UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Variables ambientales durante eventos de blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano

Deisy Alejandra Romero Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2013

Variables ambientales durante eventos de blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano

Deisy Alejandra Romero Rodríguez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Medio Ambiente y Desarrollo

Directora:

Gladys Bernal Franco, Ph.D.

Codirector:

Sven Zea, Ph.D.,

Línea de Investigación:

Ecosistemas Marinos

Grupo de Investigación:

OCEÁNICOS

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2013

Agradecimientos

A Dios por todas las oportunidades que me brinda día a día.

A mi directora Gladys Bernal por tantas asesorías, dedicación, consejos y paciencia. A mi codirector Sven Zea por compartirme su conocimiento, por enseñarme de corales y por brindarme su tiempo.

Al profesor Emilio Beier por compartirme las rutinas y brindarme horas de asesorías.

A mi hermana por sus asesorías y a mis padres por confiar en mí, por todo su apoyo emocional y económicoy por aguantarme en los tiempos difíciles.

A mis compañeros de OCEÁNICOS por acogerme en su grupo y especialmente a Juan Gabriel Correapor su tiempo y paciencia explicándome Matlab.

A mis compañeros de maestría July, María A., Lina, Alejo y Kathleen por hacer el camino más divertido y especialmente a José Mojica por irradiar en mi vida alegría, tranquilidad y amor.

Al proyecto "Alianza para el estudio del impacto de los eventos oceánicos extremos sobre los ecosistemas marino-costeros insulares" por darme la oportunidad de trabajar en mi tesis.

A la Universidad Nacional de Colombia por brindarme la beca durante estos cuatro semestres de estudio.

A todos ellos y a los que olvidé nombrar MUCHAS GRACIAS.

Contenido

Pág.

Contenido I

Índice de figuras II

Índice de tablas IV

Resumen VI

1. Introducción 1
1.1 Planteamiento del problema 1
1.2 Justificación 4
1.3 Objetivos de la investigación 5

2. Marco teórico 6
1.4 Los corales 6
1.5 Blanqueamiento de los corales 9
1.6 Factores asociados al blanqueamiento 11
1.7 Medidas de gestión ambiental en corales deteriorados 20

3. Metodología 24
3.1 Área de estudio 24
3.1.1 Estaciones coralinas 25
3.2 Procesamiento de variables ambientales 29
3.3 Datos del blanqueamiento 32
3.4 Análisis de datos 33
3.5 Limitaciones y supuestos de los resultados 34

4. Resultados 36
4.1 Análisis espacio - temporal de las variables ambientales en las áreas de estudio 36
- Comportamiento espacial de las variables 36
- Comportamiento temporal de las variables 40

4.2 Intensidad y extensión de los eventos de blanqueamiento 45
- Eventos de blanqueamiento registrados en el Caribe colombiano por medio de la literatura y en Reefbase 46
- Eventos de blanqueamiento registrados en el Caribe colombiano por medio de los monitoreos del SIMAC 46
- Extensión 51

4.3 Comportamiento de las variables ambientales asociado a los eventos de blanqueamiento 52
- Valores extremos durante los años de blanqueamientos 53
- Análisis descriptivo de las variables desde cuatro meses antes los blanqueamientos de intensidad media y alta 61
- Comportamiento combinado: análisis de componentes principales ACP66

4.4 Síntesis 75
4.5 Medidas de gestión en arrecifes coralinos con blanqueamiento 78

5. Discusión.....80

6. Conclusiones 88

7. Recomendaciones 91

8. Bibliografía.....94

Índice de figuras

Figura 1 Marco explicativo del blanqueamiento. Adaptado a partir de Douglas, 2003 y Marshall y Schuttenberg, 2006**.....13**
Figura 2 Áreas de estudio. Los puntos rojos son los sitios de monitoreo del SIMAC **.....28**
Figura 3 Años de reporte del SIMAC en cada área **.....35**
Figura 4 Variabilidad espacial de la temperatura**.** Elaboración con datos del satélite Pathfinder versión 5.2 (AVHRR) **.....37**
Figura 5 Variabilidad espacial de la (a) clorofila y (b) turbidez. Elaboración con datos del sensor SeaWiFS (1997-2010)**.....38**
Figura 6 Variabilidad espacial de la salinidad. Elaboración con datos del WOA (World Ocean Atlas) 2009 **.....39**
Figura 7 Ciclo anual de las variables temperatura**,** clorofila, turbidez, caudal, nubosidad y vientos en las cuatro áreas de estudio, con datos entre 1997 y 2010 del satélite Pathfinder Version 5.2, del IDEAM y del sensor SeaWiFS.**.....41**
Figura 8 Prueba T para muestras independientes**.....43**

Figura 9 Intensidad del blanqueamiento con registros de la literatura y de Reefbase. Los datos están separados por área de estudio.El mes registrado en la literatura se muestra como un número bajo la barra **.....46**
Figura 10 Porcentaje blanqueamiento a partir de datos del SIMAC (1998 – 2011). a) Santa Marta (Bahía Chengue), b) Islas de San Andrés, c) Islas del Rosario, d) Islas de San Bernardo. La línea oscura muestra los promedios de todos los niveles de profundidad (2 - 12 m). La línea clara muestra los registros someros (2 - 5 m) **.....47**
Figura 11 Intensidad del blanqueamiento con datos del SIMAC, los datos están separados por área de estudio. El mes en que se realizó el monitoreo se muestra como un numero bajo la barra **.....47**
Figura 12 Intensidad de blanqueamiento a partir de diferentes fuentes de información, los datos están separados por área de estudio. Los meses en que se registró blanqueamiento se indican con números bajo las barras **.....48**
Figura 13 Extensión (número de áreas de ocurrencia) de los eventos de blanqueamiento de intensidad medio y alta **.....51**
Figura 14 Serie de tiempo de la temperatura en cada área de estudio, con datos del satélite Pathfinder versión 2.5. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....54**
Figura 15 Serie de tiempo de la clorofila en cada área de estudio, con datos del sensor SeaWiFS (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....55**
Figura 16 Serie de tiempo de la turbidez en cada área de estudio, con datos del sensor SeaWiFS (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....56**
Figura 17 Serie de tiempo de caudales en las áreas continentales del estudio, con datos del IDEAM (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....57**
Figura 18 Serie de tiempo de nubosidad en cada área de estudio, con datos de reanálisis de NCEP / NCAR. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....58**
Figura 19 Serie de tiempo de vientos en cada área de estudio, con datos del proyecto CCMP. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área **.....59**
Figura 20 Cantidad anual de extremos de las variables ambientales en cada sitio de estudio. Los rectángulos indican que ese año ocurrió blanqueamiento **.....60**
Figura 21 Comportamiento de temperatura y el caudal desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media (amarrillo) o alta (rojo) **63**

Figura 22 Comportamiento de la clorofila y la turbidez desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media o alta **64**
Figura 23 Comportamiento de la nubosidad y los vientos desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media o alta **65**
Figura 24 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta . **68**
Figura 25 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta . **70**
Figura 26 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta . **72**
Figura 27 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta . **74**
Figura 28 Tiempo de duración de las variables ambientales altas y extremas que generan blanqueamientos de intensidad media o alta **77**
Figura 29 Porcentaje de cobertura de coral. En estaciones someras de cada localidad. Elaboración propia con datos del INVEMAR – 2011 ..... **83**

Índice de tablas

Tabla 1 Caudal promedio **17**
Tabla 2 Estaciones del IDEAM (1991 – 2010) **31**
Tabla 3 Intervalos del blanqueamiento de los datos del SIMAC **33**
Tabla 4 Media y valores máximos y mínimos del ciclo anual de las variables ambientales. Datos entre 1997 – 2010 de: satélite Pathfinder (TSM), Sensor SeaWiFS (clorofila, turbidez), IDEAM (caudal), NCEP/NCAR (% cobertura de nubes) y Reanálisis CCMP (vientos). **42**
Tabla 5 Correlación de Spearman entre las variables de cada sitio de estudio. Las correlaciones marcadas en rojo son significativas a un valor p<0,05 ..... **44**
Tabla 6 Valores altos y extremos de las variables ambientales calculadas a partir de datos entre 1997 – 2010. Los datos fueron obtenidos a partir de: satélite Pathfinder (TSM), Sensor SeaWiFS (clorofila, turbidez), IDEAM (caudal), NCEP/NCAR (% cobertura de nubes) y Reanálisis CCMP (vientos) **52**
Tabla 7 Resumen de información del ACP para Santa Marta **66**

Tabla 8 Coeficientes factoriales de las variables para Santa Marta.....**66**
Tabla 9 Resumen de información del ACP para la Isla de San Andrés **68**
Tabla 10 Coeficientes factoriales de las variables para la Isla de San Andrés **68**
Tabla 11 Resumen de información del ACP para Islas del Rosario.....**70**
Tabla 12 Coeficientes factoriales de las variables para Islas del Rosario.....**71**
Tabla 13 Resumen de información del ACP para Islas de San Bernardo.....**73**
Tabla 14 Coeficientes factoriales de las variables para Islas de San Bernardo.....**73**
Tabla 15 Tabla síntesis de las variables que presentaron comportamientos anómalos durante las fechas cercanas a blanqueamientos de intensidad media o alta en las áreas costeras.....**75**
Tabla 16 Tabla síntesis de las variables que presentaron comportamientos anómalos durante las fechas cercanas a blanqueamientos de intensidad media o alta en el área insular **76**

Resumen

Como consecuencia de un estrés natural o antropogénico, los corales expulsan de sus tejidos a las zooxantelas, dando lugar a un blanqueamiento que luego puede generar mortalidades masivas. Se han identificado algunas variables asociadas al blanqueamiento pero la temperatura superficial del mar (TSM) ha sido descrita como la causa principal. En el Caribe colombiano los eventos de blanqueamiento han mostrado diferencias espaciales y temporales que no han sido explicadas. Con el fin de entender las causas de estas variaciones se evaluaron los eventos de blanqueamiento coralino en relación con la distribución espacial de algunas variables ambientales en las áreas coralinas de Isla de San Andrés, Santa Marta, Islas del Rosario y San Bernardo. Con los datos recolectados del INVEMAR y revisión bibliográfica se estableció la intensidad y extensión de los eventos de blanqueamiento representativos en el Caribe colombiano. Con datos satelitales de Pathfinder Version 5.2, del sensor SeaWiFS, del IDEAM, del CCMP y del NCEP/NCAR se analizó de forma espacio - temporal el comportamiento de la TSM, clorofila, turbidez,caudal, vientos y nubes durante los eventos de blanqueamiento. Se analizaron los extremos de las variables en comparación con los blanqueamientos y con la intención de determinar la interrelación de las variables ambientales y los eventos del blanqueamiento coralino se hicieron análisis cualitativos y multivariados (ACP). Se identificaron los años de blanqueamientos en corales ubicados en áreas locales, continentales y en la cuenca en general. Estos han ocurrido principalmente en el segundo semestre del año, durante la época húmeda, de mayor temperatura y menor salinidad del agua. Se encontró que en las áreas continentales la entrada de agua dulce, sedimentos y nutrientes por los ríos juega un papel importante en el blanqueamiento al igual que la TSM, mientras que en las áreas insulares el aumento de TSM es el factor relevante. Asimismo, fenómenos macroclimáticos como La Niña influyen en la ocurrencia de los blanqueamientos a nivel continental. A partir del conocimiento generado, se hacen una serie de recomendaciones para la gestión de los arrecifes coralinos susceptibles al blanqueamiento.

Palabras claves: blanqueamiento, variables ambientales, datos satelitales, gestión ambiental

1. Introducción

El blanqueamiento es un signo del deterioro de la salud de los corales, este evento es debido, en algunas ocasiones, al comportamiento diferencial e inusual de las variables ambientales en un área o región. Esta variabilidad está influenciada por la ubicación de las áreas coralinas y por las actividades antrópicas que allí se realicen; por lo tanto, una forma de intervenir en este deterioro es mediante una adecuada gestión y manejo de las áreas cercanas a arrecifes de coral. Este trabajo de investigación intenta mostrar la relación que existe entre las variables ambientales y el blanqueamiento de los corales del Caribe colombiano.

En el presente numeral se muestra el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos que se plantearon para el desarrollo del proyecto. En el numeral dos se muestra el marco teórico de generalidades de los corales y del blanqueamiento, se amplían los factores que lo causan y se explican algunas medidas de gestión para corales deteriorados. En los numeralestercero y cuarto se explica la metodología usada para la realización del proyecto y los resultados obtenidos. Los resultados tienen cuatro componentes: 1) un análisis espacio-temporal de las variables ambientales 2) una descripción de la intensidad y extensión de los eventos de blanqueamiento significativos en las diferentes áreas 3) una descripciónntanto cualitativa como estadística de las relaciones entre los blanqueamientos y los valores de las variables ambientales antes del registro, y 4) una revisión de las medidas de gestión. En los últimos tres capítulos se encuentran la discusión a los resultados, las conclusiones y las recomendaciones.

1.1 Planteamiento del problema

El ecosistema de los arrecifes de coral es valioso, debido a los bienes económicos y los servicios ambientales que ofrece a millones de personas. Como bienes se obtienen directamente peces, algas e invertebrados, además de insumos para la industria cosmética. Como servicios generan amortiguamiento del impacto de las olas por la muralla arrecifal protegiendo el litoral ante las tormentas, su lento proceso de crecimiento permite albergue a un gran número de especies, además de servicios bióticos, geoquímicos, informáticos, sociales y culturales y además el paisaje asociado a playas blancas, aguas cristalinas y organismos multicolores atrae a turistas, deportistas y científicos (Moberg y Folke, 1999; Westmacott, *et al*., 2001). Aproximadamente el 15 % de la población mundial vive a menos de 100 km de los ecosistemas arrecifales y dependen total o parcialmente de ellos para su sustento. Se ha estimado que a nivel mundial, los arrecifes de coral brindan bienes y servicios por valor de 375 mil millones de dólares al año; para el Caribe esta cifra es de 4,600 millones de dólares (Pomerance, 1999; Wilkinson, y Souter, D. 2008).

A pesar de su valor, la degradación de los arrecifes de coral por causas naturales y humanas es un problema reconocido mundialmente (Grigg y Dollar, 1990). Entre las actividades antrópicas directas se encuentran la sedimentación producida por la agricultura y el desarrollo costero, la eutrofización por la contaminación orgánica, la contaminación química, la sobrepesca, los dragados, las actividades náuticas y la minería de corales, entre otras (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003). Además, el incremento en el uso y explotación de sus recursos, el aumento en la población mundial, la industrialización y el turismo en las zonas costeras han influido en el aumento de los impactos y presiones.Como consecuencia del estrés, en algunas ocasiones se origina el fenómeno conocido como blanqueamiento coralino.

Ante la pérdida de cobertura coralina por el blanqueamiento coralino han surgido estudios y datos históricos que reportan el aumento de la temperatura superficial del mar (TSM) como principal causante (Glynn, 1993; Wilkinson, y Souter, D. 2008). Otras investigaciones han identificado que cambios en la salinidad (Hoegh-Guldberg, 1999), en la turbidez del agua (Babcock y Smith, 2000 ; Turner, *et al.,* 2000; González – Díaz, *et al.,* 2003; Devlin, *et al.,* 2012, Browne *et al*., 2013), en la nubosidad (Mumby, *et al*., 2001,

Turner, *et al.,* 2000), eventos extremos como huracanes (Scoffin, 1993; Van Woesik *et al*., 1995 ; Gardner *et al*., 2005; Scheffers*, et al,* 2006), surgencias (Bayraktarov, *et al*., 2012) y la combinación de los anteriores (Turner, *et al.,* 2000;Buddemeier *et al*., 2004; Maina, *et al*.; 2008) también son variables que se relacionan con el blanqueamiento y que pueden aumentar o disminuir su impacto.

Durante El Niño 1997 ocurrió un evento de blanqueamiento masivo en el cual el 16 % de los arrecifes del Caribe resultaron deteriorados (Wilkinson y Souter, 2008). En 1998 se identificó un blanqueamiento en la isla de San Andrés, Santa Marta e Islas del Rosario, la causa no fue determinada pero se atribuyó al incremento de la TSM (Rodríguez – Ramírez, *et al.,* 2006; Wilkinson y Souter, 2008). En el 2005 ocurrió nuevamente un evento de blanqueamiento masivo en el Caribe aparentemente relacionado con un incremento en la TSM; en el Caribe colombiano en las Islas del Rosario y de San Bernardo entre el 70 y 80 % de cobertura de coral tuvo señales de blanqueamiento (Rodríguez – Ramírez,*et al.,* 2008) y la mortalidad asociada a este fenómeno alcanzó el 8 % (Gil-Agudelo *et al*., 2005). En Santa Marta el porcentaje de coral blanqueado estuvo entre 1 y 30 % (Venera – Pontón, 2008; Wilkinson y Souter, 2008), en San Andrés el blanqueamiento fue registrado en ReefBase, con porcentaje de coral vivo blanqueado entre 1 y 20 %.En el 2010 se evidenciaron valores anómalos de temperatura (29,4 °C), que excedieron el umbral de tolerancia de los corales lo que desencadenó otro evento de blanqueamiento masivo (INAP, 2010). El SIMAC (Sistema de Monitoreo de Arrecifes de coral, programa del INVEMAR), reportó para la estación de Bahía Chengue un porcentaje de blanqueamiento del 18 %; en Santa Marta este evento ha sido el más severo que se ha reportado, por encima de los eventos de 1997 y 2005.

El alto número de factores potenciales que también intervienen, requieren de un estudio más riguroso para establecer las causas y efectos de estas relaciones (Glynn, 1993; McClanahan *et al.,* 2007a). Especialmente en el Caribe colombiano se necesita entender por qué los blanqueamientos, han presentado distintos patrones espaciales y no han ocurrido sincrónicamente en todos los arrecifes (Gil-Agudelo *et al*., 2005). Por lo tanto, se requiere de un análisis que establezca cuáles variables inciden en cada área coralina y cómo lo hacen. Saber cómo se interrelacionan y generan un impacto sinérgico es importante para tener una apreciación de qué tan severo puede ser el blanqueamiento ante un grupo de variables en diferentes áreas. Asimismo, desde la perspectiva de la

gestión ambiental, el blanqueamiento de corales plantea un desafío, ya que las causas naturales están más allá del control de los administradores de los arrecifes (Marshall y Schuttenberg,2006).

Con base en estas problemáticas surgen las preguntas: ¿Cómo es la relación entre las variables ambientales relevantes y los eventos de blanqueamiento en las diferentes regiones del Caribe colombiano? En consecuencia ¿Cuáles son las áreas más susceptibles de sufrir blanqueamiento por el efecto combinado de estas variables? Y ¿Qué recomendaciones de manejo se pueden proponer para estas áreas?. Lo anterior lleva al planteamiento de la hipótesis: La variación espacio-temporal de algunas variables ambientales explica las diferencias en intensidad y ocurrencia del blanqueamiento en las distintas zonas arrecifales del Caribe Colombiano.

1.2 Justificación

El blanqueamiento puede modificar las actividades biológicas y ecológicas de las especies de coral, por ejemplo la alimentación, el crecimiento, la reproducción y el desarrollo larval (Glynn, 1993; Douglas, 2003). Episodios de blanqueamiento a gran escala han sido atribuidos a la alta temperatura superficial del mar, mientras que los de menor escala han sido asociados frecuentemente a factores de origen humano, que actúan en áreas más pequeñas (Westmacott, *et al.,*2001). Los estudios hechos en Colombia con relación a las condiciones de los eventos de blanqueamiento son puntuales (Zeay Tobón, 1989; Solano, 1994; Rodríguez – Ramírez, *et al.,* 2006; Venera – Pontón, 2008; Wilkinson y Souter, 2008; Navas-Camacho *et al*., 2010; Bayraktarov,*et al.,*2012) y no hay un estudio histórico de las condiciones que han precedido al evento.

En este sentido, el uso de datos satelitales para estudiar los procesos del océano se ha vuelto una herramienta importante en la investigación en diferentes regiones del planeta, ya que permite generar series históricas más completas de diferentes variables. Así, este trabajo integra la información aportada por los satélites para evaluar algunas variables ambientales y relacionarlas con eventos de blanqueamiento reportados en el Caribe colombiano, con el fin de identificar patrones que puedan servir de guía en la planificación y gestión ambiental de las áreas coralinas.

La elaboración de este trabajo de investigación adquiere importancia en la medida que integra los factores ambientales que reflejan cuáles son las áreas coralinas que han presentado mayor exposición al blanqueamiento. De esta manera, se busca explicar la respuesta diferencial a nivel espacial y temporal por parte de los corales a los eventos de blanqueamiento. Finalmente, la protección de los arrecifes de coral debe incluir el manejo de los impactos humanos que pueden causar o agravar el blanqueamiento. Con un adecuado manejo, a largo plazo, los corales se pueden recuperar de los blanqueamientos graves. Programas de este tipo han sido realizados por la Unión Mundial para la Naturaleza (UICN), el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), la Iniciativa Internacional para los Arrecifes de Coral (ICRI), la Red Global de Monitoreo de Arrecifes de Coral (GCRMN) y el Programa Degradación de los Arrecifes de Coral en el Océano Indico CORDIO (ReefBase, 2012).

1.3 Objetivos de la investigación

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los eventos de blanqueamiento coralino en relación con la distribución espacial de algunas variables ambientales, para el Caribe colombiano.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Establecer la intensidad y extensión de los eventos de blanqueamiento en el Caribe colombiano.

Analizar las variables ambientales de forma espacio - temporal.

Analizar la relación de las variables ambientales y los eventos del blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano.

A partir del conocimiento generado, hacer recomendaciones para una mejor gestión de los arrecifes coralinos susceptibles a blanqueamiento.

2. Marco teórico

En la actualidad, se ha generado información sobre los impactos reales y potenciales, tanto ecológicos como sociales del blanqueamiento. Por supuesto, no hay una cura inmediata para este evento pero se debe buscar una posición que permita proteger los recursos restantes y estimular su recuperación (Westmacott, *et al*., 2000).En los siguientes numerales se resumen las principales características de los corales duros, del evento de blanqueamiento, los factores relacionados a este evento y se abordan algunas medidas de gestión propuestas en la literatura.

1.4 Los corales

Los corales escleractíneos son animales capaces de formar colonias compuestas de pólipos entrelazados física y fisiológicamente, pueden ser divididos en dos categorías generales: aquellos capaces de formar arrecifes conocidos como hermatípicos y los que no son capaces de formar arrecifes o ahermatípicos.Los coralesescleractíneos hermatípicos forman complejas construcciones quesirven de hábitatpara una gran cantidad de organismos que conforman el ecosistema arrecifal.A nivel mundial los arrecifes coralinos ocupan un área de 290.000 km^2, aproximadamente el 90 % están ubicados en el Pacífico occidental y el Indopacífico. En el Mar Caribe hay aproximadamente un área de 10.400 km^2 de arrecifes de coral de los cuales el 16% se encuentran en el Caribe colombiano (Díaz, 2000).

Los principales géneros de corales escleractíneos en el Caribe son: *Acropora, Montastraea, Porites, Diploria, Siderastrea y Agaricia,* que incluye formas coloniales y solitarias y dependen de la profundidad a la que se encuentren. Los tipos de arrecifes están determinados por su continuidad, presencia o no de una laguna arrecifal, entre otras características, así son clasificados como: arrecifes franjeantes que están cercanos a masas de tierra y a lagunas de poca profundidad, éstos son los más comunes y se desarrollan directamente a lo largo del borde de la costa alcanzando un ancho de hasta 1 km; los arrecifes de barrera se extienden paralelos y a gran distancia de la costa,

separados por una gran laguna de aguas profundas. Los atolones tiene forma circular u ovalada y en su centro se forma una laguna, aunque son más comunes en el Indopacífico, en la cuenca Caribe hay aproximadamente 14 de éstos, por ejemplo en el archipiélago de San Andrés y Providencia se encuentran algunos, el desarrollo de los atolones está por lo general asociado a una isla volcánica que se ha hundido paulatinamente. Los arrecifes de plataforma se desarrollan como domos o bancos ovalados que se levantan aisladamente sobre la plataforma continental, por ejemplo: Los arrecifes de parche son pequeños y de forma irregular, surgen del fondo y están separados de otras secciones del arrecife (Díaz, 2000).

Dentro de las condiciones fisicoquímicas generales que determinan la distribución y el desarrollo coralino a escala global están la temperatura, la salinidad, los nutrientes y la disponibilidad de luz, éstos son considerados factores principales. Mientras que condiciones de oleaje, corrientes y frecuencia de eventos extremos son factores secundarios de orden regional y local(Kleypas *et al*., 1999). Los ambientes propicios para que se desarrollen los corales ocurren en aguas claras caracterizadas por baja turbidez, oligotróficas o con baja concentración de clorofila, en temperaturas entre los 18 y 29 ºC y en salinidades entre 33 y 36. Dependiendo de qué tanto se cumplan las condiciones propicias se desarrollan diferentes extensiones de arrecifes de coral. Por ejemplo en Santa Marta los factores limitantes del desarrollo vertical coralino en sitios expuestos son: el movimiento de sedimentos, las bajas temperaturas que se presentan en la época seca y los cambios bruscos de salinidad (Antonius, 1972; Werding y Sánchez, 1988).

Desde 1980 hasta la actualidad, la cobertura coralina en el Caribe, ha disminuido en un promedio de 80 % y ha aumentado el dominio de algas (Hughes, 1994; Jackson, 1997; Gardner,*et al.,* 2005; Rodríguez - Ramírez, *et al*., 2008). Los fósiles arrecifales han revelado que los cambios tan drásticos en estas comunidades no tienen precedentes en los últimos 200.000 años, incluso durante las grandes fluctuaciones del nivel del mar y del clima (Pandolfi, *et al.*, 2011); a raíz de esta degradación, se han adelantado estudios en torno a la salud de los arrecifes de coral y las variables que los afectan.

- Cobertura coralina

En el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis" INVEMAR existe el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos - SIMAC, el cual es un programa de largo plazo que tiene como objetivo generar información acerca

de la salud de los arrecifes de coral para proveer recomendaciones de uso y para fomentar su conservación. Entre 1998-2001, realizaron monitoreos anuales en la Isla de San Andrés, la Bahía de Chengue, las Islas del Rosario y la isla de Gorgona y en el 2002 ampliaron la cobertura a las Islas San Bernardo, el Urabá chocoano y la Ensenada de Utría (Garzón-Ferreira,*et al*., 2002). El programa realiza monitoreos a localidades de desarrollo coralino separadas como mínimo por 500 m, con al menos dos estaciones separadas a 100 m aproximadamente. Cada estación cuenta con mínimo dos parcelas y entre ellas hay transectos con diferentes niveles de profundidad (somero: 2-5 m, medio: 9-12 m), estas características varían para cada área. Entre los monitoreos que hace el SIMAC, están las enfermedades propuestas a nivel de todo el Caribe y que han sido identificadas en Colombia (banda negra, banda blanca, banda amarilla, banda roja, plaga blanca, lunares oscuros), el blanqueamiento y otros signos de deterioro. Para evaluar las enfermedades y el blanqueamiento, el SIMAC utiliza transectos permanentes con cadenas rotuladas, examinan todas las colonias pétreas mayores a 5 cm y registran la incidencia de estos eventos; también miden la cobertura de organismos sésiles, entre ellos cobertura de coral vivo.

Los análisis del SIMAC han mostrado que las algas son cada vez másun componente biótico sobresaliente en San Andrés (53,3 %) e Islas del Rosario (30,3 %), pero las causas no han sido identificadas (Garzón-Ferreira y Díaz 2003). En las áreas de monitoreo de Islas del Rosario y San Bernardo se ha registrado una pérdida de coral desde el evento de blanqueamiento masivo del 2005 (Gil-Agudelo, *et al*., 2005).

Un comportamiento diferente se ha observado en la Isla de San Andrés y en Santa Marta, donde la investigación de Vega - Sequeda, *et al*., (2008) determinó que en el área de formaciones coralinas de Santa Marta, la tendencia generalizada es que las algas sean el componente predominante. La disminución en la cobertura de coral vivo en el 2010 y el aumento de algas en Tayrona se relacionó con la degradación de los arrecifes, tras la ocurrencia del evento de blanqueamiento de 2010(Vega-Sequeda *et al*., 2011).

> *“En menos de veinte años se pasó de comunidades arrecifales bien desarrolladas, con grandes extensiones de coral del género Acropora sp. en buen estado y 48 especies de escleractíneos, a un paisaje formado por cementerios de Acropora palmata, lechos de*

cascajo de A.cervicornis cubiertos por algas y menos de 30 especies de escleractíneos" (Chasqui - Velasco, et al., 2007).

1.5 Blanqueamiento de los corales

Los corales hermatípicos, tienen una relación simbiótica con las microalgas fotosintéticas llamadas zooxantelas (*Symbiodinium sp*.) (Trench, 1979), las cuales poseen clorofila *a* y *c*, carotenoides y peridinina la cual confiere el color café (Douglas, 2003). Las algas proveen carbohidratos y facilitan el depósito de calcio al coral, por su lado el coral le ofrece material nitrogenado y otros compuestos requeridos para el desarrollo algal (Papina, *et al.,* 2003). Cuando el coral es afectado por algún factor como la temperatura extremadamente alta o baja, la relación simbiótica se rompe y las algas son expulsadas del tejido.

Los efectos conocidos del blanqueamiento son: disminución de la densidad de zooxantelas, reducción dela productividadprimaria, pérdida de pigmentos fotosintéticos, incremento en la tasa de respiración y disminución de las proteínas, lípidos, carbohidratos y de la calcificación de los corales, lo que puede conducir acambios enla liberación de productosorgánicos, alterando así procesosbiogeoquímicos (Porter *et al.,* 1989; Glynn, 1993; Brown, 1997; Douglas, 2003). La disminución de la tasa de crecimiento y calcificación hace que el coral tenga que competir por espacio con otros organismos bénticos como esponjas, tunicados (Buddemeier *et al.,* 2004), y especialmente, con algas porque crecen rápidamente sobre los corales que están enfermos o deteriorados (Cortes *et al.,* 1984).

El blanqueamiento coralino es un término genérico en el cual la pérdida de color va desde una pérdida parcial o total, hasta la degradación de los pigmentos fotosintéticos, debidoa la pérdida del alga simbiótica que da la coloración; el coral blanqueado se torna blanco, porque éste es el color del esqueleto de carbonato de calcio (Buddemeier *et al.,* 2004; Wilkinson, y Souter, D. 2008). Este evento no se produce únicamente en los corales, sino en todos los animales que tienen una relación simbiótica con las algas dinoflageladas del género *Symbiodinium sp*.

- Intensidad

Diferentes patrones de respuesta al blanqueamiento pueden ser encontrados entre arrecifes de diferentes regiones, entre colonias e incluso entre especies (Brown, 1997), además la pérdida de algas zooxanteladas puede durar desde días a semanas y puede tomar diferentes tonos de coloración. Durante un evento de blanqueamiento severo los corales pueden perder entre 60 - 90 % de sus zooxantelas (West y Salm, 2003). El monitoreo de eventos de blanqueamiento ha revelado una variación marcada en el grado de blanqueamiento de un sitio a otro (p. ej. Rodríguez- Ramírez *et al.,* 2008, McClanahan *et al.,* 2007a). Aun no existe un método de evaluación del grado en que afecta el blanqueamiento a los organismos coralinos, esto debido a la variabilidad genética de las microalgas, a las diferentes formas de aclimatación del coral y a la intensidad de la perturbación (Glynn, 1993; Douglas, 2003).

Las especies de coral responden a las condiciones locales de intensidad de luz, velocidad de flujo de agua y temperatura, entre otras; sin embargo, los corales enfermos y los corales estresados por el blanqueamiento son más propensos y se vuelven más susceptibles a sufrir blanqueamiento. Por su parte, las bajas tasas de recuperación se dan en las comunidades coralinas que experimentan perturbaciones poco frecuentes, éstas también pueden estar influenciadas por la forma de reproducción de las especies; la reproducción tiende a ser más rápida si el coral se reproduce asexualmente después de una fragmentación por perturbación (Glynn, 1993).

El evento de blanqueamiento puede disminuir el crecimiento y la capacidad reproductiva y aumentar la mortalidad coralina (Douglas, 2003). El máximo nivel de impacto del blanqueamiento dependerá de si los corales pueden recuperarse del blanqueamiento o morir. Si ellos se recuperan, el impacto habrá sido leve.Se ha observado que los corales pueden recuperarse después de un evento de blanqueamiento, debido al restablecimiento de la asociación simbiótica con las zooxantelas, que pueden provenir del medio circundante. Por lo tanto, tras el blanqueamiento el coral podría sobrevivir y su relación simbionte recuperarse en un período de semanas a meses, o alternativamente el tejido del coral podría morir. Cuando las causas que producen el evento de blanqueamiento duran varias semanas o incluso meses sin desaparecer, se causa la

muerte del coral. En principio debido a que el coral no recibe sus nutrientes por parte de las zooxantelas (Glynn, 1993; Sutherland *et al.,* 2004). Si la mortalidad es alta, los arrecifes blanqueados cambian rápidamente de una apariencia blanquecina a una apariencia opaca y café-grisácea en la medida en la que son cubiertas por cianobacterias y algas (Westmacott,*et al*., 2000). El coral que lleva uno o dos meses muerto presenta una delgada capa de algas sobre el esqueleto todavía blanco, colonias en posición de vida, colonizados por algas filamentosas y con los cálices completos (Glynn, 1993). El porcentaje de coral muerto puede ser un indicador del impacto de blanqueamiento, solamente si reporta muerte reciente y se sabe que ocurrió blanqueamiento en el área (Oliver,*et al*., 2004).

En el evento de blanqueamiento de 2005 en las áreas coralinas del Archipiélago de Corales del Rosario y San Bernardo, prácticamente todas las especies presentes en la zona a profundidades menores a los 12 m se vieron afectadas, entre éstas estaban: *Porites astreoides*, *Manicina aerolata*, *Colpophyllia natans*, *Montastraea annularis*, *M. faveolata*, *M. franksi*, *Agaricia tenuifolia*, *Diploria labyrinthiformis*, *Porites furcata* y *Siderastraea siderea*. En ese evento se registró la muerte de las especies coralinas*A. palmata, A. cervicornis, D. labyrinthiformis* y *Millepora alcicornis* (Gómez y López, 2011).Se observaron parches mayores a 100 m^2 de *A. palmata* y *A. cervicornis*, con mortandad reciente por lo cual fue atribuida al blanqueamiento coralino. También se observaron que colonias que fueron marcadas y revisadas dos meses después del pico de blanqueamiento, murieron completamente, varias de ellas de más de 50 cm de diámetro (Gómez y López, 2011).

La intensidad de un blanqueamiento para un área arrecifal puede estimarse, teniendo en cuenta la cobertura de coral vivo total que presenta blanqueamiento (Oliver,*et al*., 2004). En *ReefBase: A Global Information System for Coral Reefs* - http://www.reefbase.org - se encuentran reportes de severidad de blanqueamientos dependiendo del total de cobertura de coral viva para algunas áreas (Oliver,*et al.,* 2004).

1.6 Factores asociados al blanqueamiento

La principal causa del blanqueamiento coralino ha sido atribuida al aumento en la TSM, sin embargo, cambios drásticos en diferentes condiciones fisicoquímicas del agua, como al aumento en la radiación solar, la turbidez del agua, la sedimentación, las mareas

extremadamente bajas, las enfermedades, la contaminación y los cambios de salinidad (Goreau y Hayes,1994; Cortes, *et al*., 1984; Williamsy Bunkley, 1990; Brown, 1997) también están relacionadas al blanqueamiento; estas últimas han sido puntuales y nunca comparables en magnitud a los originados por el calentamiento del agua (Glynn, 1993; Douglas, 2003). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**También se ha reportado que la proliferación de esponjas, brotes de la estrella de mar *Acanthaster,* contaminación crónica y los microorganismos patógenos (Douglas, 2003) podrían actuar sinérgicamente con los factores abióticos y esta acción generar diferentes respuestas en el coral.

En la Figura 1se muestra un esquema del proceso del evento de blanqueamiento coralino, éste inicia con la modificación de alguna variable ambiental, la cual, dependiendo del tiempo que dure estamodificación, hace que el coral se blanquee intensamente, se recupere o se muera. Algunos factores que pueden disminuir el impacto de las variables ambientales son dados en West y Salm (2003): 1) factores físicos que reducen el estrés por temperatura (intercambio de agua oceánica, surgencia, entre otros). 2) factores físicos que promueven el movimiento del agua (corrientes rápidas, topografía, vientos, entre otros). 3) factores físicos que disminuyen el estrés por radiación (sombra, altura de la pendiente arrecifal, turbidez, nubosidad, entre otros). 4) factores que se correlacionan con la resistencia al blanqueamiento (variabilidad de la temperatura y ocurrencia de mareas bajas). Además, identificaron los factores resilientes que ayudan a la recuperación de los corales tras el blanqueamiento: factores intrínsecos que son características bióticas de la comunidad (baja abundancia de bioerosionadores y coralívoros, disponibilidad y abundancia de larvas y reclutamiento) y factores extrínsecos es decir, características de la zona coralina (conectividad a través de las corrientes).

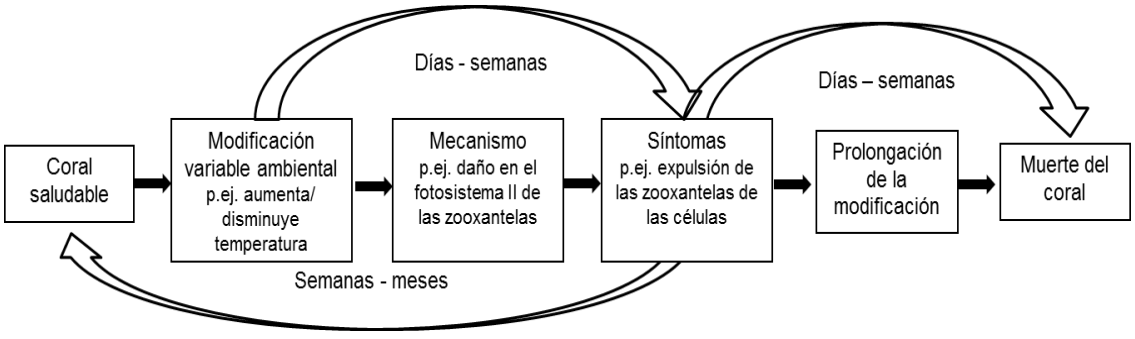


Figura 1 Marco explicativo del blanqueamiento. Adaptado a partir de Douglas, 2003 yMarshall y Schuttenberg, 2006

- Temperatura Superficial del Mar - TSM

La temperatura superficial del mar se usa como un indicador ambiental por estar relacionada tanto con aspectos físicos como con los ciclos de vida, por lo cual estudiar su variabilidad espacial y temporal es relevante desde los puntos de vista físico, climático, biológico y ambiental (Bernal *et al.,* 2006).Los corales viven cerca de su límite de tolerancia térmica (Kleypas, *et al*., 2001), por lo que pequeñas variaciones en la temperatura (0,5 -1,5 °C) durante varias semanas o grandes cambios (3 - 4 °C) durante cortos tiempos pueden llegar a causar un mal funcionamiento del coral, quedando susceptibles a enfermedades, a crecimiento de algas, a los eventos de blanqueamiento y hasta a la muerte (Glynn y D'Croz, 1990). A pesar de las amenazas de blanqueamiento por cambios en la temperatura, Guest *et al*., (2012) sugieren que los corales desarrollan una respuesta adaptativa al estrés térmico, tras haber sufrido blanqueamiento severo y ubicados en regiones sometidas a regímenes de temperatura más variables.

Además del blanqueamiento por aumento en la TSM, a nivel global se han reportado eventos de blanqueamiento por enfriamiento. Por ejemplo, Hoegh-Guldberg *et al*., (2005) evaluaron un blanqueamiento en la Gran Barrera Arrecifal de Australia (GBAA) durante el 2003, la disminución de la temperatura coincidió con mareas bajas, vientos fuertes y baja humedad. El estudio de Hernández *et al*., (2010) en el sur del golfo de California, a principios del 2008, registró una anomalía de temperatura baja de 1,8 °C menor al promedio registrado en los últimos 25 años, identificaron un blanqueamiento severo que alcanzó hasta el 90 % de la cobertura. En esta región, durante los últimos 10 años se ha monitoreado el blanqueamiento por fenómeno El Niño, pero no se tenía noticia de que la disminución de la temperatura también fuera un agente de perturbación.

Para monitorear esta variable, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica - NOAA provee datos globales como mapas de *HotSpots*[1]y datos de *Degree Heating Weeks*[2], los cuales dan información de si el evento de blanqueamiento está asociado con eventos de temperatura global o regional y cuánto tiempo duró el aumento de temperatura.

- Fenómenos ENOS

Los denominados fenómenos de El Niño y La Niña dominan la variabilidad climática del planeta y son dos fases opuestas que hacen parte del fenómeno llamado El Niño-Oscilación Sur (Álvarezy Poveda, 2006). El calentamiento del océano tropical relacionado con el Fenómeno de El Niño, aunque no es periódico, se presenta generalmente cada 2 y 7 años. En el Caribe colombiano, durante el fenómeno de El Niño se presentan valores de la TSM entre 29 y 30,4 °C, es decir un aumento, comparado con el valor promedio 27,6 °C. Durante La Niña, la TSM tiene valores entre 26 y 28,4 °C, disminución que se da originada por los vientos alisios que vienen del Este.

Las características del ENOS que son conocidas por causar blanqueamiento y mortalidad coralina son: (Niño) disminución del nivel del mar que causa exposición de los arrecifes, calentamiento de arrecifes someros y mareas bajas;(Niña) alta precipitación, salinidades bajas y aumento de la sedimentación (Glynn, 1993; Brown, 1997).

Las principales regiones arrecifales del mundo (Caribe, Atlántico Occidental, el Pacífico oriental, central y occidental, el Océano Índico, el Golfo Pérsico y el Mar Rojo)

[1]Un Hotspot es un área donde las TSM han excedido el máximo anual esperado en una localidad. Si un Hotspot de 1 °C por encima del máximo anual persiste por diez semanas o más, es de esperarse que ocurra blanqueamiento (Wilkinson, 2008; NOAA, 2000)

[2] La NOAA desarrolló el índice *Degree Heating Weeks* (DHW, por su sigla en inglés). El DHW indica las semanas durante las cuales la temperatura permanece por encima del umbral de tolerancia de los corales.

experimentaron eventos de blanqueamiento en 1980 y principios de los noventa, éstos fueron de gran escala y llegaron a ser mortales (Williams y Bunkley, 1990; Glynn, 1993), por lo cual no pueden ser explicados completamente como consecuencia de estrés por factores locales, probablemente necesitaron un factor de mayor cobertura espacial, como los fenómenos ENOS (El Niño Oscilación Sur).

Durante los años 1982 y 1983 se presentó un fuerte fenómeno de El Niño que aumentó la TSM. Glynn y D'Croz (1990) a mediados de marzo de 1983 observaron en Panamá parches de hasta 100 m^2 de corales blanqueados. Enumeraron una serie de actividades humanas y naturales que podrían ser la causa de la muerte masiva de corales sin determinar con certeza el agente responsable del fenómeno, apuntaron al calentamiento del agua debido al fenómeno de El Niño como la posible causa. Para el mismo evento, Cortés *et al*., (1984) hicieron un estudio de la pérdida de zooxantelas en corales arrecifales de Costa Rica.Determinaron que el evento fue fuerte pero no devastador, porque a finales de octubre observaron colonias que sobrevivieron y otras que estaban saludables. En ese año el aumento en la temperatura superó los niveles de tolerancia de los corales (31 °C), pero concluyeron que el agente causante del evento no fue sólo este suceso sino el efecto sinérgico de temperaturas altas, sedimentación, organismos depredadores, organismos patógenos, entre otras presiones ambientales (Cortés *et al*., 1984).

Rodríguez – Ramírez,*et al*., (2008) reportaron que en el 2005 se presentó un blanqueamiento masivo de corales que varió a lo largo de la región Atlántica. En Brasil el blanqueamiento se observó en abril. En Venezuela el pico de intensidad fue entre noviembre y diciembre. En Colombia los primeros signos fueron observados a mediados del mes de abril en las aguas de la costa Pacífica. La temperatura alcanzó a elevarse entre 3 y 4 °C por encima de la media mensuala finales de mayo y principios de junio. A mediados del mes de mayo, las aguas del litoral Caribe comenzaron un proceso similar, alcanzando temperaturas entre 1,5 y 2,5 °C por encima de la media mensual, este aumento permaneció hasta el mes de agosto. Hacia finales del mes de junio, las primeras observaciones de blanqueamiento masivo fueron realizadas en las Islas del Rosario (ReefBase, 2012). El informe de Gil – Agudelo,*et al*., (2005) mostró que los arrecifes coralinos en profundidades someras de Islas del Rosario, San Bernardo, San Andrés y Providencia fueron afectados. La severidad no fue la misma a diferentes escalas espaciales. Islas del Rosario fue una de las áreas que presentó pérdida de

cobertura coralina (entre un 1 y 90 % de las colonias), con una mortalidad asociada que varió entre 0 y 8 %. En Islas de San Bernardo fueron encontradas entre 1 y 70 % con señales de blanqueamiento y entre 0 y 5 % con mortalidad asociada al fenómeno. En San Andrés y Providencia el fenómeno de blanqueamiento parece haber sido menos severo, en algunas áreas se encontró que entre el 50 - 60 % de las colonias sufrieron blanqueamiento y la mortalidad coralina asociada a este evento fue nula. En Santa Marta se encontró que entre el 1 y 40 % de los corales evaluados tenían signos de blanqueamiento y menos del 1 % presentaron mortalidad. En esta última, el evento fue detectado hacia finales del mes de octubre mientras que en islas del Rosario fue registrado en junio. Este evento de blanqueamiento fue asociado al aumento de la TSM.

Durante el año 2009 y 2010 los datos recolectados por el SIMAC en la estación Isla Tesoro de Islas del Rosario, muestran valores de temperatura por encima del umbral de tolerancia de los corales desde mayo.En consecuencia, durante la segunda mitad del año se registró un evento de blanqueamiento coralino en algunas áreas del Caribe colombiano, similar al ocurrido en el año 2005 (Gómez y López, 2011). Las primeras observaciones del evento fueron reportadas desde agosto para Islas del Rosario, San Bernardo y Tayrona a diferentes profundidades (ReefBase, 2012). Su ocurrencia se relacionó con el incremento inusual y prologado de la TSM y con las elevadas descargadas de aguas continentales por las fuertes lluvias frente al fenómeno La Niña (Vega – Sequeda, *et al*., 2011).

- Caudal

A través de los satélites se ha podido detectar la influencia de los ríos Mississippi, Río Grande, Río Magdalena, Amazonas y Orinoco en el Caribe. Desde un punto de vista general, estos ríos vuelven más vulnerables a los arrecifes de coral al exponerlos a procesos de bioerosión, en aguas donde la producción primaria es mayor y donde diferentes tipos de compuestos tóxicos son vertidos y distribuidos a través de los ríos hasta las zonas marinas (Marshall y Schuttenberg,2006).En la costa Caribe colombiana cercana a Santa Marta, Islas del Rosario y San Bernardo, los ríos que tienen mayor aporte de agua dulce, de sedimentos y compuestos tóxicos son: Magdalena, Canal del Dique, Sinú, Atrato, Palomino, Ranchería, Don Diego, Gaira, Manzanares, Fundación,

León y Acandí (Poveda, 2004; Marín*, et al.,*2005). En la Tabla 1 se muestra el caudal promedio de algunos de estos ríos.

Tabla 1 Caudal promedio.Tomado de Marín, *et al.,* 2005

Río	Q (m^3/s)
Canal Dique	455
Sinú	291
Magdalena	7121
Palomino	25
Ranchería	12
Don Diego	37
Gaira	3
Manzanares	2

Los corales ubicados en áreas cercanas a la descarga de agua dulce pueden sufrir blanqueamiento debido al exceso de sedimentos sobre los corales, la disminución de la salinidad, la reducción de los niveles de iluminación producidos por el incremento de la turbidez y a los cambios de concentración de clorofila por la entrada de nutrientes (Rogers, 1979; Babcock y Smith, 2000; True, 2012).

- Sedimentos (Turbidez)

La carga de sedimentos produce una alta turbidez en el agua que hacontribuido significativamente a la muerte de los corales (Babcock y Smith, 2000; Turner, *et al.,* 2000; González – Díaz, *et al.,* 2003; Devlin, *et al.,* 2012, Browne *et al*., 2013). Por ejemplo los sedimentos que son arrastrados desde Bocas de Ceniza, en donde desemboca el Río Magdalena, y del Canal de Dique han afectado a los corales ubicados en las Islas del Rosario (Pinilla, *et al*., 2007). Claro está que también en estos corales ha influido el uso de dinamita en la pesca, el turismo incontrolado, el desarrollo costero, la urbanización sin control ni planificación, el tráfico no regulado de lanchas y los eventos masivos de blanqueamiento coralino repetidos (Werding y Sánchez, 1988; Pineda *et al*., 2006; Gil-Agudelo *et al*., 2005). La turbidez reduce la tasa de crecimiento de los corales, debido a que disminuye la entrada de radiación solar que permite la realización de la fotosíntesis en las zooxantelas; en ocasiones genera necrosis del tejido coralino y ahogamiento de los mismos (Rogers, 1979; Babcock y Smith*,* 2000).

La turbidez medida desde sensores satelitales es interpretada a través del coeficiente de atenuación difusa,el cual indica cómo es atenuada la luz dentro de la columna del agua.

Tiene relación con la concentración de fitoplancton y sedimentos orgánicos e inorgánicos disueltos, sin embargo, este parámetro no diferencia entre turbidez producida por materia orgánica o inorgánica (Moreira, *et al.,*2009).

- Salinidad

La salinidad es un indicador de la intensidad y la localización de los intercambios de agua en la interfase océano-atmósfera; los ríos que llevan sus aguas al mar Caribe generan gradientes de salinidad entre la costa y la zona oceánica, por ejemplo la entrada del ASGPC produce agua superficial de baja salinidad comparada con la circulación general del Caribe (Ruiz - Ochoa, 2011). Se ha demostrado que pequeños cambios de salinidad pueden generar modificación en la función metabólica de los corales, incluyendo efectos en la respiración y fotosíntesis de las algas simbiontes (True, 2012). Sin embargo, las observaciones y las fuentes de información de esta variable son muy escasas y los gradientes de salinidad no se han estudiado en el contexto espacio-temporal (Dessier y Donguy, 1994; Hoegh-Guldberg, 1999; Ruiz-Ochoa*,* 2011).

- Clorofila

Las aguas donde se encuentran los arrecifes de coral generalmente son pobres en nutrientes y tienen poca producción primaria. Para crecer en lugares oligotróficos, los corales tienen una relación simbiótica con las zooxantelas y el reciclaje de nutrientes es la principal razón para esta relación. En los casos en que hay muchos nutrientes, se puede producir un crecimiento acelerado de algas, las cuales reducen la disponibilidad de luz para la fotosíntesis y compiten por el espacio y el sustrato con los corales. El mar Caribe es de aguas limpias y poca producción primaria y es el ingreso de nutrientes quien mantiene la fertilización de sus aguas (INVEMAR, 2002). Solo en sitios con cambios en la circulación del agua, se han observado regiones eutróficas (Espinosa *et al.,* 2005). Tal es el caso en las zonas de surgencia, donde hay un aumento de nutrientes por medio del movimiento de las aguas profundas hacia la superficie, generalmente producido por el efecto del viento, aunque también influyen la forma y otras características de la costa (Nietoy Demarcq, 2009).

La concentración de clorofila - *a* es el estimador químico más utilizado para caracterizar la biomasa fitoplanctónica en el océano (Santander *et al.,* 2001). La distribución de la clorofila - *a* ha sido medida a través de sensores a bordo de satélites desde 1979. El Coastal Zone Color Scanner (CZCS) a bordo del satélite Nimbus-7, fue el primero en mostrar imágenes a color (Nietoy Demarcq, 2009). Este satélite operó hasta 1986 y fue sólo hasta 1997 que llegó el Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) a bordo del satélite SeaStar. El satélite más actual es el Moderate Resolution Imagining Spectrometer (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua.

En la isla de San Andrés no hay entrada de agua dulce, pero los lixiviados procedentes del relleno sanitario, los vertimientos de aceites lubricantes de las embarcaciones, la alta sedimentación como resultado de la erosión del suelo y los drenajes de aguas subterráneas por infiltración de los pozos y tanques sépticos, además de las actividades turísticas, son factores que influyen en la modificación de las propiedades físicoquímicas del agua.

- Nubosidad y vientos

Entre 1997 y 1998 el agua del mar registró temperaturas más altas del promedio debido al fenómeno de El Niño (Wilkinson y Souter, D. 2008), que condujo a un evento de blanqueamiento severo en gran parte de las áreas arrecifales del mundo. A pesar de esto, hubo zonas que no presentaron eventos tan severos como se esperaba. Al respecto, Mumby, *et al*., (2001) presentaron un modelo estadístico, en el que expresan que el tiempo nublado pudo ser la causa de la respuesta diferencial al evento de blanqueamiento en algunos corales. Usaron datos mensuales de TSM satelital (AVHRR) y medidos *in situ* entre 1983 y 1999, además de datos diarios de velocidad del viento y cobertura de nubes. Realizaron un análisis de discriminación cuadrática para evaluar la interacción entre las variables ambientales y su capacidad para predecir eventos de blanqueamiento. Los datos meteorológicos fueron analizados únicamente en las fechas en que se reportó anormalidad positiva de la temperatura. Concluyeron que la TSM no es el único elemento para predecir un evento de blanqueamiento, ya que la presencia de nubes durante varias horas al día disminuyó la radiación que recibieron los corales. Los vientos fueron extremadamente bajos en el evento de 1998, sin embargo, para los otros años con blanqueamiento se presentaron velocidades muy altas, indicando que aún falta investigar el papel del viento en los eventos de blanqueamiento.

Debido a la acción de los vientos Alisios, en el Caribe colombiano ocurren fenómenos de surgencia principalmente en los departamentos de La Guajira y Magdalena, con aguas que se caracterizan por presentar temperaturas entre 19 a 25 ºC y salinidades menores a 36.5 (García, *et al*., 2011). En el estudio de Bayraktarov *et al.,* (2012), los autores se preguntan ¿por qué fue diferencial el blanqueamiento en el Caribe colombiano durante el 2010? Estudiaron los arrecifes ubicados en sitios con exposición a la surgencia, con incremento de la acción de las olas y la turbulencia. Determinaron que la surgencia ayudó a mitigar el blanqueamiento y permitió una mayor resiliencia en cuanto al potencial de recuperación al blanqueamiento, en contraste con los corales en localidades protegidas a la surgencia.

1.7 Medidas de gestión ambiental en corales deteriorados

Desde los años ochenta se advirtió el deterioro progresivo de los arrecifes en el Caribe, que a su vez ha causado pérdidas a las comunidades como impactos económicos en la pesca y en el turismo, por ejemplo, la pérdida económica que produjo el evento de blanqueamiento de 1998 en la comunidad del Océano Índico causó pérdidas entre los 700– 8200 millones de dólares; y otras pérdidas por servicios ecosistémicos como la protección costera. Para evitar las grandes pérdidas económicas se puede medir la forma y la flexibilidad en que la comunidad hace uso del arrecife y tener en cuenta los impactos acumulativos de distintas amenazas, sin embargo, es difícil distinguir de qué actividad proviene el impacto, si es natural o si es humano. Adquirir esta información es clave para la gestión, de modo que se puedan reducir los impactos del blanqueamiento masivo en las comunidades humanas (Moberg y Folke, 1999; Westmacott, *et al*., 2001; César, *et al*., 2002; Marshall y Schuttenberg,2006).

Las medidas de gestión deben ser de carácter preventivo, basadas en la disminución de los factores antropogénicos que estresen al coral y que le puedan inducir a sufrir reducción de cobertura coralina, enfermedades y blanqueamiento entre otros, para aumentarla resiliencia y reforzar su capacidad de recuperación. Las medidas para mitigar las acciones negativas sobre las poblaciones de coral para mejorar y preservar la

biodiversidad en arrecifes coralinos son diversas, entre los programas propuestos están: el establecimiento y manejo de áreas marinas protegidas (AMP), las actividades de recuperación y los programas de monitoreo (Chasqui,*et al*., 2007; Terrón – Sigler,*et al.,*2011). Entre las actividades de recuperación están las técnicas de restauración como el trasplante de corales y el mantenimiento de la estructura del arrecife muerto ya que éstos sirven de estructura y sustrato para que los corales nuevos se reproduzcan y formen nuevas colonias (Westmacott, *et al*., 2000).

- Áreas Marinas Protegidas - AMP

Las áreas marinas protegidas se crean para proteger las especies y los hábitats marinos, conservar la biodiversidad marina, restaurar las reservas de pesquerías, administrar las actividades turísticas y reducir los conflictos entre los usuarios de los recursos. Un AMP debe tener en cuenta la ubicación de los arrecifes, que no estén ubicados en hotspots sino en aguas frías, en áreas libres de actividad antropogénica o en áreas que han logrado sobrevivir de un impacto anterior que sirven de sustrato y de estructura para la investigación. Claro está que la efectividad de las AMP depende del real compromiso que tomen los actores en el área de influencia (Ramírez *et al.,* 2009). La región del Caribe cuenta con 104 Áreas Marinas Protegidas correspondientes al 7,7 % del total mundial, dentro del cual Colombia participa con 6 parques marino-costeros, es decir menos del 6 % del total regional. En Colombia se ha considerado casi el 0,5% de territorio marino como AMP, el cual tiene un total de 65.000 km^2.

En Colombia existe el Área Marina Protegida Corales del Rosario y San Bernardo e Isla Fuerte (AMP-CRSBeIF), declarada mediante la Resolución 679 del 2005, allí se encuentra el complejo coralino de mayor extensión en la franja continental colombiana, incluyendo además el “Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo”-PNNCRSB- y el “Santuario de Flora y Fauna El Corchal “El Mono Hernández” (INAP, 2010).

En la zona insular, las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina y los cayos, tienen cerca del 70 % de área arrecifal con la que cuenta Colombia. Allí, para asegurar la conservación de los ecosistemas estratégicos y la sostenibilidad de la pesquería entre otras actividades, se creó la reserva la Biosfera Seaflower (RBS), esta AMP busca un equilibrio entre los aspectos social, natural y económico. La reserva está localizada en el

sur-occidente del Caribe, tiene un área de 300,000 km^2 y abarca el único departamento oceánico de Colombia

La zonificación es un instrumento para el manejo integrado de áreas protegidas, la intención es proteger al ecosistema indispensable para la supervivencia de las especies, proporcionar áreas de amortiguamiento, reservar áreas para usos específicos, propiciar la recuperación y evitar las actividades negativas para el ecosistema (INVEMAR, 2003). Esta zonificación no da mayor protección a un área que a otra, sino que busca un manejo especial con el fin de conservarlo. En el programa de Parques Nacionales Naturales Corales del Rosario y San Bernardo se definen las zonas: intangible, primitiva, de recuperación, amortiguadora, de alta densidad de uso, entre otras.

A pesar de la creación de estas zonas de manejo, para el PNNCRSB ha sido difícil la preservación de estas zonas, algunas de las razones son (Pineda, *et al*., 2006): la contaminación del área protegida por arrastre de sedimentos, la falta de compromiso de la comunidad y las autoridades, el escaso conocimiento de los recursos protegidos, la creciente presión antrópica por los usuarios y las comunidades aledañas y la falta de continuidad en los programas debido al déficit económico.

- Técnicas de recuperación

Cuando se usa la técnica de restauración mediante trasplante, se busca el incremento de la cobertura de tejido vivo y el de las larvas de coral, la recuperación acelerada de los microhábitats, de la rugosidad y refugio para diferentes especies, la rehabilitación de áreas utilizadas por el turismo, entre otras. En este tipo de programas es importante contar con un programa de monitoreo a través del tiempo, para evaluar el éxito del trasplante y los cambios en el área afectada (García y Nava, 2006).

En el Parque Nacional Natural Tayrona - PNNT existe un proyecto de siembra y restauración de corales en las playas de Gairaca y Neguanje. El objetivo es establecer el mejor procedimiento para recuperar el ecosistema coralino. Primero, se hizo una observación de toda la zona donde se tomaron muestras de las especies *Acropora Cervicornis* y *Acropora Palmata*; el siguiente paso fue cortar los corales en fragmentos de un centímetro para instalarlos en unas estructuras fabricadas en plástico; después de 6

meses crecieron hasta 25 centímetros, se recolectaron y fueron llevados a la ‘guardería’, aproximadamente a 10 metros de profundidad, donde se inició el crecimiento (C-FORCE, 2012). La siembra de los corales es un proceso largo y que requiere de monitoreos constantes para controlar su temperatura y crecimiento.

- Programas de monitoreo

Un programa de monitoreo es una herramienta para dar seguimiento a los cambios ocurridos en los arrecifes blanqueados y para monitorear la condición general de aquellos que todavía no han sido afectados. En estos programas deben recolectarse datos biológicos, físicos y socioeconómicos, de tal modo que la recuperación pueda ser relacionada al contexto ambiental y social (Westmacott, *et al*., 2000).

Este tipo de programas es importante para llevar control de la efectividad de un proyecto. Por ejemplo, en el estudio de Oviedo (2011) evaluaron la viabilidad de trasplantar *Acropora palmata* en el PNNT y determinaron que el proyecto es posible sembrando preferiblemente en la época seca, debido a que en la época húmeda las lluvias son más intensas, la temperatura es alta y hay mayor tasa de sedimentación, para de esta forma evitar que el período de recuperación de los trasplantes coincida con la época de dominancia de algas.

3. Metodología

Se seleccionaron cuatro localidades de arrecifes coralinos con base en: los sitios de monitoreo del SIMAC, las diferencias oceanográficas y la distribución en la cuenca Colombia como continentales u oceánicas. Las áreas seleccionadas fueron Santa Marta, bajo la influencia de la surgencia de La Guajira; las Islas del Rosario y de San Bernardo en el Golfo del Darién, bajo la influencia del giro Panamá-Colombia; y San Andrés, en la región central de la cuenca, bajo la influencia de la corriente del Caribe (Figura 2).

3.1 Área de estudio

La costa Caribe colombiana cubre el rango latitudinal desde 8° N hasta 13° N y desde el límite con Panamá en el suroeste (SW) en longitud 79° W, hasta el noreste (NE) de la Guajira en longitud 71° W (Bernal *et al.,* 2006). Este rango latitudinal de la costa Caribe presenta un gradiente en la distribución de la climatología media anual desde la zona de La Guajira hasta la zona del Darién (Mesa *et al.,* 1997).

En la circulación general del mar en el Caribe colombiano se destacan la corriente Caribe, el centro de surgencias de la Guajira y el giro ciclónico de Panamá - Colombia en el Golfo del Darién. La porción costera de esta última es considerada la contracorriente del Darién. La variabilidad en el océano y la atmósfera está determinada por procesos globales como el fenómeno ENSO, regionales como los vientos alisios y locales como las descargas de los ríos andinos (Restrepo y Kjerfve, 2004; Ruiz - Ochoa, 2011).

Durante la época en que los vientos alisios del noreste son máximos, la surgencia de la Guajira es máxima y la contracorriente es subsuperficial, mientras que en la época húmeda ésta misma puede manifestarse en la superficie a lo largo de toda la costa Caribe colombiana (Andrade y Barton, 2005; Bernal *et al.,* 2006). En La Guajira durante

la incidencia directa de los vientos alisios, la temperatura superficial del mar (TSM) es baja, las aguas son más frías y con mayores oscilaciones intra-anuales, debido a los valores ciclónicos del rotacional del esfuerzo del viento (bombeo de Ekman fuera de la costa). La zona del Darién está más resguardada de los alisios, por lo que allí domina el régimen del giro Panamá – Colombia, las aguas son más cálidas y con oscilaciones intra-anuales menores, debido a las descargas de los ríos que propician una termohalina superficial que inhibe la mezcla vertical (Bernal *et al.,* 2006, Ruiz - Ochoa, 2011).

En el Caribe colombiano, entre los meses de diciembre a abril se presenta la estación seca mayor y entre julio y agosto la estación seca menor o el conocido "veranillo de San Juan". Durante estas dos estaciones los vientos alisios del noreste son fuertes, hay poca precipitación y descargas continentales y se presenta el fenómeno de surgencia de la Guajira en el cual aumenta la salinidad. Entre septiembre y noviembre se presenta la estación húmeda mayor y en mayo y junio la estación húmeda menor, en las cuales cesan los vientos alisios del noreste, no hay surgencia, aumenta la precipitación, disminuye la salinidad y aumenta la temperatura (Mesa *et al*., 1997; Bernal *et al*., 2006).

3.1.1 Estaciones coralinas

- Santa Marta

El área costera de Santa Marta se encuentra localizada en el Departamento de Magdalena a los 11°12' - 11° 22' N y 73°57' - 74°15' W (Figura 2). Esta zona está influenciada por una época seca entre diciembre y abril, con presencia de vientos alisios que generan el fenómeno local de surgencia, ésta desciende la temperatura del agua entre 20 - 25 °C, eleva la intensidad del oleaje y la salinidad (36,1 - 37,4). En la época de lluvias entre mayo y noviembre, disminuye la surgencia, el agua es más cálida entre 27 – 29 °C, disminuye la salinidad hasta aproximadamente 34, mientras que los sedimentos y la turbidez incrementan (Garzón - Ferreira y Díaz, 2003; Rodríguez-Ramírez y Garzón-Ferreira, 2003). Debido a la influencia de descargas continentales y el régimen estacional mencionado anteriormente, las formaciones coralinas son poco desarrolladas y su crecimiento es limitado en comparación con otras áreas del Caribe colombiano (Werding y Sánchez, 1988). La Bahía de Chengue está situada a unos 15 km al este de Santa Marta, tiene una extensión de 2,5 km y se abre hacia el norte del Caribe. El sector

occidental se encuentra expuesto al efecto del oleaje fuerte, por lo tanto las formaciones coralinas presentes dependen de su ubicación en la Bahía.

- Islas del Rosario

El archipiélago Islas del Rosario y Barú tiene una gran formación de arrecifes debido a su relieve y localización con respecto a los vientos alisios. Forma parte del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo- PNNCRSB, localizado a 45 km al suroeste de la ciudad de Cartagena (10° 08' – 10° 15' N y 75° 40' – 75° 48' W (Figura 2), gracias a esto adquiere relevancia para los planes de manejo y conservación (Cendales, *et al.,* 2002). El PNNCRSB posee 120.000 Ha protegidas de las cuales el 99.5% corresponde a territorio sumergido principalmente de arrecifes de coral (Pinilla, *et al*., 2007). Este sector de la plataforma está influenciado por la acción de los vientos alisios del noreste, los cuales regulan el patrón del oleaje y la intensidad de la contracorriente Panamá – Colombia, causando una marcada estacionalidad climática. Allí, también dominan los aportes continentales del Canal del Dique a través de la bahía Barbacoas y por ello existe una gran turbidez del agua (Cendales, *et al*., 2002; Gómez – Giraldo, *et al*., 2010). Éstos son factores importantes que han contribuido en los esquemas de distribución de las formaciones coralinas que se han desarrollado en torno a las islas y forman bancos a cierta distancia de la costa. En las zonas más expuestas a la acción del viento, a las corrientes y al oleaje (barlovento), ubicadas en el occidente y suroccidente del Archipiélago, se encuentra el mayor desarrollo coralino con especies más saludables.

- Islas de San Bernardo

El archipiélago de San Bernardo está localizado en la región central de la plataforma continental del Caribe colombiano, frente a las costas del Golfo de Morrosquillo a los 9° 39' – 9° 52' N y 75° 41' – 75° 57' W (Figura 2). Es un extenso complejo arrecifal de origen coralino compuesto por las islas Boquerón, Cabruna, Caycén, Mangle, Maravilla, Múcura, Palma, Panda y Tintinpán y hace parte del PNNCRSB. El clima está determinado por el régimen de los vientos alisios del noreste, tiene una temperatura promedio de 27 °C y presenta dos estaciones hídricas, una época seca y de vientos de diciembre a abril y una

época húmeda de mayo a noviembre (López – Victoriay Díaz, 2000). El complejo abarca un área de más de 250 km^2, de los cuales aproximadamente el 60 % corresponden a cobertura coralina. El área de mayor desarrollo y extensión arrecifal está ubicada en la parte central de la plataforma continental. Allí se hallan estructuras arrecifales sobre altorrelieves originados por deformación de los estratos sedimentarios de la plataforma (López – Victoriay Díaz, 2000). Las formaciones coralinas del archipiélago conforman un complejo arrecifal del que hacen parte estructuras franjeantes y de parche, tapetes coralinos de escaso relieve, domos y bancos coralinos, en las que están representadas distintas comunidades coralinas, dominadas por corales como *Porites porites*, *Agaricia* spp. y *Montastrea* spp., entre otros (Díaz, 2000). Las aguas que bañan las islas son relativamente transparentes, con una temperatura media de 28 ºC y una salinidad de 34.

- Isla de San Andrés

El Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina se encuentra en el Caribe occidental localizado a los 12°29 N y 81°43'5 W (Figura 2). El Archipiélago comprende las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, varios cayos y bajos que se extienden sobre la plataforma nicaragüense por más de 500 km y por sus condiciones oceanográficas se consideran islas oceánicas (Díaz, 2000), todas ellas ubicadas en lo que se conoce como el cinturón de huracanes. Sus costados sureste, este y norte se encuentran rodeados por una barrera arrecifal de aproximadamente 32 km de longitud, esta barrera es la segunda más larga del Caribe. El clima es tropical de tendencia seca y por influencia de los alisios es estacional y regular. El Archipiélago se encuentra dentro del cinturón de huracanes del Caribe por lo que en la segunda mitad del año fenómenos como éstos, o tormentas tropicales pueden afectar las islas (Díaz, 2000). Las temperaturas superficiales del mar oscilan entre 27 y 30 °C y su salinidad entre 34 y 36,3. El área total de complejo arrecifal es de 285,2 Km^2 y el área de cobertura coralina viva relevante es de 124,9 km^2. Los tipos de formaciones arrecifales que aquí se encuentran son: complejo arrecifal oceánico con barrera, pináculos, arrecife de borde, de plataforma insular, arrecife de franja y parches lagunares (Díaz, 2000).

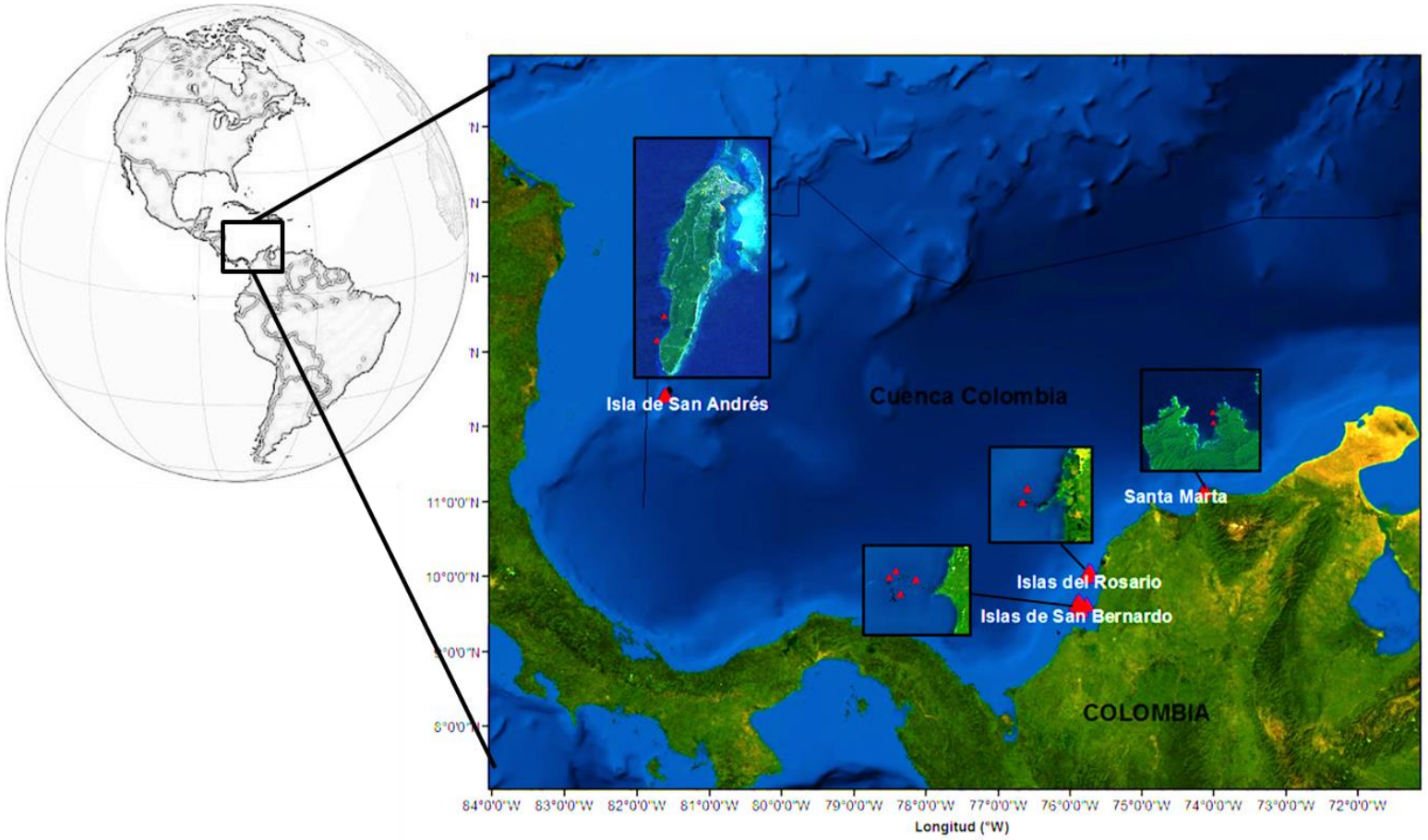


Figura 2 Áreas de estudio. Los triángulos rojos indican los sitios de monitoreo del SIMAC

3.2 Procesamiento de variables ambientales

Las siguientes variables ambientales se escogieron porque en la literatura se han señalado como factores directos o indirectos en el evento de blanqueamiento y por su disponibilidad en fuentes satelitales o en instituciones públicas como el INVEMAR y el IDEAM.

- Temperatura Superficial del Mar (TSM)

Para el análisis espacio-temporal de esta variable se descargaron los datos diarios de TSM en el período 1982 – 2011, con resolución espacial de 4,5 km, pertenecientes al proyecto NOAA / NASA Oceans Pathfinder AVHRR versión 5.2 (http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/ pathfinder4km/). El formato de los datos de Pathfinder V. 5.2 es netCDF-4 de los cuales se usaron los datos con banderas de calidad entre 4 - 7 ("best SST"). Estos datos fueron procesados en el programa MATLAB 10.

- Clorofila – Turbidez

Para realizar los análisis espacio-temporales de la clorofila y la turbidez (coeficiente de atenuación difusa - Kd490) se obtuvieron datos del sensor Sea - viewing Wide Field of View - SeaWiFS, a bordo del satélite OrbView – 2. Los datos tienen una resolución temporal semanal y fueron descargados desde septiembre de 1997 hasta diciembre del 2010. Las imágenes son Nivel L3 de la página http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/., en formato HDF, en una malla regular equidistante con proyección cilíndrica de 360°, con una resolución de 9,28 km. El algoritmo básico usado GSFC para el cálculo de la clorofila fue descrito en O'Reilly (1998). Para el análisis espacial, estos datos fueron recortados en la localización 8° - 18° N y 71° 85° W en la cuenca Colombia y para el análisis temporal fueron recortados para cada área de estudio coralino. Estos datos fueron procesados en el programa MATLAB 10.

El coeficiente de atenuación difusa (valor kd) representa un rango, dentro del cual la luz de la longitud de onda de 490 nm es atenuada con la profundidad dentro de la columna del agua, lo que ayuda a caracterizar la transparencia del agua y por lo tanto estimar el estado de turbidez de las aguas. Este parámetro tiene relación con la concentración de fitoplancton, sedimentos orgánicos y material inorgánico disuelto en el agua marina.

En este estudio se evaluaron las Islas del Rosario y de San Bernardo que están clasificadas como islas continentales, donde el color superficial del agua depende también de la materia orgánica disuelta o suspendida y no está necesariamente relacionada con la concentración de clorofila.

- Salinidad - Caudales

Debido a la falta de una serie histórica completa de salinidad, se usaron datos climatológicos de salinidad superficial del World Ocean Atlas WOA - 2009 en el programa Ocean Data View ODV, con estos datos sólo se pudo analizar la variabilidad espacial y no la temporal. Con registros diarios (1991 – 2010) del Catálogo de Estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), se analizó la entrada de agua dulce a las áreas continentales.Estos datos están medidos en unidades de m^3/s, las estaciones del catálogo usadas para cada área se muestran en la Tabla 2 y fueron procesados en el programa Excel.

Algunos ríos que tienen influencia sobre cada área de estudio son:

- Santa Marta

Las únicas influencias de agua dulce con caudal considerable que son usados en la investigación son los ríos Piedras, Manzanares, Don Diego, Cañas y Gaira.

- Islas del Rosario

El Canal del Dique tiene una longitud de 115 km y un área de ~2.500 km^2, que corresponde al 1% de la cuenca del río Magdalena. Se comunica con diversas áreas inundables por medio de pequeños caños que sirven a los pobladores de las zonas adyacentes para movilizar sus productos de sustento. Desemboca en el Mar Caribe por el caño Correa y Lequerica en la Bahía de Barbacoas.

- Isla de San Bernardo

El río Sinú tiene una longitud aproximada de 380 km con un caudal variable entre 40 y 50 m^3/s en época de sequía y 500 a 600 m^3/s en la estación lluviosa, con crecientes superiores a los 900 m3/s.

Tabla 2 Estaciones del IDEAM (1991 – 2010)

Área	Rio	Estación	Latitud	Longitud
Santa Marta	Manzanares	Bocat. Sta Marta	11,206	-74,099
	Piedras	La Revuelta	11,278	11,206
	Gaira	Minca	11,140	-74,120
	Don Diego	Pte Carretera	11,244	-73,685
	Cañas	Mingueo	11,212	-73,403
Islas del Rosario	Canal del Dique	Sta Helena 2	10,080	-75,440
Islas de San Bernardo	Sinú	La doctrina	9,291	-75,897

- Nubosidad

Esto datos se obtuvieron del proyecto Reanálisis del Centro Nacional de Predicción Ambiental y el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCEP / NCAR) de la Administración Atmosférica y Oceánica de los Estados Unidos (NOAA). Se descargaron datos desde 1997 hasta el 2010 con resolución temporal diaria y una resolución espacial de 2°. Estos datos fueron procesados en el programa MATLAB 10.

- Vientos

Esta información se obtuvo de la base de datos globales derivada del Proyecto Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) de la NASA. Se descargaron datos de las componentes *u* y *v*del viento en la superficie del mar, con una resolución temporal de cuatro datos por día, y una resolución espacial de 0,25°. Los datos se promediaron para obtener la resolución diaria requerida para la investigación y fueron procesados en el programa MATLAB 10.

3.3 Datos del blanqueamiento

Se decidió usar información de diferentes fuentes debido a los vacíos históricos en la información. Se solicitó al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andreis – INVEMAR los registros que han adquirido mediante los monitoreos del programa SIMAC, desde 1998 hasta la actualidad para algunas áreas coralinas. En cada área hay localidades distribuidas por lo menos 500 metros de distancia: en Santa Marta está Bahía Chengue (1 y 2), en Islas del Rosario están las localidades Isla Tesoro e Isla Pavitos, en Islas de San Bernardo están Isla Mangle, Isla Ceycén, Bajo Minalta y Bajo TioSolda. Y en la Isla de San Andrés están las localidades de La Iguana y Wild Life.

En cada localidad hay por lo menos 15 transectos, cada uno en los niveles de profundidad somera (3 – 5 m), media (9 – 10 m) y profunda (15 – 16 m), en las cuales los transectos tienen medidas de 10 x 2 metros. En cada transecto los buzos del SIMAC revisaron todas las colonias coralinas, notando cuáles tenían blanqueamiento. El valor de blanqueamiento obtenido fue entonces la frecuencia de ocurrencia en porcentaje del total de colonias. Estos datos fueron adquiridos en formato de Excel, de allí se usaron datos nivel 6 que son datos agregados (promedio de todos los transectos) a nivel de área y por profundidad. Las variables evaluadas, así como los procedimientos metodológicos y la ubicación precisa de los transectos y estaciones de monitoreo se encuentran descritos detalladamente en el Manual de Métodos del SIMAC (Garzón-Ferreira *et al*., 2002).

La segunda fuente de información de registros de blanqueamiento fue la base de datos ReefBase (www.reefbase.org), el cual es un sistema de información de arrecifes coralinos mantenido por ICRAN, que proporciona acceso a la información referente al estado, las amenazas y el manejo de arrecifes. ReefBase cuenta con más de 19,000 referencias y 3,000 imágenes, un sistema SIG, imágenes satelitales y una base de datos de blanqueamiento. El programa se encarga de monitorear y reportar en su página información relacionada con los arrecifes de coral, allí se encuentran registrados algunos de los eventos de blanqueamiento que se han reportado para Colombia. Las observaciones hechas sobre los corales se reportan según se indica en la guía

metodológica que ha desarrollado WorldFish Center y WWF (Oliver, *et al*., 2004)**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. La tercera fuente de información fueron artículos publicados en diferentes bases de datos y comunicación personal de algunos investigadores (p. ej., Sven Zea).

Los datos del SIMAC, del ReefBase y de la literatura se integraron promediando la intensidad asignada a cada uno de los eventos, como se explicada en el siguiente numeral; para clasificar cuáles reportes de blanqueamiento fueron de intensidad media o alta en cada una de las áreas de estudio.

- Identificación de la intensidad del blanqueamiento

Para determinar la categoría de la intensidad de los datos del SIMAC, a los datos se les calculó la media, las desviaciones estándar (+1 y +2) y los máximos y mínimos; a partir de estos resultados se determinó la intensidad: baja (1) valores entre el mínimo y la media, media (2) valores mayores a la media y +1 desviación estándar, y alta (3) valores mayores a +1 y el valor máximo. Estos intervalos fueron hechos para cada área por separado (Tabla 3).

Tabla 3 Intervalos del blanqueamiento de los datos del SIMAC

Categoría	Santa Marta	San Andrés	Islas del Rosario	Islas de San Bernardo
Baja	0 - 4,97	0 - 2,71	0 - 3,03	0 - 2,65
Media	4,98 - 9,36	2,72 - 6,16	3,04 - 4,67	2,66 - 5,52
Alta	9,37 - 15,15	6,17 - 11,66	4,68 - 5,80	5,53 - 8,93

Como los datos de ReefBase y de la literatura ya vienen dados en esta clasificación (baja, media y alta), se promediaron con esta nueva clasificación de los datos del SIMAC y así se obtuvo una única serie de tiempo de registros de blanqueamiento.

3.4 Análisis de datos

Se hizo un análisis descriptivo de los datos ambientales y bióticos, únicamente para los años que tuvieron un evento de blanqueamiento de intensidad 2 o 3. Para cada evento se calculó el promedio de la variable ambiental desde cuatro meses antes de las fechas

en que se registró blanqueamiento, distribuyendo en análisis entre una semana antes del registro, dos semanas antes, un mes antes, dos meses antes, tres meses antes y cuatro meses antes: el valor de las variables se clasificó como alto o extremo con base en las desviaciones estándar (+1 y +2).

Una revisión estadística de las gráficas de series de tiempo de cada variable permitió identificar eventos extremos en los años de blanqueamiento coralino. Con el fin de validar estadísticamente las relaciones entre las variables ambientales y el blanqueamiento se hizo un análisis de componentes principales con las series diarias de las variables.Los factores de las principales componentes se graficaron en forma de serie de tiempo junto las fechas de blanqueamiento, así se revisó qué componente coincide con las fechas de blanqueamiento y cuáles variables están asociadas. Los análisis estadísticos se realizaron en el software Statistica R 8.0.

3.5 Limitaciones y supuestos de los resultados

1) Los datos satelitales entregan información superficial, por lo que se parte del supuesto de que lo que sucede en la superficie representa los primeros metros de la columna de agua, hasta donde penetra la luz y se produce la fotosíntesis.

2) En esta investigación se usaron los datos obtenidos de los satélites AVHRR y SeaWiFS, que presentan limitaciones en la captura de información, por ejemplo tienen vacíos de datos en algunos periodos de tiempo (2005 y 2010) y vacíos en el espacio en laszonas cerca a la costa.

3) En Colombia existen al menos 26 áreas coralinas con diversidad de ambientes por lo cual se debe tener en cuenta que la información que se ha obtenido en los monitoreos del SIMAC procede de unas pocas estaciones al interior de algunas de estas áreas. Asimismo, no ha habido completa continuidad de los programas de monitoreo (Figura 3) y en aquellos que son anuales se pierde información de inicio, duración y recuperacióndel evento (INVEMAR, 2005; Vega – Sequeda, *et al*., 2011).

ÁREA DE MONITOREO		1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
CARIBE	Santa Marta	X	X				X	X	X					
	Tayrona	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Islas del Rosario	X	X		X	X	X	X		X		X	X	X
	Islas de San Bernardo					X	X	X		X		X	X	X
	Urabá Chocoano					X	X	X		X				
	San Andrés	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Figura 3Años de reporte del SIMAC en cada área

4) La forma en que se reportan los datos de blanqueamiento en la literatura es diversa: presencia / ausencia (si / no), con valores de juicios subjetivos sin análisis rigurosos (alto, medio o bajo), o medida con otros métodos sin que éstos sean comparables con otros estudios. Esto dificulta tener series numéricas estandarizadas de esta variable.

4. Resultados

En este capítulo se presenta el análisis espacio - temporal de las variables ambientales y se expone el ciclo anual de cada una de ellas. Se determina la intensidad y la extensión de los eventos de blanqueamiento mediante la recopilación de información de las diferentes bases de datos. Se muestran los eventos extremos ocurridos en las fechas de blanqueamiento coralino, de modo descriptivo se relacionan las variables ambientales con los eventos de blanqueamiento, analizando el comportamiento de las mismas desde cuatro meses antes de los registros; y se presenta a partir del análisis de componentes principales, posibles relaciones entre las variables y el blanqueamiento.

4.1 Análisis espacio - temporal de las variables ambientales en las áreas de estudio

- **Comportamiento espacial de las variables**

Los gradientes espaciales de la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad, la clorofila y la turbidez se aprecian en la Figura 4, Figura 5 y Figura 6 respectivamente.

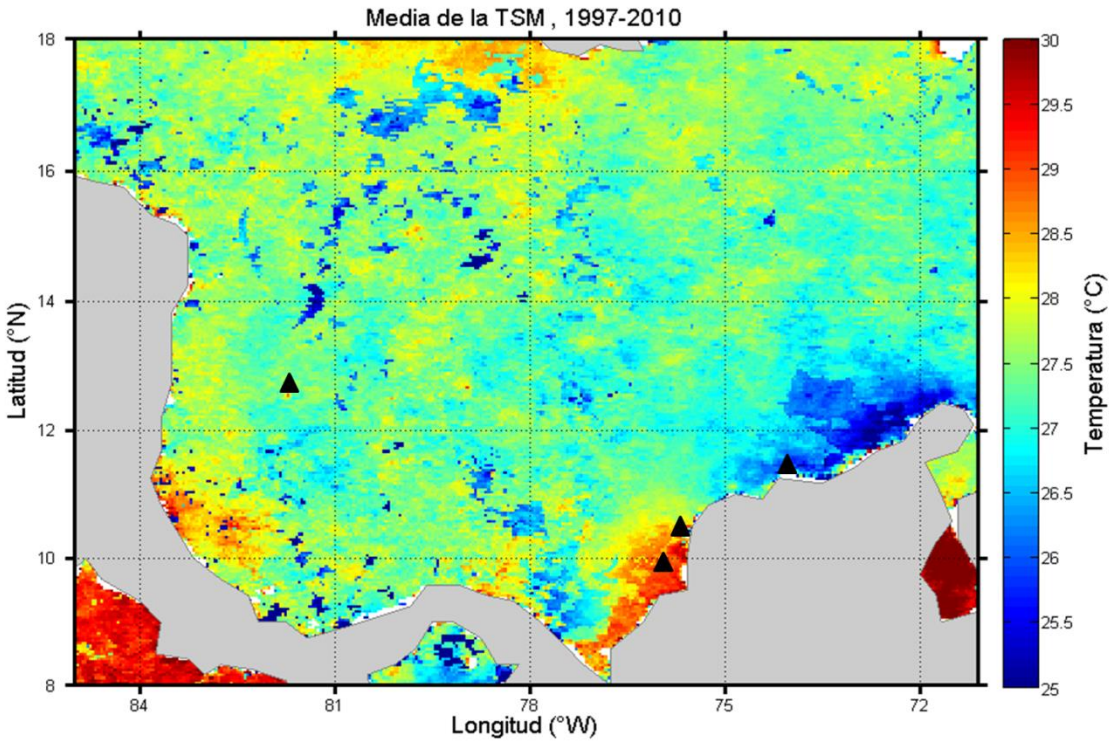


Figura 4 Variabilidad espacial de la temperatura**.** Elaboración con datos del satélite Pathfinder versión 5.2(AVHRR)

El valor medio de la TSM mostró gradientes en la cuenca Colombia, con valores mínimos en la parte noreste de la zona costera donde está ubicado el sitio de estudio Santa Marta (SM) y valores máximos en la parte sureste del Mar Caribe en el Golfo del Darién, donde están ubicados los sitios de estudio Islas del Rosario (IR)e Islas de San Bernardo (SB). En el centro de la cuenca se encontraron aguas moderadamente cálidas, más bien relacionadas con las aguas frías de la zona noreste de la costa, allí está ubicado el sitio de estudio insular San Andrés Isla (SAI).

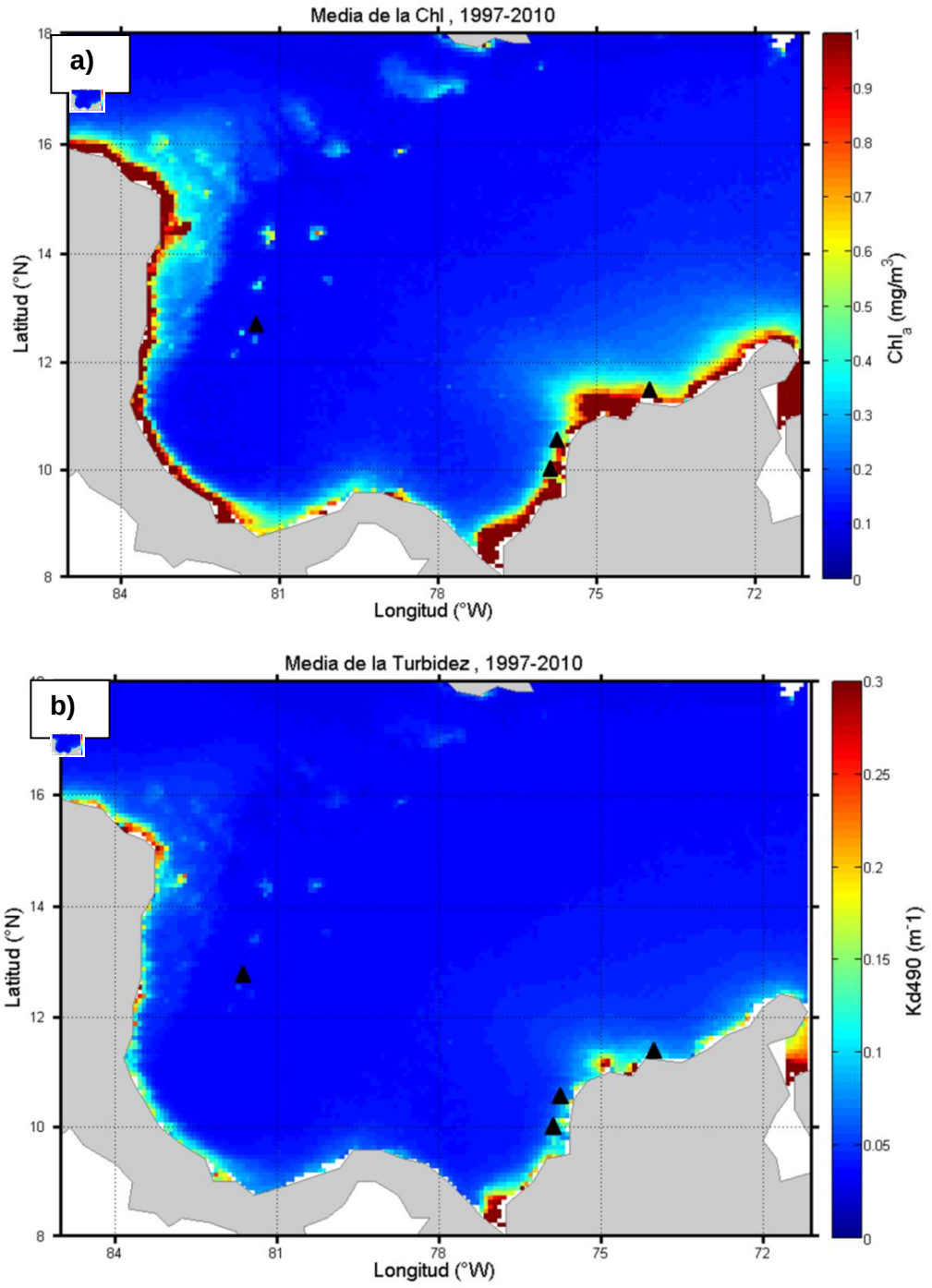


Figura 5 Variabilidad espacial de la (a) clorofila y (b) turbidez. Elaboración con datos del sensor SeaWiFS (1997-2010)

Con los datos de la clorofila se identificaron dos regiones, una mesotrófica (0,2 – 1,0 mg/m^3) en el lado sureste de la cuenca (SM, IR y SB) y otra oligotrófica en el centro de la cuenca (<0,2 mg/m^3). En la parte sureste las concentraciones altas se extendieron algunos kilómetros mar adentro y corresponden a los sitios ubicados en la zona costera. Con los datos de turbidez se identificaron valores medios en las áreas costeras (SM, IR y SB) y valores bajos en el centro de la cuenca.

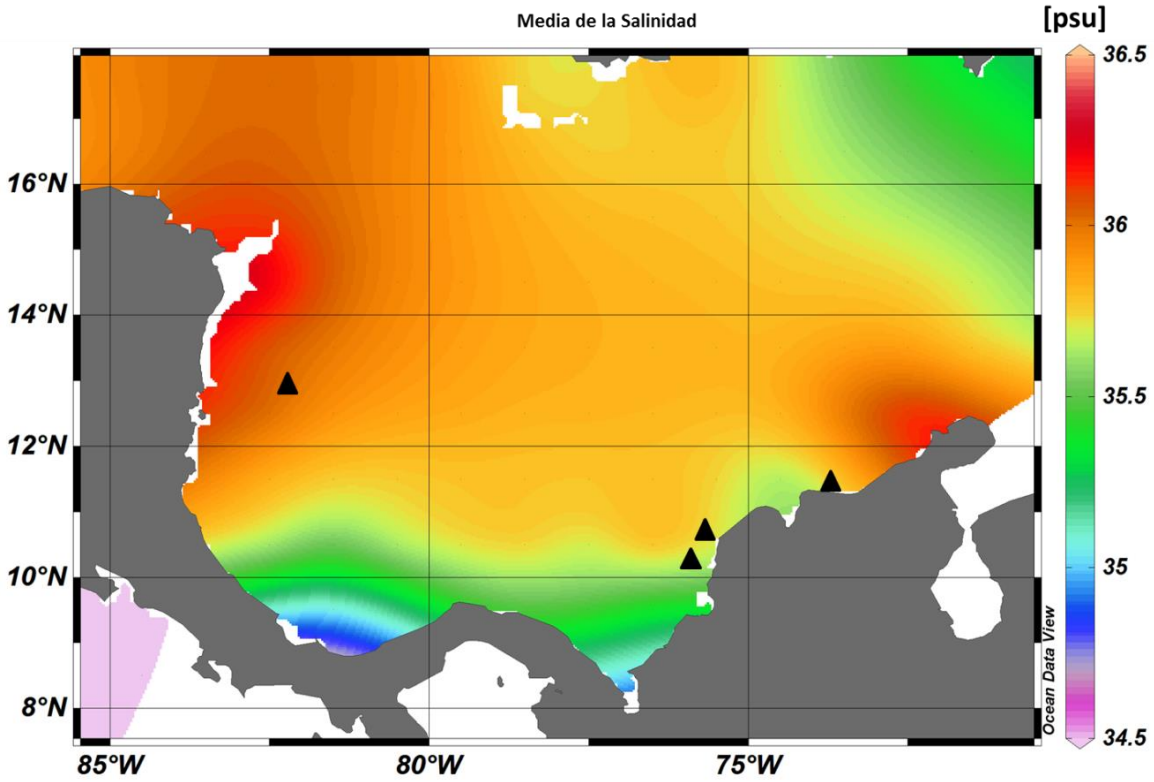


Figura 6 Variabilidad espacial de la salinidad. Elaboración con datos del WOA (World Ocean Atlas) 2009

Con los datos de salinidad se identificaron tres regiones con comportamientos diferentes en la cuenca Colombia. La primera región se encontró al noreste de la costa en el sitio de estudio SM, la segunda región al sureste en los sitios IR y SB y la tercera región en el centro de la cuenca cerca al sito de estudio SAI. En el noreste y el centro de la cuenca las salinidades fueron más altas que en el sureste, atribuido probablemente en SM a la surgencia de la Guajira que es fuerte en época seca (diciembre-febrero y junio-agosto)(Andrade y Barton, 2005) y en SAI a la baja presencia de descarga de agua.

- **Comportamiento temporal de las variables**

Los ciclos anuales de las variables temperatura, clorofila, turbidez, caudal,nubosidad y vientos se muestran en la Figura 7y los datos de la media, máximos, mínimos y varianza se muestran en la Tabla 4Tabla 4 Media y valores máximos y mínimos del ciclo anual de las variables ambientales. Datos entre 1997 – 2010 de: satélite Pathfinder (TSM), Sensor SeaWiFS (clorofila, turbidez), IDEAM (caudal), NCEP/NCAR (% cobertura de nubes) y Reanálisis CCMP (vientos).

El ciclo anual de la temperatura en SB e IR mostró una evolución temporal similar, con valores bajos de temperatura entre diciembre y abril, incrementan desde mayo hasta septiembre y disminuyen en octubre. Los valores medios del ciclo no tuvieron diferencia significativa entre estas dos estaciones.

Los valores más bajos de temperatura se encontraron en SM (24,89 °C) y SAI (26,71°C), estos dos sitios no presentaron diferencias significativas entre las medias, sin embargo el ciclo anual de éstos si tuvo diferencias. En SM el incremento de temperatura entre marzo y mayo es más acelerado y entre julio y agosto es evidente el conocido veranillo de San Juan. Los datos de temperatura de SM tienen una alta variabilidad V (varianza)= 1,97, mientras que los de SAI tienen la menor varianza (0,51).

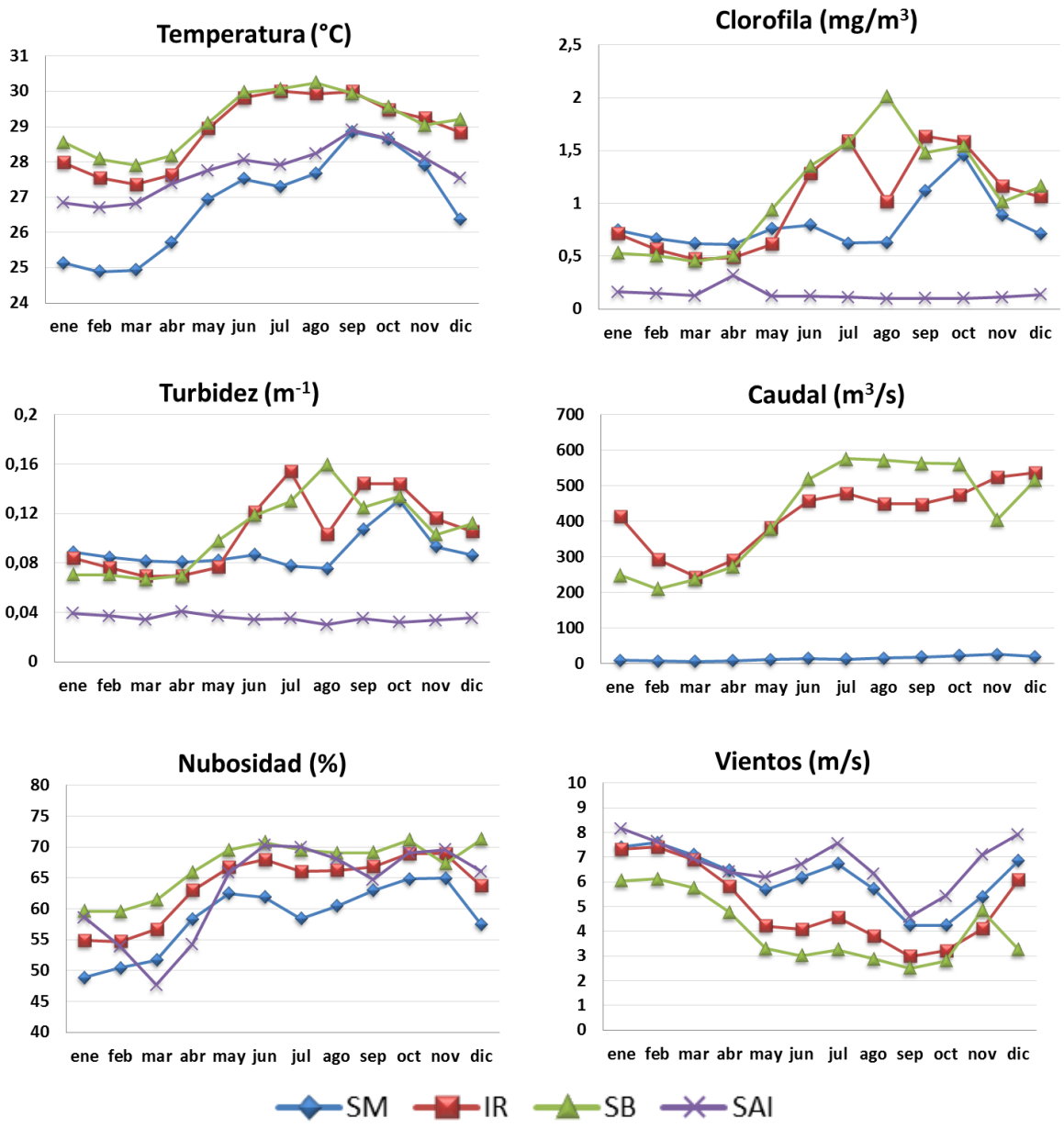


Figura 7 Ciclo anual de las variables temperatura, clorofila, turbidez, caudal, nubosidad y vientos en las cuatro áreas de estudio, con datos entre 1997 y 2010 del satélite Pathfinder Version 5.2, del IDEAM y del sensor SeaWiFS.SM=Santa Marta, IR=Islas del Rosario, SB= San Bernardo SAI= San Andrés Isla

Tabla 4 Media y valores máximos y mínimos del ciclo anual de las variables ambientales. Datos entre 1997 – 2010 de: satélite Pathfinder (TSM), Sensor SeaWiFS (clorofila, turbidez), IDEAM (caudal), NCEP/NCAR (% cobertura de nubes) y Reanálisis CCMP (vientos).

	Área	TSM (°C)	Chl (mg/m3)	Turbidez (m-1)	Caudal (m3/s)	%Cob. Nub	Vientos (m/s)
Promedio	SM	26,82	0,80	0,09	13,00	58,56	6,13
	SAI	27,75	0,14	0,04		63,17	6,75
	IR	28,89	1,02	0,11	416,39	63,70	5,03
	SB	29,15	1,09	0,10	421,39	67,00	4,04
Máximo	SM	28,85	1,46	0,13	25,20	64,96	7,58
	SAI	28,90	0,32	0,04		70,30	8,16
	IR	30,00	1,64	0,15	537,71	68,92	7,40
	SB	30,25	2,01	0,16	575,59	71,24	6,12
Mínimo	SM	24,89	0,61	0,08	4,43	48,86	4,24
	SAI	26,71	0,10	0,03		47,68	4,58
	IR	27,36	0,47	0,07	243,52	54,70	2,97
	SB	27,90	0,45	0,07	209,57	59,55	2,50
Varianza	SM	1,97	0,06	0,00	42,75	30,79	1,24
	SAI	0,51	0,00	0,00		58,27	1,09
	IR	1,04	0,20	0,00	9045,66	28,39	2,53
	SB	0,69	0,27	0,00	21636,71	19,39	1,87

TSM		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	SB	-4,964	22	0,000	2,872
SM vs.	IR	-4,143	22	0,000	1,896
SAI vs.	SM	2,041	22	0,053	3,857
SAI vs.	IR	-3,191	22	0,004	2,034
SAI vs.	SB	-4,456	22	0,000	1,343
IR vs.	SB	-0,687	22	0,499	1,514

CLOROFILA		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	IR	-1,44	22	0,16	3,10
SM vs.	SB	-1,72	22	0,10	4,23
SAI vs.	SM	-8,89	22	0,00	17,46
SAI vs.	IR	-6,78	22	0,00	54,06
SAI vs.	SB	-6,32	22	0,00	73,84
IR vs.	SB	-0,38	22	0,71	1,37

TURBIDEZ		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	IR	-1,581	22	0,128	4,047
SM vs.	SB	-1,534	22	0,139	3,940
SAI vs.	SM	-12,023	22	0,000	27,241
SAI vs.	IR	-7,815	22	0,000	110,247
SAI vs.	SB	-7,849	22	0,000	107,323
IR vs.	SB	0,050	22	0,961	1,027

VIENTOS		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	IR	1,955	22	0,063	2,034
SM vs.	SB	4,099	22	0,000	1,503
SAI vs.	SM	1,392	22	0,178	1,139
SAI vs.	IR	3,114	22	0,005	2,317
SAI vs.	SB	5,439	22	0,000	1,712
IR vs.	SB	1,637	22	0,116	1,353

NUBOSIDAD		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	IR	-2,312	22	0,030	1,085
SM vs.	SB	-4,124	22	0,000	1,588
SAI vs.	SM	1,691	22	0,105	1,892
SAI vs.	IR	-0,197	22	0,846	2,053
SAI vs.	SB	-1,504	22	0,147	3,005
IR vs.	SB	-1,652	22	0,113	1,464

CAUDAL		t-value	df	p	F-ratio
SM vs.	IR	-14,658	22	0,000	211,573
SM vs.	SB	-9,608	22	0,000	506,070
IR vs.	SB	-0,099	22	0,922	2,392

Figura 8 Prueba T para muestras independientes

En el ciclo anual de la clorofila se identificaron valores altos en los tres sitios costeros de estudio (SM, IR y SB). Con las pruebas de comparación entre las muestras no se observaron diferencias significativas entre los tres sitos. El ciclo anual de SB e IR es similar aunque en agosto hubo un pico bajo en IR. En los tres sitios los valores fueron bajos a principios del año, en mayo la concentración aumentó en SB e IR, mientras que en las otras dos estaciones siguió siendo baja. En agosto se observó una disminución en

IR que no fue observada en las demás estaciones. Los valores disminuyeron a partir de septiembre aunque sin ser tan bajos como en los primeros meses. SAIpresentó diferencias significativas entre los promedios de la clorofila con el resto de las islas, el ciclo anual en SAI tiene poca variabilidad V=0,0002 y solo presentó un pico en el mes de abril. Con la variable turbidez los resultados fueron similares. Sin diferencias significativas entre los sitios costeros y con diferencias significativas entre SAI y los demás sitios, siendo más altos los valores en los sitos costeros.

Respecto a la variable caudal los valores altos están en SB e IR. Se observó que no hay diferencias significativas entre las medias de las islas SB e IR (valor p=0,9), así como tampoco se aprecia diferencia entre los ciclos anuales. Entre febrero y abril se identificaron valores bajos que aumentan entre mayo y julio y siguen prácticamente constantes hasta octubre cuando empiezan a disminuir. El ciclo anual de SM muestra valores bajos entre enero y mayo, a partir de julio incrementan hasta noviembre. El ciclo anual de SM tiene diferencias significativas con el promedio de IR y SB.

La variable nubosidad tiene los valores más altos en SB y SAI, estas dos áreas no tienen diferencias significativas, entre SM, SB e IR si hay diferencias significativas. El ciclo de los cuatro sitios, tiene valores bajos entre enero y marzo, a partir de abril aumentan hasta mayo y permanecen casi constantes hasta final de año.

En la variable vientos se observó que los valores más altos están en SAI y SM, entre los cuales no hay diferencias significativas (valor p=0,18). En estos dos sitios, el ciclo anual tiene valores altos desde diciembre hasta abril, disminuyen en mayo y junio, incrementan entre julio y agosto y vuelven a disminuir entre septiembre y noviembre. El ciclo entre SB e IR tampoco es significativamente diferente (valor p=0,12), y presentan diferencia significativa con SM e IR. A mitad de año los vientos no son tan altos, como los del ciclo de SM y SAI.

Tabla 5 Correlación de Spearman entre las variables de cada sitio de estudio. Las correlaciones marcadas en rojo son significativas a un valor p<0,05

SM	Caudal	Clorofila	Nubes	TSM	Turbidez	Vientos
Caudal	1,00					
Clorofila	0,70	1,00				
Nubes	0,75	0,68	1,00			
Temperatura	0,84	0,69	0,90	1,00		
Turbidez	0,53	0,88	0,41	0,43	1,00	
Vientos	-0,72	-0,66	-0,96	-0,92	-0,41	1,00

SAI	Clorofila	Nubes	TSM	Turbidez	Vientos
Clorofila	1,00				
Nubes	-0,57	1,00			
Temperatura	-0,89	0,66	1,00		
Turbidez	0,86	-0,57	-0,70	1,00	
Vientos	0,60	-0,11	-0,68	0,42	1,00

IR	Caudal	Clorofila	Nubes	TSM	Turbidez	Vientos
Caudal	1,00					
Clorofila	0,74	1,00				
Nubes	0,57	0,69	1,00			
Temperatura	0,61	0,88	0,66	1,00		
Turbidez	0,77	0,99	0,66	0,89	1,00	
Vientos	-0,39	-0,70	-0,89	-0,78	-0,66	1,00

SB	Caudal	Clorofila	Nubes	TSM	Turbidez	Vientos
Caudal	1,00					
Clorofila	0,95	1,00				
Nubes	0,64	0,61	1,00			
Temperatura	0,95	0,96	0,64	1,00		
Turbidez	0,93	0,99	0,63	0,94	1,00	
Vientos	-0,88	-0,83	-0,73	-0,84	-0,85	1,00

Por medio de la correlación de Spearman (Tabla 5), se identifica si existe relación entre las variables y cuál de estas asociaciones es significativa. Los tres sitios costeros tienen relación similar entre sus variables. En SM las relaciones más altas y fuertes se dan entre Nubosidad - Vientos: es una correlación negativa fuerte; entre TSM - Vientos: correlación negativa fuerte; entre Temperatura - Nubes: correlación positiva fuerte. También se dieron algunas correlaciones positivas considerables entre Temperatura-Caudal y Clorofila – Turbidez. En IR las correlaciones entre Clorofila – Turbidez y Turbidez – Temperatura son positivas muy fuertes, mientras que la correlación entre Vientos – Nubes es negativa muy fuerte. Las correlaciones entre Temperatura - Clorofila y Turbidez - Caudal son positivas considerables. En SB las correlaciones son significativas entre todas las variables, pero las más fuertes son entre Turbidez – Clorofila, Temperatura – Clorofila, Caudal – Temperatura y Caudal – Clorofila. En cuanto a SAI la correlación entre Temperatura y Clorofila es la más fuerte negativa.

4.2 Intensidad y extensión de los eventos de blanqueamiento

En este numeral se muestran los eventos de blanqueamiento registrados en la literatura y en Reefbase que se recopilaron a través de la búsqueda en sitios de acceso público. También se muestra el análisis de la información de los monitoreos del SIMAC y la

clasificación de estos datos en categorías de intensidad según la metodología indicada. Finalmente se muestra una clasificación de extensión de los eventos de blanqueamiento.

- **Eventos de blanqueamiento registrados en el Caribe colombiano por medio de la literatura y en Reefbase**

La base de datos ReefBase propone una clasificación del blanqueamiento según la intensidad; la mayor tiene un valor de 3, la media de 2 y la baja de 1. Con base en esa metodología se realizó la clasificación de los datos de ReefBase, incluyendo la información provista por la literatura consultada (Figura 9).

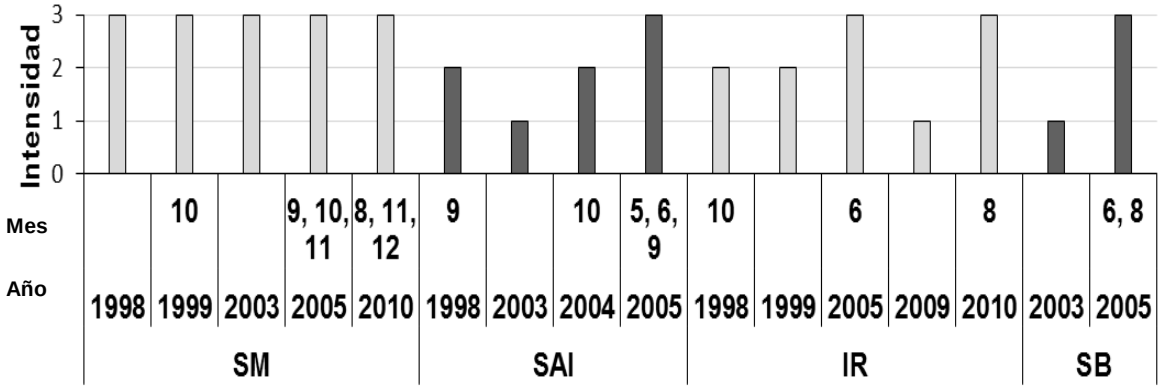


Figura 9 Intensidad del blanqueamiento con registros de la literatura y de Reefbase. Los datos están separados por área de estudio.El mes registrado en la literatura se muestra como un número bajo la barra

- **Eventos de blanqueamiento registrados en el Caribe colombiano por medio de los monitoreos del SIMAC**

La otra fuente de información de blanqueamiento utilizada fueron los monitoreos del SIMAC, los datos preliminares se muestran en la Figura 10.

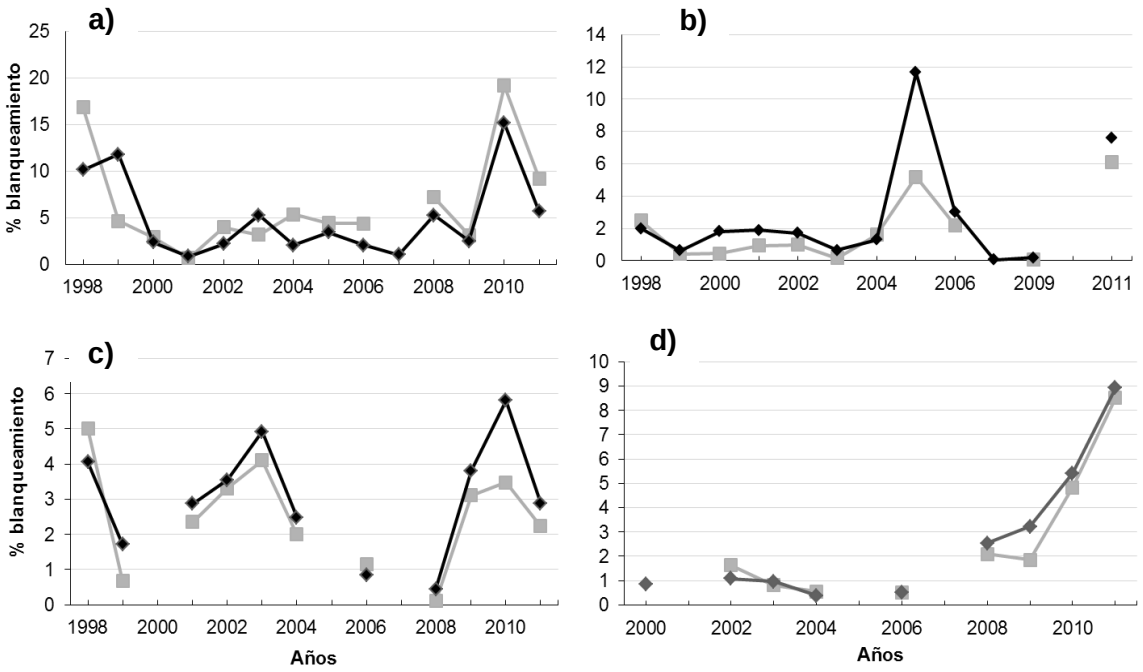


Figura 10 Porcentaje blanqueamiento a partir de datos del SIMAC (1998 – 2011). a) Santa Marta (Bahía Chengue), b) Islas de San Andrés, c) Islas del Rosario, d) Islas de San Bernardo. La línea oscura muestra los promediosde todos los niveles de profundidad (2-12 m). La línea clara muestra los registros someros (2-5 m)

Para enfocar la investigación en los eventos que tuvieron mayor porcentaje de blanqueamiento, los datos de SIMAC se dividieron en intervalos, la clasificación se muestra en la Figura 11;no se incluyen los eventos clasificados con valores 1 (bajos) porque se quieren analizar los blanqueamientos más representativos, es decir de intensidad media y alta.

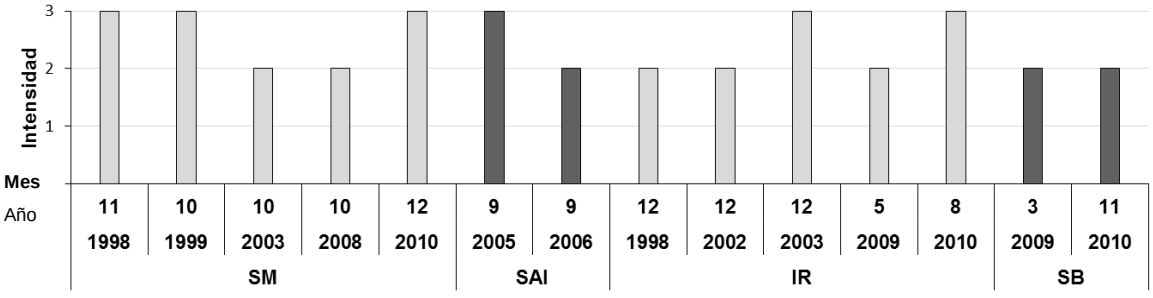


Figura 11 Intensidad del blanqueamiento con datos del SIMAC, los datos están separados por área de estudio. El mes en que se realizó el monitoreo se muestra como un numero bajo la barra

Para SM,en 1998los monitoreos registraron un porcentaje de coral vivo blanqueado de 10,12 %, el cual, según los rangos propuestos es de intensidad 3 (alta). Este valor

aumentó para 1999 (11,802 %), también clasificado de intensidad 3.En 2003 un valor de 5,24 % de blanqueamiento fue clasificado de intensidad 2 (media). En el 2008el blanqueamiento en SM tuvo una intensidad 2 con un porcentaje de 5,28 %. En el año 2010 se registró un valor de 15,15 %, de intensidad 3. Para SAI, en el 2005 la intensidad fue alta con un porcentaje de 11,66 %. En el año 2006 el porcentaje estuvo por encima del promedio para esa área (3,03 %), por lo que tuvo una intensidad 2, en las demás áreas la intensidad fue baja. En el año 2010 en SAI no se hizo el monitoreo.

Para IR, en 1998 el porcentaje de blanqueamiento fue de 4,05 % clasificado con una intensidad 2. En el año 2002 la intensidad fue media (3,55 %). En el año 2003 el valor alcanzó el 4,91 % siendo de intensidad alta. En el 2005 no hubo monitoreo del SIMAC en IR. En el 2009 los datos del SIMAC tuvieron mayor porcentaje que la media de la serie en 3,8 % con intensidad media. En el año 2010 el porcentaje de blanqueamiento fue de 5,8 %, clasificado de intensidad alta. Para SB, en el 2009 en porcentaje fue de 3,23 % y clasificación de intensidad media. En el año 2010 el blanqueamiento fue del 5,4 % de la intensidad fue media.

Para identificar los eventos de blanqueamiento que han sido de intensidad significativa en cada área de estudio del Caribe colombiano, se unieron las fuentes de información – literatura, ReefBase y SIMAC - este resultado se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

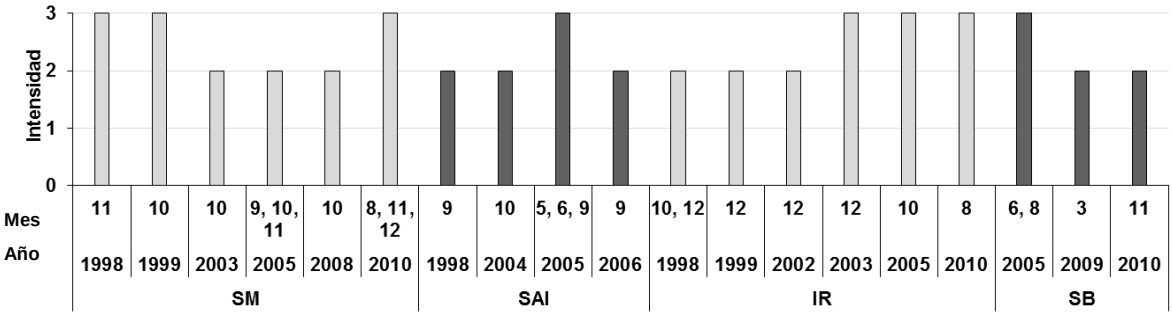


Figura 12 Intensidad de blanqueamiento a partir de diferentes fuentes de información, los datos están separados por área de estudio. Los meses en que se registró blanqueamiento se indican con números bajo las barras

En suma, en SM se identificaron seis blanqueamientos: tres de intensidad media (2003, 2005 y 2008) y tres de intensidad alta (1998, 1999 y 2010), todos registrados en la segunda mitad del año entre agosto y diciembre. El porcentaje de blanqueamiento del evento de 1998 registrado por Wilkinson y Souter (2008) fue de 10 %. El blanqueamiento de octubre de 1999 se registró en Reefbase, este evento se asoció con altas temperaturas de ~30 °C. El evento del 2003 fue registrado por Rodríguez - Ramírez, *et al*., (2006) con base en los resultados del SIMAC, ellos asociaron el blanqueamiento a las descargas continentales. El blanqueamiento de 2005 fue asociado a un aumento de la temperatura (30 °C), el porcentaje de coral blanqueado estuvo entre 1 – 30 % y probablemente la surgencia durante enero - abril y julio - agosto retardó y disminuyó la intensidad (Venera – Pontón, 2008). El blanqueamiento del año 2008 fue registrado en los monitoreos del SIMAC. En agosto de 2010 se observó un blanqueamiento que fue asociado a un incremento de temperatura entre 29 – 30 °C, para ese mes el porcentaje de coral vivo blanqueado fue entre 5 -10%. A principios de octubre de 2010, se observó un fenómeno de blanqueamiento extendido en la parte somera (3 – 4 m) de varios arrecifes; fue asociado a las aguas turbias y calientes y al exceso de lluvia de la temporada; el coral *Diploria strigosa* se destacó como el coral con prácticamente todas las colonias blanqueadas. Para el mes de noviembre las temperaturas registradas fueron de 30 – 31 °C, el porcentaje de coral vivo blanqueado fue entre 70 – 100 % y un 2 % de coral vivo estaba recientemente muerto (comunicación de Navas Camacho, *et al*. en Reefbase, 2010). Inicialmente no se observó mortalidad coralina, cuando ya los corales estaban comenzando a recuperarse, hubo mortalidad asociada a un fuerte mar de leva en diciembre de 2010, y a bajas temperaturas en enero de 2011 (S. Zea, com. Pers). Tayrona presentó la mayor reducción en la cobertura de coral vivo, así como el mayor incremento en la cobertura de algas, respecto al año anterior, lo cual pudo estar relacionado con el deterioro arrecifal tras la ocurrencia del evento de blanqueamiento coralino masivo del año 2010.

En SAI se identificaron cuatro eventos de blanqueamiento: tres de intensidad media (1998, 2004 y 2006) y uno de intensidad alta (2005), todos registrados en la segunda mitad del año entre junio y octubre, por lo general en el mes de septiembre. Los

blanqueamientos de 1998, 2004 y 2006 tienen poca información y son desconocidas las causas asociadas (Rodríguez – Ramírez, *et al*., 2006; ReefBase, 2012;). Durante el blanqueamiento del 2004, de intensidad media, se observaron algunos parches blanqueados, los cuales fueron registrados por los investigadores durante la reunión Internacional Advisory Board (Octubre 4 - 8). Aunque no fue un blanqueamiento masivo, los corales estuvieron estresados y desde pálidos a totalmente blanqueados (obs. per. de Billy Causey a ReefBase 2004). El blanqueamiento del 2005 fue registrado desde mayo en ReefBase, con porcentaje de coral vivo blanqueado entre 1- 20 %. Las causas no son claras debido a la unión de eventos que ocurrieron en ese año: el Huracán Beta en septiembre y Niño 2004 – 2005.

En IR se identificaron seis eventos de blanqueamiento: tres de intensidad media (1998, 1999 y 2002) y tres de intensidad alta (2003, 2005 y 2010), todos registrados en la segunda mitad del año entre agosto y diciembre. Los eventos de 1998 y 1999 tienen poca información; en ReefBase y Wilkinson (2000) fueron registrados con calificación baja y un porcentaje de blanqueamiento de aproximadamente 5 %. El blanqueamiento de 2005 tuvo un primer registro desde finales de junio con un porcentaje de mortalidad del 0,7 %, en agosto fue registrado a través de ReefBase con un porcentaje de coral vivo blanqueado entre 1- 90 %, en ese mes el porcentaje de mortalidad estuvo entre 0 – 8 %, y en el mes de octubre fue registrado por Wilkinson y Souter (2008) con un porcentaje de coral vivo blanqueado de hasta 80 % y un porcentaje de mortalidad de 2 %. El blanqueamiento de agosto fue asociado a las altas temperaturas que se dieron entre julio-agosto y a las descargas del río (Rodríguez - Ramírez, *et al*., 2008). El blanqueamiento de agosto de 2010 en ReefBase fue valorado como de menor intensidad comparada con el evento de 2005, el porcentaje de blanqueamiento registrado en la literatura fue del 70%.

En SB se identificaron tres eventos de blanqueamiento: dos de intensidad media (2009 y 2010) y uno de intensidad alta (2005). El blanqueamiento de 2005 tuvo un porcentaje de coral vivo blanqueado entre 18 - 42,2 % y un porcentaje de mortalidad entre 1 – 4 % (Wilkinson y Souter, 2008).

- **Extensión**

A partir del número de ocurrencia de blanqueamientos en cada área de estudio y de la información de la literatura de cada evento, se identificaron tres escalas de extensión que se muestran en la

Figura 13. Los blanqueamientos de extensión de la cuenca se refieren a los blanqueamientos que sucedieron tanto en las áreas continentales como en la oceánica. Los blanqueamientos de extensión continental ocurrieron en al menos dos sitios de estudio costeros y los blanqueamientos de extensión local ocurrieron en uno de los cuatro sitios de estudio.

Los blanqueamientos de 1998 y 2005 ocurrieron a nivel de cuenca, el blanqueamiento del 2010 fue masivo en el Caribe, pero como no se encontró registro en el SIMAC ni en literatura para SAI entonces no fue ubicado allí; los blanqueamientos de los años 1999, 2003 y 2010 ocurrieron a nivel de la costa continental; los blanqueamientos del 2002, 2004, 2006, 2008 y 2009 ocurrieron a nivel local.

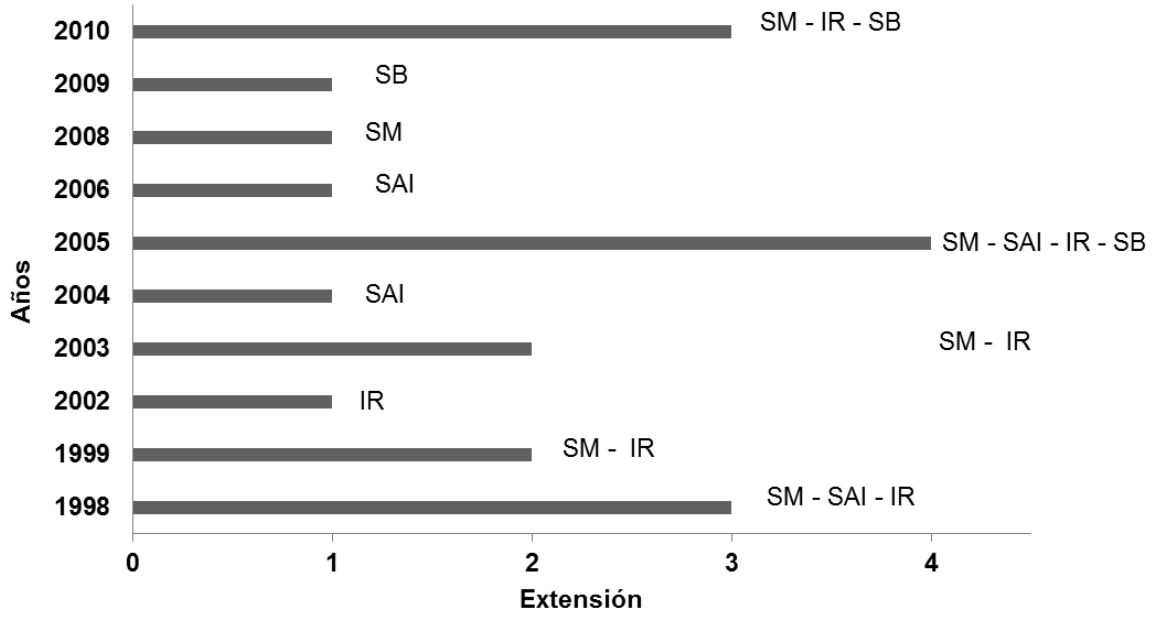


Figura 13 Extensión (número de áreas de ocurrencia) de los eventos de blanqueamiento de intensidad medio y alta

4.3 Comportamientode las variables ambientales asociado a los eventos de blanqueamiento

En este numeral se muestran las relaciones entre los blanqueamientos de intensidad media y alta y la variabilidad temporal de las variables ambientales. Se muestra un análisis de extremos y descriptivo de las variables desde cuatro meses antes de la fecha de blanqueamiento registrada; y se muestra el resultado del análisis de componentes principales con todas las series de datos de las variables ambientales. Las gráficas de las series de tiempo de cada una de las variables versus las fechas de blanqueamiento se muestran en la Figura 14,Figura 15,Figura 16, Figura 17,Figura 18 y Figura 19.

Durante los 13 años de estudio (1997 – 2010), la serie que más valores extremos presentó fue la de vientos con un total de 407: en SB 182, en IR 114, en SAI 82 y en SM 29. La segunda variable con más eventos extremos fue el caudal con un total de 248 eventos: SM 185, en SB 36 y en IR 27. La tercera fue temperatura con 187 extremos: 37 en SM, 59 en SAI, 42 en IR y 49 en SB. En la turbidez se presentaron 35 eventos extremos: en SAI y en SB 10, en IR 8 y en SM 7. La clorofila sumó 33: en SB 12, en SM 10, en IR 9 y en SAI. Y finalmente, la nubosidad tuvo siete eventos extremos: en SM 4, en IR 1 y en SB 7.

Tabla 6 Valores altos y extremos de las variables ambientales calculadas a partir de datos entre 1997 – 2010. Los datos fueron obtenidos a partir de: satélite Pathfinder (TSM), Sensor SeaWiFS (clorofila, turbidez), IDEAM (caudal), NCEP/NCAR (% cobertura de nubes) y Reanálisis CCMP (vientos)

	Área	TSM (°C)	Chl (mg/m^3)	Caudal (m^3/s)	Turbidez m^{-1}	% Cob. Nub	Vientos (m/s)
+1 Desv. Est (valores altos)	SM	28,14	1,67	24,24	0,15	72,13	8,16
	SAI	28,46	0,28		0,04	77,13	8,96
	IR	29,76	1,97	570,66	0,18	76,57	7,27
	SB	29,95	2,01	604,09	0,16	77,85	5,96

	Área	TSM (°C)	Chl (mg/m^3)	Caudal (m^3/s)	Turbidez m^{-1}	% Cob. Nub	Vientos (m/s)
	SM	29,84	2,54	35,469	0,2	85,67	10,19
+2 Desv. Est. (valores extremos)	SAI	29,42	0,43		0,05	91,03	11,17
	IR	31,01	2,94	723,74	0,26	89,4	9,509
	SB	31,06	2,98	779,89	0,22	88,66	7,873

- **Valores extremos durante los años de blanqueamientos**

Las series completas de cada variable se muestran a continuación. Con estas gráficas se identificaron la cantidad de extremos de las variables ambientales, que ocurrieron en los años en que se registraron blanqueamientos.

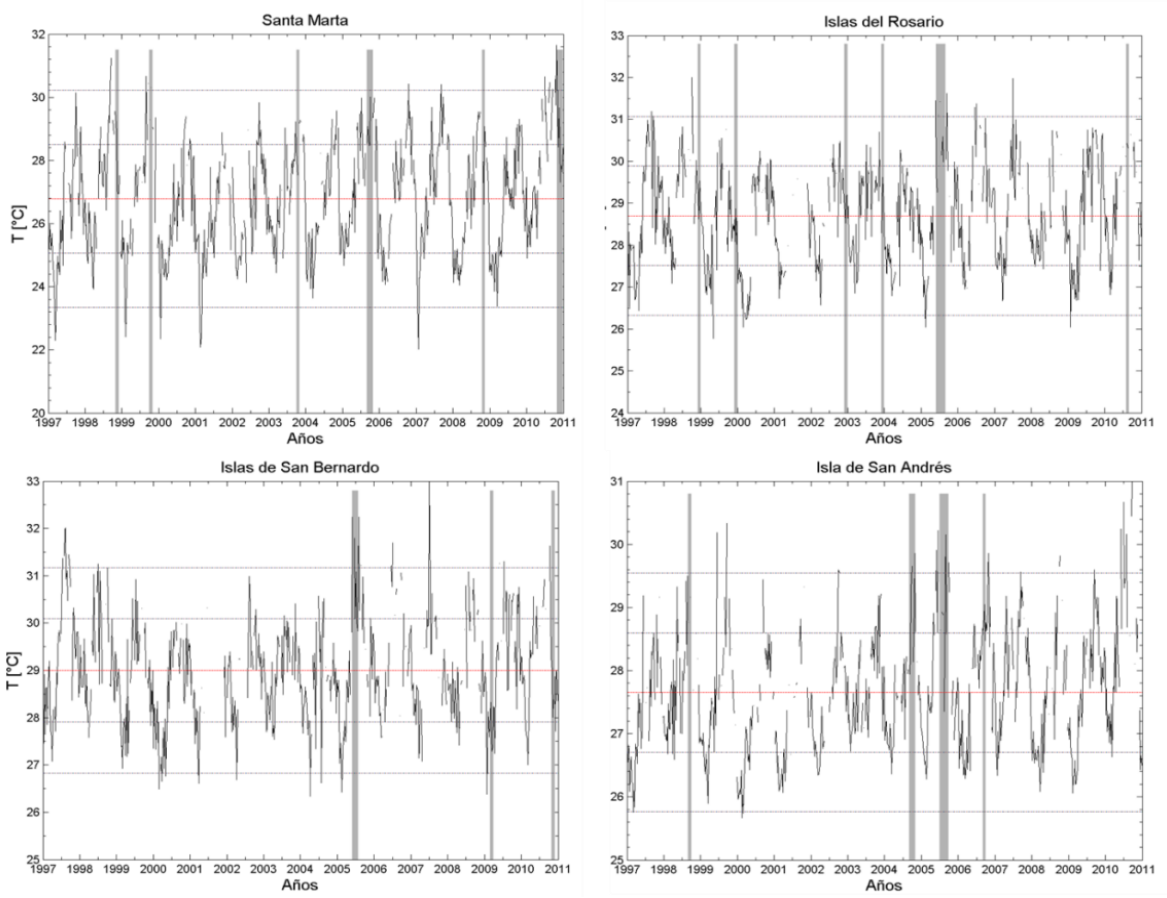


Figura 14 Serie de tiempo de la temperatura en cada área de estudio, con datos del satélite Pathfinder versión 2.5. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

Durante toda la serie histórica, la mayor cantidad de extremos de temperatura se registraron en SAI (59 extremos) y en IR (49 extremos). Las cantidades más altas de extremosse dieron en el año 2005 en IR (9 extremos) y en el 2010 en SAI-SM (11 y 9 extremos respectivamente). Es de resaltar que en SM, la alta cantidad de extremos de temperatura han coincidido con los blanqueamientos de 1998, 1999, 2005 y 2010, de los cuales tres fueron de intensidad alta. Esta misma relación se halló en SAI, en la cual los blanqueamientos 2004, 2005 y 2006 coincidieron con años de alta cantidad de extremos de temperatura, sin embargo el 2010 fue el año de mayor cantidad pero no se tiene reporte hasta el momento de un blanqueamiento en esa área.

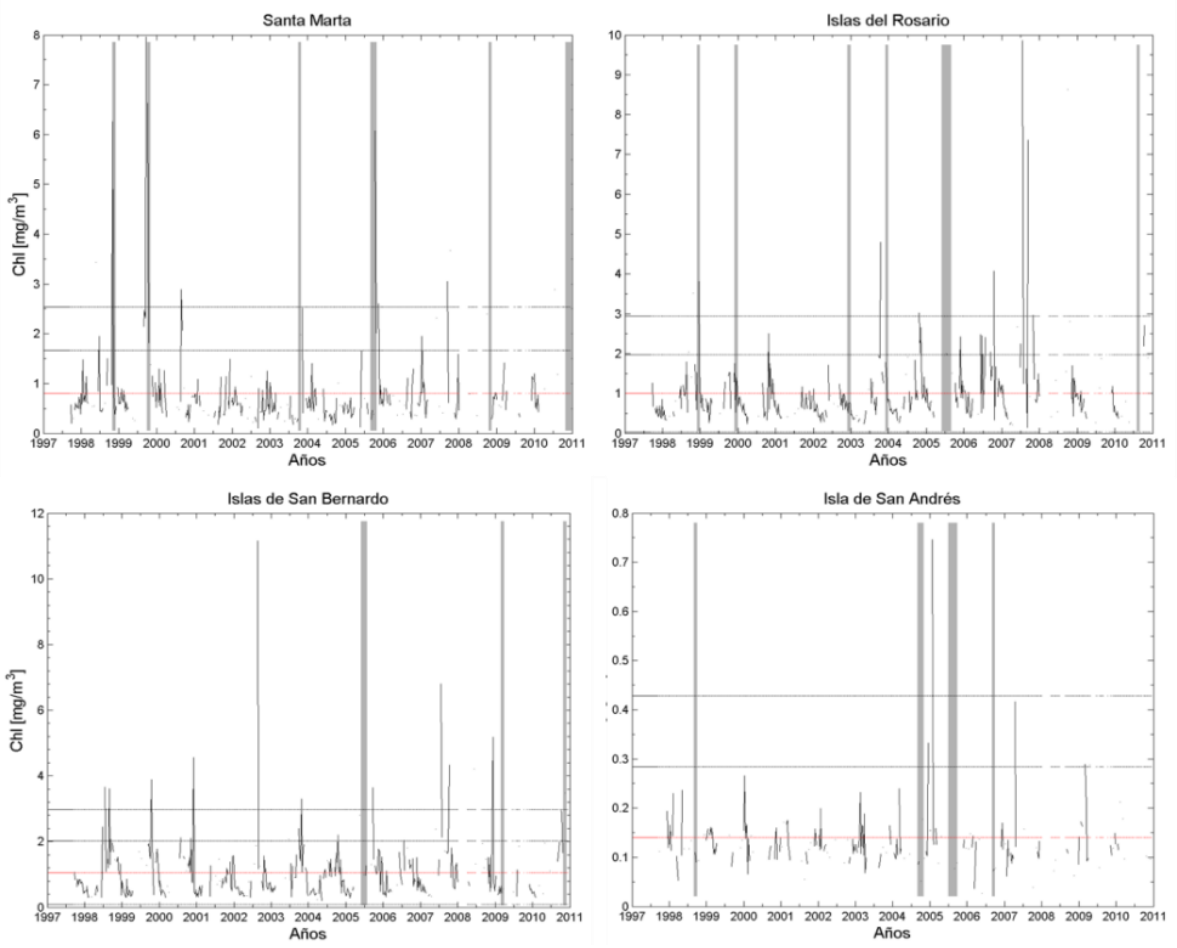


Figura 15 Serie de tiempo de la clorofila en cada área de estudio, con datos del sensor SeaWiFS (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

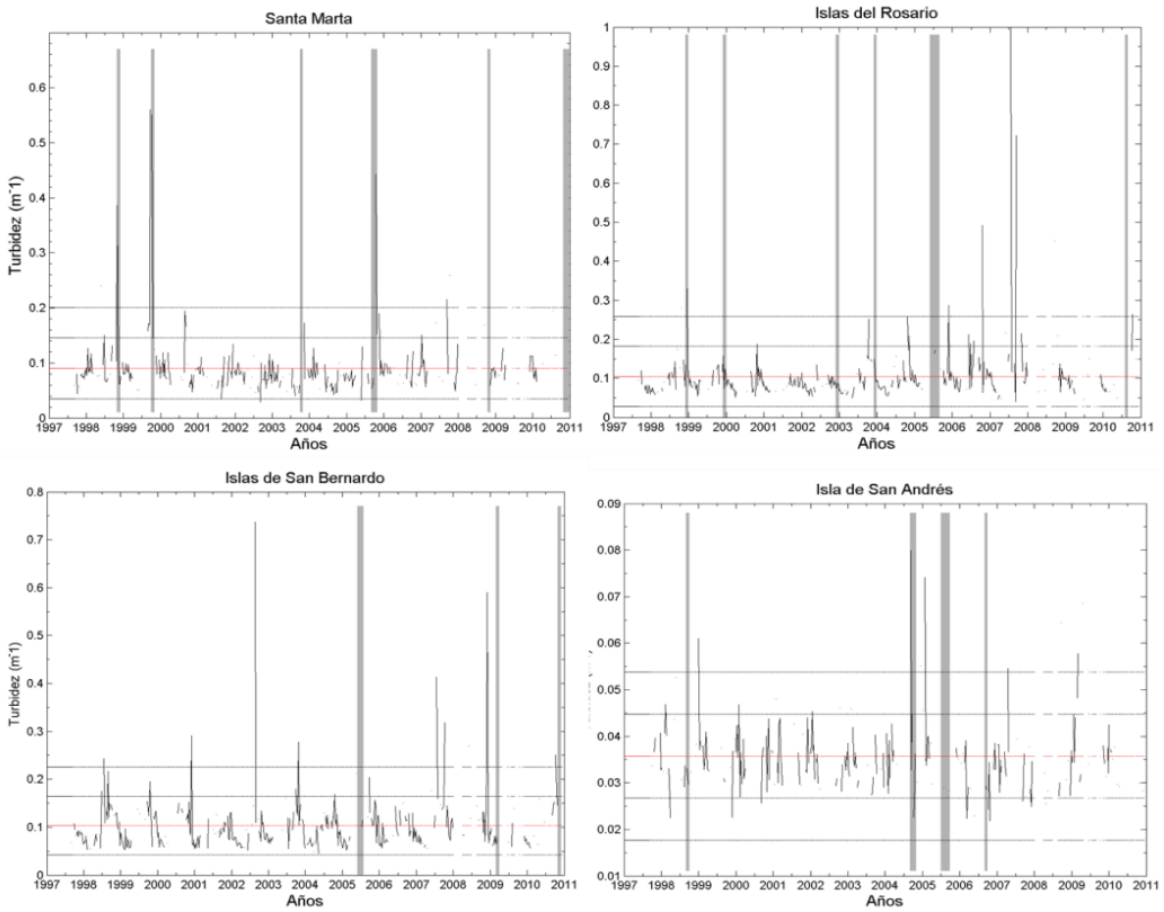


Figura 16 Serie de tiempo de la turbidez en cada área de estudio, con datos del sensor SeaWiFS (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

La mayor cantidad de valores extremos de clorofila se identificaron en SB con un total de 12 extremos entre 1997 y 2010, mientras que en SAI se han presentado la menor cantidad (2 extremos). Los años de alta cantidad de extremos no coinciden necesariamente con los años de blanqueamiento, excepto en el área de SM en los años de 1998, 1999 y 2005 que tuvieron 2 extremos cada año. Por su parte, la turbidez tuvo mayor cantidad de valores extremos en SAI y SB (10 extremos), pero tampoco se encontró coincidencia con los años de blanqueamiento.

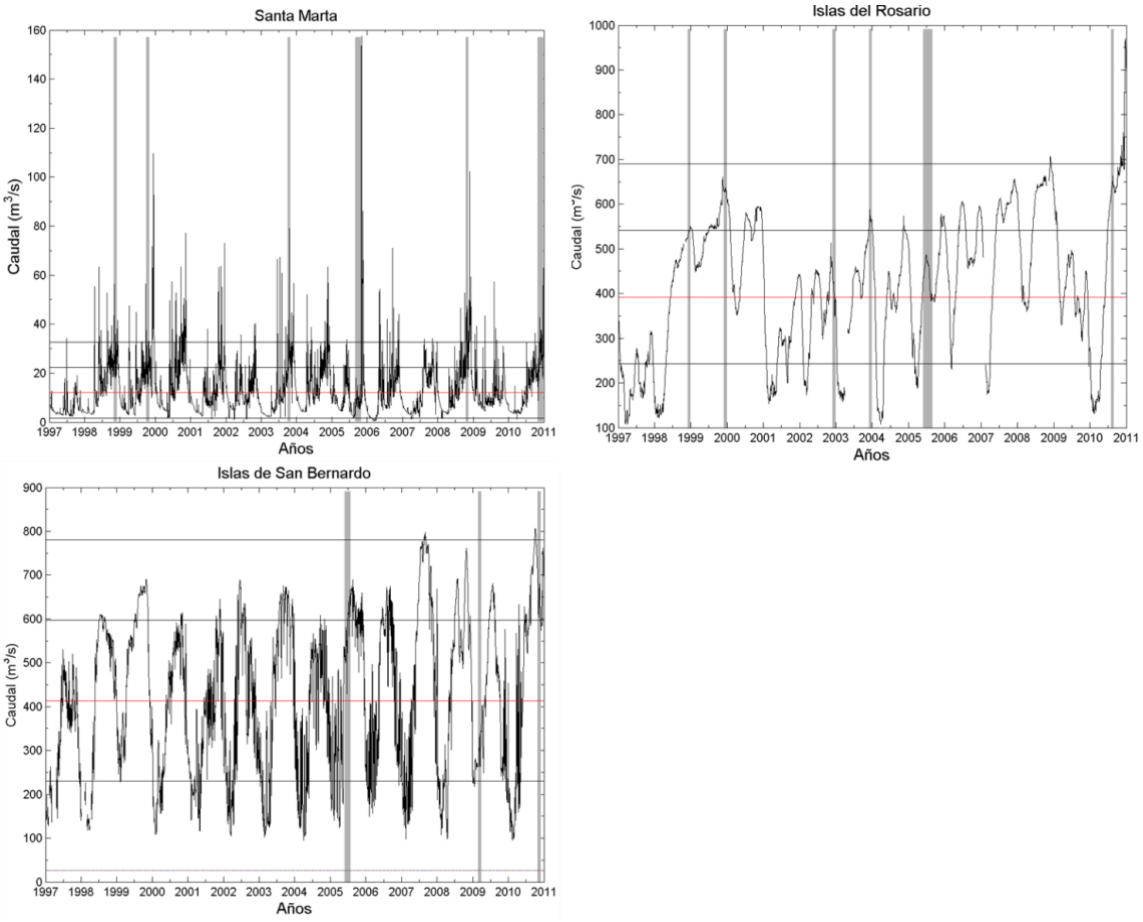


Figura 17 Serie de tiempo de caudales en las áreas continentales del estudio, con datos del IDEAM (1997 – 2010). La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

La mayor cantidad de extremos de caudal, entre 1997 y 2010 han ocurrido en SM (185 extremos), seguido de SB con 35 extremos. En SM todos los años de blanqueamiento han coincidido con una alta cantidad de extremos de caudal. En IR sólo se identificaron extremos en el 2010, años en cual ocurrió blanqueamiento.

En todas las áreas, los años de blanqueamiento no coincidieron con extremos positivos de nubosidad, por el contrario han sido años de anormalidad negativa, es decir de bajo porcentaje de nubosidad.

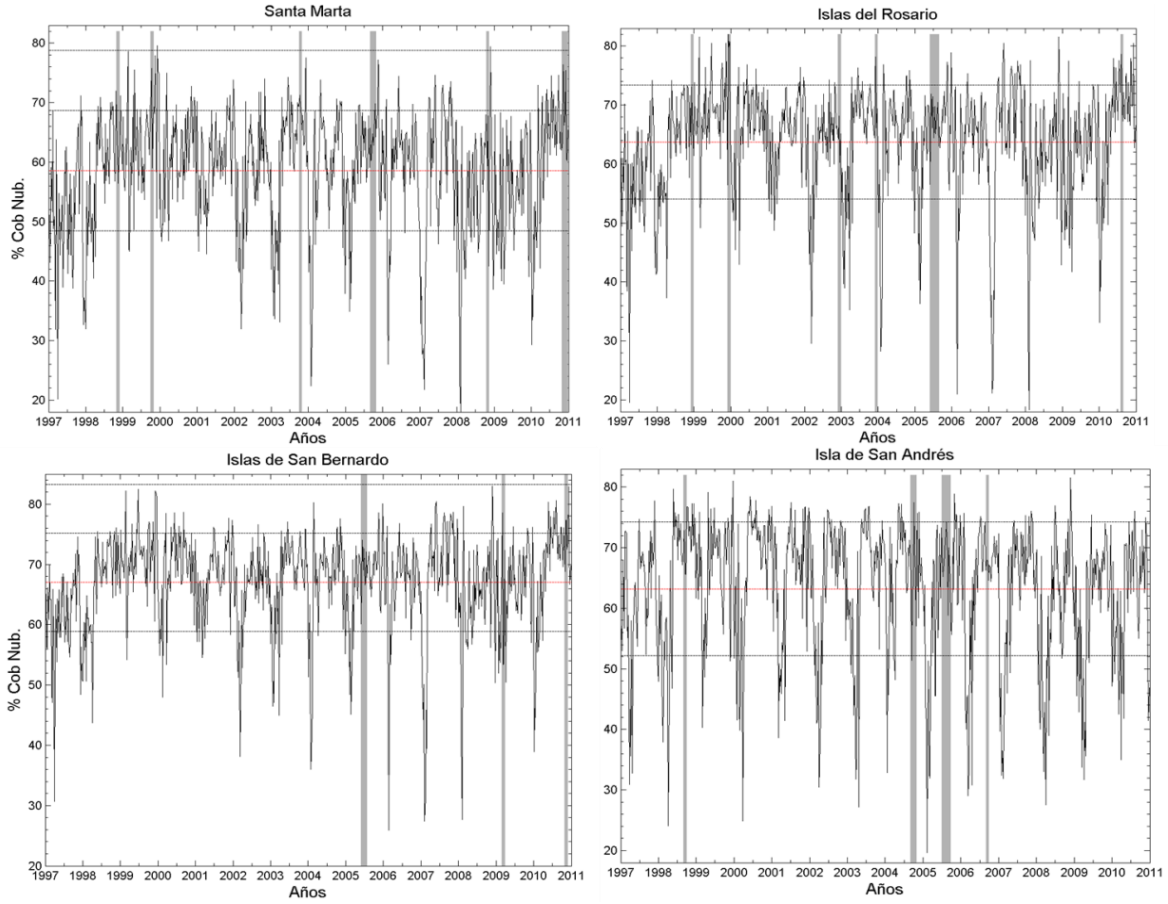


Figura 18 Serie de tiempo de nubosidad en cada área de estudio, con datos de reanálisis de NCEP / NCAR. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

La mayor cantidad de extremos de vientos se identificaron en SB con un total de 182 extremos, seguidamente se identificó a IR con 114, luego SAI con 82 y finalmente a SM con 29 extremos. Solo en SAI ha habido coincidencia de los valores extremos de vientos con los blanqueamientos. Por el contrario en SM los años de blanqueamiento han sido años en los que no se identificaron extremos; en IR y SB han estado asociados a poca cantidad de extremos.

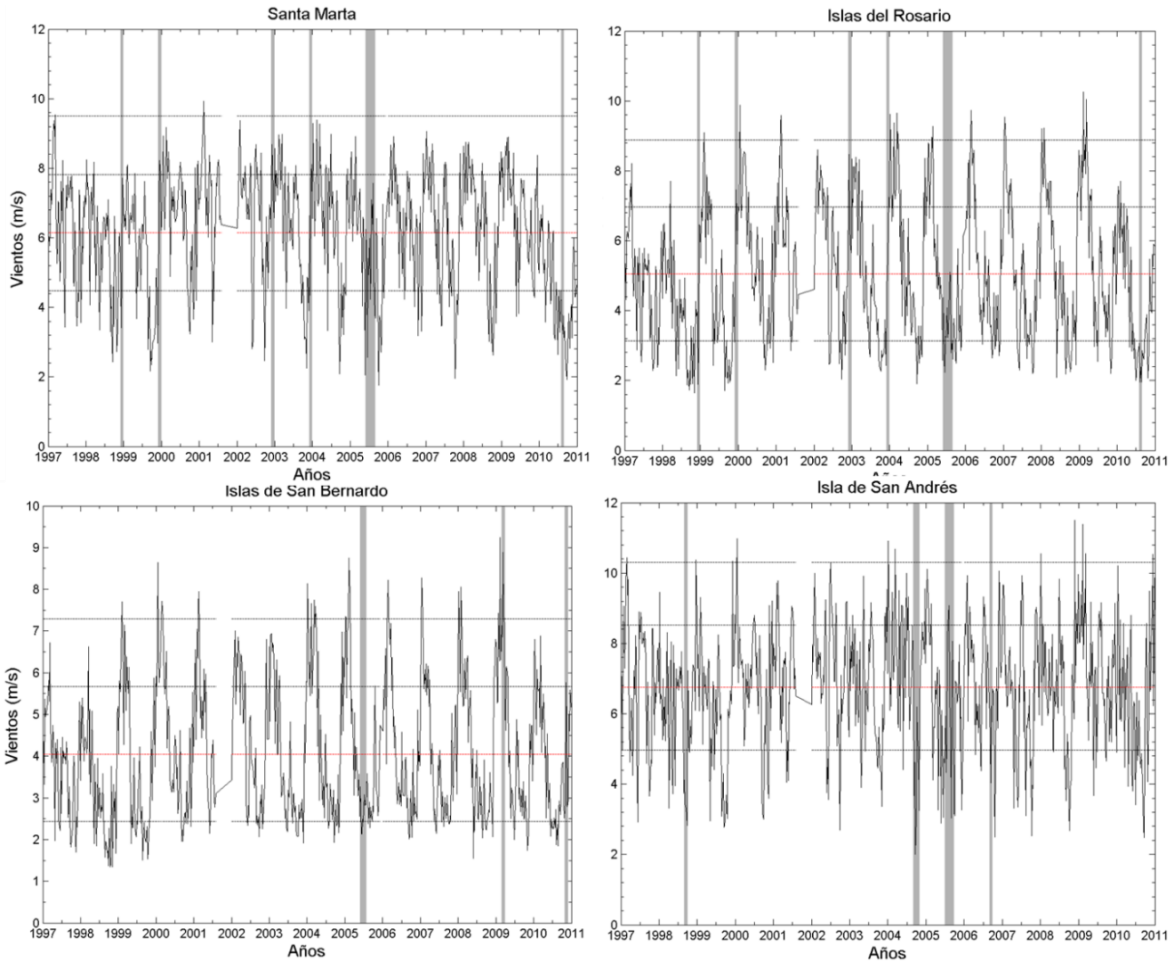


Figura 19 Serie de tiempo de vientos en cada área de estudio, con datos del proyecto CCMP. La línea horizontal roja es la media, las líneas horizontales negras son las desviaciones estándar. Los rectángulos grises verticales indican las fechas de blanqueamiento identificadas para cada área

El resumen de la cantidad de eventos extremos durante los años de blanqueamientos se muestra en la Figura 20. En SM se identifica que en general dominan los extremos de caudal, seguidos de temperatura y que ocurren en un mismo año, han coincidido con los años en que ha ocurrido blanqueamiento. En IR y SB dominan los extremos de vientos y son más frecuentes los extremos de clorofila y turbidez que en las demás áreas. En estas dos áreas no se identificó coincidencia entre la alta ocurrencia de extremos de varias variables y los años de blanqueamientos. En SAI dominan los extremos de vientos, de temperatura y de turbidez y estos han ocurrido conjuntamente en la mayoría de años de blanqueamiento.

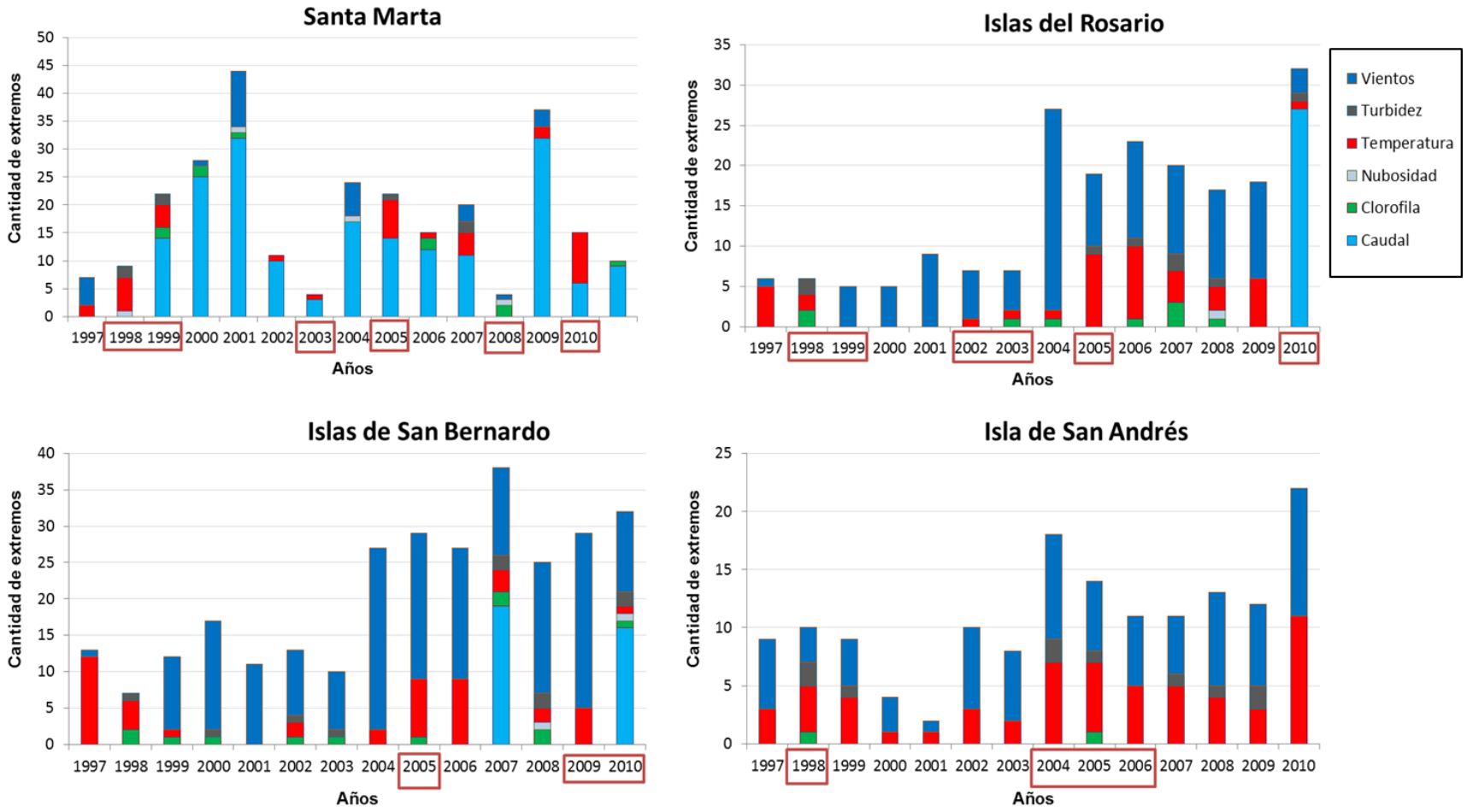


Figura 20 Cantidad anual de extremos de las variables ambientales en cada sitio de estudio. Los rectángulos indican que ese año ocurrió blanqueamiento

- **Análisis descriptivo de las variables desde cuatro meses anteslos blanqueamientos de intensidad media y alta**

Se hizo un análisis temporal de cuatro meses antes de cada blanqueamiento y se tuvieron en cuenta los valores altos y extremos que se refieren a una y dos desviaciones estándar positivas con respecto a la media, éstas se muestran en la Figura 21,Figura 22 y Figura 23, las cuales se dividen en columnas para las cuatro áreas estudio. En el eje Y se indica la variable ambiental y en el eje X se indica el tiempo (4 meses, 3 meses, 2 meses, 1 mes, 2 semanas y 1 semana antes del evento). Las columnas rojas indican valores extremos y las columnas amarillas indican valores altos.

En SM se identificaron temperaturas extremas durante los blanqueamientos de intensidad alta de 1998 y 2010 desde por lo menos tres meses antes de registrarse el evento. Los demás blanqueamientos estuvieron asociados a temperaturas altas mas no extremas. En IR no se identificaron temperaturas extremas, las temperaturas altas se identificaron a partir del 2002 y por lo menos desde dos meses antes de cada evento. En SB, la temperatura del 2005 fue extrema desde dos semanas antes de identificarse el blanqueamiento, las demás fechas estuvieron asociadas a temperaturas altas que se dieron desde cuatro meses antes pero que no perduraron hasta fechas cercanas del blanqueamiento. En SAI la temperatura de los blanqueamientos del 2004 y 2005 fue extrema aunque el tiempo de duración fue muy diferente en cada evento, durante el 2004 fue alta dos semanas antes y extrema una semana antes; en el 2005 fue alta desde por lo menos cuatro meses antes y extrema desde dos semanas antes. Los otros dos años tuvieron temperaturas altas desde por lo menos tres meses antes.

El caudal tuvo la mayor cantidad de extremos en SM, éste fue alto desde un mes antes de registrarse los eventos de 1998, 1999, 2005 y 2010; el caudal alcanzó valores extremos en los años 2005 y 2010 desde una semana antes de registrarse blanqueamiento. En IR en los años 1999 y 2010 el caudal fue alto desde un mes antes y no se identificaron extremos durante los meses cercanos al blanqueamiento. En SB hubo valores altos de caudal en el 2009 solo cuatro meses antes del evento, mientras en el 2010 los valores altos fueron desde 3 meses antes y perduraron hasta la fecha del blanqueamiento.

La clorofila y la turbidez en SM, en 1999 y 2005 llegaron a tener valores altos desde dos meses antes y extremos desde dos semanas antes. En el 2008 la clorofila fue alta cuatro meses antes del registro y en el último mes en el cual la turbidez también alcanzó un valor alto. En IR durante los eventos de 1998 y 2005, la clorofila y la turbidez presentaron valores altos dos meses antes. En el evento de 2003 dos meses antes la clorofila fue extrema y la turbidez fue alta. En SB en el evento de 2005 la clorofila y la turbidez fueron altas desde un mes antes del registro y en el 2010 la clorofila estuvo alta desde dos meses antes del monitoreo y fue extrema dos semanas antes. En SAI ninguno de los años de blanqueamiento tuvo valores altos o extremos de clorofila pero el 2004 si tuvo un valor extremo de turbidez desde dos semanas antes del evento.

La nubosidad tuvo valores altos más no extremos en todas las áreas de estudio; en SM en el evento de 2005; en IR en los años 1999, 2003 y 2010; y en SB en el 2010, todos estos eventos extremos generalmente sucedieron desde dos semanas antes del registro de blanqueamiento. Los vientos no tuvieron valores extremos durante los años estudiados y solo hubo dos valores altos uno en IR en el año 2002 una semana antes del registro y otro en SB en el 2005 desde cuatro meses antes.

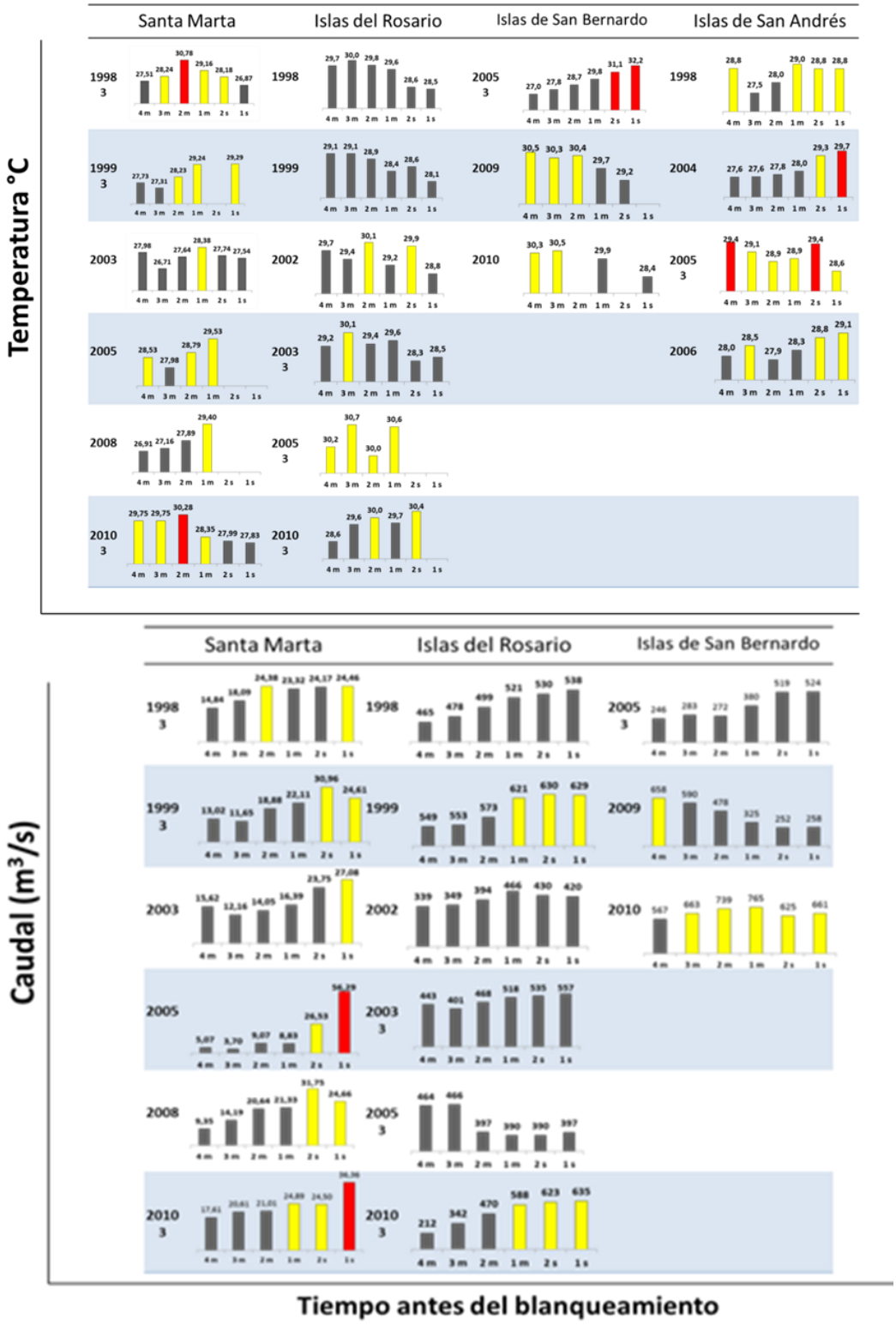


Figura 21 Comportamiento de temperaturay el caudal desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media (amarrillo) o alta (rojo)

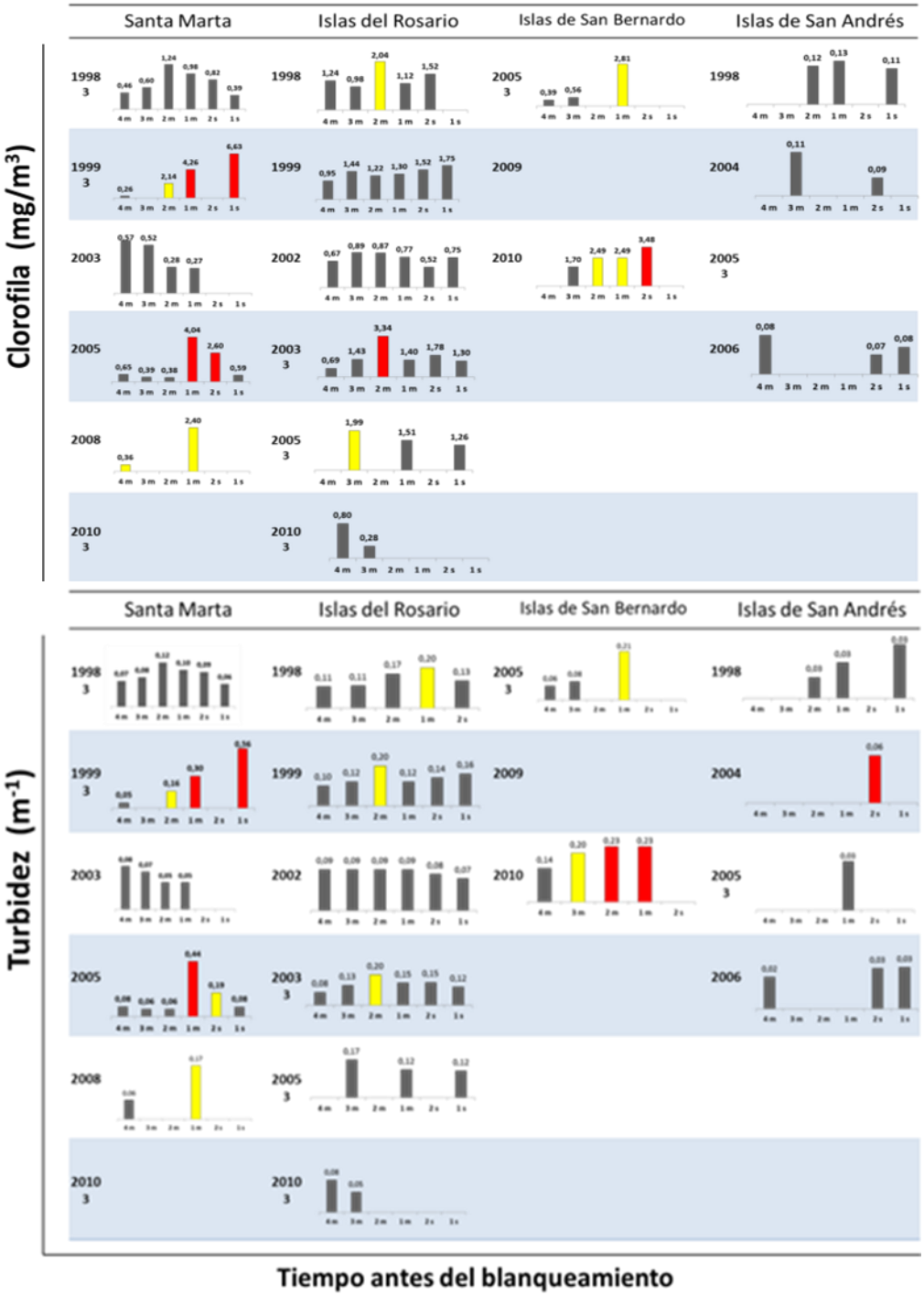


Figura 22 Comportamiento de la clorofila y la turbidez desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media o alta

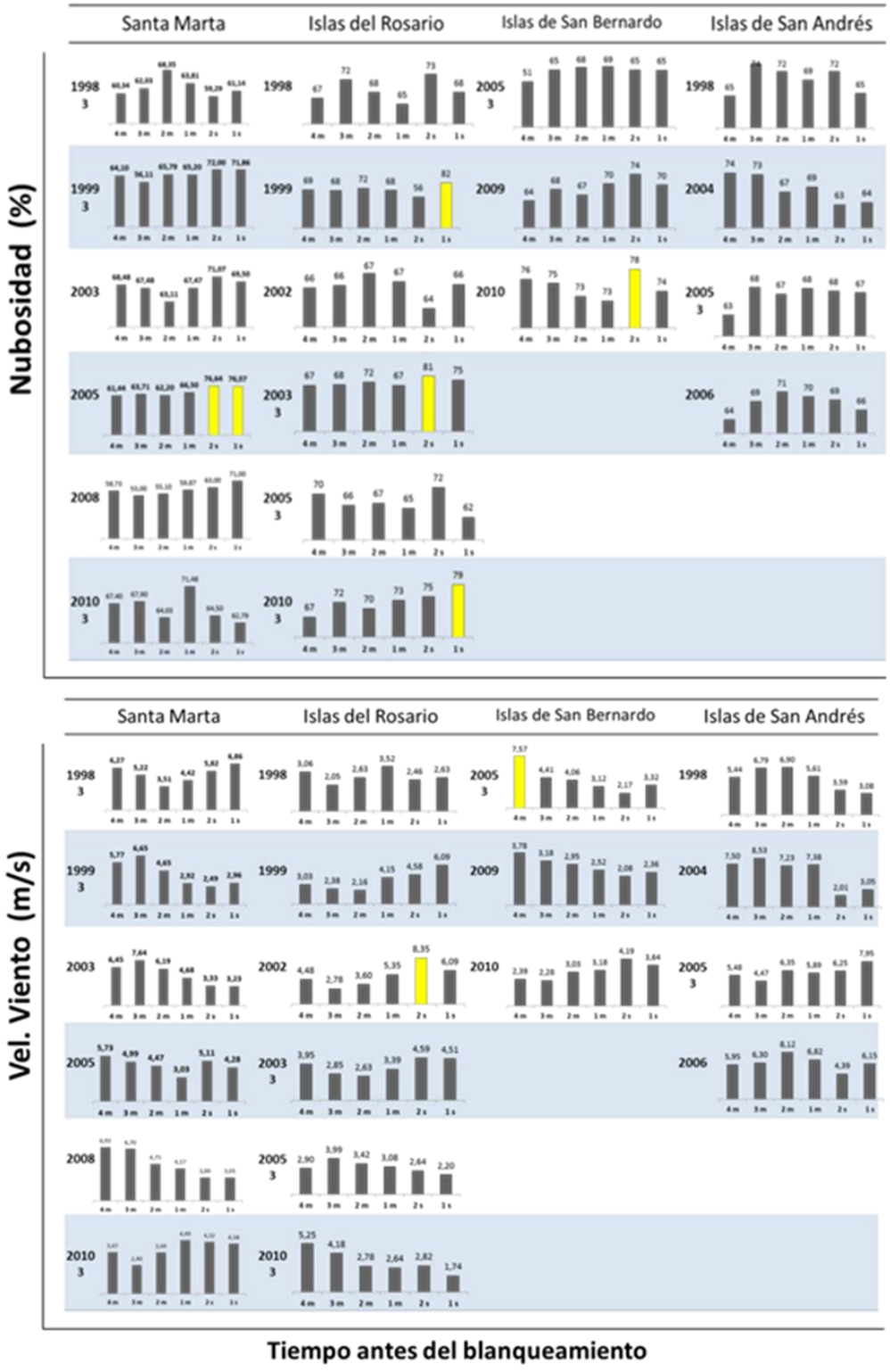


Figura 23 Comportamiento de la nubosidad y los vientos desde cuatro meses antes del registro de eventos de blanqueamiento de intensidad media o alta

- **Comportamiento combinado: análisis de componentes principales ACP**

El ACP se hizo con la intensión de explorar qué variables tuvieron un comportamiento dominante en las fechas en que ocurrieron los eventos de blanqueamiento.

- Santa Marta

Con las tres primeras componentes se explica el 86 % de la varianza de los datos (Tabla 7). La componente uno está fuertemente correlacionada con las variables vientos y temperatura, teniendo la temperatura una correlación negativa (Tabla 8). La componente dos está correlacionada negativamente con la clorofila y la turbidez.

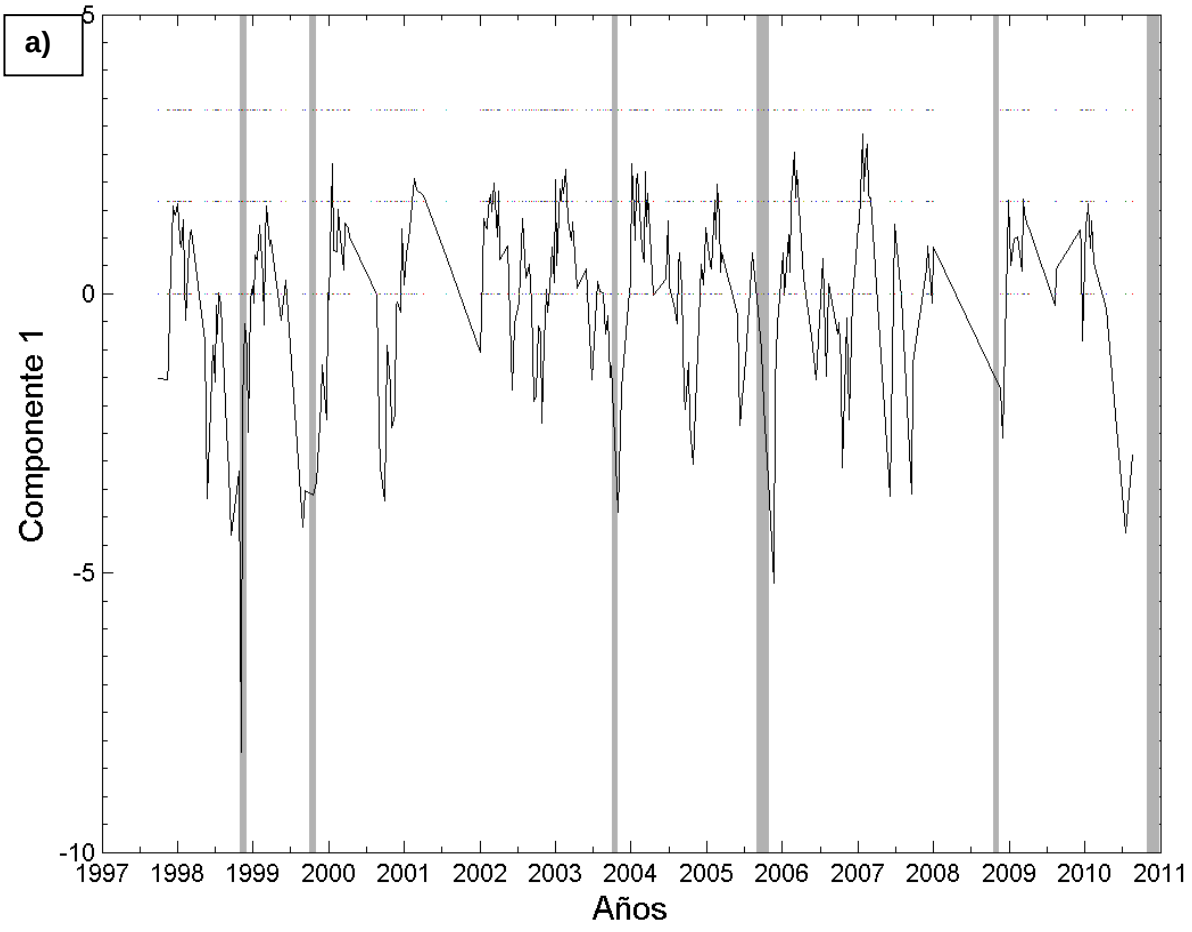
Tabla 7 Resumen de información del ACP para Santa Marta

C	Valor propio	% Total varianza	% Acu.
1	2,71	45,10	45,10
2	1,82	30,36	75,46
3	0,65	10,78	86,24

Tabla 8 Coeficientes factoriales de las variablespara Santa Marta

	C 1	C 2	C 3
Caudal	-0,68	0,25	0,51
Nubes	-0,68	0,28	0,34
Temperatura	-0,79	0,37	-0,33
Vientos	0,80	-0,27	0,40
Clorofila	-0,53	-0,84	-0,01
Turbidez	-0,49	-0,87	0,00

Al graficar estas componentes como series de tiempo y sobreponer en rectángulos grises las fechas de blanqueamiento, se identifica que todos los blanqueamientos (1998, 1999, 2003, 2005 y 2008), coincidieron con picos negativos de la componente uno, para el año 2010 no hubo datos (Figura 24a), es decir que la temperatura tuvo valores altos y los vientos valores bajos. También al graficar de esta manera la componente dos, se observa que todos los blanqueamientos (1998, 2003, 2005 y 2008) con excepción de 1999 coinciden con picos positivos de la componente es decir que la clorofila y la turbidez tenían valores altos (Figura 24b).



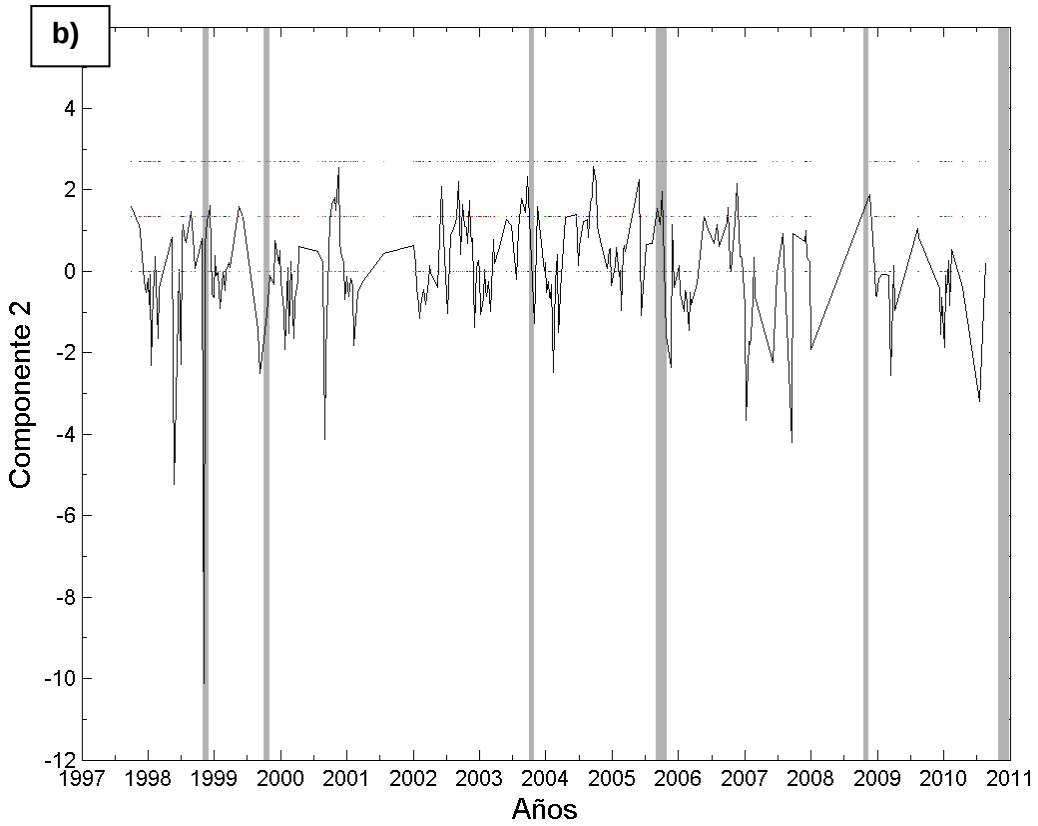


Figura 24 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta

- San Andrés

Las tres primeras componentes del ACP recogen el 89,13 % de la varianza (Tabla 9).

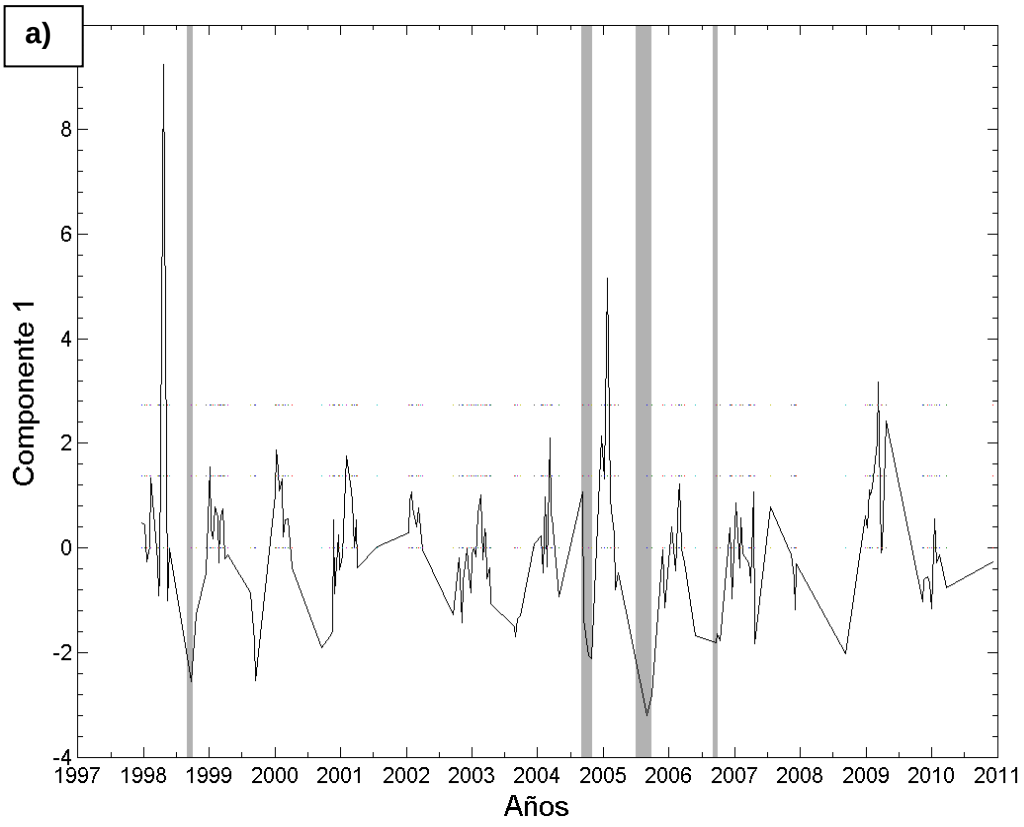
Tabla 9 Resumen de información del ACP para la Isla de San Andrés

C	Valor propio	% Total varianza	% Acu.
1	1,9	37,5	37,5
2	1,5	29,9	67,4
3	1,1	21,7	89,1

Tabla 10 Coeficientes factoriales de las variables para la Isla de San Andrés

	C 1	C 2	C 3
Nubes	-0,17	0,39	0,88
Temperatura	-0,60	0,72	0,04
Vientos	0,61	-0,49	0,53
Turbidez	0,77	0,52	-0,05
Clorofila	0,73	0,56	-0,15

Los blanqueamientos de 1998, 2003, 2005 y 2006 coinciden con picos negativos de la componente uno (Figura 25a), la cual esta correlacionada con positivamente con la turbidez y la clorofila, es decir que estas variables tuvieron valores bajos, mientras que coinciden con picos positivos de la componente dos, la cual está correlacionada positivamente con la temperatura (Tabla 10 y Figura 25b).



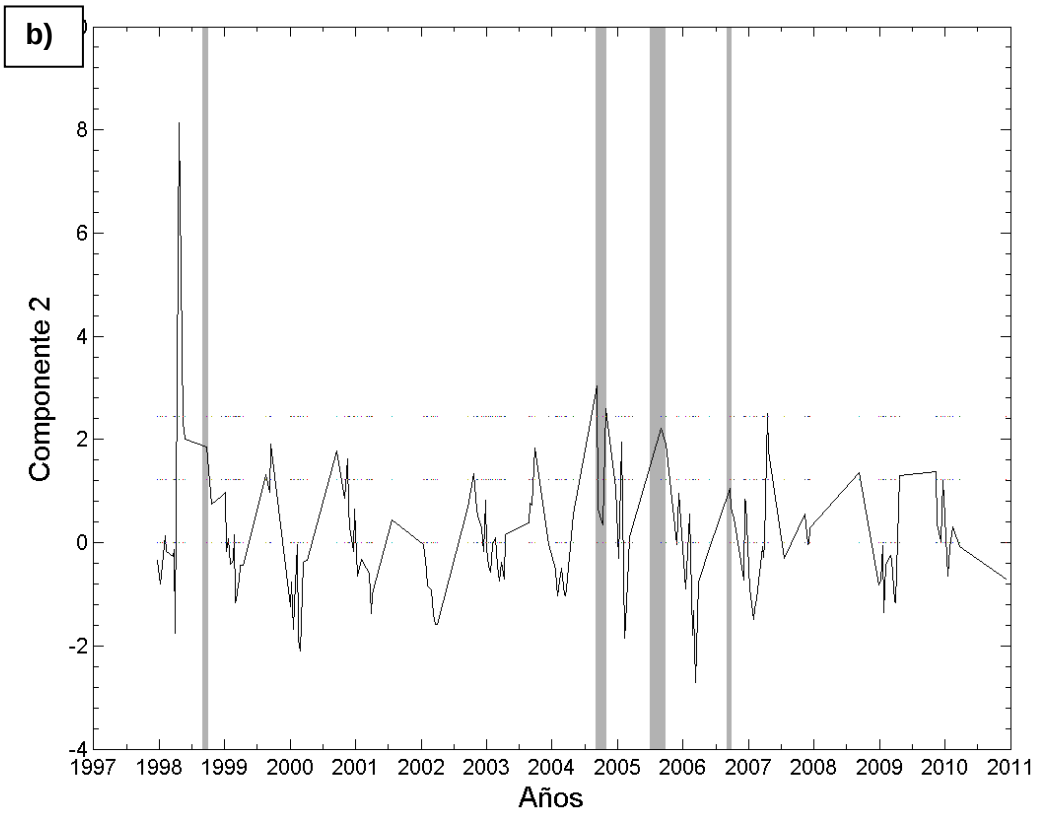


Figura 25 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta

- Islas del Rosario

Las tres primeras componentes del ACP recogen el 83,21 % de la varianza.

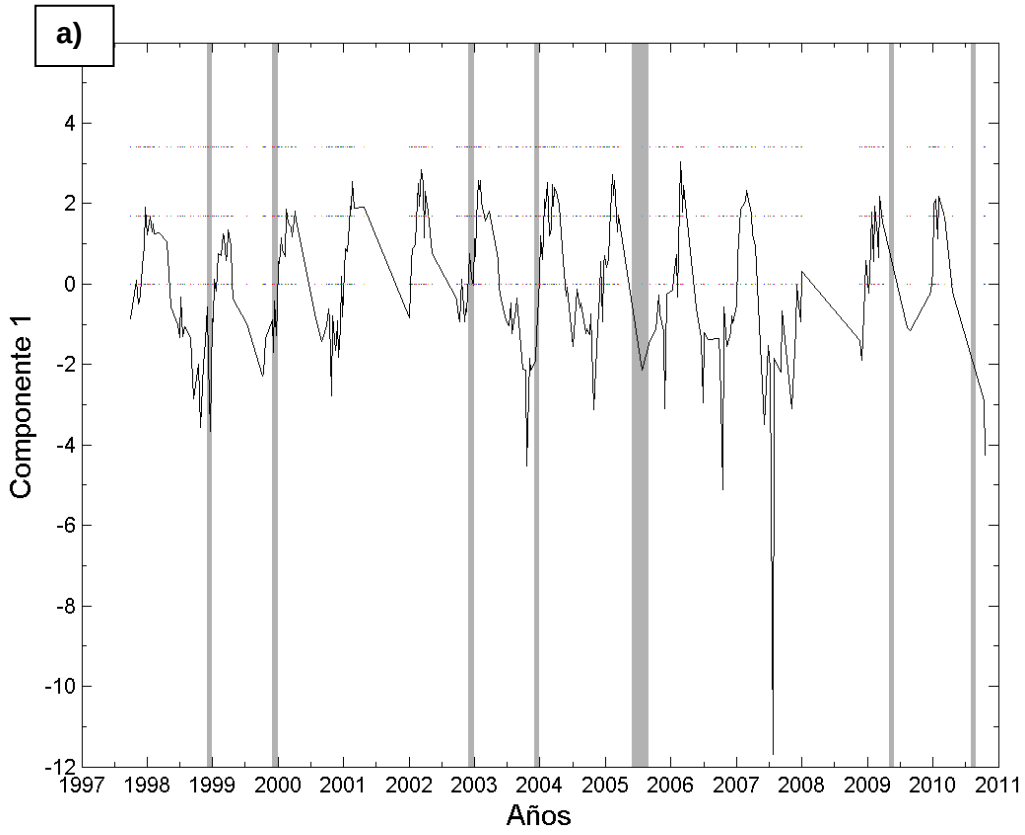
Tabla 11 Resumen de información del ACPpara Islas del Rosario

C	Valor propio	% Total varianza	% Acu.
1	2,9	48,2	48,2
2	1,3	21,9	70,2
3	0,8	13,0	83,2

Tabla 12 Coeficientes factoriales de las variablespara Islas del Rosario

	C 1	C 2	C 3
Caudal	-0,61	-0,03	0,66
Nubes	-0,57	-0,45	0,35
Temperatura	-0,67	-0,45	-0,30
Vientos	0,72	0,47	0,34
Clorofila	-0,82	0,55	-0,08
Turbidez	-0,76	0,62	-0,13

De la Tabla 12 se identifica que la componente uno está correlacionada negativamente con clorofila y la turbidez y la componente tres con el caudal.



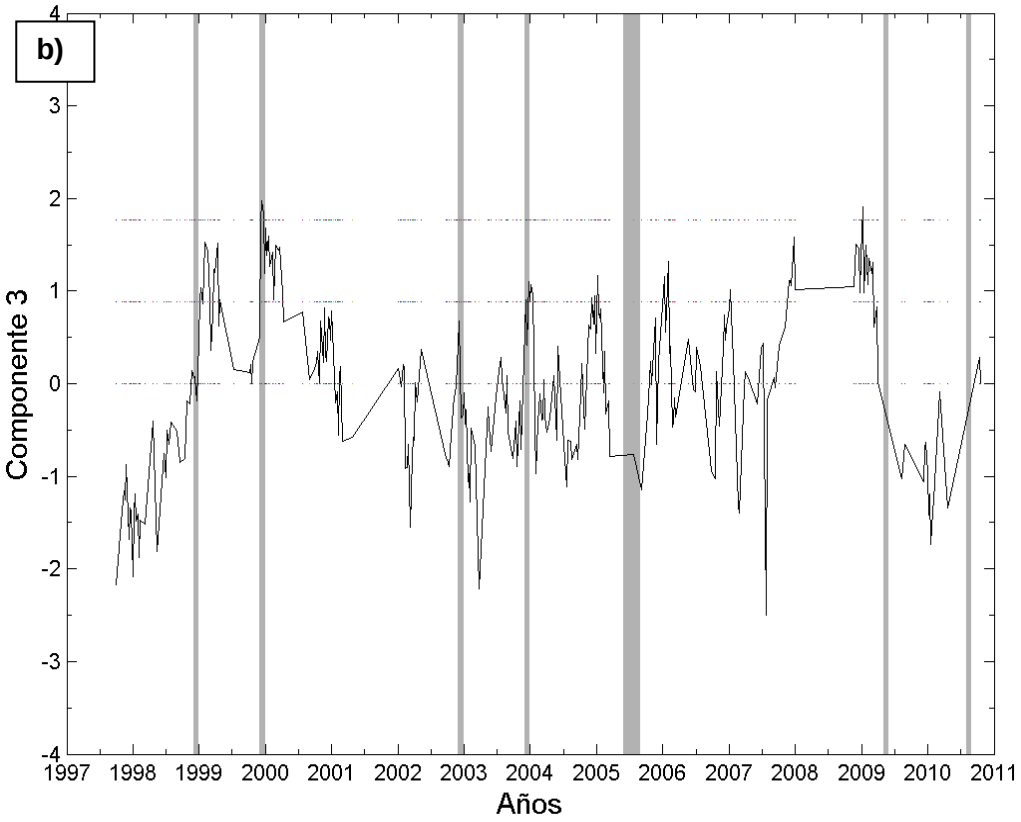


Figura 26 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta

Con los datos de la Figura 26 (a y b), se aprecia en IR los blanqueamientos de los años 1998, 1999, 2003, 2005 y 2010 han coincidido con picos bajos de la componente 1, es decir que la clorofila y la turbidez tuvieron valores muy altos durante las fechas de esos eventos. Mientras que los blanqueamientos de 1998, 1999 y 2003, estuvieron a valores altos de la componente 3 que se asoció positivamente con el caudal.

- Islas de San Bernardo

Para esta área el 86, 52 % de la varianza se explica con las tres primeras componentes (Tabla 13)

Tabla 13 Resumen de información del ACPpara Islas de San Bernardo

C	Valor propio	% Total varianza	% Acu.
1	3,2	54,1	54,1
2	1,2	19,5	73,6
3	0,8	12,9	86,5

Tabla 14 Coeficientes factoriales de las variablespara Islas de San Bernardo

	C 1	C 2	C 3
Caudal	-0,81	0,28	0,11
Nubes	-0,58	0,30	-0,73
Temperatura	-0,65	0,44	0,48
Vientos	0,84	-0,27	0,02
Clorofila	-0,76	-0,60	0,06
Turbidez	-0,74	-0,62	-0,01

Con los factores de la Tabla 14 se identifica que la componente está positivamente correlacionada con los vientos y negativamente correlacionada con el caudal, la clorofila y la turbidez. Por su parte la componente tres está relacionada con la nubosidad de forma negativa.

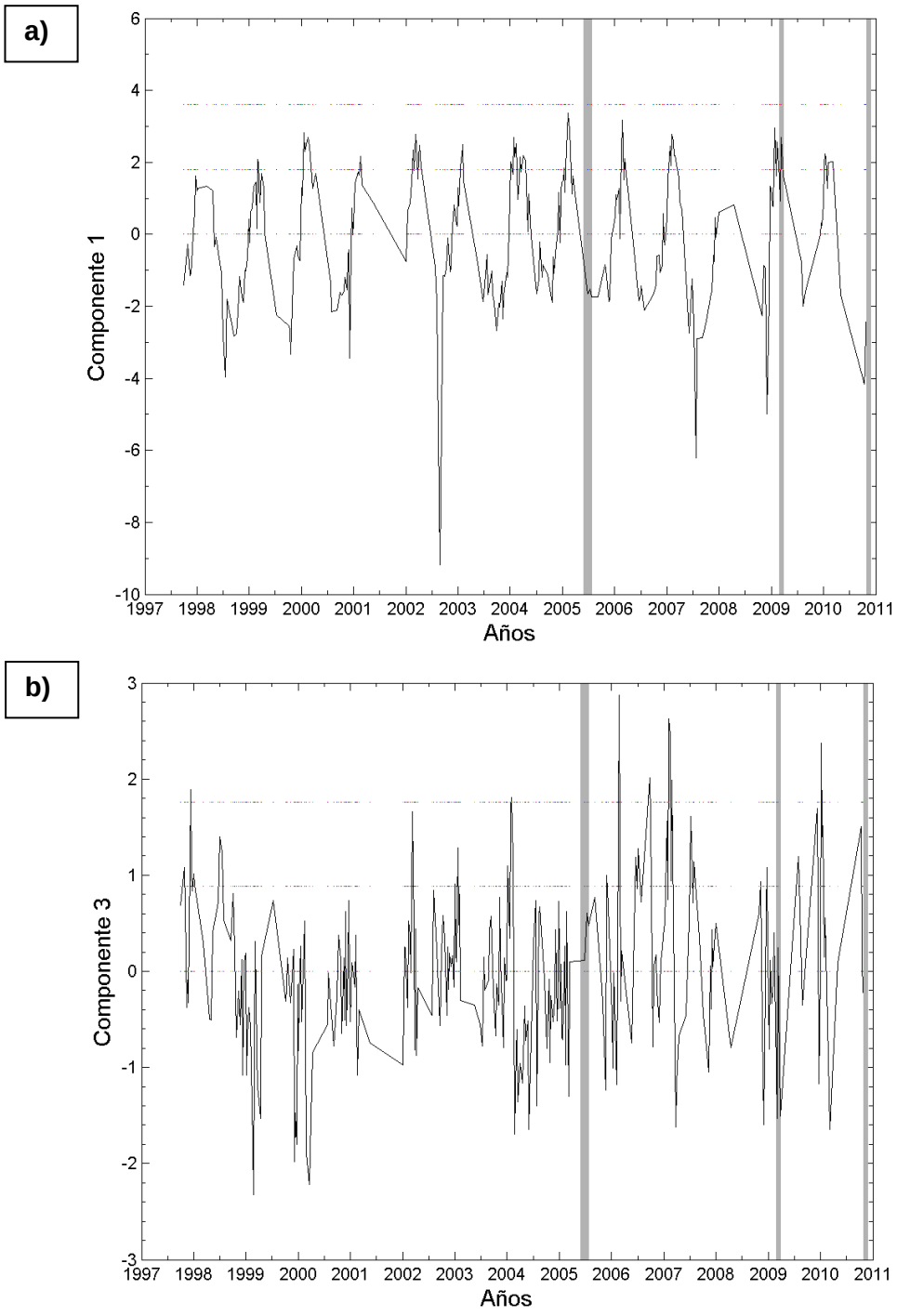


Figura 27 Factores de la primera (a) y segunda (b) componentes del ACP. Las barras grises indican los meses en que hubo blanqueamiento de intensidad media o alta

Con los datos de la Figura 27 (a y b) se observa que los blanqueamientos del 2005 y 2010 estuvieron asociados a valores altos de caudal, clorofila y turbidez. Mientras que del 2009 tuvo valores muy bajos de las mismas. En la componente 3 se identifica relación positiva con los blanqueamientos del 2005 y 2010, es decir valores muy bajos de nubosidad.

4.4 Síntesis

Los resultados sintetizados hallados tanto en la descripción cualitativa como en el ACP, se presentan en la Tabla 15para las áreas costeras y la Tabla 16 para el área insular. Estas tablas muestran los años en los que ocurrieron blanqueamientos de intensidad media o alta, las variables asociadas según cada análisis y las variables síntesis de los dos métodos. Cuando se encuentran las variables caudal, clorofila y turbidez juntas se agrupan en el término aguas turbias, ya que las tres tuvieron alta correlación en las áreas costeras (Tabla 5).

Tabla 15 Tabla síntesis de las variables que presentaron comportamientos anómalos durante las fechas cercanas a blanqueamientosde intensidad media o alta en las áreas costeras

Área	Año	Int.	Descriptivo	ACP	
SM	1998	3	T, Cau	T, Vie, Chl, Tur	Alta TSM, aguas turbias, bajos vientos
	1999	3	T, Chl , Tur, Cau	T, Vie, Chl, Tur	
	2003	2	Chl, Tur	T, Vie, Chl, Tur	
	2005	2	T, Chl, Tur, Cau, Nub	T, Vie	
	2008	2	Chl, Cau	T, Vie, Chl, Tur	
	2010	3	T, Cau		
IR	1998	2	Chl, Tur	Chl, Tur	Aguas turbias, alta TSM
	1999	2	Cau, Nub	Chl, Tur	
	2002	2	T, Vie	Cau	
	2003	3	T, Chl, Tur, Nub	Chl, Tur	
	2005	3	T, Chl	Chl, Tur	
	2010	3	T, Cau, Nub	Chl, Tur	
SB	2005	3	T, Chl, Tur	Cau, Chl, Tur, Nub	Alta TSM, aguas turbias
	2009	2	T, Cau	Cau, Chl, Tur, Nub	
	2010	2	T, Chl, Tur, Cau, Nub		

Tabla 16 Tabla síntesis de las variables que presentaron comportamientos anómalos durante las fechas cercanas a blanqueamientos de intensidad media o alta en el área insular

Área	Año	Int.	Descriptivo	ACP	
SAI	1998	2	T	T	Alta TSM
	2004	2	T, Tur	T	
	2005	3	T	T	
	2006	2	T		

Esta síntesis de resultados muestra claramente que los blanqueamientos en las áreas costeras han estado asociados a temperaturas altas pero también a valores altos de clorofila, turbidez y caudal. En algunas ocasiones la nubosidad también ha hecho parte de esta asociación de variables, sin embargo con el método de ACP ésta no ha sido relevante, por lo que no se tuvo en cuenta en las variables síntesis. Es de observar en SM, los blanqueamientos de intensidad media (2), no estuvieron asociados a temperaturas altas, con excepción del blanqueamiento del 2005. Esto mismo se aprecia en IR con excepción del 2002. En SB todos lo blanqueamientos independientemente de su intensidad estuvieron asociados a temperaturas altas. Las diferencias en la intensidad del blanqueamiento son explicadas con el tiempo que duraron expuestos los corales a valores anómalos de las variables (Figura 28). Se identifica que la intensidad del blanqueamiento en los corales del Caribe colombiano depende del tiempo de duración de la anomalía en las condiciones ambientales. En las áreas costeras, cuando solo la temperatura está alta o sólo el caudal es alto los blanqueamientos han tenido intensidad media, pero cuando ambas variables han permanecido por más de dos meses (aprox.) altas se desencadena un blanqueamiento que puede llegar a tener una intensidad alta, es decir que cubre gran parte del porcentaje de coral vivo. También se identifican situaciones en las que ambas variables están altas pero su permanencia no es mayor de dos meses y los blanqueamientos asociados han sido de intensidad media.

Por su parte para el sitio insular la única variable asociada fue la temperatura, aunque en el 2004 si se presentó un evento de turbidez extrema, esta variable no fue relevante en el

ACP. En esta área la temperatura alta ha generado blanqueamientos de intensidad 3 cuando dura por más de tres meses alta.

Santa Marta

Variables	Tiempo	Intensidad
Temperatura	> 3 meses	3
Caudal	> 2 meses	
Temperatura	1-2 meses	2
Caudal	2 semanas	
Nubosidad	2 semanas	

Islas del Rosario

Variables	Tiempo	Intensidad
Temperatura	>2 meses	3
Caudal /Chl	> 2 meses	
Temperatura	1 mes	2
Caudal /Chl	2 meses	

Islas de San Bernardo

Variables	Tiempo	Intensidad
Temp_extrema	2 semanas	3
Chl/Turbidez	> 1 meses	
Caudal /Chl	2 meses	2

Isla de San Andrés

Variables	Tiempo	Intensidad
Temperatura	> 3 meses	3
Temperatura	2-4 semanas	2

Figura 28 Tiempo de duración de las variables ambientales altas y extremas que generan blanqueamientos de intensidad media o alta

4.5 Medidas de gestión en arrecifes coralinos con blanqueamiento

En los ecosistemas arrecifales, la interacción de algunos eventos naturales con factores antrópicos aceleran e intensifican su degradación. En este sentido, se realizó una lectura de los Planes de Manejo Ambiental de los parques naturales ubicados en las áreas de estudio, se identificaron problemas sobre los cuales se proponen unas recomendaciones, teniendo en cuenta los objetivos de la investigación. Los problemas identificados fueron:

- El Plan de Manejo Ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (2006) –PNNCRSB-, hace referencia al Plan de Ordenamiento Territorial de Cartagena, que señala que las islas del Rosario están clasificadas como Zona Turística.Allí el 80% del áreaestá destinada para este uso y el resto para un aprovechamiento residencial, agropecuario y comercial; existe también posesión ilegal de terrenos y construcción de islotes artificiales. En la isla, las unidades ecológicas del paisaje como los corales, las praderas de pastos marinos y los fondos sedimentarios tienen como usos permitidos la pesca artesanal, la recreación, el transporte y la conservación. Estas actividades generan impactos como la alta carga de sedimentos, aportes de agua dulce, sobreexplotación, alteración de procesos naturales de regeneración, vertimiento de aguas contaminadas, ruido, vibraciones y disminución de la resiliencia arrecifal por bajos niveles deherbivoría debido a la pesca. Además, estos corales son de escasa profundidad, lo que los vuelve más vulnerables a las actividades antrópicas. A pesar de la existencia del PNNCRSB, esta área recibe presiones constantemente, debido entre varias razones, a la falta de financiamiento y compromiso de la Nación y a que la inversión es principalmente gastada en el turismo, más que en proyectos compatibles con los ecosistemas como el ecoturismo, la conservación y mucho menos en restauración de ecosistemas.

- Aunque las condiciones de las Islas del Rosario y San Bernardo permitieron que se consolidara allí una gran estructura arrecifal, las descargas de agua de los

ríos, junto con los aportes de los sedimentos producto de la erosión y de los caños y desembocaduras, que habían sido creados para disminuir la carga de sedimentos que llegaban a la bahía de Cartagena, probablemente están determinando la exclusión de áreas aptas para estas estructuras. Además el mal manejo económico y la mala planeación han llevado a que la población costera aumente las descargas de sedimentos al aumentar la deforestación.

- En Santa Marta las presiones son en su mayoría de tipo indirectas y se presentan especialmente en las áreas amortiguadoras creadas por el PNNT, estas presiones se han identificado a través del PMA del PNNT (2006): las políticas que permiten el incremento y desplazamiento de la población que demanda mayor cantidad de recursos naturales, introducen de especies exóticas, ampliación y construcción de infraestructura, así mismo la falta de sensibilización de los turistas, la sobreexplotación de fauna y flora y la contaminación por residuos sólidos.

- En la isla de San Andrés la cobertura coralina ha disminuido, tal vez por el aumento de nutrientes y de la turbidez. Hace unos años, como medida de control, se construyó el emisario submarino que está ubicado en la parte noroccidental de la isla. Sin embargo, éste es de corta extensión, lo cual hace que los desechos se devuelvan a la isla por la acción de los vientos. Por lo tanto, aunque el emisario fue un paso importante para evitar la degradación de las condiciones ambientales de los corales, no es una solución óptima.

Hay programas ya existentes de estaciones y metodologías de monitoreo que pueden ser adoptados, por ejemplo de las instituciones mundiales como el AGRRA - Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment. Las características de un programa de monitoreo y recuperación de los impactos de blanqueamiento se muestran en el capítulo de recomendaciones.

5. Discusión

Algunas investigaciones han sugerido que después de períodos de altas temperaturas, baja velocidad del viento, altas precipitaciones o cielos despejados se produce blanqueamiento coralino, debido a que estas condiciones favorecen la penetración de la radiación solar y el calentamiento superficial del agua (Williams y Bunkley, 1990; West y Salm, 2003). En el Caribe Colombiano la variabilidad anormal de la temperatura, el caudal y la turbidez y en menor medida de los vientos y nubosidad han incidido en el blanqueamiento de los corales y en la diferencia espacial con que se produce. En el área insular la temperatura juega el papel principal durante este evento, mientras que en los sitios costeros son la temperatura y el caudal conjuntamente.

La diferencia espacio- temporal del blanqueamiento está asociada con la climatología de la región Caribe colombiana y está relacionada a la segunda época del año en la cual se presentan temperaturas y caudales más altos del ciclo anual. La variabilidad espacio – temporal identificada en este trabajo coincide con la climatología de la región descrita en Andrade y Barton, 2005, Bernal *et al.,*2006 y Ruiz-Ochoa, 2011. La temperatura es baja de diciembre a abril y es alta de mayo a noviembre, con una disminución intermedia entre junio y agosto llamada “veranillo de San Juan”, más fuerte en Santa Marta. En el área insular la temperatura tiene valores medios debido a la influencia de la corriente del Caribe que afecta a las regiones oceánicas por encima de los 12° norte. Al noreste de la zona costera la temperatura tiene valores bajos, Santa Marta está ubicada al sur de los 12° del norte y está influenciada por la surgencia de la Guajira, que con la fuerza de los vientos alisios trae la entrada de aguas subsuperficiales de profundidades entre los 100 y 200 m de bajas temperaturas (Andrade y Barton, 2005). Como se aprecia en los resultados la TSM tiene una correlación negativa con los vientos, más fuerte en SM que en las demás áreas. Por su parte al sureste de la costa de la cuenca Colombia las temperaturas son más altas de septiembre a noviembre y pueden ser explicadas por las descargas de ríos que se incrementan en la segunda época del año (Ruiz-Ochoa, 2011).

El estudio de Devlin, *et al*., (2012), pone de manifiesto el impacto de la entrada de agua dulce terrestre en los ecosistemas marinos, especialmente del efecto de las estaciones húmedas en la salud de los corales. En la cuenca Colombia se observa que el cambio de aporte de agua dulce coincide con el cambio de la turbidez, en IR y SB la mayor turbidez es durante los meses de SON, coincidiendo con la descarga de agua dulce de los ríos y es mínima entre marzo y agosto. Devlin *et al.* sugieren que la exposición por largo tiempo de los arrecifes de coral a altos niveles de sedimentación, nutrientes y turbidez podría afectar a las especies conduciendo a cambios de mediano y largo plazo en la densidad de corales juveniles y en la composición de la comunidad. La surgencia de la Guajira también influye en la alta salinidad debido al transporte masivo de Agua Subsuperficial Subtropical con salinidades cercanas a los 36 – 37,2 partes por mil. Por su parte, las Islas del Rosario y de San Bernardo están ubicadas en la zona de influencia del giro Panamá – Colombia, allí se identifica la masa de Agua Superficial de la Contracorriente Panamá - Colombia (ASCCPC); esta zona tiene alta influencia de la entrada de agua dulce con salinidades entre los 34 y 35,5.

La clorofila también tiene marcadas diferencias entre el área insular y continental. El agua de SAI es oligotrófica característica de las aguas del Caribe mientras que las aguas de los sitios costeros clasifican como aguas eutróficas. La clorofila en SM, durante los fuertes vientos de principio y mitad de año, no muestra el comportamiento generalmente encontrado en sitios de surgencia, resultados similares a los aquí encontrados, muestran que los máximos en la comunidad planctónica no siempre ocurren durante las épocas de surgencia activa (Franco-Herrera, 2001), probablemente por las bajas concentraciones de nutrientes que caracterizan el agua que surge en el Caribe y determinan las bajas concentraciones de clorofila-a (Paramo, *et al.,* 2011). También Andrade *et al.* (2003) sugieren que las aguas subsuperficiales que abastecen el sistema de surgencia en la Guajira pueden estar influenciadas por una rama costera proveniente del Giro de Panamá-Colombia, que fluye a 100 m de profundidad por debajo de la zona de surgencia, cuyo origen superficial y reciente determina la baja cantidad de nutrientes característica del agua que emerge en este sistema.

Blanqueamientos

La época donde se han identificado más eventos de blanqueamiento coincide con la época de incremento de agua dulce e incremento de la TSM, los caudales altos o extremos puedenproducircambios en el ambiente que generan diferencias en la respuesta de un organismo a la intensidad diferencial del blanqueamiento (McClanahan, *et al*., 2007a).El riesgo de sufrir un blanqueamiento por estrés térmico se presenta especialmente en IR y SB donde la temperatura promedio está cercana a la temperatura umbral del blanqueamiento en los corales (29 °C). Además SB presenta durante la época seca baja salinidad y durante la época húmeda altas temperaturas; estas condiciones pueden dejar a los corales más susceptibles a sufrir de blanqueamiento. En esta área está sucediendo lo mencionado por (Coles y Brown 2003), en la cual una elevada temperatura que interactúa con otros factores fisicoquímicos, biológicos y antrópicos es generalmente la principal causante de estrés coralino.

Teniendo en cuenta la temperatura promedio de SM, se puede considerar ésta como la región de menor probabilidad de sufrir blanqueamiento por estrés térmico, sugerido también en Bayraktarov, *et al.,* (2012) aunque tampoco se dieron temperaturas cercanas a los 18 °C como para producir blanqueamiento (Hoegh-Guldberg *et al.,* 2005 y Hernández *et al.,* 2010). Por su parte SAI tiene valores medios de temperatura y todos los blanqueamientos identificados (1998, 2004, 2005 y 2006) tuvieron valores altos y extremos desde cuatro meses atrás de registrarse el evento y hasta una semana antes, esto sumado al comportamiento que han tenido las variables previo al blanqueamiento, pueden sugerir que en SAI la calidad del agua puede garantizar la presencia de los complejos coralinos, pero la principal amenaza es el aumento acelerado de la temperatura superficial del mar, que se traduce en impactos de cambio climático.

Los sitios que presentaron una mayor varianza de la temperatura, fueron SM, IR y SB, en estos tres sitios no es evidente una pérdida considerable de cobertura de coral teniendo en cuenta los datos del INVEMAR (2011)(Figura 29), pero en SAI si se aprecia que la cobertura de corales tiene una tendencia a disminuir, aunque esta tendencia es baja vale la pena hacer un análisis más detallado del impacto de los eventos de blanqueamiento en la mortalidad coralina por ejemplo, se podría prever alguna aclimatación o adaptación

potencial y resistencia a escenarios de cambio climático (McClanahan *et al*. 2007 b). El estudio de la aclimatación de los corales ha mostrado que ellos pueden recuperarse fácilmente después de un blanqueamiento solar debido a que la primera época del año se caracteriza por ser de baja temperatura, si la cobertura de nubes es baja la parte más expuesta del coral experimenta altos niveles de luz, se causa un blanqueamiento solar localizado del cual el coral se recupera prontamente. En las últimas décadas, la temperatura del agua está excediendo el umbral de resistencia térmica, por lo que se genera un blanqueamiento térmico, aparte del blanqueamiento solar al que venían aclimatados (Brown, 1997).

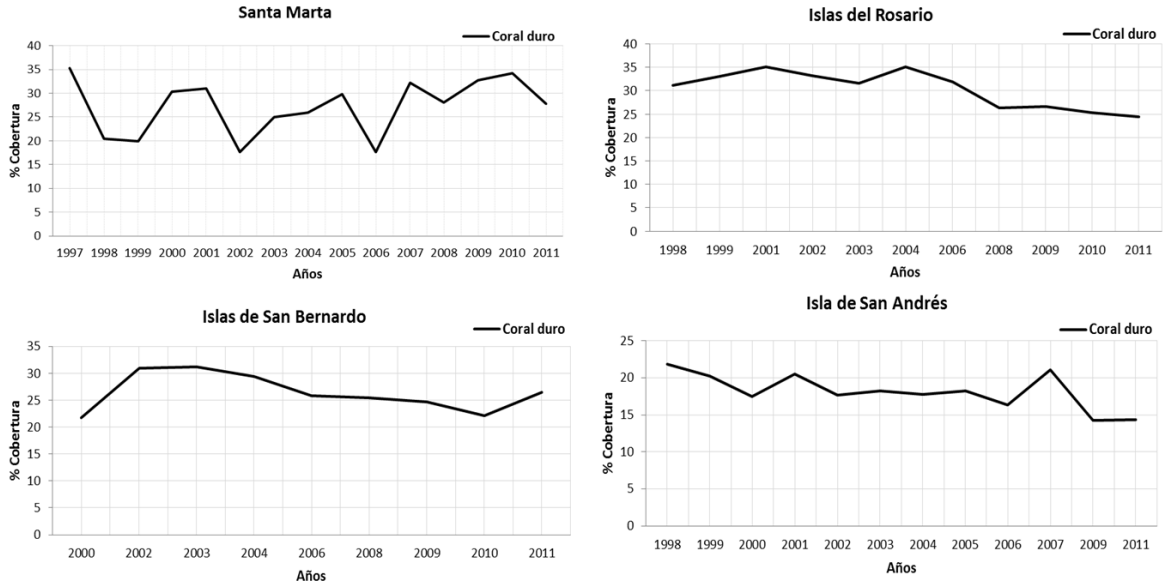


Figura 29 Porcentaje de cobertura de coral. En estaciones someras de cada localidad. Elaboración propia con datos del INVEMAR – 2011

En SM, el comportamiento de las variables durante el blanqueamiento de 2005, fue diferente de SB e IR, SM tuvo valores altos o extremos de temperatura pero en esta zona presentó una concentración alta de clorofila que pudo estar afectada por la alta concentración de sedimentos típicamente observada en las aguas costeras de la zona, causada por el aporte de sedimentos de ríos (Paramo, *et al*., 2011).A pesar de que los eventos de blanqueamiento dieron de menor intensidad cuando la turbidez alta duró menos tiempo, hay que tener en cuenta que la turbidez puede proteger a los corales de

la fuerte radiación y subsecuente blanqueamiento, comparado con ambientes de baja turbidez (McClanahan, *et al*., 2007 b).

La variable nubosidad no tuvo extremos positivos durante la mayoría de blanqueamientos, por lo cual, como es indicado en Mumby, *et al*., (2001) para que sea más evidente el impacto es mejor usar la variable de radiación solar la reducción de estrés de los corales a la radiación solar, se debió a la alta cobertura de nubes, ellos tuvieron en cuenta las variables de la TSM, la velocidad del viento y la nubosidad, sin embargo la última variable fue analizada con una resolución horaria. Los resultados muestran que tal como lo sugiere Turner, *et al.,* (2000); diferentes autores han atribuido el bajo blanqueamiento en una región a las nubes y tormentas (traducidas en fuertes vientos). Los factores como el número de días de cobertura de nubes y la magnitud y dirección de los vientos afectan a cómo el calor del agua es disipado o se acumula hasta niveles letales.

Por otro lado, en los resultados se identificaron tres escalas de extensión del blanqueamiento escala de la cuenca, continental y local. Si se contrastan las fechas en las que ocurrieron los blanqueamientos con el Índice Oceánico de El Niño (ONI por sus iniciales en inglés) se aprecia que los blanqueamientos en las áreas costeras, estuvieron asociados a la época del fenómeno La Niña, la cual tiene factores como el incremento de la precipitación y la disminución de la temperatura que modifican las condiciones típicas de los corales. No hubo blanqueamientos que hayan ocurrido durante el fenómeno El Niño, sin embargo es clave observar que la costa colombiana tiene un rezago de seis meses en la respuesta de la temperatura superficial del mar respecto al Pacifico (Bernal *et al.,* 2006) y por tanto el ONI pueden se representativo para la época del blanqueamiento, es decir la segunda mitad del año.

Los huracanes y los eventos macroclimáticos generan efectos combinados de las variables ambientales que dejan a los corales aún más deterioradosy susceptibles, por ejemplo, el blanqueamiento de octubre de 1999 en SM no estuvo relacionado con el huracán Lenny que afectó el área en noviembre de ese año, sin embargo el coletazo del huracán disminuyó la cobertura coralina de bahía Chengue de 34 a 31%, como

consecuencia principalmente de los daños físicos (fragmentación, rayones y volcamiento de colonias). En las estaciones de monitoreo del SIMAC, también quedó el registro de una pérdida de la cobertura coralina viva cercana al 4 %, especialmente de *Acropora palmata*(Garzón - Ferreira *et al.*, 2002; Rodríguez – Ramírezy Garzón – Ferreira, 2003). Estos mismos efectos se apreciaron con el blanqueamiento del 2005 en el archipiélago de San Andrés y Providencia, dejan un 10% de la cobertura coralina deteriorada.

Los resultados obtenidos en esta investigación son útiles en la creación de un modelo para identificar sitios de susceptibilidad de los corales a blanqueamiento con datos de temperatura, vientos, entre otros como los que se encuentran en Maina *et al*., (2008), ya que se armó una serie de tiempo de los eventos de blanqueamiento coralino en cuatro sitios de estudio del Caribe colombiano.Sin embargo es necesario tener en cuenta que la extrapolación de los datos de blanqueamiento debe ser cuidadosa, ya que los monitoreos de SIMAC son anuales, y no siempre coindicen con el momento en que ocurrió el blanqueamiento. El blanqueamiento puede ocurrir más o menos súbitamente por condiciones extremas, pero luego se prolonga por un tiempo, ocurriendo mortalidad y recuperación. Por lo tanto, los valores de porcentaje de colonias blanqueadas obtenidos de SIMAC son indicativos de que hubo blanqueamiento en algún momento antes o durante el monitoreo, pero estos datos no se pueden correlacionar directamente con los valores contemporáneos de las variables ambientales, porque estas ya pudieron haber vuelto a la normalidad.

También se debe tener claro que los eventos de blanqueamiento hallados, son los que se lograron ubicar en la escala de medición de intensidad, debido a que hay otros blanqueamientos que se han reportado de forma diversa, dificultando tener series numéricas estandarizadas de esta variable. Esto muestra que en la actualidad los intentos de relacionar los eventos de blanqueamiento con causas particulares sigue siendo obstaculizado por la falta de métodos estandarizados para evaluar el blanqueamiento y lafalta de bases de datos continuos y de largo plazo de las condiciones ambientales durante los períodos de interés (Glynn, 1993).

Se aconseja que las futuras investigaciones tengan en cuenta también otras variables ambientales como la radiación solar, la nubosidad a una escala más detallada y la acidificación del agua del océano. Los datos satelitales deben ser tomados a escalas

apropiadas para los objetivos de la investigación y con escalas similares, como es sugerido en Mumby *et al*., 2004. En cuanto a la selección de las variables, puede ser útil hacer una clasificación como la que se encuentra en Maina, *et al.,* 2008 en la cual las variables están agrupadas dependiendo del efecto que tengan sobre el blanqueamiento: variables que refuerzan el blanqueamiento (SST, salinidad) y variables que balancean la susceptibilidad (velocidad del viento, nubosidad).

La tabla síntesis que se presentó en el capítulo de resultados, indica que una adecuada gestión ambiental debe atender a los siguientes planteamientos:

Poner atención a factores contaminantes, ya que aquí predominan entre las múltiples variables la clorofila y la turbidez, las cuales pueden verse como impacto ambientales de las actividades socioeconómicas que se dan en los sitios de estudio: turismo, transporte marítimo, extracción ilegal de recursos marinos, entre otros. En estas áreas influyen los aportes de los ríos Magdalena, Sinú, entre otros lo que significa que la gestión marino-costera debe tener en cuenta los problemas presentados en las cuencas hidrográficas como la contaminación y los vertimientos residuales.

En San Andrés la variable que más influyó sobre el blanqueamiento fue la temperatura, por lo cual la gestión debe continuar el mantenimiento de las reservas marinas y promover la conservación y la investigación. Debido a que la variable turbidez tuvo presencia al menos en uno de los eventos de blanqueamiento, esto puede interpretarse como un llamado a la evaluación de las concentraciones de contaminación que puedan de alguna manera venir del emisario submarino. Por otro lado, aunque no fue evidente la acción de los vientos, es necesario tener en cuenta que éstos se pueden presentar después de un evento alto de blanqueamiento y por lo tanto deteriorar aún más los corales.

En los ecosistemas arrecifales, la interacción de algunos eventos naturales con factores antrópicos aceleran e intensifican su degradación. Esto genera impactos, no solamente en las dimensiones bióticas y físicas del arrecife, sino también en las comunidades costeras que necesitan de estos recursos. Esta interacción ocurre en diferentes escalas,

tanto locales, regionales y globales. Por lo anterior, cada área de estudio requiere de una gestión que responda a sus características ambientales. Los eventos de blanqueamiento no siempre se podrán evitar, debido a que existen causas naturales que no son manejables. No obstante, sí se puede actuar sobre los factores antrópicos que generan estrés, así se asegura la mitigación de impactos que aceleran la degradación del ecosistema y lo vuelven más vulnerable a eventos como el blanqueamiento. La protección de los corales mediante áreas marinas protegidas u otras figuras no será suficiente, si los actores institucionales, sociales y económicos no son conscientes de los impactos que ellos mismos producen, y si además actúan sin articulación alguna. Para la gestión ambiental de los corales hay que manejar adecuadamente los recursos naturales, regular y controlar los desechos que son transportados a través del agua, tener en cuenta las variables oceanográficas (vientos y corrientes) al momento de diseñar plantas de tratamiento y emisarios submarinos para la disposición de residuos, montar sistemas de alarma, programas de monitoreo y normas reguladoras. A pesar de la información existente acerca del deterioro de los arrecifes de coral y del interés mundial por la conservación de estos ecosistemas, en Colombia aún hacen falta recursos y estudios que lleven a su protección y conservación.

6. Conclusiones

Las conclusiones de la investigación se presentan en los siguientes párrafos:

- Durante la manifestación masiva del blanqueamiento la clorofila, la turbidez, la temperatura y el caudal presentaron valores altos o extremospor fuera del umbral de resiliencia. Asimismo, la interrelación de estas variables de acuerdo con las características locales de cada una de las áreas de estudio, ha determinado las diferentes respuestas de los blanqueamientos del Caribe colombiano.

- Las condiciones ambientales más adversas para un buen estado coralino fueron encontradas enlas Islas de San Bernardo, allí se presentaron altas temperaturas, alta entrada de agua dulce, clorofila y turbidez extremas, lo cual se asoció a un notable incremento de blanqueamiento desde el 2005 hasta la actualidad. Con la evaluación del comportamiento de las variables ambientales, es de suponer que éste no ha permitido que los corales se recuperen después de cada evento de blanqueamiento. En Islas del Rosario, a pesar de su cercanía con las Islas de San Bernardo, no se presentaron las mismas condiciones ambientales. Aquí el caudal y la temperatura juegan un papel más relevante en la salud coralina, aunque también se presentaron eventos altos de clorofila y turbidez que afectaron el ecosistema.

- La ubicación geográfica del PNNT hace que su exposición al blanqueamiento sea menor. Durante la época seca, en la que ocurre la surgencia de la Guajira, aumentan la salinidad, disminuye la temperatura y la clorofila le otorga propiedades relativamente oligotróficas al agua, lo que en contraste con las áreas anteriores, propicia condiciones más favorables. En San Andrés, por su parte, la temperatura es la variable que predominó durante los eventos de blanqueamiento.

- Entre 1997 y 2010, en Santa Marta, se identificaron seis eventos de blanqueamiento: tres de intensidad media y tres de intensidad alta, el evento del 2010 ha sido el más fuerte que se ha presentado en esa zona. En la isla de San Andrés se identificaron tres eventos de blanqueamiento de intensidad media,y ia y uno de intensidad alta. En Islas del Rosario, se identificaron seis eventos tres de intensidad media y tres de intensidad alta, el evento del 2010 fue masivo. En islas de San Bernardo se identificaron dos blanqueamientos de intensidad media y uno de intensidad alta. Se debe destacar que durante los últimos cuatro años, los corales de San Bernardo han tenido el mayor porcentaje de blanqueamiento y con una tendencia a aumentar.

- La combinación de las diferentes fuentes de información permitió construir una serie histórica de blanqueamientos, a pesar de la falta de monitoreos rigurosos y continuos.

- Durante la época húmeda mayor del año, se presentan los valores más altos de temperatura, caudal, turbidez y clorofila y los más bajos de salinidad, lo cual disminuye las condiciones óptimas para que los corales estén sanos y fue durante esta época del año que se registraron la mayoría de los eventos de blanqueamiento.

- Se observó que los eventos a escala de la cuenca han tenido comportamientos altos o extremos en la mayoría de las variables, pero se relacionan especialmente con el aumento de TSM, los que han sido a escala continental han tenido la temperatura y el caudal como principales actores y los de escala local la temperatura y en algunos casos la turbidez, sin identificarse dominancia.

- En los corales de San Andrés existen presiones como los eventos extremos naturales especialmente los huracanes que deterioran la salud coralina y los dejan expuestos a blanqueamientos. Asimismo las presiones de origen antrópico que disminuyen la calidad del agua son un problema para los corales de la isla.

- Se puede considerar que la surgencia que se presenta en la Guajira durante los primeros meses del año es un factor que brinda resistencia al blanqueamiento,

porque los corales en la época seca tienen temperaturas bajas, alta salinidad y baja concentración de clorofila.

7. Recomendaciones

La sugerencia para una mejor gestión de los arrecifes coralinos susceptibles a blanqueamientose presenta como una serie de recomendaciones para un adecuado programa de monitoreode los impactos del blanqueamiento en los corales. Las recomendaciones están basadas en las dificultades tenidas en esta investigación en el momento de obtener datos para la comparación de los blanqueamientos con las variables ambientales. Por lo anterior, a pesar de que algunas de las siguientes recomendaciones pueden ser conocidas por los programas de monitoreo, la falta de información adecuada evidencia que no se están cumpliendo y que por lo tanto, es necesario recalcar sobre la utilidad de llevar a cabo un programa de monitoreo bien hecho con las siguientes características:

- Un diseño de actividades de acuerdo con la capacidad financiera y humana disponible.

- Los datos recolectados deben estar organizados y medidos, de tal forma que se les pueda hacer análisis estadísticos y almacenamiento en bases de datos accesibles que permitan hacer comparaciones con el tiempo.

- La detección de cambios significativos en la cobertura y composición coralina y en otros ecosistemas que sirven de transición y disminuyen la presión a los arrecifes de coral como los pastos marinos, el talud de arenas y las lagunas.

- Los monitoreos deben estar planeados a largo plazo, para así obtener series de datos que permitan caracterizar estos ecosistemas y hacer un seguimiento de las condiciones ambientales del arrecife, lo cual aporta mayor cantidad de elementos para proponer recomendaciones de manejo.

- Los monitoreos deben incluir las condiciones iniciales del ecosistema y controlar los parámetros físicos y biológicos antes y después de un blanqueamiento.

- Incrementarlos monitoreos en el año, ya que la información anual es poco relevante para identificar qué variables aumentan la incidencia del blanqueamiento.Los monitoreos deben ser por lo menos desde cuatro meses antes de la época húmeda, para verificar el comportamiento de las variables ambientales; por lo menos dos meses durante la época húmeda para evaluar si aumenta su intensidad; y otros dos meses después para observar el tipo de recuperación, es decir deben ser por lo menos trimestrales.

- Deben incluir a la comunidad local en los monitoreos, capacitarla y dotarla con equipos de vigilancia de las variables ambientales.

- Los estudios de recuperación como la siembra de corales, la restauración ecológica, la rehabilitación artificial y las guarderías de coral se deben basar en la ecología de las especies. También debe haber una adecuada planeación, en la que se defina hasta qué punto crecerán los corales, cuántos se van a usar, qué zonas se pueden repoblar y cuál será la estructura ideal para los nuevos arrecifes.

- En las zonas costeras, también se pueden identificar especies de corales con unatolerancia mayor a cambios extremos en la calidad del agua, aunque si las condiciones son de contaminación y dominio de algas, resultará difícil la restauración ecológica. Solo en aquellos arrecifes más distantes de la costa, lejos de la escorrentía y la sedimentación podría resultar más efectivo.

Por otro lado, también se recalcan las siguientes recomendaciones a nivel general de la investigación. En este estudio no se llevó a cabo la evaluación de algunas variables que pueden ser útiles y efectivas a la hora de analizar el blanqueamiento, por lo cual se recomienda tener en cuenta para futuras investigaciones:

- DHW (degree heating week), los datos se obtienen de la NOAA/NESDIS.
- Especies de corales: determinan en gran medida el tipo de respuesta ante el blanqueamiento, para reforzar la hipótesis de que los episodios de blanqueamiento y la asociación con cambios de la estructura de la comunidad da alguna resistencia a anomalías positivas del agua (Coles y Brown, 2003).

8. Bibliografía

Álvarez - Vargas, D. yPoveda, G. (2006). Análisis de frecuencia de los caudales máximos diarios en ríos de Colombia considerando las fases del fenómeno ENOS. En: XVII Seminario Nacional Hidráulica e Hidrología: Conocimiento e ingeniería para la conservación y aprovechamiento del agua, 15-16 de septiembre, Popayán, Colombia.

Andrade C., y Barton E. 2005. The Guajira upwelling system. Continental Shelf Research 25: 1003-1022.

Andrade, C. A., Barton, E. D., y Mooers, C. N. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 108(C6).

Antonius, A. (1972). Ocurrence and distribution of stony corals (Anthozoa and Hydrozoa) in the vicinity of Santa Marta, Colombia. Mitt. Inst. Colombo - Alemán Invest. Cient., 6: 89-103.

Antonov, J.; Seidov, D.; Boyer, T. P.; Locarnini, R.; Mishonov, A.; Garcia, H.; Baranova, O.; Zweng, M. y Johnson, D. (2010). World Ocean Atlas 2009 Volumen 2: Salinity. S. Levitus Ed. NOAA Atlas NESDIS 69, U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C., 184 pp.

Babcock, R. y Smith, L. (2000). Effects of sedimentation on coral settlement and survivorship. En Moosa, M.K., S. Soemodihardjo, A. Soegiarto, K. Romimohtarto, A. Nontji, Soekarno y Suharsono (ed.). Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali. Vol. 1:245-248.

Bayraktarov, E., Pizarro, V., Eidens, C., Wilke, T. y Wild. C. (2012). Upwelling mitigates coral bleaching in the Colombian Caribbean. En Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia.

Bernal, G.; Poveda, G.; Roldán, P. y C. Andrade. (2006). Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 30 (115): 195-208.

Brown, B. E. (1997). Coral bleaching: causes and consequences. Coral Reefs, 16, pp. S129 – S138.

Buddemeier, R.W., Kleypas J.A. y Aronson, R.B. (2004). Coral reefs and global climate change. Potential contributions of climate change to stress on coral reef. Pew Center on Global Climate Change. 44 pp.

Cendales, M. H., Zea, S., y Díaz, M. J. M. (2002). Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las Islas del Rosario e Isla Barú, Mar caribe, Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Bogotá), 26, 101, 497-510.

César, H., Pet-Soede, L., Westmacott, S., Mangi, S. y Aish, A. (2002). Economic Analysisof Coral Bleaching in the Indian Ocean–Phase II. En: Linden, O., Souter, D., Wilhelmsson, D. y Obura, D. (Eds), Coral degradation in the Indian Ocean: Status Report 2002. CORDIO, Department of Biology and Environmental Science, University of Kalmar, Kalmar, Sweden, 251–262.

Chasqui, V. L., Alvarado, C. E. M., y Acero, P. A. (2007). Efecto de la herbivoría y coralivoría por peces en la supervivencia de corales trasplantados en el Caribe colombiano. Revista de Biología Tropical (San José´), 55.

Coles, S. L., y Brown, B. E. (2003). Coral bleaching—capacity for acclimatization and adaptation. Advances in marine biology, 46, 183-223.

Cortés, J., Murillo, M., Guzmán, H. y Acuña J. (1984). Pérdida de zooxantelas y muerte de corales y otros organismos arrecifales en el Caribe y Pacífico de Costa Rica. Revista de biología tropical Contribución No. 69 del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad de Costa Rica.

Dessier, A., y Donguy, J. (1994). The sea surface salinity in the Tropical Atlantic between 10° S and 30° N seasonal and interannual variations (1977-1989).

Devlin, M., Wenger, A., Da Silva, E., Alvarez Romero, J. G., Waterhouse, J., y McKenzie, L. (2012). Extreme weather conditions in the Great Barrier Reef: Drivers of change?.

Díaz, J. M. (2000). Evaluación de los arrecifes coralinos y praderas de pastos marinos en el Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR Díaz, J. M., Barrios, L. M., Cendales, M. H., Garzón-Ferreira, J., Geister, J., López-Victoria M., Ospina, G.H., Parra-Valencia, F., Pinzón, J., Vargas-Ángel, B., Zapata, F.A. y Zea, S. (2000). Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR, Serie publicaciones especiales No 5. Santa Marta, 176 p.

Douglas, A. E. (2003). Coral bleaching–how and why?. Marine Pollution Bulletin, 46, 4, 385-392.

Espinosa, L.; Rueda, M.J., Restrepo; Villamil, C.; Blanco, J.; Viloria, E.; Narvaez, J.; Gómez, M.; Marin, B.; Acosta, J. y Cadavid, B. (2005). Monitoreo de las condiciones ambientales y de los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe final. Santa Marta, 83 p.

Franco-Herrera, A. (2001). Estrategias de ingestión y flujo de carbono entre el fitoplancton, seston total y Eucalanus spp. (Copepoda: Calanoidea) en dos ambientes oceanográficos del Caribe central colombiano. Informe final, Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 67 p.

García, F., Palacio, C. y García, U. (2011). Distribución vertical de temperatura y salinidad en el área costera de Santa Marta (Colombia). Dyna, año 79, N. 171, pp. 232-238. ISSN 0012-7353

García, M. y Nava, G. (2006). Técnicas de restauración y monitoreo en arrecifes Coralinos. Veracruz, Ver. México. 22 pág.

Gardner, T. A., Cote, I. M., Gill, J. A., Grant, A. y Watkinson, A. R. (2005). Hurricanes and Caribbean coral reefs: Impacts, recovery patterns, and role in long-term decline. Ecología 86: 174-184.

Garzón - Ferreira, J. y Díaz. J. M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia, p. 275-301. En J. Cortés (ed.) Latin American coral reefs. Elsevier Science B.V., Amsterdam, the Netherlands. Disponible en: http://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=LLlwoNsqxi0C&oi=fnd&pg=PA275&dq=The+Caribbean+coral+reefs+of+Colombia,&ots=41S1xhGOhF&sig=WXx8gBOydMGbFF7d33LKGcdkiDo#v=onepage&q=The%20Caribbean%20coral%20reefs%20of%20Colombia%2C&f=false

Garzón - Ferreira, J., Reyes – Nivia, M. C. y Rodríguez – Ramírez, A. (2002). Manual de métodos del SIMAC. INVEMAR. Santa Marta, Colombia.

Gil - Agudelo, D.L., Garzón - Ferreira, J., Rodríguez - Ramírez, A., Reyes - Nivia, M. C., Navas - Camacho, R., Venera - Pontón, D. E., Díaz – Pulido, G. y Sánchez, J. A. (2005). Estado de los arrecifes coralinos en Colombia. Inter. Pág: 81-83. En: INVEMAR Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros de Colombia: 2005. Serie de publicaciones periódicas del INVEMAR No 8, Santa Marta. 360 pág.

Glynn, P. W. (1993). Coral reef bleaching: ecological perspectives. Coral Reefs, 12, 1, 1-17.

Glynn, P. W. y D'Croz, L. (1990). Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Niño - coincident coral mortality. Coral Reefs, 8, 181-191.

Gómez – Giraldo, A., Osorio, A., Toro, F. M., Osorio J. D., Álvarez, O. A. y Arrieta, A. (2010). Patrón de circulación en bahía Barbacoas y su influencia sobre el transporte de sedimentos hacia las islas del Rosario. Avances en Recursos Hidráulicos; No 20. Universidad Nacional de Colombia.

Gómez, K. y López, T. (2011). Análisis de las condiciones ambientales históricas del Área Marina Protegida Corales del Rosario, San Bernardo e Isla Fuerte y sus implicaciones en el mantenimiento de los arrecifes coralinos. Informe técnico final. INVEMAR.

González - Díaz, P.; De la Guardia, E. y González - Sansón, G. (2003). Efecto de efluentes terrestres sobre las comunidades bentónicas de arrecifes coralinos de ciudad de la Habana, Cuba. Rev. Invest. Mar. 24(3):193-204.

Goreau, T. J., y Hayes, R. L. (1994). Coral Bleaching and Ocean "Hot Spots". Ambio Stockholm-, 23, 3, 176.

Grigg, R. W. y Dollar, S. J. (1990). Natural and anthropogenic disturbance on coral reefs. Review of research relevant to the conservation of shallow tropical marine ecosystems. Oceanogr. Rev. An. Biol. Mar. 27: 337–414.

Guest ,J.R; Baird, A.H.; Maynard, J.A.; Muttaqin, E. y Edwards, A.J. (2012). Contrasting Patterns of Coral Bleaching Susceptibility in 2010 Suggest an Adaptive Response to Thermal Stress. PLoS ONE 7(3): e33353. doi:10.1371/journal.pone.0033353.

Hernández, L.; Reyes - Bonilla, H. y Balart, E. (2010). Effect of coral bleaching induced by low temperature on reef-associated decapods crustaceans of the southwestern Gulf of California. Revista Mexicana de Biodiversidad 81: S113- S119.

Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research*, *50*(8), 839-866.

Hoegh-Guldberg, O.; Fine, M.; Skirving, W.; Johnstone, R.; Dove, S. y Strong, A. (2005). Coral bleaching following wintry weather. Limnology and Oceanography 50(1): 265-27.

Hughes, T. (1994). Catastrophes, phase shifts and large-scale degradation of a Caribbean coral Reef. Science. Vol. 265, No 5178, 1547-1551.

INAP (2010). Proyecto Piloto Nacional de Adaptación al Cambio Climático Global – INAP - Plan de Investigación de los Arrecifes Coralinos del AMP Corales del Rosario, San Bernardo e Isla Fuerte en el Contexto de Cambio Climático Global PARRCO - CRSBeIF 2011-2019. Vinculado al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Informe técnico Santa Marta.

INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2001. (2002). 178 pág. Serie de Publicaciones Periódicas; no. 8.

INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2003. (2003). 294 pág. Serie de publicaciones periódicas / INVEMAR.

INVEMAR. Informe del estado de los ambientes y recursos marinos y costeros en Colombia: Año 2011. (2011) Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta. 203 p.

Jackson, J. B. C. (1997). Reefs since Columbus, Coral Reefs 16: S23-S32.

Kleypas, J. A., Buddemeier, R. W. y Guttuso. J. (2001). The future of coral reefs in an age of global change. International Journal of Earth Sciences. No 90, pág: 426–437.

Kleypas, J. A., McManus, J. W., y Lambert, A. B. (1999). Environmental limits to coral reef development: where do we draw the line?.American Zoologist, 39(1), 146-159.

López – Victoria, M. y Díaz, J. (2000). Morfología y estructura de las formaciones coralinas del archipiélago de San Bernardo, Caribe colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Volumen XXIV. No. 91 pág. 220 – 230.

Maina, J., Venus, V., McClanahan, T. R., y Ateweberhan, M. (2008). Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. Ecological modelling, 212(3), 180-199.

Marín B. Z., Troncoso, W., Vivas, L. J., Gómez, M. L. (2005). Estado del Medio Ambiente Abiótico. Inter. Pág: 39-50 En: INVEMAR Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros de Colombia: 2005. Serie de publicaciones periódicas del INVEMAR No 8, Santa Marta. 360 pág.

Marshall, P. y Schuttenberg, H. (2006). A reef manager's guide to coral bleaching. IUCN.

McClanahan, T. R., Ateweberhan, M., Graham, N. A. J., Wilson, S. K., Sebastian, C., Guillaume, M. M., y Bruggemann, J. H. (2007b). Western Indian Ocean coral communities: bleaching responses and susceptibility to extinction.

McClanahan, T., Ateweberhan, M., Muhando, C., Maina, J. y Mohammed, J. (2007a). Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality. Monografías Ecológicas 77(4), pp. 503–525.

Mesa O.; Poveda, G. y Carvajal, L. (1997). Introducción al clima de Colombia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Imprenta Universidad Nacional. Santafé de Bogotá, D.C. 390 pág.

Moberg, F. y Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. Ecol. Econ. 29: 215-233.

Moreira, J. M., Carpintero, I. R., Crespo, R., Granado, L., Montoya, G., Pino, I. y Rodríguez, A. (2009). Generación de indicadores para el seguimiento de la calidad de las aguas litorales. Evolución de la turbidez en la desembocadura del río Guadalquivir. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Calatayud, Editores: Salomón Montesinos Aranda y Lara Fernández Fornos pp. 197-200.

Mumby, P. J., Chisholm, J. R. M., Edwards, AJ., Andrefouet, S y Jaubert, J. (2001). Cloudy weather may have saved Society Island reef corals during the 1998 ENSO event. Marine Ecology-Progress Series, 222. Pág. 209-216.

Navas-Camacho, R., Gil-Agudelo, D.L., Rodríguez - Ramírez, A., Reyes – Nivia, M.C. y Garzón – Ferreira, J. (2010). Coral diseases and bleaching on Colombian Caribbean coral reefs. Rev. Biol. Trop. 58 (Suppl. 1): 95-106.

Nezlin, N. P. (2008). Patterns of seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll. In The Caspian Sea Environment .pp. 143-157. Springer Berlin Heidelberg.

Nieto, S. K., y Demarcq, H. (2009). Variabilidad oceánica de mesoescala en los ecosistemas de afloramiento de Chile y Canarias: Una comparación a partir de datos satelitales.

Oliver, J., Marshall, P., Setiasih, N. y Hansen, L. (2004). A global protocol for assessment and monitoing of coral bleaching. WorldFish Center, Penang, Malasia y WWF Indonesia, Jakarta. 35 p

O'Reilly. (1998). Ocean Color Chlorophyll Algorithms for SEAWIFS. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, No. C11, pp. 24,937-24,953

Oviedo, M. E. (2011). Viabilidad de trasplantes de coral Cuerno de Alce Acropora palmata (Lamarck, 1816) en el Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia. 59 pág.

Pandolfi, J. M., Connolly, S. R., Marshall, D. J. y Cohen, A. L. (2011). Projecting Coral Reef Futures Under Global Warming and Ocean Acidification. Science: 333 (6041), 418-422.

Papina, M., Meziane, T., y Van Woesik, R. (2003). Symbiotic provide the host-coral *Montipora digitata* with poly unsaturated fatty acids. Comparative Biochemistry and Physiology B: Biochemistry and Molecular Biology. 135, 533-537.

Paramo, J., C., Marco, y Núñez, Samuel. (2011). Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en La Guajira, Caribe colombiano. Revista de biología marina y oceanografía, 46(3), 421-430.

Pineda, J., Martínez, L., Bedoya, D., Caparroso, P., Rojas, J.0. (2006). Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Cartagena. 369 pág.

Pinilla, A., Gabriel, A., Gutiérrez, Á. y Ulloa, G. (2007). *Efectos ecológicos de la derivación de aguas y sedimentos hacia la Bahía de Barbacoas.* Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia.

Plan de Manejo del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Sánchez, G.; Hernández, M.; Mayor, G.; Gómez, C.; Corredor, I.; Puentes, M.; Blanco, W.; Muñoz, M.; Pinzón, J.; Franke, R.; Operarios del parque. (2006). Parques Nacionales Naturales de Colombia. Dirección Territorial Caribe. Cartagena.

PNNT (Plan de Manejo Parque Nacional Natural Tayrona. Pineda, I.; Martínez, L.; Bedoya, D.; Caparroso, P.; Rojas, J. (2006). Parques Nacionales Naturales de Colombia. Dirección Territorial Caribe. Santa Marta.

Pomerance, R. (1999). Coral bleaching, coral mortality, and global climate change. Informe presentado por el Secretario de Estado para el Medio Ambiente y el Desarrollo a The US Coral Reef Task Force, Maui, Hawái.

Porter, J.W; Fitt, W.K; Spero, H.J; Rogers, C.S. y White, M.W. (1989). Bleaching in reef corals: physiological and stable isotopic responses. Proc Natl Acad Sci USA 86:9342-9346

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 28(107): 201–222. Publications Services Unit. United Kingdom; 163 pág.

Ramírez, L.F., Alonso, D., Segura-Quintero, C., Moreno, R., Mendoza, S., Maldonado, J., Castro, A.P., Calero, L.A., Zamora, A., Bohórquez, E. y Franke, R. (2009). Viabilidad de una red de áreas marinas protegidas, Caribe colombiano. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, Sistema Regional de Áreas Protegidas del Caribe-SIRAP Caribe, Corporación Autónoma Regional de Sucre-CARSUCRE, Corporación Autónoma Regional de la Guajira-CORPOGUAJIRA y Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales-UAESPNN. Santa Marta, Colombia, 24 p.

ReefBase: A Global Information System for Coral Reefs. Noviembre (2012). http://www.reefbase.org.

Restrepo J. y Kjerfve B. (2004). The Pacific and Caribbean rivers of Colombia: water discharge, sediment transport and dissolved loads. En: 169-187. Lacerda L., Santelli R., Duursma E., Abrao J. (Ed.). Environmental geochemistry in tropical and subtropical environments. Springer Verlag. Berlin. 169-187 pp.

Rodríguez - Ramírez, A y Garzón - Ferreira, J. (2003). Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la bahía de Chengue (Caribe colombiano): 1993-1999. INVEMAR, Serie de publicaciones especiales No. 8, Santa Marta. 170 p.

Rodríguez - Ramírez, A., Reyes - Nivia, M., Navas - Camacho, R., Bejarano, S., Garzón-Ferreira J. y Zapata, F. (2006). Status of the coral reefs of Colombia in 2003. Proc. 10th Int. Coral Reef Symp., 976-981.

Rodríguez-Ramírez, A., Bastidas, C., Rodríguez, S., Leão, Z., Kikuchi, R., Oliveira, M., Gil, D., Garzón-Ferreira, J., Reyes-Nivia, M. C., Navas-Camacho, R., Santodomingo, N., Diaz-Pulido, G., Venera-Ponton, D., Florez-Leiva, L., Rangel-Campo, A., Orozco, C., Márquez, J. C., Zea. S., López-Victoria, M., Sánchez, J. A. and Hurtado, M. C. (2008). The Effects of Coral Bleaching in Southern Tropical America: Brazil, Colombia, and Venezuela. En C. Wilkinson y D. Souter (Ed.), Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in 2008 (pp. 105-114) Townsville, Australia.

Rogers, C. S. (1979). The effect of shading on coral reef structure and function. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 41, 3, 269-288.

Ruiz-Ochoa, M. A. (2011). Variabilidad de la Cuenca Colombia (mar Caribe) asociada con El Niño-Oscilación del Sur, vientos Alisios y procesos locales. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia - Medellín.

Santander, E.; Herrera, L. y Pizarro, J. (2001). Fluctuación diaria del fitoplancton en la capa superficial del océano durante la primavera de 1997 en el norte de Chile (20°18´S): I. Biomasa Pigmentaria. Rev. Biol. Mar. Oceanogr. Vol.36, N.2, pp. 141-153. ISSN 0718-1957.

Scheffers, S, Scheffers, A, Radtke, U, Kelletat, D, Staben, K. y Bak, RPM (2006), 'Tsunami trigger long-lasting phase-shifts in coral reef ecosystem', in A Scheffers y D Kelletat (eds),*Tsunamis, hurricanes and neotectonics as driving mechanisms in coastal evolution (Proceedings of the Bonaire Field Symposium, March 2-6, 2006. A contribution to IGCP 495)*, E Schweizerbart, Stuttgart, Germany, Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband , vol. 146, pp. 59-79.

Solano, P. O. D. (1994). Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahia Portete, Guajira, Colombia. Anales Del Instituto De Investigaciones Marinas De Punta De Betín (Santa Marta), 23, 149-163.

Sutherland, K. P., Porter, J. W., y Torres, C. (2004). Disease and immunity in Caribbean and Indo-Pacific zooxanthellate corals. *Marine ecology progress series*, *266*, 265-272.

Terrón - Sigler, A., Peñalver, P., Espinosa, F. y León - Muez, D. (2011). Ensayo experimental para el trasplante de colonias de coral naranja (Astroides calycularis, Pallas 1766); especie insignia del litoral sur de la Península Ibérica. Chronica naturae, 1: 35-45

Trench, R. K. (1979). The cell biology of plant - animal symbiosis. Annual Reviews of Plant Physiology, 30, 48-531.

True, J. D. (2012). Salinity as a structuring force for near shore coral communities. Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia.

Turner, J. R., Klaus, R., Hardman, E., Fagoonee, I. N. D. U. R., Daby, D. E. O. L. A. L. L., Baghooli, R. A. N. J. E. E. T., y Persands, S. H. A. R. V. E. E. N. (2000). The reefs of Mauritius. *Coral reef degradation in the Indian Ocean: status report*.

Van Woesik, R., De Vantier, L. M., J. S. Glazebrook. (1995). Effects of Cyclone 'Joy' on nearshore coral communities of the Great Barrier Reef. Series de Ecología Marina. Volumen 128: 261-270.

Vega - Sequeda, J., Navas - Camacho, R., Gómez - Campo, K., López - Londoño T. y Duque, D. (2011). Estado de los ecosistemas marinos y costeros. Intervalo de páginas: 88-187. En: INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia: Año 2010. Serie de Publicaciones Periódicas No. 8. Santa Marta, 322 Pág.

Vega - Sequeda, J., Rodríguez - Ramírez, A., Reyes-Nivia, M.C., y Navas-Camacho, R. (2008). Formaciones coralinas del área de Santa Marta: estado y patrones de distribución

espacial de la comunidad bentónica. (Boletín de investigaciones marinas y costeras, 37(2). p. 87-105.) INVEMAR, Santa Marta -Colombia.

Werding, B. y Sánchez. H. (1988). Deterioro observado en las formaciones coralinas de la bahía de Santa Marta, Colombia. An. Inst Inv. Mar. Punta Betín, 18: 9-16.

West, J.M. y Salm, R.V. (2003). Resistance and resilience to coral bleaching: implications for coral reef conservation and management. Conservation Biology 17(4): 956-967.

Westmacott S, Cesar H, Soede L.P. y Lindén O. (2001). Assessing the socioeconomic impacts of the coral bleaching event in the Indian Ocean.En: Schuttenberg HZ (ed.), Coral Bleaching: Causes, Consequences and Response. Artículo presentado en The Ninth International Coral Reef Symposium on Coral Bleaching: Assessing and linking ecological and socioeconomic impacts, future trends and mitigation planning. Coastal Management Report 2230, 31–39.

Westmacott, S., Teleki, K., Wells, S y West, J. M. (2000). Management of Bleached and Severely Damaged Coral Reefs. UICN, Suiza y Cambridge, Reino Unido. Volumen II pág. 36.

Wilkinson, C. y Souter, D. (2008). Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, 152 p.

Wilkinson, Clive R. (2000). Global and local threats to coral reef functioning and existence: review and predictions. Marine and Freshwater Research 50, 867–878.

Williams E. H y Bunkley - Williams L. (1990). The world-wide coral reef bleaching cycle and related sources of coral mortality. Atoll Res Bull 335:1-71.

Zea, S. y Tobón, D. (1989). Bleaching of reef organisms in the Santa Marta region, Colombia: 1987 Caribbean-wide event. Trianea (act. Cient.Técn, INDERENA), 3:37-75.