la Tabla 1.14.

Tabla 1.14. Cálculo del Índice de Salud Arrecifal, a partir de la suma de los rangos obtenidos para del Índice de condición de salud del bentos arrecifal (IE-CSBA) y los rangos del Índice de condición de salud de los corales (IE-CSC).

Localidad/arrecife	IE-CSBA	IE-CSC	ISA
PNIMCN			
Manchones	0.31	0.37	0.68
Cuevones	0.42	1.00	1.42
Chitales	0.26	0.45	0.71
El Bajito	0.20	0.41	0.61
Pta. Nizuc	0.24	0.69	0.93
PNAPM			
Bonanza	0.18	0.33	0.50
Radio Pirata	1.00	0.44	1.44

De acuerdo con estos cálculos del ISA, los arrecifes que se encuentra en mejores condiciones, son la localidad de Radio Pirata en el PNAPM (ISA de 1.44) y el arrecife de Cuevones en el PNIMCN (ISA de 1.42), lo que comparativamente con el resto de localidades, se puede asumir que ambos arrecifes se encuentran en buenas condiciones. En contraste, el arrecife que se encuentra en condiciones de alerta a malas son Bonanza en el PNAPM (ISA de 0.50), seguido de los arrecifes de El Bajito y Manchones en el PNIMCN (ISA de 0.61 y 0.68, respectivamente).

De manera muy satisfactoria consideramos que los resultados de Índice de Salud Arrecifal (ISA) representan una medida muy realista de la condición de salud arrecifal que es más global e incluyente, y que tiene la facilidad de ser calculado con datos de campos fáciles de obtener. Este índice nos permite sugerir acciones mas enfocadas de conservación en aquellos sitios que presentan problemas de deterioro incipiente, pero que pudieran no resultar tan evidentes si se utilizara sólo el análisis de los parámetros ecológicos. Una clasificación mas detallada de los arrecifes basados en el ISA, se podrá

refinar al incrementar los monitoreos y observaciones de campo. Sin embargo, es claro que esta primera aproximación nos ofrece una perspectiva mas detallada y realista de de la condición actual de los arrecifes de los parques nacionales en el norte del Caribe Mexicano. Una buen forma de confirmar lo anterior es compara estos índices de salud arrecifal tanto con los datos ecológicos de los transectos como con las fotografías tomadas de cada localidad. Todo estos resultados son muy coherentes entre si.

NOTA: PARA UNA APLICACIÓN MAS GENERAL DEL ISA Y CON PROPÓSITOS DE COMPARACIÓN, SE SUGIERE QUE LOS PROYECTOS DE CONABIO RELACIONADOS CON LAS ANP'S DEL CARIBE INCLUYAN MEDIDAS DE PORCENTAJE DE MORTALIDAD y DE ENFERMEDADESASI COMO UNA MEDIDA DE LA COBERTURA DE MACROALGAS ALGAS POR SEPARADO.

1.6. Sumario y conclusiones del capítulo

Los resultados mostrados por el ISA indican que, con excepción del arrecife Radio Pirata (PNAPM) y Cuevones (PNIMCN) que muestra una conición buena, la mayoría de los arrecifes del PNIMCN y del PNAPM se encuentran en condición de salud De Alerta. Los parámetros ecológicos muestran en general una baja cobertura coralina, una alta cobertura algal, riqueza específica media, tamaño (altura y diámetro) de las colonias y mortalidad bajo. El porcentaje de cobertura de corales escleractíneos es el parámetro que se utiliza más frecuentemente por los administradores de áreas protegidas para estimar la salud del arrecife (Hill y Wilkinson, 2004). El promedio de cobertura coralina para las 7 localidades estudiadas en el PIMCN y PNAPM, fue de 19.34% con una desviación estándar (DS) de 5.35%, este promedio se encuentra

dentro del valor reportado para el SAM el cuál fue de 23.47% con una desviación estándar de 5.84% (Almada-Villela *et al.*, 2003), pero por debajo de los valores reportados para toda la región del Caribe, Golfo de México, Bahamas y Brasil, la cual fue de 26% (Kramer, 2003). Para las 6 localidades estudiadas del PNAC el promedio de cobertura coralina fue de 15.48 %, lo cual indica que en promedio la cobertura de coral en el PNAC es mucho menor que la registrada en los PIMCN y PNAPM. Es importante anotar que en general los arrecifes del norte de la Península de Yucatán se encuentran por debajo de 20%, lo que señala que es necesario acciones urgentes de conservación y manejo.

Un cambio significativo en la cobertura de algas a menudo es un indicador de influencias antropogénicas, las cuales incluyen contaminación por nutrientes (fertilizantes y aguas residuales) y una reducción en el número de organismos herbívoros (sobre-pesca, cambio climático y alteración en la cadena trófica) (Rogers, y Beets, 2001). El incremento en la cobertura algal reduce significativamente el sustrato disponible para el reclutamiento de corales y por eso es un buen indicador del estado del arrecife. Condiciones de alta cobertura algal y mal estado de los arrecifes fue reportada desde los monitoreos realizados en 1997 para los arrecifes del PIMCN (Instituto Nacional de Ecología, 1998). El promedio de cobertura algal encontrado en este estudio para los PIMCN y PNAPM fue de 42.78% con una desviación estándar de 14.94%, por encima de la reportada para los arrecifes del SAM (Almada-Villela *et al.*, 2003), la cuál fue de 35.38% con una desviación estándar de 15.13% y de la reportada para todos los arrecifes de la región del Caribe, Golfo de México, Bahamas y Brasil, la cual fue de 23% (Kramer, 2003). Para el PNAC esta cobertura algas fue menor con una

cobertura promedio de 0.6% lo que indica un porcentaje menor de presencia algal en las colonias de coral del PNAC comparado con los PIMCN y PNAPM, los cuales presentan una mayor cobertura algas y lo cual esta relacionado directamente con la condicion arrecifal de los sitios.

El promedio de riqueza específica encontrado para los arrecifes de los PIMCN y PNAPM estudiados fue de 13 especies con una desviación estándar de 3.65 especies, la cuál es parecida a la reportada para los arrecifes del SAM (Almada-Villela *et al.*, 2003), la cuál fue de 11 especies. Para el PNAC el promedio de riqueza encontrado fue 22 especies. El diámetro promedio de las colonias encontrado para los arrecifes del norte de la Península de Yucatán fue de 26.75 cm con una desviación estándar de 7.99 cm y la altura promedio fue de 13.08 cm (DS 4.02 cm), las cuales se encuentran por debajo de las reportadas para los arrecifes del SAM (diámetro promedio de 33.52 cm y DS 13.91 cm; altura promedio de 20.93 cm y DS 9.56 cm) (Almada-Villela *et al.*, 2003). La mortalidad parcial total de las localidades del PIMCN y PNAPM (23.66%, DS 7.78 %) también está por debajo de las reportadas para el SAM por Almada-Villela *et al.* (2003), 40.13% y DS de 28.62%. El estado ecológico de los arrecifes del PNAC en general es mucho mejor y se encuentra en mejores condiciones en comparación a los de los PIMCN y PNAPM tal vez porque en el PNAC el control por parte de las autoridades a cargo es más estricto y mantienen mayor control del flujo turístico en estas zonas. Por otra parte estos arrecifes tienen una mayor profundidad y su acceso es mas restringido, lo que conlleva a que el efecto antropogénico sea menor que en los PIMCN y PNAPM. De los 6 sitios estudiados en PNAC, Colombia es el sitio que presenta un estado ecológico de mayor valor, sin embargo el estado de los demás sitios es bueno. Para los

PIMCN y PNAPM la mayoría de los sitios se encuentran en un estado ecológico de alerta, donde Cuevones y Radio Pirata son los únicos sitios en una condición ecológica buena; Bonanza se encuentra en un estado ecológico crítico siendo a nivel ecológico el más vulnerable de todos los sitios estudiados en este proyecto.

CAPITULO 2

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, CANCÚN, NIZUC (PIMCN), DEL PARQUE NACIONAL ARRECIFE DE PUERTO MORELOS (PNAPM) Y PARQUE NACIONAL ARRECIFES DE COZUMEL (PNAC).

2.1. Parámetros hidrológicos.

Se obtuvieron datos hidrológicos de nutrientes (nitratos, nitritos, amonio, fosfatos y silicatos), salinidad y temperatura. Aunque la temperatura solo se reporta los datos de las colectas del 2007, debido a un problema de calibración con la sonda multi-parámetros (YSI-85) durante la salida de invierno (noviembre – diciembre) del 2006. La distribución de las localidades (estaciones) de colecta para los parques de Isla Mujeres, Cancún, Nizuc (PIMCN) y el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) se muestran en la Figura 2.1, y del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) en la Figura 2.2. Estas Figuras también incluyen las subdivisiones espaciales (mostradas en cuadros), para cada parque, que fueron empleadas para analizar cuantitativamente las tendencias o gradientes espaciales de las características hidrológicas al interior de cada región.

2.2. Caracterización hidrológica promedio.

El total de los datos hidrológicos generados a la fecha de cierre del informe se incluyen en el anexo como archivos Excel. El resumen de los resultados de los parámetros hidrológicos para la colecta para el periodo de invierno (noviembre – diciembre del 2006) se muestra en la Tabla 2.1. La concentración de nutrientes en general fue baja y consistente con otras áreas oligotróficas de zonas arrecifales del

océano. Aunque se incluyen los datos completos de nutrientes en Tablas y anexos, debido al enfoque del Proyecto resulta más relevante analizar los resultados integrados de las formas inorgánicas del nitrógeno (nitratos, nitritos y amonio).

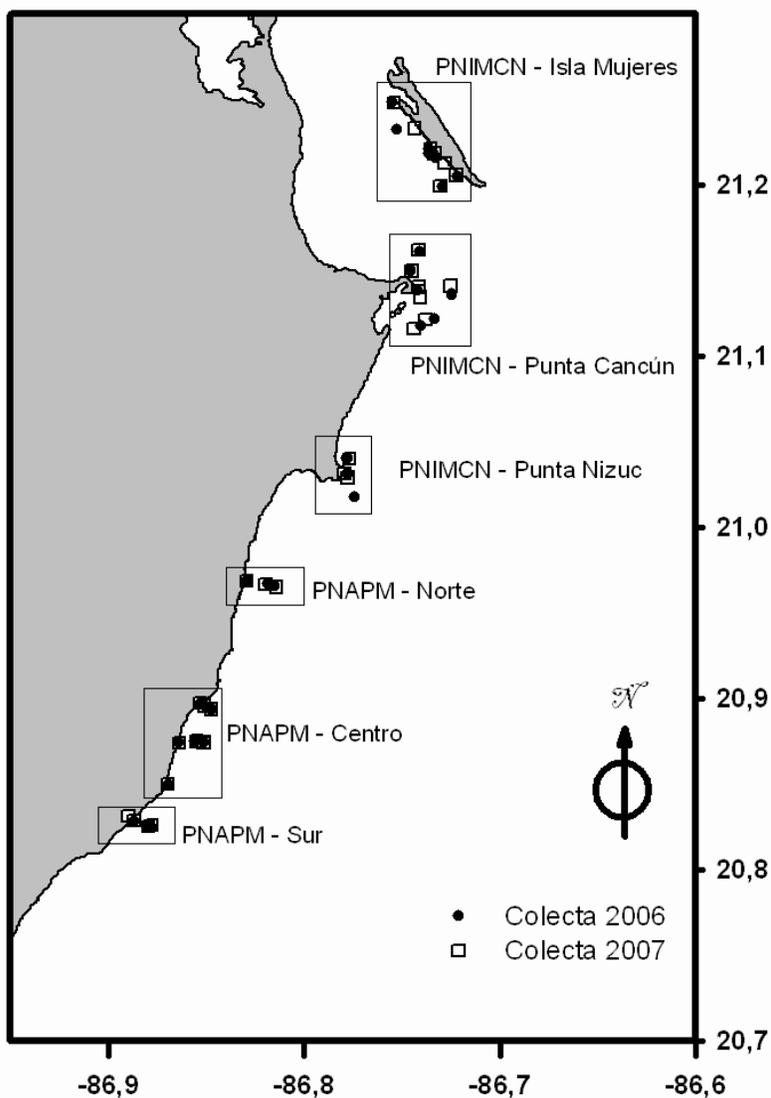


Figura 2.1. Subdivisión de las diferentes áreas empleadas en el análisis de los datos hidrológicos para el Parque Nacional Isla Mujeres Cancún Nizuc (PNIMCN) y para el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM). Se muestra los sitios de colecta para los muestreos de noviembre – diciembre del 2006 y mayo – julio del 2007.

El promedio (± 1 d.s.) de la suma de las especies de nitrógeno, referidas como Nitrógeno Inorgánico Disuelto (NID) para la región del PIMCN, excluyendo los resultados de Laguna Nichupté, fue de $0.86 \pm 0.30 \mu\text{M}$ y un intervalo entre 0.45 a $1.43 \mu\text{M}$, durante invierno del 2006 (Tabla 2.1). En contraste con la zona arrecifal del PIMCN, las concentraciones de NID en el interior de la Laguna Nichupté son significativamente más elevadas y más variables, el promedio de NID fue de $14.8 \pm 11.6 \mu\text{M}$, variando entre 1 a $32 \mu\text{M}$ (Tabla 2.1). La diferencia en las concentraciones de NID entre el interior de la Laguna y el área arrecifal externa, indica que el intercambio de agua de la Laguna con el océano adyacente es relativamente restringido y su influencia puede ser limitada a las bocas que conectan con la zona costera, al menos durante esta época del año.

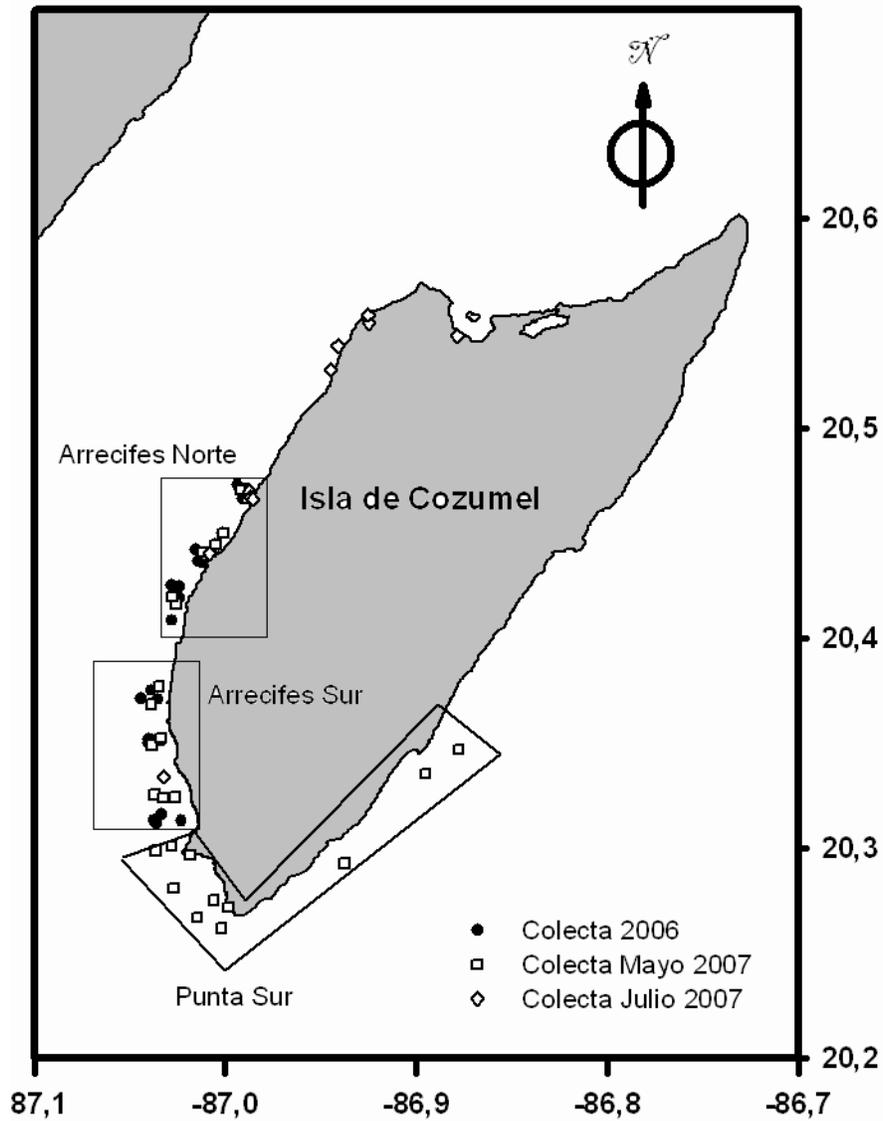


Figura 2.2. Subdivisión de las diferentes áreas empleadas en el análisis de los datos hidrológicos para el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC). Se muestra los sitios de colecta para los muestreos de noviembre – diciembre del 2006 y mayo – julio del 2007.

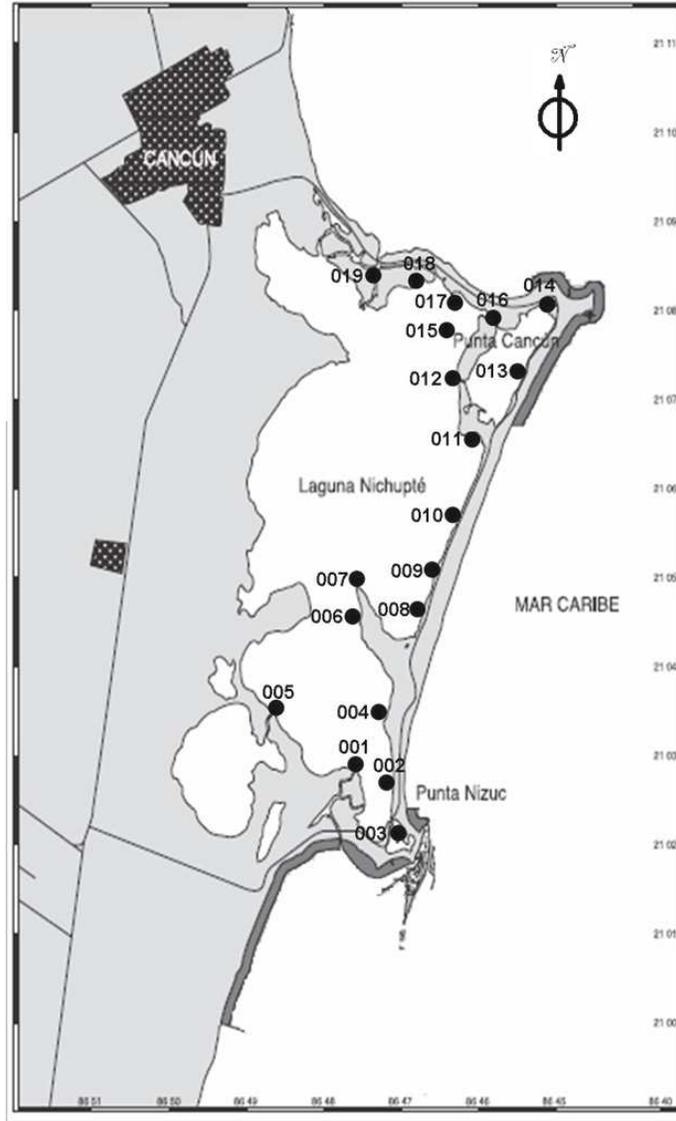


Figura 2.3. Localidades de colecta de agua para el análisis hidrológicos de Laguna Nichupté. Los sitios corresponden al muestreo de noviembre – diciembre del 2006 y mayo – julio del 2007.

El promedio (± 1 d.s.) de NID en la zona arrecifal de Isla Cozumel (PNAC) fue de $1.16 \pm 2.10 \mu\text{M}$ variando en un intervalo amplio entre 0.15 a $12.2 \mu\text{M}$, para el mismo periodo (Tabla 2.1). Aunque estas concentraciones son más elevadas que las encontradas en el PIMCN, tanto el intervalo de valores (y en consecuencia el promedio

general) de NID en el PNAC se encuentra fuertemente influenciado por las elevadas concentraciones (de hasta 12 μM) medidas en muestras de localidades costeras con filtraciones de agua dulce en el arrecife de Chankaanab (ver Tabla y Figura en el anexo). Finalmente, la concentración de NID promedio de $0.91 \pm 0.22 \mu\text{M}$ (intervalo de 0.6 a 1.3 μM) para el área del PNAPM, en el periodo de invierno del 2006, es relativamente baja y comparables con los niveles de NID medidos en el área del PIMCN (Tabla 2.1). Durante la colecta de invierno del 2006, el orden de las concentraciones fue [amonio] > [nitratos] > [nitritos] en todos las muestras analizadas.

De los nutrientes analizados, diferentes a las especies de nitrógeno (fosfatos y silicatos), el fosfato es el siguiente en importancia por ser un nutriente limitante en la producción primaria y consecuentemente en el sobrecrecimiento de macroalgas en la zona arrecifal. No obstante su importancia, la concentración promedio de fosfato para el periodo de invierno siempre fue menor a 0.5 μM y poco variable en todas las localidades de las ANP del Caribe Mexicano (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Resumen de los parámetros hidrológicos (nutrientes y salinidad) para la colecta de noviembre – diciembre del 2006.

Colecta Noviembre – Diciembre del 2006							
<i>Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc (PIMCN)</i>							
Parámetro	NID (μM)¹	Nitratos (μM)	Nitritos (μM)	Amonio (μM)	Fosfatos (μM)	Silicatos (μM)	Salinidad
Media	0.86	0.17	0.10	0.59	0.23	4.42	36.53
Desv. estándar	0.30	0.05	0.02	0.27	0.05	4.02	0.14
Mínimo	0.45	0.09	0.07	0.29	0.16	2.59	36.33
Máximo	1.43	0.33	0.15	1.08	0.36	18.60	36.87
<i>Laguna Nichupté (incluida Laguna Bojórquez)</i>							
Media	14.77	2.08	1.08	11.61	0.18	5.50	24.39
Desv. estándar	11.64	1.66	1.10	9.08	0.04	3.52	3.51
Mínimo	1.06	0.13	0.10	0.83	0.11	2.64	12.23
Máximo	32.57	5.12	3.04	25.52	0.26	17.58	27.63
<i>Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC)</i>							
Media	1.16	0.65	0.09	0.55	0.26	5.89	35.11
Desv. estándar	2.10	2.04	0.06	0.47	0.07	6.12	3.58
Mínimo	0.15	0.07	0.04	0.11	0.16	2.33	17.10
Máximo	12.12	11.09	0.29	2.52	0.50	31.76	36.30
<i>Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM)</i>							
Media	0.91	0.25	0.09	0.57	0.24	3.15	36.38
Desv. estándar	0.22	0.10	0.02	0.15	0.04	1.36	0.11
Mínimo	0.62	0.12	0.06	0.41	0.18	2.18	36.10
Máximo	1.33	0.47	0.13	0.93	0.32	7.55	36.57

¹NID: Nitrógeno inorgánico disuelto (nitratos + nitritos + amonio)

El resumen de los resultados de los parámetros hidrológicos para la colecta de primavera – verano del 2007 se muestran en la Tabla 2.2. Al igual que el caso de invierno (2006), se enfatiza el comportamiento del NID. Para este periodo, el NID en la región del PIMCN varió en un intervalo relativamente estrecho de 0.76 a 2.7 μM , con un

promedio (± 1 d.s.) de $1.5 \pm 0.65 \mu\text{M}$. Aunque los valores de NID en este periodo son relativamente bajos también, el promedio (y el intervalo de NID) es ligeramente más alto que el medido en invierno del 2006 para las mismas localidades. En contraste, la concentración del NID en el interior de la Laguna Nichupté, que varió alrededor de una media de $4.18 \pm 1.98 \mu\text{M}$ y un intervalo entre 1.4 a $8.7 \mu\text{M}$. A diferencia con los resultados obtenidos entre invierno y primavera – verano en la zona arrecifal, el intervalo de concentraciones de NID en el interior de la laguna durante primavera verano fue es marcadamente mas bajo comparado con el medido en el mismo lugar durante invierno del 2006. El incremento de la concentración promedio del NID en la zona arrecifal durante primavera – verano, comparado con los datos de NID de invierno puede ser consecuencia de un incremento en los aporte de nutrientes de origen terrestre. Esto es porque durante los meses de mayo – junio, el promedio de precipitación calculado varía entre 150 a 200 (mm/mes) y es prácticamente el doble que durante el periodo de invierno (< 80 mm/mes; Fig. 2.4). Aunque los valores bajos del NID en el interior de la Laguna Nichupté durante verano, comparados con los de invierno, parecen contradecir esta hipótesis, esta diferencia puede ser explicada por una fuerte demanda de nutrientes durante el verano. Aunque no contamos con datos de variaciones estacionales de la productividad primaria en el interior de la Laguna, la hipótesis parece razonable. Esto, bajo la consideración que un incremento inicial en el aporte de nutrientes estimula la productividad, hasta el punto donde la demanda de nutrientes excede los aportes y llegan a convertirse en un factor limitante.

Considerando las mismas localidades muestreadas, la concentración promedio del NID de $1.61 \pm 1.96 \mu\text{M}$ (intervalo de ~ 0.1 a $8 \mu\text{M}$) para la zona arrecifal del Parque

nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) es ligeramente mas elevada durante primavera – verano del 2007, comparada con la medida durante la colecta de invierno del 2006 (Tabla 2.2). Sin embargo, los valores promedio de NID en ambos periodos son bajos ($< 2 \mu\text{M}$) y con una alta variabilidad, por lo que estadísticamente no pueden ser diferenciadas. A pesar de las evidencias de sobrecrecimiento algal (que reiteran la fuente adicional de nutrientes al medio), estos resultados parecen indicar que la zona arrecifal del PNAC mantiene aparentemente condiciones oligotróficas prácticamente todo el año, típica de zonas arrecifales (Koop et al., 2001). Una marcada excepción se puede observar en las características hidrológicas de algunas localidades de la zona costera del PNAC. Por ejemplo, las concentración de NID de $9.68 \mu\text{M}$ medidas en el Arrecife Paraíso y de $6.86 \mu\text{M}$ sobre la línea de costa del arrecife Chankaanab, durante julio del 2007 (Tabla 2.3), son mas elevadas que los promedios regionales calculados en los muestreos previos (Tabla 2.1 y 2.2). En la Tabla 2.3, se muestran los resultados obtenidos para los parámetros hidrológicos para una colecta de Julio del 2007. El propósito específico de esta colecta fue obtener muestras de agua, tanto de algunas localidades arrecifales dentro del PNAC, así como de localidades cercanas a los arrecifes que presenten evidencias claras de actividades humanas.

Tabla 2.2. Resumen de los parámetros hidrológicos (nutrientes, salinidad y temperatura) para la colecta de mayo del 2007.

Colecta Mayo del 2007								
<i>Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc (PIMCN)</i>								
Parámetro	NID (μM)¹	Nitrato (μM)	Nitrito (μM)	Amonio (μM)	Fosfato (μM)	Silicatos (μM)	Salinidad	Temp °C
Media	1.50	0.46	0.07	0.98	0.28	2.30	37.24	27.82
Desv estándar	0.65	0.11	0.01	0.63	0.07	0.43	0.06	0.33
Mínimo	0.76	0.28	0.05	0.32	0.18	1.87	37.10	27.00
Máximo	2.71	0.70	0.09	2.20	0.45	3.46	37.30	28.40
<i>Laguna Nichupté (incluida Laguna Bojórquez)</i>								
Media	4.18	1.08	0.16	2.94	0.33	7.98	34.93	29.68
Desv estándar	1.98	0.47	0.09	1.73	0.08	3.21	2.48	0.71
Mínimo	1.44	0.38	0.04	0.67	0.22	2.98	28.70	28.40
Máximo	8.66	1.85	0.34	7.11	0.48	13.43	38.50	30.80
<i>Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC)</i>								
Media	1.61	0.92	0.12	1.33	0.30	4.97	35.17	28.22
Desv estándar	1.96	1.70	0.15	1.11	0.14	6.40	6.30	0.61
Mínimo	0.07	0.07	0.06	0.30	0.18	1.33	16.10	25.90
Máximo	8.10	7.91	0.88	4.65	0.81	28.66	37.60	29.00
<i>Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos (PNAPM) (julio 2007)</i>								
Media	2.15	0.53	0.04	1.58	0.16	1.85	36.03	30.60
Desv estándar	0.84	0.43	0.01	0.52	0.04	1.38	5.05	0.45
Mínimo	1.22	0.13	0.02	0.88	0.10	0.60	18.50	30.20
Máximo	4.02	1.50	0.05	2.63	0.21	6.13	37.50	31.80

¹NID: Nitrógeno inorgánico disuelto (nitratos + nitritos + amonio)

Los resultados obtenidos durante este muestreo (Tabla 2.3) no son comparables a los obtenidos previamente (noviembre – diciembre del 2006 y mayo del 2007), ya que las localidades muestreadas durante julio del 2007 no son exactamente las mismas de los muestreos previos. Durante el muestreo de julio del 2007 en Cozumel se incluyeron específicamente aquellos sitios que se consideran mas impactados

antropogénicamente por actividades recreativas (Arrecifes Paraíso, Palancar, así como el canal de entrada a la Caleta y La Caleta), además de sitios en la parte norte de la Isla (frente Hotel Las Brisas, Country Club, campo de Golf, etc). De hecho, los valores más altos de nutrientes medidos en este proyecto se obtuvieron en la laguna del campo de Golf (Tabla 2.3). El NID en esta localidad alcanzó valores de 632 μM y el 99% se encuentra en forma de amonio. Esto indica una poza de agua en condiciones de alta eutrofización y que, dadas las condiciones del terreno en la Isla y, aunque potencialmente puede constituir una fuente importante de nitrógeno a la zona costera cercana, los bajos valores de NID en la zona arrecifal indican que su influencia parece ser muy limitada.

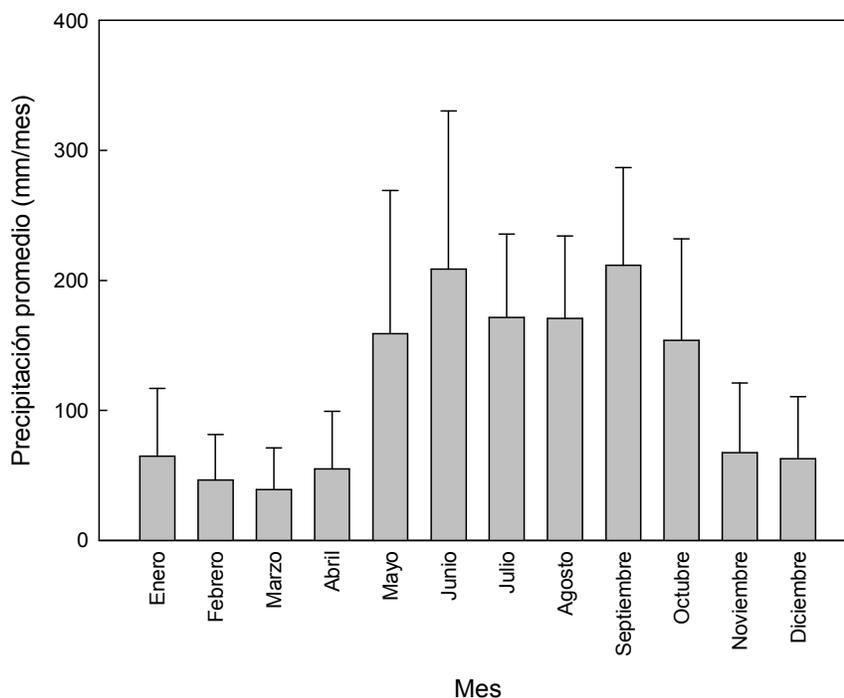


Figura. 2.4. Precipitación promedio ($\pm 1\text{d.s.}$) para la región de Cancún – Puerto Morelos. Los promedios son calculados considerando los datos de precipitación del periodo de 1900 – 1996 y obtenidos de la base de datos UEA – CRU (Hulme et al., 1998).

Tabla 2.3. Resultados de los parámetros hidrológicos (nutrientes, salinidad y temperatura) en el Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) durante la de julio del 2007. Estos incluyen localidades dentro del Parque y fuera del ANP (ver Fig. 2.2), particularmente al norte de la Isla. En el anexo se presentan los datos completos, incluidos la posición geográfica (GPS) de cada localidad.

Colecta julio del 2007								
<i>Localidades dentro y fuera del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC)</i>								
Parámetro	NID (μM) ¹	Nitratos (μM)	Nitritos (μM)	Amonio (μM)	Fosfatos (μM)	Silicatos (μM)	Salinidad	Temp °C
Palancar (S)	2.37	0.83	0.04	1.51	0.24	2.36	37.4	29.1
Palancar (F)	2.20	0.48	0.04	1.69	0.18	1.80	36.8	28.8
Chankanaab	6.86	2.24	0.06	4.56	0.18	2.72	33.7	28.7
Paraíso	9.68	0.97	0.05	8.66	0.24	1.99	37.4	28.8
Canal caleta (0.5m)	2.94	0.55	0.12	2.28	0.19	5.70	29.7	28.5
Canal caleta (3m)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	37.2	28.9
Caleta (0.5m)	5.22	1.19	0.22	3.81	0.26	8.82	30.0	28.2
Caleta (3m)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	36.3	28.8
Hotel "Las Brisas"	2.52	0.47	0.03	2.02	0.17	2.12	37.2	28.6
Campo de Golf	632	2.58	3.67	626	61	225	1.4	32.3
"Country Club"	13.9	2.81	0.09	11.0	0.48	2.51	37.9	32.7
Isla de la Pasión	2.58	0.12	0.05	2.41	0.19	1.39	39.4	30.2
Pto. abrigo Cozumel	5.61	0.87	0.08	4.67	0.29	1.42	37.3	29.2
Media	62.4	1.19	0.40	60.8	5.77	23.3	33.2	29.5
Desv. Estándar	189	0.92	1.08	187	18.3	67	10	1.44
Mínimo	2.20	0.12	0.03	1.51	0.17	1.39	1.40	28.2
Máximo	632	2.81	3.67	626	61	225	39.4	32.7
Media*	5.39	1.05	0.08	4.67	0.24	3.08	35.86	29.2
Desv. Estándar*	3.87	0.84	0.06	4.26	0.09	2.36	3.09	1.20
Mínimo*	2.20	0.12	0.03	1.51	0.17	1.39	29.7	28.2
Máximo*	13.9	2.81	0.22	11.0	0.48	8.82	39.4	32.7

¹NID: Nitrógeno inorgánico disuelto (nitratos + nitritos + amonio)

*Estadísticos calculados sin considerar los valores del Campo de Golf (valores remarcados con el sombreado)

Las concentraciones promedio para los parámetros hidrológicos en el PNAPM, durante el verano del 2007, se presentan en la Tabla 2.2. Al igual que la colecta de noviembre – diciembre del 2006, los nutrientes en general fueron bajos comparados con aguas de zonas costeras de regiones templadas, pero similares a zonas arrecifales de áreas tropicales. El NID promedio de $2.15 \pm 0.84 \mu\text{M}$ obtenido durante la colecta de julio del 2007, es mayor por un factor de dos a los obtenidos durante la colecta de noviembre – diciembre del 2006 (NID promedio de $0.91 \pm 0.22 \mu\text{M}$). Este mismo factor es aplicable a los promedios de nitratos ($0.53 \pm 0.43 \mu\text{M}$) y amonio ($1.58 \pm 0.52 \mu\text{M}$) de julio del 2007, comparado con los valores promedio de nitratos ($0.25 \pm 0.10 \mu\text{M}$) y amonio ($0.57 \pm 0.15 \mu\text{M}$) de noviembre – diciembre del 2006. El caso contrario se observó en los nitritos, donde el valor promedio de noviembre – diciembre del 2006 ($0.09 \pm 0.02 \mu\text{M}$) es aproximadamente el doble de la concentración promedio de nitritos obtenida en julio del 2007 ($0.04 \pm 0.01 \mu\text{M}$), para la misma región. El mismo resultado se obtuvo con fosfatos y silicatos; durante la colecta de noviembre – diciembre del 2006, el promedio de fosfatos ($0.24 \pm 0.04 \mu\text{M}$) y silicatos ($3.15 \pm 1.36 \mu\text{M}$) fueron cercanos al doble de los promedios de fosfatos ($0.16 \pm 0.04 \mu\text{M}$) y silicatos ($1.85 \pm 1.38 \mu\text{M}$) medidos en el PNAPM durante julio del 2007. La salinidad en ambas colectas fue muy similar (~ 36). No obstante, el promedio de salinidad calculado para julio del 2007 es afectado por la baja salinidad medida en la localidad de Marina El Cid (18.5), ya que en el resto de las localidades la salinidad varía entre 37.2 a 37.5 (Tabla 2.3). Esto sugiere que, el final del periodo de alta precipitación (noviembre – diciembre) produce una reducción de salinidad en una unidad, comparado con el periodo previo a la temporada de lluvias (julio).

2.3. Distribución espacial de las características hidrológicas.

En el anexo de este proyecto se incluyen la distribución espacial de los parámetros hidrológicos en forma de isosuperficies. No obstante, con el propósito de realizar un análisis mas detallado de la variabilidad espacial de los parámetros hidrológicos, se perfilaron transectos a lo largo del de cada uno de los parques. Para esto, cada ANP se subdividió en áreas geográficas (ver los cuadros en las Fig. 2.1 y 2.2) y se promediaron los datos hidrológicos de las localidades de colecta posicionadas dentro de cada subdivisión. Esta tipo de estratificación arbitraria nos ofrece información mas clara sobre el comportamiento espacial de los parámetros hidrológicos, cuando existen fuentes no puntuales, o difusas, que potenciales que pueden afectar a una variable.

La distribución espacial de las variables hidrológicas medidas en el PIMCN, siguiendo el eje norte – sur (Fig. 2.1), se muestra en la Figura 2.5. Uno de los aspectos más relevantes de esta comparación es la diferencia en cada variable, entre periodos de colecta. Para todas las áreas del PIMCN, la concentración de nitrato durante mayo del 2007 es poco mas del doble que la medida durante noviembre del 2006 y, mientras que en el mes de noviembre el nitrato muestra una ligera tendencia a disminuir de norte (Isla Mujeres) a sur (Punta Nizuc), durante el mes de mayo, esta tendencia se invierte (Fig. 2.5a). De manera similar al nitrato, las concentraciones promedio de amonio son mayores en mayo del 2007, comparado con el mes de noviembre del 2006; además en noviembre el amonio no presenta una tendencia espacial muy evidente (Fig. 2.5c). La diferencia en la concentración promedio durante ambos periodos de colecta es más evidente en el norte (Isla Mujeres), donde la diferencia entre muestreos es $\sim 1 \mu\text{M}$,

mientras que en Punta Cancún, la concentración promedio de amonio prácticamente no cambia entre muestreos (Fig. 2.5c). Aunque pequeñas, el incremento en las concentraciones de nitratos, amonio y fosfatos en verano (Fig. 2.5a,c,d), comparado con el invierno, puede ser consecuencia de las escorrentías de tierra (superficiales y subterráneas) debido a las altas precipitaciones durante estos meses (Fig. 2.4). Sin embargo, esto no se ve reflejado en la salinidad ya que durante los meses de verano, la zona del PIMCN se caracteriza por salinidades de ~ 37.2 , compara con la salinidad promedio de ~ 36.5 para los meses de invierno (Fig. 2.5f). En consecuencia, y a falta de información precisa sobre la circulación regional, estas diferencias pueden ser explicadas por un mayor reciclamiento de nutrientes superficiales en verano.

El comportamiento espacial de los parámetros hidrológicos en el PNAPM se presenta en la Figura 2.6. De la misma manera que la clasificación geográfica en el PIMCN, la zona arrecifal de Puerto Morelos fue analizada en un transecto que subdivide las áreas geográficas del norte (alrededor de la localidad de Bonanza), el centro del arrecife y la parte sur (cerca del Muelle o marina).

Durante la colecta de verano, la concentración de nitratos en el PNAPM mostró una clara tendencia a incrementar de norte a sur, mientras que en invierno los niveles de nitratos siempre fueron bajos y poco variables en todo el arrecife (Fig. 2.6a). Los niveles de amonio también fueron marcadamente mayores en verano, en promedio hasta en $\sim 1 \mu\text{M}$, comparados con el invierno, pero a diferencia del nitrato, el amonio no muestra ninguna tendencia definida (Fig. 2.6c). La concentración promedio de amonio es ligeramente menor en la zona central del arrecife y mayor en los extremos norte y

sur; aunque una característica distintiva del amonio fue su elevada variabilidad en todas las áreas del parque (Fig. 2.6c).

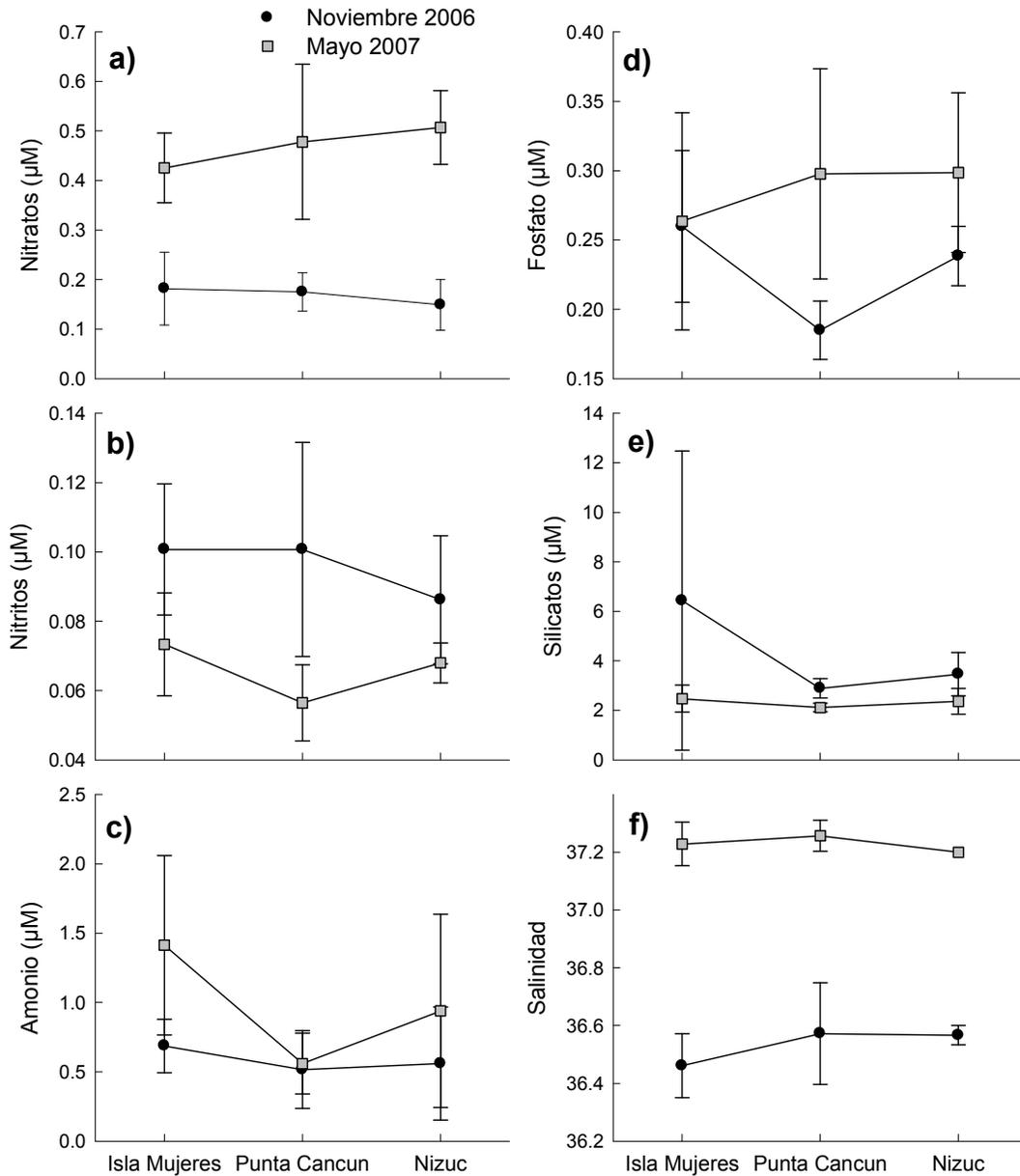


Figura 2.5. Comparación en la concentración de nutrientes y salinidad (promedio \pm 1 desviación estándar) entre las diferentes áreas que se subdividió el PIMCN (ver Fig. 2.1) entre las colectas de invierno del 2006 y primavera – verano del 2007.

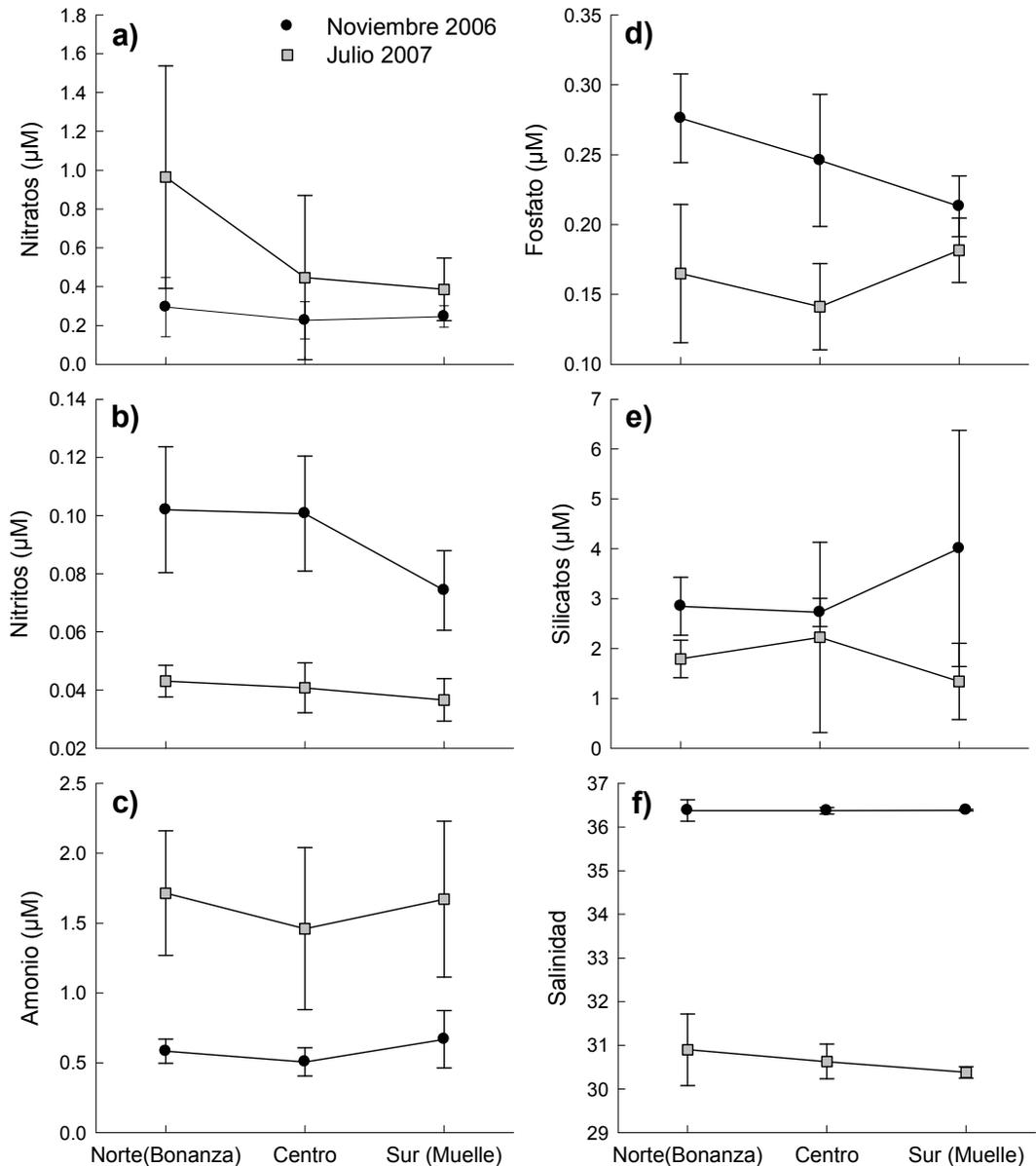


Figura 2.6. Comparación en la concentración de nutrientes y salinidad (promedio \pm 1 desviación estándar) entre las diferentes áreas que se subdividió el PNAPM (ver Fig. 2.1) entre las colectas de invierno del 2006 y primavera – verano del 2007.

A diferencia del nitrato y el amonio, las concentraciones promedio de nitritos, fosfato y silicatos fueron mayores durante invierno, que en verano (Fig. 2.6). De estos, aunque siempre en concentraciones promedio menores a $0.3 \mu\text{M}$, el fosfato muestra un

gradiente claro norte – sur en invierno, mientras que en verano las concentraciones promedio de fosfato son menores a $0.2 \mu\text{M}$ y sin ninguna tendencia definida (Fig. 2.6d). Este mismo gradiente norte – sur a lo largo del arrecife es observado en los nitritos, aunque menos evidente que el fosfato. Con concentraciones siempre menores a $0.12 \mu\text{M}$, los nitritos también se caracteriza por su elevada variabilidad durante la colecta de invierno (Fig. 2.6b).

La concentración promedio de silicatos por área, fue mayor en la colecta de invierno que los promedios de verano, para todo el PNAPM y las tendencias son exactamente invertidas en ambos periodos (Fig. 2.6e). Mientras que en invierno la concentración promedio disminuye ligeramente desde el norte (Bonanza) al centro del arrecife, para posteriormente incrementarse hacia el sur, durante el muestreo de verano la concentración promedio sube desde el norte hacia el centro, para posteriormente disminuir del centro hacia el sur (Fig. 2.6e).

Finalmente la salinidad mostró una diferencia significativa entre ambos muestreos. Durante invierno, la salinidad es alta en todas las áreas del parque (ligeramente mayor a ~ 36), mientras que en verano la salinidad fue < 31 , en todo el transecto longitudinal del arrecife (Fig. 2.6f). Las bajas salinidades durante verano, a diferencia de lo encontrado en el PIMCN, muestra de manera más clara el efecto del periodo de lluvias sobre las características hidrológicas de la zona arrecifal. Contrario a lo esperado, las bajas salinidades de verano que presumiblemente pudiera ser consecuencia de un mayor aporte de aguas de escorrentías y submarina, no tiene un efecto sobre las concentraciones de nitrato y amonio, que por su concentración son las principales especies de nitrógeno.

A diferencia de los otras ANP, la subdivisión geográfica del Parque Nacional Arrecifes de Cozumel (PNAC) es más complicada, debido en parte que las colectas se desarrollaron a lo largo de todo el sistema de arrecifes, desde el extremo sur en el Arrecife Colombia hasta el límite norte del ANP en el Arrecife Paraíso. Posterior a la colecta de invierno del 2006, durante el verano (mayo – noviembre) del 2007, el muestreo hidrológico se extendió hasta la parte sur de la Isla de Cozumel, fuera de la zona arrecifal. Como se mencionó previamente, la subdivisión geográfica del PNAC fue seleccionada para comparar el límite norte del Parque, por encontrarse más cerca de la ciudad de Cozumel, se esperaría un mayor efecto de las actividades antropogénicas. Comparado con el PIMCN y el PNAPM, los niveles promedio de todos los nutrientes analizados son más elevados en el PNAC. Otra característica hidrológica que diferencia las el PNAC de los otros ANP, son la diferencias mínimas en la concentración promedio de nutrientes, incluyendo la salinidad, entre ambos periodos del año (Fig. 2.7). Una notable excepción es el amonio, ya que durante la colecta de verano del 2007, la concentración promedio fue mayor a la de invierno en $\sim 1 \mu\text{M}$ (Fig. 2.7c). La tendencia espacial de todos los nutrientes muestra un claro gradiente norte – sur, pero espacialmente el amonio, el fosfato y los silicatos (Fig. 2.7). El mismo gradiente es observable en nitratos y nitritos, pero en ambos nutrientes los niveles promedio tienden a incrementarse hacia la punta sur de la Isla (Fig. 2.7).

Los gradientes espaciales de nutrientes a lo largo de Parque, aunque evidentes, son acompañados de variabilidad muy elevada, particularmente en la parte norte de la zona arrecifal (Fig. 2.7). Este es un resultado esperado, ya que la parte norte además de la zona arrecifal, que generalmente presenta valores bajos de nutrientes y

comparables a las otras ANP estudiadas, incluye muestras cercanas a la línea de costa donde las concentraciones son típicamente más altas. Un ejemplo son muestras colectadas frente a la Caleta y la región costera de Chancanaab, donde existen filtraciones de aguas subterráneas caracterizadas por altos valores de nutrientes (Ver anexos con datos hidrológicos completos). La contribución relativa de los aportes subterráneos sobre la variabilidad de nutrientes observada en la parte norte puede ser vista con los datos de salinidad. En el PNAC, la salinidad es típicamente mas baja que en los otros parques, además que no se observan diferencias de salinidad entre los diferentes periodos de muestreo, lo que indica la influencia limitada de la precipitación sobre los cambios en las características hidrológica de la zona arrecifal (Fig. 2.7f).

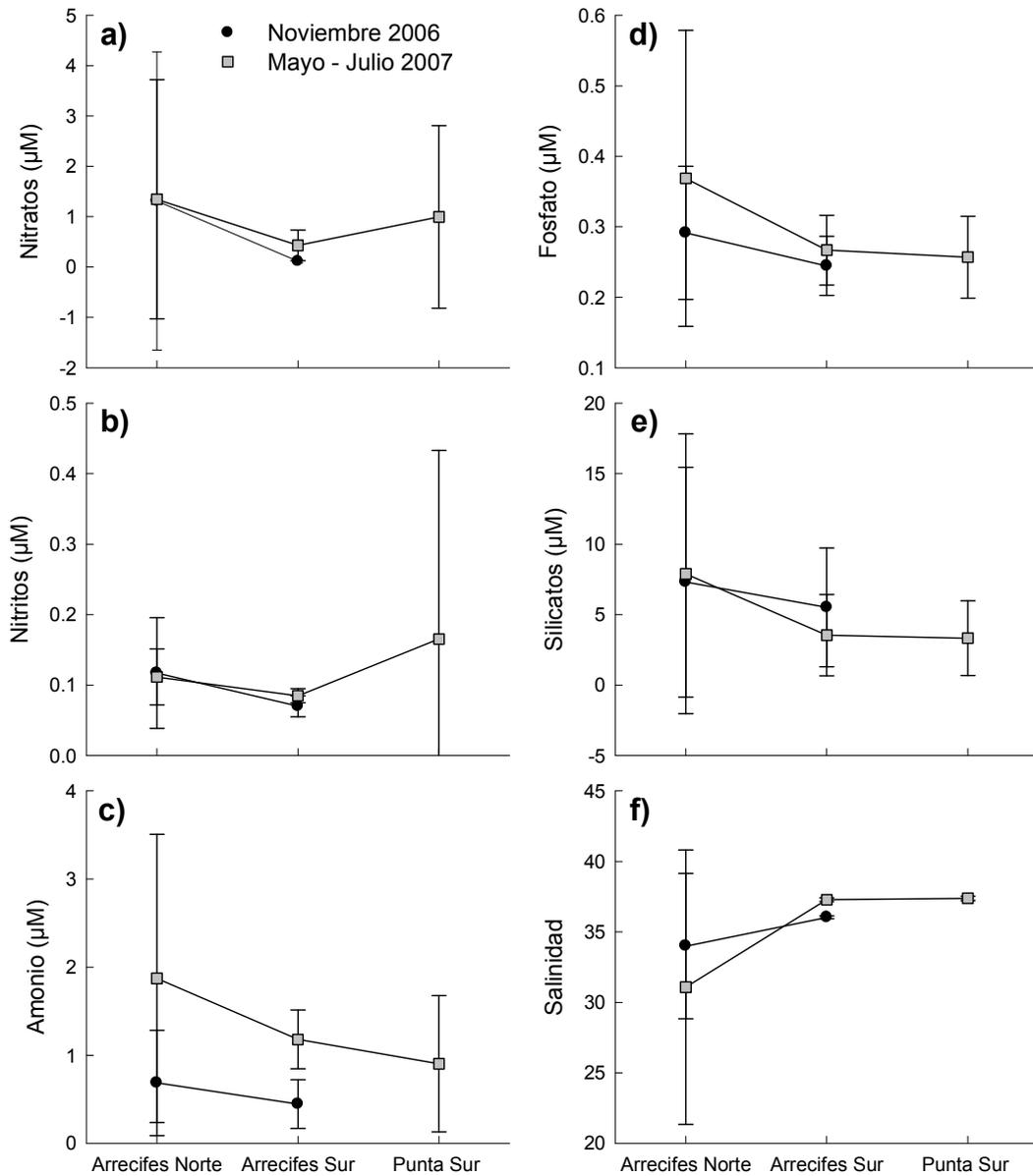


Figura 2.7. Comparación en la concentración de nutrientes y salinidad (promedio \pm 1 desviación estándar) entre las diferentes áreas que se subdividió el PNAC (ver Fig. 2.2) entre las colectas de invierno del 2006 y primavera – verano del 2007.

2. 4. Sumario y conclusiones del capítulo.

La información hidrológica generada en este estudio de caracterización, indica que no existen evidencias de eutrofización en las zonas arrecifales del Caribe

Mexicano. Los niveles de nutrientes analizados, muestran valores generalmente bajos y dentro de lo esperado para zonas arrecifales del océano (e.g. Koop *et al.*, 2001). Se ha demostrado que las filtraciones de aguas subterráneas, a través de “ojos de agua” (spings), en la zona costera de área tropicales, tanto en el la costa norte y occidental de la Península de Yucatán (Herrera-Silveira *et al.*, 2002) como en la plataforma costera de Florida (Lapointe 1997; Lapointe *et al.*, 2004, 2005), aportan cantidades significativas de nitrógeno y fósforo a la columna de agua. Sin embargo, un estudio realizado en pastos marinos (*Thalassia testudinum*) de la laguna arrecifal de Puerto Morelos, ha demostrado que los aportes de nutrientes, a través de ojos de agua, enriquecen el medio (y a los pastos) con fósforo, pero no con nitrógeno (Carruthers *et al.*, 2005). De hecho, estos autores encontraron que el agua intersticial en la zona de praderas de *T. testudinum* de Puerto Morelos contiene concentraciones extremadamente bajas de nutrientes (amonio 1.2 – 3.42 μM ; NID 2.8 – 4.4 μM y fosfatos de 1 – 1.5 μM) comparados con la media global para praderas de pastos marinos (~86 μM de amonio y 12 μM de fosfatos).

Aunque los bajos valores de NID, tanto en la columna de agua como en el agua intersticial de Puerto Morelos, sugiere que el nitrógeno puede ser limitante para el crecimiento de los pastos, el contenido de nitrógeno (%N>1.8) en *T. testudinum* de la laguna arrecifal no muestra esta limitación (Carruthers *et al.*, 2005). Es interesante resaltar estos resultados ya que Puerto Morelos es un ejemplo que puede ser extendido al resto de las comunidades coralinas del norte del caribe mexicano. Las bajas concentraciones de NID medidas en este estudio para las zonas arrecifales, el crecimiento evidente de macroalgas en algunos arrecifes estudiados y los altos valores

de N en el tejido de los pastos, sugiere la existencia de fuentes difusas de nitrógeno que son capaces de satisfacer la demanda interna de las plantas.

A diferencia de la concentración de nutrientes medidos en las áreas arrecifales de las ANP, los niveles de nutrientes en el interior de Laguna Nichupté (incluida Laguna Bojórquez) es mucho mas elevado. La concentración promedio medida de NID en estas Lagunas (de $14.7 \pm 11.6 \mu\text{M}$ para invierno y de $4.18 \pm 1.98 \mu\text{M}$ para verano) es entre 2 a 7 veces mas alto que el promedio de NID medido en Puerto Morelos, localidad en que se medió la concentración promedio mas elevada de la zona arrecifal ($2.15 \pm 0.84 \mu\text{M}$). Estos resultados son de esperarse, debido ya que el sistema lagunar Nichupté – Bojórquez esta expuesto al aporte antropogénico de aguas residuales y ha mostrado signos evidentes de eutrofización en las últimas décadas (Merino *et al.*, 1990, 1992; Carruthers *et al.*, 2005). Sin embargo, nuestros resultados no muestran una influencia significativa de este sistema lagunar, sobre las características hidrológicas de las zonas arrecifales de la parte externa de las Lagunas.

CAPITULO 3

ISÓTOPOS ESTABLES DE NITRÓGENO ($\delta^{15}\text{N}$) EN MACROALGAS

3.1. Resultados

Con el propósito de diferenciar las potenciales fuentes de nitrógeno hacia las zonas arrecifales, se analizó la composición isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) en una variedad de macroalgas colectadas en los arrecifes estudiados. El uso de trazadores isotópicos, principalmente el $\delta^{15}\text{N}$ en macroalgas ha sido una estrategia ampliamente utilizada para estudiar la dinámica de nutrientes. Esto se ha aplicado particularmente en áreas en las que las fuentes de nutrientes son difusas o no tan evidentes, así como también en áreas donde la fuente esta bien diferenciada, por ejemplo los aportes de nutrientes provenientes de aguas residuales, pero la extensión espacial de su influencia no es clara (Gartner *et al.*, 2002; Yamamuro *et al.*, 2003).

El $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido foliar de las macroalgas colectadas en los diferentes arrecifes del Caribe Mexicano durante invierno del 2006, se muestra en la Tabla 3.1. En esta tabla se clasifican los resultados de todas las especies muestreadas por localidad (arrecife) y para cada ANP. Durante invierno del 2006 se analizaron muestras de 10 arrecifes; uno del PIMCN (Cuevones), tres en el PNAPM (Bonanza al norte, Punta Caracol o Bertran en el centro y La Pared en la parte sur) y seis arrecifes del PNAC (de norte a sur, Paraíso, Chankanaab, Yucab, El Cedral, Dalila y Colombia). Las especies colectadas dependieron de la disponibilidad en cada localidad, aunque existen especies que fueron obtenidas en más de un arrecife (Fig. 3.1). Nuestro objetivo de coleccionar una misma especie en el mayor número de localidades posibles, y de esta manera poder establecer una comparación entre localidades, proporcionó resultado contrastantes. De

la Figura 3.1 se puede ver que el genero con mayor frecuencia de ocurrencia fue *Dyctiota* sp. y *Halimeda* sp., en cinco localidades, seguida de *Penicillus pyriformis* con cuatro y el pasto marino *Thalassia testudinum* y *Ulatrix* sp. colectadas en tres localidades, el resto de las especies enlistadas en la Tabla 3.1, se colectaron en dos o en una localidad. De estos especímenes, *Dyctiota* sp mostró un amplio intervalo de valores de $\delta^{15}\text{N}$ (entre -1.40 a 6.60 ‰; Tabla 3.1) en las diferentes localidades, mientras que *Halimeda* sp. el intervalo de $\delta^{15}\text{N}$ fue mas estrecho (entre -0.24 a 2.07 ‰, Tabla 3.1). Con excepción de *Dyctiota* sp., que presenta una alta variabilidad en el $\delta^{15}\text{N}$, el resto de las especies no estuvieron representadas en todos los Parques.

Tabla 3.1 Valores de $\delta^{15}\text{N}$ para los arrecifes de PIMCN, PNAPM y PNAC para las muestras colectadas en el 2006.

Localidad	Fecha	Género – Especie	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Desv. Est.
Isla Mujeres – Cuevones	29/11/2006	<i>Dyctiota</i>	2.020	0.04
Isla Mujeres – Cuevones	29/11/2006	<i>Sargassum</i>	1.225	0.06
Isla Mujeres – Cuevones	29/11/2006	Roja filamentosa	3.190	0.01
Isla Mujeres – Cuevones	29/11/2006	<i>Codium</i>	4.215	0.08
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Sargassum</i>	1.500	0.04
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Turbinaria turbinata</i>	1.685	0.05
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Dyctiota</i>	1.395	0.04
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Thalassia testudinum</i>	0.615	0.05
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Avrainvillea</i>	1.330	0.07
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Udotea sp.</i>	2.540	0.08
Puerto Morelos – Bonanza	28/11/2006	<i>Udotea flabellum</i>	2.675	0.02
Puerto Morelos – Pta. Caracol	28/11/2006	<i>Haludole wrightii</i>	2.420	0.11
Puerto Morelos – Pta. Caracol	28/11/2006	<i>Thalassia testudinum</i>	2.210	0.01
Puerto Morelos – La Pared	28/11/2006	<i>Thalassia testudinum</i>	2.200	0.06
Puerto Morelos – La Pared	28/11/2006	<i>Halimeda tuna</i>	2.065	0.13
Cozumel – Paraíso	13/06/2010	<i>Penicillus pyriformis</i>	2.365	0.06
Cozumel – Paraíso	13/06/2010	<i>Halimeda goreavi</i>	-0.245	0.05
Cozumel – Chankanaab	13/06/2010	<i>Dyctiota</i>	6.600	0.13
Cozumel – Chankanaab	13/06/2010	<i>Penicillus pyriformis</i>	3.450	0.07
Cozumel – Yucab	13/06/2010	<i>Lobophora variegata</i>	-0.850	0.03
Cozumel – Yucab	13/06/2010	<i>Halimeda goreavi</i>	-0.020	0.03
Cozumel – Yucab	13/06/2010	<i>Ulotrix</i>	0.330	NA
Cozumel – El Cedral	13/05/2010	<i>Styopodium zonale</i>	-0.060	0.01
Cozumel – El Cedral	13/05/2010	<i>Dyctiota</i>	0.155	0.01
Cozumel – El Cedral	13/05/2010	<i>Penicillus pyriformis</i>	1.610	0.06
Cozumel – Dalila	13/05/2010	<i>Lobophora variegata</i>	-0.195	0.05
Cozumel – Dalila	13/05/2010	<i>Ulotrix</i>	0.240	0.07
Cozumel – Dalila	13/05/2010	<i>Penicillus pyriformis</i>	1.315	0.04
Cozumel – Arrecife Colombia	14/12/2006	<i>Caulerpa racemosa</i>	3.020	0.14
Cozumel – Arrecife Colombia	14/12/2006	<i>Halimeda opuntia</i>	1.020	0.03
Cozumel – Arrecife Colombia	13/06/2010	<i>Dyctiota</i>	-1.395	0.13
Cozumel – Arrecife Colombia	13/06/2010	<i>Halimeda</i>	1.480	0.10
Cozumel – Arrecife Colombia	13/06/2010	<i>Ulotrix</i>	0.195	0.12

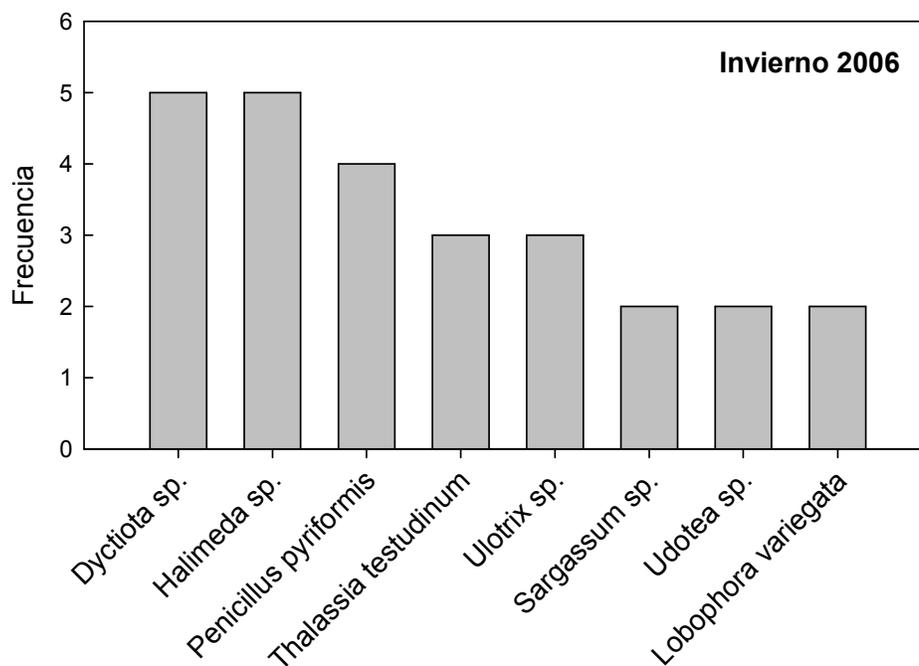


Figura 3.1. Frecuencia de ocurrencia de las diferentes especies de algas en las localidades estudiadas para el invierno del 2006. Algunos de los géneros son representados por más de una especie, o incluyen ejemplares que fueron identificados a nivel de género (ver Tabla 3.1). Las especies: *Codium* sp., *Turbinaria turbinata*, *Caulerpa racemosa*, *Styopodium zonale*, *Avrainvillea* sp. y *Halodule wrightii* sólo se colectaron en 1 localidad.

Los resultados del análisis de $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de macroalgas colectadas durante el verano del 2007 se muestran en la Tabla 3.2. De la misma manera que el muestreo de invierno del 2006, en esta Tabla se clasifican geográficamente las localidades muestreadas en cada parque y los resultados isotópicos para todas las especies en cada localidad. En este periodo, se colectaron especímenes de macroalgas, en 11 localidades, que en algunos casos fueron diferentes que las muestreadas durante el invierno del 2006. La colecta incluyó 5 localidades en el PIMCN (Manchones, Cuevones, Chitales, El Bajito y Punta Nizuc), 1 localidad del PNAPM (Bocana chica) y 5

localidades en el PNAC (Paraíso, Chankanaab, El Cedral, Dalila y Colombia) (Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Valores de $\delta^{15}\text{N}$ (‰) para los arrecifes de PIMCN, PNAPM y PNAC para las muestras colectadas en el 2007.

Localidad	Fecha	Genero – Especie	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	Desv. Est.
Isla Mujeres – Manchones	06/10/2011	<i>Sargassum</i>	1.565	0.08
Isla Mujeres – Manchones	06/10/2011	<i>Codium</i>	3.715	0.08
Isla Mujeres – Cuevones	08/05/2011	<i>Sargassum</i>	2.870	NA
Isla Mujeres – Cuevones	08/05/2011	<i>Dyctiota sp.</i>	1.560	0.01
Isla Mujeres – Cuevones	08/05/2011	<i>Dyctiota dichotoma</i>	1.830	0.01
Isla Mujeres – Cuevones	08/05/2011	<i>Halimeda</i>	1.765	0.02
Cancún – Chitales	06/07/2011	<i>Styopodium zonale</i>	1.530	0.00
Cancún – El Bajito	06/11/2011	<i>Lobophora variegata</i>	-0.450	NA
Cancún – El Bajito	06/11/2011	<i>Dyctiota</i>	1.620	0.07
Cancún – El Bajito	06/11/2011	<i>Galaxaura</i>	2.225	0.09
Cancún – Punta Nizuc	06/11/2011	<i>Styopodium zonale</i>	0.810	0.10
Cancún – Punta Nizuc	06/11/2011	<i>Codium</i>	3.000	0.04
Cancún – Punta Nizuc	06/11/2011	<i>Halimeda tuna</i>	1.905	0.08
Pto. Morelos – Bocana Chica	08/03/2011	<i>Dictyopteris</i>	2.010	0.04
Pto. Morelos – Bocana Chica	08/03/2011	<i>Halimeda tuna</i>	2.100	0.04
Cozumel – Paraíso	08/05/2011	<i>Halimeda</i>	1.030	NA
Cozumel – Paraíso	16/05/07	<i>Lobophora variegata</i>	1.340	0.06
Cozumel – Paraíso	16/05/07	<i>Penicillus pyriformis</i>	2.250	0.03
Cozumel – Chankanaab	16/05/07	<i>Lobophora variegata</i>	1.520	NA
Cozumel – Chankanaab	16/05/07	<i>Dictyosphaera cavernosa</i>	0.005	0.05
Cozumel – Chankanaab	16/05/07	<i>Anadyomene stellata</i>	-1.670	0.00
Cozumel – Chankanaab	08/05/2011	<i>Ulotrix</i>	-1.210	NA
Cozumel – El Cedral	15/05/2007	<i>Udotea sublittoralis</i>	2.050	0.08
Cozumel – El Cedral	15/05/2007	<i>Penicillus pyriformis</i>	1.655	0.01
Cozumel – Dalila	14/05/2007	<i>Udotea</i>	1.215	0.02
Cozumel – Dalila	14/05/2007	<i>Penicillus pyriformis</i>	1.570	0.06
Cozumel – Dalila	14/05/2007	<i>Halimeda goreavi</i>	1.070	0.04
Cozumel – Dalila	14/05/2007	<i>Anadyomene stellata</i>	-1.415	0.02
Cozumel Arrecife Colombia	14/05/2007	<i>Dyctiota</i>	-0.035	0.02
Cozumel Arrecife Colombia	14/05/2007	<i>Lobophora variegata</i>	-0.280	0.00
Cozumel Arrecife Colombia	14/05/2007	<i>Penicillus pyriformis</i>	1.910	0.03
Cozumel Arrecife Colombia	14/05/2007	<i>Halimeda</i>	0.795	0.11

La distribución de frecuencia de correncia de los diferentes géneros – especies colectados durante el verano del 2007, se muestran en la Figura 3.2.

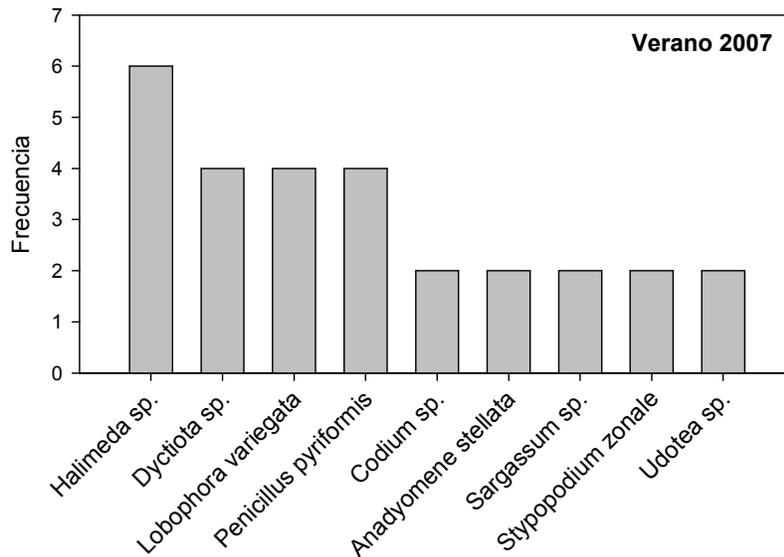


Figura 3.2. Frecuencia de ocurrencia de las diferentes especies de algas en las localidades estudiadas para el verano del 2007. Algunos de los géneros son representados por más de una especie, o incluyen ejemplares que fueron identificados a nivel de género (ver Tabla 3.2). Las especies: *Dictyopteris* sp., *Dictyosphaera cavernosa*, *Galaxaura* sp. y *Ulotrix* sp., sólo colectaron en 1 localidad.

A diferencia del muestreo de invierno del 2006, en verano del 2007, las especies del género *Halimeda* fueron colectadas con mayor frecuencia (en 6 localidades), seguidas de *Dyctiota* sp., *Lobophora variegata* y *Penicillus pyriforme* en 4 localidades y resto de las especies enlistadas en la Tabla 3.2, se obtuvieron en dos o menos sitios. Las macroalgas del género *Halimeda* mostraron un intervalo del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido entre 0.79 a 2.10 ‰, mientras que el $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de *Dyctiota* sp. se encontró entre -0.04 a 1.83 ‰, que es un rango de $\delta^{15}\text{N}$ mucho mas estrecho al que presentó el mismo

genero durante el invierno del 2006. Los resultados del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de las otras dos especies con alta representatividad; *Lobophora variegata* (-0.45 a 1.52 ‰) y *Penicillus pyriforme* (1.57 a 2.25 ‰) (Tabla 3.2), indican que esta última probablemente refleje con mayor fidelidad la composición isotópica de la fuente de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) disponible para las macroalgas. La limitante de *Penicillus pyriforme* para emplearla con fines comparativos entre localidades, es su distribución restringida ya que solo se colectó en los arrecifes del PNAC (Tabla 3.2).

Una forma alternativa de analizar los resultados del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de las macroalgas es agrupar todas las especies por localidad y contrastar los promedios, y la variabilidad, del $\delta^{15}\text{N}$ entre sitios de colecta. Con este propósito, se comparó el promedio del $\delta^{15}\text{N}$ (± 1 s.d.), calculado a partir del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de todos los especímenes colectados en cada localidad para el muestreo de invierno del 2006 (Fig. 3.3a) y durante el verano del 2007 (Fig. 3.3b). Como referencia, en las mismas Figuras se muestra la composición isotópica de nitrógeno promedio de nitratos ($\delta^{15}\text{NO}_3$), medidos en el área costera de las Bahías de Akumal y Xaak (Mutcher *et al.*, 2007). Estos sitios se encuentran localizados aproximadamente en la región central del Caribe Mexicano, al sur de nuestra área de estudio, y presentan algunas diferencias hidrológicas con las zonas arrecifales estudiadas en este trabajo. Por ejemplo, las concentraciones de nitratos en el agua costera de la Bahía Akumal ($3.3 \pm 5.3 \mu\text{M}$) y en Xaak ($1.1 \pm 0.7 \mu\text{M}$) son comparativamente mas elevadas que las concentraciones típicas de nitratos medidas en este estudio (ver sección de hidrología), aunque las concentraciones promedio de amonio son relativamente similares (~ 1 a $2 \mu\text{M}$) (Mutcher *et al.*, 2007). No obstante estas diferencias, los valores de $\delta^{15}\text{NO}_3$ que presentan estos

autores son la única referencia encontrada para áreas cercanas a nuestras zonas de estudio.

Una característica en la comparación de los promedios $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de macroalgas entre localidades, y que es relativamente común para ambos periodos de colecta, son los bajos valores isotópicos de nitrógeno en macroalgas. Durante el invierno del 2006 y, con excepción de la localidad de Chankanaab en el PNAC ($\delta^{15}\text{N}$ de 5.03 ± 2.23 ‰), los promedio del $\delta^{15}\text{N}$ en las macroalgas se encuentran por debajo del valor de referencia del $\delta^{15}\text{NO}_3$ (Fig. 3.3a).

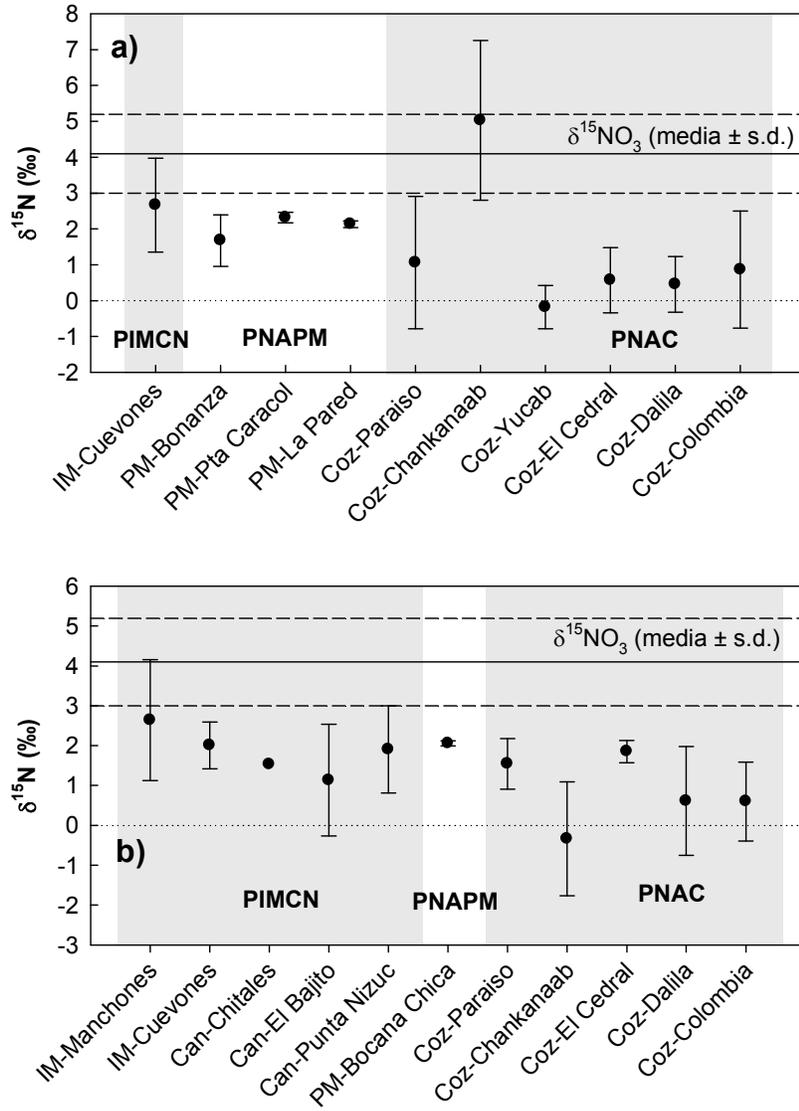


Figura 3.3 Composición isotópica de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$) promedio (± 1 s.d.) de todas las algas colectadas en cada localidad, durante la colecta de invierno del 2006 (a) y durante verano del 2007 (b). Se incluye como referencia la composición isotópica de los nitratos (media \pm s.d.) en las aguas marinas de las Bahías de Akumal y Xaak (Mutcher *et al.*, 2007).

Los resultados obtenidos durante el verano del 2007 son muy similares a los del 2006; el $\delta^{15}\text{N}$ promedio se encontró entre ~ 0.5 a 2.5 ‰, siempre por debajo del valor de referencia $\delta^{15}\text{NO}_3$ (4.1 ± 1.1 ‰) publicado por Mutcher *et al.* (2007) (Fig. 3.3b). De estos

resultados, resalta la localidad de Chankanaab en el PNAC que presentó las mayores diferencias en el $\delta^{15}\text{N}$ promedio entre periodos de colecta; mientras que en el invierno del 2006 el $\delta^{15}\text{N}$ promedio fue el más positivo comparado con el resto de las localidades (Fig. 3.3a), durante la colecta de verano del 2007 se obtuvo un $\delta^{15}\text{N}$ de $-0.34 \pm 1.43 \text{ ‰}$, que fue el valor promedio mas negativo del $\delta^{15}\text{N}$, comparado con el resto de los sitios estudiados (Fig. 3.3b). Un de los factores que pueden explicar estas discrepancias son las diferencias en las especies analizadas entre muestreos; las especies analizadas en esta localidad durante la colecta de invierno del 2006 fueron *Dyctiota* sp. y *Penicillus pyriformis* (Tabla 3.1), mientras que en el verano del 2007, las especies colectadas fueron *Lobophora variegata*, *Dictyosphaera cavernosa*, *Ulotrix* sp y *Anadyomene stellata* (Tabla 3.2). Al comparar los resultados de las Tablas 3.1 y 3.2, se puede ver que los promedios del $\delta^{15}\text{N}$ calculados para localidad son también sensibles a las especies analizadas. El $\delta^{15}\text{N}$ promedio medida en *Dyctiota* sp., aunque se caracterizó por su alta variabilidad en ambos muestreos, en la mayoría de los sitios fue mas positivo, comparado con el resto de las especies, mientras que en *Penicillus pyriformis*, la $\delta^{15}\text{N}$ fue siempre positivo, entre >1 hasta 3.4 ‰ en ambos periodos de colecta (Tabla 3.1 y 3.2). En contraste, durante el verano del 2007, la mayoría de las especies de macroalgas colectadas en Chankanaab, con excepción de *Lobophora variegata*, mostraron valores bajos del $\delta^{15}\text{N}$, inclusive en *Anadyomene stellata* se obtuvieron los $\delta^{15}\text{N}$ mas negativos (de -1.67 y -1.42 ‰ en Chankanaab y Dalila, respectivamente) de ambas colectas (Tabla 3.2).

3.2. Sumario y conclusiones del capítulo.

Existen dos aspectos relevantes de resaltar con estos resultados; primero, los valores medidos de $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de las macroalgas estudiadas son generalmente bajos (menos positivos), inclusive mas bajos a los medidos en macroalgas de la zona costera de la región central del Caribe Mexicano (Mutcher *et al.*, 2007). En segundo lugar, el $\delta^{15}\text{N}$ medido en el tejido de las diferentes macroalgas mostró una elevada variabilidad en cada localidad.

Con la notable excepción de los resultados obtenidos para las macroalgas colectadas durante el invierno del 2006 en el arrecife de Chankanaab en el PNAC, el $\delta^{15}\text{N}$ promedio en el tejido de las especies estudiadas fue siempre menor comparado con la $\delta^{15}\text{NO}_3$ usada como referencia (Fig. 3.3). Esta comparación es considerada valida, bajo el supuesto que los nitratos constituyen una de las principales fuentes de nitrógeno para las macroalgas.

Una posible explicación a la baja señal del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de macroalgas es la baja concentración de nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en las zonas arrecifales analizadas. Diferentes investigaciones han demostrado que existe una relación funcional positiva entre la $\delta^{15}\text{NO}_3$ *versus* la [nitratos], tanto en áreas templadas, como en áreas tropicales. En un estudio realizado en un estuario del estado de Massachusetts, se encontró que la $\delta^{15}\text{NO}_3$ se aproxima a valores cercanos a 0 ‰ cuando la concentración de nitratos se reduce a niveles $<1 \mu\text{M}$ (McClelland y Valiela, 1998). Resultados similares, publicados para el Caribe Mexicano por el estudio citado de Mutcher *et al.* (2007), encuentran que la $\delta^{15}\text{NO}_3$ se reduce linealmente con la concentración de nitratos en el medio. Bajo esta perspectiva, es de esperar que

concentraciones tan bajas de NID medidas en este estudio contengan una señal baja del $\delta^{15}\text{NID}$ disponible para las macroalgas.

La composición isotópica de las especies de nitrógeno inorgánico disuelto ($\delta^{15}\text{NID}$) esta pobremente caracterizada en zonas costeras oligotróficas, típica de zonas tropicales. Las áreas costeras de Florida probablemente son las más estudiadas debido a la elevada densidad poblacional y los potenciales problemas que acarrea el aporte de nutrientes por aguas residuales a las zonas arrecifales (e.g. Lapointe et al., 1997; 2004; 2005). Desafortunadamente, no fue posible obtener la señal del $\delta^{15}\text{NID}$ en nuestra área de estudio, debido principalmente a que las concentraciones típicas de nitratos en las zonas arrecifales investigadas es muy baja ($\sim 1 \mu\text{M}$), y menor a límite de cuantificación de los métodos prácticos considerados (Sigman *et al.*, 1997). Por otro lado, a diferencia de lo observado en otras áreas del Caribe donde la concentración típica de nitratos es mucho mayor a la de amonio (e.g. Lapointe, 1997; Mutcher *et al.*, 2007), en las áreas de la zona norte del Caribe Mexicano incluidas en este estudio, la concentración típica de amonio es más elevada que la de nitratos. La proporción de amonio respecto al NID para todas las colectas varió entre el 60 al 67% en el PIMCN, de 63 al 76% en el PNAPM y de 65 al 67% en el PNAC (ver sección II y anexos). Esto implica que el amonio, y no el nitrato, pudiera ser la principal fuente de nitrógeno para las macroalgas de la región y la señal del $\delta^{15}\text{N}$ en las macroalgas reflejan principalmente la firma isotópica del amonio. Esta hipótesis, aunque plausible, depende de la capacidad metabólica de cada especie para utilizar el amonio o el nitrato, en función de su disponibilidad.

Por otro lado, el $\delta^{15}\text{N}$ medido en el tejido de las diferentes macroalgas mostró una elevada variabilidad en cada localidad. Estos resultados demuestran que la señal del $\delta^{15}\text{N}$ en las macroalgas es altamente dependiente de la especie, lo que sugiere que el $\delta^{15}\text{N}$ promedio calculado en cada localidad no solo refleja la composición isotópica de la fuente, sino también las características metabólicas de las macroalgas. Tal como se mencionó previamente, la capacidad de emplear indistintamente el amonio o el nitrato, pudiera producir diferencias significativas en la $\delta^{15}\text{N}$ de las distintas especies de macroalgas de cada localidad, como se observa en nuestros resultados. Otro factor que puede explicar la alta variabilidad en el $\delta^{15}\text{N}$, dentro de cada localidad, son las diferencias en la cinética de incorporación de nitrógeno en las diferentes especies de macroalgas. Se ha encontrado que la señal del $\delta^{15}\text{N}$ en el tejido de estas plantas depende de la velocidad de incorporación de nitrógeno. Mientras que las macroalgas con capacidad de incorporar nitrógeno más rápidamente, reflejan la composición isotópica de la fuente más abundante de nitrógeno presente en el momento de la colecta, las especies de macroalgas que presentan una cinética de incorporación mas lenta, generalmente integran la señal de la fuente de nitrógeno a largo plazo (Gartner *et al.*, 2002).

CAPÍTULO 4

PROPUESTA PLAN DE MONITOREO DE PARÁMETROS ECOLÓGICOS E HIDRÓLOGICOS DE LOS PARQUES PIMCN, PNAPM Y PNAC

4.1. Introducción

Como muchos procesos ecológicos, los cambios en un arrecife de coral pueden ser lentos y casi imperceptibles a corto plazo, o altamente variables de un año a otro (Rogers *et al.*, 1994). De igual manera, algunos cambios también pueden ser de naturaleza puntual como los ocasionados por huracanes, derrames de hidrocarburos, vertimientos entre otros. Adicionalmente, los arrecifes de coral se encuentran también expuestos a grandes presiones humanas producto de la diversidad de bienes y servicios que proveen, estas presiones también son cambiantes en el tiempo y tienden a incrementar. Es debido a todo esto, que se puede decir que los ecosistemas arrecifales se encuentran en decline a causa de los efectos sinérgicos de varios factores (extracción de recursos y baja calidad del agua) (Knowlton y Jackson, 2008) y no debido al efecto de uno en particular.

Por consiguiente, el observar las tendencias a gran escala espacial y temporal (monitoreo) de la condición de los arrecifes de coral es sumamente importante para entender la magnitud y naturaleza de los cambios que en ellos ocurren, darle seguimiento a los impactos de las actividades antropogénicas y proponer alternativas de manejo. Entender como los ecosistemas responden al aumento en los impactos humanos locales y como se recobran ante la disminución de los mismos, es esencial para planear estrategias de conservación (Knowlton y Jackson, 2008). Un monitoreo

que permita entender las causas y efectos de los cambios incluye tanto el estudio de las características ecológicas, como de las características ambientales de un ecosistema, en este caso del ecosistema coralino, en amplias escalas espaciales y temporales.

4.2. Estaciones de muestreo

Siguiendo los planteamientos expuestos anteriormente, acerca de la observación a gran escala temporal, la presente propuesta de monitoreo enfatiza la necesidad de continuar con el estudio de los arrecifes ya monitoreados en los parques PIMCN (Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Cancún, Nizuc) y PNAPM (Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos) (Tabla 4.1) con el fin de dar seguimiento a las condiciones de dichos arrecifes y a las actividades de manejo que las autoridades de cada parque están llevando a cabo en ellos (Ej: Arrecife Cuevones – PIMCN). Otra razón para mantener el seguimiento en los arrecifes ya estudiados son los resultados observados para el estado de salud de los arrecifes del PIMCN y PNAPM (Tablas 1.7 y 1.8), estos resultados muestran que la mayoría de arrecifes de estos parques se encuentran en estado De Alerta, mientras que el Arrecife Cuevones presenta una tendencia a buena condición de salud, lo que sugiere que las acciones tomadas para su protección están dando resultado, es importante anotar que el tamaño de las colonias es pequeño indicando que el proceso de recuperación es reciente, estas observaciones resaltan la necesidad de darle seguimiento a las formaciones arrecifales ya estudiadas.

Tabla 4.1. Posición geográfica de las estaciones de monitoreo ecológico en los parques PIMCN y PNAPM, estudiadas durante 2006 y 2007 y propuestas para los monitoreos posteriores.

Nombre de la estación	Posición geográfica	Parque
Manchones	Lat. 21.199 N, Long. 86.727 W	PIMCN
Cuevones	Lat. 21.162 N, Long. 86.742 W	PIMCN
Chitales	Lat. 21.150 N, Long. 86.745 W	PIMCN
El Bajito	Lat. 21.140 N, Long. 86.741 W	PIMCN
Nizuc	Lat. 21.031 N, Long. 86.779 W	PIMCN
Bonanza	Lat. 20.965 N, Long. 86.815 W	PNAPM
Radio Pirata	Lat. 20.965 N, Long. 86.453 W	PNAPM

Adicionalmente, la comparación del estado de los arrecifes y los resultados hidrológicos muestra una tendencia a una disminución en la condición de salud de los arrecifes localizados en cercanías de la boca del sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, especialmente Bonanza, posiblemente debido al aporte de aguas salobres y con mayor contenido de nutrientes (Tabla 2.2) y contaminantes (la laguna recibe gran cantidad de las aguas servidas de la ciudad de Cancún, Merino *et al.*, 1990 y 1994; Carbajal *et al.*, 2007) provenientes del interior de la laguna. Por esta razón se sugiere incluir algún arrecife del PNAPM localizado más al norte de Bonanza, podría ser Limones, para poder corroborar los efectos que las aguas de la Laguna tienen sobre los arrecifes.

Por otro lado, se hace difícil la comparación entre arrecifes debido a la relativa cercanía entre ellos y a que las condiciones ambientales y en especial de presión antropogénica son relativamente similares (teniendo en cuenta los dos parques), por tal motivo se propone el estudio de arrecifes más cercanos a condiciones prístinas, como los arrecifes localizados en el parque de Sian Ka'an, esto permitiría una evaluación más sólida del verdadero estado de deterioro de los arrecifes del norte del estado de

Quintana Roo y de cambios en sus condiciones hidrológicas (especialmente nutrientes). El uso de localidades situadas a lo largo de un amplio gradiente en población humana es útil en la comparación descriptiva y experimental de procesos ecológicos y de resiliencia de los ecosistemas, además los ecosistemas prístinos proveen información acerca del funcionamiento de dichos ecosistemas antes de disturbios humanos constituyendo una virtual “Maquina del Tiempo” (Knowlton y Jackson, 2008). Esta estrategia ha sido considerada como clave para poder discernir entre los cambios producidos por efectos del calentamiento global o por cambios en la presión humana y además evaluar verdaderos efectos de acciones de manejo, como el establecimiento de zonas de reserva (Knowlton y Jackson, 2008).

Con respecto al monitoreo hidrológico, se propone mantener la red de estaciones utilizada en los parques PIMCN (incluyendo el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez), PNAPM y PNAC (Parque Nacional Arrecifes de Cozumel) (Tablas 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5), durante las colectas del 2006 y 2007 (figuras 2.1, 2.2 y 2.3), debido a que esta red de estaciones cubre la mayor parte del área de los parques y permite estudiar la tendencia en condiciones hidrológicas en la zona de estudio, así mismo permite el contraste entre arrecifes. El estudio del sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, es importante por su aporte e impacto en los ecosistemas de la zona.

Tabla 4.2. Posición geográfica de las estaciones de monitoreo hidrológico en el parque PIMCN, estudiadas durante 2006 y 2007 y propuestas para posteriores monitoreos.

Código Estación	Nombre de la Estación	Posición geográfica
IM001	Rolandis	Lat. 21.233 N, Long. 86.741 W
IM002	El Farito	Lat. 21.248 N, Long. 86.751 W
IM003	Tortugranja	Lat. 21.221 N, Long. 86.733 W
IM004	El Pescador	Lat. 21.218 N, Long. 86.730 W
IM005	Playa Lancheros	Lat. 21.213 N, Long. 86.725 W
IM006	El Garrafón	Lat. 21.205 N, Long. 86.719 W
IM007	Manchones	Lat. 21.199 N, Long. 86.727 W
PC008	Cuevones	Lat. 21.162 N, Long. 86.742 W
PC009	Chitales	Lat. 21.150 N, Long. 86.745 W
PC010a	El Bajito/Camino Real	Lat. 21.140 N, Long. 86.741 W
PC010b	Arrecife Isla de los Pajaros/Camino Real	Lat. 21.134 N, Long. 86.741 W
PC011	Cerca del Grampin	Lat. 21.141 N, Long. 86.725 W
PC012	Aristos	Lat. 21.121 N, Long. 86.738 W
PC013	Melía	Lat. 21.116 N, Long. 86.744 W
PN014	Westin	Lat. 21.040 N, Long. 86.777 W
PN015	Mediterrané - Costa/Arrecife Nizuc	Lat. 21.031 N, Long. 86.779 W
PN016	2nd barrera Mediterrané	Lat. 21.029 N, Long. 86.778 W

Tabla 4.3. Posición geográfica de las estaciones de monitoreo hidrológico en el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, estudiadas durante 2006 y 2007 y propuestas para posteriores monitoreos.

Código Estación	Nombre de la Estación	Posición geográfica
LN001	Boca Rio Nizuc	Lat. 21.049 N, Long. 86.791 W
LN002	Marina El Manglar	Lat. 21.044 N, Long. 86.785 W
LN003	Hotel Westin (laguna)	Lat. 21.038 N, Long. 86.783 W
LN004	Hotel Ruinas del Rey	Lat. 21.058 N, Long. 86.787 W
LN005	Boca Canal Ingles	Lat. 21.059 N, Long. 86.810 W
LN006	Salida Canal La Zeta	Lat. 21.075 N, Long. 86.791 W
LN007	Baliza La Zeta (canal)	Lat. 21.082 N, Long. 86.792 W
LN008	Planta de tratamiento aguas negras	Lat. 21.077 N, Long. 86.778 W
LN009	Aquaworld	Lat. 21.084 N, Long. 86.776 W
LN010	Marina Barracuda	Lat. 21.094 N, Long. 86.771 W
LN011	Plaza la Isla	Lat. 21.110 N, Long. 86.765 W
LN012	Boca Canal Laguna Bojórquez	Lat. 21.121 N, Long. 86.770 W
LN013	Restaurante Florencillos	Lat. 21.122 N, Long. 86.757 W
LN014	Hoteles Riu	Lat. 21.135 N, Long. 86.750 W
LN015	Señor Frog's	Lat. 21.130 N, Long. 86.751 W
LN016	Entrada Laguna Bojórquez	Lat. 21.131 N, Long. 86.761 W
LN017	Blue Water	Lat. 21.138 N, Long. 86.771 W
LN018	SEMARNAT	Lat. 21.143 N, Long. 86.782 W
LN019	Canal Sigfrido	Lat. 21.143 N, Long. 86.788 W

Tabla 4.4. Posición geográfica de las estaciones de monitoreo hidrológico en el parque PNAPM, estudiadas durante 2006 y 2007 y propuestas para posteriores monitoreos.

Código Estación	Nombre de la Estación	Posición geográfica
PM01	Bonanza arrecife	Lat. 20.965 N, Long. 86.814 W
PM02	Bonanza laguna media	Lat. 20.967 N, Long. 86.820 W
PM03	Bonanza costa	Lat. 20.969 N, Long. 86.829 W
PM04	Marina Bertran	Lat. 20.897 N, Long. 86.853 W
PM05	Bertran laguna media	Lat. 20.896 N, Long. 86.851 W
PM06	Bertran cresta arrecife	Lat. 20.894 N, Long. 86.848 W
PM07	La Bocana	Lat. 20.874 N, Long. 86.851 W
Bchica	La Bocana Chica	Lat. 20.874 N, Long. 86.851 W
PM08	Canal de navegación Bocana	Lat. 20.875 N, Long. 86.855 W
PM09	Muelle Hotel	Lat. 20.874 N, Long. 86.864 W
PM010	Frente Hotel "Ojo de agua"	Lat. 20.850 N, Long. 86.873 W
PM011	La Pared	Lat. 20.826 N, Long. 86.878 W
PM012	Entre jardines y la pared	Lat. 20.825 N, Long. 86.880 W
PM013	Frente rompeolas Marina El Cid	Lat. 20.828 N, Long. 86.887 W
Marina El CID	Frente Hotel El CID	Lat. 20.831 N, Long. 86.890 W

De ser aprobada la inclusión de los arrecifes de Sian Ka'an, se diseñará una red de estaciones que cubra la mayor parte del área y que permita igualmente el contraste en las condiciones hidrológicas.

Es importante anotar que la red de estaciones puede ser ampliada en caso de que sea necesario monitorear algún evento puntual, como derrame de hidrocarburos, vertimientos, entre otros.

4.3. Periodicidad de muestreo

Debido a que, el norte del Caribe mexicano (Norte de Quintana Roo) presenta un clima relativamente estable con dos estaciones climáticas marcadas que son: la época de secas que va de Noviembre a abril, con promedios mensuales cercanos a los 50

mm/mes y la época de lluvias que va de mayo a octubre, con promedios mensuales entre 150 y 211.5 mm/mes (Fig. 2.4), se sugiere dos épocas de colecta de datos hidrológicos una entre los meses de febrero y marzo (mínima precipitación) y la segunda entre los meses de junio y julio (máxima precipitación). A partir de agosto hasta octubre es temporada de huracanes por lo que no se recomienda muestrear durante estos meses.

Tabla 4.5. Posición geográfica de las estaciones de monitoreo hidrológico en el parque PNAC, estudiadas durante 2006 y 2007 y propuestas para posteriores monitoreos.

Código Estación	Nombre de la Estación	Posición geográfica
CZ01	Arrecife Colombia	Lat. 20.325 N, Long. 87.027 W
CZ02	Colombia centro	Lat. 20.324 N, Long. 87.022 W
CZ03	Colombia costa	Lat. 20.324 N, Long. 87.016 W
CZ04	Dalila/Palancar	Lat. 20.349 N, Long. 87.028 W
CZ05	Dalila/Palancar costa	Lat. 20.352 N, Long. 87.024 W
CZ06	Limite SE parque	Lat. 20.347 N, Long. 86.898 W
CZ07	Playa Bonita	Lat. 20.335 N, Long. 86.915 W
CZ08	El Mirador	Lat. 20.032 N, Long. 86.929 W
CZ09	Rastas Beach Club	Lat. 20.293 N, Long. 86.958 W
CZ10	Paso del Cedral	Lat. 20.368 N, Long. 87.029 W
CZ11	Paso del Cedral costa (Hotel Muelle)	Lat. 20.377 N, Long. 87.025 W
CZ12	Yucab/costa	Lat. 20.416 N, Long. 87.016 W
CZ13	Yucab/arrecife	Lat. 20.420 N, Long. 87.017 W
CZ14	Cenote Caleta	Lat. 20.466 N, Long. 86.978 W
CZ15	Faro/costa	Lat. 20.272 N, Long. 86.988 W
CZ16	Faro/cantil	Lat. 20.262 N, Long. 86.992 W
CZ17	Maracaibo/cantil	Lat. 20.267 N, Long. 87.005 W
CZ18	Maracaibo/costa	Lat. 20.275 N, Long. 86.996 W
CZ19	Chanchakaab costa	Lat. 20.297 N, Long. 87.008 W
CZ20	Chanchakaab cantil	Lat. 20.281 N, Long. 87.017 W
CZ21	Punta Sur cantil	Lat. 20.299 N, Long. 87.026 W
CZ22	Punta Sur costa	Lat. 20.301 N, Long. 87.018 W
CZ23	Chankanaab	Lat. 20.439 N, Long. 87.000 W
CZ24	Chankanaab arrecife	Lat. 20.441 N, Long. 87.002 W
CZ25	Salida Cenote Chankanaab	Lat. 20.441 N, Long. 86.997 W
CZ26	Ckankanaab Delfinario	Lat. 20.445 N, Long. 86.995 W
CZ27	Playa Uvas (ojo de agua)	Lat. 20.450 N, Long. 86.991 W
CZ28	Paraiso costa	Lat. 20.471 N, Long. 86.980 W
CZ29	Paraiso arrecife	Lat. 20.471 N, Long. 86.982 W
CZ30	Canal Caleta (0.5m)	Lat. 20.467 N, Long. 86.982 W
CZ31	Canal Caleta (3m)	Lat. 20.467 N, Long. 86.982 W
CZ32	Caleta (0.5m)	Lat. 20.466 N, Long. 86.981 W
CZ33	Caleta (3m)	Lat. 20.466 N, Long. 86.981 W
CZ34	Hotel "Las Brisas"	Lat. 20.539 N, Long. 86.936 W
CZ35	Campo de Golf	Lat. 20.550 N, Long. 86.920 W
CZ36	"Country Club Estates"	Lat. 20.554 N, Long. 86.920 W
CZ37	Isla de la Pasión	Lat. 20.544 N, Long. 86.879 W
CZ38	Puerto de Abrigo Coz	Lat. 20.528 N, Long. 86.940 W

Para el muestreo ecológico se recomienda un solo muestreo durante cada año, como lo recomendando por el Programa de Monitoreo sinóptico (PMS) del SAM (Almada-Villela *et al.*, 2003), este muestreo podría llevarse a cabo durante los meses de febrero a marzo, paralelo al muestreo hidrológico, con el fin de optimizar recursos y aprovechar las buenas condiciones climatológicas durante esa época. Adicionalmente se pueden realizar muestreos puntuales después de un evento catastrófico como huracanes, derrame de hidrocarburos, encallamientos entre otros, procurando hacerle seguimiento a la zona afectada durante monitoreos posteriores.

4.4. Métodos de Trabajo

Para el trabajo de campo tanto para la captura de datos ecológicos e hidrológicos, se continuará con las metodologías usadas hasta el momento y que incluyen algunos métodos utilizados por el PMS del SAM (tabla 4.6).

Adicionalmente se seguirá con la colecta de muestras de agua, tejido de coral y algas carnosas para el análisis de isótopos estables de nitrógeno ($\delta^{15}\text{N}$), con el fin de evaluar cambios tanto estacionales como espaciales en las fuentes de nutrientes. Las muestras de agua para análisis isotópicos se filtran y se fijan utilizando 200 μL de ácido sulfúrico, después se verifica que el pH sea ≈ 2 y posteriormente son preservadas en lugar fresco. Para su análisis se emplea un analizador elemental CNS Carlo Erba 1500 acoplado a un espectrómetro de masas de razones isotópicas (EMRI) con flujo continuo modelo Optima (Micromass/Fision) del Laboratorio de Isótopos Estables del Grupo de Investigación de Geociencias Ambientales, del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO), Universidad Autónoma de Baja California.

También se continuará con la captura de material fotográfico y de video en las diferentes localidades estudiadas en los parques PIMCN, PNAPM y PNAC, con el fin de mantener un registro de imágenes que permita la documentación de los cambios ocurridos a través del tiempo.

Tabla 4.6. Métodos de monitoreo utilizados por el por el proyecto CONABIO DM012 en relación con los del Programa de Monitoreo sinóptico (PMS) del SAM.

Variable	Método SAM	Método proyecto CONABIO DM012
Cobertura bentónica: <ul style="list-style-type: none"> • Cobertura de coral duro • Cobertura de algas • Cobertura de otros (gorgonáceos, esponjas, miléporas) 	Transecto intercepto-punto, 30 m de longitud, intercepto cada 25 cm., perpendiculares a la línea de costa, al azar	Transecto Intercepto-punto, 10 m de longitud, intercepto cada 20 cm., al azar
Condición de las colonias: <ul style="list-style-type: none"> • Riqueza de especies de corales escleractíneos. • Mortalidad • Enfermedades • Diámetro de las colonias de coral • Altura de las colonias de coral • Mortalidad de colonias coral 	Evaluación a lo largo del transecto de cobertura, cabezas >10 cm de diámetro. ~ 50 colonias Áreas vivas + muertas, perpendicular al eje de crecimiento Areas vivas + muertas, paralela al eje de crecimiento, desde la base de la colonia Vista de plano (desde arriba)	Igual que el método SAM Igual que el método SAM Igual que el método SAM Igual que el método SAM
Calidad del agua: <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Salinidad • Oxígeno disuelto • Nutrientes Nitritos, Nitratos, Amonio, ortofosfatos y silicatos. 	Sonda multi-paramétrica YSI-300 Análisis laboratorio Métodos Parson <i>et al.</i> (1984) agua marina y/o salobre. Métodos colorimétricos empleando un espectrofotómetro modelo Spectronic 21, marca Milton Roy. No incluye silicatos	Sonda multi-paramétrica YSI-E6600 Preservación usando método de envenenamiento HgCl ₂ (Kattner, 1999) y medición en laboratorio GA-IIO con analizador de nutrientes, marca Skalar San Plus.

5.5 Literatura citada.

- Almada Villela, P.C., Sale P.F., Gold Bouchot G. y Kjerfve B. 2003. Manual de métodos para el programa de monitoreo sinóptico del SAM. Sistema Arrecifal Mesoamericano, Belice City.
- Burke, L. y Maidens J. 2005. Arrecifes en Peligro en El Caribe. World Resources Institute, Washington, D.C., 80 p.
- Carbajal, N., Galicia M., Gaviño J., Santos L., León F., Hernández J.L., Sosa C.I. y Bravo A. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, Cancún, Quintana Roo, México. Informe No. 2 Proyecto CQ063. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO).147 pp.
- García-Salgado M, Camarena T, Gold G, Vásquez M, Galland G, Nava G, Alarcón G, Ceja V, 2006. Línea base del estado del Sistema Arrecifal Mesoamericano. Resultados del Monitoreo Sinóptico 2004 y 2005. Proyecto para la conservación y uso sostenible del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), Vol. 1, 201 pp.
- Carruthers T.J.B., van Tussenbroek B.I. y Dennison W.C. 2005. Influence of submarine springs and wastewater on nutrient dynamics of Caribbean seagrass meadows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64,191-199.
- Gartner A., Lavery P. y Smit A.J. 2002. Use of $\delta^{15}\text{N}$ signature of different functional forms of macroalgae and filter – feeders to reveal temporal and spatial patterns in sewage dispersal. *Marine Ecology Progress Series* 235,63-73.
- Gardner, T.A., Côté I.M., Gill J.A., Grant A. y Watkinson A.R. 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science* 301: 958 - 960.
- Herrera-Silveira J.A., Medina-Gomez I. y Colli R. 2002. Trophic status base on nutrient concentration scales and primary producers community of tropical coastal lagoons influenced by groundwater discharges. *Hydrobiologia* 475/476, 91-98.
- Hill, J. y Wilkinson C. 2004. Methods for Ecological Monitoring of Coral Reefs: A Resource for Managers. Version 1. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Townsville, Australia.117 pp.

- Hughes, T.P. 1994. Catastrophes, phase shifts, and large scale degradation of a caribbean coral reef. *Science* 266, 1547-1551.
- Hughes, T.P., A.H. Baird, D.R. Bellwood, M. Card, S.R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J.B.C. Jackson, J. Kleypas, J.M. Lough, P. Marshall, M. Nyström, S.R. Palumbi, J.M. Pandolfi, B. Rosen y J. Roughgarden. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science* 301, 929 - 933.
- Hulme, M., Osborn T.J. y Johns T.C. 1998. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophysical Research Letters* 25, 3379-3382.
- Instituto Nacional de Ecología. 1998. Programa de Manejo Parque Marino Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc, México. 160 pp.
- Kattner, G. 1999. Storage of dissolved inorganic nutrients in seawater: poisoning with mercuric chloride. *Marine Chemistry* 67, 61 - 66
- Knowlton, N. y Jackson J.B.C. 2008. Shifting baselines, local impacts, and global change on coral reefs. *PLoS Biology* 6(2): e54. doi:10.1371/journal.pbio.0060054.
- Koop, K., Booth D., Broadbents A., Brodie J., Bucher D., Capone D., Colls J., Dennison W., Erdman M., Harrison P., Hoegh-Guldberg O., Hutchings P., Jones G.B., Larkum A.W.D., O'neil J., Steven A., Tentori E., Ward S., Williamson J. y Yellowless D. 2001. ENCORE: The effect of nutrient enrichment on coral reefs. Synthesis of results and conclusions. *Marine Pollution Bulletin* 42(2), 91 - 120.
- Kramer, P. A. 2003. Synthesis of Coral Reef Health Indicators for the Western Atlantic: Results of the AGRRA Program (1997-2000). En: Status of Coral Reefs in the western Atlantic; Results of initial Surveys. Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program. J.C. Lang Ed. *Atoll Research Bulletin* 496, 1-59.
- Lapointe, B.E. 1997. Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnology and Oceanography* 42, 1119 - 1131.

- Lapointe, B.E. 1999. Simultaneous top-down and bottom-up forces control macroalgal blooms on coral reefs. *Limnology and Oceanography* 44, 1586 - 1592.
- Lapointe B.E., Barile P.J. y Matzie W.R. 2004. Anthropogenic nutrient enrichment of seagrass and coral reef communities in the lower Florida Keys: Discrimination of local versus regional nitrogen sources. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 308, 23-58.
- Lapointe B.E., Barile P.J., Littler M.M. y Littler D.S. 2005. Macroalgal blooms on southern Florida coral reefs II. Cross-shelf discrimination of nitrogen sources indicates widespread assimilation of sewage nitrogen. *Harmful Algae* 4, 1106-1122.
- McClanahan T.R. y Muthiga N.A. 1998. An ecological shift in a remote coral reef atoll of Belice over 25 years. *Environmental Conservation* 25, 122 - 130.
- McClelland J.W. y Valiela I. 1998. Linking nitrogen in estuarine producers to land – derived sources. *Limnology & Oceanography* 43, 577-585.
- McManus, J.W., Meñez L.A.B., Kesner-Reyes K.N., Vergara S.G. y Ablan M.C. 2000. Coral reef fishing and coral-algal phase shift: implications for global reef status. *ICES Journal of Marine Science* 57, 572 - 578.
- McManus, J.W. y Polsenberg J.F. 2004. Coral-algae phase shift on coral reefs: ecological and environmental aspects. *Progress in Oceanography* 60, 263 - 279.
- Merino M., Czitrom S., Jordan E., Martín E., Thomé P. y Moreno O. 1990. Hydrology and rain flushing of the Nichupté lagoon system, Cancún, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 30, 223-237.
- Merino, M. Gonzalez A., Reyes E., Gallegos M. y Czitrom, S. 1992. Eutrophication in the lagoons of Cancun, Mexico. *Science of the Total Environment* 126, 861 – 870.
- Mutchler, T., Dunton K.H., Townsend-Small A., Fredriksen S., Michael K. y 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.

- Pandolfi, J.M., Bradbury R.H., Sala E., Hughes T.P., Bjorndal K.A., Cooke R.G., McArdle D., McClenachan L., Newman M.J.H., Paredes G., Warner R.R. y Jackson J.B.C. 2003. Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science* 301, 955 - 958.
- Rogers, C.S. y Beets J.P. 2001. Degradation of marine ecosystems and decline of fishery resources in marine protected areas in the US Virgin Islands. *Environmental Conservation* 28, 312 – 322.
- Rogers, C.S., Garrison G., Grober R., Hillis Z.M. y Franke M.A. 1994. Manual para el monitoreo de arrecifes de coral en el Caribe y el Atlántico Occidental. Servicio de Parques Nacionales, Parque Nacional del Islas Vírgenes. 123 p.
- Sigman D.M., Altabet M.A., Michner R., McCorkle D.C., Fry B. y Holmes R.M. 1997. Natural abundance – level measurement of nitrogen isotopic composition of oceanic nitrate: an adaptation of the ammonia diffusion method. *Marine Chemistry* 57, 227-242.
- Szmant, A.M. 2002. Nutrient enrichment on coral reefs: Is it a major cause of coral reef decline? *Estuaries* 25, 743 - 766.
- Wilkinson C. 2000, Status of Coral Reefs of the World: 2000. Executive Summary. *Global Coral Reef Monitoring Network*. Australian Institute of Marine Science. Townsville, Australia. pp. 7-19.
- Yamamuro M., Kayanne H. y Yamano H. 2003. $\delta^{15}\text{N}$ of seagrass leaves for monitoring anthropogenic nutrient increases in coral reef ecosystems. *Marine Pollution Bulletin* 46, 452-458.

Anexo I

Tabla A1. Descripción de los índices ecológicos calculados para este trabajo

Índice de diversidad Shannon-Wiener	Índice de dominancia Simpson	Índice de equidad Pielou	Índice de Similitud Morisita
$H' = - \sum \left[\frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \right]$	$C = \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$	$J' = \frac{H'}{\log_2 S}$	$C_\lambda = \frac{2 \sum_{i=1}^s n_{ij} n_{ik}}{(\lambda_1 + \lambda_2) N_j N_k}$ $\lambda_1 = \frac{\sum_{i=1}^s [n_{ij} (n_{ij} - 1)]}{N_j (N_j - 1)}$ <p style="text-align: center;">y</p> $\lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^s [n_{ik} (n_{ik} - 1)]}{N_k (N_k - 1)}$
ni = número de individuos de la especie i N = abundancia de todas las especies	ni = número de individuos de la especie i N = abundancia de todas las especies	S = número máximo de especies en la muestra	nij, nik = número de especies de la especie i en la comunidad j, k... Nj, Nk = número total de individuos en la comunidad j, k... s = número total de especies en las comunidades j, k...

Estas ecuaciones estandarizan los valores en el rango [0,1], con excepción de el índice de Similitud. Todos los indicadores fueron programados en algoritmos Excel, mientras que el índice de Similitud, se obtuvo mediante el software estadístico Past.

Anexo II

INVENTARIO FAUNA PARQUE NACIONAL COSTA OCCIDENTAL DE ISLA MUJERES, PUNTA CANCÚN, PUNTA NIZUC (PIMCN) Y PARQUE NACIONAL ARRECIFES DE PUERTO MORELOS (PNAPM)

Parque Nacional Costa Occidental de Isla Mujeres, Punta Cancún, Punta Nizuc (PIMCN)

Algas <i>Codium sp.</i> <i>Dictyota sp.</i> <i>Galaxaura sp.</i> <i>Halimeda sp.</i> <i>Halimeda tuna</i> <i>Lobophora variegata</i> <i>Penicillus pyriformis</i> <i>Sargassum sp.</i> <i>Styopodium zonale</i>	Corales escleractinios <i>Acropora cervicornis</i> <i>Acropora palmata</i> <i>Agaricia agaricites</i> <i>Agaricia humilis</i> <i>Agaricia tenuifolia</i> <i>Colpophyllia natans</i> <i>Diploria clivosa</i> <i>Diploria labyrinthiformis</i> <i>Diploria strigosa</i> <i>Heliocercis cucullata</i> <i>Montastraea annularis</i> <i>Montastraea cavernosa</i> <i>Montastraea faveolata</i> <i>Montastraea franksi</i> <i>Porites astreoides</i> <i>Porites branneri</i> <i>Porites furcata</i> <i>Porites porites</i> <i>Siderastrea radians</i> <i>Siderastrea siderea</i> <i>Solenastrea bournoni</i> <i>Stephanocoenia intersepta</i>
Pastos marinos <i>Thalassia sp.</i> <i>Thalassia testudinum</i>	
Hidrocorales (Corales de fuego) <i>Millepora alcicornis</i> <i>Millepora complanata</i>	
Octocorales <i>Briareum asbestinum</i> <i>Erythropodium caribaeorum</i> <i>Eunicea sp.</i> <i>Gorgonia sp.</i> <i>Gorgonia ventalina</i> <i>Muricea elongata</i> <i>Muricea sp.</i> <i>Plexaura sp.</i> <i>Pseudoplexaura sp.</i> <i>Pseudopterogorgia sp.</i>	
Anélidos (gusanos segmentados) <i>Spirobranchus giganteus</i>	Cnidarios <i>Palythoa sp.</i> <i>Zoanthus pulchellus</i>
Moluscos <i>Cyphoma gibbosum</i>	Equinodermos <i>Diadema antillarum</i>
	Peces <i>Diodon holocanthus</i> <i>Ocyurus chrysurus</i>

Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM)

<p>Algas <i>Amphiroa tribulus</i> <i>Avrainvillea sp.</i> <i>Caulerpa racemosa</i> <i>Dictyopteris sp.</i> <i>Dictyota sp.</i> <i>Halimeda tuna</i> <i>Laurencia sp.</i> <i>Penicillus dumetosus</i> <i>Penicillus pyriformis</i> <i>Sargassum sp.</i> <i>Turbinaria sp.</i> <i>Turbinaria turbinata</i> <i>Udotea flabellum</i> <i>Udotea sp.</i></p>	<p>Octocorales <i>Briareum asbestinum</i> <i>Eunicea sp.</i> <i>Gorgonia sp.</i> <i>Gorgonia ventalina</i> <i>Muricea laxa</i> <i>Muricea sp.</i> <i>Plexaura homomalla</i> <i>Pseudoplexaura sp.</i> <i>Pseudopterogorgia sp.</i></p>
<p>Pastos marinos <i>Syringodium filiforme</i> <i>Thalassia sp.</i> <i>Thalassia testudinum</i></p>	<p>Corales escleractinios <i>Acropora palmata</i> <i>Agaricia agaricites</i> <i>Agaricia humilis</i> <i>Agaricia lamarcki</i> <i>Agaricia tenuifolia</i> <i>Colpophyllia natans</i> <i>Dichocoenia stokesi</i> <i>Diploria clivosa</i> <i>Diploria labyrinthiformis</i> <i>Diploria strigosa</i> <i>Manicina areolata</i> <i>Meandrina meandrites</i> <i>Montastraea annularis</i> <i>Montastraea cavernosa</i> <i>Montastraea faveolata</i> <i>Montastraea franksi</i> <i>Porites astreoides</i> <i>Porites divaricata</i> <i>Porites furcata</i> <i>Porites porites</i> <i>Siderastrea siderea</i> <i>Solenastrea bournoni</i> <i>Stephanocoenia intersepta</i></p>
<p>Hidrocorales (Corales de fuego) <i>Millepora alcicornis</i></p>	
<p>Anélidos (gusanos segmentados) <i>Spirobranchus giganteus</i></p>	
<p>Peces <i>Abudefduf saxatilis</i> <i>Acanthurus coeruleus</i> <i>Acanthurus sp.</i> <i>Bodianus pulchellus</i> <i>Chaetodon striatus</i> <i>Chromis cyanea</i> <i>Dasyatis sp.</i> <i>Haemulon flavolineatum</i> <i>Haemulon sciurus</i> <i>Ocyurus chrysurus</i> <i>Scarus coelestinus</i> <i>Scarus iserti</i> <i>Scarus guacamaia</i> <i>Sparisoma aurofrenatum</i> <i>Sparisoma rubripinne</i> <i>Sparisoma viride</i> <i>Stegastes planifrons</i> <i>Thalassoma bifasciatum</i></p>	<p>Esponjas <i>Clathria sp.</i> <i>Anthosigmella varians</i></p>
	<p>Cnidarios <i>Condylactis gigantea</i> <i>Palythoa caribaeorum</i></p>