

Informe final* del Proyecto CQ063
Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo

Responsables:	Dr. Noel Carbajal Pérez
Institución:	Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, AC
Dirección:	Camino a la Presa San José 2055, Lomas 4a sección, San Luis Potosí, 78216 , México
Correo electrónico:	noelc@ipicyt.edu.mx
Teléfono/Fax:	Tel: 01 (444) 834 2000 Ext. 7274
Fecha de inicio:	Noviembre 30,2004
Fecha de término:	Marzo 4, 2009
Principales resultados:	Informe final, Fotografías, Cartografía, Hojas de cálculo,
Forma de citar** el informe final y otros resultados:	Carbajal Pérez, N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063 . México D. F.
Forma de citar hoja de cálculo	Carbajal Pérez, N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Hoja de Cálculo SNIB-CONABIO proyecto No. CQ063 . México, D.F.

Resumen:

Proyecto financiado con recursos aportados por Comercial Chemax, S.A. de C.V. En el presente proyecto se propone un estudio profundo e integral de la hidrodinámica, de los procesos de dispersión de contaminantes, del transporte de sedimentos, de planimetría y aerofotografía en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. Fundamentalmente, se propone investigar las corrientes de marea, la circulación de origen baroclínico (por diferencia de densidad), las corrientes inducidas por el viento y concentraciones de sedimentos. Se plantea la medición sistemáticas en todo el sistema de la batimetría, de la salinidad y de las corrientes. Se pondrá especial énfasis en las bocas que comunican al mar y en aquellas que separan a las diferentes lagunas. Los cambios de nivel del mar en las bocas de Cancún y Nizuc deben ser medidos simultáneamente para determinar las fases de las mareas. Una vez concluidas las campañas de medición, los datos servirán para alimentar un modelo hidrodinámico numérico de diferencias finitas. El modelo permitirá entender la dinámica del sistema lagunar en forma global, así como estimar los transportes de contaminantes y sedimentos. Con el modelo se investigarán las reacciones del sistema, por ejemplo a modificaciones hipotéticas de las bocas y a eventos de fuertes vientos como es el caso de los huracanes. El conocimiento de la hidrodinámica es fundamental para entender aspectos de tipo biológico y ecológico

-
- * 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.



INFORME FINAL

COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD CONABIO

Proyecto CQ063

***Hidrodinámica y transporte de
contaminantes y sedimentos en el
sistema lagunar Nichupté-Bojórquez,
Cancún, Quintana Roo, México***

Dr. Noel Carbajal Pérez

Marzo 2008

PARTICIPANTES EN EL PROYECTO *“Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez, Cancún, Quintana Roo, México”*

Responsable del proyecto
Dr. Noel Carbajal Pérez

Participantes
Dr. Marco Galicia Pérez
Dr. Juan Gaviño
Dra. Leticia Santos Martínez
M. en C. Ma. Fabiola León Galván
Ing. Jejanny Lucero Hernández Martínez
Estudiante Claudia Ivonne Sosa Franco
Oceanólogo Alejandro Bravo Quezada
Estudiante Leonardo Hernández Ascúnaga
Estudiante Luis Felipe Pineda Martínez
Dr. Thomas Pohlmann

LISTA DE CONTENIDO

CAPITULO 1.....	
RESUMEN.....	1
CAPITULO 2.....	2
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO 3	8
ZONA DE ESTUDIO.....	8
CAPITULO 4.....	22
HIDROGRAFÍA.....	22
Salinidad.....	29

Temperatura.....	34
Oxígeno disuelto	38
pH.....	42
Turbidez.....	45
Manantiales.....	48
Referencias	48
CAPITULO 5.....	52
Nutrientes y contaminantes.....	52
Metodología.....	62
Nitratos (NO ₃ ⁻), Nitritos (NO ₂), Amonio (NH ₄ ⁺).....	54.
La Fijación del Nitrógeno.....	55
La toma del Nitrógeno.....	55
La Mineralización del Nitrógeno.....	56
Nitrificación.....	56
La Desnitrificación	57
Fosfatos.....	58
Surfactante.....	59
Clasificación de surfactantes.....	60
Agentes aniónicos.....	60
Agentes catiónicos.....	60
Agentes no iónicos.....	61

Descripción de resultados.....	61
Metodología.....	62
Análisis colorimétrico.....	62
Mediciones en laboratorio.....	63
Análisis colorimétrico.....	63
NITRATO.....	64
NITRITO.....	67
AMONIO.....	70
Método	70
FOSFATO.....	74
SURFACTANTE.....	77
Referencia.....	80
CAPITULO 6	82
METALES PESADOS.....	82
Plomo.....	84
Cadmio.....	87

Zinc.....	89
Cobre.....	95
Hierro.....	97
Referencias.....	100
CAPÍTULO 7.....	105
ESTADÍSTICA.....	105
CAPITULO 8.....	121
MICROBIOLOGÍA.....	121
INTRODUCCIÓN.....	122
Materiales y métodos en general.....	124
Diseño de oligonucleótidos.....	125
Enzimas seleccionadas.....	125
Aislamiento de DNA.....	126
PCR.....	127
Condiciones de PCR UBF-1492R.....	127
Purificación de los fragmentos de PCR.....	127
Clonación de Insertos en el vector PCR TOPO 4	128

Transformación de células E. coli Topo 10 químicamente competentes.....	129
Análisis de clonas.....	129
Digestión Enzimática del PCR- Colonia.....	130
Extracción de DNA	131
Amplificación del 16 S por PCR.....	132
Ligación y transformación.....	133
PCR- Colonia.....	134
Análisis con enzimas de restricción.....	134
Resultados y discusión.....	136
Representación de la división de bacterias.....	136
División CFB.....	137
Referencias.....	141
Artículo científico.....	151
CAPITULO9.....	160
HIDRODINÀMICA.....	160
Resumen.....	160
Antecedentes.....	161
Hidrodinámica de las mareas	163
Modelo hidrodinámico numérico	166
Resultados.....	168

Hidrodinámica inducida por el viento	181
Referencias.....	192
CAPÍTULO 10.....	195
TRANSPORTE DE CONTAMINANTES Y SEDIMENTOS.....	195
Transporte de sedimentos.....	206
Referencias.....	212

CAPÍTULO 11.....	214
EVALUACIÓN FOTOGRÁFICA DEL COMPLEJO LAGUNAR DE NICHUPTÉ-BOJÓRQUEZ.....	214
PROCESOS COSTEROS.....	220
Procesos ambientales de tipo químico y tipo ecológico.....	222
Procesos hidrodinámicos (viento, oleaje, mareas, corrientes marinas)...	222
Fenómenos meteorológicos estacionales (huracanes, nortes, tormentas).....	223
Procesos de transporte de sedimentos (fuertes, trayectorias, bancos de arena, playa.....	223
Procesos geológicos (tipo de suelo, tipo de arenas, limos, arcillas).....	224
Procesos de largo plazo.....	224
Condiciones políticas y sociales.....	225
Procesos de preservación del medio ambiente y restauración de áreas primordiales.....	225
Evaluación Fotografica1.....	228
Evaluación fotográfica 2.....	258.
CAPÍTULO 12.....	273
CONCLUSIONES.....	273
Agradecimientos.....	275

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez en Cancún, Quintana Roo.

Figura 3.2 Profundidades en el sistema lagunar

Figura 3.3 Trayectorias de todos los huracanes en el Atlántico Norte y el Pacífico Oriental entre 1851 y 2007 (NOAA, National Weather Service, Nacional Hurricane Center).

Figura 3.4 Huracán Wilma estacionado al noreste de la Península de Yucatán (NASA).

Figura 3.5 Intensidad del viento en el mes de noviembre de 2006. La línea verde indica los valores máximos diarios alcanzados y la línea lila indica los valores promedio diarios.

Figura 3.6 Dirección promedio diaria en Cancún entre el 12 y 25 de noviembre de 2006.

Figura 3.7 Intensidad del viento en el mes de marzo de 2007. La línea verde indica los valores máximos diarios alcanzados y la línea lila indica los valores promedio diarios.

Figura 3.8 Dirección promedio diaria en Cancún (aeropuerto) entre el 11 y 17 de marzo de 2007.

Figura 3.9 Intensidad del viento en km/hr en la zona de Cancún, Quintana Roo durante el año 2004. Los valores representados son promedios diarios.

Figura 3.10 Rosa de vientos en Cancún, Quintana Roo para el año 2004.

Figura 4.1 Distribución y posición de las estaciones hidrográficas en la campaña de medición de Septiembre de 2005

Figura 4.2 Topografía y distribución de las estaciones hidrográficas de la segunda campaña de medición.

Figura 4.3 a Salinidad en Septiembre de 2005

Figura 4.3 b Salinidad en Noviembre de 2006

Agentes aniónicos

Agentes catiónicos

Figura 4.4 a Temperatura en Marzo de 2007.

Figura 4.4 b Temperatura en Marzo de 2007.

Metodología

Figura 4.5 b Oxígeno disuelto en Marzo de 2007.

Figura 4.5 c Oxígeno disuelto en Julio-Agosto de 2007

Figura 4.6 a pH en Noviembre de 2006

Figura 4.6 b pH en Marzo de 2007.

Figura 4.6 c pH en Julio-Agosto de 2007.

Figura 4.7 a Turbidez en Noviembre de 2006.

Figura 4.7 b Turbidez en Marzo de 2007.

Figura 4.7 c Turbidez en Julio-Agosto de 2007

Figura 4.8 Posición de los manantiales de agua en el sistema lagunar

Figura 4.9 Manantial de agua 1, ubicado al noroeste de Nichupté

Figura 4.10 Mediciones de velocidad alrededor de un manantial

Figura 5.1 a Nitrato en Noviembre de 2006.

Figura 5.1 b Nitrato en Marzo de 2007.

Figura 5.1 c Nitrito en Julio-Agosto de 2007.

Figura 5.2 a Nitrito en Septiembre de 2005.

Figura 5.2 b Nitrito en Noviembre de 2006.

Figura 5.2 c Nitrito en Marzo de 2007.

Figura 5.2-d Nitrito en Julio-Agosto de 2007

Figura 5.3 a Amonio en Septiembre de 2005.

Figura 5.3 b Amonio en Noviembre de 2006.

Figura 5.3 c Amonio en Marzo de 2007.

Figura 5.3 d Amonio en Julio-Agosto de 2007.

Figura 5.4 a Fosfato en Septiembre de 2005.

Figura 5.4 b Fosfato en Noviembre de 2006.

Figura 5.4 c Fosfato en Marzo de 2007.

Figura 5.4 d Fosfato en Julio-Agosto de 2007.

Figura 5.5 a Surfactantes en Noviembre de 2006

Figura 5.5 b Surfactantes en Marzo de 2007.

Figura 5.5 c Surfactantes en Julio-Agosto de 2007.

Figura 6.1 a Plomo en Noviembre de 2006.

Figura 6.1 b Plomo en Marzo de 2007.

Figura 6.1 c Plomo en Julio-Agosto de 2007

Figura 6.2 a Cadmio en Noviembre de 2006

Figura 6.2 b Cadmio en Marzo de 2007.

Figura 6.2 c Cadmio en Julio-Agosto de 2007.

Figura 6.3 a Zinc en Noviembre de 2006.

Figura 6.3 b Zinc en Marzo de 2007.

Figura 6.3 c Zinc en Julio-Agosto de 2007

Figura 6.4 a Cobre en Noviembre de 2006.

Figura 6.4 b Cobre en Marzo de 2007.

Figura 6.4 c Cobre en Julio-Agosto de 2007.

Figura 6.5 a Hierro en Noviembre de 2006.

Figura 6.5 b Hierro en Marzo de 2007.

Figura 6.5 c Hierro en Julio-Agosto de 2007

Figura 7.1 Valor medio y variabilidad de fosfatos en las cuatro campañas de medición

Figura 7.2 Valor medio y variabilidad en tres campañas de medición de nitratos

Figura 7.3 Valor medio y variabilidad del nitrito

Figura 7.5 Valor medio y variabilidad de los surfactantes.

Figura 7.6 Valor medio y variabilidad del amonio.

Figura 7.7 Valor medio y variabilidad de la temperatura.

Figura 7.8 Valor medio y variabilidad de la salinidad

Figura 7.9 Valor medio y variabilidad del pH.

Figura 7.10 valor medio y variabilidad de oxígeno disuelto.

Figura 7.11 Valor medio y variabilidad de la turbidez.

Figura 7.12 valor medio y variabilidad del cadmio.

Figura 7.13 Valor medio y variabilidad del cobre.

Figura 7.14 Valor medio y variabilidad del hierro.

Figura 7.15 Valor medio y variabilidad del plomo

Figura 7.16 Valor medio y variabilidad del zinc.

Figura 8.1 DNA de los microorganismos. 132

Figura 8.2 Amplificación..... 132

Figura 8.3 Ligación y transformación 133

Figura 8.4 Colonia PCR..... 134

Figura 8.5 Análisis de restricción de muestra 1 Bsa JI. 135

Figura 8.6 Análisis de restricción de muestra 1 Msp I..... 136

Figura 8.7 Batimetría del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez 149

Figura 8.8 Mapa CLANS que visualiza similitudes a manera de pares para un conjunto de 13453 secuencias 150

Figura 9.1 Calendario de mareas de la zona de Isla mujeres. Su comportamiento es muy semejante al de Cancún. Gráfica obtenida del departamento de Oceanología del CICESE. 166

Figura 9.2 Flujo de la marea M_2 a un octavo de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s. 171

Figura 9.3 Flujo de la marea M_2 a un cuarto de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s. 172

Figura 9.4 Flujo de la marea M_2 a tres octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s..... 174

Figura 9.5 Flujo de la marea M_2 a la mitad de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s. 175

Figura 9.6 Flujo de la marea M_2 a cinco octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.....	177
Figura 9.7 Flujo de la marea M_2 a tres cuartos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.....	178
Figura 9.8 Flujo de la marea M_2 a siete octavos de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.....	179
Figura 9.9 Flujo de la marea M_2 al inicio de periodo. Las velocidades están dadas en cm/s.	180
Figura 9.10 Circulación inducida por un viento soplando de norte a sur con una velocidad de 5 m/s.	185
Figura 9.11 Circulación inducida por un viento soplando de noreste hacia el suroeste con una velocidad de 5 m/s.	186
Figura 9.12 Circulación inducida por un viento soplando de noroeste hacia el sureste con una velocidad de 5 m/s.	190
Figura 9.13 Circulación inducida por un viento soplando del oeste hacia el este con una velocidad de 5 m/s.	191
Figura 10.1 a Dispersión de partículas desde la laguna Bojórquez con viento del noroeste	
Figura 10.1 b. Situación después de 2 días.	
Figura 10.1 c. Situación después de 3 días.	
Figura 10.1 d. Situación después de 8 días.	
Figura 10.1 e. Situación después de 15 días.	

Figura 10.1 f. Situación después de 30 días.

Figura 10.2 a. Dispersión de partículas desde Bojórquez con un viento del noreste.

Figura 10.2 b. Dispersión después de 3 días.

Figura 10.2 c. Dispersión después de 8 días.

Figura 10.2 d. Dispersión después de 15 días.

Figura 10.2 e. Dispersión después de 30 días.

Figura 10.2 f. Dispersión después de 45 días.

10.3 a. Dispersión de partículas desde Nichupté con un viento del este.

Figura 10.3 b. Dispersión después de 3 días

Figura 10.3 c. Dispersión después de 8 días.

Figura 10.3 d. Dispersión después de 15 días

Figura 10.3 e. Dispersión después de 30 días.

Figura 10.3 f. Dispersión después de 45 días.

Figura 10.4. Transporte de sedimentos después de un año de simulación.

Figura 10.5 Ampliación de la zona Nichuptè.

Figura 11.1 Geografía del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. 217

Figura 11.2 Distribución de profundidades en la laguna (batimetría) y la posición de las estaciones hidrográficas en la campaña de medición de septiembre de 2004. 218

Figura 11.3 Distribución de nitritos los cuales son una indicación de contaminación. 219

Figura 11.4 Distribución de fosfato el cual es una indicación de contaminación. 220

LISTA DE TABLAS

Tabla 4.1 Campañas de medición.

Tabla 4.2 Coordenadas geográficas de las estaciones hidrográficas de la segunda campaña de medición.

Tabla 4.3 Relación de concentración para el oxígeno Disuelto.

Tabla 6.1. Actividades que contaminan las aguas costeras.

Tabla 6.2. Concentración media de Metales ($\mu\text{g/L}$) en agua superficial de lagunas costeras del Golfo de México.

Tabla 6.3. Límites Máximos Permisibles en Aguas Costeras.

Tabla 6.4 Límites máximos permisibles para metales pesados, tomado de la NOM-001-ECOL-1996.

Tabla 8.1 Muestras a analizar

Tabla 8.2 Reactivos y cantidades

Tabla 8.3 Condiciones para PCR-Colonia UBF-M13R

Tabla 8.4 Muestras encubadas a 60^a C

Tabla 8.5 Muestras incubadas a 37^a C

Tabla 8.6 Los diez huracanes más intensos (basados en la presión medida en el centro en el Océano Atlántico (1851-2005)

Tabla 8.7 Taxonomic classification of bacteria present at the lagoon before hurricane Wilma (September 3-9, 2005)

Tabla 8.8 Taxonomic classification of bacteria identified at the lagoon after hurricane Wilma (December 1st., 2005)

LISTA DE FOTOS

EVALUACIÓN FOTOGRAFICA

Foto 1 Vista de la laguna Bojórquez. Este cuerpo de agua es el más contaminado de Cancún. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 2 Corte de mangle injustificado en una zona de marinas. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 3 Mangle dañado junto al Boulevard Kukulcán. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 4 Isla de mangle en Bojórquez. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 5 Mangle dañado en Bojórquez mostrando signos de recuperación. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 6 Boca norte que comunica a la laguna Bojórquez con la de Nichupté. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 7 Playa externa completamente erosionada por la acción del oleaje generado por el huracán Wilma. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 8 Playa de Cancún completamente erosionada con restos de piedras calizas. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 9 Daños ocasionados por la marejada sobre la playa y construcciones hoteleras. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 10 Problema de erosión y de rehabilitación de playas. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 11 Desarrollo no controlado de marinas y demasiado tráfico de yates, lanchas y motos acuáticas en el complejo lagunar. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 12 Intento de rehabilitación de la laguna Bojórquez. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 13 Residuos fecales observados en Diciembre de 2005 en la laguna Bojórquez.
..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 14 Residuos fecales y basura flotando en Bojórquez. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 15 Inmovilidad del agua en la laguna Bojórquez. ... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 16 Eutroficación del agua en la laguna Bojórquez. . **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 17 Residuos orgánicos favoreciendo el crecimiento de almejas y ostras. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 18 Daños del huracán en los linderos de la laguna. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 19 Mangle dañado en el interior de la laguna Nichupté. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 20 Construcciones civiles afectando la zona costera. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 21 Trabajos de restauración inmediatos. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 22 Boulevard Kukulkán devastado por el huracán Wilma, sin árboles y sin palmas.
..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 23 El principal intercambio de aguas entre el Nichupté y el mar abierto ocurre a través de la boca Cancún. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 24 Principal canal de navegación en Nichupté. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 25 Control de datos medidos en la campaña de medición de septiembre de 2005.
..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 26 Fuentes de agua natural en el complejo lagunar de Nichupte-Bojórquez. **¡Error!**

Marcador no definido.

Foto 27 Oleaje y mangle..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 28 El viento es el principal factor que induce la dinámica o circulación de agua en el complejo lagunar..... **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 29 Mangle en Bojorquez mostrando signos de recuperación. **¡Error! Marcador no definido.**

Foto 30 Arrasamiento de árboles, arbustos y palmas por la acción del viento asociado al huracán Wilma. **¡Error! Marcador no definido.**

EVALUACIÓN FOTOGRAFICA 2

FOTO 1. MANGLAR SECO.....

FOTO 2. Mangle como refugio de aves

FOTO 3. Mangle recuperado

FOTO 4. Mangle seco y recuperado

FOTO 5. Boca sur. Punta Nizuc

FOTO 6. Pastos marinos

FOTO 7. Indicación de canales de navegación

FOTO 8. Canales de intercomunicación

FOTO 9. Mangle alejado de la zona de presión

FOTO 10. Construcción (extensión del malecón

FOTO 11. Nivel del agua y del suelo (debido a la poca diferencia de niveles alta susceptibilidad a inundaciones)

FOTO 12. Mangle afectado por zona hotelera

FOTO 13. Crecimiento explosivo de la zona hotelera

FOTO 14. Mangle completamente recuperado

FOTO 15. Puente norte, boca norte. Zona de mayor intercambio de agua entre la laguna y el mar



CAPÍTULO I

Resumen

Se presentan los resultados de un estudio integral del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, ubicado en Cancún, Quintana Roo, México. Se realizaron campañas de medición de parámetros hidrográficos (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, turbidez, densidad, pH), de nutrientes (fosfato, nitrato, nitrito, fosfato, amonio, surfactantes) y metales pesados (cadmio, cobre, zinc, fierro). En este informe se presentan y discuten los resultados obtenidos en campañas de medición de parámetros hidrográficos (temperatura, salinidad, densidad, oxígeno disuelto, turbidez) y de contaminantes químicos como el amonio, nitritos, nitratos, fosfatos, surfactantes y pH. Se muestran también los resultados del estudio sobre la fauna bacteriológica encontrada en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos en modelaciones hidrodinámico-numéricas efectuadas con el fin de investigar los alcances de las circulaciones obtenidas por marea y por viento en el interior del complejo lagunar.

CAPITULO 2

Introducción

Las lagunas costeras tienen una importancia fundamental en su interacción con el ser humano por la capacidad de pesca, por sus posibilidades portuarias y por el potencial turístico que ofrecen. Su posición normalmente las ubica como cuerpos de agua que, por un lado, admiten agua dulce por ríos y escurrimientos y, por otro lado, tienen intercambios de agua con el mar a través de una o varias bocas (Millar et al, 1990). Las lagunas costeras se distinguen por sus gradientes de salinidad que dependen mucho de la capacidad de interacción de las lagunas con el agua salada del mar abierto y de los flujos de agua dulce que varían fuertemente en las diferentes estaciones del año.

La circulación o dinámica en lagunas costeras es producida fundamentalmente por el sistema de vientos, por las mareas, por la interacción de agua dulce liviana con agua de mar más pesada, es decir, por los gradientes de densidad y por la geometría del sistema que tiene efecto sobre la dinámica a través de las dimensiones de las bocas que comunican con el mar abierto, con la batimetría, con los canales, con el largo y ancho de las lagunas y en general con la morfología del sistema. Otro factor importante a considerar en las lagunas costeras es su capacidad de respuesta relativamente rápida a calentamientos por radiación solar y a enfriamientos al paso de masas de aire frío. Esto es debido a su característica de ser cuerpos de agua

someros. La acción del viento causa un proceso de mezclado en la vertical que por lo general alcanza hasta el fondo de las lagunas. Por este motivo, las lagunas muestran una estructura vertical homogénea. En términos generales, se puede afirmar que los gradientes verticales de parámetros hidrológicos son comúnmente pequeños. La fricción en las lagunas costera es dominante y su influencia se extiende sobre toda la columna de agua. Una característica en las lagunas costeras es que la circulación puede ser amortiguada inmediatamente debido a la fricción. Así por ejemplo, si una circulación es inducida por el viento, en cuanto éste cesa, la circulación disminuye rápidamente. Las mareas por el contrario, siendo un forzamiento siempre presente, son también disipadas dentro de las lagunas habiendo por lo general una zona de influencia o abanico de acción de las mareas. Estos abanicos están ubicados en regiones cercanas a las bocas por donde las lagunas interactúan con el mar abierto. Un aspecto adicional que distingue al sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, objeto de nuestro estudio, es que tiene interacción con flujos subterráneos de agua. Concretamente, existe un gradiente de presión orientado de tierra firme hacia el sistema lagunar de Nichupté –Bojórquez, de tal modo que a través de los manantiales u ojos de agua, ubicados en diferentes puntos del fondo, existe un flujo hacia el sistema lagunar. Normalmente, se esperaría que estos flujos serían completamente de agua dulce, es decir, con un valor cero de salinidad, pero debido a la conocida estructura caliza y cavernosa del subsuelo en la Península de Yucatán, sugieren que en la cercanías de las costas existe un proceso de mezclado en el subsuelo entre el agua dulce y el agua de mar, que en forma de cuña salina alcanza distancias importantes tierra adentro.

La dinámica resultante de la interacción de todos estos aspectos determina la capacidad de intercambio de aguas, el tiempo de residencia de contaminantes o material disuelto o no disuelto en el agua, el transporte de sedimentos, la circulación en el cuerpo lagunar mismo, la capacidad de calentarse o enfriarse de las lagunas, especialmente en las lagunas someras, dependiendo del forzamiento atmosférico existente. Normalmente, la dinámica evoluciona en las diferentes estaciones del año, debido a los cambios de temperatura, a la variación en intensidad y dirección del viento y al cambio de nivel del mar ocasionado por el sistema estacional de vientos que eleva o disminuye el nivel del mar en las costas.

En cierto modo, las lagunas costeras son un tipo de estuarios, al menos tan variable como cualquier sistema acuático (Dyer, 1997). Estuarios y lagunas costeras tienen en común la característica de tener una o más comunicaciones restringidas con el mar abierto, en ambos existe una interacción de agua dulce y agua salada. Aunque existen algunas clasificaciones para los diferentes tipos de estuarios (Pritchard, 1969; Lankford, 1976), éstas no pueden ser aplicadas directamente a las lagunas costeras. En términos generales, las lagunas costeras presentan una morfología más compleja y los procesos químicos tienden a ser más ricos debido a que la interacción biológica entre la vida marina y terrestre ocurre de una manera más directa y protegida. Otro aspecto distintivo de las lagunas costeras es que son más susceptibles de manipulaciones hidráulicas, ya sea para incrementar la productividad pesquera o para fines turísticos.

Desde el punto de vista de la hidrodinámica, con sus forzamientos con viento, mareas y gradientes de densidad, las lagunas costeras en México han sido poco investigadas. En realidad, los balances de salinidad, nutrientes y contaminantes dependen directamente de la hidrodinámica de las lagunas costeras, aún sin considerar su variación estacional. Aun así, hay varios intentos de obtener información sobre los ciclos en la interacción biosfera – geosfera, a través de los elementos clave de nutrientes como son el carbono, nitrógeno y fósforo (Smith et al, 1999). Este ambicioso proyecto de estudiar los balances de nutrientes y parámetros hidrológicos fue llevado a cabo para un número importante de lagunas costeras en México y en América Central. Aunque se necesitaron una gran cantidad de observaciones, los balances tienen en realidad un carácter de primera aproximación. Otro proyecto de importancia considera el estudio de nutrientes en 39 lagunas costeras de México, la mayoría en regiones tropicales (Contreras et al, 1995). En este trabajo, se demuestra que no hay prácticamente limitaciones de nutrientes para la producción primaria en lagunas costeras tropicales. Los valores observados están, incluso los mínimos, aún por arriba de valores reportados en lagunas de zonas templadas. En términos generales se reporta una gran variabilidad en los valores medidos de nutrientes, lo cual es una indicación de la heterogeneidad de las lagunas costeras. Es importante recalcar que los nutrientes y las fuentes de nutrientes son de fundamental importancia en los sistemas acuáticos porque determinan una productividad primaria ordenada o bien una sobreproducción que puede llevar a la eutrofización del sistema marino (Nixon, 1981). En otras palabras, los problemas más comunes asociados a los nutrientes es que pueden existir en exceso o haber una carencia de ellos. En ambos casos, las

consecuencias para la vida marina (o biota acuática) pueden ser devastadoras. Cuando existe escasez de nutrientes se habla de aguas oligotróficas, o bien que los sistemas acuáticos o lagunas costeras tienen una producción primaria mínima. Por otro lado, cuando existe una disponibilidad de nutrientes excesiva, los sistemas acuáticos o lagunas costeras son denominados sistemas distróficos o hipereutróficos. En estos sistemas, se genera una producción masiva de biomasa, principalmente fitoplanctónica, causando serios problemas de desequilibrio en los flujos energéticos (Contreras et al, 1995). En este punto, es importante señalar que con los desarrollos urbanos y la creciente problemática de aguas residuales vertidas sin tratamiento a los sistemas acuáticos y lagunas costeras, el problema de la eutrofización se ha incrementado notablemente en las últimas décadas. Considerando los problemas de salud que la eutrofización conlleva, es necesario implementar políticas de tratamiento de las aguas residuales y de control de calidad de estos sistemas acuáticos. UN aspecto adicional con la presencia de nutrientes, incrementada por los flujos de aguas residuales, es la proliferación de la diversidad microbiana. Incluso, estudios detallados con técnicas modernas de biología molecular, debe ser posible hacer un diagnóstico preciso de los microorganismos que han entrado a un sistema acuático por medio de procesos naturales o de origen antropogénico.

De los comentarios expuestos anteriormente, se deduce que el estudio de las lagunas costeras debe tener un carácter lo más integral posible, es decir, requiere de un trabajo multidisciplinario (geológico, biológico, físico y químico, ecológico). Únicamente

de esta manera será posible tener una idea global de lo que está sucediendo en los sistemas lagunares. Incluso, para que los estudios realizados tengan influencia en las decisiones, debe haber una comunicación con los trabajadores sociales y con los responsables de las políticas del medio ambiente.

El trabajo que realizamos en este proyecto trata fundamentalmente sobre la hidrodinámica del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. Adicionalmente, se han investigado los procesos de transporte de contaminantes y de sedimentos por efectos de vientos y mareas. Para este fin, se realizaron muestreos de parámetros hidrológicos como la temperatura, salinidad, pH, turbidez y oxígeno disuelto. Aunque el proyecto trata sobre el cálculo de la circulación en el complejo lagunar, las investigaciones se han extendido a un muestreo intenso y amplio de nutrientes (nitrito, nitrato, fosfato, amonio) y contaminantes (surfactantes) y con métodos de biología molecular se determinó la diversidad microbiana. Estos trabajos, realizados en diferentes campañas de medición, fueron complementados con una gran cantidad de modelaciones numéricas. Lo cual nos permitió tener un diagnóstico muy claro de lo que sucede en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez.

CAPÍTULO 3

Zona de estudio

El sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, ubicado en la parte noreste de la Península de Yucatán, en el Estado de Quintana Roo, interacciona con el Mar Caribe a través de dos bocas; la boca Cancún en el norte y la boca en Punta Nizuc en el sur. El sistema lagunar consiste principalmente de cinco cuerpos de agua, todos ellos interconectados por canales bien definidos. Los cuerpos de agua son: laguna Bojórquez, laguna Nichupté Parte Norte, Parte Central, Parte Sur y la laguna del Inglés (ver Figura 3.1). El complejo lagunar presenta fuertes gradientes de salinidad que reflejan su interacción con el mar abierto y las entradas de agua de poca salinidad a través de los manantiales ubicados en diferentes puntos. El área total del sistema lagunar ha sido estimado por Merino et al (1990) y es del orden de $5.0 \times 10^5 \text{ m}^2$. El volumen total estimado por los mismos autores es de $1.1 \times 10^8 \text{ m}^3$. El levantamiento con sistemas de información geográfica revela que amplias zonas del sistema lagunar están cubiertas densamente por manglar (*Rhizophora* y *Avicennia* sp.), sobre todo en la parte occidental y sur. En el lado occidental estos manglares se desarrollan sobre una llanura de inundación y van siendo sustituidos por una selva baja perenifolia (Jordan et al, 1990). El ritmo de evaporación en esta zona del Caribe Mexicano es del orden de $1.8 \times 10^3 \text{ mm/año}$ y la precipitación de $1.1 \times 10^3 \text{ mm/año}$. Debido al carácter cárstico del suelo en la Península de Yucatán o bien formaciones de rocas calcáreas de alta

permeabilidad, el agua de lluvia se filtra rápidamente y fluye a través de ríos o interconexiones subterráneas. Por cierto, la investigación de estos flujos de agua subterráneos, de mucha importancia en el balance de agua de las diferentes zonas de la Península de Yucatán, requieren de un estudio detallado con métodos geofísicos modernos. Esto podría dar una idea de la interacción del agua dulce con el agua de mar en el subsuelo. En base a los valores observados de precipitación, a la capacidad de filtración de las rocas calcáreas, a los ritmos de evaporación y considerando el área superficial de la Península de Yucatán, es posible estimar el agua filtrada y debido a que estos volúmenes de agua deben fluir hacia las costas en un subsuelo de alta permeabilidad y forzados por gradientes de presión, también es posible calcular los flujos de agua dulce hacia el mar a través de las costas de la Península de Yucatán. En esas estimaciones se supone que existe un balance entre el volumen de agua que se filtra y el volumen de agua que fluye al mar a través de las costas de la Península de Yucatán. Merino et al (1990) reporta que el volumen de agua que fluye hacia el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez es del orden de $100 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$. Esto equivale a un flujo hacia Nichupté de $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$. Como se mostrará más adelante, en un trabajo de mediciones batimétricas se identificaron una cantidad de manantiales de agua subterránea en diferentes puntos del fondo del complejo lagunar. Se demostrará que esta agua que surge en los manantiales, en realidad ya fue mezclada con agua de mar en los canales subterráneos, pues muestran relativamente altos valores de salinidad y además grandes cantidades de nutrientes, provenientes de la zona urbana de Cancún que no cuenta con canalización de aguas negras.

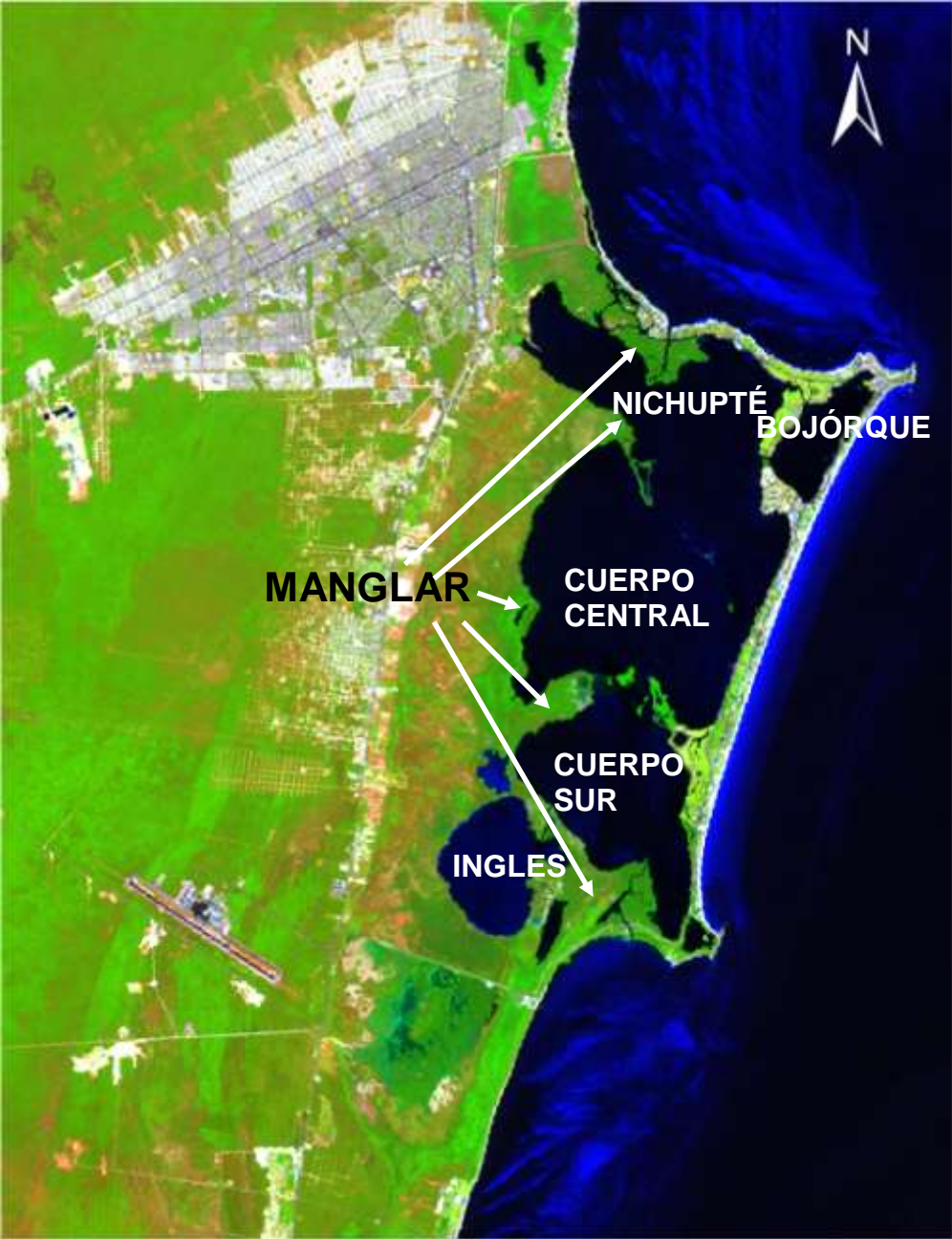


Figura 3.1 Sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez en Cancún, Quintana Roo.

El complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez es bastante somero con profundidades variando entre 0.3 m y 5.0 m de profundidad. En la Figura 3.2 se puede ver que gran parte del sistema lagunar tiene profundidades de alrededor de 2 metros. Entre la parte norte de Nichupté y el cuerpo de agua central existe una zona de bajos con profundidades que no pasan de 0.5 m. Estos bajos dificultan el intercambio de aguas entre los diferentes cuerpos de agua que conforman el sistema lagunar. Se pueden distinguir los canales de navegación y su comunicación hacia el mar abierto.

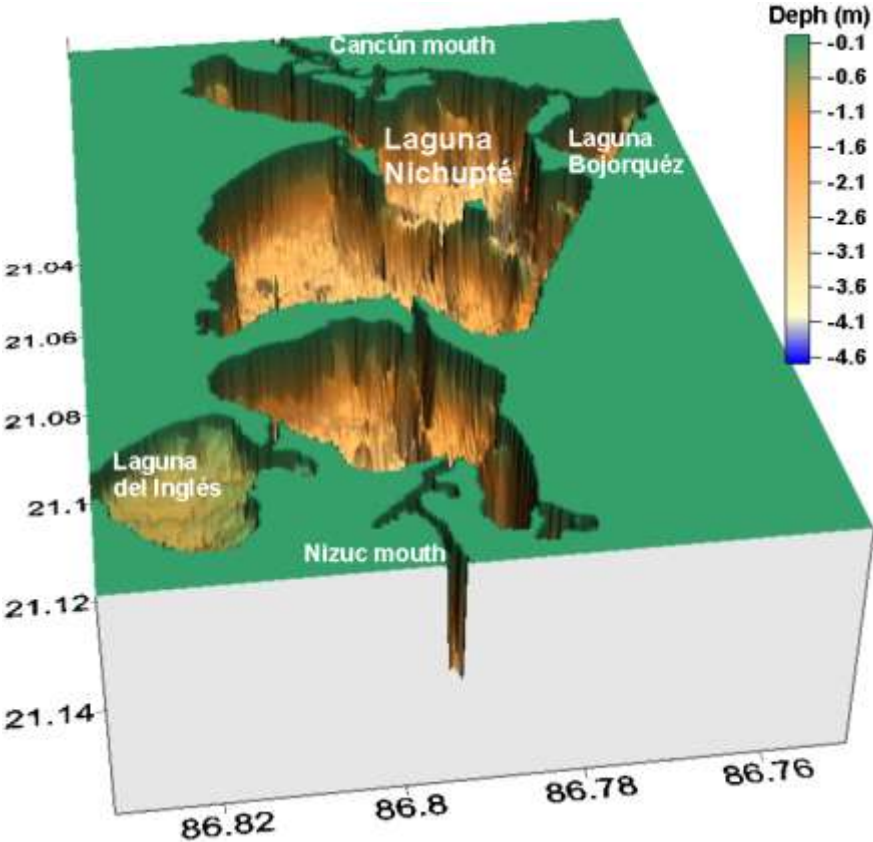


Figura 3.2 Profundidades en el sistema lagunar.

Toda la Península de Yucatán es vulnerable a la incidencia de huracanes en el verano, concretamente desde el mes de mayo a octubre. Las lagunas costeras ubicadas en esta zona de trayectorias de huracanes deben de algún estar adaptadas a estos eventos naturales extremos. La incidencia de huracanes trae consigo la ola o marea de tormenta, con elevaciones en el nivel del mar que pueden rebasar las alturas topográficas de la línea de costa conduciendo al flujo de agua sobre las barras de arena que comúnmente separan a las lagunas costeras del mar abierto. Esto tiene como consecuencia que de manera intermitente, existe una inyección de vida biológica nueva a los cuerpos de agua costeros. Con el fin de dar una idea de la frecuencia con la cual los huracanes inciden sobre la región del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, se muestra en la Figura 3.3, el historial de trayectorias de huracanes en el Océano Atlántico entre los años 1851 y 2007 (NOAA, National Weather Service, Nacional Hurricane Center). La afirmación de que, de cuando en cuando existe una inyección de vida biológica nueva a las lagunas costeras principalmente por huracanes ha sido uno de los objetivos a investigar en este proyecto. De hecho, durante este proyecto, el huracán Wilma azotó la región del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez en Octubre de 2005 (Figura 3.4). El huracán estuvo estacionado por un tiempo cercano a las 48 horas causando grandes daños a la ciudad de Cancún y particularmente a la industria turística. Puesto que teníamos muestras de agua antes y después del huracán, fue posible detectar en un estudio bacteriológico, que las muestras tomadas después del huracán contenían una diversidad biológica en un 10% diferente a las muestras tomadas antes de la incidencia. Esto será documentado en un capítulo aparte más adelante.



Figura 3.3 Trayectorias de todos los huracanes en el Atlántico Norte y el Pacífico Oriental entre 1851 y 2007 (NOAA, National Weather Service, Nacional Hurricane Center).



Figura 3.4 Huracán Wilma estacionado al noreste de la Península de Yucatán (NASA).

De manera dominante, la Península de Yucatán es ventilada por los vientos alisios provenientes del noreste. Sin embargo, este patrón cambia con la presencia de huracanes, tormentas tropicales, el paso de ondas tropicales y frentes fríos o nortes. Otra modificación diaria es debido a las brisas producidas por el calentamiento diferencial de tierra y agua. En la Figura 3.5 se muestran los valores máximos de intensidad del viento diarios, es decir las ráfagas, y los valores promedio diarios en Cancún, Quintana Roo. La diferencia entre los valores máximos y promedios son una indicación de la variabilidad diaria que existe en la zona costera de Cancún. En la Figura 3.6 se muestra para el mismo periodo, del 12 al 25 de noviembre de 2006, la dirección promedio diaria del viento. Se observa que la dirección varía, como es de esperarse, entre las direcciones Este y Norte. El efecto dominante de los vientos alisios se observa claramente. En las Figuras 3.7 y 3.8, se muestran de manera similar series de tiempo de promedios diarios de intensidad y dirección del viento para el mes de marzo de 2007, particularmente entre los días del 11 al 17. Claramente se observa que el mes de marzo es más energético, pero la dirección dominante es del Este.



Figura 3.5 Intensidad del viento en el mes de noviembre de 2006. La línea verde indica los valores máximos diarios alcanzados y la línea lila indica los valores promedio diarios.



Figura 3.6 Dirección promedio diaria en Cancún entre el 12 y 25 de noviembre de 2006.



Figura 3.7 Intensidad del viento en el mes de marzo de 2007. La línea verde indica los valores máximos diarios alcanzados y la línea lila indica los valores promedio diarios.

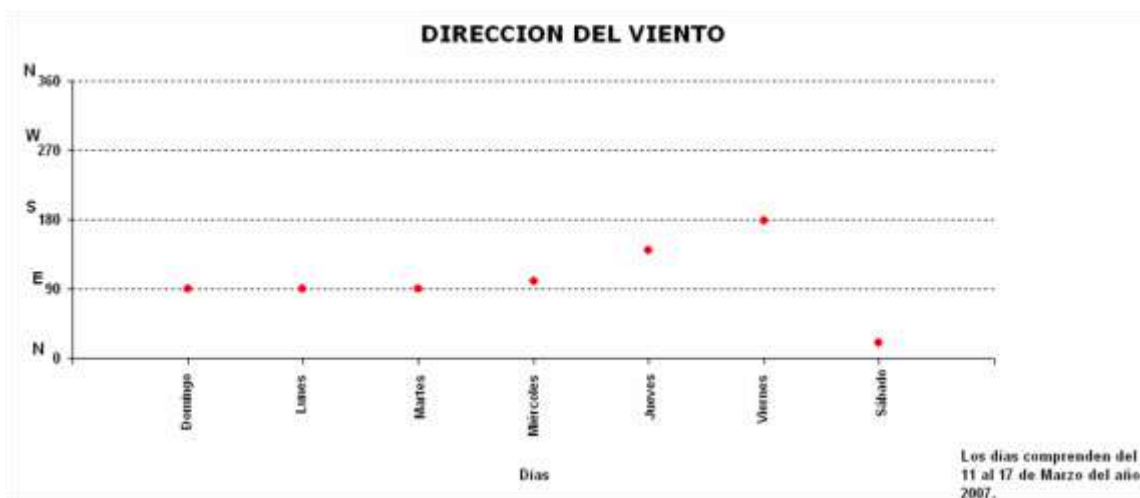


Figura 3.8 Dirección promedio diaria en Cancún (aeropuerto) entre el 11 y 17 de marzo de 2007.

Para dar una idea de la gran variabilidad del viento en el transcurso de un año, se muestra en la Figura 3.9 la intensidad del viento a lo largo del año 2004 en la zona de Cancún (medidos en el aeropuerto). Los valores representados en la figura corresponden a valores promedio diarios. Los valores máximos observados principalmente en la época de invierno corresponden al paso de frentes fríos. Los máximos observados en verano corresponden al paso de ondas tropicales, tormentas y eventualmente la influencia o incidencia de huracanes. La velocidad del viento alcanza valores máximos entre 25 y 30 km/hr en los meses de invierno. En los meses de verano los máximos varían entre 15 y 20 km/hr. Finalmente, en la Figura 3.10 se

describe la rosa de vientos para el año 2004. La frecuencia de los vientos provenientes entre el Este y Noreste domina fuertemente sobre otras direcciones. Esta rosa de vientos refleja la influencia de los vientos alisios. El hecho de haber vientos provenientes del suroeste indica que la presencia de las brisas es también relativamente importante en esta zona de la Península de Yucatán.

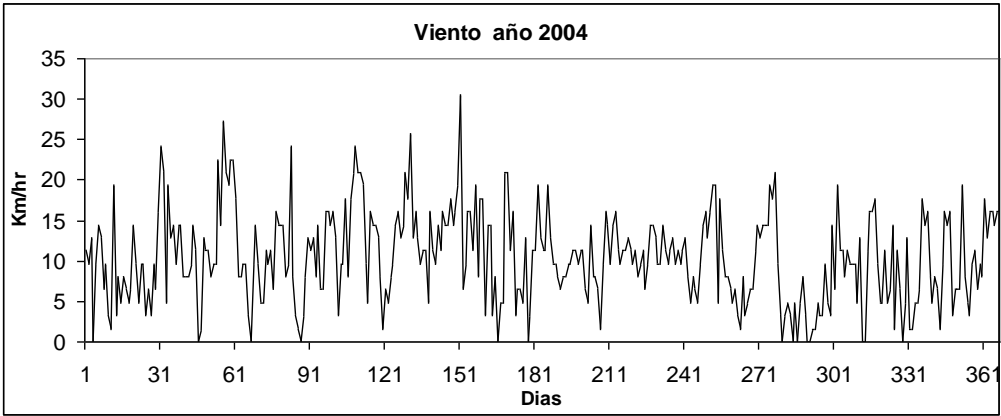


Figura 3.9 Intensidad del viento en km/hr en la zona de Cancún, quintana Roo durante el año 2004. Los valores representados son promedios diarios.

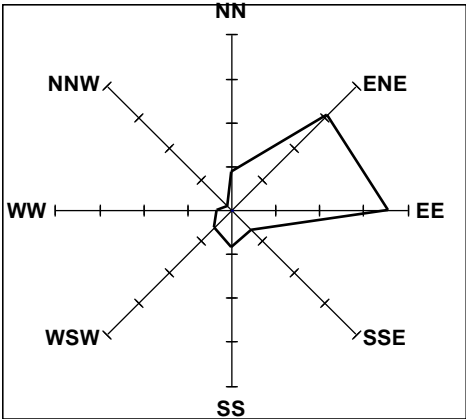


Figura 3.10 Rosa de vientos en Cancún, Quintana Roo para el año 2004.

Aunque este estudio está concentrado en aspectos de hidrodinámica es conveniente mencionar que biológicamente el sistema se caracterizaba en los comienzos del desarrollo turístico de Cancún por tener el fondo cubierto por *Thalassia testudinum*. En ese entonces se reportó que la laguna de Nichupté tenía el fondo formado por sedimentos carbonatados y cubierto por una capa vegetal cuyo principal componente (más de 90%) era *Thalassia testudinum* (Jordan et al, 1977). Esta cubierta biológica se extendía a lo largo de los canales y en cuerpos de agua como la laguna Bojórquez y en zonas donde la salinidad no es tan baja. De hecho, en la laguna Inglés, donde las salinidades son muy bajas, no se encontró esta cubierta biológica. Los mismos autores mencionan que “La cubierta biológica de *Thalassia testudinum* es importante en aspectos de la producción tanto primaria como de detritos, en la estabilización de ambientes marinos, en el aporte de substrato para organismos epifíticos y en la protección de etapas larvales y juveniles de muchas especies”. Ante el crecimiento exponencial de la industria turística, el uso intensivo de la laguna y el flujo de aguas residuales sería interesante investigar el estado actual de la cubierta biológica. Este aspecto está fuera de los objetivos de este proyecto.

Otro aspecto a mencionar es que el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez presenta una problemática muy seria debido a la presión ejercida por la intensa y creciente industria turística en sus alrededores. El presente estudio tiene como finalidad principal hacer un diagnóstico del estado de contaminación, investigar su fauna bacteriológica

con los métodos más modernos de la biología molecular, conocer su hidrografía en las diferentes estaciones del año y como es ésta afectada por eventos particulares de viento. Con el fin de estimar los procesos de intercambio de agua entre la laguna y el mar, los procesos de transporte de contaminantes y en general la dinámica dentro de la laguna se muestran también cálculos de modelación numérica de la circulación inducida por el viento en diferentes direcciones y por las mareas.

Se muestra en este documento a través de mediciones el deterioro sufrido por el sistema lagunar por la influencia antropogénica sobre este ecosistema. Es importante señalar que por primera vez en México se hace un estudio extremadamente detallado sobre el estado bacteriológico de un sistema lagunar. En el caso de Nichupté-Bojórquez hemos llevado a cabo un estudio bacteriológico profundo, lo cual ha tenido como resultado la detección de decenas de bacterias en las muestras de agua. Así mismo, hemos realizado una medición detallada de toda una serie de parámetros químicos que nos dan una excelente idea de las zonas más contaminadas en el sistema. Finalmente, para entender los procesos de circulación inducidos por las mareas y por el viento, presentamos los resultados de diferentes modelaciones numéricas. Al final se integra una lista de todos los valores de los parámetros medidos. Este estudio da un amplio panorama del estado del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez.

En el primer informe se hizo una detallada descripción de la distribución de salinidad, temperatura y algunos contaminantes como nitritos, nitratos, fosfatos y amonio. En esa

campaña de medición se le dio mayor importancia a efectuar mediciones a lo largo de las costas con el fin de investigar la interacción con las zonas hoteleras, las zonas de mangle y con zonas de depósitos en la región cercana a la ciudad de Cancún. En este segundo informe, se hizo énfasis en medir de manera homogénea en el interior de los diferentes cuerpos de agua.

Contreras L. F., Castañeda L. O., García-Nagaya A., Gutiérrez M. F. Nutrientes en 39 lagunas costeras mexicanas. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. (Rec. 23-V-1994. Rev. 30-VIII-1995. Acep. 7-III-1995)

Dyer K. R. (1997) *Estuaries a Physical Introduction*. John Wiley & sons, pp. 195.

Jordan E., De la Torre R., Argot M. (1977) Prospección biológica de la laguna de Nichupté, Cancún, Q.R. México, Nota Científica. Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología.

Lankford, R. R. 1976. Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification. p. 192–216 *In*: M. Wiley, Ed. Estuarine Processes, Vol. 2. Academic Press, New York, NY, USA.

Miller J. M., L.J.Pietrafesa, N. P. Smith (1990) Principles of hydraulic management of coastal lagoons for aquaculture and fisheries. FAO Fisheries Technical Paper 314.

Pritchard, D. W. 1967. What is an estuary: physical viewpoint. p. 3–11. *In*: G. H. Lauff, Ed. Estuaries. Am. Assoc. Advancement Sci. (83), Washington, D.C., USA.

Merino M., Czitrom S., Jordan E., Martin E., Thome P. (1990) Hidrology and rain flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancun, Mexico. *Estuarine Coastal and Shelf Sciences*, Vol. 30, No 3, 223-237.

Nixon, S. W. (1981) Freshwater inputs and estuarine productivity, p. 31-57 *In* R. D. Cross, & D. L. Williams (eds.). *Proceedings of the National Symposium on Freshwater inflow to Estuaries*. U. S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services. (FWS/OBS-81/04, Vol 1.)

Smith S. V., Crossland J.I.M., Crossland C.J. (1999) Mexican and Central American coastal lagoon systems: carbon, nitrogen and phosphorus fluxes. LOICZ Reports & Studies No. 13.

CAPITULO 4

Hidrografía

Una vez que se estudió a fondo la geometría del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez, se determinó la morfología de su fondo marino, se inspeccionó la interacción con el mar abierto a través de las bocas Cancún y Punta Nizuc, se localizaron los manantiales de agua existentes, se consideró la presión ejercida por la zona hotelera sobre el sistema lagunar, se evaluó el sistema de vientos y se determinaron puntos críticos por donde contaminantes y nutrientes son inyectados al sistema, se procedió a efectuar mediciones de parámetros hidrográficos en zonas estratégicamente seleccionadas para obtener la mayor información posible. En la primera campaña de medición, efectuada del 6 al 9 de septiembre de 2005 (ver Tabla 4.1), se le dio mucho énfasis a la interacción del sistema lagunar y las costas que lo rodean. La línea de costa esta conformada por carreteras bulevares, manglares, selva y en parte por la ciudad misma de Cancún. En la Figura 4.1 se muestra la posición y la distribución en el complejo lagunar de 145 estaciones hidrográficas. Se puede observar que las estaciones están concentradas a lo largo de las líneas de costa y con mayor concentración en zonas en donde teníamos especial interés por sus manantiales de agua subterránea y en donde había eventualmente focos de contaminación. En esta campaña de medición se hicieron determinaciones de bacteriología, temperatura, salinidad, fosfato, amonio y nitrito. Es importante señalar que los resultados obtenidos en esta campaña de medición fueron muy útiles para

tomar decisiones para los futuros trabajos de campo. Como se demostrará más adelante, las mediciones nos dieron una idea muy precisa de los lugares mas conflictivos desde el punto de vista de la contaminación y de mayor interés por las entradas de agua subterránea de baja salinidad.

Tabla 4.1 Campañas de medición

Fecha de Campaña	Bacteriología	pH	OD (mg/L)	Turbidez (FTUs)	Temperatura promedio (°C)	Salinidad promedio (UPS)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)
6 al 9 de Septiembre 2005	X				X	X	X	X
1 y 2 de Diciembre 2005	X							
15 al 23 Noviembre 2006		X	X	X	X	X	X	X
13 al 14 de Marzo de 2007		X	X	X	X	X	X	X
26 de Julio al 2 de agosto 2007		X	X	X	X	X	X	X

Fecha de campaña	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	Surfantantes (mg/L)	Pb (mg/L)	Cu (mg/L)	Fe (mg/L)	Zn (mg/L)	Cd (mg/L)
6 al 9 de Septiembre 2005	X							
1 y 2 de Diciembre 2005								
15 al 23 Noviembre 2006	X	X	X	X	X	X	X	X
13 al 14 de Marzo de 2006	X	X	X	X	X	X	X	X
26 de Julio al 2 de agosto 2007	X	X	X	X	X	X	X	X

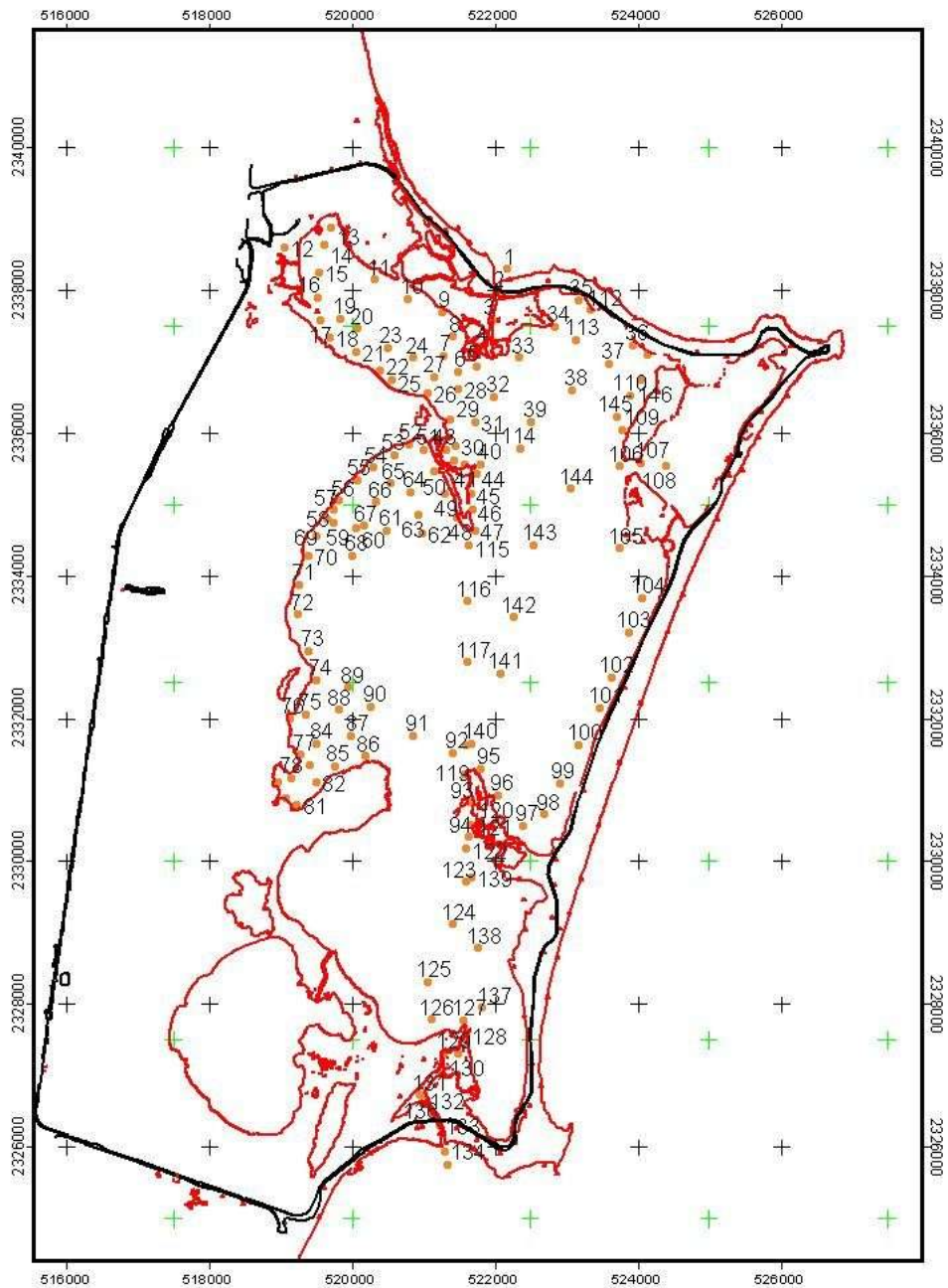


Figura 4.1 Distribución y posición de las estaciones hidrográficas en la campaña de medición de Septiembre de 2005.

A veces los eventos naturales de carácter muy relevante exigen tomar decisiones de corto plazo. Inicialmente habíamos programado un análisis bacteriológico únicamente para la campaña de mediciones efectuada en Septiembre de 2005. Sin embargo, la magnitud del huracán Wilma, catalogado de magnitud 5 en la escala de Saffir-Simpson, y la información sobre la entrada de agua de mar a la laguna por el efecto de la ola de tormenta, nos condujo a tomar la decisión de efectuar otra toma de muestras en Diciembre de 2005, para determinar si había una diferencia entre la diversidad bacteriológica antes y después del huracán. Consecuentemente, hubo una campaña de toma de muestras de agua en los días siguientes al paso del huracán Wilma por la región de Cancún (ver Tabla 4.1). Concretamente, este último muestreo se hizo necesario para determinar el efecto que tuvo la ola de tormenta producida por el huracán Wilma sobre la laguna de Nichupté-Bojórquez, pues el nivel del agua fue tan alto que el agua de mar fluyó sobre la barra donde se ubica la zona hotelera inundando amplias zonas del complejo lagunar. La toma de muestras de agua posterior al paso del huracán Wilma y necesarias para el análisis bacteriológico se llevaron a cabo en la primera semana de Diciembre de 2005. Para ver el detalle de la posición de la toma de muestras ver el capítulo sobre bacteriología.

Para las campañas de medición, efectuadas en Noviembre de 2006, marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007 (ver Tabla 4.1), se seleccionaron 50 nuevas estaciones hidrográficas, ahora con la intención de abarcar todo el complejo lagunar de una

manera lo más regular posible. En la Figura 4.2 se muestra la batimetría y la posición de las estaciones hidrográficas. Como se puede observar, la distribución pretende tener información en las cercanías de las dos bocas, en la zona de influencia del abanico de mareas, de las entradas de agua por los manantiales, y en general tener una idea de los cuerpos de agua principales, de hecho, únicamente la laguna del Inglés no fue considerada en este estudio por las dificultades para navegar en esa zona. En estas estaciones hidrográficas fueron medidos parámetros hidrográficos (temperatura, salinidad, turbidez y concentración de oxígeno) y se tomaron muestras de agua para efectuar análisis químicos sobre los nutrientes y contaminantes más importantes (nitrito, nitrato, fosfato, amonio, surfactantes). También se hicieron estimaciones de metales pesados disueltos en agua (plomo, cobre, zinc, fierro y cadmio) Las tres campañas de medición para estas estaciones hidrográficas se efectuaron en diferentes épocas del año (ver tabla 4.1). Es importante destacar que de esta distribución de estaciones hidrográficas, podemos obtener información sobre la forma en que por ejemplo interactúan las lagunas de Bojórquez y Nichupté, la manera en que se deben formar los gradientes de salinidad y las zonas de influencia de puntos o focos de contaminación. En la tabla 4.2 se da un listado de la posición de las estaciones hidrográficas. Las estaciones 7 y 50 están ubicadas en las bocas que interaccionan con el Mar Caribe. La hidrografía en el sistema lagunar ha sido estimada anteriormente por Merino et al. (1990). No obstante, desde entonces ha habido importantes cambios morfológicos, hidráulicos y de manejo ambiental. Una actualización es necesaria y se describe a continuación.

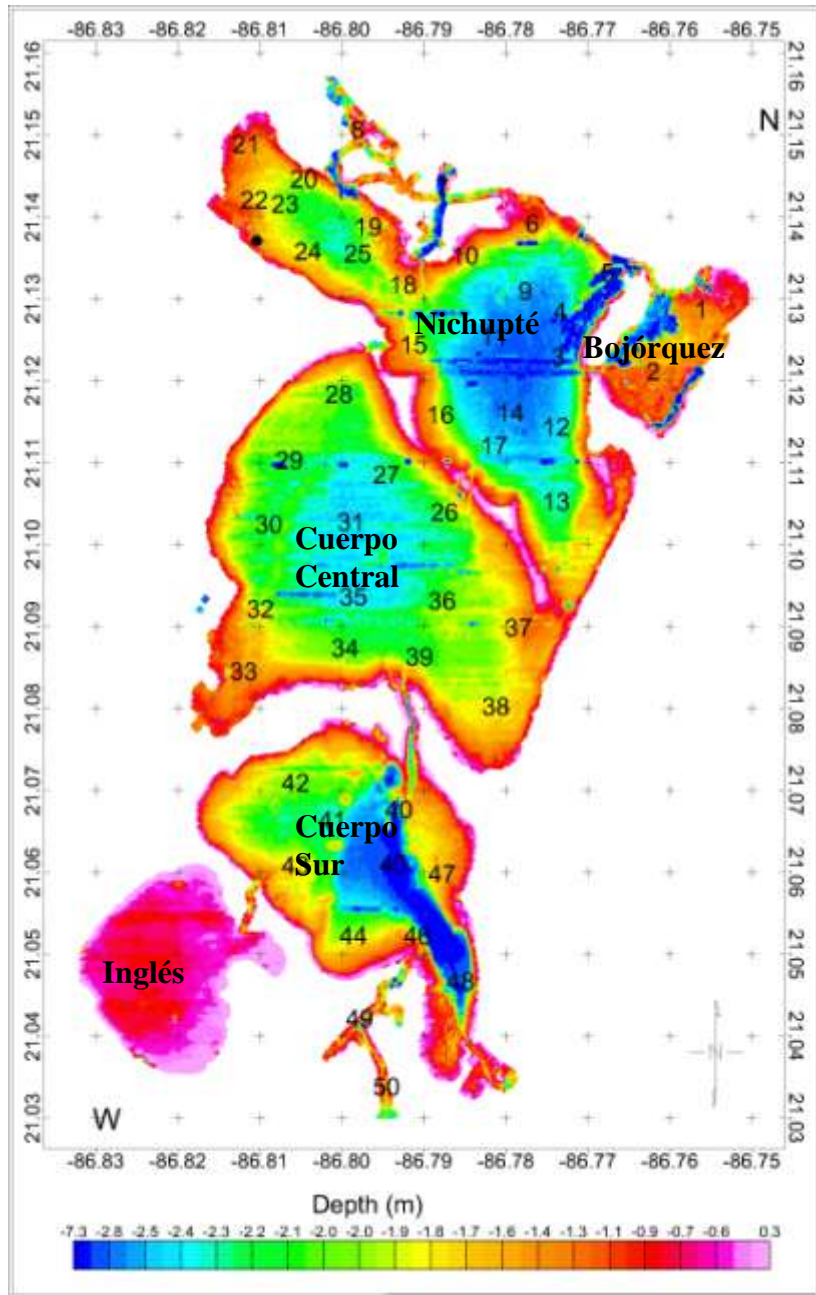


Figura 4.2 Topografía y distribución de las estaciones hidrográficas de la segunda campaña de medición.

Tabla 4.2 Coordenadas geográficas de las estaciones hidrográficas de la segunda campaña de medición.

Estacion	Coordenadas Geográficas	
	Longitud	Latitud
1	-86.756205	21.128610
2	-86.761967	21.120893
3	-86.773519	21.123032
4	-86.773491	21.128544
5	-86.767436	21.133370
6	-86.776624	21.139066
7	-86.787934	21.143372
8	-86.797517	21.150278
9	-86.777667	21.131197
10	-86.784960	21.135417
11	-86.781190	21.125409
12	-86.774176	21.115099
13	-86.773940	21.105485
14	-86.779211	21.115756
15	-86.791254	21.124573
16	-86.787973	21.116292
17	-86.781527	21.112127
18	-86.792477	21.132020
19	-86.797003	21.139408
20	-86.804488	21.144603
21	-86.811715	21.149382
22	-86.810723	21.142279
23	-86.806987	21.141669
24	-86.804259	21.135883
25	-86.798009	21.135804
26	-86.787586	21.104174
27	-86.794473	21.108773
28	-86.800141	21.118620
29	-86.806344	21.110052
30	-86.808895	21.102699
31	-86.798458	21.102787
32	-86.809843	21.092300
33	-86.812105	21.084604
34	-86.799567	21.087481
35	-86.798432	21.093832
36	-86.787659	21.093340
37	-86.778518	21.089660
38	-86.781102	21.080419
39	-86.790470	21.086314
40	-86.793000	21.067422
41	-86.801087	21.066637
42	-86.805566	21.071241
43	-86.805781	21.061329
44	-86.798699	21.052258
45	-86.793711	21.061143
46	-86.790730	21.052420
47	-86.787543	21.059880
48	-86.785454	21.046368
49	-86.797981	21.042308
50	-86.794413	21.033910

Salinidad

La distribución de salinidad para las campañas de medición efectuadas en septiembre de 2005, Noviembre de 2006, Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007, mostradas en las figura 4.3a, 4.3b, 4.3c y 4.3.d, refleja claramente los diferentes aspectos que afectan la hidrografía del sistema lagunar. En primer lugar, se observa la influencia del agua del Mar Caribe a través de las altas salinidades en la zona norte que abarca una buena parte de los cuerpos de agua de Nichupté y Bojórquez. De la distribución de salinidad en las diferentes épocas del año, se infiere que la influencia del agua salada de mar cambia notablemente. Por ejemplo, considerando como referencia la isosalina de 30 ups, entonces en Noviembre de 2006, la zona de relativamente alta salinidad se limita a la parte norte de Nichupté. En Septiembre de 2005, se observó que la influencia salina se extiende un poco más pero se limita al cuerpo de agua, ubicado en la parte norte. En los meses de Marzo y Julio-agosto, el agua salina alcanza su mayor extensión en la laguna. En la región central de Nichupté se encuentra un fuerte gradiente de norte a sur de salinidad con valores que varían de 24 a 30 ups (Septiembre 2005 y Noviembre 2006). En los meses de Marzo y Julio-Agosto de 2007, este gradiente apunta en la dirección E, con las isosalinas teniendo una orientación de norte a sur. En el cuerpo de agua de Nichupté ubicado en la parte más al norte, existe una franja de baja salinidad (24 a 24.8 ups) que colinda con manglares y con algunas zonas con aportes de agua menos salina. En el cuerpo de agua central las isosalinas están orientadas de norte a sur en todas las épocas del año, es decir, el gradiente apunta en la dirección de oeste a este. En la serie de gráficas mostradas, se observa que el gradiente varía en intensidad. Por ejemplo, varió de 23 a 32 ups en

Julio-Agosto de 2007 y de 21 a 24 ups en Marzo de 2007. Las zonas con salinidad de 21 ups, ubicadas hacia el oeste del cuerpo de agua central, se deben principalmente a los aportes de agua menos salina provenientes de aguas subterráneas y aguas superficiales escurriendo desde tierra firme. Los valores de salinidad de 21 ups, medidos en las zonas donde se ubican los manantiales, sugieren que en el subsuelo debe haber un proceso de mezclado entre al agua dulce y el agua de mar. En la Figura 4.3 se indican la posición de algunos de estos manantiales que indudablemente afectan considerablemente la hidrografía del complejo lagunar. En la Figura 4.3 también se pueden observar ampliaciones de la zonas de canales en la parte norte, es decir en los alrededores de la boca Cancún y en la parte sur en los canales cercanos a Punta Nizuc. La salinidad en los canales de la parte norte están altamente influenciados por el mar, los contenidos de sal son grandes en todos ellos. Por el contrario, se observa que el canal que conduce a punta Nizuc tiene salinidades bajas del orden de 23 psu, solamente ya en las cercanías del mar se eleva el valor de la salinidad. Esto indica que la influencia del mar a través de esta boca es menor que a través de la boca Cancún en el norte. A continuación describimos la forma en que la dinámica del intercambio de salinidad ocurre en la laguna y que puede ser aplicado para efectuar un balance del contenido de sal en el sistema (Dyer, 1977). La ecuación de conservación de salinidad puede ser escrita en la forma

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = K_s \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad (4.1)$$

donde S es la salinidad en ups, (u, v, w) son las componentes del vector velocidad $\mathbf{v} = (u, v, w)$ y K_s es el coeficiente de difusión turbulento de salinidad. Considerando que los flujos en el sistema lagunar son predominantemente en la horizontal la ecuación 4.1. puede simplificarse a

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = K_s \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

Si además consideramos que la difusión es pequeña, lo cual es cierto en condiciones de poca turbulencia, el balance de salinidad se reduce a una compensación del término de variación temporal y los términos advectivos horizontales.

$$\frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial uS}{\partial x} - \frac{\partial vS}{\partial y} \quad (4.3)$$

Las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 pueden ser fácilmente resueltas en forma numérica. Por ejemplo, la evolución de la salinidad puede ser modelada en forma barotrópica en dos dimensiones. Las velocidades (u, v) en la ecuación 4.2 o 4.3 pueden ser obtenidas de un modelo bidimensional y entonces calcular la evolución de la salinidad. En el caso del complejo lagunar de Nichupte-Bojórquez, la distribución de salinidades observadas en las diferentes campañas de medición deben ser predominantemente explicadas por la ecuación 4.3, donde el transporte advectivo de salinidad en todo el sistema lagunar debe estar dominado por la circulación inducida por el viento. Únicamente en las cercanías de las bocas o del abanico de influencia de mareas, donde existe un proceso oscilatorio, la componente difusiva, el término de la derecha en la ecuación 4.2, debe ser importante.

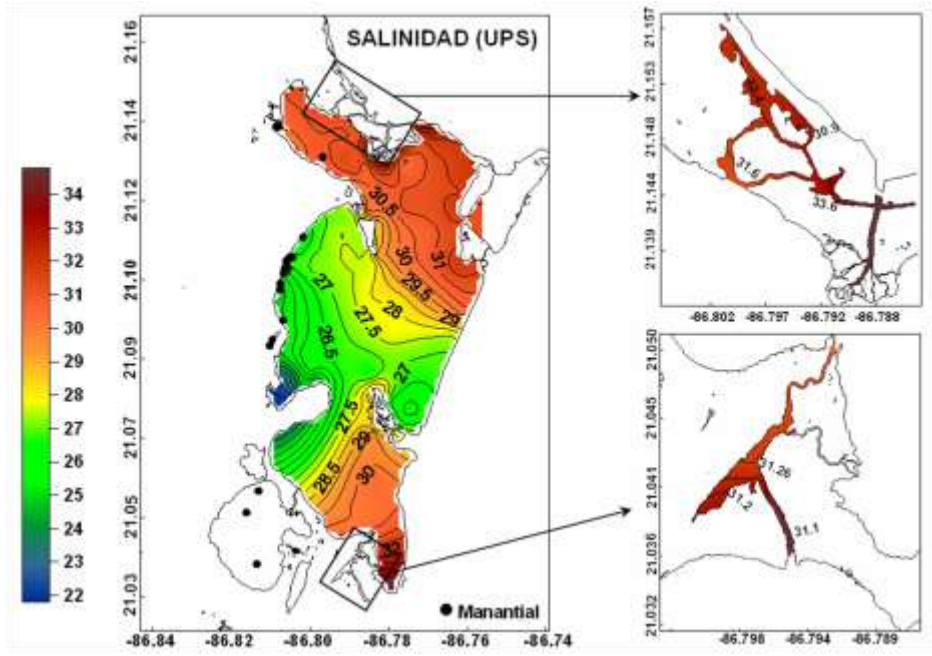


Figura 4.3 a Salinidad en Septiembre de 2005.

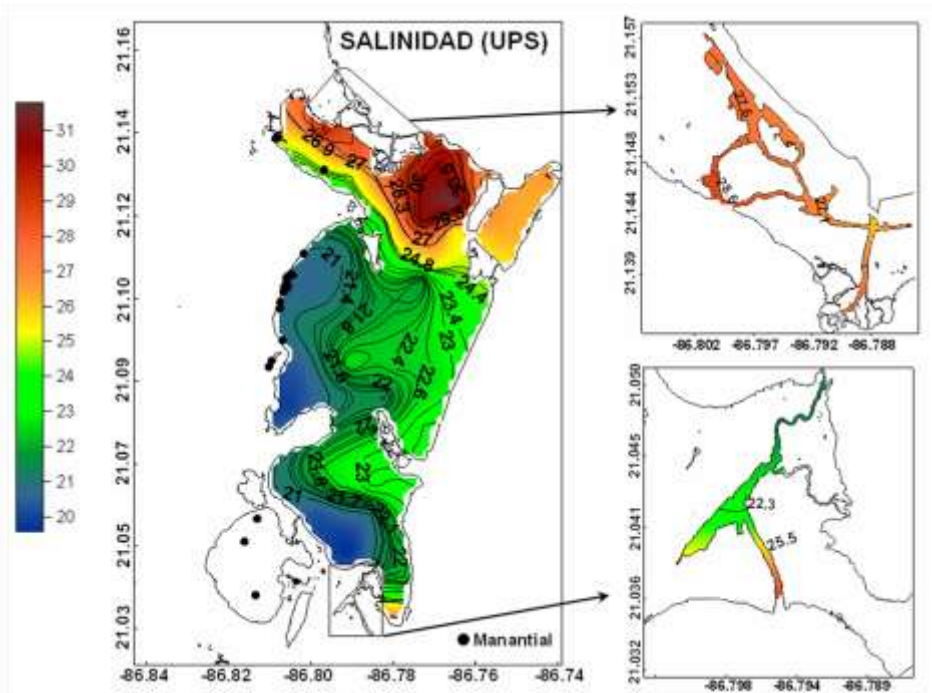


Figura 4.3 b Salinidad en Noviembre de 2006.

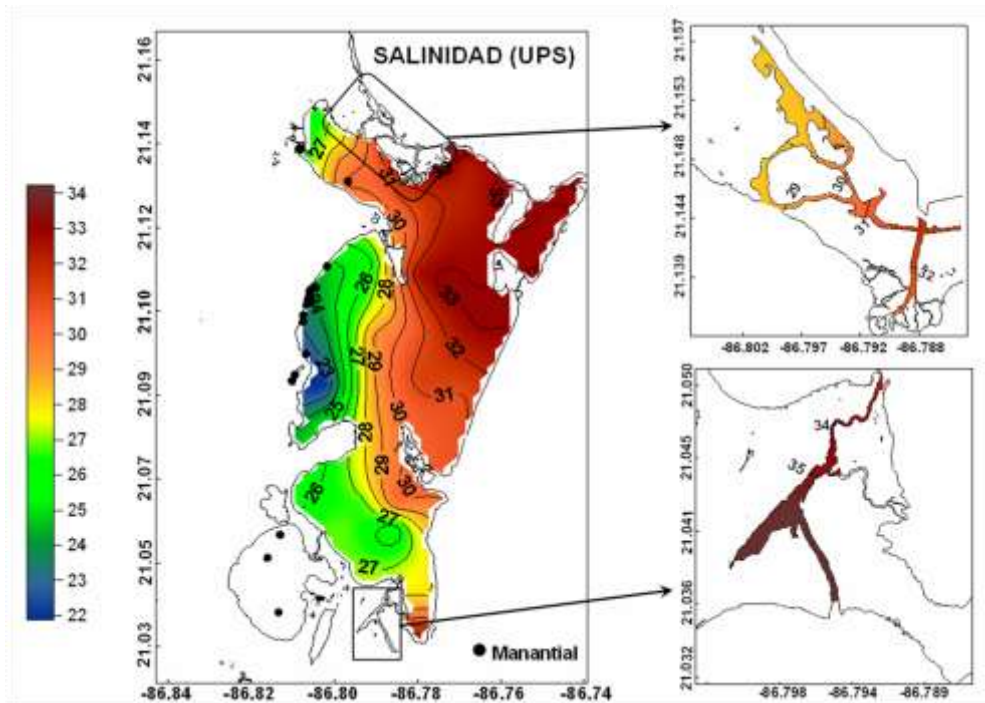


Figura 4.3 c Salinidad en Marzo de 2007.

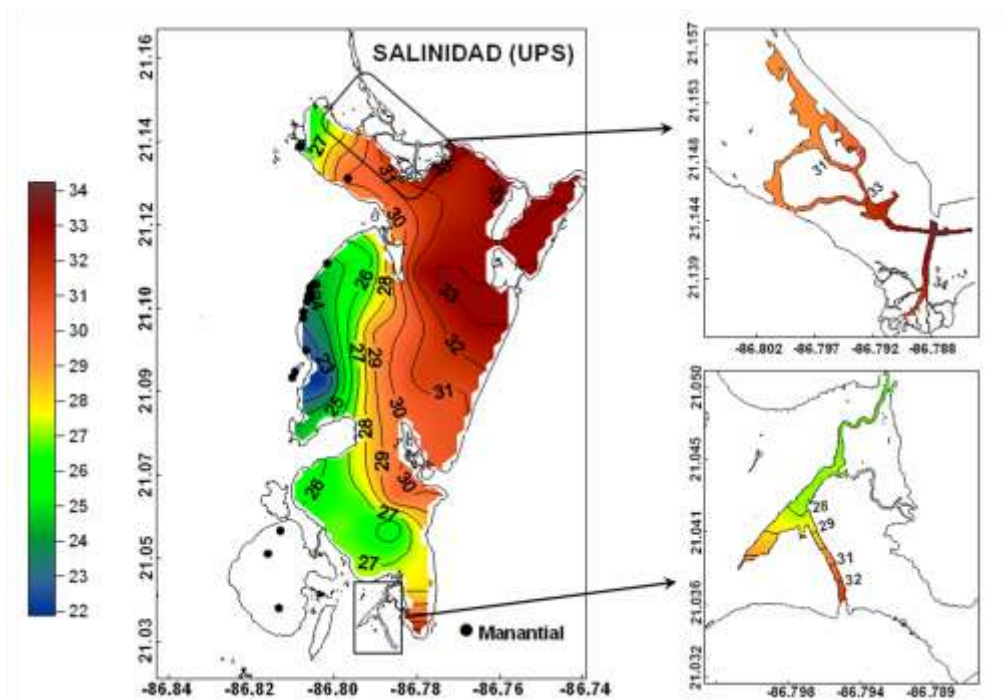


Figura 4.3 d Salinidad en Julio-Agosto de 2007.

Temperatura

Las mediciones hidrográficas en las 50 estaciones se efectuaron en el lapso de una semana en las diferentes campañas de medición. Sin embargo, por razones de la entrada de frentes fríos y tormentas, con los fuertes vientos asociados, la navegación en la zona marítima de Cancún, tanto en mar abierto como en el interior del complejo lagunar estuvo cerrada en algunas ocasiones. Estos vientos extremos ocasionan en la zona de la plataforma continental aledaña a Cancún surgencias de agua relativamente fría. Este fenómeno se ve reflejado en las zonas relativamente frías que se observan en la serie de gráficas mostradas en la Figura 4.4 a, c, d (Septiembre de 2005, Marzo de 2007, Julio-Agosto de 2007). En los casos de Marzo de 2007 (Figura 4.4c y Noviembre de 2006 (figura 4.4b), las mediciones hidrográficas se efectuaron en estas zonas después del paso de un frente frío. Este análisis indica que el paso de frentes fríos puede tener una influencia importante en la temperatura de algunas áreas del complejo lagunar que interaccionan con el mar abierto. En general, En la parte central y norte del complejo lagunar, la temperatura del agua es más alta en el lado oeste, en las cuatro campañas varió entre 25.5 y 32.0 °C. En algunos casos se forman algunos lentes de agua más caliente en diferentes zonas del complejo lagunar, esto es debido a que estos lentes quedan entre agua fría que surge en los manantiales y agua relativamente fría que entra por las bocas. Este es el caso en Septiembre de 2005 (Figura 4.4a) en donde se observa un lente de agua más caliente al sur de la laguna Bojórquez y en Julio-Agosto de 2007 (Figura 4.4d) en donde se identificó un lente de agua caliente en la parte oeste del cuerpo central de Nichupté. Las áreas de agua fría se encuentran normalmente en las inmediaciones de los canales que conducen a las

bocas Cancún en el norte, Punta Nizuc en el sur y en la zona donde se encuentran los manantiales de agua subterránea. En general, debido a la radiación solar y a lo somero de los cuerpos de agua, la temperatura en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez es siempre más alta que en el adyacente Mar Caribe. Estas altas temperaturas son, sin embargo, modificadas constantemente por dos procesos: por agua fría proveniente de los manantiales subterráneos y por el agua del Mar Caribe enfriada por la mezcla vertical y por surgencias asociadas al paso de frentes fríos o vientos dominantes de mesoscala. De las distribuciones de salinidad y temperatura se deduce que la densidad del agua, la cual puede ser calculada teniendo los valores de temperatura, salinidad y profundidad aplicando la ecuación de la UNESCO, debe ser bastante variable en el sistema. En términos generales, concluimos que los valores de temperatura y salinidad y de aquí la densidad deben variar estacionalmente y las influencias dominantes son la entrada de salinidad por las bocas Cancún y Punta Nizuc y la entrada de agua subterránea fría por los manantiales. En época de lluvia la descarga desde los manantiales debe incrementarse y por ende hay más inyección de agua baja en salinidad y temperatura.

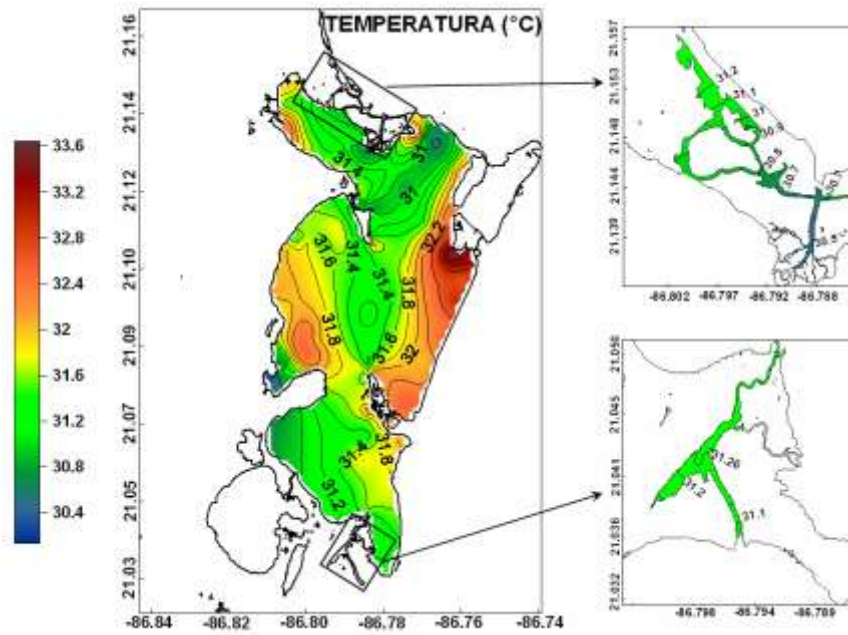


Figura 4.4 c Temperatura en Septiembre de 2005. Distribución basada en 145 estaciones hidrográficas.

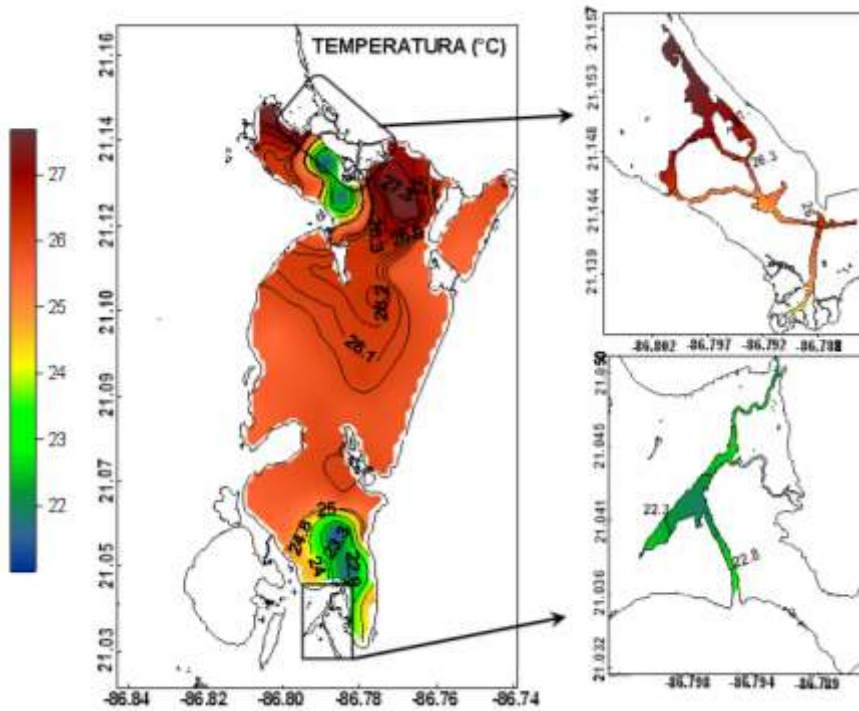


Figura 4.4 d Temperatura en Noviembre de 2006.

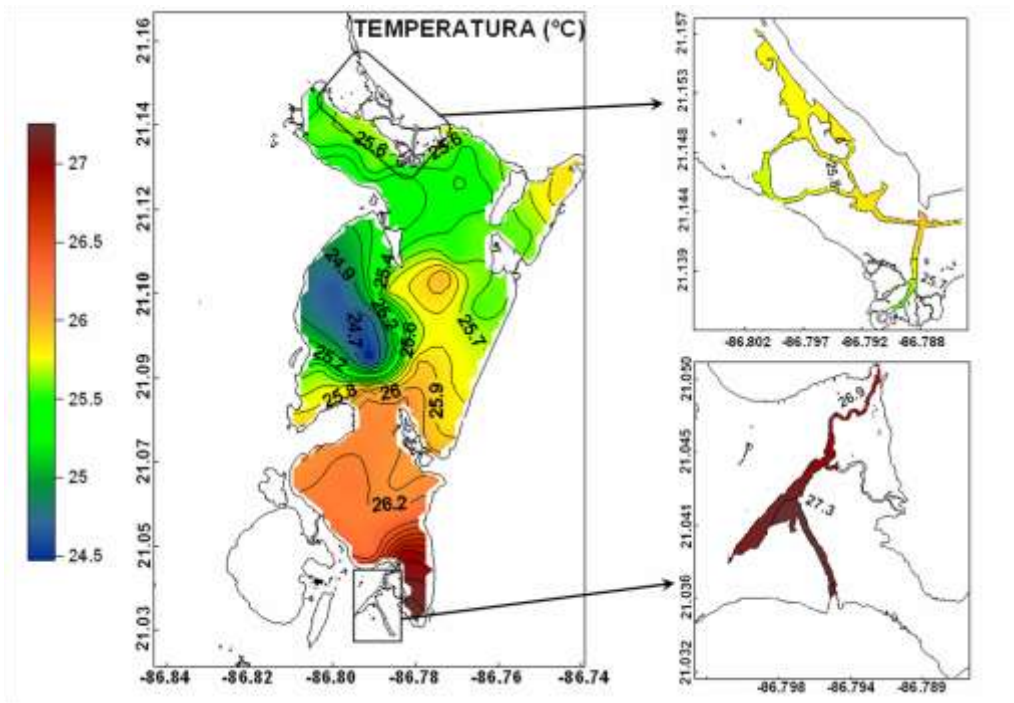


Figura 4.4 e Temperatura en Marzo de 2007.

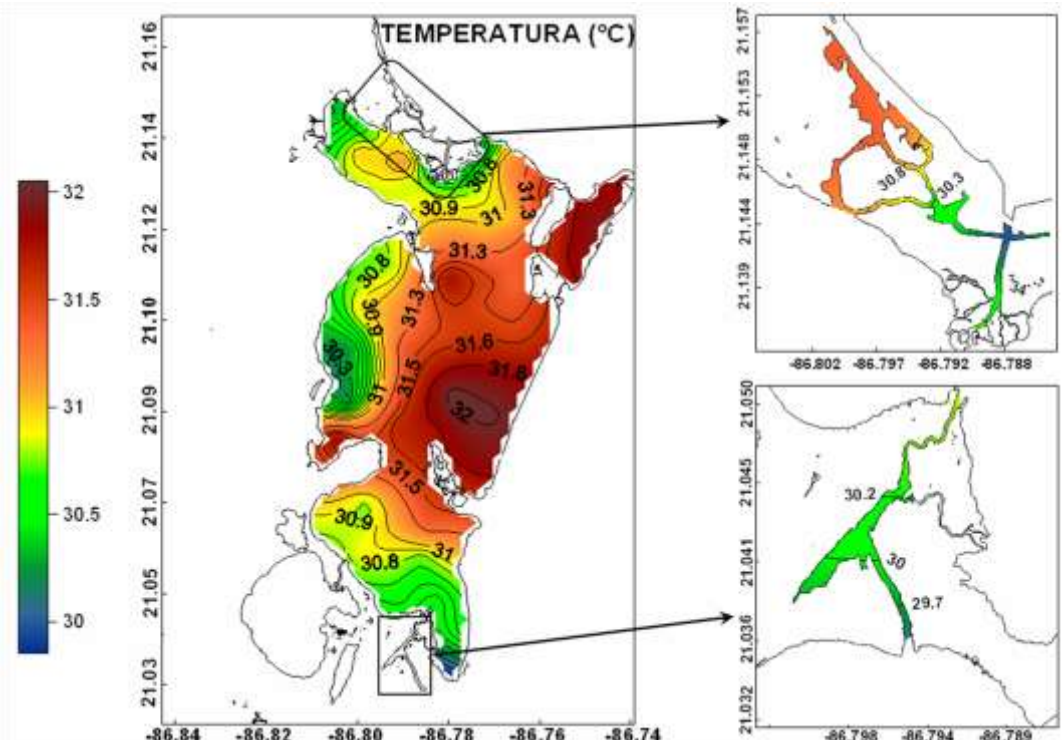


Figura 4.4 f Temperatura en Julio-Agosto de 2007.

Oxígeno disuelto

El oxígeno que se encuentra en la atmósfera se disuelve en las aguas superficiales, o se genera mediante la fotosíntesis de los organismos presentes en el cuerpo de agua. Al aumentar la profundidad, la concentración de oxígeno disuelto se reduce debido a la respiración de los diferentes organismos aerobios. También es disminuido por la descomposición microbiana del detritus orgánico proveniente del mangle, por acciones de origen antropogénico y al fenómeno de absorción. La vida y el crecimiento de todos los organismos aerobios del medio marino dependen de la disponibilidad de oxígeno molecular, al igual que la mayoría de sus actividades metabólicas. Adicionalmente, la mayoría de los contaminantes utilizan el oxígeno libre en reacciones químicas de oxidación, lo que reduce el oxígeno disuelto de manera significativa. (Casanova y Betancourt, 2000). En relación a nuestra región de estudio, se debe mencionar que para mejorar la calidad del agua en la laguna Bojórquez ha habido varios intentos de oxigenarla mediante dispositivos que hacen fluir el agua en cascada, o bien metodologías de aparamiento de diferente desarrollo tecnológico (ver foto 12 en la Evaluación Fotográfica No 1).

La medición de oxígeno disuelto se llevó a cabo mediante un medidor portátil e impermeable de oxígeno disuelto modelo HI 9142 marca Hanna, con compensación automática de temperatura. Se calibró todos los días con una solución oxígeno cero HI 7040. Posteriormente, se calibró el sensor al aire manteniéndolo 1 cm arriba de una superficie de agua limpia al valor correspondiente de acuerdo con la elevación sobre el nivel del mar del sitio (100% para la zona de estudio ya que se encuentra al nivel del

mar). La sonda se sumergía para tomar la lectura y en todo momento se esperó el tiempo necesario para alcanzar un equilibrio térmico entre la sonda y el punto a medir.

Como se puede observar en la serie de graficas mostradas en la Figura 4.5 a, b y c, la concentración de oxígeno disuelto en el sistema lagunar tiene una gran variabilidad. En Noviembre de 2006, el oxígeno disuelto en casi toda la laguna alcanza valores semejantes o típicos del mar abierto (11-12 mg/L) en la parte central y sur del complejo lagunar. Valores un poco más bajos se encuentran en la parte norte. Los valores de oxígeno disuelto más bajos se localizaron en un área adjunta a la barra donde se encuentra la zona hotelera y en la parte noroeste de la laguna donde hay gran influencia de la ciudad de Cancún. Los valores mínimos de oxígeno disuelto pueden ser asociados a materia orgánica en descomposición. En Julio-Agosto de 2007, las concentraciones de oxígeno disuelto tuvieron valores muy bajos en todo el sistema lagunar. Esto quiere decir que el consumo de oxígeno por las especies marinas es más grande o que la acción de los vientos en aumentar la concentración ha sido menos efectiva en estos meses. De hecho observando la Figura 3.9, se puede ver que Julio es el mes en que menos eventos de fuerte intensidad del viento ocurrieron en el año 2004. Por supuesto, con esto no queremos generalizar a todos los meses de Julio, pero si queremos hacer énfasis en que puede haber periodos de tiempo en el verano con poca intensidad de vientos, que puede conducir a la disminución de la concentración de oxígeno. Finalmente, es conveniente mencionar que en la zona aledaña a los manantiales de agua, la concentración de oxígeno disuelto en el agua

fue menor. Esto es debido a la influencia de agua subterránea con valores bajos en concentración de oxígeno.

En la siguiente tabla se muestra las equivalencias del Oxígeno Disuelto (OD) de ppm (mg/L) a ml/L, esto es condiciones ideales.

Tabla 4

Concentración en mg/L de OD	Concentración en ml/L OD
1	0.7
2	1.4
3	2.1
4	2.8
5	3.5
6	4.2
7	4.9
8	5.6
9	6.3
10	7
11	7.7
12	8.4
13	9.1
14	9.8

Tabla de relación de concentraciones para el Oxígeno Disuelto

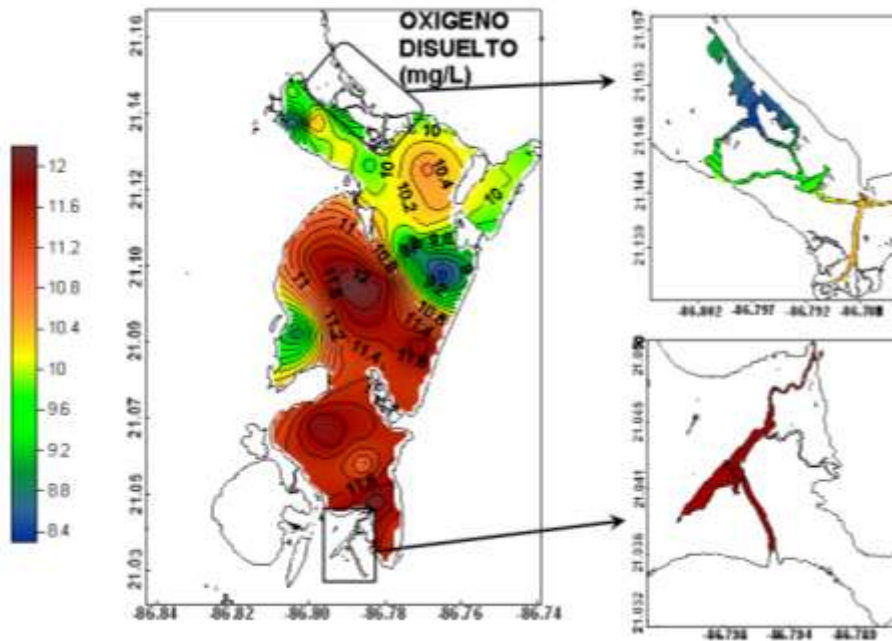


Figura 4.5 a Oxígeno disuelto en Noviembre de 2006.

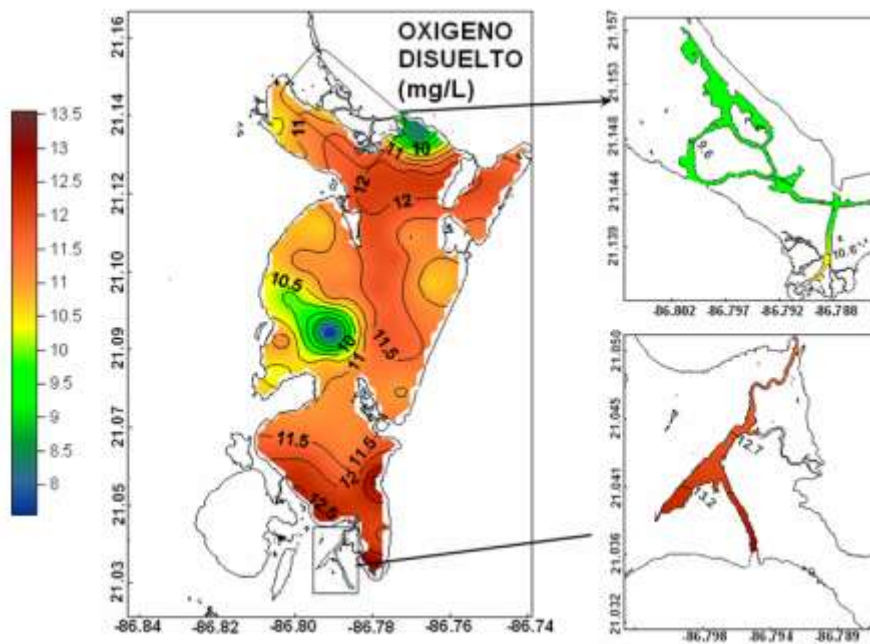


Figura 4.5 b Oxígeno disuelto en Marzo de 2007.

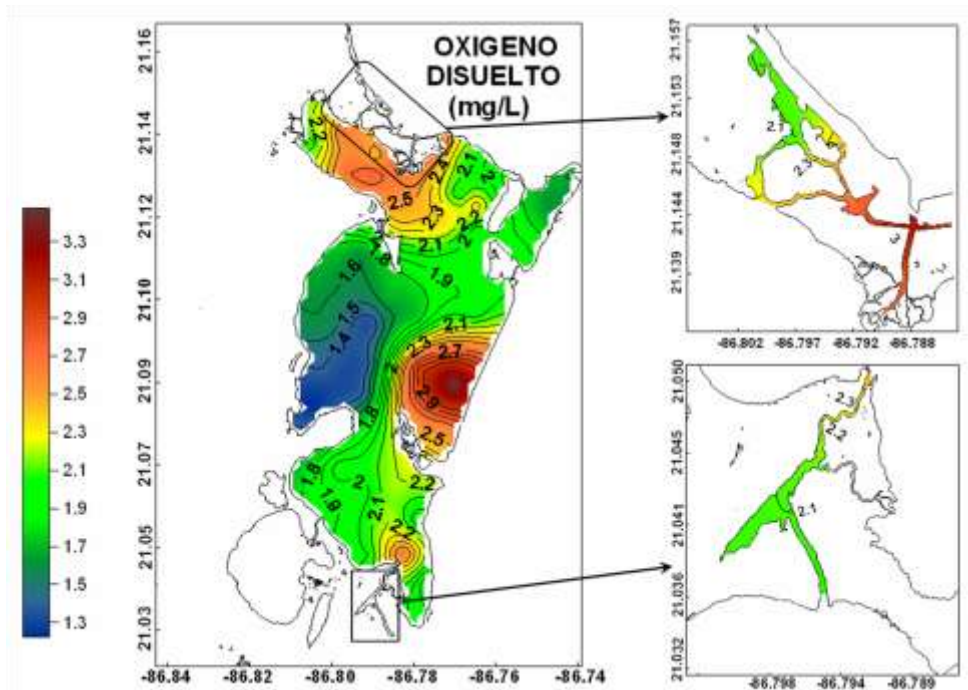


Figura 4.5 c Oxígeno disuelto en Julio-Agosto de 2007.

pH

El pH de una solución es el negativo del logaritmo de la actividad del ión hidrógeno en moles por litro. Como causas naturales que afectan el valor del pH encontramos en primer lugar el anhídrido carbónico disuelto procedente de la atmósfera, así como también por la respiración y fotosíntesis de los organismos acuáticos. Otro factor es la contaminación industrial. El pH del agua puede variar como consecuencia de desechos vertidos por industrias (Catalan, 1981). En este trabajo de investigación, la determinación del pH se efectuó "in situ", ya que la muestra de agua puede sufrir variaciones con el tiempo, siendo algunas de las causas: presencia de una sobre saturación de anhídrido carbónico como consecuencia de la respiración de las plantas presentes en el agua, influencia del anhídrido carbónico de la atmósfera, reacciones

químicas en el seno del agua, etc. El equipo utilizado para este propósito fue un aparato digital portátil modelo HI 9813, marca Hanna, medidor de pH/EC/STD. El cual tiene una precisión de ± 0.1 con lo que respecta al pH. Este equipo se calibró todos los días siguiendo la técnica de calibración en dos puntos conocidos. Para ello se utilizaron soluciones buffer de 7.0 y 10.0 unidades de pH. La sonda se introdujo en el punto de muestreo y se anotaba el resultado en el momento en el cual la lectura se estabilizaba. En general, se puede afirmar de acuerdo a los valores de pH mostrados en la Figura 4.6 a, b y c que el sistema lagunar es alcalino. Los valores del centro y sur del sistema son similares a los presentes en sistemas marinos. Los valores de pH un poco más bajos encontrados en la parte norte del sistema lagunar pueden ser asociados a aportes de aguas residuales, ya sean procedentes de la ciudad de Cancún en la parte noroeste o bien por la zona hotelera en el lado noreste. Los valores mínimos del pH en el lado oeste del cuerpo de agua central en todas las gráficas mostradas en la Figura 4.6 (a, b, c) reflejan la influencia de las aguas subterráneas, pues como se verá en el siguiente capítulo, estas aguas parecen haber sido mezcladas en el subsuelo, no sólo con agua de mar, sino también con aguas residuales de la ciudad de Cancún y cuyo efecto es la reducción del pH.

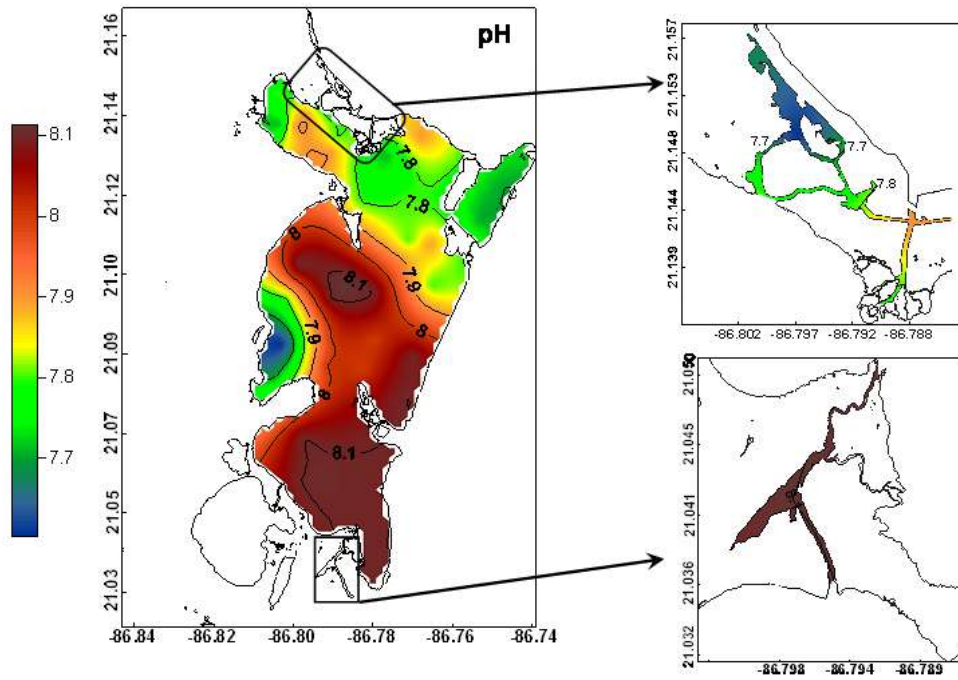


Figura 4.6 a pH en Noviembre de 2006.

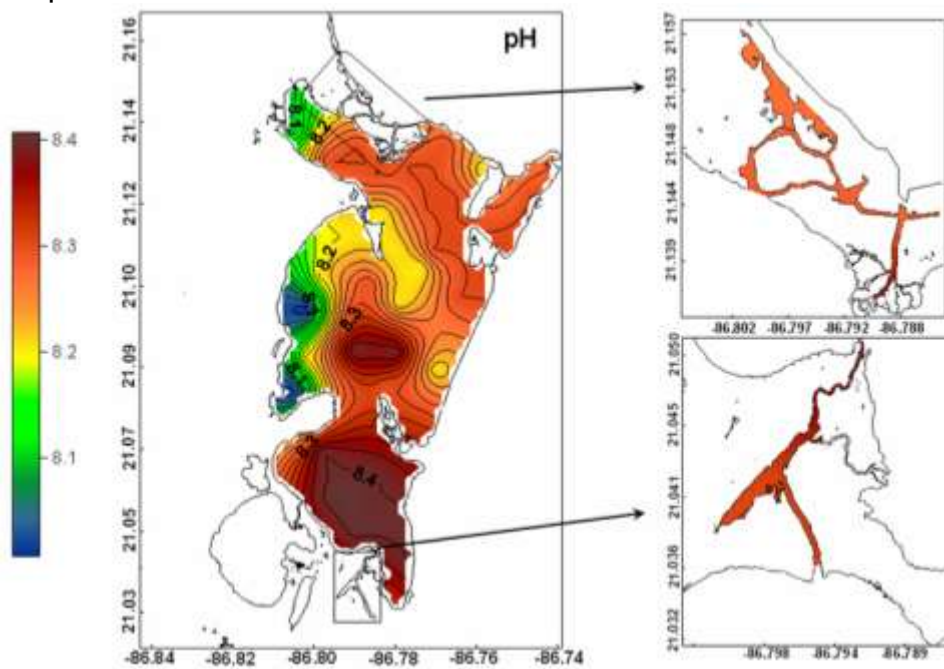


Figura 4.6 b pH en Marzo de 2007.

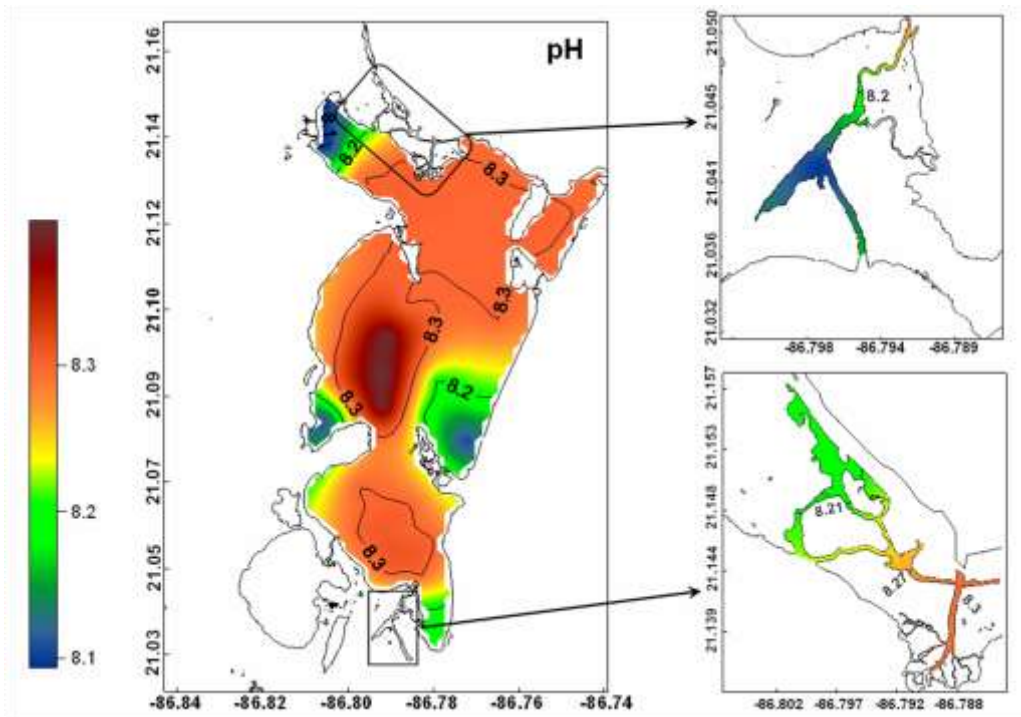


Figura 4.6 c pH en Julio-Agosto de 2007.

Turbidez

La claridad de un cuerpo de agua natural es la mayor determinante de la condición y productividad de ese sistema (Standard Methods, 1992). La turbidez en el agua es causada por sólidos no disueltos y suspendidos. El lodo, arcilla, algas, microorganismos y descarga de efluentes también pueden causar turbidez. Puede decirse que la turbidez es una medida burda de la calidad del agua. Es un fenómeno óptico producido por estas partículas y consiste esencialmente en una absorción de la luz que ilumina un cierto volumen de agua, combinada con su difusión (Catalan, 1981). La turbidez puede también estar íntimamente relacionada a fenómenos atmosféricos de fuerte viento que pueden generar el levantamiento, entrapamiento y resuspensión de sedimentos y sustancias orgánicas e inorgánicas. La turbidez se midió in situ para evitar que las partículas se sedimenten en el recipiente. Para la determinación de este

parámetro se utilizó un colorímetro marca Smart2 aceptado por la EPA (Environmental Protection Agency, USA). Para eliminar interferencias en la lectura, el aparato se llevó a cero con una muestra de agua tridestilada (sin sólidos suspendidos) y después se procedió a llenar una nueva celda con agua del punto de muestreo y se registró la lectura. En la Figura 4.7 (a, b, c) se observa que en la zona central y sur tienen altos valores de turbidez. Para explicar estos altos valores se debe considerar que la acción del viento sobre el fondo marino, y de este modo generar un proceso de resuspensión, es más fácil en áreas muy someras. Los valores observados son el resultado de intensos vientos, la presencia de material detritus en el fondo marino en la cercanía de los manglares y pastos marinos y lo somero de las zonas centrales del complejo lagunar. En las zonas más profundas, por lo general la turbidez es menor. En la Figura 4.7a, se puede observar que en la zona norte, los valores de turbidez son relativamente bajos, con excepción de áreas aledañas a la laguna Bojórquez y en la parte oeste de este cuerpo de agua, donde los valores de turbidez se incrementan marcadamente. Todo parece indicar por nuestras mediciones que esto se debe a que en la laguna Bojórquez y en la parte oeste existen flujos de aguas residuales, con la presencia de sustancias que incrementan la turbidez.

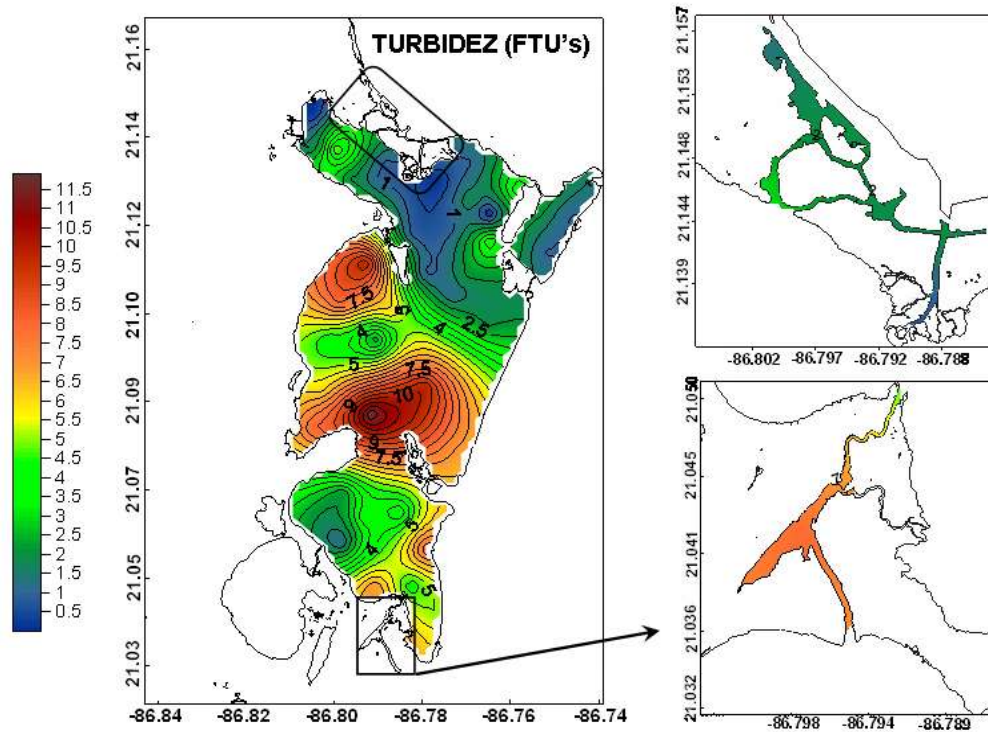


Figura 4.7 a Turbidez en Noviembre de 2006.

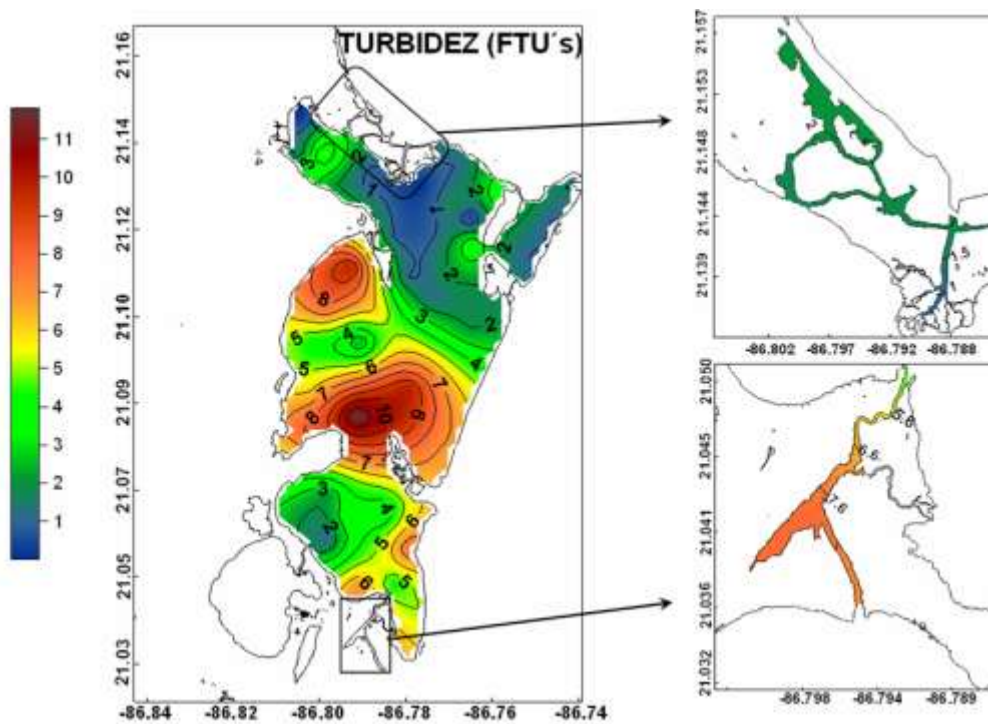


Figura 4.7 b Turbidez en Marzo de 2007.

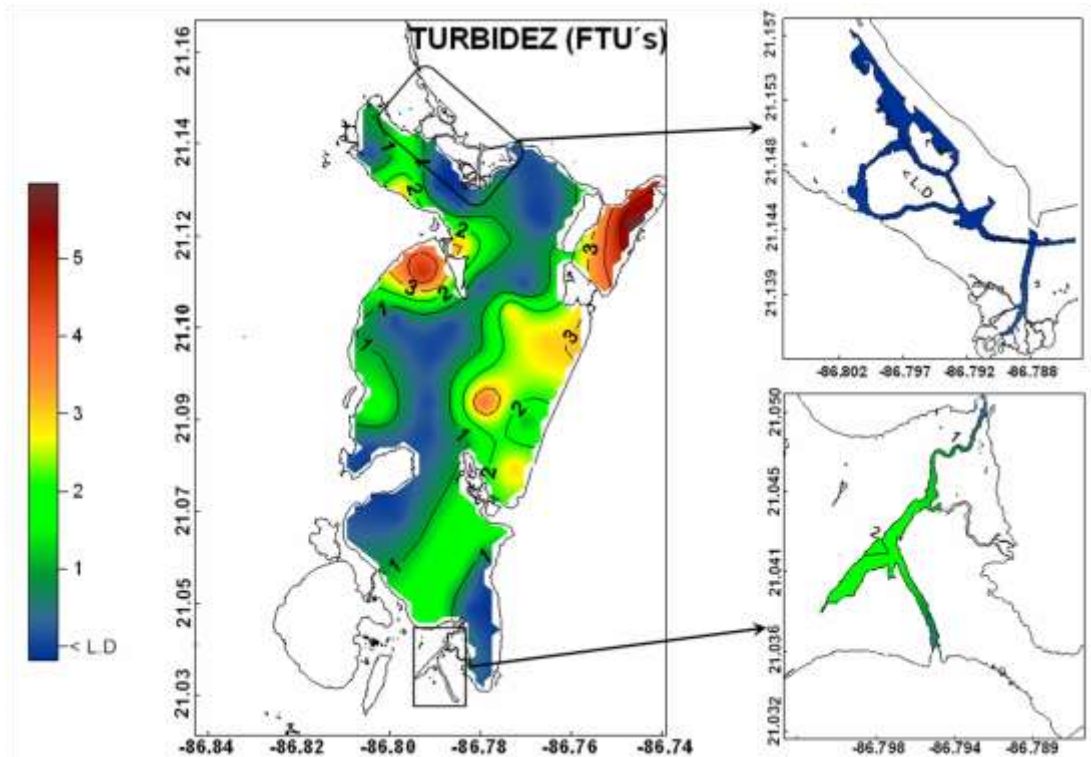


Figura 4.7 c Turbidez en Julio-Agosto de 2007.

Manantiales

Durante el trabajo de medición de la batimetría a detalle, se identificaron diferentes manantiales en el sistema lagunar. En la figura 4.8 se marcan claramente las posiciones de estas fuentes de agua. De las mediciones que se describen en los capítulos posteriores se ha encontrado que los manantiales 1, 2 y 3 afectan considerablemente al sistema lagunar. Los manantiales del 4 al 20 afectan significativamente la distribución de salinidad. Para dar una idea de la dimensión de los manantiales, se muestra en la Figura 4.9 una fotografía del manantial 1.

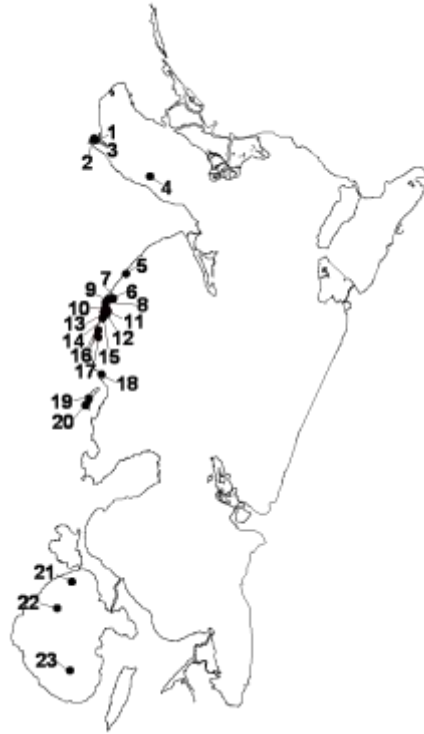


Figura 4.8 Posición de los manantiales de agua en el sistema lagunar.



Figura 4.9 Manantial de agua 1, ubicado al noroeste de Nichupté.

Con el fin de demostrar como se puede determinar el flujo proveniente de un manantial se muestra en la Figura 4.10, la distribución de los vectores velocidad alrededor de un manantial. Las líneas verdes indican la magnitud del vector velocidad, la línea azul la trayectoria seguida por la lancha para efectuar las mediciones. El método que se aplica es el teorema de la divergencia de Gauss.

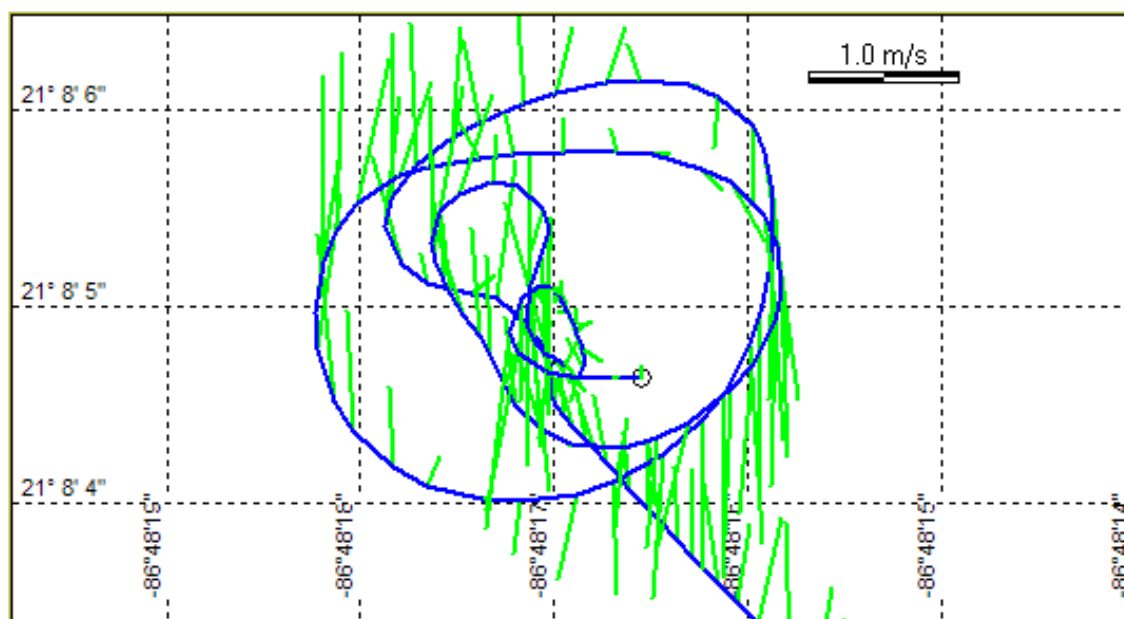


Figura 4.10 Mediciones de velocidad alrededor de un manantial.

Referencias

Casanova, R. & J. Betancourt. Análisis de algunas características fisicoquímicas registradas en las aguas estuarias de la Ensenada de Tumaco. Anuario científico CCCP. Pag. 12 – 21, 2000.

Catalan J. Química del agua. Segunda edición. Fuenlabrada., Madrid. España, 1981.

Dyer K. R. Estuaries: A Physical Introduction. John Wilwe & Sons. 140 pp.

Merino M., S. Czitrom, E. Jordan, E. Martin, P. Thomé and O. Moreno, 1990.
Hydrology and Rain Flushing of the Nichupté Lagoon System, Cancún, Mexico.
Estuarine Coastal and Shelf Sciences, 30, 223-237.

Standard Methods for the examination of water and wastewater, 18 th edition.
American Public Health Assoc., Washington. D.C, 1992.

CAPITULO 5

Nutrientes y contaminantes

El problema de la contaminación de los mares y en especial de las zonas costeras está estrechamente correlacionado con la actividad antropogénica. Gran parte de los asentamientos humanos se ubican en áreas costeras con cuerpos de agua como lagunas costeras, bahías y golfos, en los cuales hay muy frecuentemente descargas de ríos. Se estima que alrededor del 70- 75 % de la contaminación global marina es producto de las actividades humanas que tienen lugar en la superficie terrestre debido a las descargas de ríos y otros escurrimientos, alcanzando un 90 % la contribución de contaminantes a los mares por este mecanismo. Teniendo en consideración que entre un 70 % y 80 % de la población se ubica en las costas o cerca de ellas y que especialmente en zonas urbanas es donde una parte importante de los desechos que allí se producen se deposita directamente al océano, las probabilidades de que estos cuerpos de agua se deterioren es grande. Como consecuencia muchos ecosistemas críticos, algunos en el mundo, tales como bosques de manglar, arrecifes coralinos, lagunas costeras y otros lugares de interfase entre la tierra y el mar, han sido alterados mas allá de su capacidad de recuperación (Escobar, 2002). Con el fin de ilustrar la problemática de los nutrientes y contaminantes, se presenta la Tabla 5.1, hecha por Escobar (2002), en la cual se describen muy claramente aspectos de los nutrientes, contaminantes y sus fuentes. Este trabajo de investigación fue llevado a cabo por especialistas en hidrodinámica, por lo que para la descripción de nutrientes,

contaminantes y metales pesados nos hemos basado en literatura científica sobre el tema sin profundizar sobre ello, pero si con la intención de dar a conocer los valores observados y relacionarlos con los procesos hidrodinámicos del complejo lagunar.

Tabla 5.1. Contaminantes, procesos y fuentes que afectan la calidad del agua (tomada de Escobar, 2002).

Contaminantes y Procesos	Descripción	Fuentes
Contaminantes orgánicos	Se descomponen en el agua y disminuyen el Oxígeno Disuelto, induciendo la eutrofización.	Fuentes industriales, domesticas, asentamientos humanos.
Nutrientes	Incluyen principalmente fosfatos y nitratos, su incremento en el agua induce a una eutrofización. Se originan de desechos humanos y animales, detergentes y escorrentía de fertilizantes agrícolas.	Fuentes industriales, domesticas, escorrentía agrícola.
Metales Pesados	Se originan principalmente alrededor de centro industriales y mineros. También pueden provenir de actividades militares o a través de lixiviados.	Fuentes industriales, mineras, domesticas, asentamientos humanos, actividades militares.
Contaminación Microbiológica	Desechos domésticos no tratados, criadero de animales. (E. Coli, protistos, amebas, etc.)	Fuentes municipales.
Compuestos Tóxicos Orgánicos	Químicos industriales, Dioxinas, plásticos, pesticidas agrícolas, hidrocarburos de petróleo, compuestos orgánicos persistentes (POP) como químicos disruptores endocrinos.	Fuentes industriales, domesticas, escorrentía agrícola.
Químicos Traza y compuestos farmacéuticos	Desechos hospitalarios, son sustancias peligrosas no removidas necesariamente por los tratamientos convencionales y han sido reconocidos como disruptores endocrinos y carcinogénicos.	Industria química y farmacéutica.
Partículas suspendidas	Pueden ser orgánicas e inorgánicas y se originan principalmente de prácticas agrícolas y del cambio en el uso de la tierra, como la deforestación, conversión de pendientes en pastizales originando erosión.	Fuentes industriales, domesticas, asentamientos humanos, y cambios en el uso de la tierra.
Desechos nucleares	Incluye una amplia gama de radio núcleos utilizados en fines pacíficos.	Plantas nucleares, fallout radioactivo, ensayos nucleares, desechos hospitalarios.
Salinización	Se produce por la presencia de sales en los suelos, y drenajes inadecuados. También ocurre por afloramiento de agua proveniente de zonas altas, donde se riega (lavado de sales).	Presencia de sales en los suelos, la que aflora por carecer de un buen drenaje, irrigación con agua salobre, agua de yacimientos secundarios de petróleo.

Acidificación	Está relacionada con un bajo pH del agua dado por la deposición sulfúrica producida por la actividad industrial y por las emisiones urbanas.	Fuentes industriales y municipales.
---------------	--	-------------------------------------

Nitratos (NO_3^-), Nitritos (NO_2^-), Amonio (NH_4^+)

El Nitrógeno (N) es la sustancia común a nutrientes como el nitrito, nitrato y amonio. Se le considera como parte esencial para la vida por estar presente de manera fundamental en el ADN, ARN y en las proteínas. El nitrógeno se encuentra en la atmósfera en forma molecular como N_2 , siendo bastante estable por lo que es prácticamente un gas inerte. Aún así, siendo esencial para la vida, los organismos necesitan del nitrógeno, por lo que es importante describir la manera en que se obtiene como nutriente. Para que el nitrógeno pueda ser consumido como nutriente, debe ser convertido a formas químicas más accesibles. Algunas formas son el nitrato, amonio, urea, nitrito, etc. Es conveniente mencionar que debido a su naturaleza estable a veces hay poca disponibilidad del nitrógeno en los ecosistemas, habiendo consecuentemente una limitación de producción de biomasa. El nitrógeno que es consumido por plantas y organismos proviene predominantemente de la atmósfera, por lo que es necesario explicar los mecanismos en que el nitrógeno es fijado para su consumo, es decir, que interacción ocurre entre la atmósfera, biosfera y geosfera. En este sentido, los procesos principales que componen el ciclo del nitrógeno son: la fijación del nitrógeno, la toma de nitrógeno por organismos y plantas, la mineralización del nitrógeno (desintegración), la nitrificación y la denitrificación (Harrison, 1993) Finalmente, es importante señalar que en los procesos de transformación del nitrógeno, los microorganismos son esenciales. El ciclo de

nitrógeno que a continuación se describe está basado en el trabajo de Harrison (1993).

La Fijación del Nitrógeno

La fijación del nitrógeno es un proceso químico en el cual el N_2 se convierte en amonio. Este proceso de fijación es fundamental por ser el mecanismo por el cual los organismos (bacterias, Rhizobium) obtienen el nitrógeno de la atmósfera a través de su metabolismo. Existen al igual bacterias que fijan el nitrógeno, sin plantas anfitrionas. Éstas son conocidas como fijadores de nitrógeno libre sin límites. En ambientes acuáticos, las algas azules verdosas (a través de una bacteria llamada cianobacteria) es una importante fijadora de nitrógeno libre sin límites. Existen otros fenómenos naturales de alta energía que pueden contribuir a la fijación de nitrógeno en cantidades relativamente importantes.

La toma del Nitrógeno

Una vez que el nitrógeno que fija la cianobacteria se convierte en amonio, pasa, por lo general, inmediatamente a formar parte de proteínas y otros compuestos orgánicos con átomos de nitrógeno en sus moléculas. Este proceso es llevado a cabo por las plantas, por la bacteria misma o por organismos localizados en el suelo. Se puede afirmar que los seres vivos en lo más alto de la cadena alimenticia cuando comen o se nutren, en realidad están consumiendo el nitrógeno que fue fijado por bacterias en el primer proceso de toma de nitrógeno de la atmósfera.

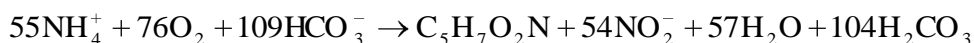
La Mineralización del Nitrógeno

Después de que el nitrógeno se incorpora en la materia orgánica, frecuentemente se vuelve a convertir en nitrógeno inorgánico a través de un proceso llamado mineralización del nitrógeno, también conocido como desintegración. Cuando los organismos mueren, las materias de descomposición consumen la materia orgánica y llevan al proceso de descomposición. Durante este proceso, una cantidad significativa del nitrógeno contenido dentro del organismo muerto se convierte en amonio. Una vez que el nitrógeno está en forma de amonio, está también disponible para ser usado por las plantas o para transformaciones posteriores en nitrato (NO_3^-) a través del proceso llamado nitrificación.

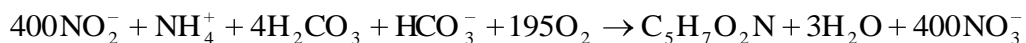
Nitrificación

Para que se produzca la nitrificación es necesaria la actuación de las bacterias Nitrosomas y Nitrobáct. Los Nitrosomas oxidan el amoníaco en nitrito (producto intermedio), mientras que los Nitrobáct transforman el nitrito en nitrato. De forma aproximada estas son las reacciones que tienen lugar:

Para los Nitrosomas, la ecuación es la siguiente:



Mientras que para los Nitrobáct, la ecuación es:

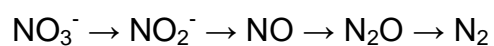


Las bacterias nitrificantes son muy sensibles a gran cantidad de sustancias inhibidoras, que pueden llegar a impedir el crecimiento y su actividad. Pueden resultar inhibidoras altas concentraciones de amoníaco y de ácido nitroso, siendo también importante el efecto del pH.

Para que se produzca la nitrificación, es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto (OD) por encima de 1 mg/l. Si el nivel de OD es inferior a este valor, el oxígeno se convierte en el nutriente limitante del proceso. Por consiguiente, la nitrificación puede suceder solamente en ambientes ricos de oxígeno, como las aguas que circulan o que fluyen y las capas de la superficie de los suelos y sedimentos.

La Desnitrificación

La desnitrificación es un proceso que realizan ciertas bacterias durante la respiración usando el nitrato como aceptor de electrones en condiciones anóxicas (ausencia de oxígeno). El proceso de reducción de nitratos hasta nitrógeno gas ocurre en etapas seriales, catalizadas por sistemas enzimáticos diferentes, apareciendo como productos intermedios nitritos, óxido nítrico y óxido nitroso:



La desnitrificación requiere un sustrato oxidable ya sea orgánico o inorgánico que actúe como fuente de energía, por lo que la desnitrificación puede llevarse a cabo tanto por bacterias heterótrofas como autótrofas. En la desnitrificación heterótrofa, un sustrato orgánico, como metanol, etanol, ácido acético, glucosa, etc. actúa como fuente de energía (donador de electrones) y fuente de carbono. En la desnitrificación

autótrofa, la fuente de energía es inorgánica, como hidrógeno o compuestos reducidos de azufre: sulfhídrico (H_2S) o tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), la fuente de carbono, también inorgánica, es el CO_2 . Una vez que se convierte en N_2 , el nitrógeno tiene pocas posibilidades de reconvertirse en una forma biológica disponible, ya que es un gas y se pierde rápidamente en la atmósfera. La desnitrificación es la única transformación del nitrógeno que remueve el nitrógeno del ecosistema (que es esencialmente irreversible), y aproximadamente balancea la cantidad de nitrógeno fijado por los fijadores de nitrógeno descritos con anterioridad.

Fosfatos

El fósforo se encuentra en el mar como ión fosfato, concretamente bajo la forma de ortofosfato cálcico. Su presencia es importante porque es un elemento imprescindible en la síntesis de materia orgánica en el mar y es muy utilizado por el fitoplancton (plancton vegetal). Este mismo hecho de la utilización de los fosfatos por el fitoplancton durante los procesos de fotosíntesis, hace que su concentración en el mar sea muy variable y dependa de las fluctuaciones de población fitoplanctónica y, por lo tanto, de la profundidad. En la descomposición bacteriana de los cadáveres, el fósforo se libera en forma de ortofosfatos (PO_4H_2) que pueden ser utilizados directamente por los vegetales verdes, formando fosfato orgánico (biomasa vegetal). A su vez, los vegetales son consumidos en los diversos niveles tróficos animales herbívoros, formando biomasa animal que a su vez es utilizada por los animales carnívoros. Cuando los seres vivos mueren, o a partir de sus excretas, los restos son

mineralizados por las bacterias dando lugar a ortofosfato y a fosfato orgánico, soluble o disuelto, que puede ser reutilizado por los vegetales cerrando la cadena.

En los depósitos sedimentarios, el fósforo se encuentra como apatitas con un grado mucho mayor de substitución y menor grado de cristalización, características que hacen más fácil el procesamiento industrial. Este tipo de fosfatos se conoce como fosforitas. La mayoría de la producción mundial (80 %) y de las reservas de roca fosfórica (70%) son de origen sedimentario. En esta descripción sobre el fosfato, nos hemos basado en el trabajo de Ferrer.

Surfactante

Generalmente se designa con este término a los compuestos con actividad interfacial. Químicamente los surfactantes se caracterizan por tener una estructura molecular, la cual contiene un grupo que posee muy poca atracción por el solvente. A este grupo se le conoce como liofóbico, donde a su vez dicho grupo está unido a otro llamado liofílico el cual tiene una gran atracción por el solvente. Si el solvente es agua estos grupos se conocen como porción hidrofóbica e hidrofílica donde generalmente el grupo hidrofóbico es una cadena de carbonos lineales o ramificados y la porción hidrofílica tiene carácter polar (Rivas, 1999). Una de las principales características de los surfactantes es adsorberse en interfases, justo en la frontera entre dos fases inmiscibles (o que no se puedan mezclar, como ejemplo el agua y el aceite). Un ejemplo muy palpable sería el detergente, donde el grupo hidrofílico se atrae fuertemente al agua, mientras que el grupo lipofílico se uniría a la parte más

desagradable del uso del detergente que es la suciedad. Y esta es una forma de contaminación del medio acuático ya que generalmente existen descargas de aguas residuales de uso doméstico hacia los cuerpos de agua, y estos al desembocar en alguna laguna u océano propician la contaminación del agua.

Clasificación de surfactantes

La siguiente clasificación fue tomada de Kirt (1997) y Spitz (1997).

Agentes aniónicos

Los surfactantes aniónicos contienen generalmente uno de cuatro grupos polares solubles - carboxilato, sulfonato, sulfato o fosfato - combinado con una cadena hidrocarbonada hidrófoba. Si esa cadena es corta son muy hidrosolubles. En caso contrario tendrán baja hidrosolubilidad y actuarán en sistemas no acuosos como aceites lubricantes.

Agentes catiónicos

Los surfactantes catiónicos comúnmente utilizados en detergentes, agentes limpiadores, líquidos lavaplatos y cosméticos están compuestos por una molécula lipofílica y otra hidrofílica, consistente de uno o varios grupos de amonios terciarios o cuaternarios. Las sales de cadenas larga de amonios terciarias, obtenidas por neutralización de las aminas con ácidos orgánicos o inorgánicos, son raramente usadas en detergentes y preparaciones para limpieza.

Agentes no iónicos

En contraste a sus contrapartes iónicas, los surfactantes no iónicos no se disocian en iones hidratados en medios acuosos. Las propiedades hidrofílicas son provistas por hidratación de grupos amida, amino, éter o hidroxilo. Cuando existe un número suficiente de estos grupos la solubilidad acuosa es comparable con la de los surfactantes iónicos.

Descripción de resultados

En esta sección procedemos a describir los resultados de las diferentes campañas de medición. La idea de tener mediciones en todos los cuerpos de agua importantes del sistema lagunar de Nichupte-Bojórquez es localizar las áreas conflictivas por su grado de contaminación. Como una medida para determinar el estado de contaminación, se efectuaron mediciones de las sustancias químicas más representativas que dan una idea del estado de deterioro de los cuerpos de agua. Las sustancias que se midieron fueron: nitritos, nitratos, amonio, surfactantes y fosfato. El complejo lagunar tiene una fuerte presión por el gran número de hoteles ubicados principalmente en la barra localizada al lado Este, pero también en lado occidental por la ciudad de Cancún y algunas zonas que fueron usadas como basureros. En un informe pasado ya se hacía notar que las concentraciones de los contaminantes eran claramente más altas en las áreas de la laguna aledañas a los hoteles. Adicionalmente, en el lado occidental se encontraron altos valores de algunas sustancias, debido también a la presencia de lugares donde hay descargas de lodos provenientes de aguas residuales. Con el fin de

monitorear las distribuciones de las sustancias antes mencionadas a diferentes tiempos, se efectuaron campañas de medición en distintas épocas del año.

Metodología

A continuación se describe la metodología seguida en el proceso de determinación de las concentraciones. En lo que se refiere a las precauciones tomadas antes, durante y después de la colecta de las muestras debe considerarse la calidad de los datos de muestreo del agua recolectada. Esto depende en gran medida de la toma correcta de las muestras. En este proceso, se tomaron precauciones de limpieza y de condiciones naturales para evitar algún tipo de contaminación. Para cumplir con el objetivo descrito anteriormente, se seleccionaron recipientes apropiados, los cuales fueron de polietileno de 125 ml con tapa y contratapa para el análisis de nitrato, nitrito, amonio, fosfato y surfactantes. Los botes se compraron y fueron lavados en el laboratorio con una solución de ácido nítrico al 10% y agua tridestilada. Como la turbidez en la muestra puede interferir en la determinación analítica, se tuvieron que eliminar los solutos presentes (partículas en suspensión, bacterias, etc) mediante un proceso de filtración, el cual consistió en hacer pasar el agua por una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45 μ micras. Inmediatamente después de que se tomó la muestra, se almacenó en una hielera donde se mantuvo a una temperatura de 4°C hasta su análisis, el cual se llevó a cabo el mismo día en que se tomó la muestra.

Mediciones en laboratorio

Análisis colorimétrico

La mayoría de las sustancias en el agua son incoloras y no detectables por el ojo humano. Para determinar su presencia se debe encontrar una forma de “verlos”. Un colorímetro puede usarse para medir y determinar cualquier sustancia que sea de por si coloreada o que puede reaccionar para dar color. Una definición simple de colorimetría es “la medición del color” y un método colorimétrico es “cualquier técnica usada para evaluar un color desconocido con referencia a un color conocido”. En un ensayo colorimétrico químico la intensidad del color producido por la reacción debe ser proporcional a la concentración de la sustancia analizada.

Debido a que entre una de las ventajas que existen al usar un colorímetro de campo es la obtención rápida de resultados. Se optó por realizar los análisis de nitrato, nitrito, amonio, fosfato y surfactantes con un colorímetro marca Smart 2. Para obtener los mejores resultados posibles, un blanco de reactivo fue determinado para cuantificar cualquier contribución al resultado del análisis por el sistema de reactivos. Para determinar un blanco de reactivo, se siguió la metodología de análisis completa y se aplicó utilizando agua tridestilada como agua de muestra. Este resultado es el blanco de reactivo, el cual se sustrae a los test subsiguientes de muestras desconocidas.

Otra medida de control de calidad de datos que se tomó en cuenta fue el análisis de muestras por duplicado así como también la determinación de un blanco para cada día de análisis.

Nitrato

El nitrato es la forma mas oxidada de los compuestos de nitrógeno, esta comúnmente presente en aguas superficiales y subterráneas, debido a que es el producto final de la descomposición aeróbica de materia orgánica nitrogenada. Fuentes significativas de nitrato son fertilizantes y excremento de ganado, así como también aguas residuales de origen doméstico e industrial. La determinación de nitrato ayuda a evaluar el carácter y el grado de oxidación en aguas superficiales. Aguas naturales no contaminadas contienen insignificantes cantidades de nitrato. En agua superficial, el nitrato es un nutriente tomado por las plantas y asimilado en proteína celular. Estimular el crecimiento de las plantas, especialmente de algas, puede cuasar problemas de calidad de agua asociados con eutrofización. La subsiguiente muerte y descomposición de algas produce efectos secundarios en la calidad del agua, los cuales pueden también ser indeseables (Bartram y Ballance, 1996).

La técnica analítica utilizada para la determinación del nitrato es llamada “reducción de zinc” ya que el zinc es usado para reducir nitrato a nitrito. El nitrito que estaba originalmente presente, más el nitrato reducido, reacciona con el ácido cromotrópico para formar un color rojo en proporción a la cantidad de nitrito en la muestra (Smart 2 colorimeter). Puesto que los nitratos están asociados fuertemente a las aguas

residuales urbanas o domésticas, el hecho de que se encuentren muy altos valores en la laguna de Bojórquez al noreste del complejo lagunar, indican la presencia importante de aguas residuales (ver figura 5.1 a, b, c). En la zona ubicada al noroeste los valores son también altos por la influencia de los lodos municipales que son depositados en sus inmediaciones y además se ubican en esa área varios manantiales de agua con apariencia turbia por lo que pudieran provenir de la ciudad de Cancún por flujos subterráneos. Otro resultado importante es que de las Figuras 5.1 a y b, se infiere que la laguna Bojórquez está exportando nitratos hacia Nichupté.

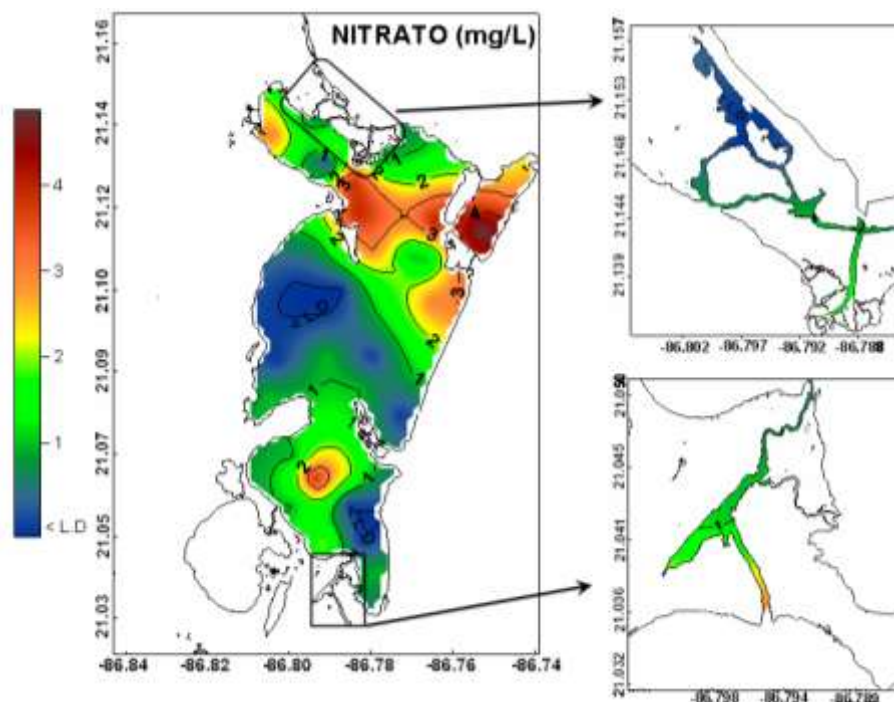


Figura 5.1 a Nitrato en Noviembre de 2006.

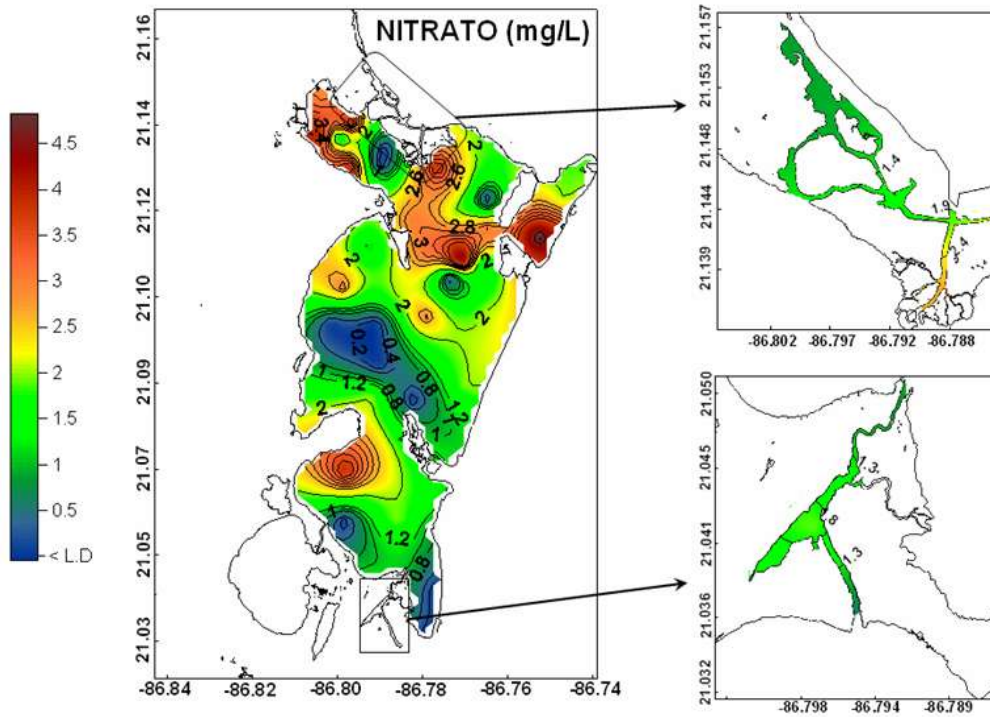


Figura 5.1 b Nitrato en Marzo de 2007.

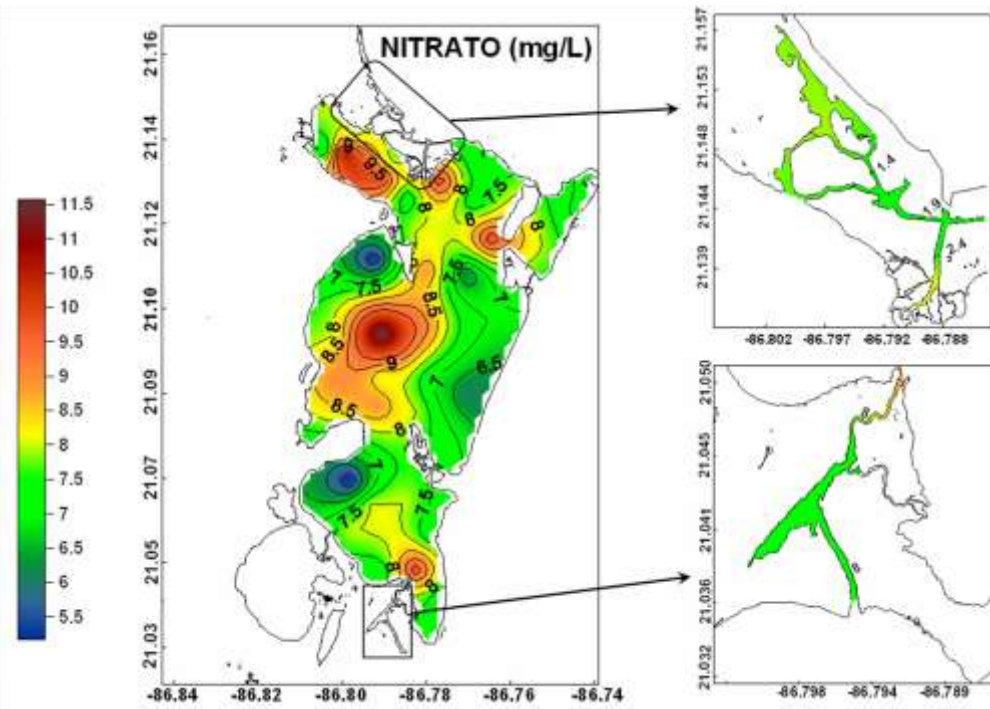


Figura 5.1 c Nitrato en Julio-Agosto de 2007.

Nitrito

El nitrito es un estado inestable intermedio en el ciclo del nitrógeno y se forma en el agua por la oxidación de amonio o por la reducción de nitrato. Por lo tanto, los procesos bioquímicos pueden causar un cambio rápido en la concentración de nitrito en una muestra de agua. En aguas naturales el nitrito está normalmente presente en aguas residuales industriales, en efluentes de aguas residuales tratadas y en agua contaminada (Bartram y Ballance, 1996). Mediante una técnica denominada "Diazotización", el compuesto formado por diazotización de sulfanilamida unido con N-(1-naftil)-etilendiamina produce un color rojo-violeta en proporción a la concentración de nitrato presente (Smart 2 colorimeter). El hecho de que la concentración de nitritos puede cambiar rápidamente se ve reflejado en la serie de gráficas mostradas en la Figura 5.2 a, b, c, d. En general se puede afirmar que los valores de nitrito son bajos en todo el complejo lagunar. Hay valores consistentemente altos en la parte noroeste del sistema que se relacionan a los depósitos de lodos resultantes de aguas residuales de origen municipal y en la parte central de Nichupté, en donde hay varios manantiales de agua que pudieran jugar un papel importante en las concentraciones medidas. Otro origen de nitritos son los aportes provenientes de las zonas hoteleras como se puede observar en la figura 5.2 b y c.

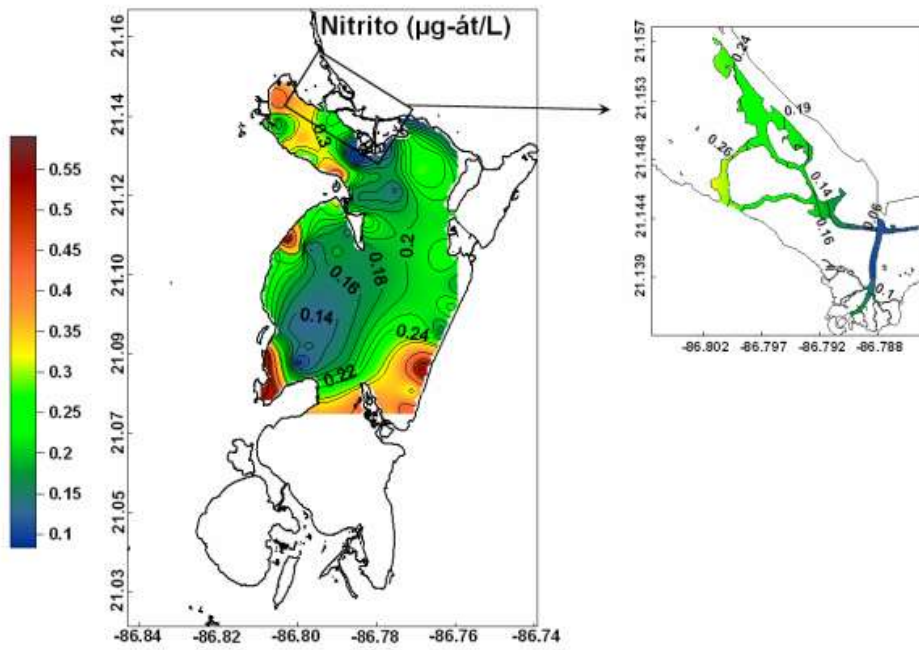


Figura 5.2 a Nitrito en Septiembre de 2005.

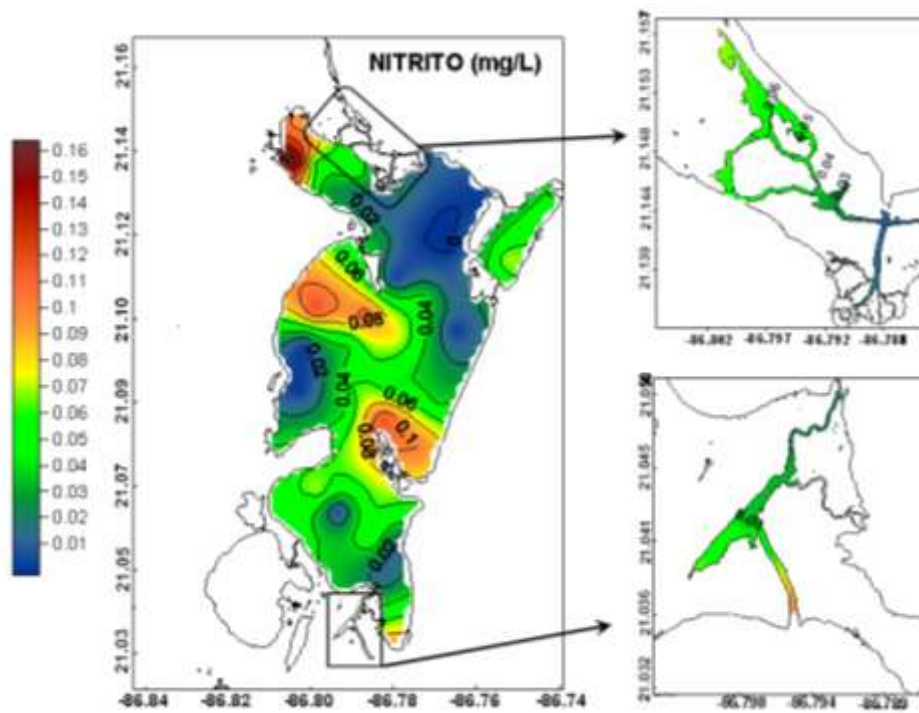


Figura 5.2 b Nitrito en Noviembre de 2006.

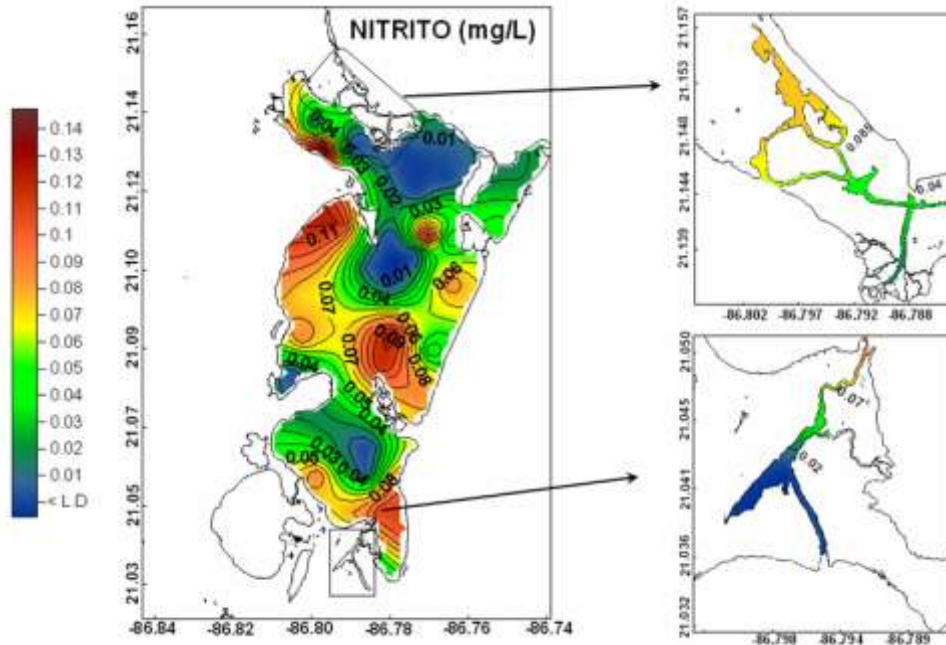


Figura 5.2 c Nitrito en Marzo de 2007.

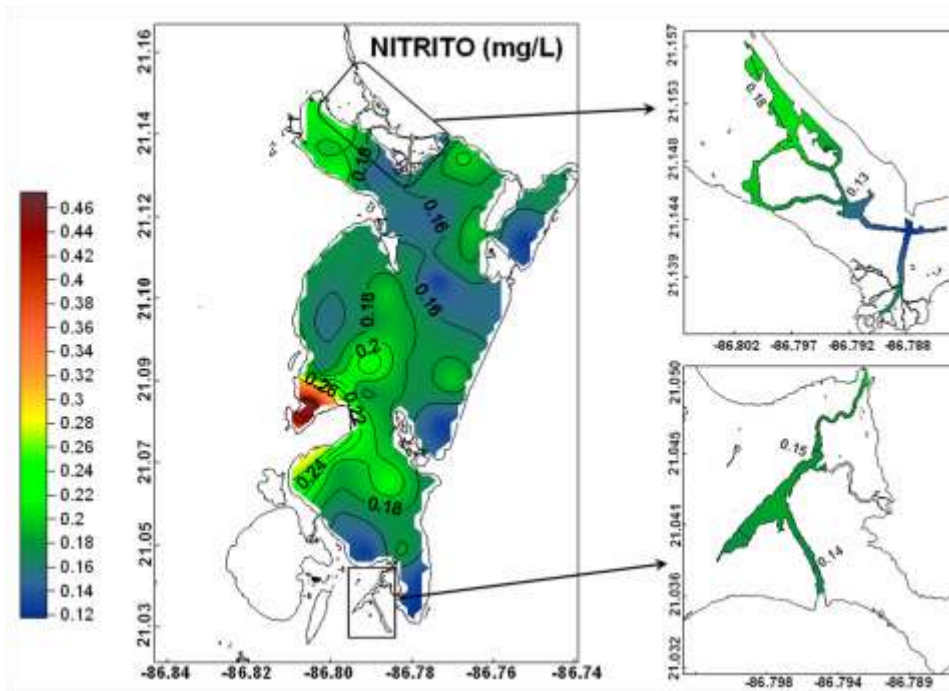


Figura 5.2-d Nitrito en Julio-Agosto de 2007

AMONIO

Cuando la materia orgánica nitrogenada es destruida por la actividad microbológica, el amonio es producido y es por lo tanto encontrado en la mayoría de las aguas superficiales y subterráneas. Altas concentraciones son encontradas en agua contaminada por aguas residuales, fertilizantes, desechos agrícolas o industriales que contienen nitrógeno orgánico. Ciertas bacterias aerobias convierten el amonio en nitritos y entonces en nitratos. Los compuestos de nitrógeno, como nutrientes para los micro-organismos acuáticos, pueden ser parcialmente responsables por la eutrofización de ríos y lagos. El amonio puede resultar de procesos naturales de reducción bajo condiciones anaerobias. Las proporciones de las dos formas de nitrógeno de amonio como amoníaco (NH_3) y ión amonio (NH_4^+) dependen del pH (Bartram y Ballance, 1996).

Ph	6	7	8	9	10	11
% NH_3	0	1	4	25	78	96
% NH_4^+	100	99	96	75	22	

Fuente (Bartram y Ballance, 1996)

Método

La técnica analítica utilizada para la determinación de este parámetro es conocida como "Nesslerización, ya que el amonio forma un complejo coloreado con el reactivo

de Nessler en proporción a la concentración de amonio presente en la muestra. La sal de Rochelle es añadida para prevenir la precipitación de calcio o magnesio en muestras no destiladas (Smart 2 colorimeter).

Puesto que el amonio está íntimamente relacionado a las aguas residuales, confirma lo encontrado ya previamente en otros contaminantes de que los valores más altos son encontrados en la laguna de Bojórquez (Figura 5.3 b, c, d) junto a la zona hotelera y en la parte noroeste donde hay depósitos de lodos de origen municipal (Figura 5.3 a, b, c, d). Este resultado es bastante claro en cuanto a la localización de zonas críticamente contaminadas en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. En todo el sistema lagunar, las concentraciones de amonio son bajas, solamente en las dos regiones los valores son significativamente altos en las cuatro campañas de medición.

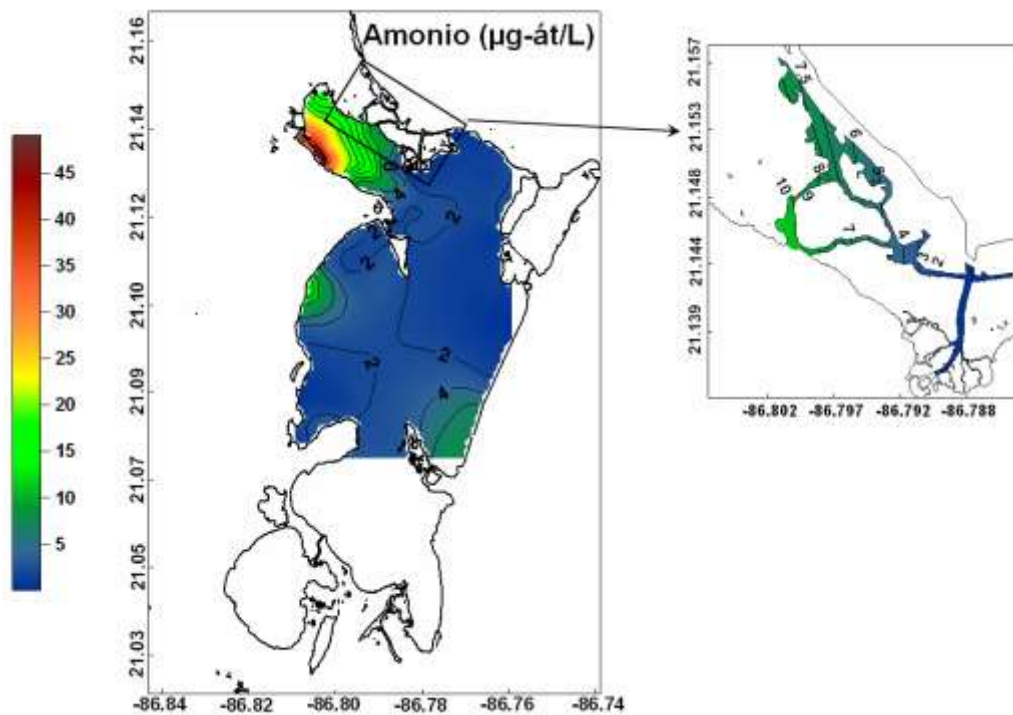


Figura 5.3 a Amonio en Septiembre de 2005.

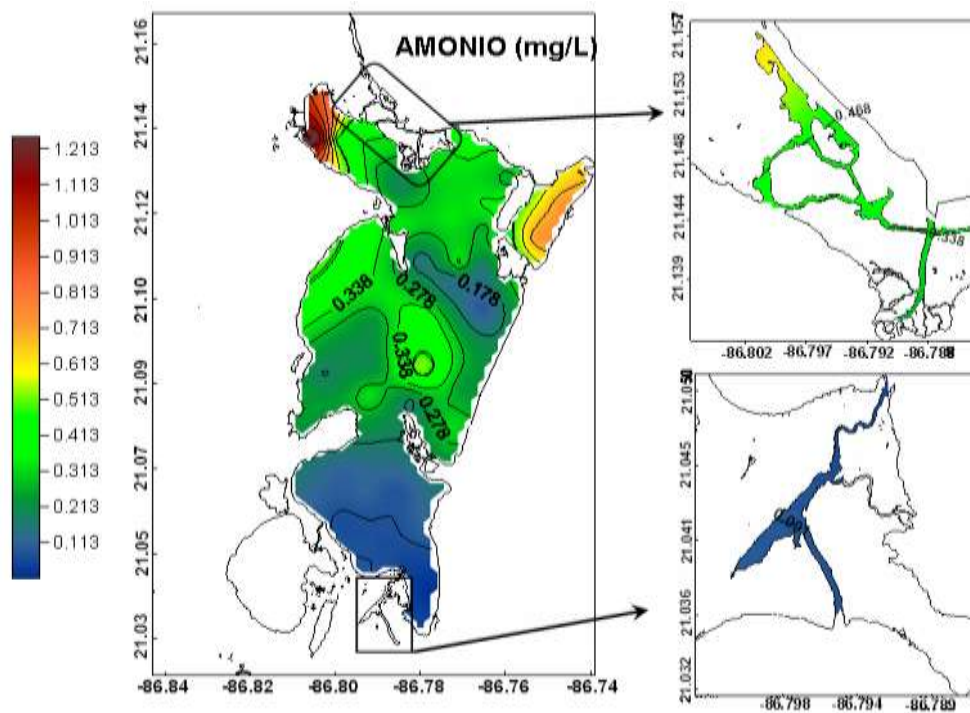


Figura 5.3 b Amonio en Noviembre de 2006.

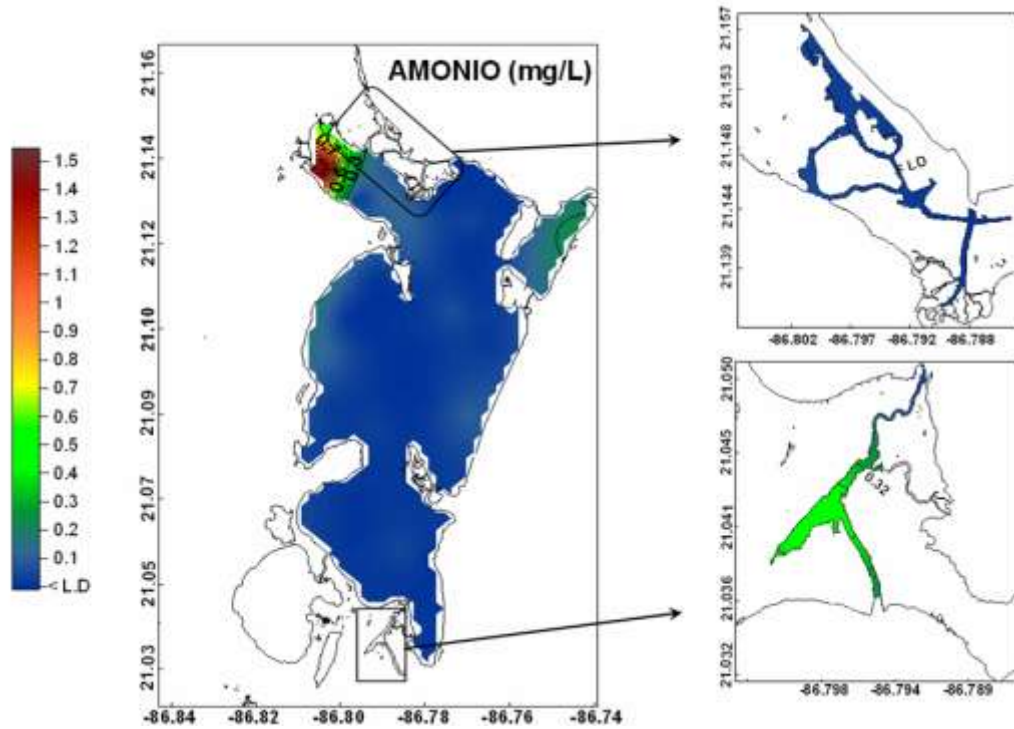


Figura 5.3 c Amonio en Marzo de 2007.

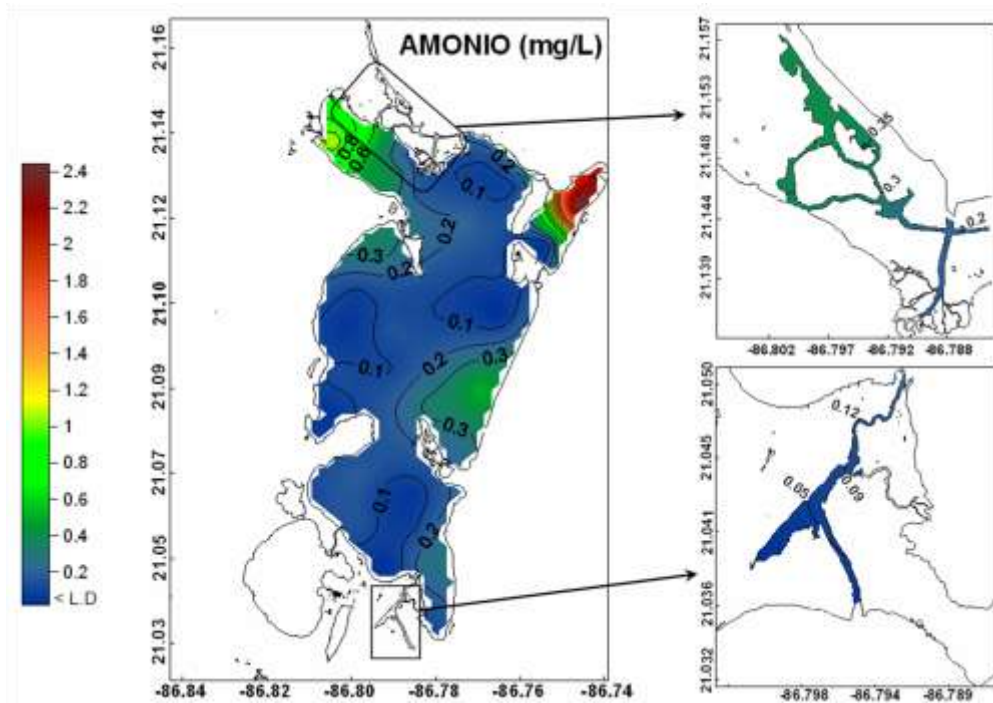


Figura 5.3 d Amonio en Julio-Agosto de 2007.

Fosfato

El fósforo es un importante nutriente para las plantas acuáticas. La concentración encontrada en agua es generalmente no mayor a 0.1 ppm a menos que el agua este contaminada por aguas residuales o por riego excesivo en áreas agrícolas. Cuando el fósforo esta presente por encima de las concentraciones requeridas para el crecimiento normal de las plantas acuáticas, sucede un proceso llamado eutrofización. Esto crea un ambiente favorable para el incremento en la población de algas y maleza (talófitas) (Bartram y Ballance, 1996).

La técnica utilizada fue la del Ácido vanadomolibdofosfórico y el principio es que el ortofosfato reacciona en condiciones ácidas con vanadomolibdato de amonio para dar ácido vanadomolibdofosforico. El color amarillo es proporcional a la concentración de ortofosfato y se lee colorimétricamente (Smart 2 colorimeter). En general, los valores de concentración de fosfatos varían entre .1 y 2.5 mg/L. Los valores de fosfato más altos se encuentran en la zona de la laguna de Bojórquez y en sus inmediaciones. En la Figura 5.4a, se puede observar que la laguna Bojórquez exporta fosfato hacia Nichupté, un aspecto que se ha observado para otras sustancias. Es conveniente mencionar que en la parte mas hacia el noroeste los valores de fosfato alcanzan valores altos, por lo que debe haber allí alguna fuente de fósforo.

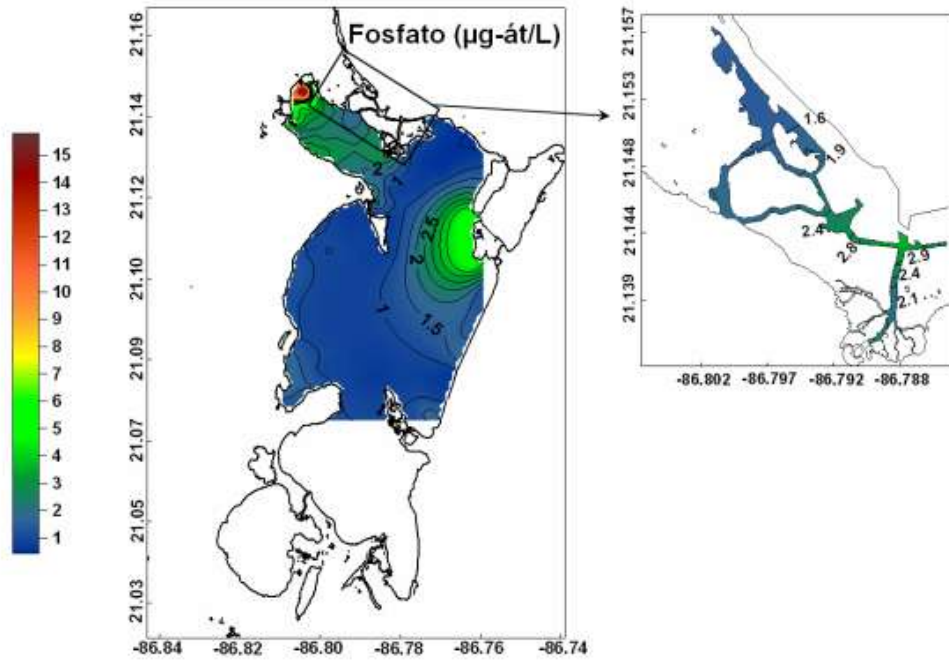


Figura 5.4 a Fosfato en Septiembre de 2005.

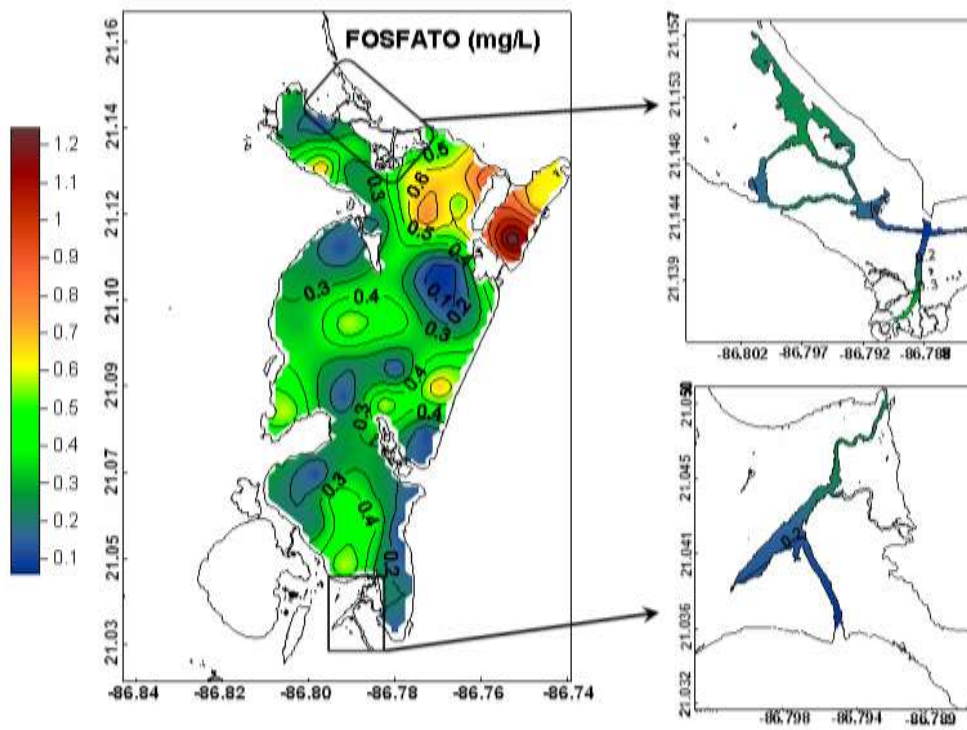


Figura 5.4 b Fosfato en Noviembre de 2006.

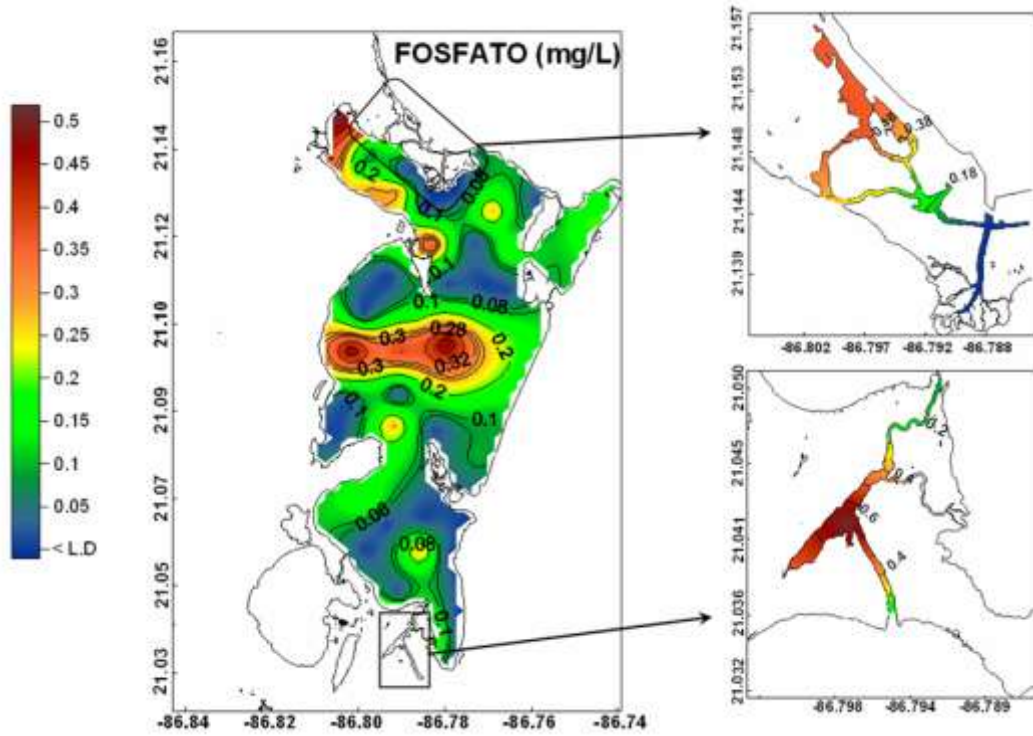


Figura 5.4 c Fosfato en Marzo de 2007.

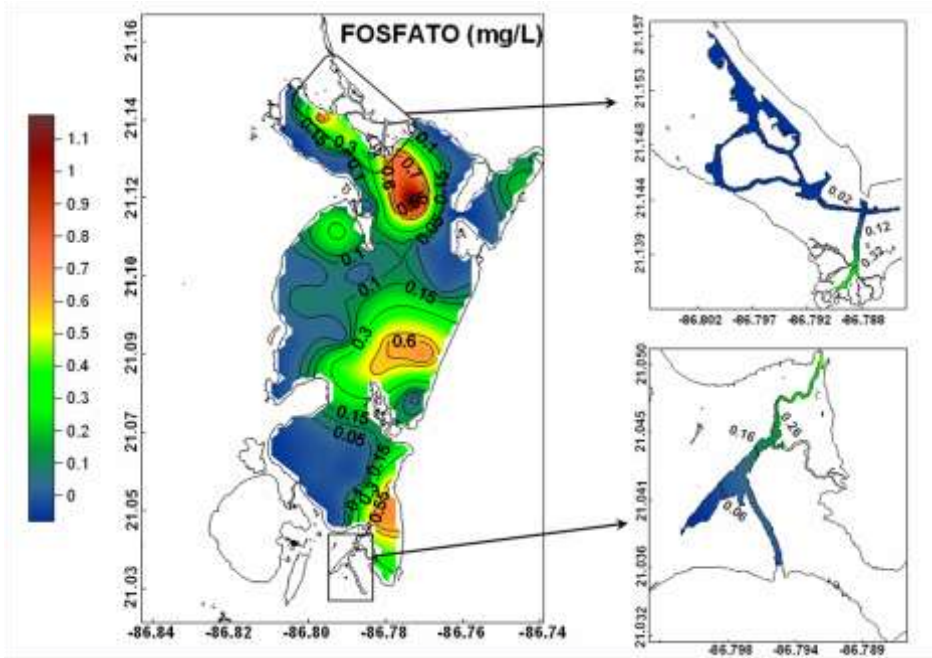


Figura 5.4 d Fosfato en Julio-Agosto de 2007.

Surfactantes

El agua residual de casa e industrial es la principal fuente de surfactantes en el agua. Los surfactantes son encontrados a bajas concentraciones en las aguas naturales excepto si el cuerpo de agua esta cerca de una fuente de contaminación (Bartram y Ballance, 1996). La metodología analítica utilizada es llamada "Extracción de pares de iones indicador azul de bromofenol" debido a que la presencia de LAS (Alquil-benceno-lineal) en muestras de agua causa la transferencia del colorante azul de bromofenol desde la capa de reactivo orgánico a la capa acuosa. La intensidad del color en la capa acuosa es proporcional a la concentración de LAS en la muestra. El método utilizado para la cuantificación de LAS son sustancias activas al Azul de Metileno (SAAM) (Smart 2 colorimeter).

Los surfactantes reflejan principalmente la presencia de detergentes por aportes probablemente procedentes de los hoteles. Por ejemplo en la Figura 5.5 a, es decir, en Noviembre de 2006, se alcanzan relativamente altas concentraciones de surfactantes en el área de la laguna Bojórquez y en sus alrededores. Por el contrario, en los meses de Marzo de 2007 (Figura 5.5 b) y en Julio-Agosto de 2007 (Figura 5.5 c), se midieron los valores más grandes en la parte noroeste y en la parte occidental del cuerpo de agua central de Nichupté, con valores de hasta 6.5 mg/L. En base al análisis efectuado sobre la distribución de salinidad, que es explicada por las fuentes de agua subterránea en varios lugares de Nichupté, del mismo modo los valores altos de surfactantes en la parte occidental son explicados por entradas de agua subterránea que muy probablemente están en contacto con aguas residuales

provenientes de la ciudad de Cancún. Los valores más altos de surfactantes se encuentran en la zona de mayor densidad de hoteles, bares y otros servicios turísticos. Su distribución es semejante a la que presentan el amonio y otros contaminantes.

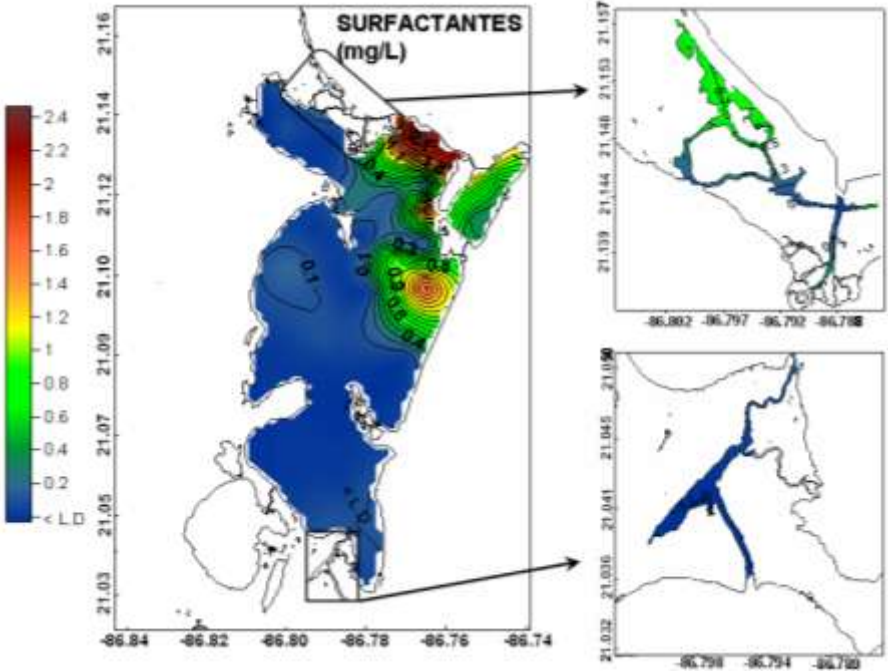


Figura 5.5 a Surfactantes en Noviembre de 2006.

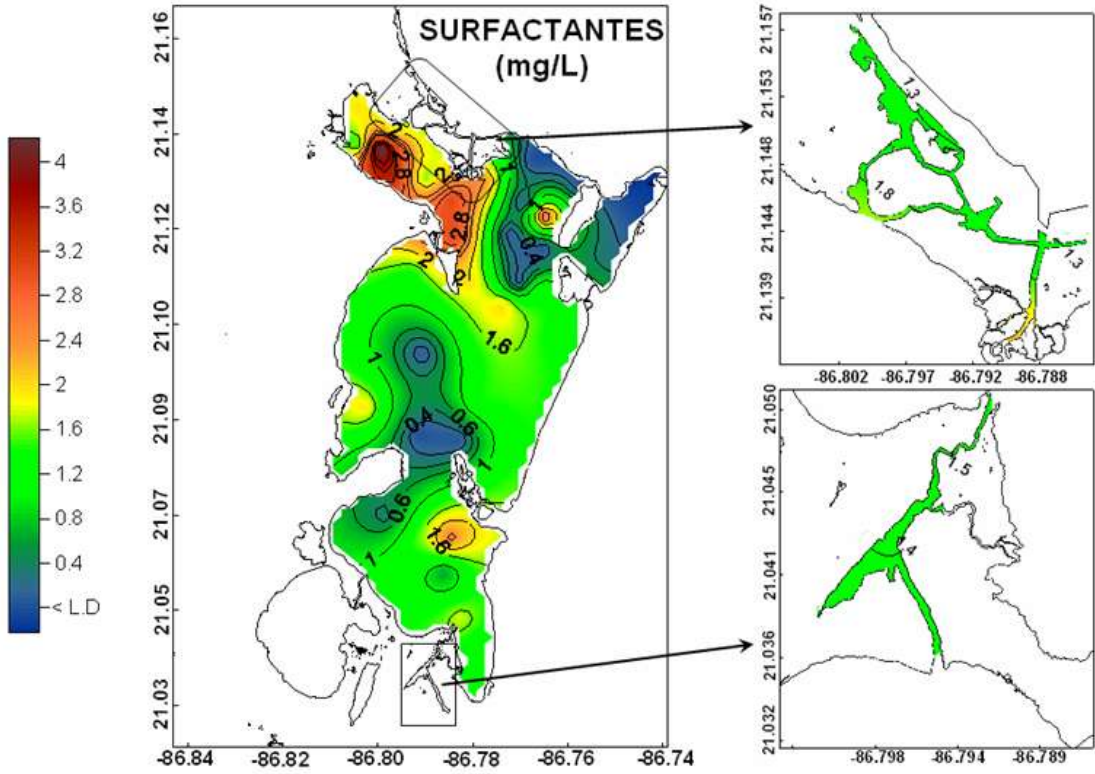


Figura 5.5 b Surfactantes en Marzo de 2007.

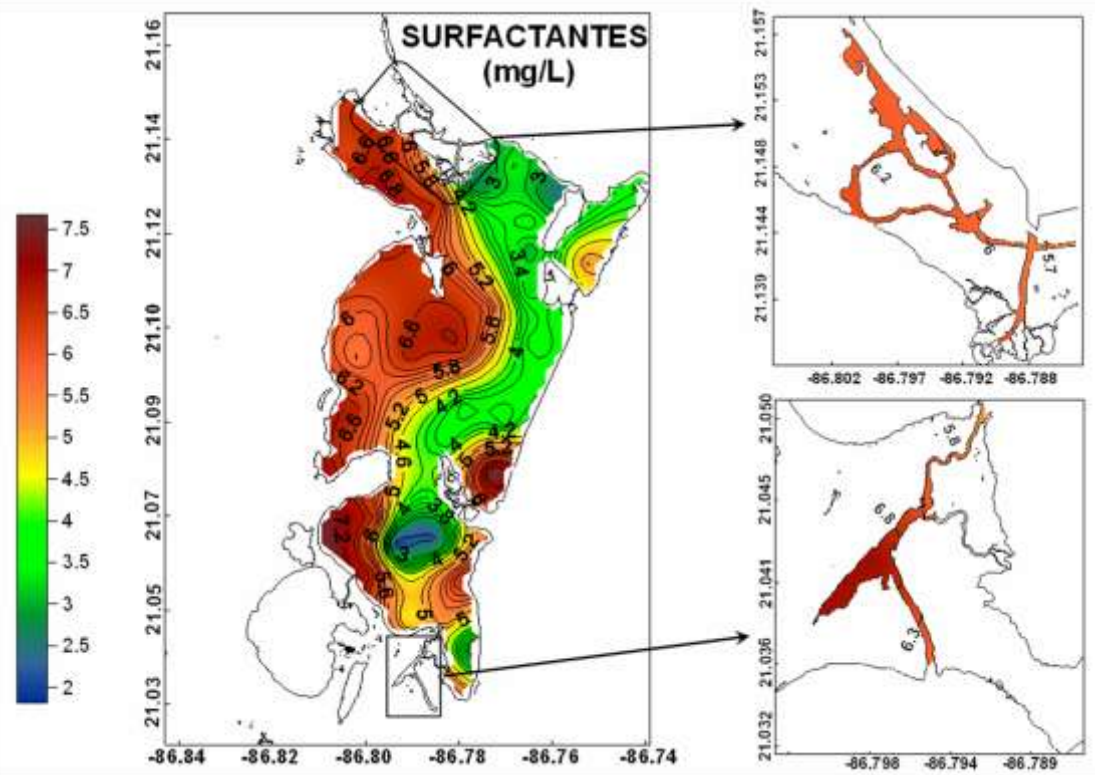


Figura 5.5 c Surfactantes en Julio-Agosto de 2007.

Referencias

Bartram, J and R Ballance. Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes. United Nations Environment Programme and the World Health Organization, (UNEP/WHO), 1996.

Escobar J., 2002. Contaminación de los Ríos y sus efectos en las Areas Costeras y el Mar. La. Comisión económica para América Latina y el Caribe. United Nations Publication. pp 5 y 11.

Ferrer. O. J., Los tipos de Fosfatos y su origen, Departamento de Química, Facultad de Agronomía, Universidad de Zulia, Maracaibo, Venezuela .

Harrison J. A., Ph.D. "El Ciclo del Nitrógeno: De Microbios y de Hombres," *Visionlearning* Vol. EAS-2 (4s), 2003.

Othmer K. Enciclopedia de tecnología química. 1997.

Rivas H., Gutiérrez X., Los Surfactantes, su comportamiento y algunas de sus aplicaciones en la Industria Petrolera. *Acta Científica Venezolana* 50 (1), pp 54-65. 1999.

Spitz L. Technology of Soaps and Detergents. 1997.

Smart 2 colorimeter. *Operator's manual. LaMotte. V.2.3 11/05.*

CAPITULO 6

Metales Pesados

Los componentes principales del agua de mar son llamados constituyentes mayores o Elementos mayores tales como el Na^+ , M^{2+} , Ca^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , aunque también tiene componentes llamados Elementos Traza, y dichas trazas son componentes esenciales para la vida de varios organismos marinos pero en cantidades menores a los elementos mayores. Junto a estos constituyentes inorgánicos, se encuentran al igual en estado de traza materias orgánicas como aminoácidos, proteínas y carbohidratos (Establier, 1969). En la actualidad las bahías, estuarios y lagunas costeras de nuestro país encaran serios problemas de contaminación, donde los ecosistemas costeros y estuarinos han ido sufriendo transformaciones que son ocasionadas por la represa de los ríos, además del cierre entre las comunicaciones de lagunas y mares, aunado a esto el vertimiento de los desechos municipales e industrias de las poblaciones colindantes donde estos desechos contienen varios contaminantes destacando de esta manera los metales pesados tales como el Pb, Cu, Zn, Fe entre otros (Villanueva 1992).

La distribución de metales traza en los sedimentos de los ecosistemas costeros está influenciada por las fuentes naturales o antrópicas que los suministran y los movilizan (Madureira et al. 2003). Los metales pueden sufrir transformaciones por procesos de oxidación, reducción o complejamiento, dependiendo del dinamismo del entorno químico en el que se localicen. Así, se forman especies que tienen diferente grado de

asimilación o de toxicidad por parte de los organismos, e incluso podrían quedar biológicamente no disponibles. Entre los metales que se considera que representan un mayor riesgo de contaminación ambiental están, además del mercurio y del cadmio, el zinc, el cobre y el plomo (Páez-Osuna 1996). Algunos, como el hierro y el manganeso, son necesarios para la vida en bajas concentraciones, pero en general, cuando aumentan las concentraciones de los metales en los ecosistemas, muchos organismos experimentan un estrés que les resta posibilidades de sobrevivir. Otros, por el contrario, han desarrollado mecanismos de detoxificación fisiológica, mediante los cuales se excreta o se inmoviliza químicamente a los metales por medio de la complejación con proteínas o con matrices minerales inertes. De allí, el fenómeno de la bioconcentración (Conder y Lanno 2003). La relativa estabilidad de los sedimentos costeros favorece la evaluación de la presencia de metales, los cuales no son biodegradables y persisten en los ecosistemas bajo diferentes formas químicas. Su cuantificación permite establecer los niveles característicos en ese ambiente y revelar situaciones anómalas de concentraciones que podrían afectar a los organismos de ese ecosistema o convertirse en una amenaza para la salud humana (Gutiérrez-Galindo et al. 1999).

Es por esto que es de suma importancia los estudios utilizados para determinar los niveles por contaminación por metales pesados en los sistemas costeros de México. Esto nos permite cuantificar las descargas de efluentes contaminantes y, de este modo, a valorar el impacto ambiental y los efectos producidos en los organismos acuáticos. Los metales pesados quedan atrapados en los sedimentos los cuales

actúan como reservorios naturales de los contaminantes y es de esta manera que se hacen disponibles para los organismos que los acumularán en sus tejidos, y de esta manera sufrirán sus efectos tóxicos (GEMSI 1983).

Las aguas se ven contaminadas por tres diferentes zonas totalmente identificables: las zonas agropecuarias, las zonas industriales, y las zonas urbanas o municipales donde los tipos de contaminantes dependerán de los tipos de procesos desarrollados en cada zona. Aunque es muy predecible que dichos contaminantes serán: pesticidas y fertilizantes, metales pesados, nutrientes y organismo microbiológicos, respectivamente (Jiménez Cisneros, 2002). A continuación procedemos a describir los valores medidos de los metales pesados (plomo, cadmio, zinc, cobre y hierro).

Plomo

Este metal no es esencial para los seres vivos, sin embargo, existe en todos los tejidos y órganos de los mamíferos. Se presenta en dos estados de oxidación Pb^{2+} y Pb^{4+} , siendo el primero el que predomina en el ambiente acuático. En el agua de mar se encuentra como $PbCl_2$, (43%), $PbCO_3$ (42%) y $Pb(OH)_2$ (9%) (Whitfield *et al.* 1981). Asimismo, algunos compuestos sulfurosos se forman con este metal en condiciones anaeróbicas en los sedimentos marinos.

En la Figura 6.1 a, b, c, se muestran las concentraciones de plomo para Noviembre de 2006, Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007. Es interesante observar que en Noviembre de 2006 y en Julio-Agosto de 2007, se detectaron muy altos valores de

plomo en la parte central y sur de Nichupté. Estos resultados indican que la laguna del Inglés parece estar exportando metales pesados hacia el cuerpo de agua principal de Nichupté, o bien, el plomo se debe al intenso tráfico de lanchas turísticas en esa zona que usan motores en mal estado y aceites que contienen este metal. Los valores relativamente bajos en la parte norte de Nichupté pueden ser explicados por que en esa zona hay un intercambio de aguas con el mar abierto. Definitivamente, los valores que hemos medido están muy por arriba de la norma mexicana NOM-001-ECOL-1996, que permite un máximo de 60 mg/L (ver Tabla 6.3). En Marzo de 2007, los valores máximos fueron encontrados en la parte noroeste, en las cercanías de un manantial de agua subterránea.

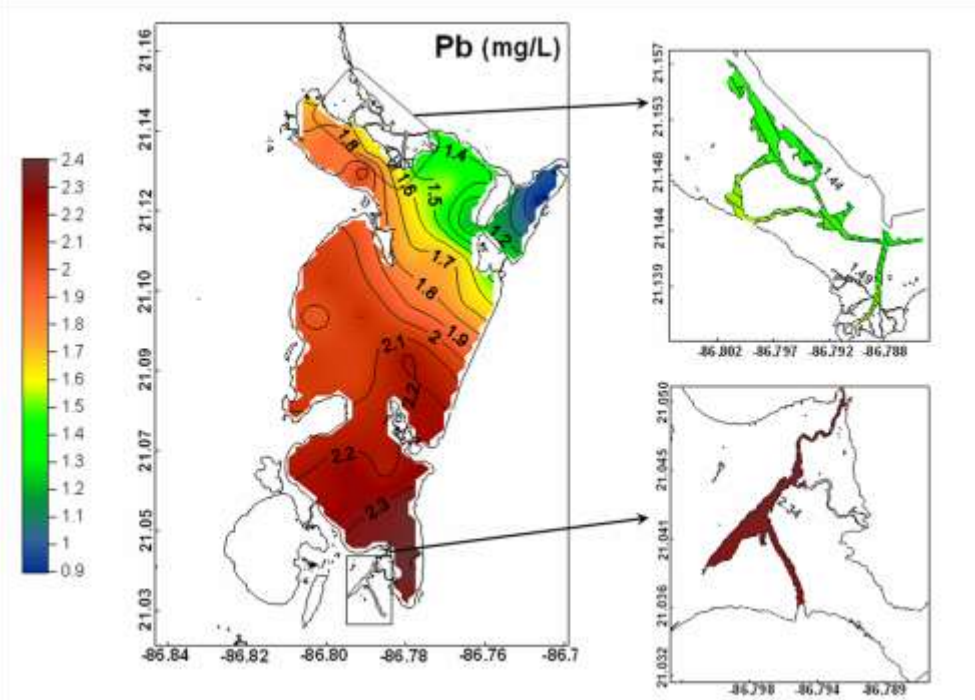


Figura 6.1 a Plomo en Noviembre de 2006.

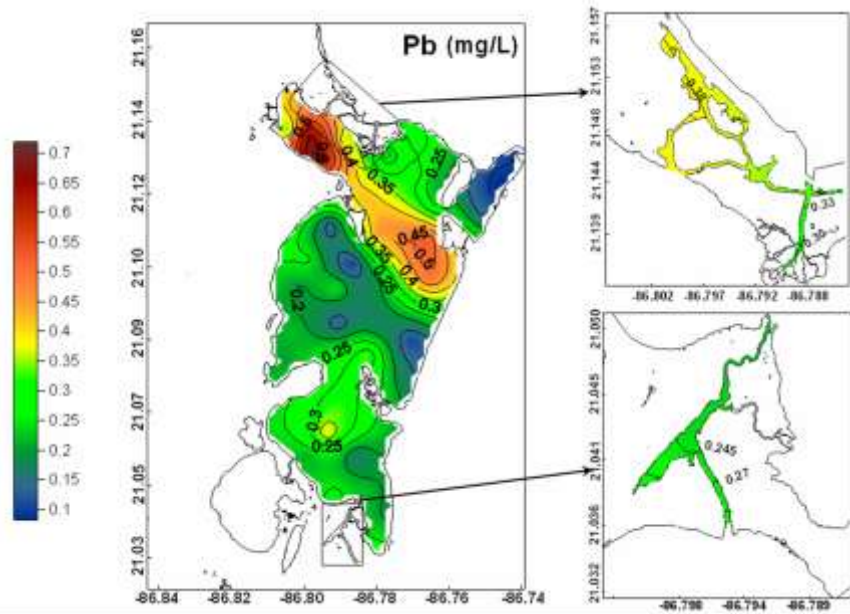


Figura 6.1 b Plomo en Marzo de 2007.

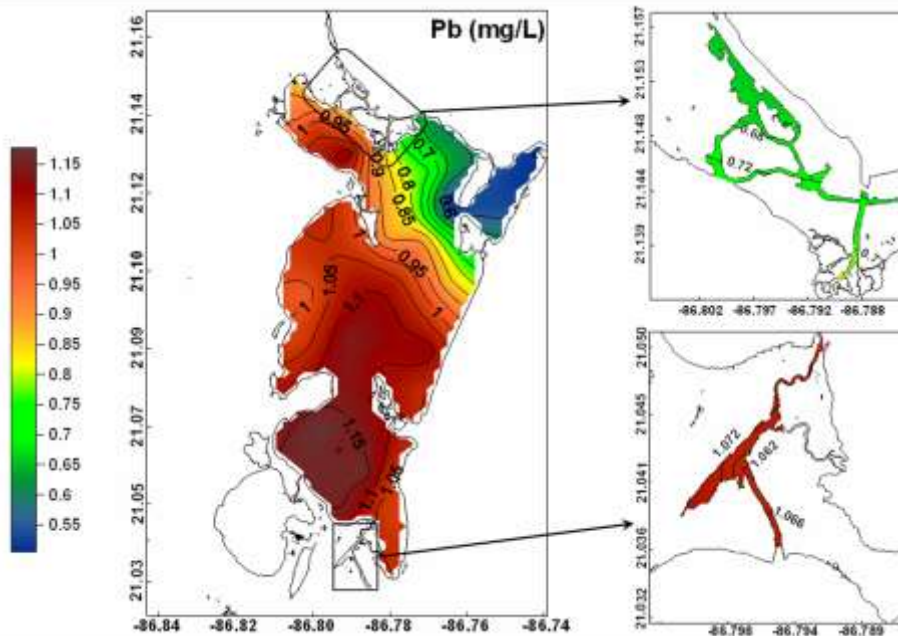


Figura 6.1 c Plomo en Julio-Agosto de 2007.

Cadmio

El cadmio es un elemento no esencial cuyas propiedades químicas son intermedias entre el zinc y el mercurio. En ambientes dulceacuícolas, está íntimamente asociado con la materia coloidal como CdCl_2 y CdSO . En el mar el 66% está presente como ion Cd^{2+} junto con CdCO_3 , (26%), Cd(OH)_2 , (5%), CdCl_2 , (1%) y CdSO_4 , (1%) (Whitfield *et al.* 1981). En aguas costeras y estuarinas, una alta proporción de este metal se encuentra asociado a partículas formando complejos (MacKay 1983). Las principales fuentes de cadmio en ambientes acuáticos son debidas al lavado de los suelos agrícolas y a las descargas de la minería y la industria. Otro origen importante son los desechos municipales y los lodos de las plantas de tratamiento (UNEP 1985). Su presencia en ambientes marinos disminuye la capacidad de sobrevivencia de larvas y estadios juveniles de peces, moluscos y crustáceos (Forstner y Wittman 1979).

En las tres campañas de medición mostradas en la Figura 6.2 a, b, c, se encuentran valores muy altos de cadmio en la laguna Bojórquez y en sus alrededores. En Noviembre de 2006 alcanzaron valores de 0.09 mg/L. La norma mexicana, NOM-001-ECOL-1996, permite un valor máximo de 0.9 $\mu\text{g/L}$. Estos valores parecen estar muy por encima de los valores permitidos. Nuestros datos, medidos en diferentes épocas del año, muestran de manera consistente altos valores en la misma zona de Nichupté. De la Figura 6.2 c, se infiere que, como en otros casos, la laguna de Bojórquez está exportando cadmio hacia el resto del sistema lagunar.

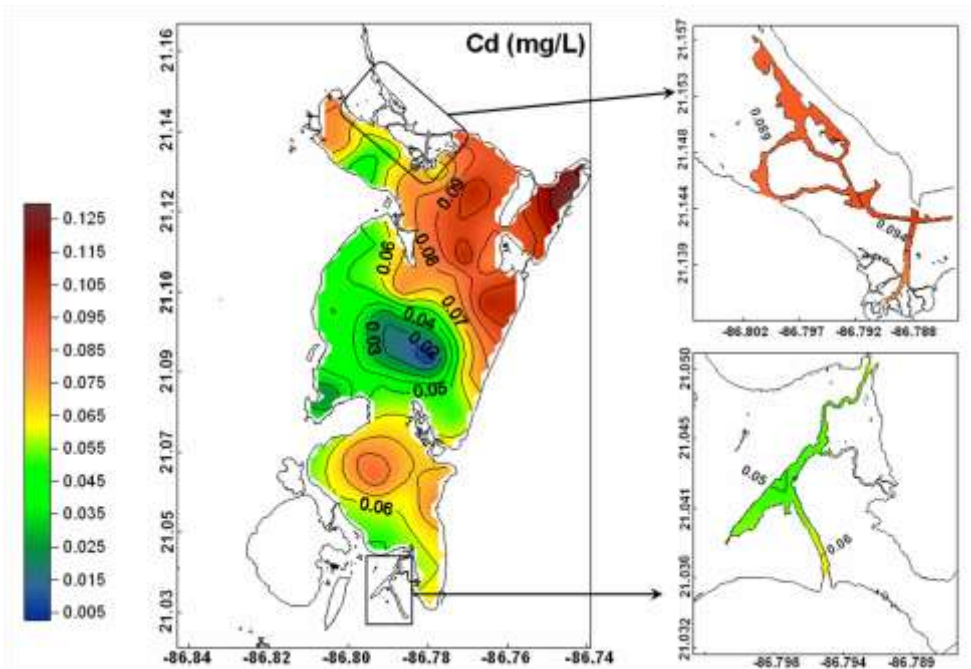


Figura 6.2 a Cadmio en Noviembre de 2006.

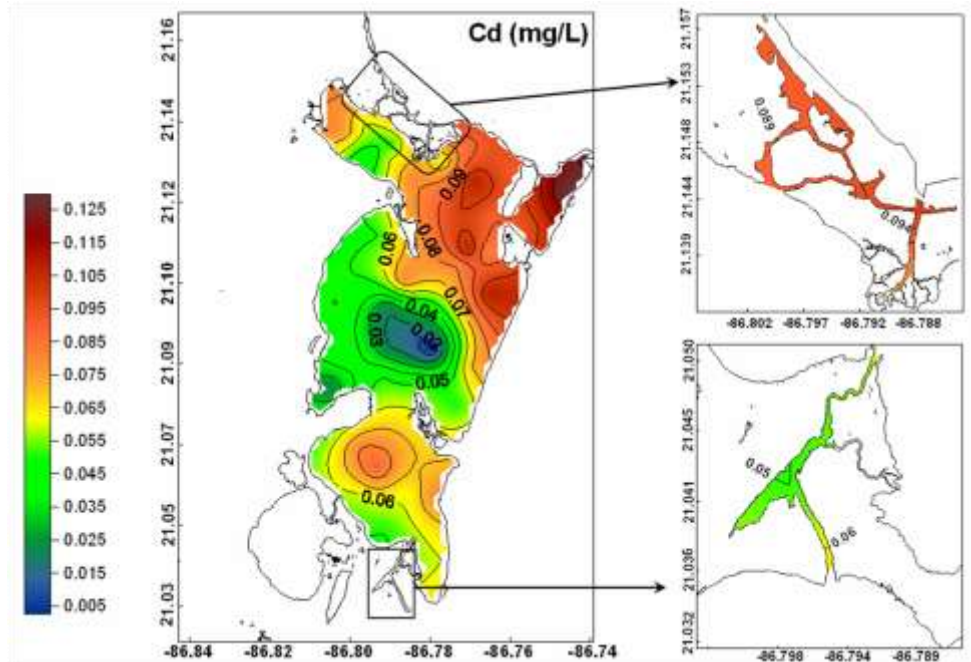


Figura 6.2 b Cadmio en Marzo de 2007.

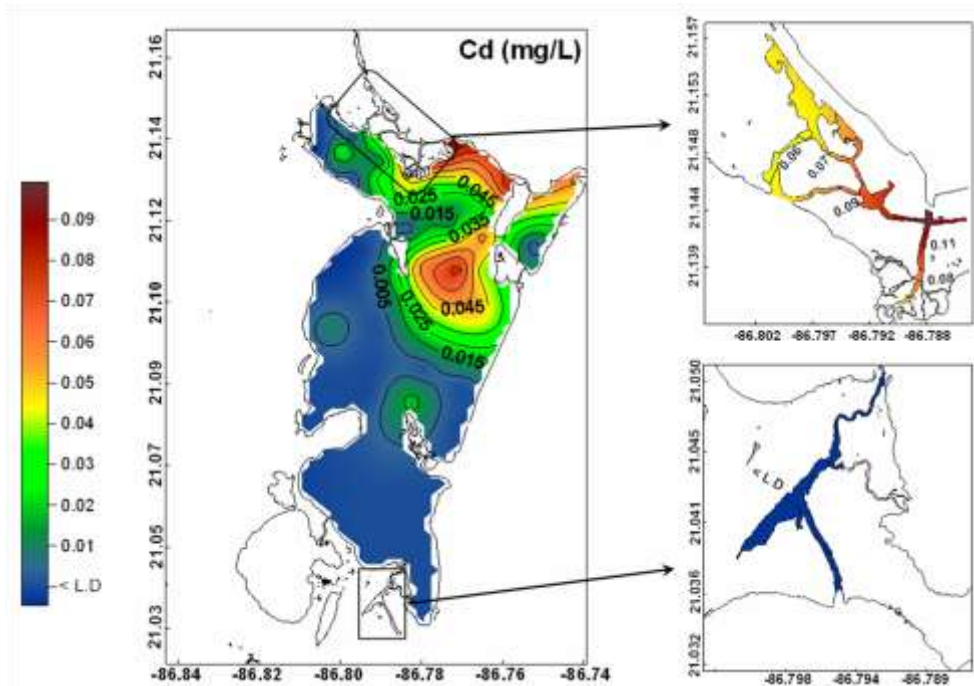


Figura 6.2 c Cadmio en Julio-Agosto de 2007.

Zinc

Es un elemento esencial para el desarrollo de muchas clases de organismos vegetales y animales. La deficiencia de zinc en la dieta humana deteriora el crecimiento y la madurez y produce también anemia. Las aguas residuales industriales que contienen zinc, suelen proceder de procesos de la industria galvánica, producción de pilas, etc. Los compuestos del zinc se aplican con muchos propósitos distintos. La mayor parte del zinc, presente en las aguas residuales no procede de fuentes puntuales, sino que procede principalmente de aguas superficiales ricas en zinc. En general, los patrones de zinc medidos son diferentes para las diferentes campañas de medición, no pudiéndose observar una regularidad en la distribución. En una cantidad importante de las muestras obtenidas en las 50 estaciones hidrográficas, los valores medidos de zinc

estuvieron por debajo de la resolución del colorímetro aplicado. Esto se puede observar en el color azul mostrado en las grafica 6.3 c.

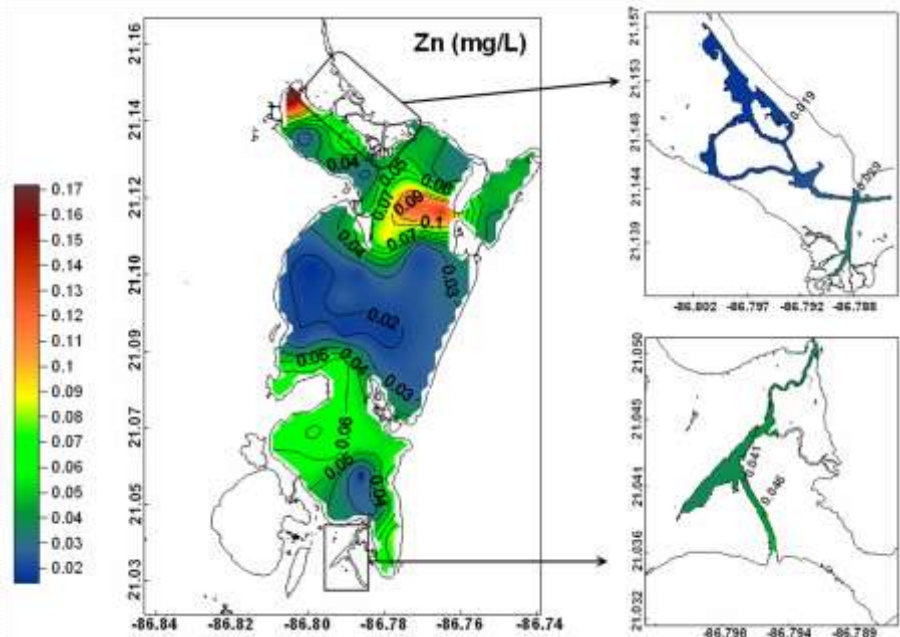


Figura 6.3 a Zinc en Noviembre de 2006.

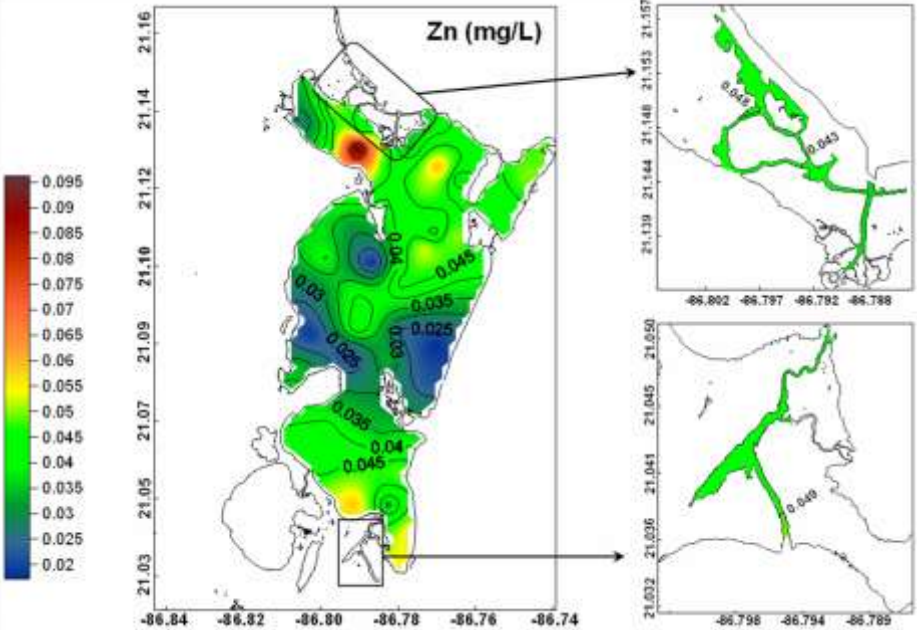


Figura 6.3 b Zinc en Marzo de 2007.

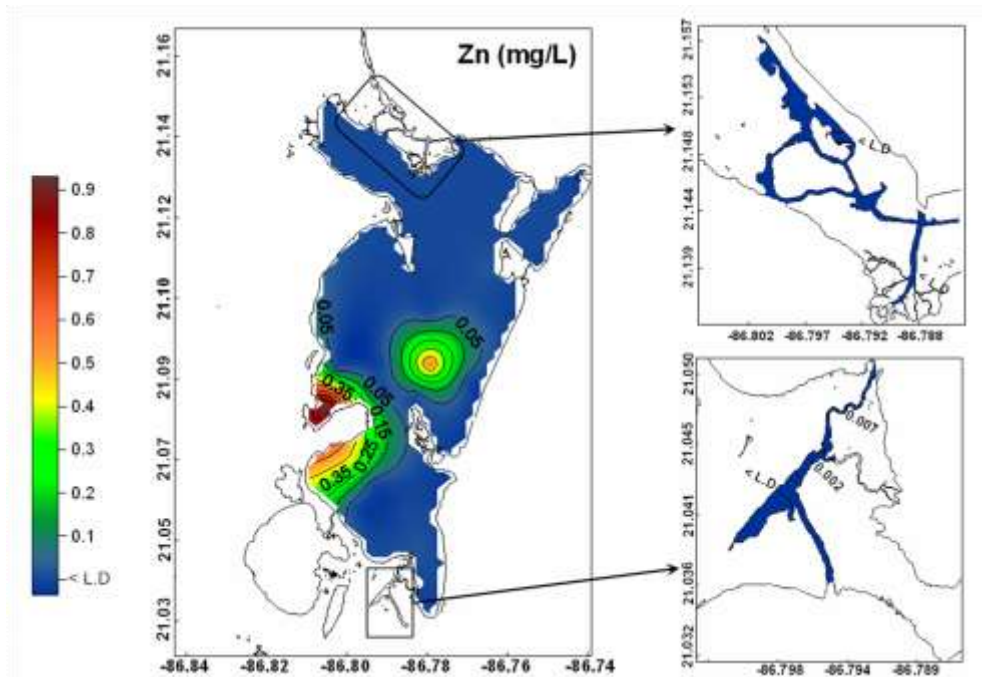


Figura 6.3 c Zinc en Julio-Agosto de 2007.

Con el fin de tener una idea de los mecanismos y procesos por los cuales los cuerpos de agua costeros son afectados por la contaminación de origen antropogénico, se muestra de manera resumida en la Tabla 6.1 las actividades contaminantes.

Tabla 6.5. Actividades que contaminan las aguas costeras.

Metal contaminante	*Actividades asociadas a proliferar la contaminación	Efectos
Pb	Gasolineras, uso en baterías, pigmentos, soldaduras, uso pinturas, industria celulosa y del papel, industria petroquímica, Ind. Acero,	Limita la síntesis clorofílica de las plantas, perjudicando su crecimiento. Envenenamiento, edema cerebral, entre otros.

Cd	Industria galvanizado, estabilizadores plásticos, aleaciones, baterías, uso de pinturas, industria petroquímica, industria fertilizante, ind. Acero, Ind. Automotriz,	Diarrea, fractura de huesos, daño al sistema nervioso central, desordenes psicológicos, daño al sistema inmune.
Cu	Pinturas, industria celulosa y del papel, industria fertilizante, Ind. Acero, Ind. Automotriz, termoeléctricas,	Daño al hígado, Riñón
Zn	Uso domestico de detergente, uso de pinturas, industria petroquímica, ind. Fertilizante, Ind. Acero, termoeléctricas,	Toxicidad aguda y envenenamiento a concentraciones mayores de 5g.
Fe	Uso domestico de detergente, industria petroquímica, Ind. Fertilizante, Ind. Acero	

*Nota: Esto es solo ejemplos de muestras antropogénicas, ya que se sabe que existe contaminación de estos metales de manera natural.

Se debe tener en consideración que no solo las industrias, la agronomía y el uso domestico son las fuentes principales de contaminación. La industria marítima como el trafico comercial de embarcaciones, las flotes pesqueras pueden contaminar desechando aguas residuales al mar, además de los aceites o hidrocarburos con los cuales trabajan dichas embarcaciones causando con esto problemas graves tales como el envenenamiento de algunas especies marinas, enfermedades y eutrofización de cuerpos de agua. A manera de comparación se muestra en la Tabla 6.2 las

concentraciones de metales disueltos que se han obtenido en otras lagunas costeras del país. Las concentraciones se encuentran en el orden de ppb ($\mu\text{g/L}$), así como la referencia de donde fue tomada. Se puede decir con certeza que, en general, los valores medidos en el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez están por encima de los observados en otras lagunas costeras de México.

Tabla 6.6. Concentración media de Metales ($\mu\text{g/L}$) en agua superficial de lagunas costeras del Golfo de México.

Lagunas/Concentraciones metales disueltos	Cobre	Cadmio	Zinc	Plomo $\mu\text{g/L}$	Hierro	Referencia
Pueblo Viejo, Ver.	49.0			214.0		Robledo, 1987
Tampamachoco, Ver		1.0		46.0		Rosas et al., 1983
Mendinga, Ver.		2.0		125.0		Rosas et al., 1983
Del Carmen, Tab.		13.0		40.0		Rosas et al., 1983
Del Carmen, Tab.				43.0		Pérez-Zapata, 1981
Machona, Tab				99.7		Pérez-Zapata, 1981
Mecoacán, Tab.				90.5		Pérez-Zapata, 1981
Atasta, Camp.		3.0		38.0		Rosas et al., 1983
Términos, Camp.	1.6	0.07		1.8	8.66	Páez-Osuna et al., 1987

Madre, Tamp.	2.5	0.6	15.0			Pulich. 1980
Costa Nor-Occidental del Golfo de México	60.0	<0.20	2.5		18.0	Shokes et al., 1979 Slowey y Hood. 1971
Costa Oriental del Golfo de México		1.0	0.35			Corcoran, 1972
Puerto de Veracruz, Ver.	8.5		15.3		34.62	Luevano y Camargo, 1982
Plataforma Continental del Golfo de México.	1.4		2.7			Slowey y Hood. 1971
Parte Central del Golfo de México	0.5		2.6			Davis, 1968 Slowey y Hood, 1971

Con el fin de tener una ubicación acerca de las concentraciones medidas en el sistema lagunar de Nichupté-Bojorquez, se muestran en la siguiente tabla los límites máximos permisibles para aguas costera en términos de ppb ($\mu\text{g/L}$).

Tabla 6.7. Límites Máximos Permisibles en Aguas Costeras.

Metal	Concentración ($\mu\text{g/L}$)	Referencia
Pb	6.0	SEDUE. 1990
Cd	0.9	SEDUE. 1990
Cr	1.0	SEDUE.1986

Cu	5.0	SEDUE.1986
Zn	10.0	SEDUE.1986
Fe	50.0	SEDUE.1986

Finalmente, para concluir acerca de las concentraciones de metales pesados, se dan en la Tabla 6.4 los valores de permitidos para aguas costeras según la norma mexicana, NOM-001-ECOL-1996.

Tabla 6.4 Límites máximos permisibles para metales pesados, tomado de la NOM-001-ECOL-1996.

Parámetros (mg/L)(*)	AGUAS COSTERAS					
	Explotación pesquera , navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cianuros	2.0	2.0	2.0	3.0	1.0	2.0
Cobre	4.0	6.0	4.0	6.0	4.0	6.0
Cromo	0.5	1.0	1.0	1.5	0.5	1.0
Mercurio	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02
Níquel	2.0	4.0	2.0	4.0	2.0	4.0
Plomo	0.2	0.4	0.5	1.0	0.02	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total.

P.D. Promedio diario

P.M. Promedio mensual

(A) y (B), Tipo de cuerpo receptor según la ley federal de derechos.

Cobre

Las concentraciones de cobre mostradas en la Figura 6.5 a, b, c indican que la parte sur del complejo lagunar contiene relativamente altos valores de cobre.

Consistentemente, en Noviembre de 2006, Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007, las concentraciones en las inmediaciones de la laguna Inglés y en el canal que comunica a la boca Punta Nizuc. Se tiene conocimiento que en la zona de la Laguna del Inglés fue usada como basurero. Este hecho puede ser la causa para las altas concentraciones medidas en la parte sur de Nichupté. Otra área con relativamente altos valores de concentración, se ubica en la parte noroeste, en las cercanías de manantiales de aguas subterráneas. Los valores máximos medidos de concentraciones de cobre fue de .156 mg/L, en Marzo de 2007.

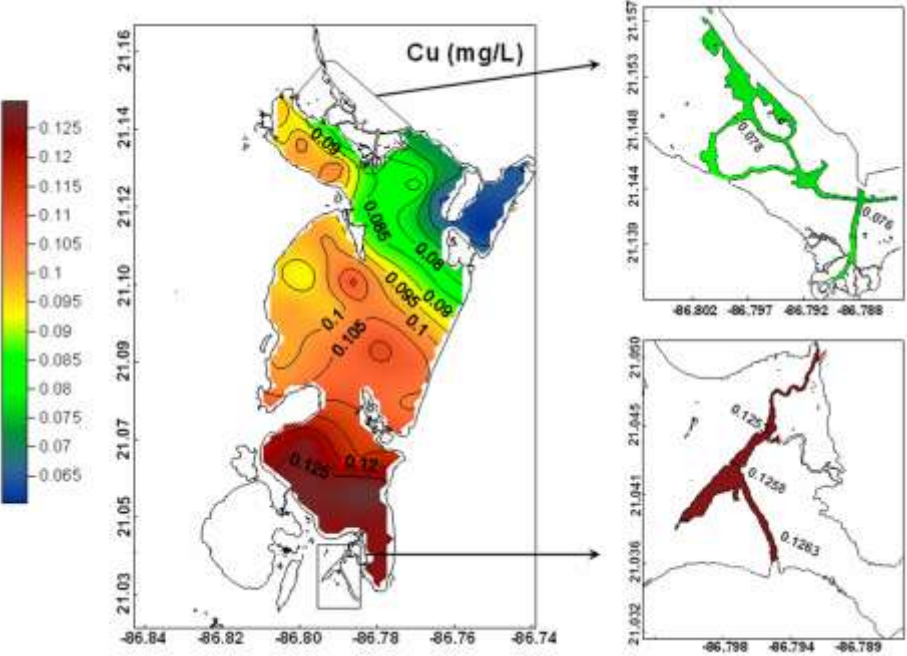


Figura 6.4 a Cobre en Noviembre de 2006.

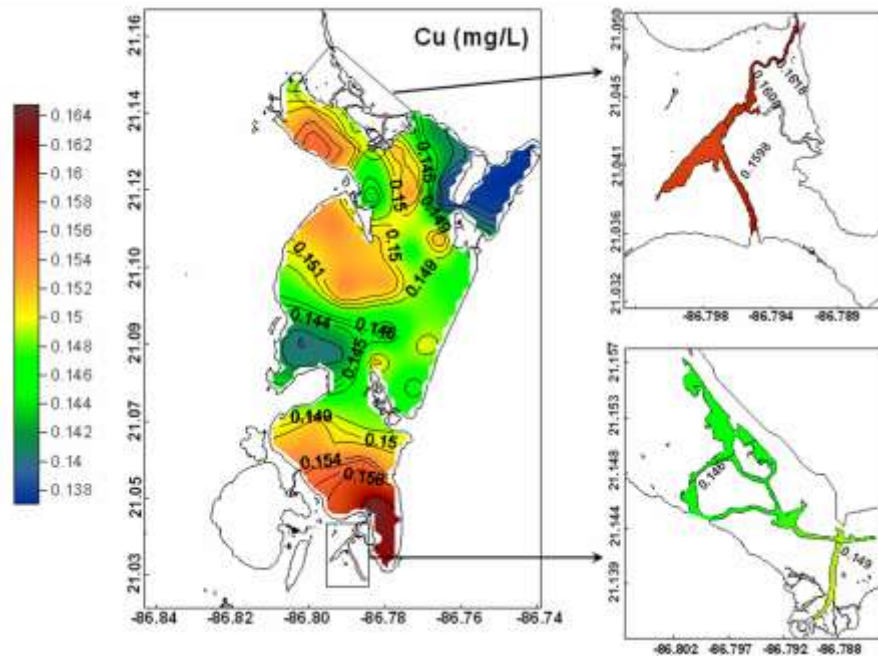


Figura 6.4 b Cobre en Marzo de 2007.

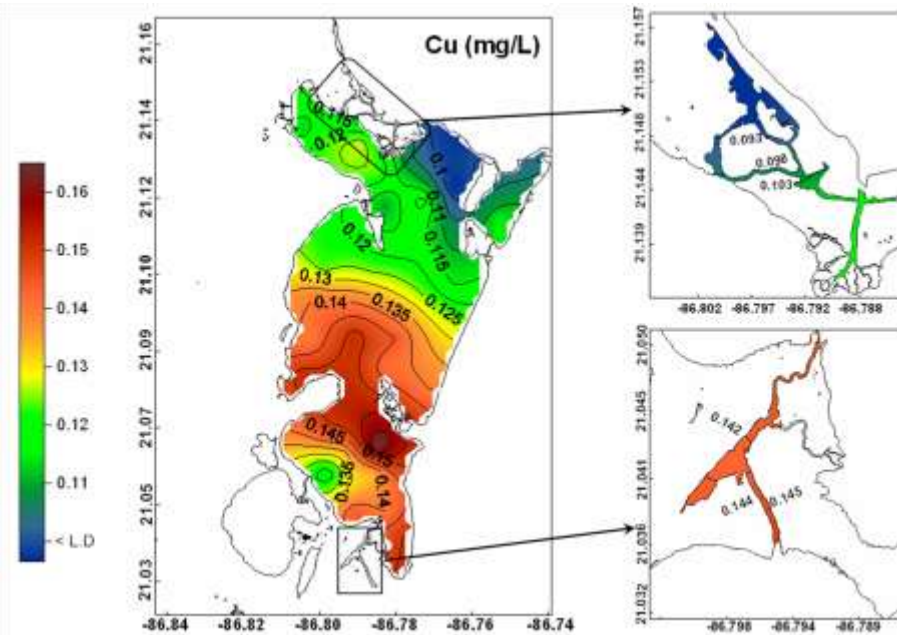


Figura 6.4 c Cobre en Julio-Agosto de 2007.

Hierro

A diferencia de las altas concentraciones de cobre en la parte sur, las concentraciones más altas de hierro fueron observadas en la parte norte del sistema lagunar de

Nichupté-Bojórquez. De las distribuciones mostradas en la Figura 6.5 a, b, c, se infiere que la laguna Bojórquez está exportando hierro hacia el resto del sistema lagunar. Esto se observa claramente en las gráficas de Noviembre de 2006 y en Marzo de 2007. Para corroborar este comentario, hacemos notar que en la gráfica de Julio-Agosto de 2007, se puede ver que las concentraciones de hierro son más grandes dentro de la laguna Bojórquez que en los alrededores, indicando que esta laguna está exportando hierro hacia el resto del sistema lagunar. Los valores más altos fueron de 0.44 mg/L en la laguna Bojórquez en Noviembre de 2006 y en la parte sur de Nichupté en Julio-Agosto de 2007.

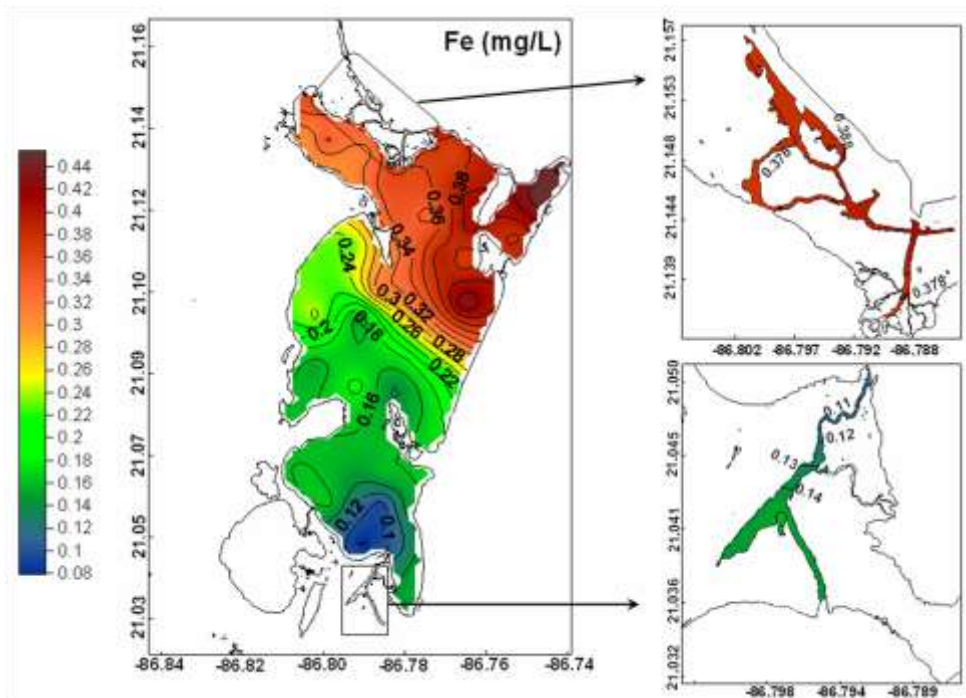


Figura 6.5 a Hierro en Noviembre de 2006.

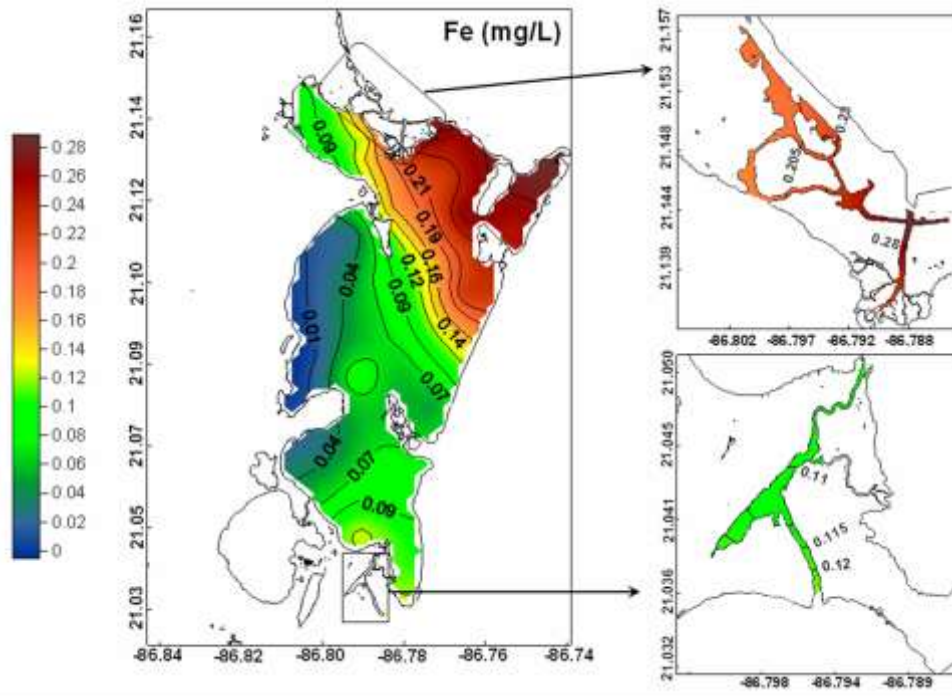


Figura 6.5 b Hierro en Marzo de 2007.

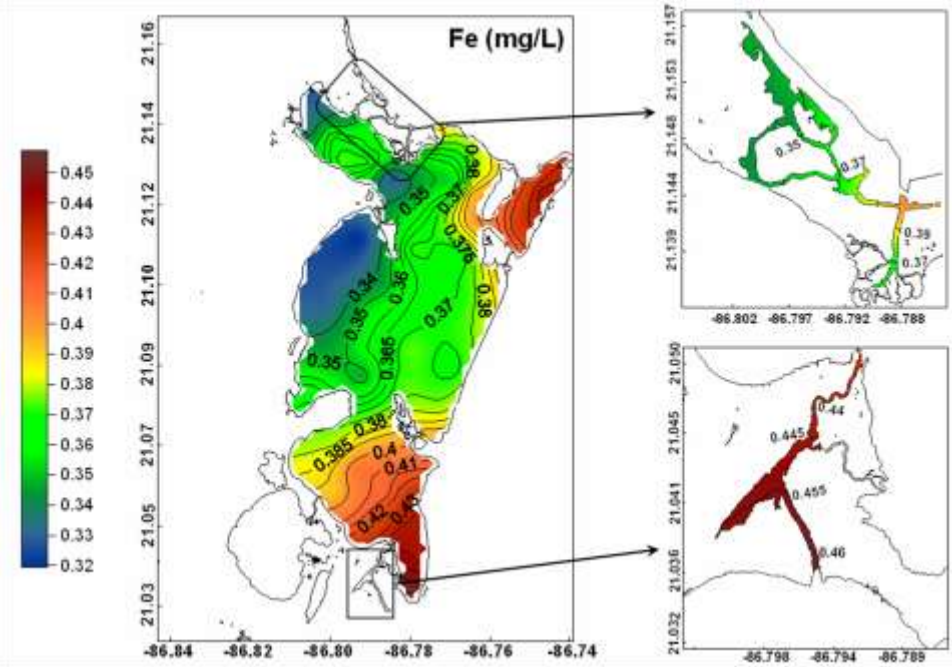


Figura 6.5 c Hierro en Julio-Agosto de 2007.

Referencias

Conder, J.M. & R.P. Lanno. 2003. Lethal critical body residues as measures of Cd, Pb, and Zn bioavailability and toxicity in the earthworm *Eisenia fetida*. J. Soils & Seds. 3 :13-20.

Establier R., 1969. Estudios del Contenido de Cobre del agua de mar y ostiones (*Crassostrea angulata*) de las Costas de Cádiz. Inv. Pesq. Vol. 33 (1). Pp. 69-86

Corcoran, E.F., 1972. Data interpretation reports of a study of the distribution and concentration of trace metals and pesticides of the Florida Territorial sea of ESCAROSA-ESCARASA 1-71, Contract No. ccc04-71, Susio, FCCC.

Davis, D. R., 1968. The measurement and evaluation of certain trace metal concentrations in the nearshore environment of the north-west Gulf of México and Galveston Bay. Ph. D. Thesis, Texas A&M University, College Station, 70 p.

Forstner U. y Wittman G.T.W. (1979). *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer-Verlag, Berlín. Capítulo C., pp. 324-359.

GEMSI, AD HOC GROUP (Group of Experts on Methods, Standards and Intercalibration). 1983. The Use of Marine sediments for pollution monitoring. Instituto de Ciencias del Mar y limnología, UNAM, Mazatlán, México. Pp. 11-15

Gutiérrez-Galindo, E.A., J.A. Villaescusa-Celaya & A. Arreola-Chimal. 1999. Bioacumulación de metales en mejillones de cuatro sitios selectos de la región costera de Baja California. *Cienc. Mar.* 25(4):557- 578.

Jímenez Cisneros B. E., 2002, *La Contaminación Ambiental en México*. Editorial Limusa, México, México, pp 33-112, 650 -652

Luevano, M. P. y F. S. Camargo, 1982. Análisis de algunos oligoelementos en las cercanías al Puerto de Veracruz. *Sria de Marina. Dir. Gral. De Oceanografía. Calidad de Aguas en la Dársena del Puerto de Veracruz y Proximidades. Estación Oceanográfica-Veracruz. Febrero,1982*

Mackay J. (1983). Metal organic complexes in sea water. An investigation of naturally-occurring complexes of Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Mg and Cd using high performance liquid chromatography with atomic fluorescence detection. *Mar. Chem.* 13, 169-180.

Madureira, M-J., C. Vale & N. Fonseca. 2003. Distribución de metales traza en sedimentos de zonas de lodo de la plataforma costera norte de Portugal. *Cienc. Mar.* 29(4):435-445.

Páez-Osuna, F. 1996. Fuentes de metales en la zona costera marina, p. 297-308. *In:* A.V. Botello, J.L. Rojas-Galaviz, J.A. Benitez, D. Zárate-Lomelí (Eds). *Golfo de México,*

Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnóstico, y Tendencias. Universidad Autónoma de Campeche. *EPOMEX* Serie científica, 5. 666 p.

Paéz – Osuna, F., D. Valdéz-Lozano, H. Alexander, H. Fernández y L. J. Osuna, 1987. Trace metals in the fluvial system of Terminos Lagoon, Mexico, *Marine Pollution Bulletin* 18: 294-297

Paéz – Osuna, F., D. Valdéz-Lozano, H. Alexander, H. Fernández y L. J. Osuna, 1987. Níquel y Plomo en las fracciones disueltas y particulada del sistema fluvio lagunar de laguna de Terminos, Mexico. *Anal. Inst. de ciencias del Mar y Limnol Univ. Nal. Autón. México* 14:79-86

Paéz-Osuna. F., A.V. Botello, y S. Villanueva. 1986. Heavy Metals in Coatzacoalcos Estuary and Ostrion Lagoon, Mexico. *Marine Pollution Bulletin* 11: 516-519.

Pérez-Zapata, A. J., 1981. Plomo y Mercurio. P 58-61. In : *Lagunas Costeras de Tabasco. Un ecosistema en peligro.* Centro de Ecodesarrollo.

Pulich, M. W., 1980. Heavy Metals accumulation by selected *Halodule wrightii* *ASH* populations in the Corpus Christi Bay Areas. *Marine Science* 23:89-100.

Robledo, M.F., 1987. Evaluación de la calidad del agua y calidad sanitaria del ostión (*Crossostrea virginica*) en la Laguna del Pueblo Viejo. Ver. Mexico Esc. Cienc. Biol., Universidad de Tampico, Tamps. 58p.

Rosas, P. I., A. Báez, y R. Belmont. 1983. Oyster (*Crossostrea virginica*) as indicator of heavy metals pollution in some lagoons of the Gulf of Mexico. Water, Air and Soil Pollution 20:127-135.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1986. Reglamento para la Prevención y control de la contaminación de aguas. Serie: Normatividad Ecologica. No. 4 Colección los Básicos. 40 p.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1990. Gaceta Ecológica. Vol. II, num. 6, enero 1990, 64 p.

Shokes, R. F., P. Mankiewicz, R. Sims, M. Guttman, J. Jordan, J. Nemmers, y Payne, 1979. Geochemical baseline study of the TEXOMA offshore brine disposal sites, Big Hill, Fall. 1977, sepr. 1978. Sci. Appl. Tech. Rep. 79-834-L3, La Jolia, CA.

Slowey, J. F. y D. W. Hood, 1971. Cooper, manganese and Zinc concentrations in Gulf of México waters. Geochimica Cosmochimica Acta 35: 121-138

United Nations and United Nations Environment Programme. Regional Seas. (1985).
GESAMP: Cadmium, lead and tin in the marine environment. UNEP Regional Seas
Report and Studies No. 56. GESAMP Report and Studies No. 22, pp. 1-62.

Villanueva F. (1992). Metales Pesados en la Zona Costera Del Golfo de México y
Caribe Mexicano, Una revisión. Rev. Int. Contam. Ambient. 8 (I), pp.47-61.

Whitfield M., Turner D.R. y Dickison A.G. (1981). Speciation of dissolved constituents
in estuaries. En: River inputs to ocean systems. Proceedings of UNESCO/IOC/UNEP
Review Workshop, 16-19 March, 1979. Nueva York, United Nations, pp. 132-188.

CAPÍTULO 7

Estadística

En los capítulos anteriores hemos mostrado toda una serie de gráficas mostrando las concentraciones de nutrientes, contaminantes y metales pesados. Los valores de concentración, medidos en diferentes épocas del año, mostraron una gran variabilidad en todo el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez. Con el fin de sopesar realmente los valores dominantes y los extremos mínimos y máximos, presentamos a continuación un análisis estadístico muy simple acerca de la variabilidad de las concentraciones y sus valores medios en cada campaña de medición. Iniciamos el análisis con los datos medidos de fosfato. En la Figura 7.1 se puede observar que en términos generales, los valores promedio del fosfato están en la parte baja de la barra de variabilidad (máximo y mínimo). Esto quiere decir que la gran mayoría de los datos medidos en las estaciones hidrográficas tienen valores parecidos a los promedios y unos pocos alcanzan valores altos. La mayor variabilidad en fosfatos se obtuvo en Noviembre de 2006 y en Julio-Agosto de 2007. La menor variabilidad observada en los datos de fosfato tuvo lugar en Marzo de 2007.

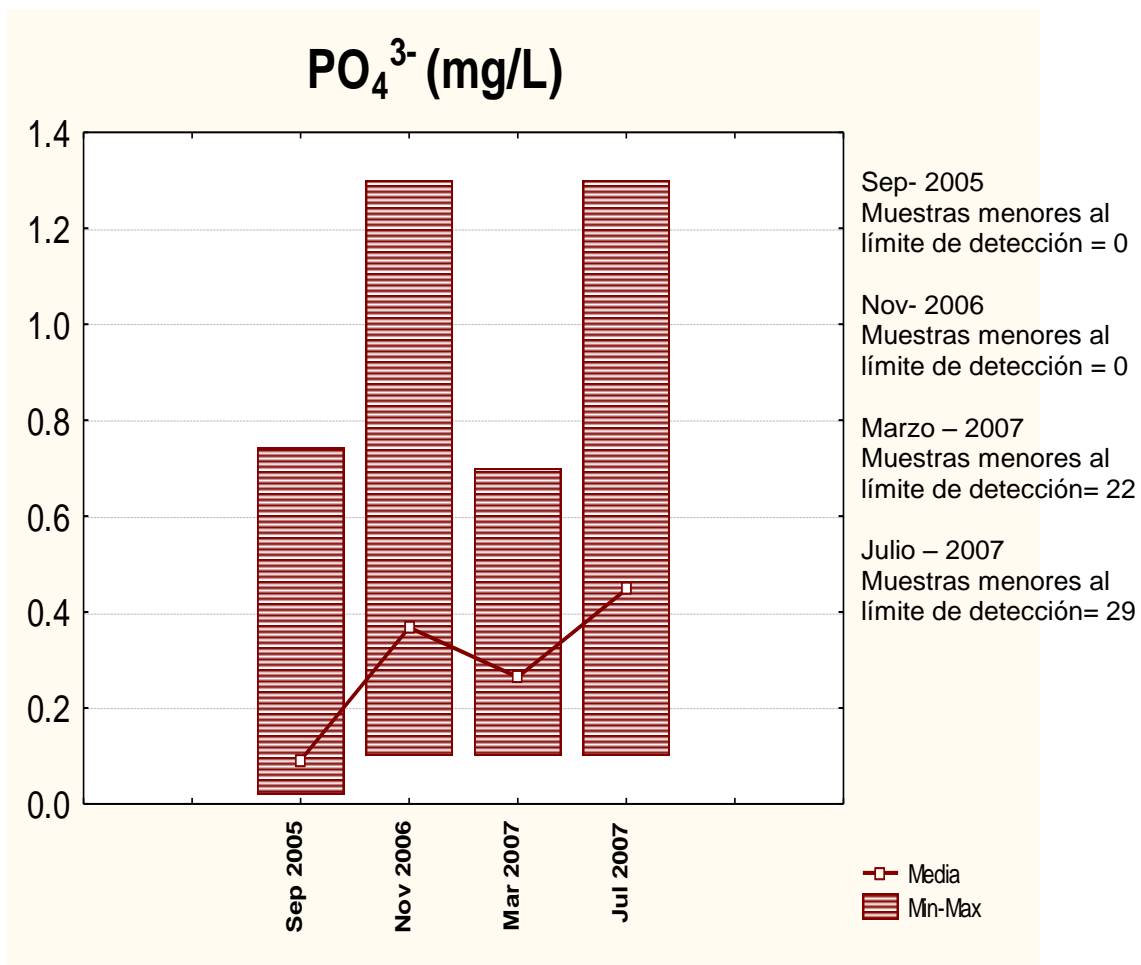


Figura 7.1 Valor medio y variabilidad de fosfatos en las cuatro campañas de medición.

Los valores de los nitratos mostraron una más pequeña variabilidad en las tres campañas en las cuales se determinaron los nitratos. Se observa en la Figura 7.2 que en Noviembre de 2006 y en Marzo de 2007 los valores medios y la variabilidad (máximos y mínimos) fueron muy parecidos. Esto quiere decir que los nitratos se comportan de una manera más estable en el sistema lagunar. Únicamente en Julio-Agosto de 2007, la variabilidad fue un poco mayor, lo mismo que el valor medio el cual fue 4 veces más grande.

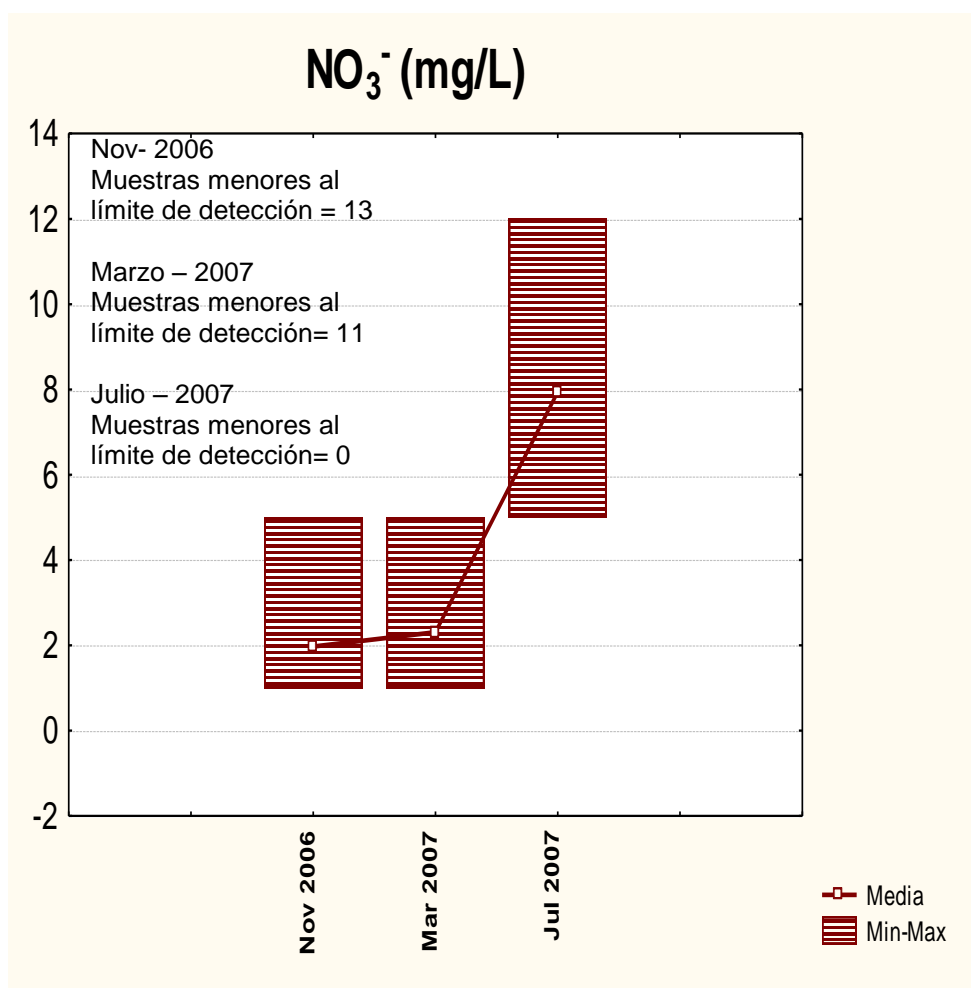


Figura 7.2 Valor medio y variabilidad en tres campañas de medición de nitratos.

El análisis de la variabilidad del nitrito revela que en el mes de Septiembre de 2005, el rango de valores prácticamente no varió y fueron muy pequeños. En los meses de Noviembre de 2006 y en Marzo de 2007 la variabilidad y el valor medio se incrementaron a cerca de 0.5 mg/L, pero en estas dos campañas de medición los valores medio, máximos y mínimos son muy parecidos. En la campaña de medición en el verano de 2007, la variabilidad se incrementó notablemente y el valor medio se duplicó.

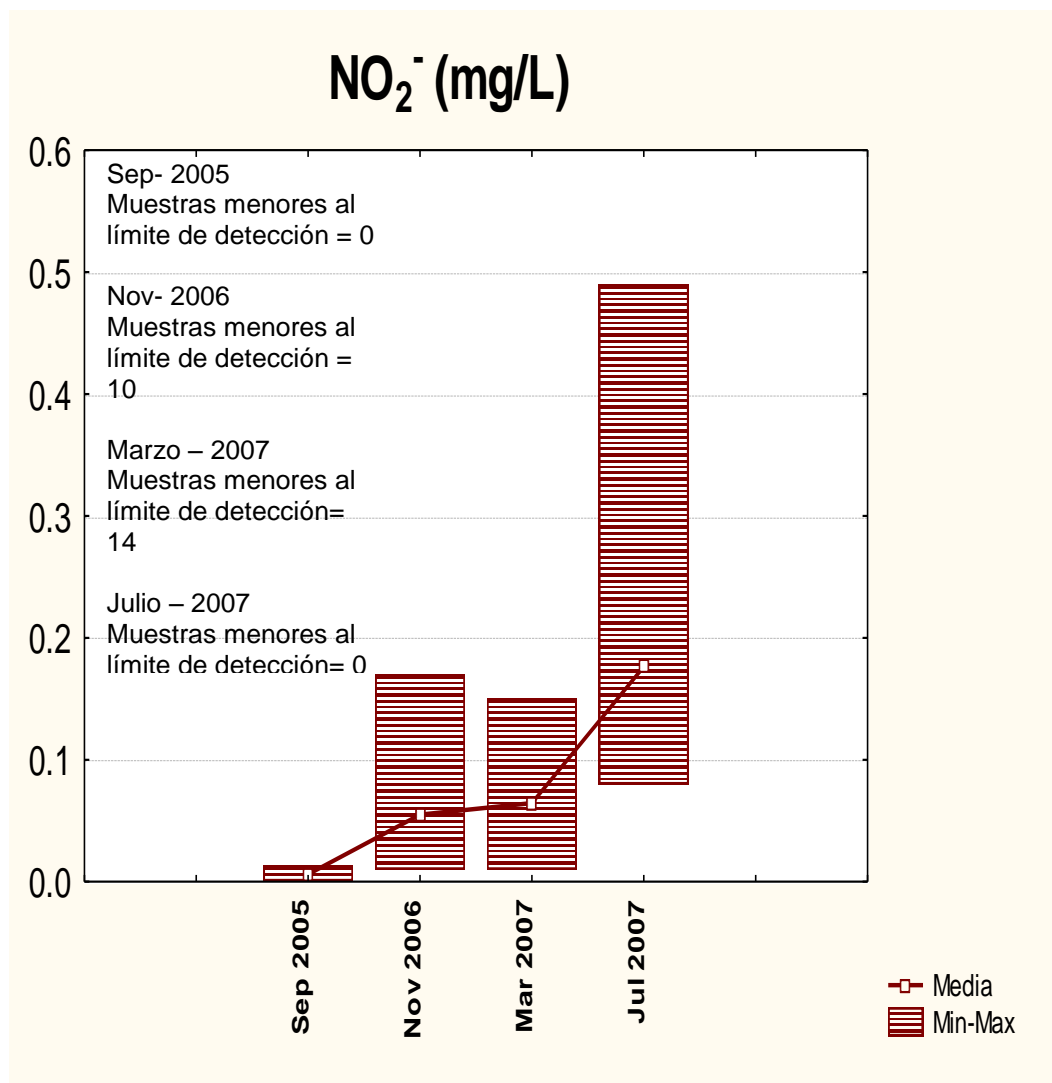


Figura 7.3 Valor medio y variabilidad del nitrito.

Los surfactantes, que son una medida de aguas residuales conteniendo formas de jabón, muestran un variable valor medio a lo largo del año, como puede observarse en la Figura 7.4 en los meses de Noviembre de 2006, Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007. Tanto en las épocas de aún turismo internacional en el mes de Marzo y en el nacional en los meses de Julio y Agosto los valores medio son altos y con gran variabilidad en los máximos y mínimos. La menor variabilidad ocurrió en Noviembre de 2006. Sin embargo, debe ser mencionado que en este mes hubo relativamente muchas muestras de estaciones hidrográficas que estuvieron por debajo de la resolución del aparato de medición.

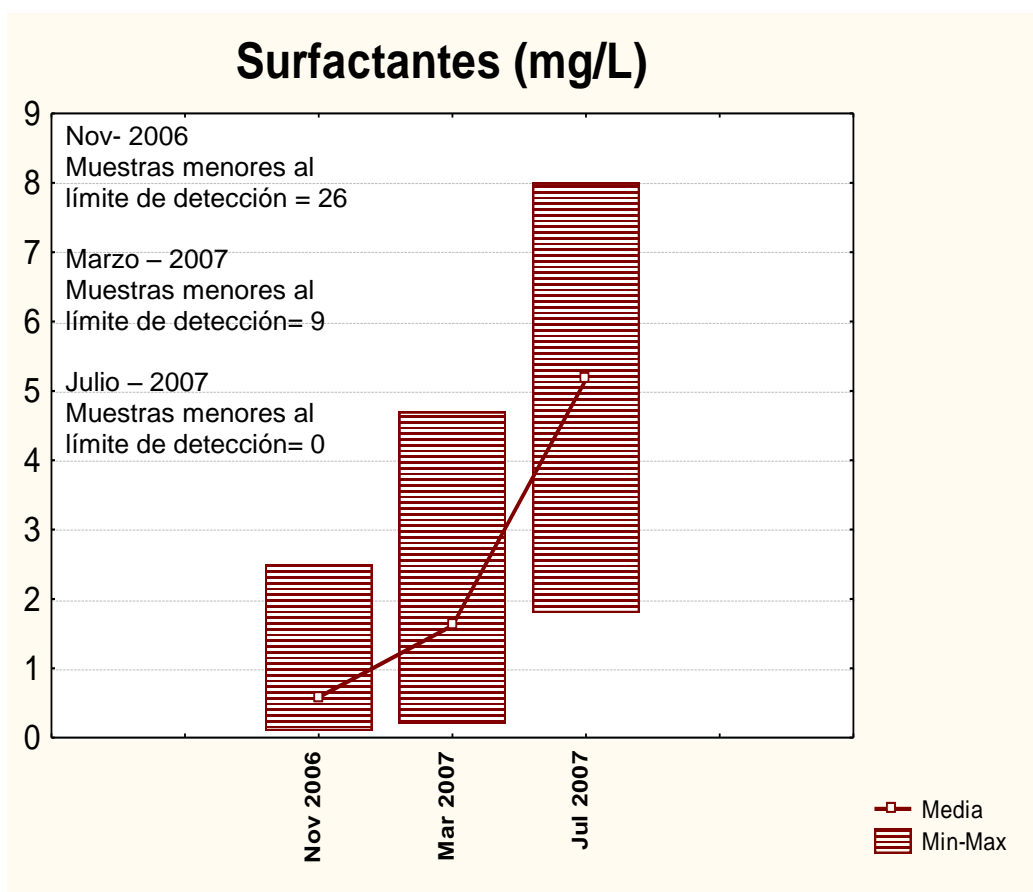


Figura 7.4 Valor medio y variabilidad de los surfactantes.

Los valores medios del amonio, mostrados en la Figura 7.5, revelan que hay pocos cambios en este dato a lo largo del año. Por el contrario, la variabilidad se incremento cronológicamente en las cuatro diferentes campañas de medición. Este dato pudiera revelar en general el incremento en las zonas más críticas del sistema lagunar. Así por ejemplo, en Julio-Agosto de 2007, los valores de amonio variaron de prácticamente cero a 2.5 mg/L.

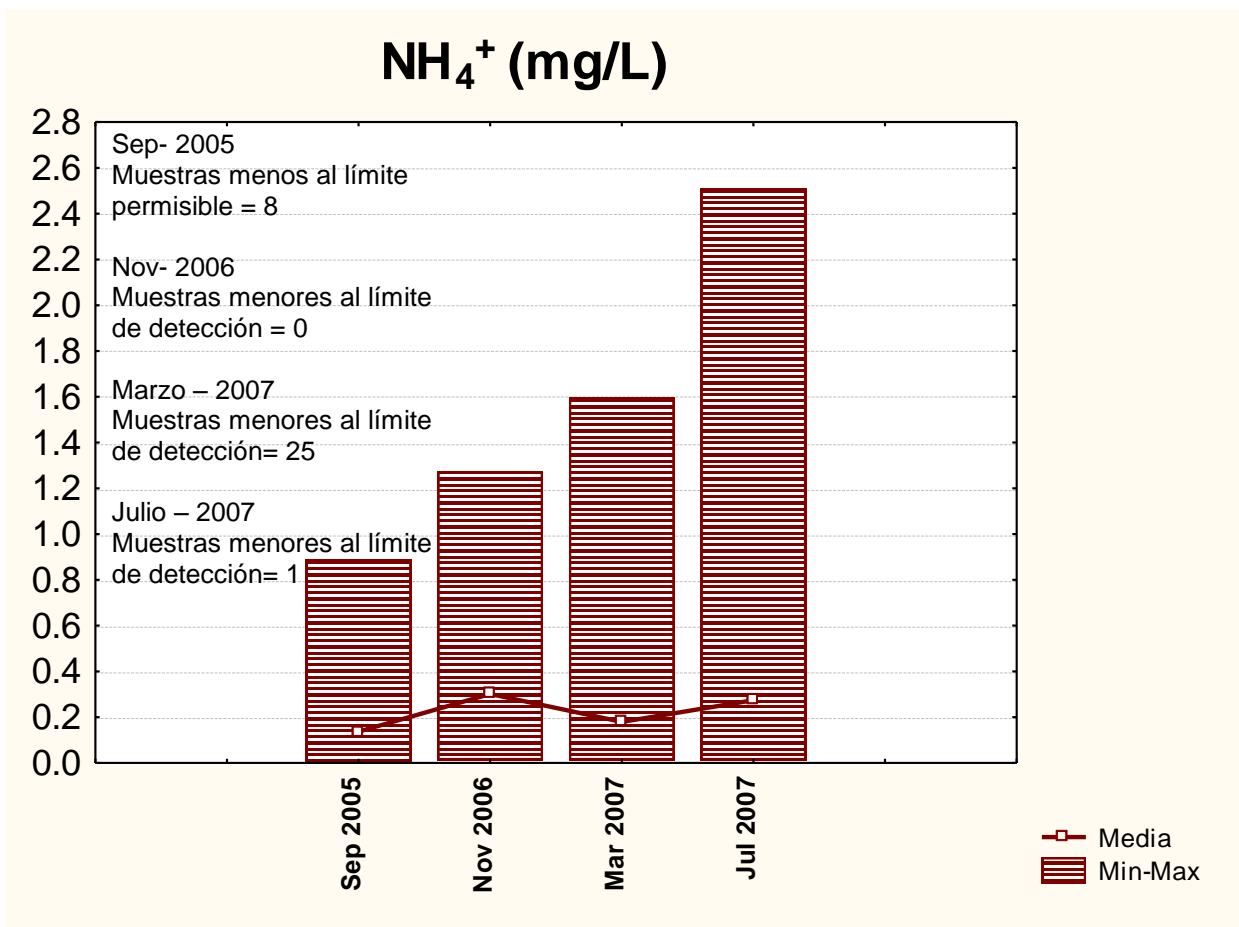


Figura 7.5 Valor medio y variabilidad del amonio.

Los valores medios de temperatura a lo largo del año reflejan el ciclo anual, con máximos en Septiembre y en Julio-Agosto ($31.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y con mínimos en Noviembre y Marzo ($25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). La máxima variabilidad fue observada en el mes de Noviembre de 2006 y la menor en Julio-Agosto de 2007. Estos datos medidos de temperatura indican que los valores medios tienen un rango anual de 6 grados centígrados.

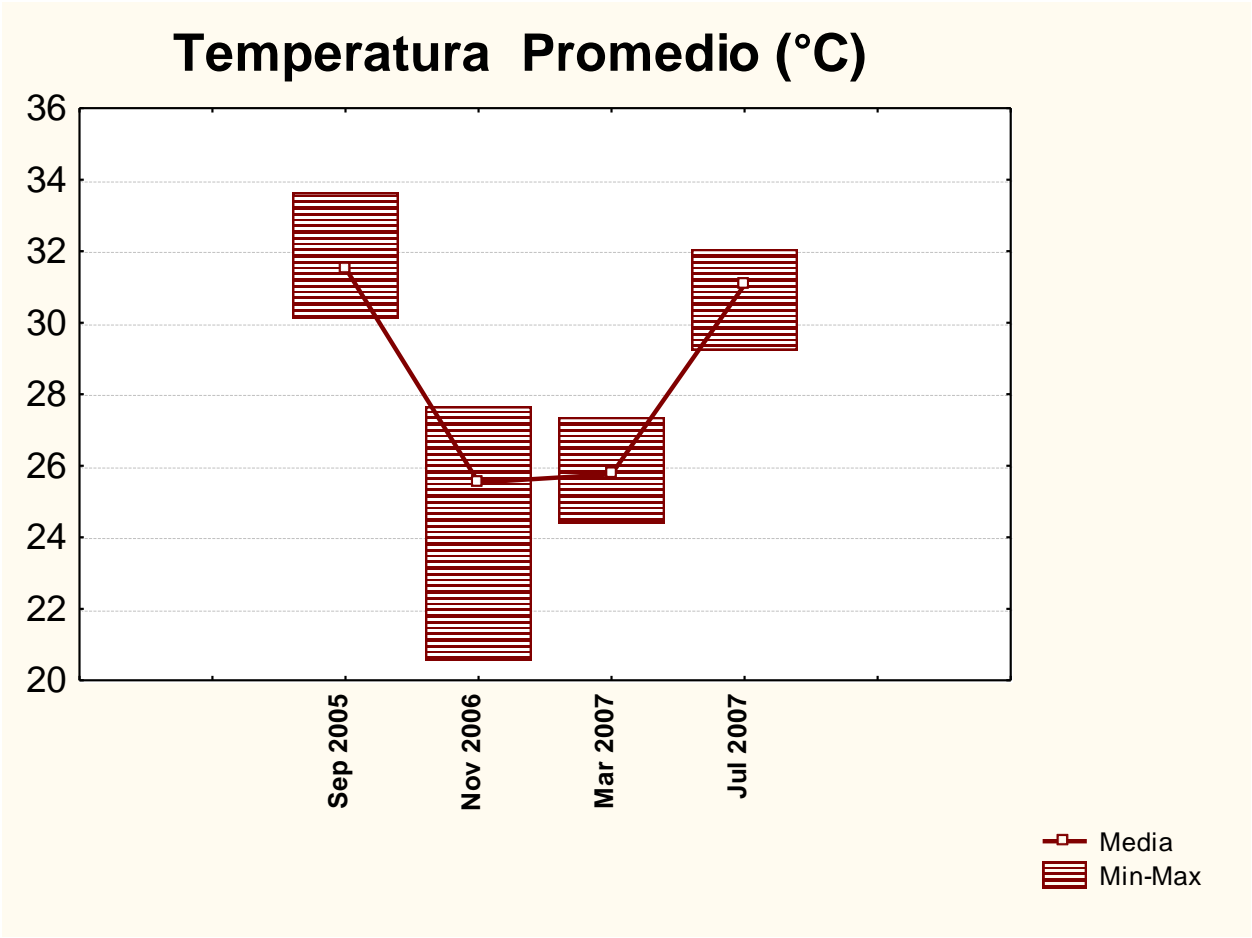


Figura 7.6 Valor medio y variabilidad de la temperatura.

La salinidad muestra una variabilidad bastante estable a lo largo del año, como se puede ver en la Figura 7.7. Los valores máximos y mínimos en los meses de Marzo, Julio-Agosto y Septiembre son muy parecidos con valores de aproximadamente 36 ups. En la campaña de medición de Noviembre de 2006, el valor máximo fue de 32 ups y el mínimo de 19.5 ups. Por lo tanto, muy probablemente en este mes hubo escurrimientos y aportes de agua relativamente dulce a través de los manantiales, ubicados en diferentes partes del sistema lagunar.

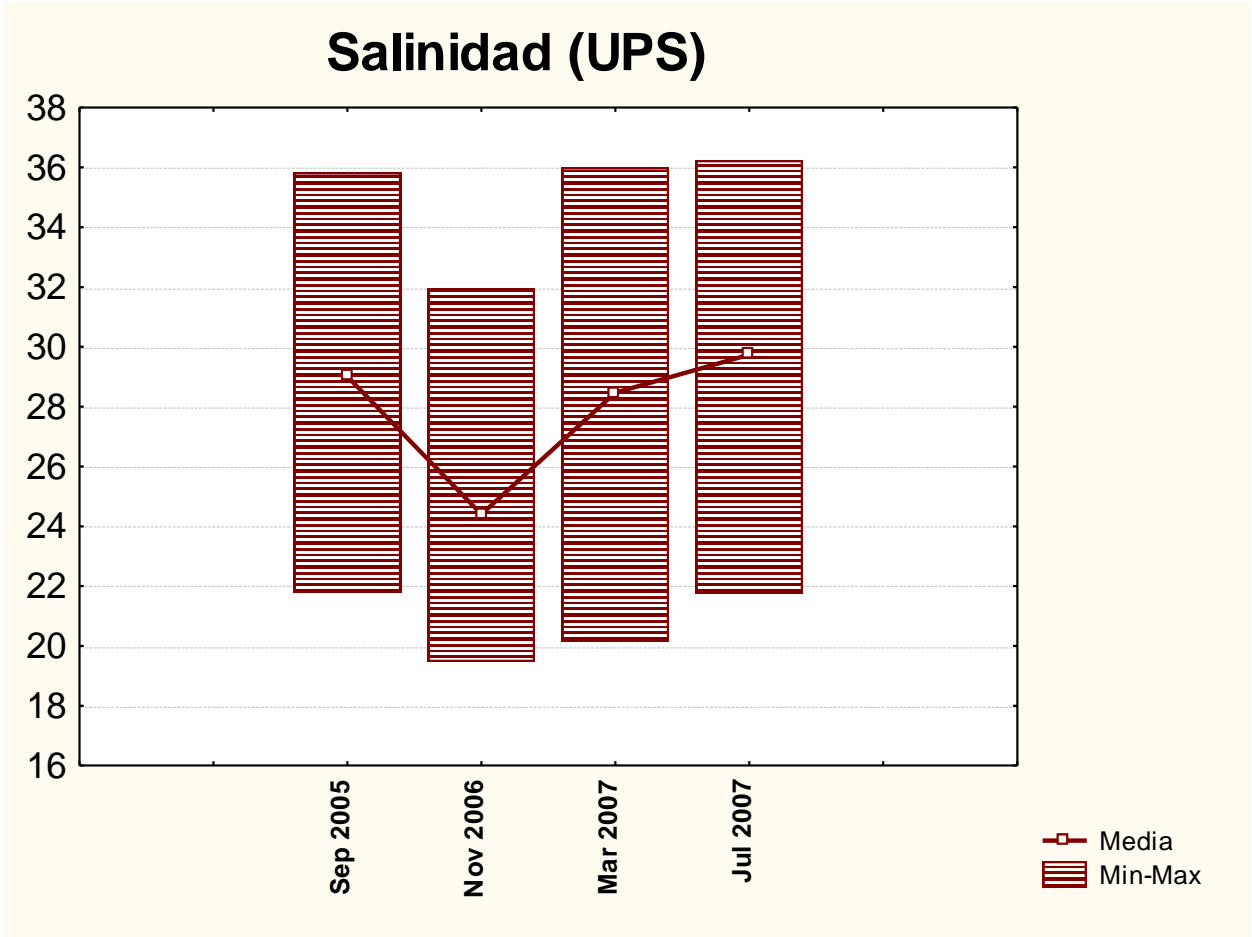


Figura 7.7 Valor medio y variabilidad de la salinidad.

El pH en las campañas de medición de Noviembre de 2006, Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2008, varió entre 7.6 y 8.4 en todo el sistema lagunar (Figura 7.8). Esto significa que las aguas son ligeramente alcalinas. Es conocido que típicamente las aguas marinas tienen un pH de aproximadamente 8.2, mientras que fuentes naturales de agua dulce tienen un pH que varía entre 6.5 y 8.0. De los valores y de la variabilidad se deduce que la influencia del agua de mar, principalmente por la boca norte, es grande. Los valores debajo de 8.0 deben estar relacionados con mediciones de pH en las cercanías de los manantiales de agua.

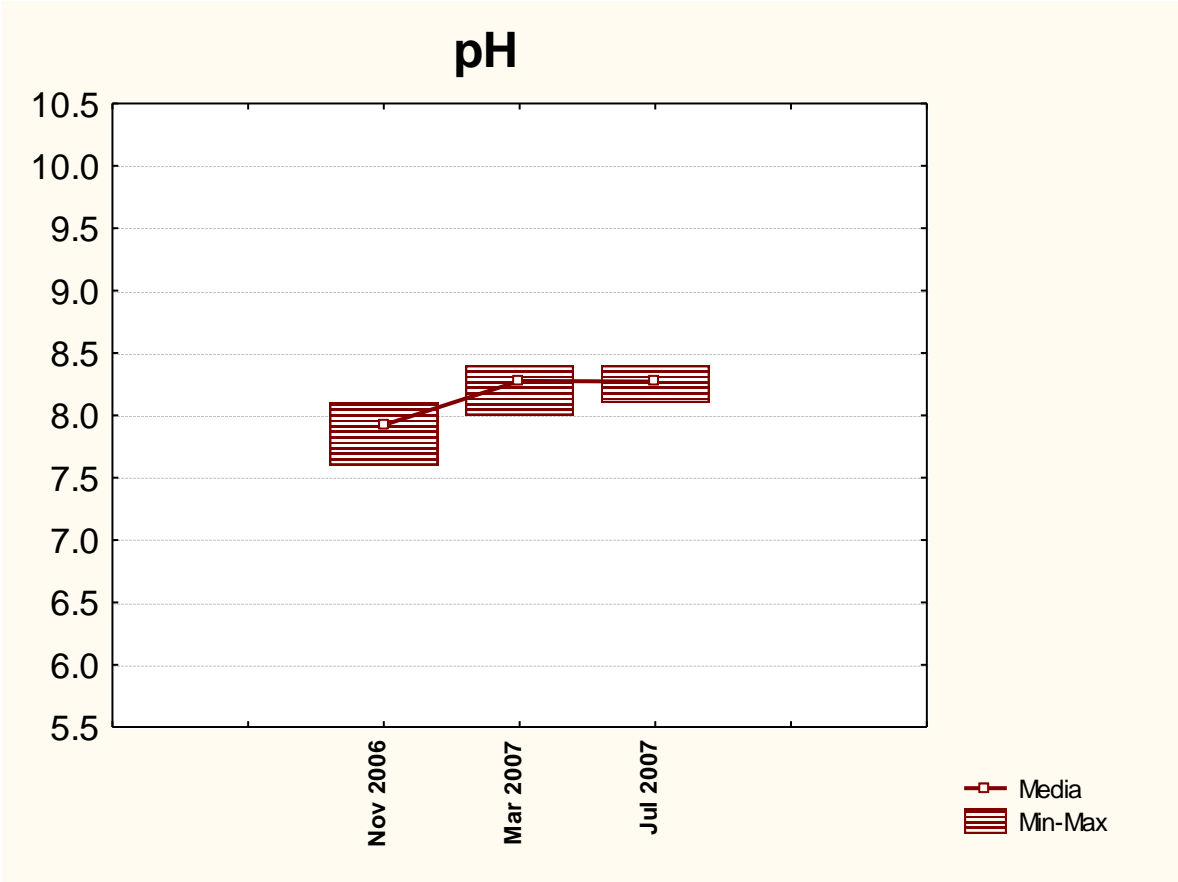


Figura 7.8 Valor medio y variabilidad del pH.

La cantidad de oxígeno disuelto en cuerpos de agua depende mucho de la capacidad de oxigenación por la acción del viento (turbulencia, entrampamiento, rompimiento de oleaje). Se puede observar en la gráfica 7.9 que en Julio-Agosto de 2007, las concentraciones de oxígeno disuelto fueron bastante bajas (1 mg/L) y su variabilidad también. Sin embargo, en las mediciones de Noviembre de 2006 y sobre todo en Marzo de 2007, la variabilidad fue grande con valores entre 7 y 14.5 mg/L.

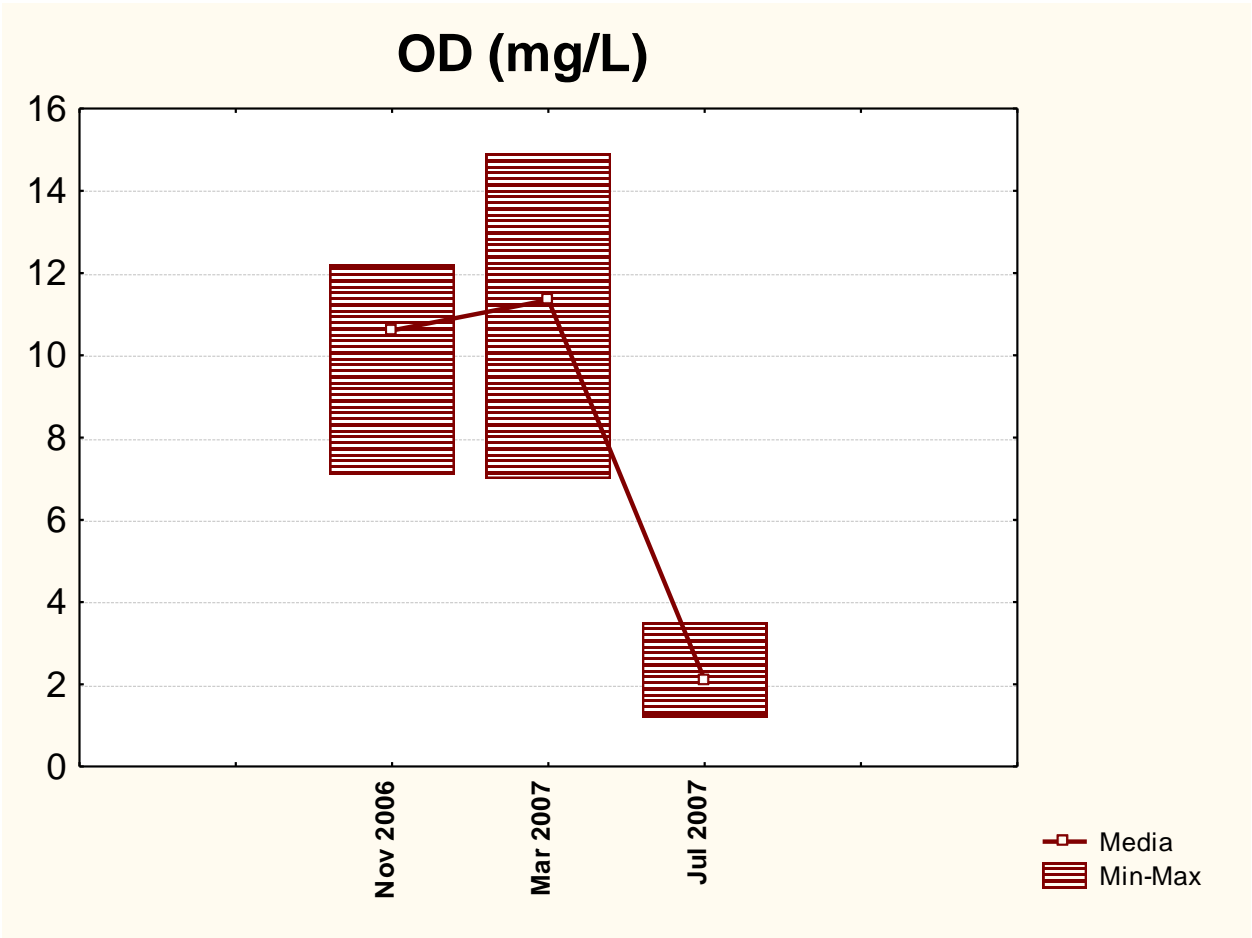


Figura 7.9 valor medio y variabilidad de oxígeno disuelto.

La turbidez puede ser considerada como una medida de la pérdida de transparencia de cuerpos de agua debido a la presencia de materia en partículas suspendida. En la Figura 7.10, se puede observar que en los meses de Noviembre y marzo hubo bastante variabilidad en los valores de turbidez. La razón es que hay zonas muy someras donde la acción del viento es más efectiva en enturbiar el agua y además existen manantiales de aguas subterráneas que también traen material disuelto. De la posición de los valores medios, se infiere que la mayor parte de los valores medidos están entre 2 y 4 FTUs.

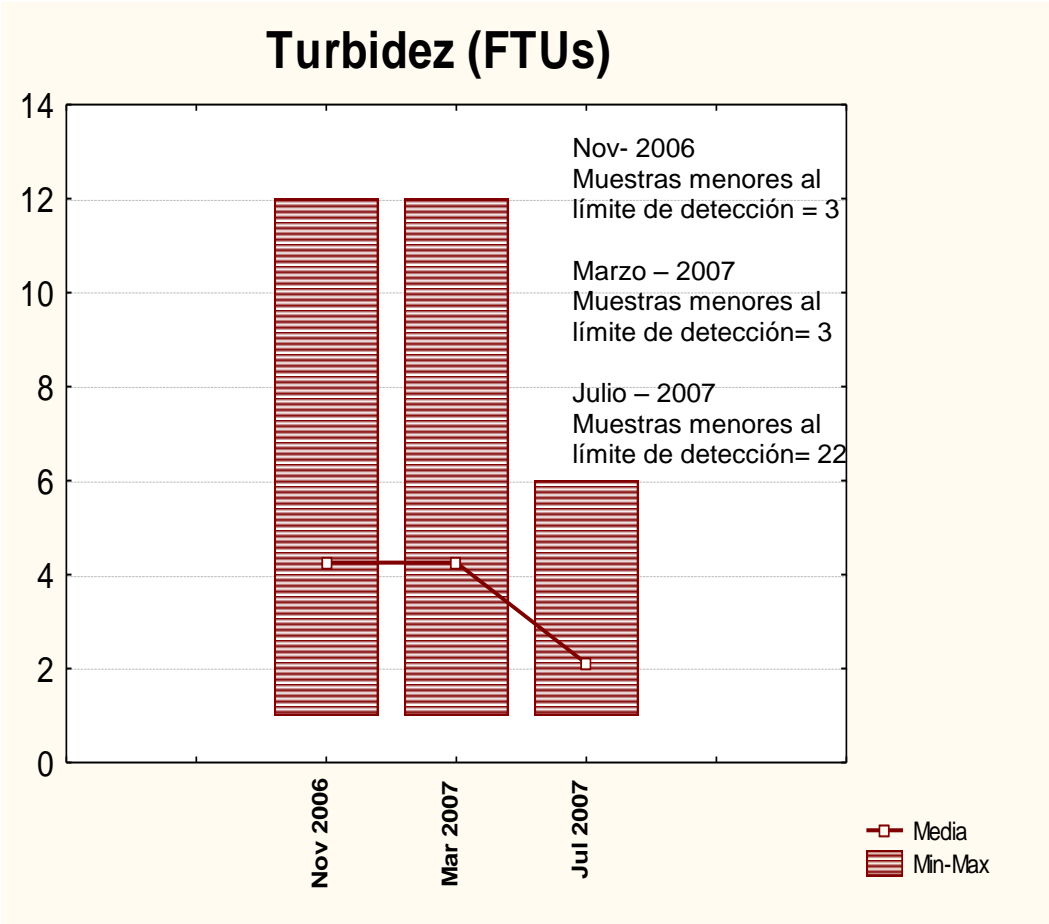


Figura 7.10 Valor medio y variabilidad de la turbidez.

Los rangos de variabilidad de la concentración de cadmio en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez son del mismo orden (Figura 7.11). En Noviembre de 2006 y en Julio-Agosto de 2007 los valores variaron entre 0.01 y .13 mg/L, con valores medios entre 0.04 y 0.12 mg/L. En marzo de 2007, el rango en las concentraciones de cadmio varió entre 0.06 y 0.16 mg/L. Estos rangos en las diferentes épocas del año parecen estar conectadas con las estaciones de alta actividad turística.

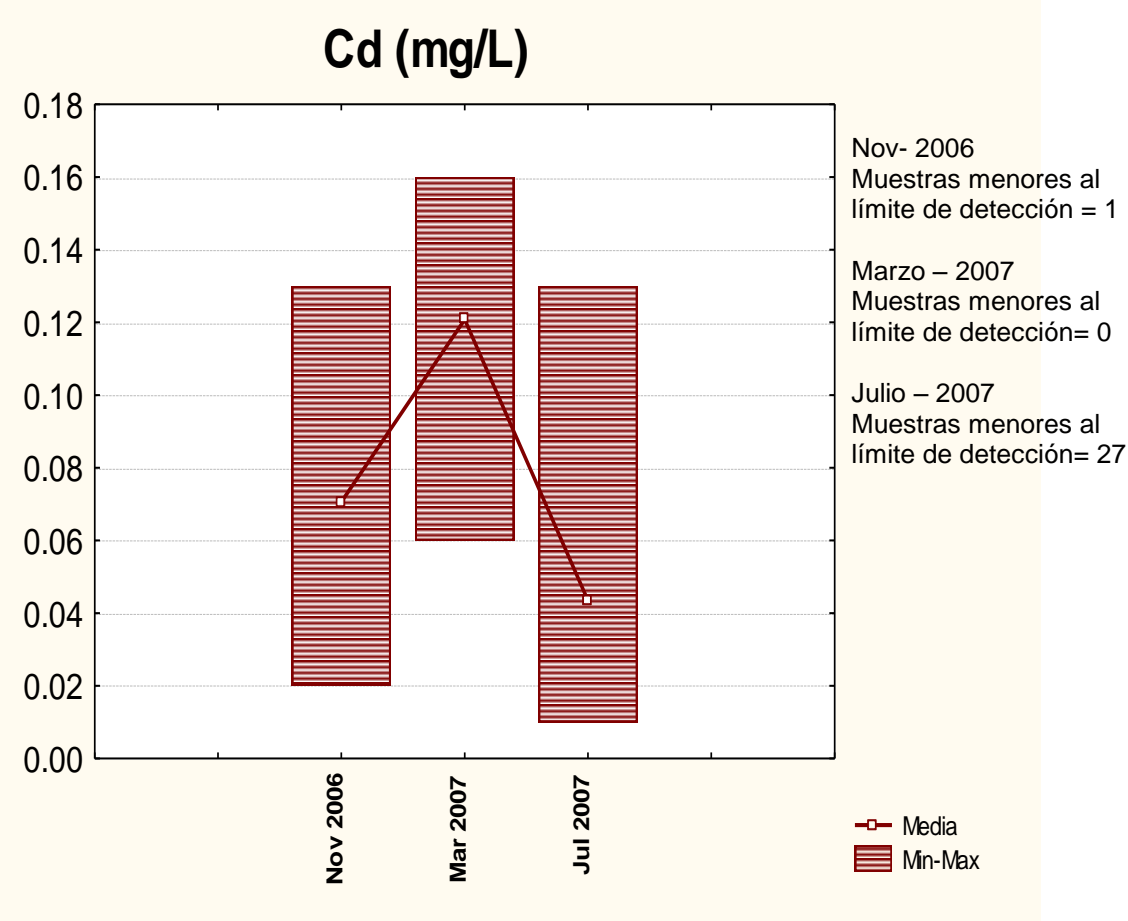


Figura 7.11 valor medio y variabilidad del cadmio.

Los valores medios, máximos y mínimos, mostrados en la Figura 7.12, caen en la parte central de la variabilidad. Esto es interpretado como que la mayoría de las observaciones en las estaciones hidrográficas tienen un valor cercano al medio y con poca variabilidad. Los valores medios están en el rango de 0.1 y 0.15 mg/L, teniéndose el máximo valor en Marzo de 2007.

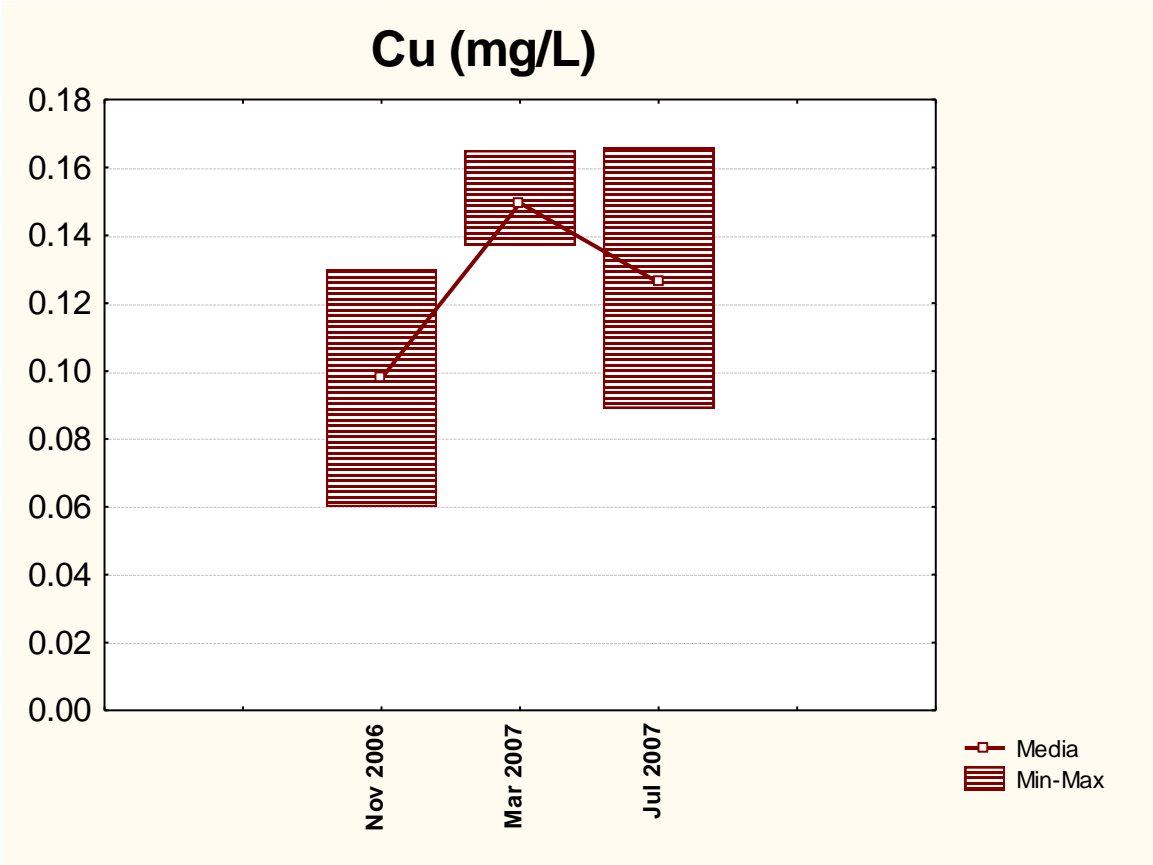


Figura 7.12 Valor medio y variabilidad del cobre.

La concentración de hierro en el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez mostro gran variabilidad, como puede verse en la Figura 7.13. En el mes de Noviembre de 2006, encontramos que las concentraciones variaron entre 0.075 y 0.45 mg/L, en Marzo de 2007 varió entre prácticamente 0.0 y 0.30 mg/L. La menor variabilidad fue encontrada en Julio-Agosto de 2007, aunque con valores relativamente altos (0.32 – 0.47 mg/L).

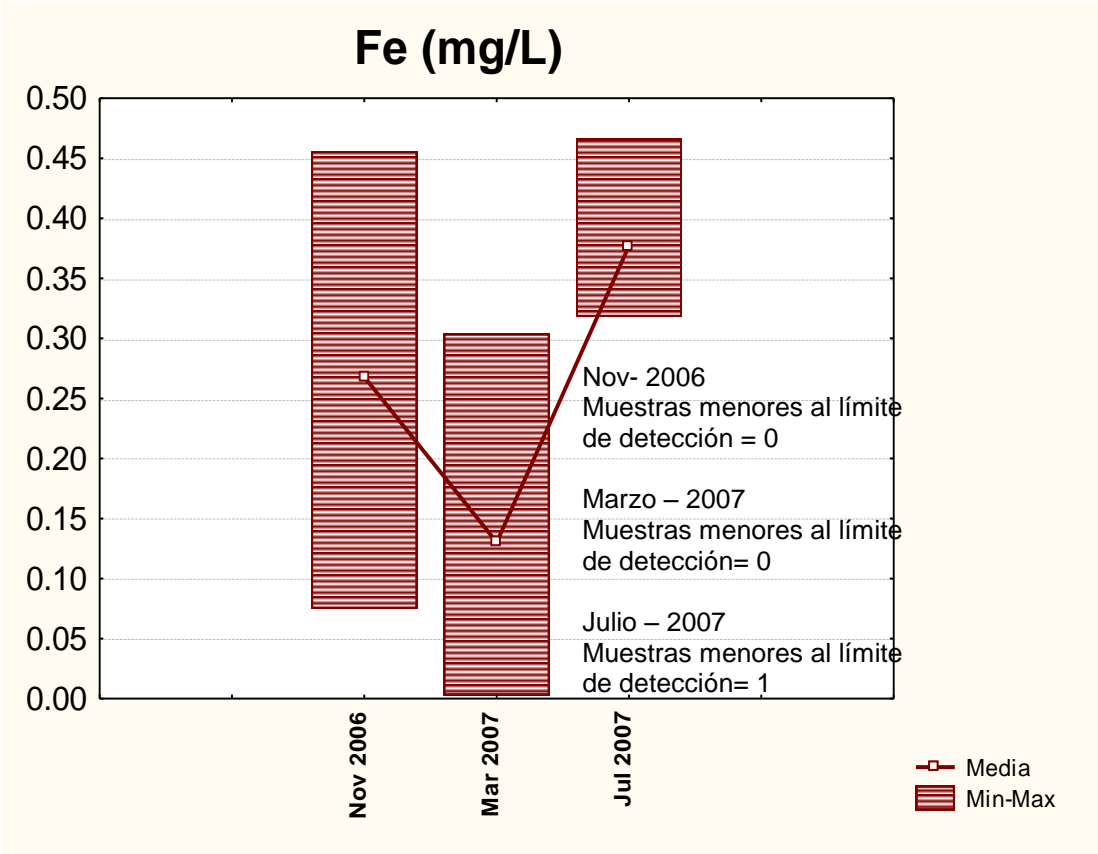


Figura 7.13 Valor medio y variabilidad del hierro.

Las concentraciones de plomo mostraron poca variabilidad en los meses de Marzo de 2007 y Julio-Agosto de 2007, aunque esta variabilidad cae en diferentes rangos de valores (Figura 7.14). En Noviembre de 2006, la concentración de plomo tuvo un valor mínimo de 0.88 mg/L y un máximo de 2.4 mg/L. Estos valores son demasiado altos para un sistema lagunar costero y algo debe hacerse para reducirlos.

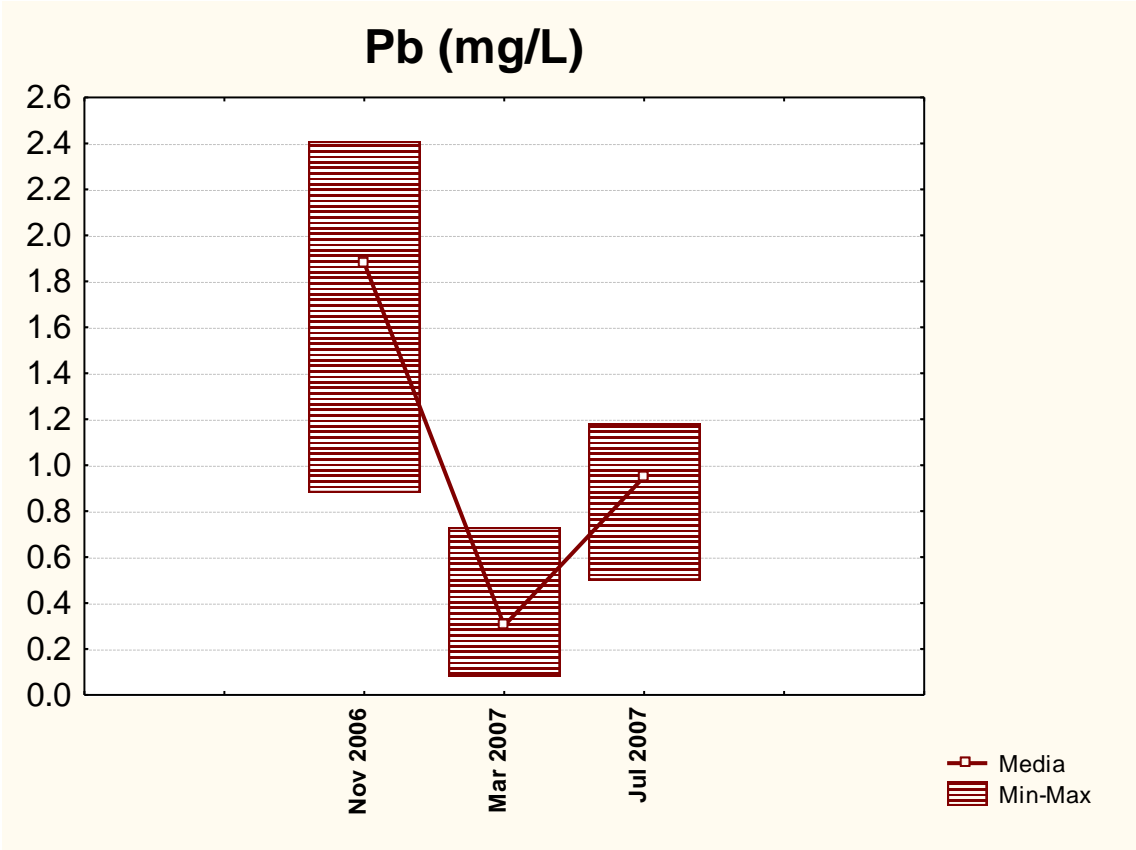


Figura 7.14 Valor medio y variabilidad del plomo.

En los meses de Noviembre de 2006 y en Marzo de 2007, las concentraciones medidas de zinc mostraron poca variabilidad, con valores en el rango de 0.0 y 0.19 mg/L (Figura 7.15). En la campaña de medición de Julio-Agosto de 2007, se encontró una mayor variabilidad con un rango entre 0.0 y 0.95 mg/L. Pero debe mencionarse que este rango fue encontrado en unas pocas estaciones, donde los valores estuvieron por encima de la resolución del aparato de medición.

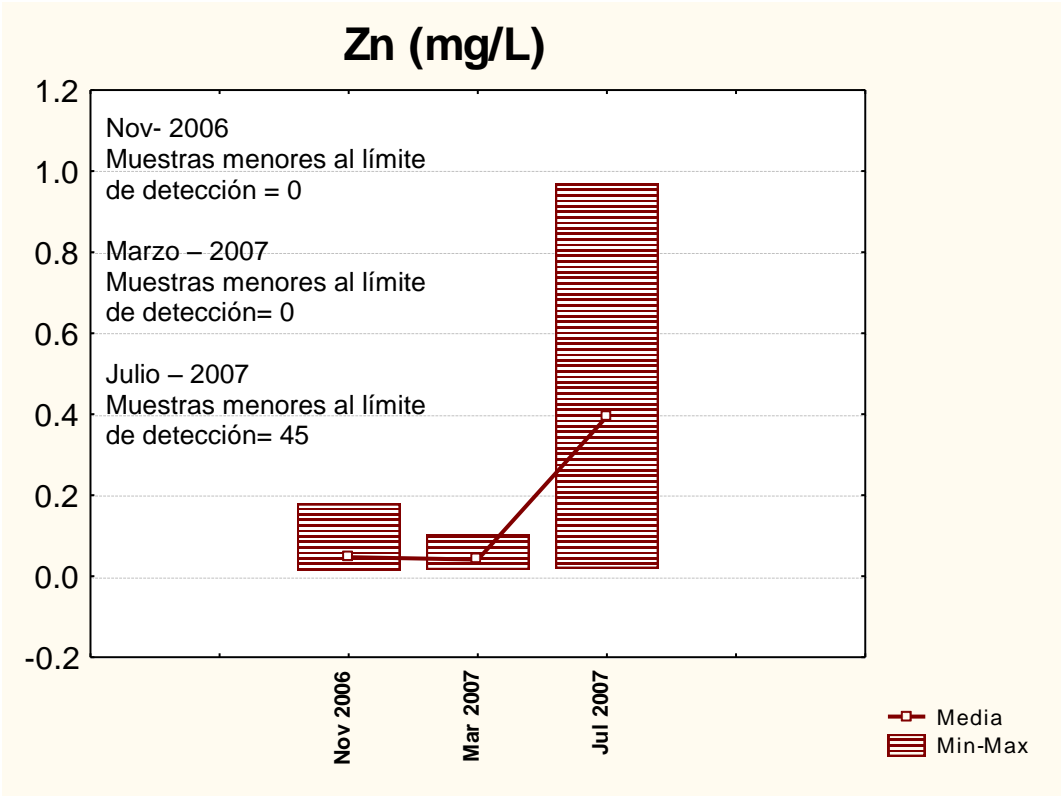


Figura 7.15 Valor medio y variabilidad del zinc.

CAPITULO 8

Microbiología

Aprovechando las intensas campañas de medición y considerando que el sistema sufre una alta presión por la contaminación derivada de la actividad turística y por el crecimiento de la ciudad de Cancún, se procedió a evaluar la diversidad microbiana en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. Las circunstancias permitieron tomar muestras de agua antes y después de que el huracán Wilma azotara esta región de la Península de Yucatán en Octubre de 2005. Para este estudio microbiológico se aplicaron técnicas basadas en rRNA de 61 genes clonados 16S ribosomal RNA (rRNA) que fueron seleccionados y analizados. Es interesante mencionar que los resultados muestran que dos terceras partes de las secuencias pertenecen al grupo *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes*, en particular el phylum *Bacteroidetes*. Menos de un tercio de las secuencias pertenecen al grupo *Proteobacteria* y un número menor a la *Cyanobacteria* y a la clase *Bacilli*. La población bacteriana no muestra diferencias en las diferentes localizaciones, con la excepción de una amplia variedad de *Bacteroidetes*, de *proteobacteria* y *bacilli* que fueron encontradas en las muestras después del desastre.

INTRODUCCIÓN

Para los fines del estudio bacteriológico del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, es conveniente mencionar que consiste de cuatro lagunas interconectadas con dos sistemas de canales comunicados con el Mar Caribe. Se han realizado algunos estudios sobre aspectos físicos y químicos de la región, en los que se le ha dado énfasis a la hidrografía y sólo algunos pocos aspectos de la hidrodinámica, flora y fauna [1][2]. Una de las características más interesantes es la presencia de agua subterránea fluyendo hacia la laguna en diferentes puntos del sistema. Los flujos provenientes de estos manantiales, ubicados en el fondo de la laguna, varían su intensidad según la época del año. Esta clase de manantiales son bien conocidos en la Península de Yucatán, caracterizada por calizas. Adicionalmente, se ha demostrado en los capítulos anteriores que el sistema lagunar presenta problemas serios de contaminación como un resultado del crecimiento de la ciudad de Cancún y particularmente de la zona hotelera. Hay fuertes evidencias de aportes de aguas residuales o aguas negras que han degradado considerablemente al sistema lagunar. El drenaje de sustancias orgánicas e inorgánicas parecen estar afectando decididamente la calidad del agua de la laguna. Los manantiales de agua, es decir, el flujo de agua subterránea fluyendo hacia la laguna, una contaminación incrementándose por la actividad turística y la interacción con el mar abierto a través de dos bocas proporcionan razones suficientes para realizar un estudio profundo de la fauna bacteriológica del sistema lagunar. Más aún, el huracán Wilma, uno de los más intenso jamás registrados en el Océano Atlántico, devastó amplias zonas de la

Península de Yucatán en Octubre de 2005, inclusive la laguna de Nichupté Bojórquez (Tabla 8.6). La ola de tormenta asociada al huracán inundó el sistema lagunar transportando gran cantidad agua de mar y a través de procesos turbulentos causó una mezcla vertical muy intensa. Como resultado de este fenómeno, las condiciones hidrográficas cambiaron radicalmente, esto sugiere el análisis bacteriológico también después del huracán.

En la actualidad la laguna presenta un alto grado de eutroficación en algunas áreas debido a las actividades antropogénicas que contaminan el sistema y a la baja capacidad de intercambio en algunos cuerpos de agua. Hasta donde sabemos, no hay información referente a la composición de microorganismos nativos de este complejo lagunar y el impacto que puedan tener en esta región altamente turística.

La finalidad principal de este trabajo de investigación bacteriológico es la identificación de la diversidad de microbios en las aguas del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez. Se analizaron los genes 16S rRNA con el método de huellas dactilares “fingerprinting-RFLPs” (restriction fragment length polymorphism), clonación, secuenciación DNA y taxonómicamente clasificada por el método de similaridad en secuencias. El trabajo esta enfocado al análisis de muestras colectadas antes y después del huracán Wilma que azotó la región entre el 15 y el 25 de Octubre de 2005. El huracán Wilma alcanzó la categoría 5 en la escala de Saffir-Simpson (SSHS), siendo el huracán más intenso jamás registrado en el océano Atlántico. La presión atmosférica registrada en el centro del huracán fue la más baja registrada. Estas

condiciones provocaron una devastación y un movimiento de aguas enorme en zonas costeras de la Península de Yucatán. Esto parece verse reflejado significativamente en los resultados bacteriológicos de los ecosistemas que se discuten en los párrafos siguientes (Pasch et al., 2006).

Materiales y métodos en general

Para el análisis de la caracterización molecular de bacterias nativas del complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez, se realizaron muestreos de esta zona en diferentes épocas del año (septiembre y diciembre) y en diferentes puntos.

Se realizó un análisis comparativo del RNA ribosomal 16S de bacterias para encontrar regiones conservadas que se encuentren flanqueando una región variable en las diferentes especies de bacterias. Con esta región conservada, se diseñaron oligonucleotidos que permiten amplificar esta región variable mediante la técnica de reacción en cadena de la polimerasa (PCR), la cual genera un número de copias de forma exponencial del fragmento de la región variable amplificada, este fragmento fue ligado en el vector Topo TA Clonning for secuencias, con el producto de esta ligación se realizó una transformación genética por choque térmico en células de *E. coli* (Topo 10) químicamente competentes, generando múltiples clonas que contienen el fragmento amplificado. Estas clonas fueron sometidas de forma individual a otra reacción de PCR, en la cual se amplificó una vez más la región variable para posteriormente ser digerida con dos diferentes enzimas de restricción (*Msp* I y *Bsa* II), generando

diferentes patrones de restricción, obteniendo de esta forma un resultado preliminar de variabilidad genética. Las clonas que presenten patrones de restricción diferentes, indican que se tratan de bacterias de diferente especie o género y por tanto fueron secuenciadas en el Laboratorio Nacional de Genómica del Cinvestav-Irapuato.

Diseño de oligonucleotidos

UBF 5´ AGAGTTTGATCCTGGCTGAG 3´

1492R 5´ GGTTACCTTGTTACGACTT 3´

M13 F 5´ -GTAAAACGACGGCCAG-3´ (Topo 4)

M13R 5´ GAGGAAAGAGGTATGAC 3´ (Topo 4)

Enzimas seleccionadas

Msp I

Bsa I

Tabla 8.1 Muestras a analizar.

Numero de muestra	Localización	Características
1		
4		
6		
11		
12		
18		Alta presencia de Amonio
31		Agua Naciente
51		Agua Naciente
57		Alta presencia de Amonio
85		Agua Naciente

Aislamiento de DNA

Este protocolo puede ser modificado dependiendo de la cantidad de células (volumen o colonia) este protocolo es para 20 mL de medio.

1. Centrifugar a 12,000 rpm por 15 - 20 min. a 4°C y decantar el sobrenadante.
2. Resuspender el paquete celular en 0.5 mL de solución salina-EDTA pH 8.0.
3. Adicionar 60 μ L de lisozima a 10 μ g/ μ L
4. Adicionar 30 μ L de proteinasa K a 10 μ g/ μ L
5. Adicionar 5 μ L de Rnasa A 0.5 10 μ g/ μ L
6. Incubar a 37°C por 2 hrs.
7. Adicionar 100 μ L de SDS 10%
8. Adicionar 400 μ L de Acetato de Sodio 5 M pH 8.0
9. Incubar a 60°C por 10 min.
10. Adicionar 1 volumen de Cloroformo:alcohol isoamilico (24:1), mezclar gentimente
11. Centrifugar a 10, 000 rpm por 5 min.
12. Recuperar el sobrenadante en un tubo nuevo
13. Adicionar 1 volumen de alcohol isoamílico mezclar por inversión e incubar 1 hr a -20°C.
14. Si el DNA es visible, recuperar por pipeteo, de no ser así, centrifugar a 13000 rpm por 15 min a 4°C
15. Lavar con etanol al 70% y centrifugar brevemente.
16. Resuspender el DNA en H₂O
17. Medir la OD a 260 nm.

PCR

Tabla 8.2 Reactivos y cantidades

Reactivo	Cantidad (μL)
H ₂ O	19.2
Buffer de Reacción 10X	2.5
dNTP's 2.5 mM	0.5
Oligo UBF 10pM	0.5
Oligo 1492R 10pM	0.5
MgCl ₂ 50 mM	1.5
Enzima Taq	0.2
DNA	1
Volumen Total	25

Condiciones de PCR UBF-1492R

Termociclador Biorad:

94 °C 5 min

27 ciclos

➤ 94 °C 1.0 min

➤ 60 °C 1.0 min

➤ 72 °C 2.0 min

Ext. final 72°C 10 min.

Purificación de los fragmentos de PCR

Los productos de PCR fueron purificados con el kit Qiaquick Gel Extraction de Qiagen.

1. Cortar el fragmento de DNA del gel de azarosa y pesar el fragmento.
2. Adicionar 3 volúmenes de buffer QG por volumen de gel.

3. Incubar a 50°C por 10 min. (o hasta que el gel se disuelva) mezclar por inversión cada 2 min.
4. Adicionar 1 volumen de isopropanol a la mezcla. (esto incrementa el rendimiento de fragmentos de DNA entre 500 pb – 4 kb)
5. Pasar esta mezcla a la columna.
6. Centrifugar a 13,000 rpm por 1 min.
7. Descartar el filtrado y colocar la columna en el mismo tubo colector.
8. Adicionar 750 µL de buffer PE a la columna Qiaquick.
9. Centrifugar por 1 min. A 13, 000 rpm.
10. Descartar el filtrado y centrifugar nuevamente 1 min a 13,000 rpm.
11. Repetir el paso 11.
12. Transferir la columna a un tubo estéril.
13. Eluir el DNA adicionando un volumen de 30 µL de buffer EB (10 mM Tris-HCl pH 8.5) en el centro de la columna, reposar 1 min.
14. Centrifugar 1 min a 13, 000 rpm.
15. Almacenar a – 20°C, hasta su uso.

Clonación de Insertos en el vector PCR TOPO 4

Los productos de purificados de PCR, fueron clonados en el vector PCR TOPO 4, como se describe a continuación.

Preparar la siguiente reacción:

Reactivo	Cantidad (μ L)
Producto de PCR	1
Solución salina	1
Agua m \grave{a} . estéril	3
Vetor Topo-4	1
Volumen total	6

La mezcla de reacción fue colocada en el termociclador a 23 °C por 2:30 min., e inmediatamente fue colocada en hielo, para proceder con la transformación.

Productos transformantes: muestras 1, 4, 6, 11, 12, 18, 31, 51, 57, 85.

Transformación de células E. coli Topo 10 químicamente competentes

La transformación se realizó por choque térmico.

1. Descongelar el vial de células químicamente competentes topo 10.
2. Agregar 2 μ L del producto de la ligación.
3. Incubar a 42°C por 45 seg.
4. Incubar en hielo por 10 min.
5. Adicionar 250 μ L de medio SOC
6. Incubar a 37°C y 200 rpm por 1 hora.
7. Sembrar en placa de LB com Kanamicina (50 mg/ml.).
8. Incubar a 37°C 12-16 hr.

Análisis de clonas

Para seleccionar las clonas que contienen el fragmento clonado se realizó un PCR-Colonia como se describe a continuación.

Se utilizó el oligonucleotido UBF del 16S con el M13R del TOPO-4, esto para amplificar exclusivamente fragmentos clonados en TOPO-4 expresados en E. coli Topo 10.

Tabla 8.3 Condiciones para PCR-Colonia UBF-M13R.

Reactivo	Cantidad (μ L)
H ₂ O	19.2
Buffer de Reacción 10X	2.5
dNTP's 2.5 mM	0.5
Oligo UBF 10pM	0.5
Oligo M13R 10pM	0.5
MgCl ₂ 50 mM	1.5
Enzima Taq	0.2
DNA	Muestra tomada por picadura de la clona
Volumen Total	25

94 °C 10 min
 35 ciclos
 ➤ 94 °C 1.0 min
 ➤ 60 °C 1.0 min
 ➤ 72 °C 2.0 min
 Ext. final 72°C 10 min.

Digestión Enzimática del PCR- Colonia

El producto de PCR-Colonia fue digerido con dos diferentes enzimas, Msp I y Bsa JI, como se describe a continuación.

a) Para el caso de la enzima Bsa JI

Características de la enzima:

2500 U/ml

Temp. 60°C

Tabla 8.4 Muestras incubadas a 60°C.

Reactivo	Cantidad (μL)
Agua mq estéril	8.1
NEB buffer 2 10X	1.5
Enzima <i>Bsa JI</i>	0.4
Producto de PCR-Colonia	5
Volumen total	15

Las muestras fueron incubadas a 60°C por 2 hr.

b) Para el caso de *Msp I*

Características de la enzima

20,000 U/ml

Temp. 37°C

Tabla 8.5 Muestras incubadas a 37°C.

Reactivo	Cantidad (μL)
Agua mq estéril	8.4
NEB buffer 2 10X	1.5
Enzima <i>Msp I</i>	0.1
Producto de PCR-Colonia	5
Volumen total	15

Las muestras fueron incubadas a 37°C por 2 hr.

Extracción de DNA

De las muestras analizadas se logró extraer el DNA de los microorganismos presentes en las muestras de agua tomadas del complejo lagunar.

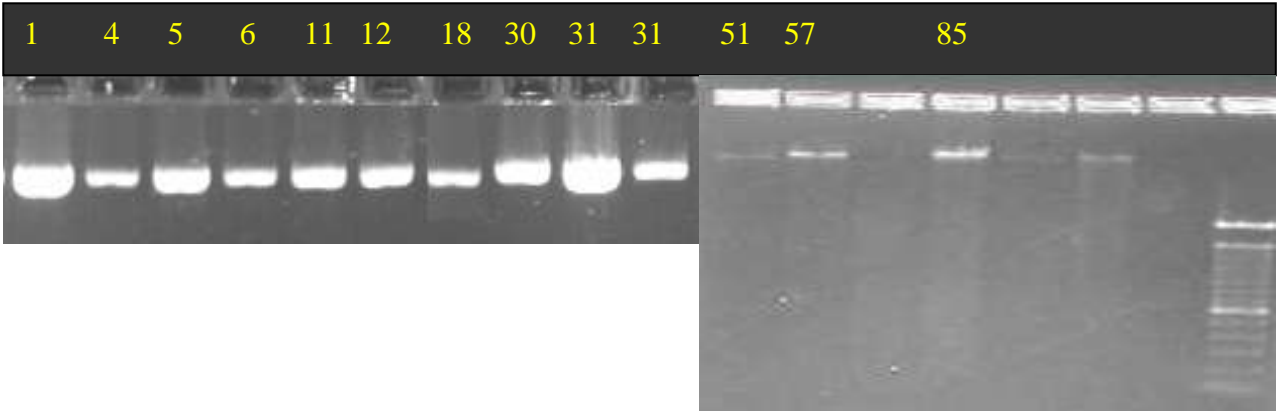


Figura 8.1 DNA de los microorganismos.

Amplificación del 16 S por PCR

De cada muestra se logró obtener DNA genómico de los microorganismos presentes, se realizó la amplificación de los ribosomales 16s, por PCR

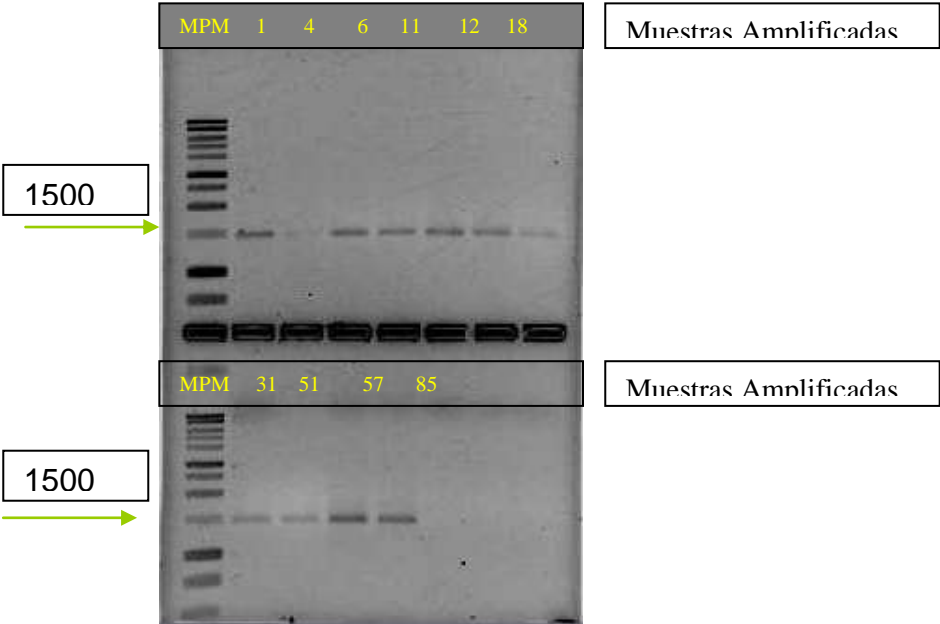
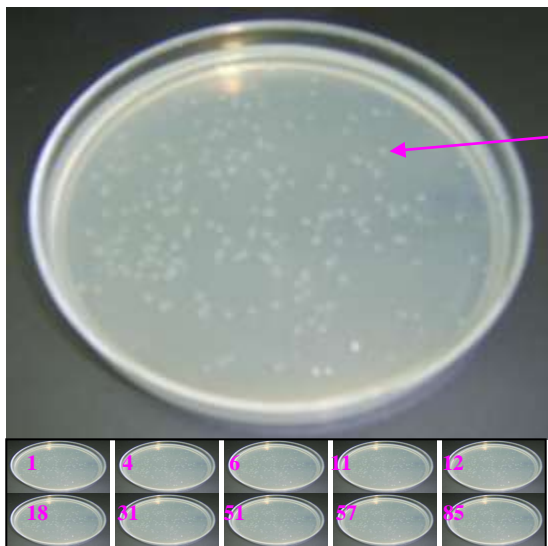


Figura 8.2 Amplificación

Ligación y transformación

El producto de PCR de cada una de las muestras fue clonado en el Plasmido PCR-Topo 4, La figura es un ejemplo de una de las placas que contiene las clonas transformantes.



De cada una de estas clonas contiene el fragmento de RNAr 16S de alguno uno de los diferentes microorganismos, presentes en las muestras de agua.

Figura 8.3 Ligación y transformación

PCR- Colonia

De cada clona se toma una muestra y se realiza el PCR.

Las bandas a la altura de 1600 pb, indican que efectivamente se trata de un fragmento del 16s clonado en el vector PCR- TOPO-4; La figura muestra el resultado del PCR-Colonia de la muestra 1, de la misma forma se hizo para las otras muestras.

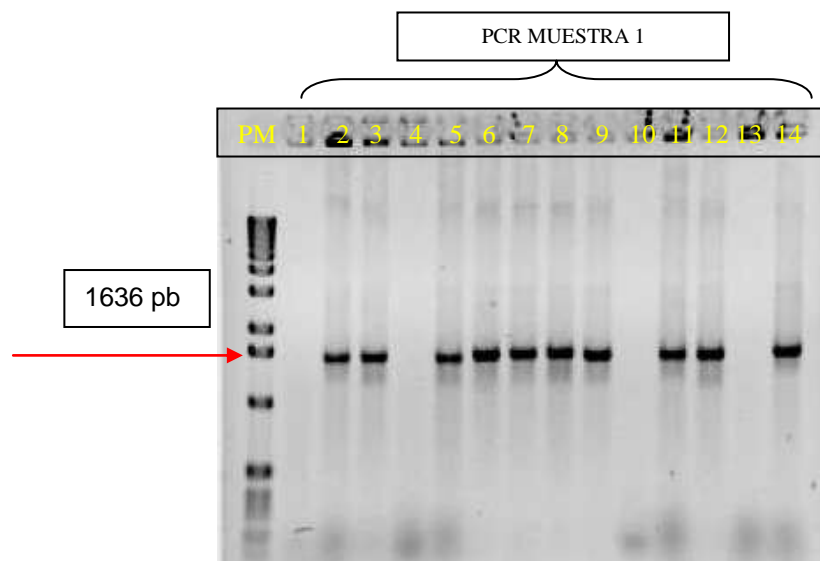


Figura 8.4 Colonia PCR.

Análisis con enzimas de restricción

A continuación se muestra el análisis realizado a las clonas que fueron amplificadas en el PCR-Colonia, cada cuadro de distinto color indica que puede tratarse de una

especie o un genero distinto, en cada una de las muestras analizadas. Se ejemplifica el análisis para la muestra 1, se hizo lo mismo para todas las muestras.

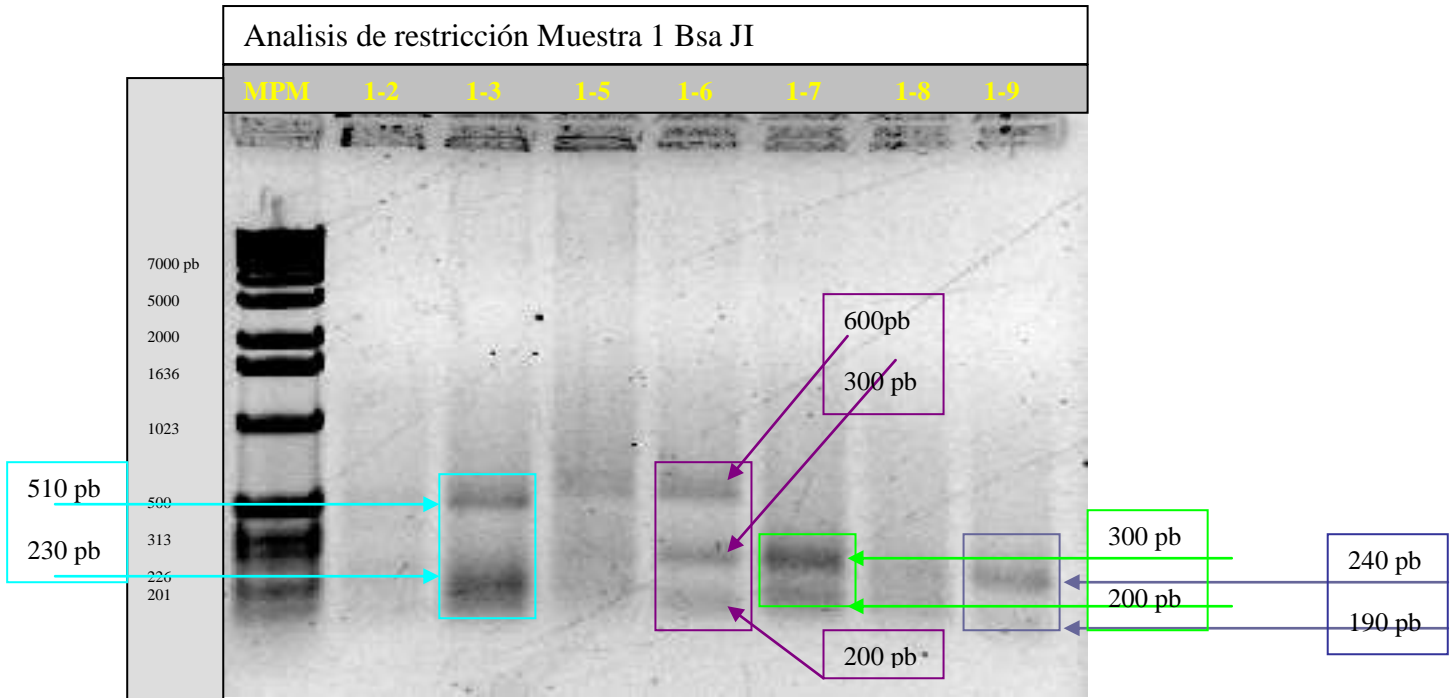


Figura 8.5 Análisis de restricción de muestra 1 Bsa JI.

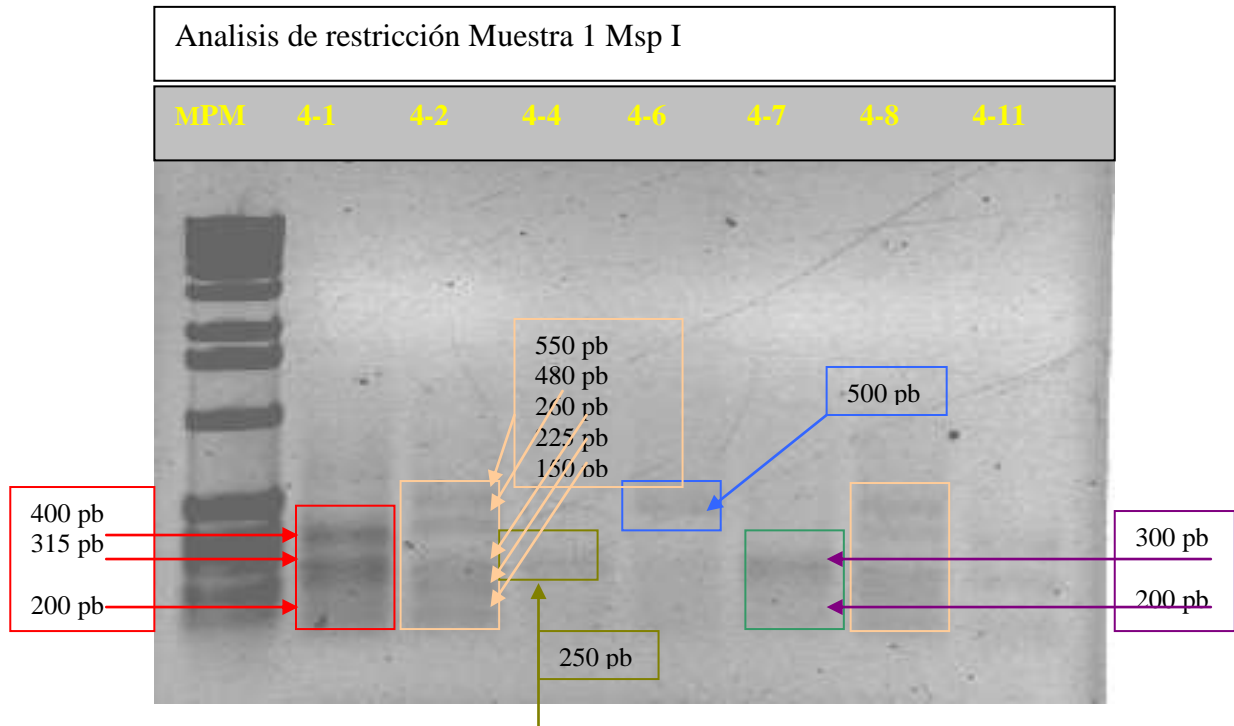


Figura 8.6 Análisis de restricción de muestra 1 Msp I

Resultados y discusión

Representación de la división de bacterias

En este esfuerzo por identificar las especies bacteriológicas en las muestras colectadas en el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez tal y como se muestra en la Figura 8.7, nosotros explotamos primeramente la información 16S rDNA, obtenida de los clones secuenciados generados. Las secuencias se identificaron primeramente con al herramienta BLAST de la base de datos NCBI y entonces se clasificaron aplicando CLANS [4, 5, 6]. Este procedimiento asegura un resultado extremadamente robusto para la clasificación taxonómica-filogenética. Los resultados proporcionan una clasificación taxonómica para 53 de los 61 clones aislados (Tablas 8.7 y 8.8). Ocho

genes 16S rRNA no pudieron ser asignados a alguna división de bacterias existentes [4].

Los aislamientos obtenidos revelan una amplia colección genética cubriendo 10 géneros de seis clases filogenéticas: Proteobacteria, Cyanobacteria, Bacilli, Bacteroidetes, Flavobacteria, and Sphingobacteria. Los grupos bacteriológicos representados más grandes son: el grupo *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes* (CFB), el grupo *Proteobacteria* (con las subdivisiones alfa-, beta- y gamma), las clases *Cyanobacteria* and *Bacilli* (Fig. 2).

Nuestros resultados indican una correlación con la distribución de las divisiones bacteriológicas descritas por los laboratorios Cottrell and Eilers [7, 8]. En general, la comunidad bacteriológica existente antes y después del huracán indica que el complejo lagunar es abundante de la bacteria CFB (13 secuencias antes y 21 después), seguida por la *Proteobacteria*. La clase menos representativa incluye la *Cyanobacteria* y la *Bacilli*.

División CFB

Para la clasificación secuencias/bacteria CFB se recomienda evitar el procedimiento de archive de clon-PCR puesto que puede sesgar la diversidad detectable de la muestra original [9]. Las bacterias asociadas al grupo CFB, particularmente las *Bacteroidetes* son encontradas raramente en bancos de datos de genes clonados 16S rRNA encontrados en muestras de agua costera marina, aunque en general pueden representar un tercio de todas las bacterias de esos medios [7, 8]. En contraste,

aproximadamente dos terceras partes de las bacterias encontradas antes del impacto del huracán Wilma corresponden a este grupo. Este grupo incluye tres phyla: *Bacteroidetes*, *Flavobacteria* y *Sphingobacteria*. El ultimo está formado por los géneros *Cytophaga* and *Flexibacter* [10, 11] (Tablas 8.2 y 8.3).

Miembros del *Bacteroidetes* phylum son principalmente o estrictamente anaerobios, son considerados tradicionalmente como indicadores fecales y son abundantes en heces de animales de sangre caliente en comparación a bacterias coliformes y enterobacterias [12, 13]. Otras evidencias indican la presencia de *Bacteroidetes* como el phylum más abundante en el océano abierto y en aguas costeras [14]. *Flavobacteria* y *Sphingobacteria* estuvieron presentes en ambos casos; antes y después del huracán Wilma, aunque en una proporción menor. Ellas representan un amplio grupo de bacterias heterotróficas, ampliamente dispersas en agua dulce y agua marina, así como en sedimentos y suelos [11].

Nuestros resultados indican que existe una correlación con la distribución de divisiones bacteriológicas tanto en los grupos de Cottrell como de Eilers. En términos generales, la comunidad bacteriológica existente antes y después del huracán indican que el complejo lagunar es abundante en la bacteria CFB (13 secuencias antes y 21 después del huracán). Se ha mencionado que los resultados apuntan hacia una alta proporción de *Bacteroidetes*. Puesto que el complejo lagunar de Nichupté-Bojórquez está conectado al Océano Atlántico y se forma una mezcla de aguas de la laguna, del mar y residuales, es lógico esperar una mezcla de comunidades bacteriológicas en este

phylum. Aún así, la significancia ecológica de estos resultados preliminares está más cerca a una fuente natural marina que a una contaminación directa, puesto que las especies *Bacteroidetes* son estrictamente anaerobias.

División Proteobacteria

Se identificaron catorce *Proteobacteria* en las muestras: la *alpha*-y *gammaproteobacteria* estuvieron presentes en la misma proporción antes y después del huracán, mientras que una proporción algo mayor de *gammaproteobacteria* emergieron después del huracán. De acuerdo a varias investigaciones, la composición de *beta*-y *gammaproteobacteria* son las características mayores en medios acuáticos y ambas coexisten en ambientes costeros, aunque las *betaproteobacteria* no son generalmente encontradas en el océano alotrópico, sino que son abundantes en medios de agua dulce donde parecen desplazar la *gammaproteobacteria* [15, 16, 17]. Una posible explicación para encontrar en este estudio la *betaproteobacteria* es la alta cantidad de agua dulce fluyendo hacia la laguna y además favoreció la gran cantidad de lluvia caída durante el huracán.

Entre las subclases alfa de la *Proteobacteria*, encontramos la presencia de *Roseobacteria* y la *Magnetospirillum*. La *Roseobacteria* es encontrada en medios marinos donde pueden dominar en florecimientos de fitoplancton en regiones costeras [18]. El linaje de la *Roseobacteria* comprende hasta un 25% de las comunidades bacteriológicas y juega un papel muy importante en los ciclos del carbono y los sulfuros y en el clima finalmente porque tienen los rasgos de fotosíntesis anoxigénica aeróbica,

oxida el gas del efecto invernadero monóxido de carbono y produce el gas relevante en el clima sulfuro de metilo a través de la degradación de algas osmolíticas [19]. *Magnetospirillum* pertenece al grupo de bacterias magnetotáctica (MTB), las cuales son un grupo heterogéneo de microorganismos acuáticos que comparten la habilidad para orientarse a lo largo de líneas de campo magnético. Debido a su gran abundancia y su sobresaliente potencial para acumular y precipitar minerales de hierro, se presume que el grupo de bacterias MTB tienen un gran impacto en el ciclo biogeoquímico en sedimentos naturales [20, 21].

La evaluación bacteriológica presentada en este trabajo muestra la identificación de una mezcla de especies características de agua dulce y de agua de mar. La mayoría de los grupos aislados fueron miembros de la especie *Bacterioidetes* tal y como fue mostrado. No se pudo obtener información sobre 8 especies de la base de datos NCBI para determinar su clasificación. Los resultados generales evidencian una mezcla de especies adaptadas al medio ambiente marino presente en el complejo lagunar, esto independientemente del paso del huracán Wilma. Se detectaron solamente algunos cambios menores después del paso del huracán. Únicamente resta estudiar esta comunidad bacteriológica en la presencia de culturas enriquecidas para poder llevar a cabo la caracterización de las especies nuevas.

Referencias

- [1] González, A., Merino, M., Czitrom, S. (1992) Laguna Bojórquez, Cancún: un sistema de características marinas controlado por la atmósfera. *An. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM.* 19, 57-70.
- [2] Jordán, É. (1971) Informe Sobre el Estudio Ecológico de Prospección de la Laguna de Cancún, Quintana Roo; Instituto de Biología; UNAM.
- [3] Pasch, (2006) Centers for Disease Control and Prevention (CDC). *MMWR Morb. Mortal Wkly. Rep.* 55, 29-30.
- [4] Wisotzkey, J.D., Jurtshuk, P.Jr. and Fox, G.E. (1990) PCR amplification of 16S rDNA from lyophilized cell cultures facilitates studies in molecular systematics. *Curr. Microbiol.* 21, 325–327.
- [5] Altschul, S.F., Madden, T.L., Schaffer, A.A., Zhang, J.H., Zhang, Z., Miller, W., and Lipman, D.J. (1997). Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Res.* 25, 3389–3402.
- [6] Frickey, T. and Lupas, A. (2004) CLANS: a Java application for visualizing protein families based on pairwise similarity. *Bioinformatics* 20, 3702-3704.

- [7] Cottrell, M.T. and Kirchman, D.L. (2000) Natural Assemblages of Marine Proteobacteria and Members of the *Cytophaga-Flavobacter* Cluster Consuming Low- and High-Molecular-Weight Dissolved Organic Matter. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 1692-1697.
- [8] Eilers, H., Pernthaler, J., Peplies, J., Glockner, F.O., Gerds, G. and Amann, R. (2001) Isolation of Novel Pelagic Bacteria from the German Bight and Their Seasonal Contributions to Surface Picoplankton. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 5134-5142.
- [9] Pernthaler, J. and Amann, R. (2005) Fate of Heterotrophic Microbes in Pelagic Habitats: Focus on Populations. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 69, 440–461.
- [10] Garrity, G.M., Johnson, K.L., Bell, J.A., Searles, D.B. (2002) Taxonomic outline of the procaryotes. In: *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*, 2nd ed, Springer-Verlag, New York.
- [11] Lydell, C., Dowell, L., Sikaroodi, M., Gillevet, P. and Emerson, D. (2004) A Population Survey of Members of the Phylum Bacteroidetes Isolated from Salt Marsh Sediments along the East Coast of the United States. *Microb. Ecol.* 48, 263-273.

- [12] Fiksdal, L., Maki, J.S., LaCroix, S.J. and Staley, J.T. (1985) *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 148-150.
- [13] Lamendella, R., Domingo, J.W., Oerther, D.B., Vogel, J.R. and Stoeckel, D.M. (2006) *FEMS Microbiol. Ecol.*
- [14] Kirchman, D.L. (2002) The ecology of Cytophaga-Flavobacteria in aquatic environments. *MiniReview. FEMS Microbiol. Ecol.* 39, 91-100.
- [15] Glockner, F.O., Fuchs, B.M. and Amann, R. (1999) *Appl. Environ. Microbiol.* 65, 3721-3726
- [16] Hiorns, W., Methe, B., Nierzwicki-Bauer, S. and Zehr, J. (1997) *Appl. Environ. Microbiol.* 63, 2957-2960.
- [17] Rappe, M.S., Kemp, P.F., Giovannoni, S.J. (1997) Phylogenetic Diversity of Marine Coastal Picoplankton 16S rRNA Genes Cloned from the Continental Shelf Off Cape Hatteras, North Carolina. *Limnol. Oceanogr.* 42, 811-826.
- [18] Howard, E.C., Henriksen, J.R., Buchan, A., Reisch, C.R., Bürgmann, H., Welsh, R., Ye, W., González, J.M., Mace, K., Joye, S.B., Kiene, R.P., Whitman, W.B., Moran, M.A. (2006) Bacterial Taxa That Limit Flux from the Ocean. *Science* 314, 649-314.

- [19] Wagner-Dobler, I., Biebl, H. (2006) Environmental biology of the marine Roseobacter lineage. *Annu. Rev. Microbiol.* 60, 255-80.
- [20] Matsunaga, T., Okamura, Y., Fukuda, Y., Wahyudi, A.T., Murase, Y. and Takeyama, H. (2005) *DNA Res.* 12, 157-166.
- [21] Flies, C.B., Peplies, J., and Schüler, D. (2005) Combined Approach for Characterization of Uncultivated Magnetotactic Bacteria from Various Aquatic Environments. *Appl. Environ. Microbiol.* 71, 2723–2731.

Tabla 8.6 Los diez huracanes más intensos (basados en la presión medida en el centro en el Océano Atlántico (1851-2005))

Rank	Hurricane	Season	Min. pressure mbar (hPa)
1	Wilma	2005	882
2	Gilbert	1988	888
3	"Labor Day"	1935	892
4	Rita	2005	895
5	Allen	1980	899
6	Katrina	2005	902
7	Camille	1969	905
8	Mitch	1998	905
9	Ivan	2004	910
10	Janet	1955	914

Source: U.S. Department of Commerce.

Tabla 8.7 Taxonomic classification of bacteria present at the lagoon before hurricane Wilma (September 3-9, 2005)

Station ^a	Clone No.	Fragment size (bp)	Closely related, taxonomically classified species according to CLANS ^b	Group ^c
	E03	1309	uncultured Bacteroidetes (gil56418207), peripheral to group	CFB

....Continuación Tabla 8.7

57	C12	1209	Non classifiable	-
	C10	1317	uncultured Bacteroidetes (gi 46392259)	CFB
	H04	1286	Uncultured Cyanobacterium (gi 21391642) ^d	cyano
	G04	1330	gamma proteobacteria, possibly Rheinheimera (gi 20145607)	gamma
	H06	1334	Non classifiable	-
85	G10	509	Non classifiable	-
	C09	1319	uncultured Bacteroidetes (gi 46392259)	CFB
	C11	1282	Bacterium BD/Bacterium BE (gi 14031043)	CFB
	G09	1315	Roseobacter/Rhodobacteraceae (gi 33187785 and gi 67008232)	alpha
	H02	1340	uncultured Bacteroidetes (gi 17530369)	CFB

^aRefer to the figure 4.1.

^bCLANS, Cluster Analysis of Sequences [8].

^cGroup: CFB, *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes*; alpha, beta, *betaproteobacterium*; gamma, *gammaproteobacterium*; cyano,

^dthat group of cyanobacteria has not been further classified taxonomically.

peripheral=close to, but distinctly separated from the group (see figure 4.2).

Tabla 8.8 Taxonomic classification of bacteria identified at the lagoon after hurricane Wilma (December 1st., 2005)

Stations ^a	Clone No.	Fragment size (bp)	Closely related, taxonomically classified species according to CLANS ^b	Group ^c
01	C01	1026	uncultured Bacteroidetes (gi 94315843)	CFB
	C07	1155	Non classifiable	-
	C06	732	beta-proteobacteria, Burkholderiaceae (beta	gamma
	C03	1319	Pseudomonas or "uncultured Chromatiales" (gi 3402460)	
	C04	1300	uncultured CFB-group bacterium B2M39 (gi 7689058) (Bacteroidetes)	CFB
	C05	1358	Bacteroidetes bacterium SED4 (gi 86130005)	CFB
	C08	1338	Bacteroidetes bacterium SED4 (gi 86130005)	CFB

...Continuación Tabla 4.8

04	D05	1287	uncultured Bacteroidetes (gi 94315843)	CFB
	D07	1316	uncultured Bacteroidetes (gi 94315843)	CFB
	D08	1332	uncultured Bacteroidetes (gi 109727035)	CFB
	D10	1265	Non classifiable	-
	D02	1309	uncultured Flavobacterium (gi 75767200)	CFB
	D03	1300	Bacteroidetes bacterium SED4 (gi 86130005)	CFB
	D04	1000	Cyclobacterium (gi 33304507)	CFB
	D06	366	beta-proteobacterium, Burkholderiales (gi 4760894) (gi 41056722), peripheral to the group	beta
	D09	1244	Uncultured bacteroidetes and Sphingobacterium (gi 66354321)	CFB
D12	1200	Planococcus sp. (gi 115253087)	Bacilli	
06	E05	1288	uncultured Bacteroidetes (gi 46392297)	CFB
	E06	1279	uncultured Sphingobacterium (gi 104478942)	CFB
	E09	1325	uncultured Sphingobacterium (gi 104478942)	CFB
	E10	1299	Non classifiable	-
	E12	926	alpha-proteobacterium SL3.40 (gi 99033969)	alpha
	E07	1325	Synechococcus or Prochlorococcus (gi 83267778).	cyano
	E08	1334	uncultured Bacteroidetes (gi 109726963)	CFB
	E11	1315	uncultured Sphingobacterium (gi 104478942)	CFB
11	F01	1285	Magnetospirillum (tentative) (gi 114228557)	alpha
	F02	1315	uncultured Sphingobacterium (gi 104478942)	CFB
	F03	1297	alpha-proteobacterium SL3.40 (gi 99033969)	alpha
	F07	1335	uncultured Bacteroidetes (gi 61655743)	CFB
	H05	1239	Roseobacter/Rhodobacteraceae (gi 33187785, gi 67008232)	alpha

...Continuación Tabla 8.8

12	G03	1321	Pseudomonas or "uncultured Chromatiales" (gi 3402460)	gamma
	G05	1320	uncultured Bacteroidetes (gi 17530369)	CFB
	G06	1311	Bacterium BD/Bacterium BE (gi 14031043)	CFB
	G07	763	uncultured bacteroidetes and Sphingobacterium (gi 66354321)	CFB
	F06	1333	Bacteroidetes (gi 50727351) peripheral to group	CFB

^aRefer to the figure 4.1.

^bCLANS, CLuster Analysis of Sequences [8].

^cGroup: CFB, *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes*; alpha, *alphaproteobacterium*; beta, *betaproteobacterium*; gamma, *gammaproteobacterium*; cyano, *cyanobacterium*.

peripheral=close to, but distinctly separated from the group (see figure 4.2).

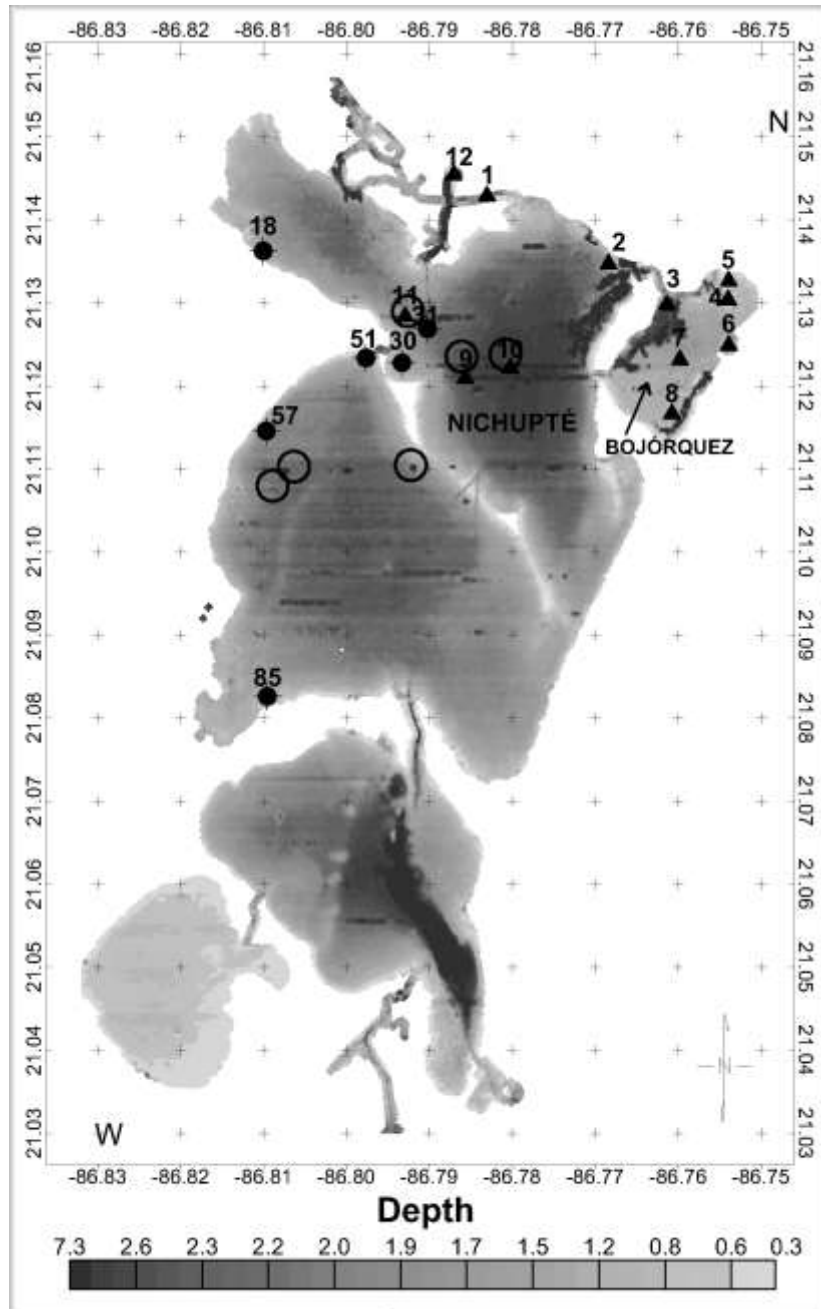


Figura 8.7 Batimetría del sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez. Los colores grises indican la profundidad de la laguna en metros. La latitud y longitud están indicadas en grados. Los círculos llenos representan la posición de las muestras tomadas antes y los triángulos después del impacto del huracán Wilma. Los anillos indican la posición de los manantiales.

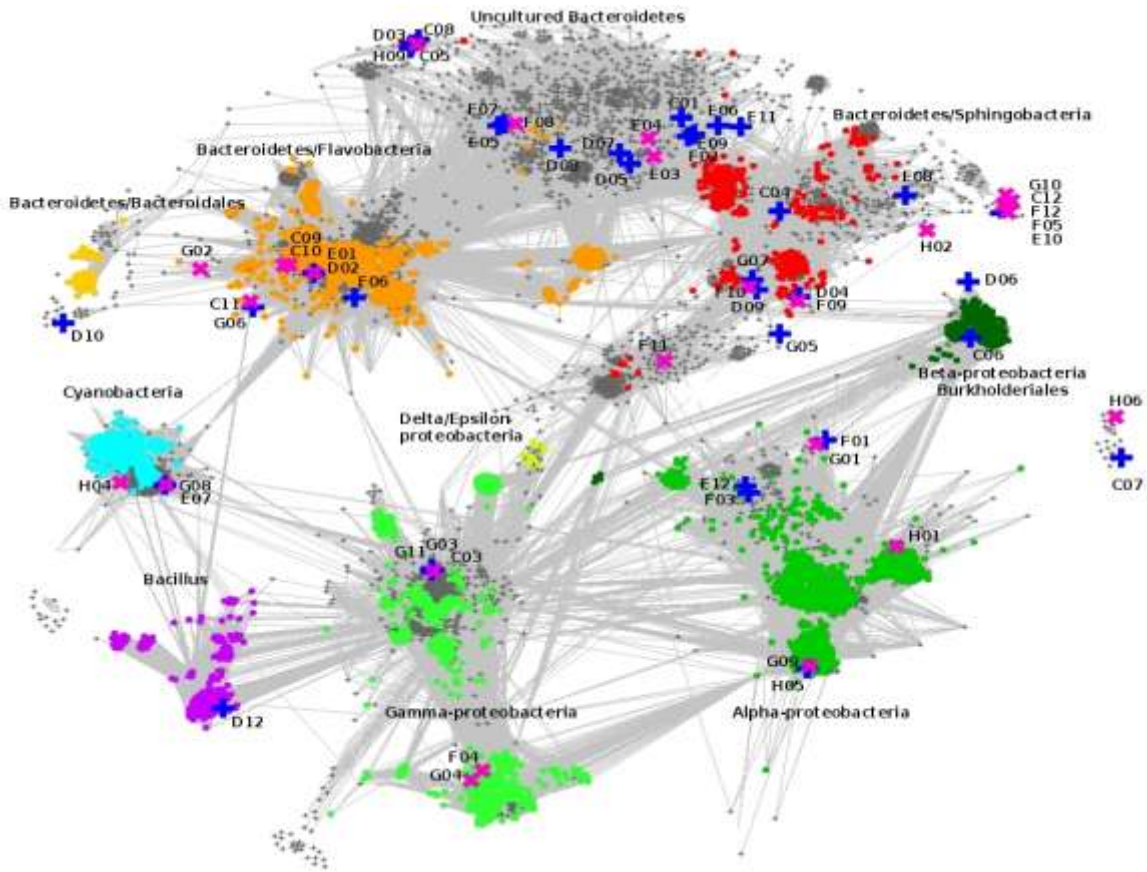


Figura 8.8 Mapa CLANS que visualiza similitudes a manera de pares para un conjunto de 13453 secuencias. Secuencias con similitudes en pares por arriba del corte especificado (1) están conectadas por líneas grises. Los grupos taxonómicos mayores aparecen como agrupamientos (clusters) bien separados y están codificados en color: Gamma-proteobacteria (verde claro), Alpha-proteobacteria (verde), Beta-proteobacteria and Burkholderiales (verde oscuro), Delta/Epsilon proteobacteria (amarillo), Bacillus (púrpura), Cyanobacteria (azul claro) y varios sub-grupos de Bacteroidetes en rojo y naranja. Los pequeños cruces en gris señalan secuencias no cultivadas. Las secuencias encontradas antes y después del huracán son mostradas con una X en rosa (antes) y con cruzamientos en azul después del huracán con los correspondientes identificadores próximos a ellos.

A continuación se presenta una copia de un artículo científico sobre la diversidad bacteriológica en el sistema lagunar de Nichupté-Bojórquez.

Artículo científico

Aquat Ecol
DOI 10.1007/s10452-008-9171-1

Microbial identification of the Nichupte-Bojorquez coastal lagoon in Cancun, Mexico

Ma. Fabiola León-Galván · Noel Carbajal ·
Tancred Frickey · Leticia Santos

Received: 18 August 2007 / Accepted: 19 February 2008
© Springer Science+Business Media B.V. 2008

Abstract The microbial community of the Nichupte-Bojorquez lagoon system located in Cancun, Mexico was evaluated using surface-water samples that were collected before and after the hurricane Wilma impacted the area on October 2005. The analysis was done using a culture-independent molecular approach involving Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis, and CLuster ANalysis of Sequences. A total of 61 16S ribosomal RNA genes were differentially selected and screened. The results show a bacterial profile dominated by *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes* group; the

Bacteroidetes group in particular. The second most abundant group was assigned to the Proteobacteria group and a minor proportion of bacteria that belongs to the Cyanobacteria and Bacilli classes. Our study gives the first insight into the bacterial community adapted to this heavily polluted but occasional oligotrophic coastal lagoon; no substantial differences were, however, found.

Keywords 16S rDNA · Hurricane Wilma · Lagoon

Abbreviations

ARDRA Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis
CLANS CLuster ANalysis of Sequences
UPS Practical Units of Salinity

Introduction

The Nichupte-Bojorquez lagoon system is located at the northeastern part of the Peninsula of Yucatán, in the city of Cancun, State of Quintana Roo, Mexico. It embraces an area of about 48 km², with depths varying between 0.3 and 4.5 m (Fig. 1a). The coastal lagoons, to some extent an oligotrophic system, consist of four interconnected shallow lagoons and two channel systems opened to the Caribbean Sea (Fig. 1b). Several studies on the region have reported physical and chemical characteristics like high concentration values

Ma. F. León-Galván · L. Santos (✉)
Division of Molecular Biology, Institute for Scientific and Technological Research of San Luis Potosi (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, Col. Lomas 4a. Sección, C.P. 78216 San Luis Potosi, SLP, Mexico
e-mail: lsantos@ipicyt.edu.mx

N. Carbajal
Division of Applied Geosciences, Institute for Scientific and Technological Research of San Luis Potosi (IPICYT), Camino a la Presa San José 2055, Col. Lomas 4a. Sección, C.P. 78216 San Luis Potosi, SLP, Mexico

T. Frickey
Research School of Biological Sciences, The Australian National University, GPO Box 475, Canberra, ACT 2601, Australia

L. Santos
Haartman Institute, University of Helsinki, Haartmaninkatu 3, Helsinki 00250, Finland

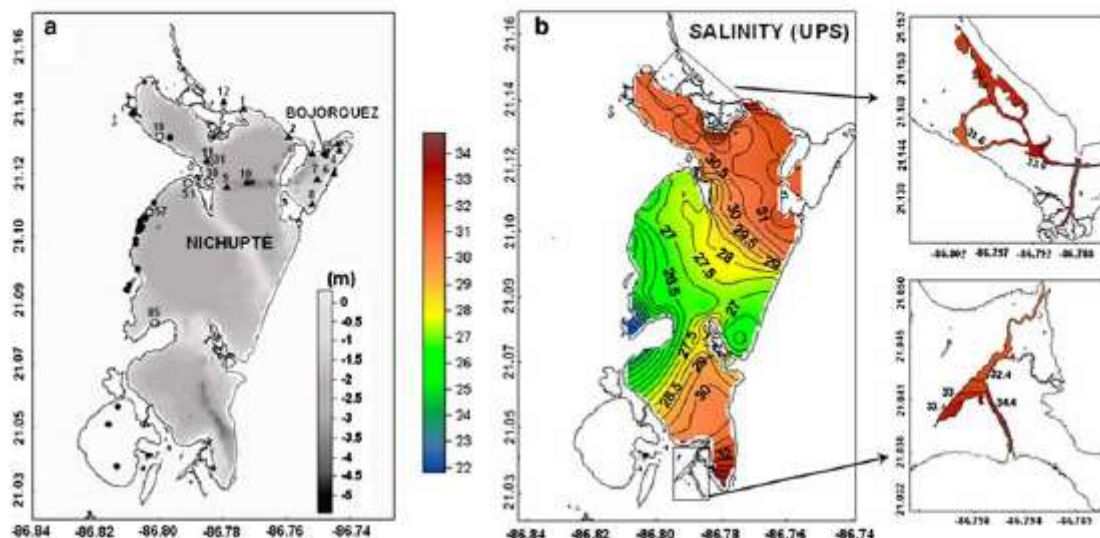


Fig. 1 (a) Bathymetry of the Nichupte-Bojorquez lagoon system in the city of Cancun at the Quintana Roo state in Mexico. The gray color tonalities indicate the depth of the lagoon in meters. The degrees of latitude (North/South) and longitude (East/West) are visualized according to the region. Opened rings indicate the positioning of the samples taken in

the stations before, and triangles after the impact of hurricane Wilma. The filled circles indicate the position of freshwater springs. (b) Salinity distribution of Nichupte-Bojorquez lagoon system. Data measured on September 3–9, 2005. Salinity data are expressed in Practical Units of Salinity (UPS) (UNESCO, 1981)

of oxygen (Reyes and Merino 1991) and gradients of nutrients, temperature, salinity, depth, and interesting hydrodynamics, flora and fauna (Jordán 1971; González et al. 1992), however, no microbial community analysis has been performed.

An interesting feature is the presence of several water springs (Fig. 1a, filled circles) at the bottom of the lagoon system, characterized by limestone, which are well known in the Yucatán peninsula (Schmitter-Soto et al. 2002; Beddows et al. 2006). This inflow of freshwater is reflected in locally lower salinity values. This can be observed in the salinity distribution shown in Fig. 1b. This salinity pattern is based on measurements carried out at 145 stations inside the lagoon system (Carbajal 2007). In general, the salinity reflects the influences of sea-water through the mouths at the northern and southern side of the lagoon system and inputs of low-salinity water through the water springs. Reports on nutrient content (nitrite, nitrate, phosphate, ammonia, etc.) indicate the presence of municipal waste-water from the city of Cancun in these water springs (Carbajal 2007).

The lagoon system presents serious problems of eutrophication in some areas due to anthropogenic and environmental pollution. There is evidence of

inlet of municipal wastewater that has led to the degradation of the lagoon system. Drainage of organic and inorganic compounds seems to be affecting the water quality of the lagoon (Reyes and Merino 1991). Moreover, it has a low capability of water exchange. In addition to the conditions before mentioned, the most intense hurricane ever recorded in the Atlantic Ocean devastated large areas of the peninsula of Yucatán on October 21, 2005, including the lagoon system of Nichupte-Bojorquez (Pasch et al. 2006). The storm surge associated with the hurricane, transporting large quantities of seawater, flooded the lagoon system and, through turbulence processes, caused a strong vertical water exchange and mixing. Since the hydrographic conditions changed, we identified the bacterial community of samples collected before and after the tropical storm.

Materials and methods

Stations and sample collection

Samples of 250 ml from the surface-water of the lagoon complex were collected in 145 stations before

and 11 stations after hurricane Wilma (October 21, 2005). The strategy for the bacteriological analysis of the selected samples for this study; first collected on 6–9 September 2005, was the location of water springs. An inspection of the lagoon system was carried out on 1 December 2005, i.e., after the hurricane Wilma impacted this region. The study revealed zones of contrasting contamination and changes caused by the flood of sea-water. This determined the position of the analyzed samples (Fig. 1a). From the total number of samples taken, only five of each date were selected which represent the full area studied. The samples were stored in wide-mouth polyethylene bottles (Nalgene Labware), kept on ice during the recollection and then stored at 4°C until they were processed.

DNA isolation

About 20 ml of the total volume from each sample was transferred to a fresh tube and cells were centrifuged at 14,000 rpm for 15–20 min at 4°C. The pellet obtained was resuspended in 500 µl of saline-EDTA buffer pH 8.0 (0.15 M NaCl, 0.01 M EDTA) and the DNA extraction was performed using the modified method by Wisotzky et al. (1990), as follows. The lysis of the cells was performed by adding 0.6 mg of lysozyme, 0.3 mg of proteinase K, and 50 µg of RNase A and incubated for 2 h at 37°C. Then 0.5% of SDS and 0.1 M of Na-Acetate pH 8.0 were added and again incubated for 10 min at 60°C. The DNA extraction was done by adding one volume of a 24:1 chloroform:isoamyl alcohol [v/v], mixed thoroughly and centrifuged at 10,000 rpm for 5 min. The upper layer was then decanted to a fresh tube and DNA was precipitated by adding two volumes of cold ethanol (100%), incubated for one hour at -20°C, washed with 70% cold ethanol, air-dried, and diluted in 50 µl sterile water.

16S rRNA gene amplification and cloning

The 16S rDNA was amplified by using 10 pmoles of the universal oligonucleotide set that amplifies both the bacterial and archaeal domains: forward UBF 5'-AG AGTTTGATCCTGGCTGAG-3' and reverse 1492 R 5'-GGTTACCTTGTTACGACTT-3'. The PCR conditions were the following: 5 min at 95°C; 30 cycles of 1 min at 95°C, 1 min at 60°C, and 2 min at 72°C; lastly

10 min at 72°C. An aliquot of 10 µl of the PCR products were subjected to electrophoresis in 1% agarose gels and stained with ethidium bromide to visualize the amplified products. The PCR products from each sample were cloned using a TOPO TA cloning kit (Invitrogen) that allows the direct cloning into the pCR®4-TOPO® vector. The ligation mix (300 µl) was used to transform *E. coli* cells. For the transformation, serial dilutions of each construction (up to 50 ng spread in three plates) were incubated on ice for 30 min with 300 µl of freshly thawed, chemically competent TOP10 *E. coli* cells. An average of 180 single clones per plate were detected, thus approximately 540 clones were obtained per collected sample. Only single clones were then transferred to 5 ml LB medium supplemented with ampicillin and kanamycin at a final concentration of 50 µg ml⁻¹. Incubation of the cultures was done overnight with shaking at 37°C. Cells were pelleted at 4,000 rpm at 4°C for 10 min. The QIAprep Spin Miniprep Kit Protocol (QIAGEN) was used for the plasmid purification.

Selection of clones and sequencing

The selection of the clones for ARDRA was done using the total number of single separated colonies (approximately 60–75 clones per plate). For this purpose, the plasmid inserts were re-amplified using the oligonucleotide set UBF (above described) and the M13 Reverse oligonucleotide 5'-CAGGAAACAGCTAT GAC-3' from the TOPO TA cloning kit (Invitrogen), and then subjected to restriction pattern analysis by digesting the PCR products with the restriction enzymes *MspI* y *BsaI* (New England Biolabs) at 37°C and 60°C, respectively for 2 h. The digested products were separated on 1.2% agarose gels. Throughout the screening, only the products showing different restriction patterns were chosen for sequencing using the primer set M13 Reverse (see above) and the M13 Forward (-20) 5'-GTAAAACGACGGCC AG-3' (Invitrogen) at the National Laboratory for Genomics (Cinvestav-Irapuato, Mexico).

In silico classification of 16S rRNA genes by CLANS

A BLAST (Basic Local Alignment and Search Tool) (Altschul et al. 1997) search against the NCBI

nonredundant nucleotide database “nt” (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) was used to find putatively homologous sequences to the 61 PCR-fragments selected by ARDRA. Full-length sequences were selected from the “nt” database for all BLAST hits with *E*-values better than $1e-80$ to any of the 61 PCR-fragments. Sequences containing multiple genes, such as whole chromosomes, plasmids, or operons were excluded. Sequences belonging to the NCBI taxonomic groups “unclassified sequences,” “other sequences,” “Viruses,” “Viroids,” “unclassified bacteria,” and “environmental samples” were excluded as well, as these would complicate the analysis without providing data useful for taxonomic classification. The resulting set of 13,453 sequences was classified using CLANS (Frickey and Lupas 2004). CLANS performs against all BLAST comparisons of the sequences and visualized the derived pair-wise similarities in a graph. The BLAST score of each pair-wise comparison divided by the length of the shorter sequence was used to quantify similarity. Clustering was performed at a cutoff of “1”, and the resulting groups of sequences were manually annotated. This provided us with a rapid way to determine from which taxonomic groups the various clones/samples have most likely originated.

Nucleotide sequence accession numbers

“Non classifiable” sequences or without information in NCBI were deposited in the EMBL database under the accession numbers AM937265, AM937266, AM937267, AM937268, AM937269, AM937270, AM937271, AM937272, AM937273, AM937274, AM937275, AM937276, AM937277, AM937278, AM937279, AM937280, AM937281, AM937282, and AM937283 (Tables 1, 2).

Results

The PCR reactions of the 16S rRNA genes were carried out at a temperature of 60°C and 30 cycles to avoid unspecific and biased amplification. The cloning and transformation steps generated a library of approximately 540 colonies per station and separated single clones (60–75 clones per station) were subject to ARDRA. The clones with different RFLP patterns (Fig. 2) were re-amplified and DNA sequenced.

We used BLAST to determine 16S rRNA sequences from other organisms with significant similarities to any of our sample sequences. Due to the large number of sequences to analyze and the short fragment length of some of the samples, we used the CLANS program to classify our samples, as it had been successfully used to classify large and highly diverse sets of sequences where traditional classification methods had failed (Proikas-Cezanne et al. 2004, 2006; Ammelburg et al. 2006). Based on the sequence and taxonomic groups our samples associated with, we were able to assign 53 of the 61 isolated clones to specific bacterial families (Tables 1, 2). Eight new 16S rRNA sequences could not be assigned to any of the existing bacterial divisions/taxonomic groupings.

The 16S rRNA genes obtained comprise a wide genetic collection covering ten genera of five phylogenetic groupings: Proteobacteria, Bacilli, Bacteroidetes, Flavobacteria, and Sphingobacteria. The taxonomic groups represented are the *Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes* (CFB) group, the Proteobacteria group (alfa-, beta-, and gamma-subdivisions). Other classes include the *Proteobacteria* and the *Bacilli* (Fig. 3).

Discussion

The strategy of this study was based on the analysis of the 16S rDNA obtained from the culture-independent molecular approach ARDRA and CLANS analysis, thus, we report the occurrence of bacteria although this do not reflect the presence of viable cells in the samples.

Our findings indicate correlation with the distribution of marine Proteobacteria and members of the *Cytophaga-Flavobacter* cluster described by Cottrell and Kirchman (2000) and Eilers et al. (2001). Bacteria associated to the CFB group; particularly the *Bacteroidetes*, are rarely found in 16S rRNA gene clone libraries from coastal marine water samples, although it has been described that they may represent one-third of all bacteria in such habitats (Pernthaler and Amann 2005). We found that about two-thirds of the bacteria identified correspond to this group covering its three subgroups: *Bacteroidetes*, *Flavobacteria*, and *Sphingobacteria*, the last one included the genera *Cytophaga* and *Flexibacter*

Table 1 Taxonomic classification of bacteria present at the lagoon before hurricane Wilma (September 6–9, 2005)

Station ^a	Clone No.	Fragment size (bp)	Closely related, taxonomically classified species according to CLANS ^b	Group ^c	Identity (%)	NCBI/EMBL accession no.	
18	E03	1,309	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi56418207), peripheral to group	CFB	94	AY921784.1	
	E04	1,292	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi56418207), peripheral to group	CFB	95	AY921784.1	
	F04	1,252	<i>Gamma</i> proteobacteria, possibly <i>Rheinheimera</i> (gi20145607)	gamma	97	AM117934.1	
	F05	1,303	Non classifiable	–	–	AM937265 ^e	
	E01	1,310	Uncultured <i>Flavobacterium</i> (gi75767200)	CFB	97	AM279192.1	
	G08	1,257	<i>Synechococcus</i> or <i>Prochlorococcus</i> (gi83267778)	cyano	98	AF001480.1	
	31	H09	1,315	<i>Bacteroidetes</i> bacterium SED4 (gi86130005)	CFB	98	DQ357760.1
		H01	1,303	<i>Sphingomonas</i> (gi5733745)	alpha	98	AY554010.1
G11		1,218	<i>Pseudomonas</i> or “uncultured <i>Chromatiales</i> ” (gi3402460)	gamma	92	AB015255.1	
F11		1,316	<i>Cytophagales</i> bacterium (gi90308549)	CFB	91	AY038553.1	
51	F08	1,309	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi61655743)	CFB	97	AB125062.1	
	F09	1,347	<i>Cyclobacterium</i> (gi33304507)	CFB	98	CMA575266	
	F10	1,334	“uncultured <i>Bacteroidetes</i> ” and <i>Sphingobacterium</i> (gi66354321)	CFB	97	DQ660388.1	
	F12	1,250	Non classifiable	–	–	AM937266 ^e	
	G01	1,284	<i>Magnetospirillum</i> (putative) (gi114228557)	alpha	93	AY710800.1	
	G02	1,076	<i>Bacteroidetes</i> C-7 (gi34494718)	CFB	94	DQ514301.1	
	57	C12	1,209	Non classifiable	–	–	AM937267 ^e
		C10	1,317	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi46392259)	CFB	97	AB080771.1
H04		1,286	Uncultured <i>Cyanobacterium</i> (gi21391642) ^d	cyano	98	AF001480	
G04		1,330	<i>Gamma</i> proteobacteria, possibly <i>Rheinheimera</i> (gi20145607)	gamma	95	AM183347.1	
H06		1,334	Non classifiable	–	–	AM937268 ^e	
85	G10	509	Non classifiable	–	–	AM937269 ^e	
	C09	1,319	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi46392259)	CFB	97	DQ514299.1	
	C11	1,282	Bacterium BD/Bacterium BE (gi14031043)	CFB	97	AY163576.1	
	G09	1,315	<i>Roseobacter/Rhodobacteraceae</i> (gi33187785 and gi67008232)	alpha	98	AY682199.1	
	H02	1,340	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi17530369)	CFB	98	AB015265.1	

^a Refer to Fig. 1b^b CLANS—CLuster ANalysis of Sequences [10]^c Group: CFB—*Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes*; alpha—*alphaproteobacterium*; beta—*betaproteobacterium*; gamma—*gamma*proteobacterium; cyano—*cyanobacterium*^d The group of cyanobacteria that has not been further classified taxonomically

Peripheral = close to, but distinctly separated from the group (Fig. 3)

^e Information deposited in the EMBL Nucleotide Sequence Database

Bold characters: clone frequency

(Garrity et al. 2002; Lydell et al. 2004) (Tables 1, 2). To our knowledge, members of the Bacteroidetes phylum are mostly strict anaerobes. They are

considered as fecal indicators and are abundant in the feces of warm-blooded animals (Fiksdal et al. 1985; Lamendella et al. 2006). Other evidences

Table 2 Taxonomic classification of bacteria identified at the lagoon after hurricane Wilma (December 1, 2005)

Stations ^a	Clone No.	Fragment size (bp)	Closely related, taxonomically classified species according to CLANS ^b	Group ^c	Identity (%)	NCBI/EMBL accession no.	
01	C01	1,026	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi94315843)	CFB	89	DQ153141.1	
	C07	1,155	Non classifiable	–	–	AM937270 ^d	
	C06	732	<i>Betaproteobacteria, Burkholderiaceae</i> (gi40804459)	beta	98	AY509480.1	
	C03	1,319	<i>Pseudomonas</i> or "uncultured <i>Chromatiales</i> " (gi3402460)	gamma	92	AB015255.1	
	C04	1,300	Uncultured CFB-group bacterium B2M39 (gi7689058)	CFB	98	AY739663.1	
	C05	1,358	<i>Bacteroidetes</i> bacterium SED4 (gi86130005)	CFB	99	DQ357760.1	
	C08	1,338	<i>Bacteroidetes</i> bacterium SED4 (gi86130005)	CFB	95	DQ357760.1	
	04	D05	1,287	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi94315843)	CFB	90	AM937271 ^d
D07		1,316	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi94315843)	CFB	90	AM937272 ^d	
D08		1,332	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi109727035)	CFB	98	AM937273 ^d	
D10		1,265	Non classifiable	–	–	AM937274 ^d	
D02		1,309	Uncultured <i>Flavobacterium</i> (gi75767200)	CFB	97	AY794073.1	
D03		1,300	<i>Bacteroidetes</i> bacterium SED4 (gi86130005)	CFB	95	AY241563.1	
D04		1,000	<i>Cyclobacterium</i> (gi33304507)	CFB	97	FLERRDB	
D06		366	<i>Betaproteobacterium, Burkholderiales</i> (gi4760894) (gi41056722), peripheral to the group	beta	97	AM159240.1	
D09		1,244	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> and <i>Sphingobacterium</i> (gi66354321)	CFB	97	DQ070826.1	
D12		1,200	<i>Planococcus</i> sp. (gi115253087)	Bacilli	98	AM111008.1	
06		E05	1,288	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi46392297)	CFB	97	AM937275 ^d
		E06	1,279	Uncultured <i>Sphingobacterium</i> (gi104478942)	CFB	90	AM937276 ^d
	E09	1,325	Uncultured <i>Sphingobacterium</i> (gi104478942)	CFB	98	AM937277 ^d	
	E10	1,299	Non classifiable	–	–	AM937278 ^d	
	E12	926	<i>Alpha-proteobacterium</i> SL3.40 (gi99033969)	alpha	99	AM937279 ^d	
	E07	1,325	<i>Synechococcus</i> or <i>Prochlorococcus</i> (gi183267778)	cyano	98	AY172828.1	
	E08	1,334	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi109726963)	CFB	97	AB078072.1	
	E11	1,315	Uncultured <i>Sphingobacterium</i> (gi104478942)	CFB	98	AM937280 ^d	
11	F01	1,285	<i>Magnetospirillum</i> (tentative) (gi114228557)	alpha	99	AJ863153.1	
	F02	1,315	Uncultured <i>Sphingobacterium</i> (gi104478942)	CFB	97	AB121104.1	
	F03	1,297	<i>Alpha-proteobacterium</i> SL3.40 (gi99033969)	alpha	97	DQ665839.1	
	F07	1,335	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi61655743)	CFB	97	AM937281 ^d	
	H05	1,239	<i>Roseobacter/Rhodobacteraceae</i> (gi33187785, gi67008232)	alpha	98	MAL391187	
12	G03	1,321	<i>Pseudomonas</i> or "uncultured <i>Chromatiales</i> " (gi3402460)	gamma	91	AM937282 ^d	
	G05	1,320	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> (gi17530369)	CFB	87	AJ784892.1	
	G06	1,311	Bacterium BD/Bacterium BE (gi14031043)	CFB	97	AM937283 ^d	
	G07	763	Uncultured <i>Bacteroidetes</i> and <i>Sphingobacterium</i> (gi66354321)	CFB	98	DQ836305.1	
	F06	1,333	<i>Bacteroidetes</i> (gi150727351) peripheral to group	CFB	97	AY259507.1	

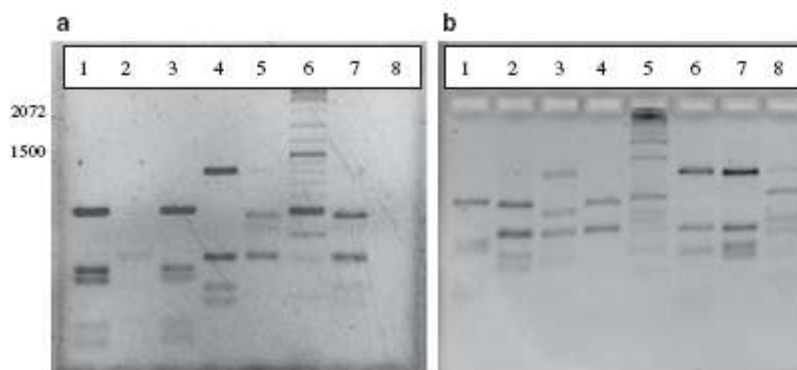
^a Refer to the Fig. 1^b CLANS—CLuster ANalysis of Sequences [10]^c Group: CFB—*Cytophaga-Flavobacteria/Flexibacter-Bacteroidetes*; alpha—*alphaproteobacterium*; beta—*betaproteobacterium*; gamma—*gamma*proteobacterium; cyano—*cyanobacterium*

Peripheral = close to, but distinctly separated from the group (see Fig. 3)

^d Information deposited in the EMBL Nucleotide Sequence Database

Bold characters: clone frequency

Fig. 2 Representative ARDRA profiles of 16S rDNA fragments amplified from DNA samples digested with (a) *MspI* and (b) *BsaI*. Those patterns showing the same restriction profile (e.g. a lanes 1 and 3) were compared and only one was selected for sequencing. Lane 6 of a and lane 5 of b correspond to molecular markers in bp (100 bp DNA Ladder, Invitrogen Life Technologies)



indicate the presence of Bacteroidetes as the most abundant taxonomic group in the opened ocean and coastal waters (Kirchman 2002). Then the source of *Bacteroidetes* in the samples analyzed here is not clear. A more profound biochemical characterization needs to be done to distinguish whether the species are strictly anaerobes.

A total of 14 Proteobacteria were identified in the samples: the *alpha*- and *gamma*proteobacteria were present in the same proportion before the hurricane (six in total, Table 1), while *betaproteobacteria* were not detected initially (Tables 1, 2). According to several authors, the composition of *beta*- and *gamma*proteobacteria are the major features in aquatic environments and both coexist in coastal environments. Although *betaproteobacteria* are not found in the oligotrophic ocean, these are abundant in freshwater habitats where they seem to displace *gamma*proteobacteria (Glockner et al. 1999; Hiorns et al. 1997; Rappe et al. 1997). A possible explanation for finding *betaproteobacteria* in the samples taken after the hurricane is the high amount of freshwater replacement in the lagoon during the hurricane rainfall.

Among the alpha subclass of Proteobacteria, we found the presence of Roseobacteria and a putative *Magnetospirillum*. Roseobacteria are commonly found in marine habitats where they may dominate in phytoplankton blooms and coastal regions (Howard et al. 2006). The *Roseobacter* lineage comprise up to 25% of marine microbial communities and play an important role for the global carbon and sulfur cycle and the climate (Wagner-Dobler and Biebl 2006). *Magnetospirillum* belongs to the magnetotactic bacteria (MTB) group, which is a heterogeneous group of

aquatic microorganisms that share the ability to orient themselves along magnetic field lines, and MTB is assumed to have great impact in the biogeochemical cycling in natural sediments (Matsunaga et al. 2005; Flies et al. 2005). The presence of MTB in our samples is expected since Nichupte-Bojorquez is a shallow lagoon.

Interestingly, *Synechococcus* is present between low and high salinity environments in the groups where bacteria can better tolerate a wide range of salt concentrations (Zwart et al. 2002), and we have observed the same in our study along with the variation in salinity along the lagoon (Fig. 1b).

Conclusions

The overall results point to a transitional lagoon-marine environment containing a wide variety of species (Karl 2007; Paerl et al. 2003; Piccini et al. 2006). Variable environments are known to support a wider variety of species than stable environments in which the best-adapted species will frequently out-compete all others. As we did not detect major changes in the species composition before and after the passage of hurricane Wilma, this could point to influxes of sea-water or other churning mechanisms being a common occurrence in this lagoon complex, providing important mechanisms for the maintenance of the wide variety of bacterial species we observed. However, a major disturbance event, such as hurricane Wilma, could provide a large enough ecological effect, that the consequences might traceable over a number of years. To characterize the changes in species abundance and their effect on the ecology of

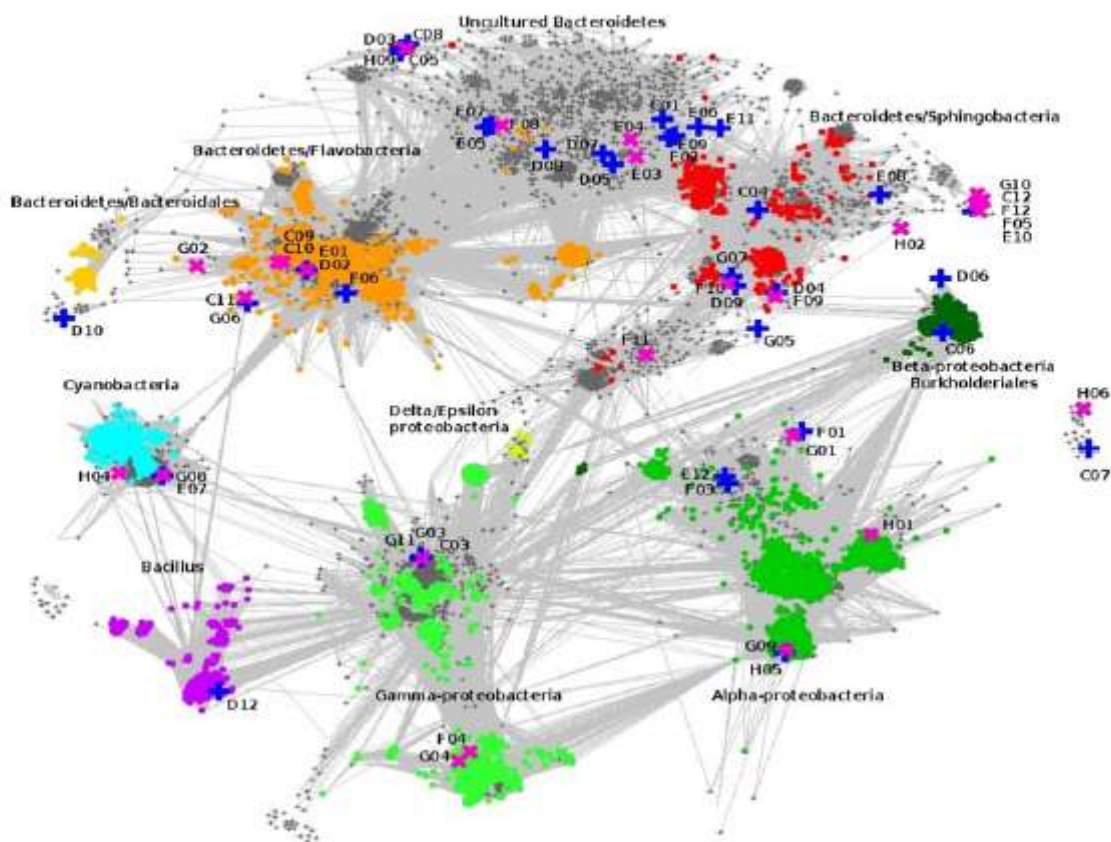


Fig. 3 CLANS map visualizing the pair-wise similarities for a set 13,453 sequences. The sequences with pair-wise similarities above the specified cutoff (1) are connected by gray lines. Well separated sequence clusters corresponding to different taxonomic groupings and color coded: Gamma-proteobacteria (light-green), Alpha-proteobacteria (green), Beta-proteobacteria and Burkholderiales

(dark-green), Delta/Epsilon proteobacteria (yellow), Bacillus (purple), Proteobacteria (light-blue) and the various Bacteroidetes sub-groups in red and orange. Small gray crosses highlight uncultured sequences. The sequences found before and after the hurricane are shown with pink X's (before) and blue crosses (after) with the corresponding identifiers next to them

the lagoon, the bacterial population will need to be studied in detail using enriched cultures.

Acknowledgments We thank Consejo Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, Mexico, for the support provided for this research work (Project CQ063).

References

- Altschul SF, Madden TL, Schaffer AA, Zhang JH, Zhang Z, Miller W, Lipman DJ (1997) Gapped BLAST and PSI-BLAST: a new generation of protein database search programs. *Nucleic Acids Res* 25:3389–3402
- Ammelburg M, Frickey T, Lupas AN (2006) Classification of AAA + proteins. *J Struct Biol* 156:2–11
- Beddows PA, Smart PL, Whitaker FF and Smith SL (2006) Regional groundwater circulation of the Caribbean Yucatan aquifer revealed using temperature and specific electrical conductance observations. Abstracts in limestone hydrogeology meeting, Bristol University 12–13
- Carbajal N (2007) Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Proyecto CQ063, Consejo nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (Conabio). Informe no 2. Consejo Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, CONABIO, CQ063, 147
- Cottrell MT, Kirchman DL (2000) Natural assemblages of marine proteobacteria and members of the *Cytophaga-Flavobacter* cluster consuming low- and high-molecular-weight

- dissolved organic matter. *Appl Environ Microbiol* 66:1692–1697
- Eilers H, Pernthaler J, Peplies J, Glockner FO, Gerdt G, Amann R (2001) Isolation of novel pelagic bacteria from the German bight and their seasonal contributions to surface picoplankton. *Appl Environ Microbiol* 67:5134–5142
- Fiksdal L, Maki JS, LaCroix SJ, Staley JT (1985) Survival and detection of *Bacteroides* spp., prospective indicator bacteria. *Appl Environ Microbiol* 49:148–150
- Flies CB, Peplies J, Schiller D (2005) Combined approach for characterization of uncultivated magnetotactic bacteria from various aquatic environments. *Appl Environ Microbiol* 71:2723–2731
- Frickey T, Lupas A (2004) CLANS: a Java application for visualizing protein families based on pairwise similarity. *Bioinformatics* 20:3702–3704
- Garrity GM, Johnson KL, Bell JA, Searles DB (eds) (2002) Taxonomic outline of the prokaryotes. In: *Bergey's manual of systematic bacteriology*, 2nd edn. Springer-Verlag, New York
- Glockner FO, Fuchs BM, Amann R (1999) Bacterioplankton compositions of lakes and oceans: a first comparison based on fluorescence in situ hybridization. *Appl Environ Microbiol* 65:3721–3726
- González A, Merino M, Czitrom S (1992) Laguna Bojórquez, Cancun: un sistema de características marinas controlado por la atmósfera. *An Inst Cienc del Mar y Limnol UNAM* 19: 57–70
- Hiorns W, Methe B, Nierzwicki-Bauer S, Zehr J (1997) Bacterial diversity in Adirondack mountain lakes as revealed by 16 S rRNA gene sequences. *Appl Environ Microbiol* 63: 2957–2960
- Howard EC, Henriksen JR, Buchan A, Reisch CR, Bürgmann H, Welsh R, Ye W, González JM, Mace K, Joye SB, Kiene RP, Whitman WB, Moran MA (2006) Bacterial taxa that limit flux from the ocean. *Science* 314:649–314
- Jordán É (1971) Informe Sobre el Estudio Ecológico de Prospección de la Laguna de Cancun, Quintana Roo; Instituto de Biología; UNAM
- Karl DM (2007) Microbial oceanography: paradigms, processes and promise. *Nat Rev Microbiol* 5:759–769
- Kirchman DL (2002) The ecology of Cytophaga-Flavobacteria in aquatic environments. MiniReview. *FEMS Microbiol Ecol* 39:91–100
- Lamendella R, Domingo JW, Oerther DB, Vogel JR, Stoeckel DM (2006) Assessment of fecal pollution sources in a small northern-plains watershed using PCR and phylogenetic analyses of Bacteroidetes 16 S rRNA gene. *FEMS Microbiol Ecol* 59:651–650
- Lydell C, Dowell L, Sikaroodi M, Gillevet P, Emerson D (2004) A population survey of members of the phylum bacteroidetes isolated from salt marsh sediments along the East Coast of the United States. *Microb Ecol* 48:263–273
- Matsunaga T, Okamura Y, Fukuda Y, Wahyudi AT, Murase Y, Takeyama H (2005) Complete genome sequence of the facultative anaerobic magnetotactic bacterium *Magneto-spirillum* sp. strain AMB-1. *DNA Res* 12:157–166
- Paerl HW, Stegge TF, Buchan KC, Potts M (2003) Hypersaline cyanobacterial mats as indicators of elevated tropical hurricane activity and associated climate change. *Ambio* 32:87–90
- Pasch RJ, Blake ES, Cobb HD III, Roberts DP (2006) Tropical cyclone report: Hurricane Wilma, 15–25 October 2005. Miami, FL: US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Hurricane Center
- Pernthaler J, Amann R (2005) Fate of heterotrophic microbes in pelagic habitats: focus on populations. *Microbiol Mol Biol Rev* 69:440–461
- Piccini C, Conde D, Alonso C, Sommaruga R, Pernthaler J (2006) Blooms of single bacterial species in a coastal lagoon of the southwestern Atlantic Ocean. *Appl Environ Microbiol* 72(10):6560–6568
- Proikas-Cezanne T, Stabel S, Riethmacher D (2004) WIPI-alpha (WIPI49), a member of the novel 7-bladed WIPI protein family, is aberrantly expressed in human cancer and is linked to starvation-induced autophagy. *Oncogene* 23:9314–9325
- Proikas-Cezanne T, Gangel A, Frickey T, Nordheim A (2006) Rab14 is part of the early endosomal clathrin-coated TGN microdomain. *FEBS Lett* 580:5241–5246
- Rappe MS, Kemp PF, Giovannoni SJ (1997) Phylogenetic diversity of marine coastal picoplankton 16 S rRNA genes cloned from the continental shelf off Cape Hatteras, North Carolina. *Limnol Oceanogr* 42:811–826
- Reyes E, Merino M (1991) Diel dissolved oxygen dynamics and eutrophication in a shallow, well-mixed tropical lagoon (Cancun, Mexico). *Estuaries* 14:372–381
- Schmitter-Soto JJ, Comín FA, Escobar-Briones E, Herrera-Silveira J, Alcocer J, Suárez-Morales E, Elías-Gutiérrez M, Díaz-Arce V, Marín LE, Steinich B (2002) Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula. *Hydrobiologia*, SE Mexico, pp 215–228
- Wagner-Dobler I, Biebl H (2006) Environmental biology of the marine *Roseobacter* lineage. *Annu Rev Microbiol* 60:255–80
- Wisotzkey JD, Jurtschuk P Jr, Fox GE (1990) PCR amplification of 16 S rDNA from lyophilized cell cultures facilitates studies in molecular systematics. *Curr Microbiol* 21:325–327
- Zwart G, Crump BC, Kamst-van Agterveld MP, Hagen F, Suk-Kyun Han S-K (2002) Typical freshwater bacteria: an analysis of available 16 S rRNA gene sequences from plankton of lakes and rivers. *Aquat Microb Ecol* 28: 141–155