



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Efectos de perturbaciones naturales en ecosistemas marinos: eventos oceánicos extremos en formaciones coralinas del Caribe colombiano**

**Johanna Carolina Vega Sequeda**

Universidad Nacional de Colombia  
Instituto de Estudios en Ciencias del Mar - CECIMAR  
Convenio Universidad Nacional de Colombia - INVEMAR  
Santa Marta, D.T.C.H., Colombia  
2016

# **Efectos de perturbaciones naturales en ecosistemas marinos: eventos oceánicos extremos en formaciones coralinas del Caribe colombiano**

**Johanna Carolina Vega Sequeda**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias – Biología, Línea Biología Marina**

Director:  
Sven Zea, Ph.D.  
Codirectora:  
Gladys Bernal, Ph.D.

Línea de Investigación:  
Biología Marina

Universidad Nacional de Colombia  
Instituto de Estudios en Ciencias del Mar – CECIMAR  
Convenio Universidad Nacional de Colombia – INVEMAR  
Santa Marta, D.T.C.H., Colombia  
2016

## **Agradecimientos**

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín y la Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe y a los recursos financieros del Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología –COLCIENCIAS- en el marco del proyecto “Eventos oceánicos extremos en ecosistemas costeros insulares del Pacífico y Caribe colombianos” (Código 1118-569-34826). Igualmente agradezco al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras –INVEMAR– por su colaboración al brindarme el acceso a series datos históricos y a la realización del trabajo en campo en las estaciones del Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia –SIMAC– en las Islas del Rosario.

Agradezco especialmente a Sven Zea y a Gladys Bernal, por su apoyo y por brindarme valiosas enseñanzas, consejos y experiencias que me ayudaron no sólo a crecer como profesional sino también como persona.

Doy las gracias a Diego Duque, funcionario del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo, a mis compañeros del proyecto Andrés Osorio, Ligia Urrego, Daniel Pérez, Víctor Saavedra, Andrea Galeano, Lizeth Puerres, Juan David Osorio y a los demás miembros del Grupo OCEÁNICOS por toda su ayuda en el trabajo de campo, sus consejos y compañía durante todo este proceso; de igual manera agradezco a Alexandra Rodríguez por su gran asesoría y Adolfo Sanjuan Muñoz por sus consejos y que siempre estuvieron ahí para ayudarme, a la escuela de buceo Scuba Cartagena, y a Víctor Anaya y al Oceanario de las islas del Rosario, por toda su colaboración.

A mi familia, mi mamá Olga Teresa, mis hermanos Edgar Manuel y Olga Lucia, a Cristian Restrepo y Benji por brindarme ánimo, por su infinita paciencia, colaboración y apoyo incondicional para llegar a finalizar esta Maestría.

## Resumen

Según la ecología de las perturbaciones, el impacto de los eventos extremos depende de la magnitud del agente perturbador y de la susceptibilidad del sistema. Debido a que la información varía para distintas regiones y tipos de eventos, es importante entender la respuesta de los ecosistemas ante las perturbaciones y detectar los cambios en su estado. Esta investigación buscó mejorar este entendimiento usando como modelo los eventos oceánicos extremos en los arrecifes coralinos. Para ello se evaluaron dos formaciones coralinas de las islas del Rosario (islas Tesoro y Pavitos) en el Caribe colombiano, de donde se tienen series históricas de datos de cobertura y salud coralina generados por el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia (SIMAC). El trabajo se desarrolló en dos escalas temporales, una a largo plazo (decadal, 1998-2013), con los datos existentes e información ambiental de bases de datos y modelos numéricos asociados a eventos oceánicos extremos (e.g., oleaje, temperatura, caudal, entre otros), y otra a corto plazo (un año) desde noviembre de 2013 hasta noviembre de 2014, con nuevas mediciones, cada tres meses, de la estructura y salud coralina en las estaciones SIMAC, a una profundidad somera (3-6 m) y media (9-12 m). Igual que para el largo plazo, para el corto plazo se emplearon mediciones directas de variables ambientales (temperatura, sedimentación y salinidad), bases de datos (precipitación) y modelos numéricos (oleaje). Los eventos oceánicos extremos se presentaron en general en la segunda época del año (época lluviosa), exceptuando los de oleaje proveniente del norte, que fueron en el primer semestre del año (época seca). En el largo plazo, los eventos extremos de temperatura superficial del mar, caudal del Canal del Dique y Kd490 (medida indirecta de la turbidez) fueron las principales variables asociadas a la reducción de la cobertura de coral. Se evidenció que la pérdida de cobertura coralina entre 2004 y 2010 estuvo posiblemente asociada al blanqueamiento masivo de 2005, y la combinación de eventos extremos de la temperatura del mar, Kd490 y el caudal. Asimismo, la mayor frecuencia, intensidad y duración de estas dos últimas variables se asociaron con eventos moderados del fenómeno de La Niña. En el corto plazo, durante el año de evaluación, a nivel general, no se registraron cambios significativos en las formaciones coralinas, aunque se evidenció que los signos de deterioro coralino crónico pueden tener un rol importante en la degradación del ecosistema. Se presentaron cinco signos, blanqueamiento, enfermedades, palidecimiento, invasión y volcamiento, siendo el primero el que registró los valores más altos. Sin embargo, en Tesoro somero las enfermedades fueron el signo de mayor afección con un aumento paulatino en su frecuencia a partir de febrero de 2014. No obstante, el estrés producido por las temperaturas extremas, la acumulación de estrés térmico y en menor medida por reducciones de salinidad (descargas de agua dulce), se vio reflejado en mayores porcentajes de blanqueamiento, particularmente en noviembre de 2014. En general, las mayores intensidades de las perturbaciones naturales fueron consecuencia del efecto en conjunto de variables ambientales extremas, siendo la temperatura del mar uno de los principales conductores que afectaron en gran medida al ecosistema arrecifal desde 1998.

**Palabras clave:** Perturbaciones naturales, arrecifes coralinos, eventos oceánicos extremos, cobertura coralina, signos de deterioro, Caribe colombiano.

## Abstract

According to the ecology of disturbances, the impact of extreme events depends on the magnitude of the disturbing agent and the susceptibility of the system. Because the information varies for different regions and types of events, it is important to understand the response of ecosystems to disturbances and detect changes in their status. This research sought to improve this understanding using as a model the effect of extreme ocean events on coral reefs. For this, two coral formations in Rosario Islands (Tesoro and Pavitos islands) in the Colombian Caribbean were evaluated, as they have historical data of coral cover and health gathered by the Colombian Coral Reefs Monitoring System ” (Spanish acronym: SIMAC). The work was developed in two time scales, one long-term (decadal, 1998-2013) with existing environmental data and information from databases and numerical models associated to extreme ocean events (e.g. waves, temperature, runoff, etc.), and other short-term (one year), from November 2013 to November 2014, with new measurements every three months for the coral community structure and health in SIMAC stations, at a shallow depth (3-6 m) and mid-depth (9 -12 m). As in the long term, direct measurement of environmental variables (temperature, salinity and sedimentation), databases (precipitation) and numerical models (waves) were used for the short term. Extreme ocean events occurred generally in the second semester, during the rainy season, while only extreme northerly wave events occurred in the first half of the year during the dry season. In the long term, extreme events of sea surface temperature, runoff from Canal del Dique and Kd490 (indirect measurement of turbidity) were the main variables associated with reductions in coral cover. It was evident that the loss of coral cover between 2004 and 2010 was possibly associated with the mass coral bleaching event of 2005, and to the combination of extreme events of temperature, Kd490 and runoff. Also, the greater frequency, intensity and duration of the latter two variables were associated with moderate events of La Niña. In the short term, in general, no significant changes were recorded in coral formations, although it was evident that the signs of chronic coral deterioration can play an important role in the degradation of the ecosystem. Five signs were present, bleaching, disease, paling, invasion and toppling. The first sign showed the highest values. However, in shallow Tesoro, diseases were the sign of greater occurrence with a gradual increase starting February 2014. However, the stress caused by extreme temperatures, the accumulation of heat stress and to a lesser extent by low salinity (freshwater outflow), was reflected in higher values of bleaching, particularly in November 2014. In general, the higher intensities of natural disturbances were a result of the combined effect of extreme environmental variables, where the sea temperature was one of the main drivers affecting the reef ecosystem since 1998.

**Key words:** Natural perturbations, coral reefs, extreme ocean events, coral cover, signs of reef deterioration, Colombian Caribbean.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen.....</b>	<b>IV</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Área de estudio.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Metodología .....</b>	<b>6</b>
2.1 Evaluación histórica (1998-2013) . . . . .	6
2.1.1 Variables ambientales de bases de datos . . . . .	6
2.2 Evaluación de corto plazo (2013-2014) . . . . .	7
2.2.1 Variables bióticas . . . . .	7
2.2.2 Variables ambientales <i>in situ</i> . . . . .	7
2.2.3 Determinación de sedimentación . . . . .	8
2.2.4 Variables ambientales de bases de datos . . . . .	8
2.2.5 Tratamiento de la información . . . . .	9
<b>3. Resultados.....</b>	<b>11</b>
3.1 Evaluación histórica (1998 - 2013) . . . . .	11
3.1.1 Ocurrencia de eventos oceánicos extremos . . . . .	11
3.1.2 Cobertura y salud coralina . . . . .	19
3.1.3 Análisis de componentes principales . . . . .	20
3.2 Evaluación anual (noviembre 2013 – noviembre 2014) . . . . .	27
3.2.1 Ocurrencia de eventos oceánicos extremos . . . . .	27
3.2.2 Cobertura y salud coralina . . . . .	31
3.2.3 Análisis de componentes principales . . . . .	33
<b>4. Discusión .....</b>	<b>38</b>
4.1 Evaluación histórica (1998-2013) . . . . .	38
4.1.1 Evaluación anual (noviembre 2013- noviembre 2014) . . . . .	43
<b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>47</b>
5.1 Conclusiones . . . . .	47
5.2 Recomendaciones . . . . .	49
<b>Bibliografía .....</b>	<b>50</b>
<b>Anexos</b>	

## Introducción

Una perturbación es un evento puntual en el tiempo que altera la estructura de los ecosistemas, comunidades o poblaciones y cambia la relación entre las especies, la disponibilidad del espacio a ser colonizado, del hábitat y/o el medio físico. Debido a su acción continua en la historia, las perturbaciones han provocado la adaptación de las especies y han generado parte de la diversidad del planeta. En su proceso pueden alterar las poblaciones (e.g. fisiología, condición física, presencia o ausencia y abundancia), la composición y estructura de la comunidad (e.g. muerte selectiva o no selectiva, distribución de especies, índices de diversidad, dominancia, interacciones de las especies y sucesión), así como la dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (e.g. tasas de flujo de energía, reciclaje de nutrientes, interacciones de las especies y sucesión). El impacto ecológico de las perturbaciones depende de la magnitud del agente perturbador y de la susceptibilidad del ecosistema (Bormann y Likens, 1979; Sousa, 1984; Pickett y White, 1985; Smith, 2011a). Asimismo, en ocasiones, las mayores perturbaciones en un ecosistema no son sólo por un evento específico de gran intensidad y tamaño, sino por varios eventos más pequeños combinados o sucesivos (Pickett y White, 1985; Scheffer y Carpenter, 2003).

Un ejemplo de perturbación ecológica son los eventos oceánicos extremos, que son aquellos en que las condiciones meteorológicas y oceanográficas exceden los niveles normales, son difícilmente predecibles y producen un impacto sobre los ecosistemas marinos y costeros (Smith, 2011a; Coronado *et al.*, 2007; Denny y Gaylord, 2010; GBRMPA, 2011; Crabbe, 2012). Entre los más reconocidos se encuentran las variaciones inusuales de la temperatura del mar, lluvias intensas, alta sedimentación, huracanes, mares de leva, remolinos de mesoescala, entre otros. Se considera que exceden los niveles normales cuando los datos se encuentran por encima o debajo de los valores de un umbral registrados para una variable, que usualmente corresponden al 1 % de los valores extremos en la curva de frecuencia de las variables atmosféricas y de oleaje y 5 % de las variables oceánicas (Vellinga y Verseveld, 2000; Jentsch y Beierkuhnlein, 2008; Denny y Gaylord, 2010; Crabbe, 2012; Freeman *et al.*, 2012; IPCC, 2013). No obstante, estos valores pueden variar dependiendo de la duración del evento, la susceptibilidad y nivel de exposición del ecosistema (Pickett y White, 1985; IPCC, 2012), así como la respuesta ecológica en cascada a través de múltiples niveles jerárquicos (Smith, 2011b).

A nivel mundial se espera y se ha evidenciado el incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos en asocio con las condiciones climáticas estacionales de largo plazo (e.g. fenómenos de El Niño y La Niña) y del cambio climático global (Wilkinson y Souter; 2008; Jentsch y Beierkuhnlein, 2008; WMO, 2010; IPCC, 2012; Wernberg *et al.*, 2013), que causan inundaciones, erosión costera, aumento en el nivel del mar, en la turbidez, entre otros. Estos fenómenos traen graves consecuencias ambientales, sociales y económicas, ocasionando daños directos a la infraestructura de las zonas costeras y afectando las comunidades humanas que dependen de los recursos naturales costeros (Wilkinson y Souter; 2008; GBRMPA, 2011; Wernberg *et al.*, 2013).

Los arrecifes de coral constituyen uno de los ecosistemas más importantes, productivos y biodiversos del planeta, ofreciendo variados servicios a la población costera; son fuente de gran valor económico

para la pesca tradicional y el turismo (Achituv y Dubinsky, 1990; Birkeland, 1997; Buddemeier *et al.*, 2004; Burke *et al.*, 2011). Son muy sensibles a cambios no muy pronunciados de su entorno, por lo que han sido catalogados como indicadores de perturbaciones (Zea, 1991; Garzón-Ferreira, 1997; Bernhard, 2007). La variación temporal de la cobertura de coral vivo en los arrecifes ha sido un buen indicador del estado de salud de los arrecifes coralinos, debido a que estos organismos son los constructores fundamentales del ecosistema (Birkeland, 1997).

A nivel mundial se ha observado que los arrecifes coralinos han sido afectados por eventos extremos a través de al menos tres mecanismos diferentes: -1. el blanqueamiento coralino causado principalmente por las altas temperaturas (Marshall y Schuttenberg, 2006; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2007; Wachenfeld *et al.*, 2007), -2. daños físicos en los corales y en el andamiaje arrecifal producto de ciclones, huracanes y mares de leva (Wilkinson y Souter, 2008; GBRMPA, 2011) y -3. el incremento en la prevalencia de enfermedades coralinas, el cual ha sido asociado, entre otros factores, con el aumento de la temperatura del mar (McClanahan, 2004; Raymundo *et al.*, 2008; Ruiz-Moreno *et al.*, 2012).

La acción recurrente o prolongada de estos eventos sobre los arrecifes trae como consecuencias mortandades de organismos, cambios en la composición coralina, reducción en el número de especies de coral, y del reclutamiento y la cobertura coralina total, susceptibilidad de los corales frente a enfermedades, además de favorecer a la colonización de algas y esponjas, fuertes competidores de los corales por espacio (Díaz *et al.*, 2000; Raymundo *et al.*, 2008; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2010; GBRMPA, 2011; Wernberg *et al.*, 2013).

Los ecosistemas del Caribe colombiano han sido sometidos históricamente a eventos oceánicos extremos recurrentes. Las altas temperaturas del mar han generado varios eventos de blanqueamiento coralino en las islas del Rosario y San Bernardo, San Andrés, Parque Nacional Natural Tayrona y La Guajira, siendo los eventos de 2005 y 2010 unos de los más severos en los últimos 25 años (Alvarado *et al.*, 1986; Ramírez, 1986; Gómez y Sánchez, 1987; Lang, 1987; Bohórquez, 1988; Zea y Duque-Tobón, 1989; Solano *et al.*, 1993; Solano, 1994; Gil-Agudelo *et al.*, 2006; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008; Romero-Rodríguez *et al.*, 2014; Vega-Sequeda *et al.*, 2011; Gómez-Campo *et al.*, 2011; Bayraktarov *et al.*, 2013). Los huracanes han afectado principalmente el complejo arrecifal del archipiélago de San Andrés (Garzón-Ferreira y Díaz, 2003; Taylor *et al.*, 2007; Rodríguez-Ramírez y Reyes-Nivia, 2008) y en ocasiones su paso mar afuera ha generado fuertes oleajes y descargas continentales producto de las fuertes lluvias que han afectado a los arrecifes de las islas del Rosario (López-Victoria y Zea, 2004) y del Parque Nacional Natural Tayrona (CARICOMP, 1997; Rodríguez-Ramírez y Garzón-Ferreira, 2003; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008).

En cuanto a la sedimentación, particularmente en el caso de las islas del Rosario, la influencia de aguas continentales cargadas de sedimentos provenientes del área de Cartagena, genera en los corales estrés crónico o episódico (Alvarado y Corchuelo, 1992; Restrepo-Ángel y Alvarado, 2011). Sin embargo, este tipo de mortalidad por sedimentación no se ha podido asociar directamente con variables ambientales.

Para analizar la ocurrencia de eventos extremos y la respuesta de los ecosistemas existen varias fuentes de información. El Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia (SIMAC) realiza desde 1998 un monitoreo anual en algunos arrecifes coralinos del País. En cada uno, se evalúan tres niveles de profundidad: una parcela somera (3-6 m), una intermedia (9-12 m) y una profunda (15-18 m). Cada lugar cuenta con un sensor de temperatura a 10 m de profundidad y se evalúan variables biológicas relevantes como la cobertura del sustrato a través del método de cadena, la riqueza y abundancia de peces mediante censos visuales, así como la salud coralina,

abundancia de invertebrados vágiles y octocorales a través de transectos de banda (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002; Garzón-Ferreira y Rodríguez-Ramírez, 2010).

El uso de sensores remotos se ha convertido en un componente importante en los temas de investigación, monitoreo y manejo, ya que a través de satélites se registra y almacena información casi en tiempo real de variables ambientales (e.g. vientos, oleaje, temperatura) y biológicas (e.g. cobertura viva del fondo) en grandes escalas espaciales y algunas temporales que no serían posible de obtener a través de evaluaciones *in situ* (Kerr y Ostrovsky, 2003; Lucas y Strong, 2012). Sin embargo, los datos satelitales tienen las limitaciones que sólo registran la información superficial del mar y algunas fuentes de sensores poseen vacíos de información en algunos periodos de tiempo y en las zonas cerca a la costa.

Desde la perspectiva del manejo y ante la presión antropogénica actual, sumado a los escenarios descritos del cambio climático, es importante entender la respuesta de los ecosistemas ante las perturbaciones y detectar sus cambios. Dado que las perturbaciones ocurren a escalas temporales y espaciales extensas, hay pocos datos disponibles para hacer adecuadas valoraciones sobre los cambios en su frecuencia o intensidad (IPCC, 2012), al igual que la información para identificar cambios en los ecosistemas a largo plazo, particularmente en los marinos, ya que los pocos programas de monitoreo a nivel mundial comenzaron sus actividades a inicios de la década de 1990 (e.g., CARICOMP, Global Coral Reef Monitoring Network –GCRMN–). Debido a esto, el enfoque de investigación de largo plazo y de observación continua (monitoreo) es esencial.

Esta investigación buscó entender el papel de las perturbaciones naturales, en este caso, eventos oceánicos extremos, en la dinámica de los sistemas biológicos, tomando como modelo dos formaciones coralinas de las islas del Rosario (islas Tesoro y Pavitos), en los que se tienen estaciones permanentes por parte del SIMAC (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002; Garzón-Ferreira y Rodríguez-Ramírez, 2010). Se pretendió analizar cambios históricos (1998 al presente) y de corto plazo (2013-14) en la estructura y salud arrecifal, relacionándolos con variables ambientales (mediciones directas y bases de datos). Este proyecto se enmarcó dentro del proyecto: "Eventos oceánicos extremos en ecosistemas costeros insulares del Pacífico y Caribe colombianos", desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín con el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia Sede Caribe, con financiación de COLCIENCIAS. Los resultados de esta tesis contribuirán al componente de arrecifes coralinos del proyecto en mención.

# 1. Área de estudio

El archipiélago de Nuestra Señora del Rosario está ubicado al suroccidente de la bahía de Cartagena y hace parte de la jurisdicción del departamento de Bolívar (Díaz *et al.*, 2000), del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB) y del Área Marina Protegida Corales del Rosario, San Bernardo e Isla Fuerte (Resolución 679 de 2005 del Ministerio de Ambiente; Alonso y Castillo, 2007). El clima de la región es tropical, con una época seca (diciembre-abril) con mayor influencia de los vientos alisios del NE, un descenso de la temperatura del agua (27 °C) y un incremento en la acción oleaje. Y una época de lluvias (mayo-noviembre) donde los vientos alisios se debilitan, domina la contracorriente de Panamá, el agua es más cálida (29 °C), las lluvias son frecuentes y llegan al área las descargas continentales provenientes del Canal del Dique, cargadas de sedimentos que incrementan la turbidez (Alvarado *et al.*, 1986; Cendales *et al.*, 2002; Díaz-Pulido y Garzón-Ferreira, 2002; Andrade y Barton, 2005).

En esta área se encuentra un complejo de arrecifes holocénicos con terrazas, arrecifes franjeantes y bancos coralinos formados por la interacción entre diapirismo de lodos, cambios en el nivel del mar y crecimiento de arrecifes (Díaz *et al.*, 2000; Cendales *et al.*, 2002). Las formaciones coralinas están ubicadas sobre terrazas calcáreas de poca inclinación que inicia desde la costa y descienden gradualmente hasta el borde externo a los 9-12 m de profundidad. En este punto comienza el talud con una mayor pendiente hasta los 25-40 m de profundidad llegando a un fondo areno-lodoso. Las principales especies formadoras de arrecifes son *Orbicella* spp., *Porites astroides* y *Undaria tenuifolia* y a partir de los 18 m de profundidad dominan los corales con crecimiento laminar como *Undaria* y *Agaricia* spp. y en forma de plato como *Orbicella franksi* y *P. astreoides* que a menor profundidad son masivas (Cendales *et al.*, 2002). La irregularidad del relieve y su localización privilegiada con relación al régimen de vientos han dado lugar a variados ambientes y asociaciones bióticas que hacen que se trate de una de las áreas coralinas más desarrolladas geomorfológica y estructuralmente del Caribe colombiano (Díaz *et al.*, 2000).

Las formaciones coralinas del área han sufrido fuertes impactos antropogénicos desde la década de los años 80, atribuidos principalmente a las enfermedades coralinas, la sedimentación y turbidez provenientes de Canal del Dique, la pesca con dinamita, el desarrollo costero, el turismo incontrolado, el uso indebido de los corales para construcciones y el vertimiento de aguas residuales (Alvarado *et al.*, 1986; Díaz *et al.*, 2000; Restrepo y Alvarado, 2011).

Se evaluaron dos estaciones de SIMAC. La primera se ubica hacia el costado sur de isla Tesoro (Tabla 1.1), la cual es una zona intangible según la Resolución 018 de 2007 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Allí las especies *Orbicella* spp. y *Diploria labyrinthiformis* son las más abundantes. La parcela de profundidad somera (5-6 m) está ubicada en una cuenca lagunar de muy poca pendiente, mientras que la parcela de profundidad media (9-12 m) está ubicada iniciando el talud, el cual es de pendiente media y relieve complejo. La segunda estación se ubica al suroeste de la isla Pavitos (Tabla 1.1) y muy cerca de la estación, a 30 m al oeste aproximadamente, hay una

baliza usada para amarrar embarcaciones que comúnmente realizan actividades de buceo. El coral *U tenuifolia* es la especie predominante. La parcela de profundidad somera está ubicada sobre una terraza que rodea la Isla y la parcela de profundidad media (9-12 m) está ubicada en el talud de pendiente fuerte y de sustrato frágil (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002).

**Tabla 1.1:** Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo SIMAC en las islas del Rosario.

Lugar	Coordenadas	Lugar	Coordenadas
Pavitos	10° 10' 17,3" N 75° 45' 58,8" W	Tesoro	10° 13' 50,8" N 75°44' 32,2" W

Ambas estaciones fueron escogidas al inicio del monitoreo por representar porciones del arrecife diferentes y en relativo buen estado; ambas enfrentan al sur, estando protegidas del oleaje predominante del noreste generado por los vientos alisios, aunque están expuestas a fuertes oleajes esporádicos del sur y occidente que se generan del sur durante tormentas de la época de lluvias, en la temporada de huracanes o mares de leva atmosféricos (Bernal *et al.*, 2016)



**Figura 1.1:** Delimitación del archipiélago Nuestra Señora del Rosario y ubicación de las estaciones de monitoreo SIMAC en las islas de Tesoro y Pavitos. Modificado de Garzón-Ferreira *et al.* (2002).

## 2. Metodología

### 2.1 Evaluación histórica (1998-2013)

#### 2.1.1 Variables ambientales de bases de datos

Desde 1998 el SIMAC cuenta con las estaciones de monitoreo en isla Pavitos e isla Tesoro, en las islas del Rosario (Figura 1.1; Tabla 2.1). Cada profundidad cuenta con cinco transectos permanentes de 10 m donde se registra anualmente la cobertura del bentos arrecifal a través del método de cadena y la salud coralina en bandas de 10 x 2 m (Garzón-Ferreira *et al.*, 2002; Garzón-Ferreira y Rodríguez-Ramírez, 2010). Es importante tener en cuenta que existen vacíos de información, ya que no se pudo llevar el cabo el monitoreo en los años 2000, 2005 y 2007. Para establecer los efectos de eventos oceánicos extremos en los arrecifes de coral en una escala temporal de largo plazo (1998-2013), se empleó la información de la cobertura y salud coralina de este programa de monitoreo en las profundidades somera y media (INVEMAR, 2014).

Se obtuvieron datos históricos en bases de datos (satelital y re-análisis) de las variables ambientales asociadas a eventos oceánicos extremos: precipitación (mm), oleaje (altura significativa de ola Hs), temperatura superficial del mar (°C) y coeficiente de atenuación difusa a 490 nm ( $m^{-1}$ , Kd490 una medición indirecta de la turbidez), que indica cómo es atenuada la luz dentro de la columna del agua. Para esta última las imágenes fueron de nivel L3 en formato HDF desde el 2002 y fueron procesadas en el programa MATLAB R2012a. Asimismo, se tuvo acceso a datos del índice DHW para las islas del Rosario (*Degree Heating Weeks - DHW*) de la NOAA *Coral Reef Watch* (2000), el cual indica el tiempo (en semanas) del efecto acumulativo del incremento de la temperatura. Un DHW por encima de cuatro semanas ha demostrado un blanqueamiento coralino significativo y valores por encima de ocho semanas han causado blanqueamiento masivo y mortalidad asociada (Liu *et al.*, 2003, 2005). Adicionalmente, se obtuvo información histórica de caudal del Canal del Dique ( $m^3/s$ ), como medida indirecta del flujo de agua dulce hacia el Archipiélago del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de la estación hidrológica Santa Helena 2. El Canal del Dique es la fuente de agua dulce más cercana a los arrecifes evaluados en las Islas del Rosario (Figura 2.1; Tabla 2.1). También se obtuvo el *Oceanic Niño Index* (ONI) de la NOAA, el cual es un indicador para el seguimiento de los eventos de El Niño Oscilación Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), la mayor fuente de variación climática interanual de periodo irregular que se presenta cada dos a siete años (Montealegre y Pabón, 1992; Coronado *et al.*, 2013). Este índice es calculado a partir de mediciones de la temperatura superficial del mar en el sector central del Pacífico tropical frente a las costas de Suramérica

## 2.2 Evaluación de corto plazo (2013-2014)

### 2.2.1 Variables bióticas

El estudio se desarrolló trimestralmente en las estaciones someras (3-6 m) y medias (9-12 m) del SIMAC de isla Tesoro e isla Pavitos (Tabla 1.1) a lo largo de un año (2013-14), empleando los mismos transectos fijos del programa de monitoreo, cinco por estación, cada uno con una longitud de 10 m, donde se estimaron las siguientes variables:

- **Cobertura de coral vivo**

Para esta evaluación se empleó el método de “punto intercepto en transecto” (Dodge *et al.*, 1982; Hill y Wilkinson, 2004), el cual consiste en extender una cinta métrica sobre el fondo, observando cada 10 cm el componente del sustrato que está justamente debajo. Sólo se anotaron los puntos donde los corales estaban presentes, siendo identificados a nivel de especie.

- **Salud coralina**

Para establecer la frecuencia de signos de deterioro en cada estación, se utilizó el protocolo descrito en CARICOMP (2001) y Garzón-Ferreira *et al.* (2002). La evaluación se realizó en las cinco bandas de 10 x 2 m, correspondientes a los transectos permanente, utilizando un tubo de PVC de 1 m de largo para estimar visualmente el ancho de la banda a cada lado del cabo. En cada banda se contaron todas las colonias coralinas mayores a 5 cm, anotando la especie y si estaban afectadas por enfermedades, blanqueamiento, palidecimiento, volcamiento, fragmentación e invasión (recubrimiento del tejido vivo por algas u otros organismos). La identificación en campo de las enfermedades se hizo con base en las descripciones de Sutherland *et al.* (2004) y Raymundo *et al.* (2008). Debido a la dificultad de contar colonias de tipo foliar (e.g. *Undaria* y *Agaricia* spp.) cuando son abundantes, se empleó un cuadrante de 50 x 50 cm, el cual se colocó dentro de la banda para realizar el conteo de los corales de tipo foliar. Se asumió que un cuadrante corresponde a una colonia y en este se registraron las condiciones de salud arriba mencionadas. Adicionalmente, se tomó una foto inclinada (unos 30-45°) de cada transecto a 0, 3, 6 y 9 m con el fin de evaluar y documentar cambios en el fondo en cada muestreo.

### 2.2.2 Variables ambientales *in situ*

Desde noviembre de 2013 se instalaron en la estación somera de Tesoro dos dispositivos electrónicos, uno hobo Pendant de temperatura/luz 8K UA-002-08 marca Onset con una exactitud de  $\pm 0,47$  °C a 25 °C y un sensor de salinidad DST-CT marca Star-Oddi con un intervalo de conductividad de 13-63 mS/cm y con exactitud de  $\pm 1$  de salinidad. Cada uno de estos dispositivos fue programado para almacenar datos cada hora. En cada salida de campo el sensor de temperatura fue retirado y reemplazado, mientras que el de salinidad se sacó, se limpió, se descargaron los datos y se volvió a colocar en la estación. Adicionalmente se colocaron trampas de sedimento siguiendo el protocolo descrito por Garzón-Ferreira *et al.* (2002), en las parcelas SIMAC somera (3-6 m) y media (9-12 m). Se ubicaron verticalmente dos trampas hechas en tubo de PVC de 30 cm de alto y 5,5 cm de diámetro en las estacas fijas de los transectos SIMAC. Las trampas fueron retiradas y reemplazadas trimestralmente.

### 2.2.3 Determinación de sedimentación

Se empleó el protocolo de Garzón-Ferreira *et al.* (2002) con modificaciones. El contenido de cada trampa se pasó por separado a través de un tamiz de 1 mm sobre un sistema de filtración al vacío manual para retener el sedimento. Para cada trampa se empleó entre uno o dos filtros de fibra de vidrio Whatman GF/A de 47 mm de diámetro previamente pesados. Para remover las sales, al final se vertió aproximadamente 250 ml de agua dulce. Cada filtro se guardó en un sobre de papel aluminio rotulado. Posteriormente cada filtro fue secado en un horno a 90 °C por dos días y pesados individualmente en una balanza analítica.

### 2.2.4 Variables ambientales de bases de datos

Al igual que para la evaluación histórica, se obtuvo información en bases de datos satelitales y re-análisis de otras variables ambientales (Figura 2.1): precipitación (mm), altura significativa de ola (m), y datos del índice DHW para Colombia de la NOAA Coral Reef Watch (2013; Tabla 2.1).

**Tabla 2.1:** Fuente de datos históricos y resolución de las variables ambientales asociadas a eventos oceánicos extremos obtenidas de bases de datos desde enero de 1998 hasta diciembre de 2014. Kd490: coeficiente de atenuación difusa a 490 nm, medición indirecta de la turbidez. \*Desde enero de 2002.

Variable	Fuente	Resolución espacial	Resolución temporal
Precipitación (mm)	TRMM 3B42 v.7	0,25°	Cada 6 h
Altura de ola (m)	ERA-INTERIM	0,25°	Cada 6 h (1998-2013)
	Modelación numérica, Grupo Oceánicos UNAL, Sede Medellín	-	Cada hora (2013-2014)
Temperatura (°C)	NOAA AVHRR v.2 (interpolación óptima)	0,25°	Diaria (1998-2013)
<i>Degree Heating Weeks</i> (DHW)	NOAA <i>Coral Reef Watch</i>	50 km	Dos veces a la semana (2001-2013)
		5 km	Diaria (2013-2014)
*Kd490 (m <sup>-1</sup> )	Aqua MODIS	4 km	Semanal (2002-2013)
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	IDEAM	-	Diaria (1998-2013)
<i>Oceanic Index Niño</i> (ONI)	NOAA	-	Cada tres meses



**Figura 2.1:** Ubicación del lugar de donde se recabaron desde las bases de datos de sensores remotos las variables ambientales asociadas a eventos oceánicos extremos. Kd490: coeficiente de atenuación difusa a 490 nm, medición indirecta de la turbidez, fue tomada en tres puntos, Kd490 (1), (2) y (3).

### 2.2.5 Tratamiento de la información

Se realizó una sumatoria de los puntos de cobertura coralina de los transectos y se recalcularon los porcentajes para determinar la cobertura de coral general (%). En cuanto a los signos de deterioro, se estimó su frecuencia relativa (colonias afectadas/total de colonias\*100). Adicionalmente, para ambas variables bióticas se calcularon estadígrafos de tendencia central (promedio) y variabilidad (error estándar, coeficiente de variación, valor máximo y mínimo) con las formulas descritas en Zar (2010).

En cuanto a las variables ambientales, se calculó el promedio diario de la información almacenada en los sensores de temperatura y salinidad. Para esta última variable se tuvo que eliminar la información de los siguientes periodos: del 5 de diciembre de 2013 a 8 de febrero de 2014, del 12 marzo a 8 de mayo de 2015, y del 30 mayo a 14 de agosto de 2014, debido a una inesperada descalibración del dispositivo por alta colonización de algas. Por lo tanto, la información suministrada para la salinidad debe ser tomada con cautela. Para obtener la tasa de sedimentación (TS) se empleó la fórmula descrita en Garzón-Ferrera *et al.* (2002), donde  $TS \text{ (mg/cm}^2\text{/día)} = (\text{peso del sedimento (g)/1000 mg}) * (1/\text{área de la boca de la trampa}) * (1/\text{días})$ . En cuanto a la información obtenida de bases de datos, en el caso de la precipitación se calculó el valor acumulado diario. Para obtener el Kd490 se realizó un promedio de los datos de los tres puntos de donde se obtuvo la información. Para el oleaje se manejó por separado la altura de ola de dirección norte y sur, ya que esta última pasa directamente sobre los arrecifes estudiados. Para establecer la ocurrencia de eventos oceánicos extremos en el largo y corto plazo, se estimó el percentil 95 (variables oceanográficas), percentil 99 (variables atmosféricas y

oleaje) y percentil 5 (salinidad, para discriminar los momentos de menor salinidad que afectarían los corales).

En el caso de la temperatura, si bien el Umbral de Tolerancia al blanqueamiento para el PNNCRSB es de 29,4 °C (NOAA Coral Reef Watch, 2013) y partir de este punto los corales comienzan a experimentar estrés térmico (Glynn y D’Croz, 1990), sólo se tuvo en cuenta el percentil 95 (30,2°C) como valor crítico extremo. Asimismo, en el caso de la salinidad, aunque es considerado que los arrecifes coralinos poseen una limitada tolerancia a la salinidad (35 a 38), también pueden desarrollarse en lugares donde esta variable se encuentra entre 25 hasta 42 (Coles, 1992; Coles y Jokiel 1992; Glynn, 1993; Ferrier-Pages *et al.*, 1999; Furnas, 2003; Lirman y Manzello, 2009). No obstante, la tolerancia de estrés osmótico es altamente específico a nivel de especies y estos límites pueden ser influenciados por las condiciones ambientales locales (Coles, 1992). La mayor parte de los valores registrados están dentro de su variación normal, pero algunos se encuentran por debajo de su rango óptimo, por tal motivo y para evidenciar mejor a nivel local posibles reducciones anómalas de esta variable se tuvo en cuenta los valores obtenidos por debajo de 31,4 que corresponde al percentil 5. Posteriormente, para el análisis histórico se determinó para cada periodo de monitoreo SIMAC el número de eventos extremos de cada variable para el período anterior a cada campaña de monitoreo; asimismo se determinó el valor máximo (intensidad), el número de días totales no seguidos y el máximo número de días seguidos (duración) en que las variables registraron valores extremos.

Para el caso del índice ONI se consideró el umbral de valores igual o superior a 0,5 °C de anomalía como indicadores de un evento Niño y valores igual o inferior a -0,5 °C de anomalía para un evento Niña. Este umbral se subdivide en una categoría débil con una anomalía entre 0,5 °C y 0,9 °C, moderado entre 1,0 °C y 1,4 °C, fuerte entre 1,5 °C y 1,9 °C y muy fuerte cuando es mayor o igual a 2,0 °C. Estos valores deben permanecer en los umbrales durante al menos tres períodos de tres meses consecutivos para ser categorizados (Pizarro y Montecinos, 2004; NOAA, 2016).

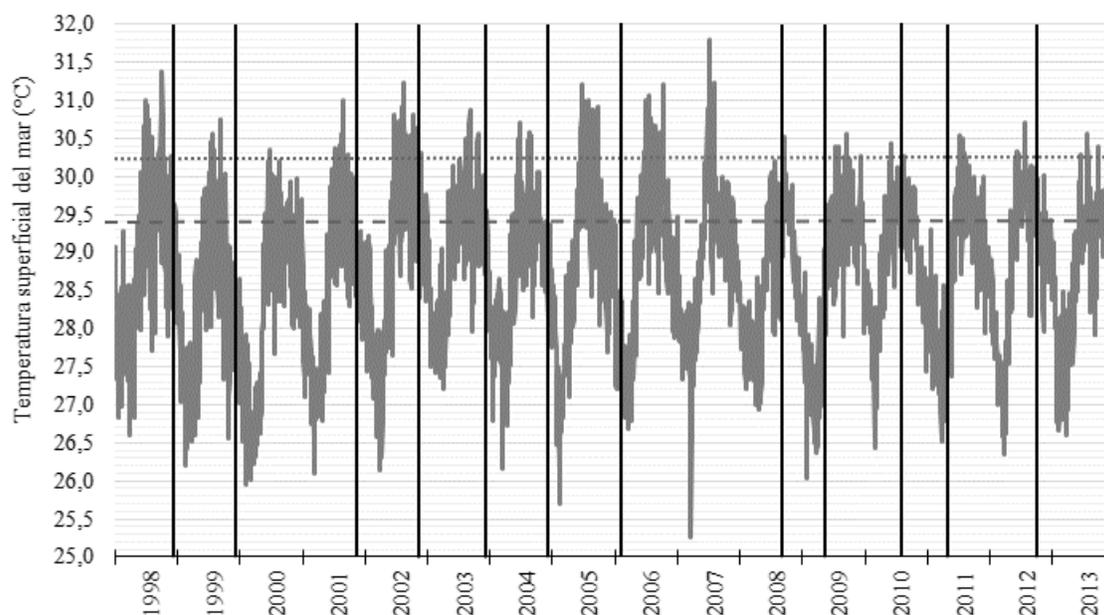
Con el fin de determinar las variables tanto ambientales como de salud coralina que mejor explican los cambios en la cobertura de coral en cada estación entre campañas de monitoreo, se identificó a nivel descriptivo su posible relación con los signos de deterioro y los eventos oceánicos extremos. Adicionalmente, se realizaron análisis de componentes principales (PCA) con el programa R, donde se consideraron las variables bióticas y oceanográficas simultáneamente, usando para las bióticas el cambio de la cobertura de coral en el tiempo, como pérdida o ganancia de cobertura con respecto al monitoreo anterior y la frecuencia (%) del blanqueamiento y enfermedades, y como oceanográficas, las descriptoras de eventos extremos (frecuencia por mes, valores máximos o mínimos, máximas duraciones). Se realizaron dos PCA, uno desde el 2002 hasta el 2013 donde se incluye el coeficiente de extinción de luz (Kd490) cuyos datos están disponibles desde el 2002, y otro desde 1998 a 2013 que excluye el Kd490. En el PCA, para el caso de 1998-2013 se eliminaron previamente las siguientes variables ambientales que estaban altamente correlacionadas con otras: número de días totales de temperatura extrema, número de días totales de caudal extremo, número máximo de días seguidos de caudal, número de días totales de altura extrema de ola y número máximo de días seguidos de Kd490. Para el caso del estudio de corto plazo (2013–2014) aunque no se pudo llevar a cabo las correlaciones debido a que sólo se cuenta con cuatro observaciones, para el PCA se incluyeron las variables ambientales de temperatura del mar, salinidad, precipitación, valores máximos de la tasa de sedimentación y altura de la ola dirección norte y sur.

## 3. Resultados

### 3.1 Evaluación histórica (1998 - 2013)

#### 3.1.1 Ocurrencia de eventos oceánicos extremos

Para la serie de temperatura superficial del mar, el percentil 95 para definir eventos extremos fue 30,2 °C. Con este umbral, se detectaron de 87 eventos extremos de temperatura entre 1998 y 2013, los cuales se presentaron en su mayoría entre junio y septiembre de cada año. Considerando los periodos entre monitoreos de SIMAC, el de enero a diciembre de 1998 fue el año con la mayor frecuencia de eventos extremos con 1,00 eventos/mes, seguido del período comprendido entre enero a diciembre de 2002 con 0,92 eventos/mes y el período comprendido entre febrero de 2006 y agosto de 2008 con 0,55 eventos/mes; este último período presentó la mayor temperatura (31,8 °C) y la mayor duración, con un caso de 10 días consecutivos con valores por encima del umbral, en julio de 2007 (Figura 3.1; Tabla 3.1).



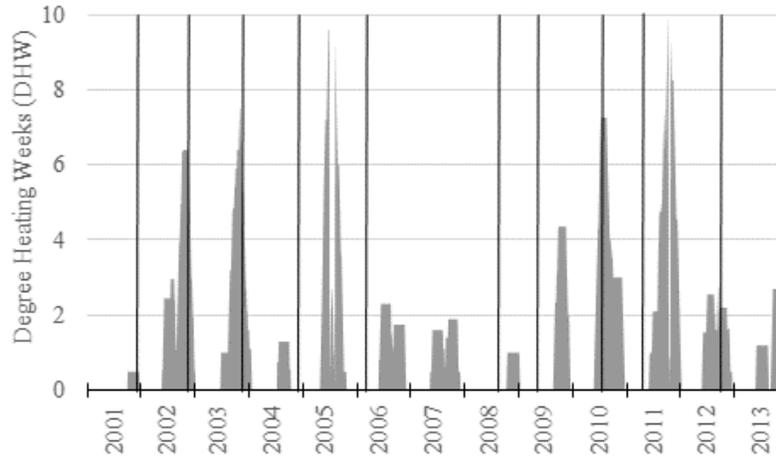
**Figura 3.1:** Valores diarios de la temperatura superficial del mar (°C) entre 1998 y 2013, obtenidos de la NOAA AVHRR v.2 interpolación óptima. Resolución espacial de 0,25° (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). La línea punteada corta muestra el percentil 95 (30,2 °C). La línea punteada larga

muestra el umbral de tolerancia al blanqueamiento de la NOAA *Coral Reef Watch* para las islas del Rosario (29,4 °C). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

La información del *Degree Heating Weeks* (DHW), obtenida de la NOAA *Coral Reef Watch* (2015), que provee una medida acumulada de intensidad de estrés térmico para los arrecifes de coral, aunque sólo tiene información disponible desde el 2001, mostró que los periodos con un DHW mayor a ocho y que puede causar un blanqueamiento coralino masivo, fueron 2005 en julio y septiembre y 2011 en octubre y noviembre. Los años con un DHW entre cuatro y ocho y que puede ocasionar un blanqueamiento significativo fueron 2002, 2003, 2009, 2010 y 2013 (Figura 3.2).

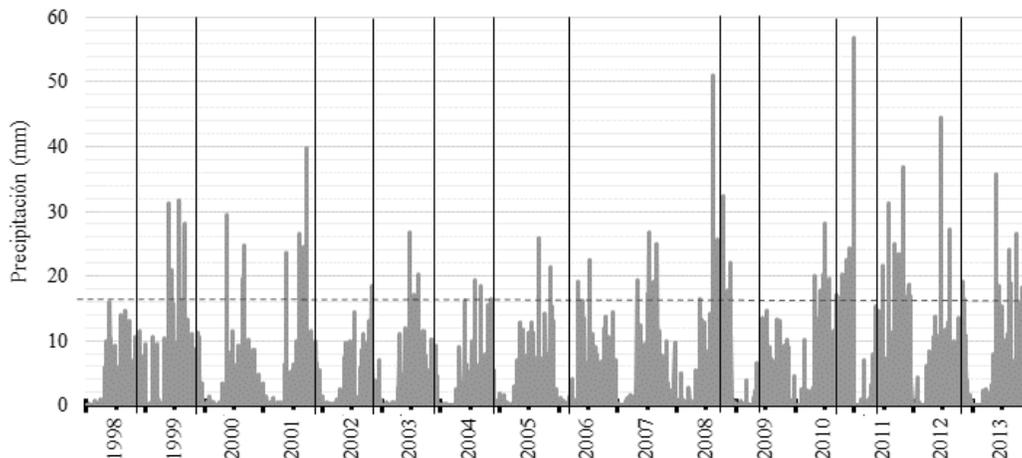
**Tabla 3.1:** Valor máximo, número de eventos de extremos de temperatura superficial del mar por mes y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo) teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC desde 1998 hasta 2013 y el percentil 95 (30,2 °C). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo (°C)	Eventos por mes	No. días totales	Máximo No. días seguidos
1 ene - 18 dic 1998	12	31,38	<b>1,00</b>	30	4
19 dic 1998 - 7 dic 1999	12	30,75	0,33	14	7
8 dic 1999 - 7 dic 2001	24	30,99	0,33	15	3
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	31,23	<b>0,92</b>	44	7
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	30,88	0,33	10	4
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	30,7	0,42	16	5
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	31,22	0,46	36	8
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	<b>31,80</b>	0,55	66	<b>10</b>
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	30,52	0,33	10	5
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	30,55	0,40	11	5
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	30,44	0,20	4	2
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	30,71	0,42	8	3
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	30,55	0,29	8	3



**Figura 3.2:** Acumulación de estrés térmico en semanas, índice DHW, calculado para islas del Rosario con datos satelitales dos veces a la semana por la NOAA *Coral Reef Watch* desde 2001 hasta 2013, resolución 50 km (NOAA *Coral Reef Watch*, 2015) (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

Para la precipitación, teniendo en cuenta el percentil 99 de 17,04 mm diarios, se registró un total de 62 eventos entre 1998 y 2013, los cuales se presentaron entre junio y diciembre con una mayor concentración entre julio y septiembre. Considerando los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC, entre agosto de 2010 y mayo de 2011 se presentó la mayor frecuencia de eventos extremos (0,60 eventos/mes), así como la mayor intensidad (56,72 mm en diciembre de 2010), seguido del período comprendido entre agosto 2008 y mayo de 2009 con 0,56 eventos/mes especialmente entre octubre y noviembre de 2008 (Figura 3.3; Tabla 3.2).

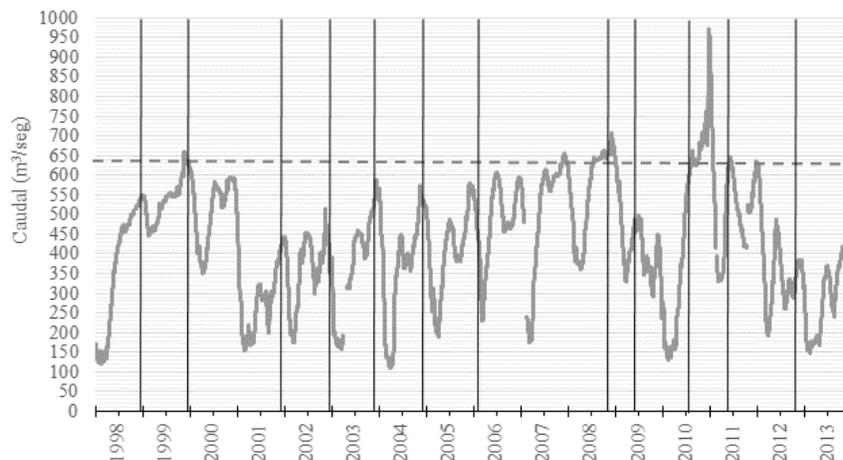


**Figura 3.3:** Valores de precipitación acumulada diaria (mm) obtenidos de la base TRMM 3B42 v.7 (datos cada 6 h) entre 1998 y 2013. Resolución espacial de 0,25° (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). La línea punteada muestra el umbral de precipitación (percentil 99=17,04 mm). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

**Tabla 3.2:** Valor máximo, número de eventos de extremos precipitación por mes y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo) teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC desde 1998 hasta 2013 y el percentil 99 (17,04 mm). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo (mm)	Eventos por mes	No. días totales	Máximo No. días seguidos
1 ene - 18 dic 1998	12	15,93	0,00	0	0
19 dic 1998 - 7 dic 1999	12	31,62	0,33	4	1
8 dic 1999 - 7 dic 2001	24	39,87	0,33	8	1
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	18,47	0,08	1	1
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	26,66	0,33	4	1
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	19,43	0,17	2	1
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	25,8	0,15	2	1
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	51,09	0,26	8	1
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	32,43	0,56	5	1
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	28,04	0,33	5	1
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	<b>56,72</b>	<b>0,60</b>	6	1
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	44,54	0,33	4	1
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	35,71	0,50	7	1

En cuanto al caudal del Canal del Dique, teniendo en cuenta el percentil 95 de 639 m<sup>3</sup>/s, se registró un total de 14 eventos entre 1998 y 2013, los cuales fueron más comunes en agosto y, entre octubre y diciembre. Asimismo, la ocurrencia y frecuencia de eventos extremos fue mayor a partir de 2006. Considerando los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC, el período entre agosto de 2010 y mayo de 2011 presentó la mayor frecuencia de eventos extremos (0,50 eventos/mes), así como la mayor intensidad (970,1 m<sup>3</sup>/s) y duración (91 días consecutivos), especialmente de octubre a diciembre de 2010, seguido del período comprendido entre agosto de 2008 y mayo de 2009 con 0,22 eventos/mes, incluyendo un período de 53 días seguidos en caudal extremo desde septiembre de 2008



**Figura 3.4:** Valores medios diarios de caudal (m<sup>3</sup>/s) del Canal del Dique desde 1998 hasta 2013, obtenidos del IDEAM, estación Santa Helena 2 (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). La línea

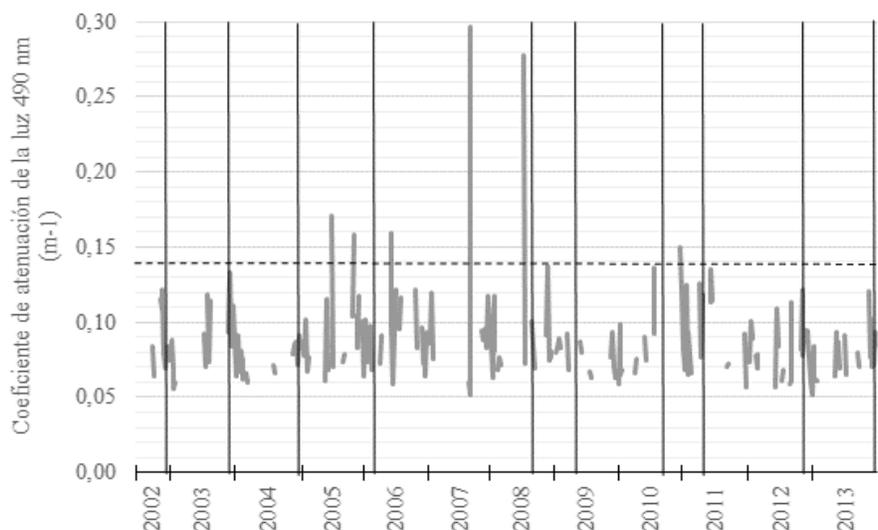
punteada muestra el umbral de precipitación (percentil 95=639 m<sup>3</sup>/s). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

**Tabla 3.3:** Valor máximo, número de eventos de extremos del caudal del canal de Dique por mes y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo) , teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC desde 1998 hasta 2013 y el percentil 95 (639 m<sup>3</sup>/s). En negrilla se indican los valores más altos

Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Eventos por mes	No. días totales	Máximo No. días seguidos
1 ene - 18 dic 1998	12	0,0	0,00	0	0
19 dic 1998 - 7 dic 1999	12	660,3	0,08	6	6
8 dic 1999 - 7 dic 2001	24	0,0	0,00	0	0
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	0,0	0,00	0	0
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	0,0	0,00	0	0
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	0,0	0,00	0	0
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	0,0	0,00	0	0
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	657,3	0,13	42	23
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	706,8	0,22	97	53*
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	0,0	0,00	0	0
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	<b>970,1</b>	<b>0,50</b>	134	<b>91</b>
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	0,0	0,00	0	0
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	0,0	0,00	0	0

\*El intervalo de duración de este evento se inició desde finales de agosto de 2008.

Para el coeficiente de atenuación difusa a 490 nm, teniendo en cuenta el percentil 95 de 0,14 m<sup>-1</sup>, se registró un total de 13 eventos extremos entre 2002 y 2013, los cuales fueron más comunes en junio y entre septiembre y noviembre. Considerando los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC, el comprendido entre febrero de 2006 y agosto de 2008 presentó la mayor frecuencia de eventos extremos (0,23 eventos/mes), así como la mayor intensidad (0,30 m<sup>-1</sup>, en septiembre de 2007), seguido del período comprendido entre agosto de 2010 y mayo de 2011 con 0,20 eventos/mes (Figura 3.5; Tabla 3.4).



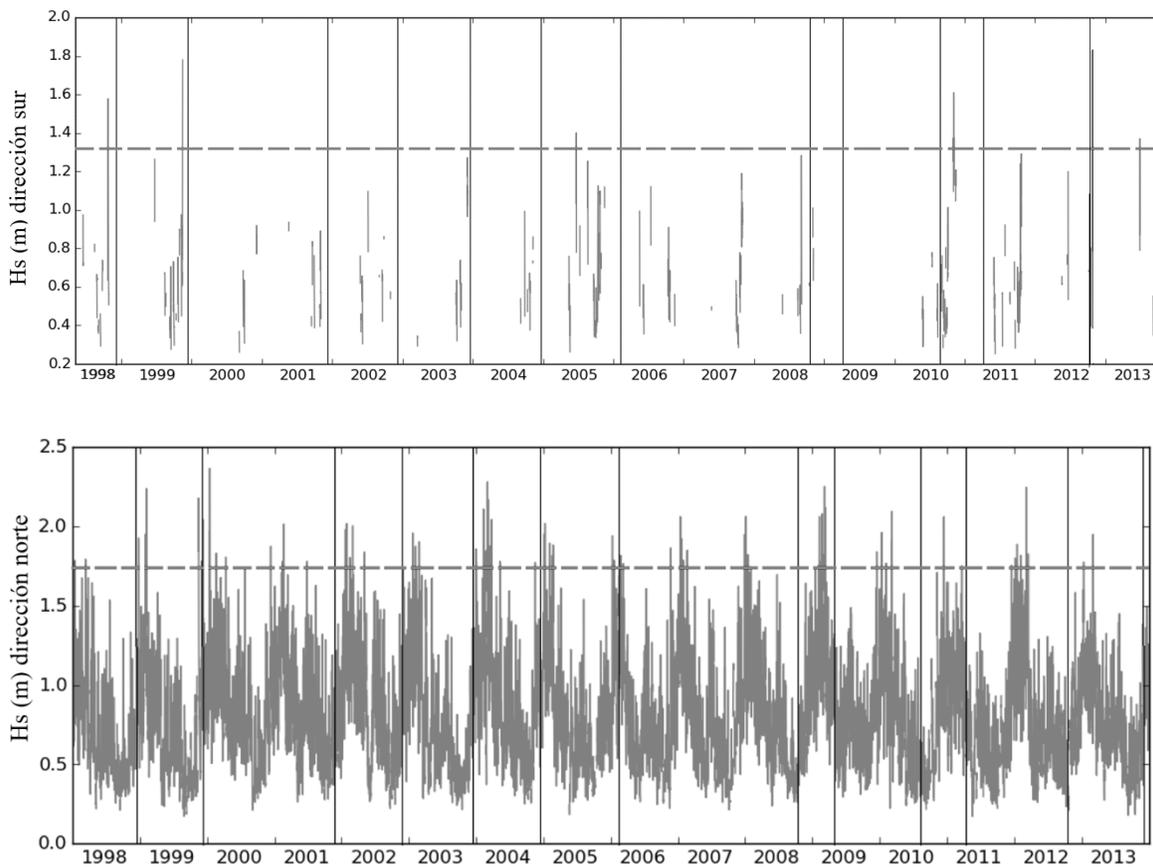
**Figura 3.5:** Valores semanales del coeficiente de atenuación difusa a 490 nm ( $\text{m}^{-1}$ ), obtenidos de la base Aqua MODIS entre 2002 y 2013. Resolución espacial de 4 km (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). La línea punteada muestra el umbral (percentil 95= $0,14 \text{ m}^{-1}$ ). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

**Tabla 3.4:** Valor máximo, número de eventos extremos del coeficiente de atenuación difusa a 490 nm por mes y su duración en semanas (total semanas extremas en el período y máximo número de semanas seguidas de un evento extremo), teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC desde 2002 hasta 2013 y el percentil 95 ( $0,14 \text{ m}^{-1}$ ). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo ( $\text{m}^{-1}$ )	Eventos por mes	No. semanas totales	Máximo No. semanas seguidas
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	0,00	0,00	0	0
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	0,21	0,08	1	1
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	0,00	0,00	0	0
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	0,17	0,15	2	1
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	<b>0,30</b>	<b>0,23</b>	7	1
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	0,00	0,00	0	0
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	0,00	0,00	0	0
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	0,17	0,20	2	1
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	0,20	0,17	2	1
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	0,00	0,00	0	0

En cuanto al oleaje, la altura de la ola proveniente del sur, que afecta directamente los arrecifes de coral evaluados, teniendo en cuenta el percentil 99 de 1,32 m, se registró un total de 7 eventos extremos entre 1998 y 2013, los cuales se concentraron en junio, octubre y noviembre. Considerando los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC, el periodo entre octubre de 2012 y diciembre de 2013, registró la mayor frecuencia de eventos ( $0,14$  eventos/mes) y la más alta intensidad ( $1,83 \text{ m}$  en noviembre de 2012), seguido del período entre agosto de 2010 y mayo de 2011 con  $0,10$

eventos/mes y la mayor duración de tres días continuos de oleaje extremo en noviembre de 2010 (Figura 3.6; Tabla 3.5).



**Figura 3.6:** Valores de la altura de la ola significativa ( $H_s$  en m) en provenientes del sur (panel superior) y del norte (panel inferior). La línea punteada muestra el umbral (percentil 99=1,32 m para el sur, =1,61 m para el norte). Información obtenida de la base de datos de re-análisis ERA INTERIM, cada 6 h, desde 1998 hasta 2013. Resolución espacial de  $0,25^\circ$  (ver Figura 2.1 para la ubicación espacial). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el monitoreo SIMAC.

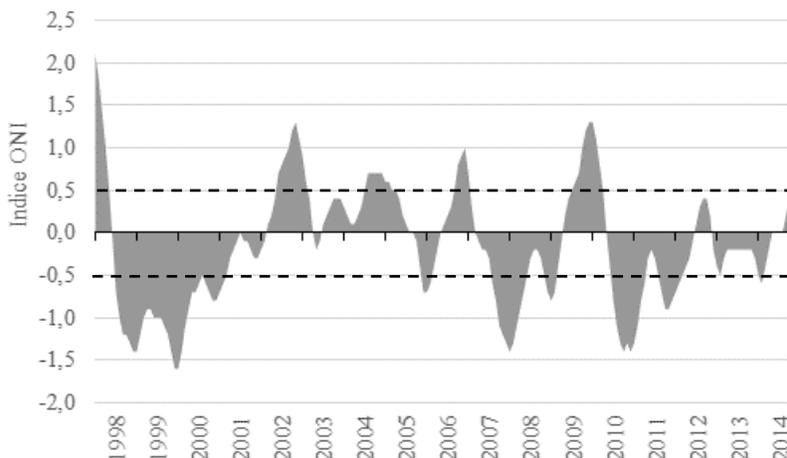
Para la altura de la ola proveniente del norte, teniendo en cuenta el percentil 99 de 1,61 m, se registró un total de 151 eventos extremos entre 1998 y 2013, los cuales fueron más comunes de febrero a marzo y diciembre. Considerando los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC, el comprendido entre agosto de 2008 y mayo de 2009 registró el mayor número de eventos (1,56 eventos/mes) y la mayor duración de tres días continuos en febrero de 2009, seguido de 2004 con 1,33 eventos/mes. La mayor intensidad se presentó en el periodo de diciembre de 1999 a diciembre de 2001 con 2,37 m en enero de 2000 (Figura 3.6; Tabla 3.5).

**Tabla 3.5:** Valor máximo, número de eventos de extremos de altura de la ola significativa (m) en las direcciones sur y norte por mes y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo), teniendo en los periodos en que fue realizado el monitoreo SIMAC desde 1998 hasta 2013 y el percentil 99 (1,32 m y 1,61 m, respectivamente para oleaje del sur y norte). En negrilla se indican los valores más altos.

Dirección sur					
Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo (m)	Eventos por mes	No. días totales	Máximo No. días seguidos
1 ene - 18 dic 1998	12	1,58	0,08	1	1
19 dic 1998 - 7 dic 1999	12	1,78	0,08	1	1
8 dic 1999 - 7 dic 2001	24	1,34	0,04	1	1
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	0	0,00	0	0
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	0	0,00	0	0
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	0	0,00	0	0
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	1,4	0,08	1	1
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	0	0,00	0	0
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	0	0,00	0	0
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	0	0,00	0	0
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	1,61	0,10	3	<b>3</b>
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	0	0,00	0	0
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	<b>1,83</b>	<b>0,14</b>	3	2
Dirección norte					
Periodo	Meses entre monitoreos	Máximo (m)	Eventos por mes	No. días totales	Máximo No. días seguidos
1 ene - 18 dic 1998	12	1,93	0,58	7	1
19 dic 1998 - 7 dic 1999	12	2,24	0,50	7	1
8 dic 1999 - 7 dic 2001	24	<b>2,37</b>	0,75	19	2
8 dic 2001 - 12 dic 2002	12	2,02	1,17	14	1
13 dic 2002 - 3 dic 2003	12	1,96	1,08	13	1
4 dic 2003 - 7 dic 2004	12	2,28	1,33	18	2
8 dic 2004 - 6 feb 2006	13	2,02	0,92	12	1
7 feb 2006 - 30 ago 2008	31	2,06	0,74	24	2
31 ago 2008 - 21 may 2009	9	2,25	<b>1,56</b>	19	<b>3</b>
22 may 2009 - 10 ago 2010	15	2,1	0,53	9	2
11 ago 2010 - 10 may 2011	10	1,75	0,50	5	1
11 may 2011 - 21 oct 2012	12	2,25	1,08	11	1
22 oct 2012 - 3 dic 2013	14	1,78	0,14	1	1

Con relación al ENSO, según la información de la NOAA (2016) a través del índice ONI, se presentó un evento El Niño en la categoría muy fuerte en 1998, moderado en 2002 y 2009 y débil en 2004-2005 y 2007. En cuanto a los eventos de La Niña, se registraron eventos moderados en 1999-2000,

en 2007-2008 y 2010 y uno débil en 2011 (Figura 3.7). Se presentó una asociación entre la intensidad del fenómeno de El Niño y la frecuencia de los eventos extremos de la temperatura superficial del mar. Sin embargo, no se observó una relación con la intensidad y duración de las temperaturas extremas. Por su parte, los mayores eventos extremos de precipitación, caudal y turbidez ocurrieron durante niveles moderados del fenómeno de La Niña.



**Figura 3.7:** Registro del *Oceanic Niño Index* (ONI) entre 1998 y 2014 que mide la presencia e intensidad de los eventos Niño (datos positivos) y Niña (datos negativos). Información obtenida de la NOAA (2016). La línea punteada ( $\pm 0,5$  °C de anomalía) se considera como umbral para la ocurrencia de El Niño (+) o La Niña (-). Se clasifican como débil ( $\pm 0,5$  a  $0,9$ ) °C, moderado ( $\pm 1,0$  a  $1,4$ ) °C y fuerte ( $\pm 1,5$  a  $1,9$ ) °C.

### 3.1.2 Cobertura y salud coralina

De acuerdo con la información suministrada por el SIMAC (INVEMAR, 2014) y las observaciones propias, la formación coralina de Tesoro está conformada principalmente por especies de coral de tipo masivo, siendo el género *Orbicella* el más abundante. La estación somera presenta una cobertura de coral cercana a 45 % e históricamente ha registrado las abundancias más altas con respecto a las demás estaciones, mientras que la estación media presenta una cobertura cercana al 25 %, que son históricamente los más bajos. En la formación coralina de Pavitos los corales cubren cerca del 30 % del sustrato y está conformada principalmente por especies de coral de tipo foliáceo, siendo la especie *Undaria tenuifolia* la más abundante en ambas profundidades.

En general, durante el período de monitoreo de SIMAC analizado, se observó en el sector somero de ambas estaciones un descenso en la cobertura coralina entre diciembre de 2004 y agosto de 2010, con una reducción cercana a 11 %, mientras que en Tesoro medio se observó un descenso entre febrero de 2006 y agosto de 2008, con una reducción en la cobertura de coral de 5,6 %. En el caso de Pavitos medio, se registró la mayor pérdida de cobertura de coral (17,7 %), entre diciembre de 2001 y mayo de 2009, y posteriormente se observó un descenso más leve de agosto de 2010 a mayo de 2011 con una reducción del 5,0 %. No obstante, todas las estaciones incrementaron su cobertura a partir de diciembre de 2013, entre 4,2 y 10,5 %, especialmente en Pavitos (Figura 3.8).

En cuanto a la salud coralina, en general el blanqueamiento fue el signo de mayor frecuencia en el área de estudio, especialmente en el período entre diciembre de 2004 y febrero de 2006, seguido del período entre enero y diciembre de 1998, que registraron una mayor frecuencia en las estaciones someras, y los presentados en los periodos de mayo de 2011 a octubre de 2012 y entre octubre de 2012 y diciembre de 2013 en ambas estaciones medias. Asimismo, las enfermedades afectaron a las colonias coralinas particularmente en entre agosto de 2008 y mayo de 2009 con una mayor intensidad en los arrecifes de Pavitos, debido a la enfermedad de plaga blanca (Figura 3.8).

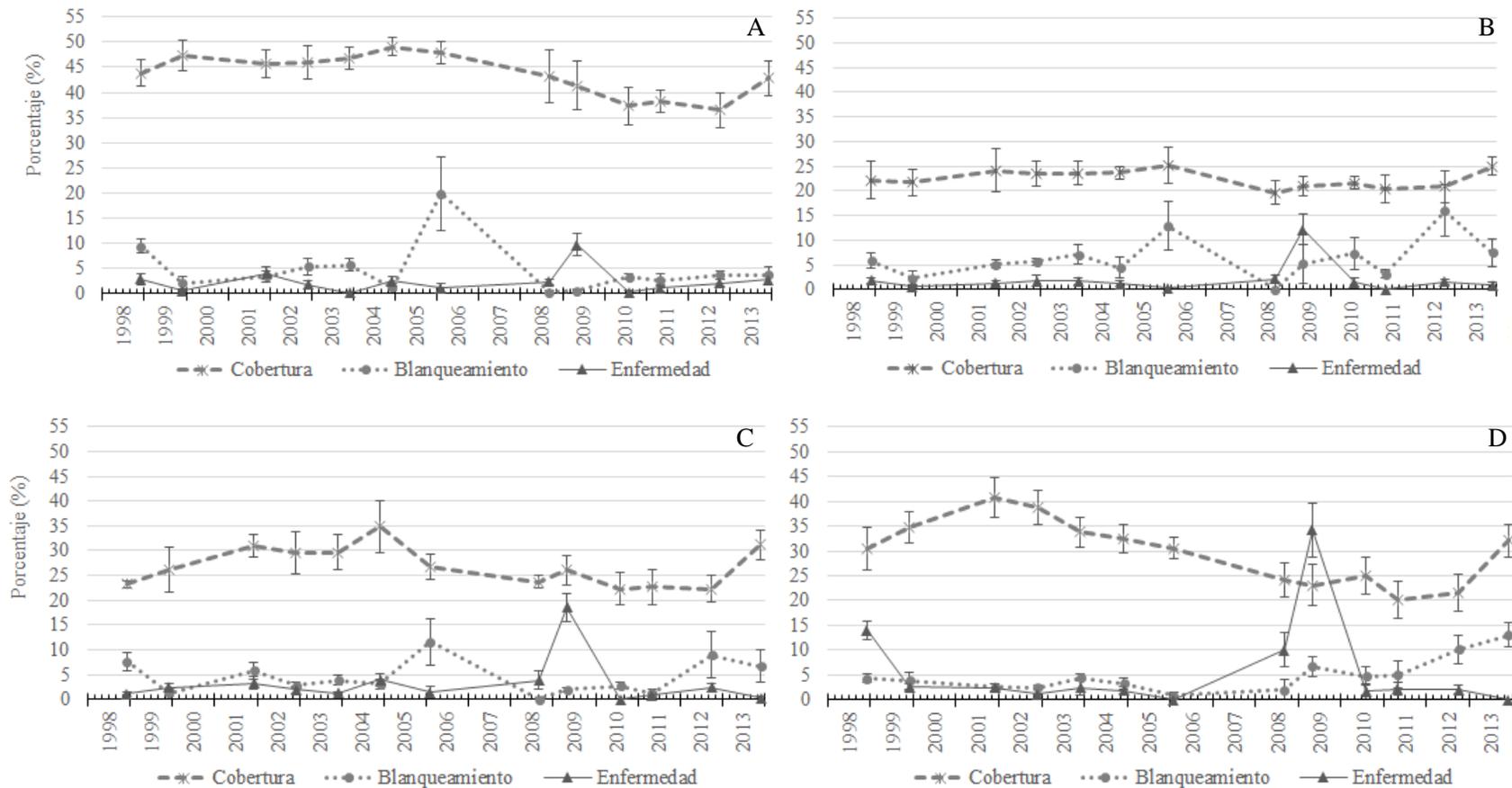
### **3.1.3 Análisis de componentes principales**

En el primer análisis, tomando información entre 1998 y 2013 y sin incluir el Kd490, se observó que, excepto en Pavitos medio, la disminución de la cobertura de coral se asoció con el aumento de la temperatura superficial del mar y el caudal del Canal del Dique, principalmente con la intensidad (valores máximos).

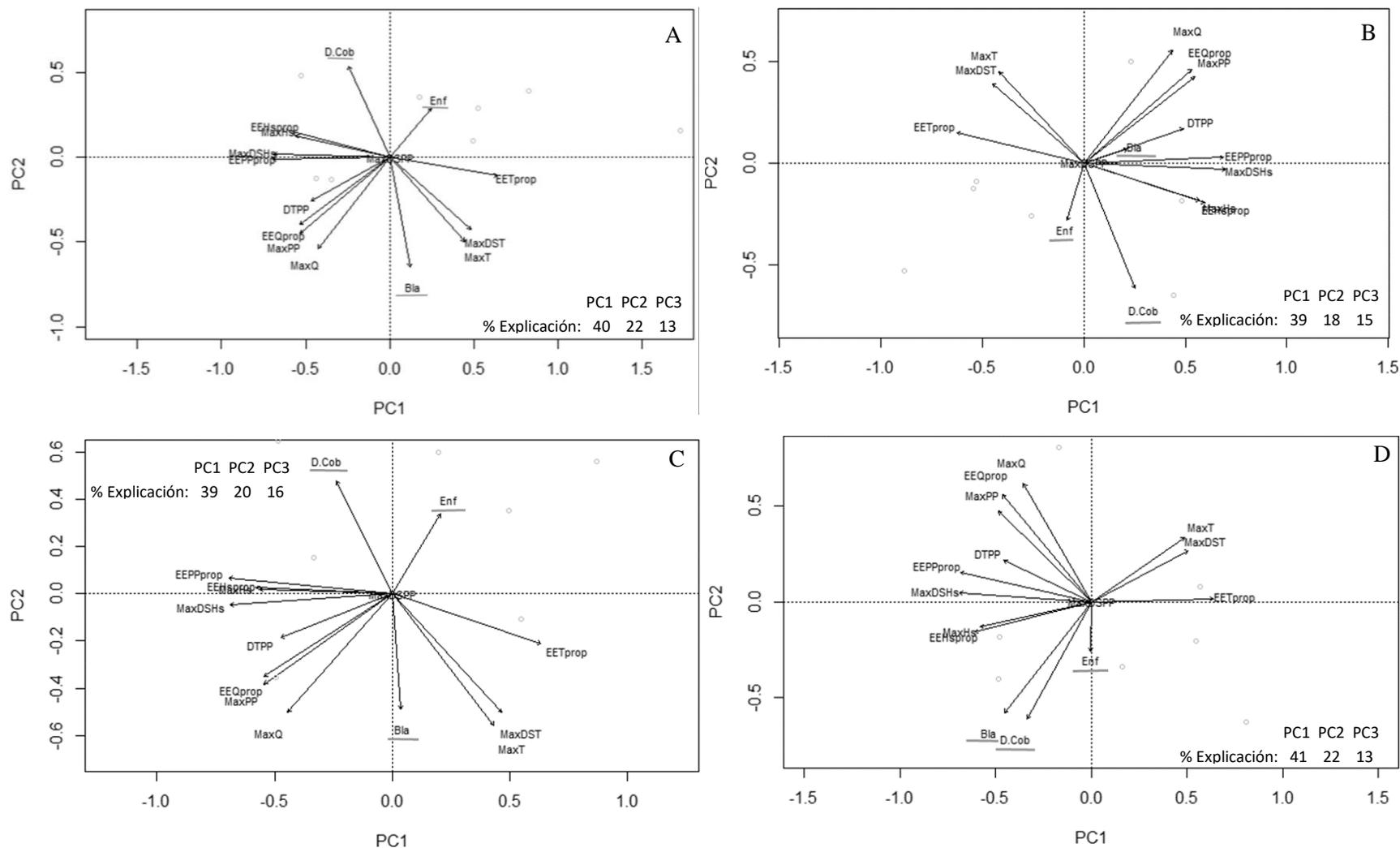
Adicionalmente, en las estaciones someras la pérdida de cobertura estuvo asociada con el incremento del blanqueamiento. En Pavitos medio la disminución de cobertura se asoció con mayores caudales.

En el análisis realizado entre 2002 y 2013, para incluir el Kd490, en todas las estaciones la reducción de la cobertura de coral estuvo asociada mayores atenuaciones y temperaturas; además, se mostró de nuevo que la pérdida de cobertura en Pavitos medio estuvo relacionada nuevamente con los incrementos en caudal (Figura 3.9, Figura 3.10; Tabla 3.6, Tabla 3.7).





**Figura 3.8:** Cobertura de coral y frecuencia relativa de enfermedades y blanqueamiento ( $\pm 1$  error estándar) obtenida de las bases de datos del SIMAC durante sus monitoreos entre 1998 y 2013 en las estaciones evaluadas en las islas del Rosario (INVEMAR, 2014). A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio.

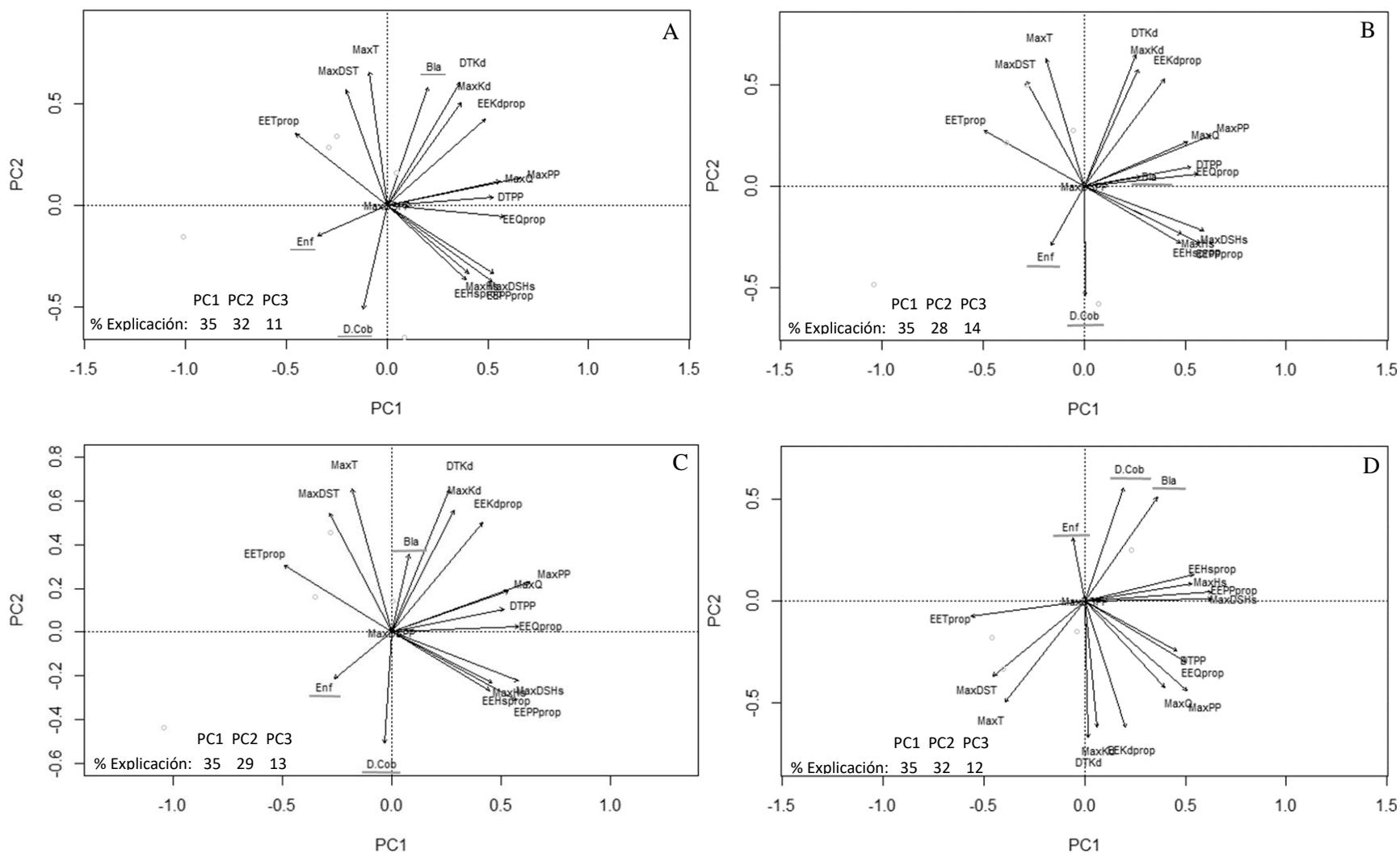


**Figura 3.9:** Análisis de componentes principales que reúne la información biológica (subrayado) y ambiental (variables descriptoras de eventos extremos) entre 1998 y 2013. Los puntos indican la posición en el espacio de los dos primeros componentes según los valores de las variables en cada período entre muestreos de SIMAC. Las flechas son los vectores propios, que indican la dirección en la que cada variable está aumentando sobre el promedio. Los tres primeros componentes

explican más del 72% de la varianza de los datos. D.cob: cambio de cobertura de coral. Bla: blanqueamiento. Enf: enfermedades coralinas. EE: número de eventos extremos. Q: caudal, PP: precipitación. Hs: altura de la ola dirección sur. MaxDS: máximo número de días seguidos. DT: número de días totales. Este análisis no incluye el coeficiente de atenuación a 490 nm (Kd490). A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio.

**Tabla 3.6:** Coeficientes de correlación entre las variables biológicas y ambientales (1998 a 2013) sin el coeficiente de atenuación a 490 nm (Kd490) y los ejes de los tres primeros componentes principales. En negrilla se muestran los valores más altos independientemente de su signo.

Variables	Tesoro somero			Tesoro medio			Pavitos somero			Pavitos medio		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Cambio de cobertura	-0,29	<b>0,63</b>	-0,39	0,29	<b>-0,73</b>	0,25	-0,28	<b>0,56</b>	-0,54	-0,28	<b>0,56</b>	-0,54
Blanqueamiento	0,14	<b>-0,76</b>	-0,30	0,25	0,08	<b>0,60</b>	0,04	<b>-0,57</b>	<b>-0,58</b>	0,04	<b>-0,57</b>	<b>-0,58</b>
Enfermedades	0,29	0,34	0,14	-0,10	-0,33	-0,39	0,24	0,40	0,16	0,24	0,40	0,16
No. Eventos extremos/mes de temperatura	<b>0,75</b>	-0,13	-0,16	<b>-0,74</b>	0,18	0,26	<b>0,74</b>	-0,25	-0,15	<b>0,74</b>	-0,25	-0,15
Máxima temperatura	0,52	<b>-0,58</b>	-0,44	-0,49	<b>0,53</b>	0,53	0,51	<b>-0,66</b>	-0,26	0,51	<b>-0,66</b>	-0,26
Máximo No. de días seguidos de temperatura	<b>0,57</b>	-0,50	-0,35	<b>-0,53</b>	0,46	0,40	<b>0,55</b>	-0,59	-0,23	<b>0,55</b>	-0,59	-0,23
No. Eventos extremos/mes de caudal	<b>-0,63</b>	-0,47	0,34	<b>0,62</b>	0,54	-0,29	<b>-0,64</b>	-0,41	0,43	<b>-0,64</b>	-0,41	0,43
Máximo caudal	-0,50	<b>-0,63</b>	0,20	0,51	<b>0,65</b>	-0,17	-0,52	<b>-0,59</b>	0,32	-0,52	<b>-0,59</b>	0,32
No. Eventos extremos/mes de precipitación	<b>-0,82</b>	-0,01	0,34	<b>0,81</b>	0,03	-0,36	<b>-0,82</b>	0,08	0,32	<b>-0,82</b>	0,08	0,32
Máxima precipitación	<b>-0,63</b>	-0,53	0,05	<b>0,64</b>	0,50	0,00	<b>-0,64</b>	-0,45	0,19	<b>-0,64</b>	-0,45	0,19
Días totales de precipitación	-0,55	-0,30	-0,10	0,58	0,20	0,08	-0,56	-0,22	-0,01	-0,56	-0,22	-0,01
No. Eventos extremos/mes de altura de ola dirección sur	<b>-0,68</b>	0,18	-0,55	<b>0,70</b>	-0,23	0,51	<b>-0,68</b>	0,03	-0,59	<b>-0,68</b>	0,03	-0,59
Máxima altura de ola dirección sur	<b>-0,66</b>	0,15	-0,60	<b>0,67</b>	-0,22	0,49	<b>-0,66</b>	0,02	-0,59	<b>-0,66</b>	0,02	-0,59
Máximo No. de días seguidos de altura de ola dirección sur	<b>-0,81</b>	0,03	-0,29	<b>0,82</b>	-0,04	0,27	<b>-0,81</b>	-0,06	-0,29	<b>-0,81</b>	-0,06	-0,29



**Figura 3.10:** Análisis de componentes principales que reúne la información biológica (subrayado) y ambiental (variables descriptoras de eventos extremos) entre 2002 y 2013, incluyendo el coeficiente de atenuación a 490 nm (Kd490). Los tres primeros componentes explican más del 73% de la varianza de los datos. D.cob:

cambio de cobertura de coral. Bla: blanqueamiento. Enf: enfermedades coralinas. Kd: kd490. EE: número de eventos extremos. Q: caudal, PP: precipitación. Hs: altura de la ola dirección sur. MaxDS: máximo número de días seguidos. DT: número de días totales.

**Tabla 3.7:** Coeficientes de correlación entre las variables biológicas y ambientales (2002 a 2013), incluyendo el coeficiente de atenuación a 490 nm (Kd490) y los ejes de los seis primeros componentes principales en Tesoro somero. En negrilla se muestran los valores más altos independientemente de su signo.

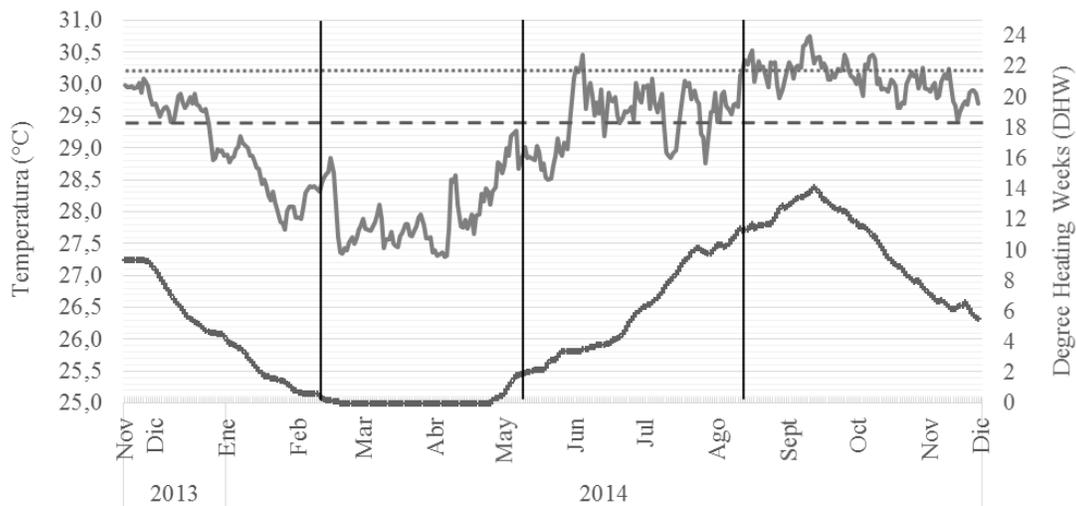
Variables	Tesoro somero			Tesoro medio			Pavitos somero			Pavitos medio		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Cambio de cobertura	-0,14	<b>-0,60</b>	0,31	0,00	<b>-0,64</b>	0,39	0,00	<b>-0,64</b>	0,39	0,23	<b>0,65</b>	0,25
Blanqueamiento	0,24	<b>0,69</b>	0,08	0,33	0,05	<b>0,63</b>	0,33	0,05	<b>0,63</b>	0,42	<b>0,60</b>	0,26
Enfermedades	-0,40	-0,18	-0,10	-0,19	-0,35	-0,21	-0,19	-0,35	-0,21	-0,07	0,37	<b>-0,43</b>
No. Eventos extremos/mes de temperatura	<b>-0,53</b>	0,42	0,16	<b>-0,58</b>	0,33	0,19	<b>-0,58</b>	0,33	0,19	<b>-0,66</b>	-0,09	0,20
Máxima temperatura	-0,10	<b>0,77</b>	0,30	-0,22	<b>0,74</b>	0,32	-0,22	<b>0,74</b>	0,32	-0,47	<b>-0,58</b>	0,34
Máximo No. de días seguidos de temperatura	-0,24	<b>0,67</b>	0,20	-0,34	<b>0,61</b>	0,22	-0,34	<b>0,61</b>	0,22	<b>-0,53</b>	-0,44	0,20
No. Eventos extremos/mes de caudal	<b>0,68</b>	-0,07	-0,30	<b>0,66</b>	0,07	-0,38	<b>0,66</b>	0,07	-0,38	<b>0,59</b>	-0,35	-0,31
Máximo caudal	<b>0,66</b>	0,14	-0,35	<b>0,60</b>	0,26	-0,38	<b>0,60</b>	0,26	-0,38	0,47	<b>-0,50</b>	-0,36
No. Eventos extremos/mes de precipitación	<b>0,61</b>	-0,44	-0,30	<b>0,67</b>	-0,33	-0,30	<b>0,67</b>	-0,33	-0,30	<b>0,74</b>	0,05	-0,34
Máxima precipitación	<b>0,78</b>	0,16	-0,08	<b>0,74</b>	0,29	-0,10	<b>0,74</b>	0,29	-0,10	<b>0,60</b>	-0,52	-0,07
Días totales de precipitación	<b>0,62</b>	0,05	-0,08	<b>0,62</b>	0,11	0,03	<b>0,62</b>	0,11	0,03	<b>0,54</b>	-0,29	-0,11
No. Eventos extremos/mes de altura de ola dirección sur	0,46	-0,43	<b>0,56</b>	<b>0,56</b>	-0,33	0,50	<b>0,56</b>	-0,33	0,50	<b>0,64</b>	0,15	0,51
Máxima altura de ola dirección sur	0,48	-0,39	<b>0,56</b>	<b>0,57</b>	-0,28	0,46	<b>0,57</b>	-0,28	0,46	<b>0,63</b>	0,10	0,51
Máximo No. de días seguidos de altura de ola dirección sur	<b>0,62</b>	-0,39	0,33	<b>0,70</b>	-0,26	0,24	<b>0,70</b>	-0,26	0,24	<b>0,74</b>	0,01	0,29
No. eventos extremos/mes de kd490	<b>0,57</b>	0,50	0,12	0,47	<b>0,62</b>	0,02	0,47	<b>0,62</b>	0,02	0,24	<b>-0,73</b>	0,17
Máximo Kd490	0,43	<b>0,59</b>	0,08	0,32	<b>0,68</b>	0,02	0,32	<b>0,68</b>	0,02	0,07	<b>-0,73</b>	0,15
No. días totales de Kd490	0,43	<b>0,71</b>	0,11	0,30	<b>0,76</b>	0,11	0,30	<b>0,76</b>	0,11	0,02	<b>-0,79</b>	0,14

## 3.2 Evaluación anual (noviembre 2013 – noviembre 2014)

### 3.2.1 Ocurrencia de eventos oceánicos extremos

Para el ciclo anual de la temperatura del mar de fondo a 8 m de profundidad en isla Tesoro, y usando el percentil 95 histórico de 30,2 °C como umbral de extremos (ver Figura 3.1), en el área de estudio se registró un total de 11 eventos extremos durante 41 días, siendo el período 12 de agosto a 22 de noviembre de 2014 el mes con el mayor número de eventos extremos separados (3,0 eventos/mes). En ese período ocurrió la mayor temperatura (30,8 °C) y la mayor duración de temperaturas extremas seguidas (14 días, en septiembre). Se destaca que esta frecuencia y duración alcanzó valores superiores a los registrados en la evaluación histórica (Tabla 3.1). Por el contrario, agosto sólo registró un total de dos eventos extremos (Figura 3.11; Tabla 3.8).

Asimismo, el índice DHW, mostró que los meses que registraron un valor mayor a ocho semanas fueron noviembre de 2013, agosto y octubre de 2014. Los meses con un DHW entre cuatro y ocho y que puede ocasionar un blanqueamiento significativo fueron diciembre de 2013, junio, julio y noviembre de 2014 (Figura 3.11).

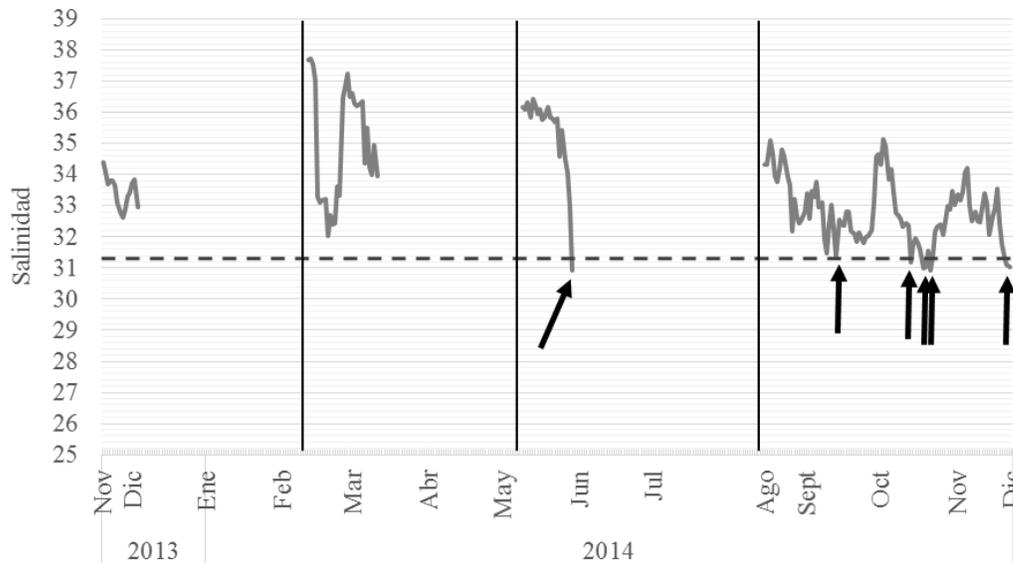


**Figura 3.11:** Promedios diarios de la temperatura del mar (°C) entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014, obtenidos con un sensor electrónico (hobo Onset) ubicado a 8 m de profundidad en la estación de Tesoro somero. En el eje Y de la derecha muestra la acumulación de estrés térmico en semanas, índice DHW diario calculado por la NOAA *Coral Reef Watch* (línea oscura en cruces) con datos satelitales para Colombia, resolución 5 km (NOAA Coral Reef Watch, 2013). La línea punteada corta muestra el percentil 95 histórico (30,2 °C). La línea punteada larga muestra el umbral de tolerancia al blanqueamiento de la NOAA *Coral Reef Watch* para las islas del Rosario (29,4 °C). Las líneas verticales indican el momento en que fue realizado el muestreo.

**Tabla 3.8:** Valor máximo, número de eventos de extremos de la temperatura superficial del mar y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo) teniendo en cuenta el período entre los muestreos realizados de noviembre de 2013 a noviembre de 2014 y el percentil 95 (30,2 °C). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Máximo (°C)	Total Eventos	No. días totales	Máximo No. días seguidos
19 noviembre 2013 - 8 febrero 2014	30,1	0	-	-
9 febrero - 7 mayo	29,3	0	-	-
8 mayo - 12 agosto	30,5	2	3	2
13 agosto - 22 noviembre	<b>30,8</b>	<b>9</b>	<b>41</b>	<b>14</b>

Para la salinidad, aunque hubo varios vacíos de información, teniendo en cuenta los valores por debajo del percentil 5 de 31,4 como umbral para los extremos mínimos, se registró un aproximado de seis eventos extremos, siendo el período comprendido entre el 12 de agosto y el 22 de noviembre de 2014 el de mayor número de eventos extremos (5), durante el mayor número de días (9 días) dos de ellos seguidos en octubre. Por el contrario, el periodo del 12 de mayo al 8 de 12 de agosto sólo registró un evento a finales de mayo pero fue el de menor salinidad con 30,9 (Figura 3.12; Tabla 3.9).

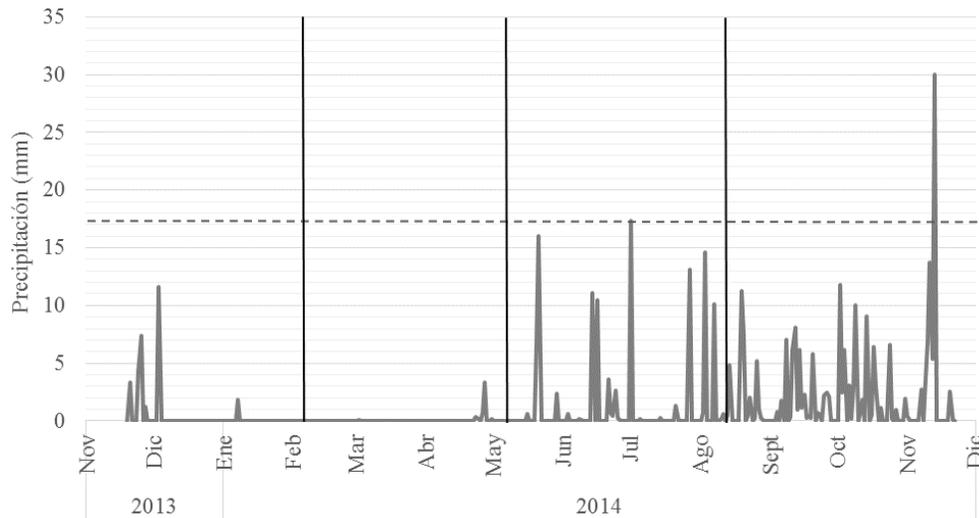


**Figura 3.12:** Promedio diarios de salinidad entre noviembre de 2013 a noviembre de 2014, obtenidos con un sensor electrónico (DST CTD, SeaStar) ubicado a 8 m de profundidad en la estación de Tesoro somero. La línea punteada muestra el umbral inferior de salinidad (percentil 5 = 31,4). Las flechas indican los momentos en los que se registraron los eventos extremos. Las líneas verticales muestran indican el momento en que fue realizado el muestreo.

**Tabla 3.9:** Valor mínimo, número de eventos de extremos de salinidad por mes y su duración en días (total días extremos en el período y máximo número de días seguidos de un evento extremo) en el período entre los muestreos realizados de noviembre de 2013 a noviembre de 2014 y el percentil 5 (31,4). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Mínimo	Total	No. días totales	Máximo No. días seguidos
19 noviembre - 4 diciembre 2013	32,63	0	-	-
11 febrero - 11 marzo	32,04	0	-	-
9 - 29 mayo	<b>30,92</b>	2	1	1
15 agosto - 22 noviembre	30,94	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>2</b>

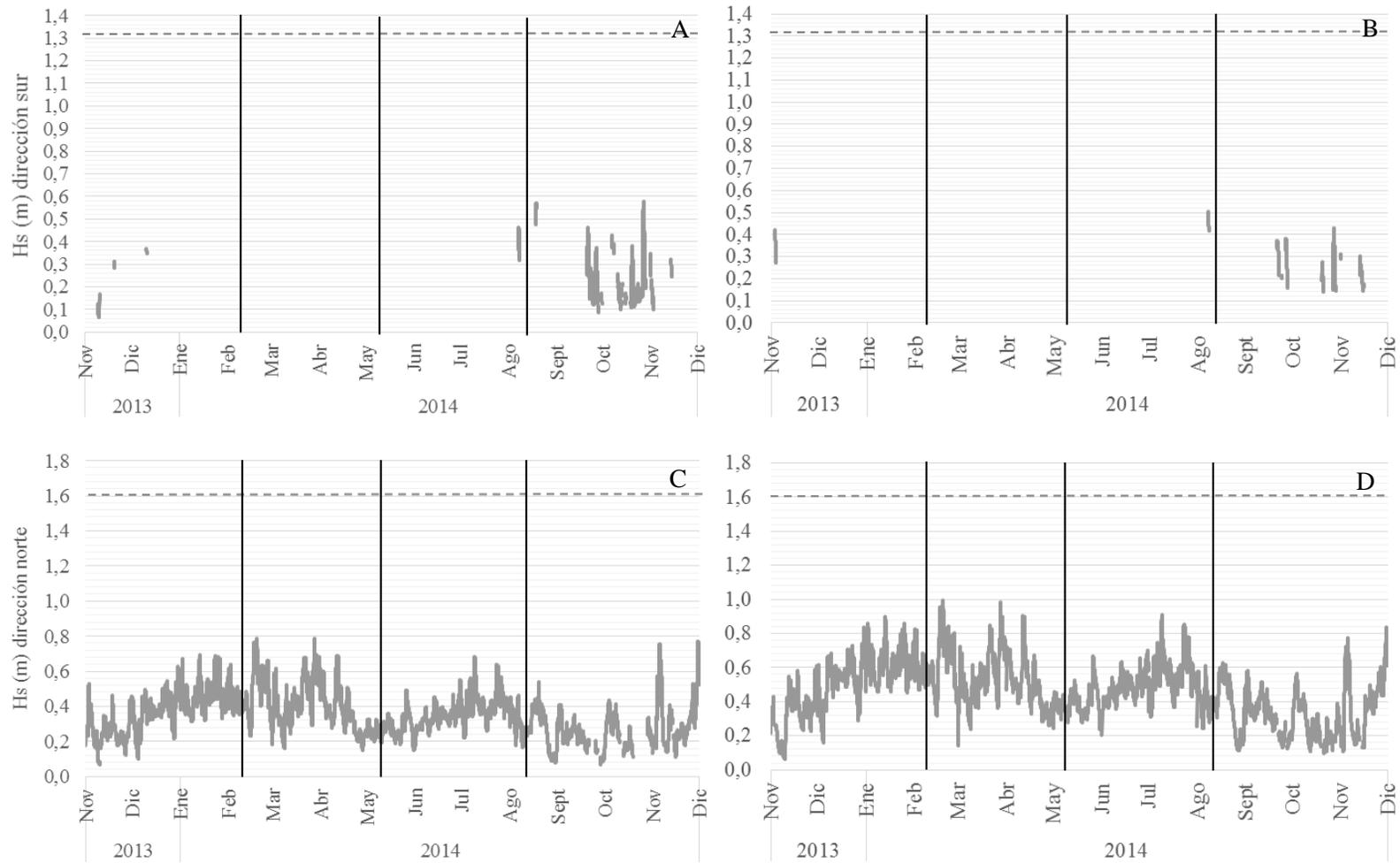
En cuanto a la precipitación, considerando el percentil 99 histórico de 17,04 mm, se presentaron dos eventos extremos. El primero a mediados de julio de 2014 y el segundo de mayor intensidad a mediados de noviembre de 2014 con 30,0 mm, ambos con una duración de un día (Figura 3.13; Tabla 3.10).



**Figura 3.13:** Valores de precipitación acumulada diaria (mm) obtenidos del TRMM 3B42 versión 7 (datos cada 6 h) desde noviembre de 2013 a noviembre de 2014. La línea punteada muestra el umbral de precipitación histórica (percentil 99 = 17,04 mm, ver Figura 3.3). Las líneas verticales muestran indican el momento en que fue realizado el muestreo.

**Tabla 3.10:** Valor máximo, número de eventos de extremos de precipitación y su duración en días (total días extremos y máximo número de días seguidos de un evento extremo) en el período entre los muestreos realizados de 2013 a noviembre de 2014 y teniendo en cuenta el percentil 99 histórico (17,04 mm). En negrilla se indican los valores más altos.

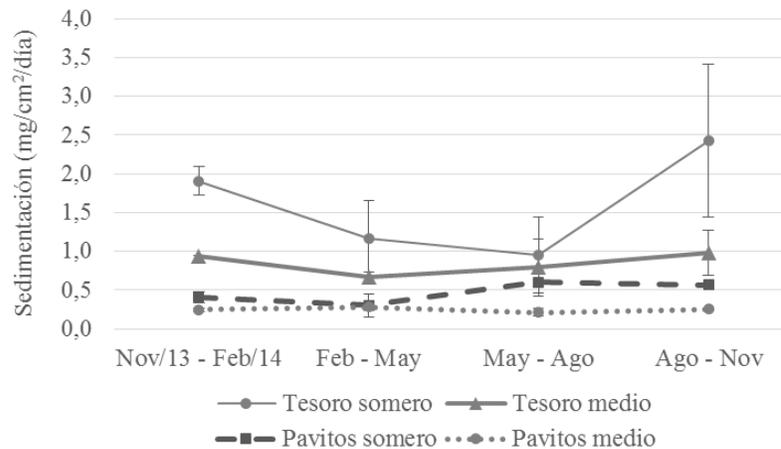
Periodo	Máximo (mm)	Total Eventos	No. días totales	máximo No. días seguidos
19 noviembre 2013 - 8 febrero 2014	0	0	-	-
9 febrero - 7 mayo	0	0	-	-
8 mayo - 12 agosto	17,4	1	1	1
12 agosto - 22 noviembre	<b>30,0</b>	1	1	1



**Figura 3.14:** Valores de la altura de la ola significativa (Hs en m) dirección sur (panel superior) y en dirección norte (panel inferior) entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. La línea punteada muestra el umbral (percentil 99 = 1,32 m para el sur, percentil 99 = 1,61 m para el norte). A y C. Tesoro. B y D. Pavitos. Información obtenida cada hora de la base de datos, modelación numérica, del grupo Océánicos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, desde noviembre de 2013 a noviembre de 2014. Las líneas verticales muestran indican el momento en que fue realizado el muestreo.

El ciclo anual de la altura de la ola proveniente del sur registró los valores más bajos en noviembre de 2013 y los más altos en octubre de 2014. A nivel general, sólo estuvo presente en el segundo semestre entre noviembre y diciembre de 2013 y entre agosto y noviembre de 2014 (época de lluvias). Por el contrario, la altura de la ola proveniente del norte, a nivel general, fue menor en mayo y entre septiembre a noviembre (época de lluvias) y fue mayor de enero a abril y entre julio y agosto (época seca), pero este comportamiento fue más acentuado en febrero y abril de 2014. Teniendo en cuenta el percentil 99 histórico de 1,32 m para la dirección sur y de 1,61 m para la dirección norte, en este año de evaluación no se registraron eventos extremos de oleaje (Figura 3.14).

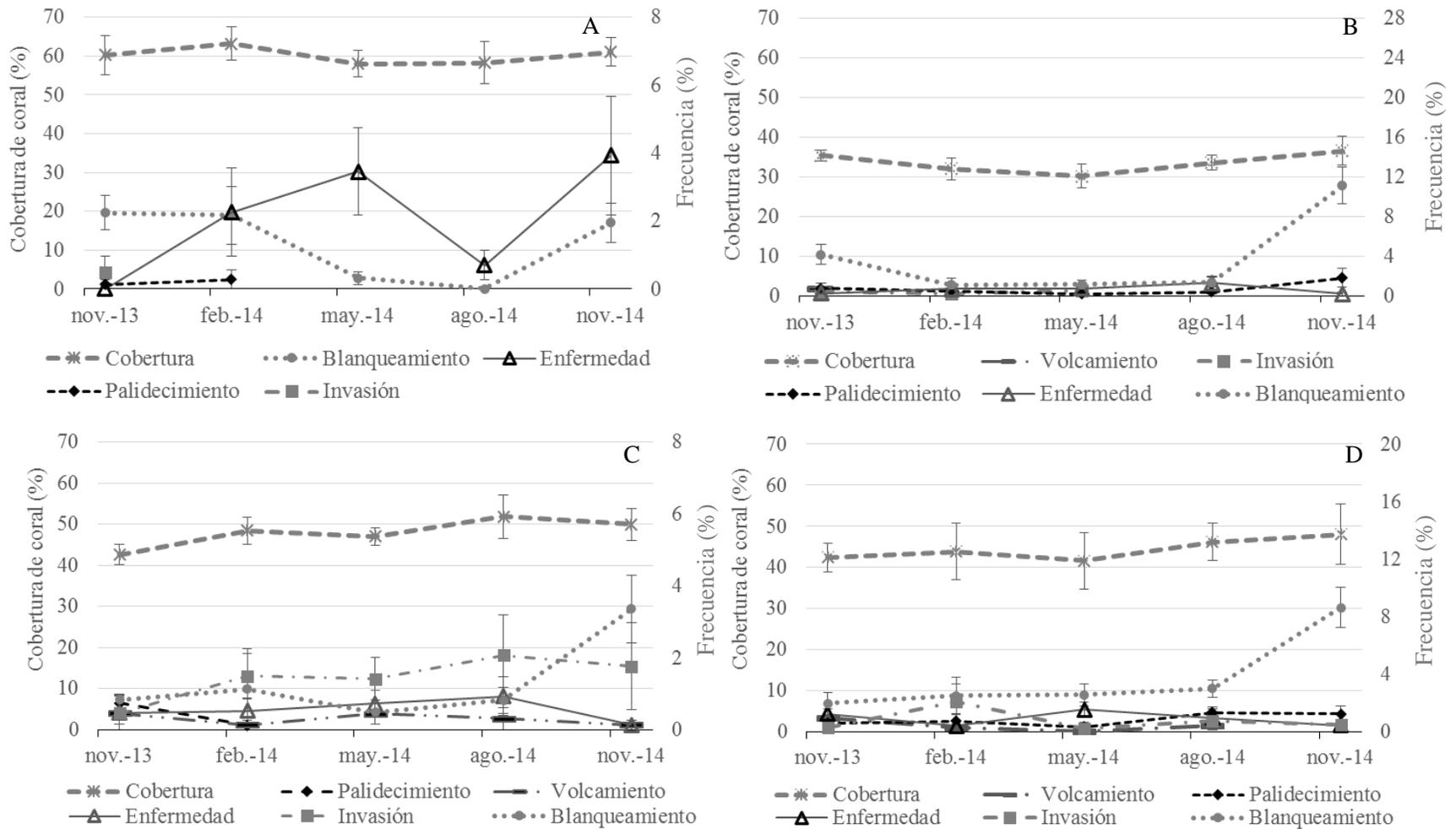
En cuanto a la sedimentación, la estación de Tesoro somero registró los valores más altos durante todo el año de muestreo (Figura 3.15) (promedio =  $1,61 \pm 0,34$  mg/cm<sup>2</sup>/día), seguido de Tesoro medio (promedio =  $0,85 \pm 0,07$  mg/cm<sup>2</sup>/día), Pavitos somero (promedio =  $0,47 \pm 0,07$  mg/cm<sup>2</sup>/día) y Pavitos medio (promedio =  $0,25 \pm 0,01$  mg/cm<sup>2</sup>/día). Considerando que se ha documentado que en general tasas mayores a 10 mg/cm<sup>2</sup>/día ejercen un impacto negativo sobre los corales (Rogers, 1990; Fabricius, 2005; Erfteimeijer *et al.* 2012), durante este año de evaluación no se registraron valores extremos.



**Figura 3.15:** Tasa de sedimentación promedio (mg/cm<sup>2</sup>/día  $\pm$  1 error estándar) medida para cada estación evaluada en las islas del Rosario cada tres meses entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014.

### 3.2.2 Cobertura y salud coralina

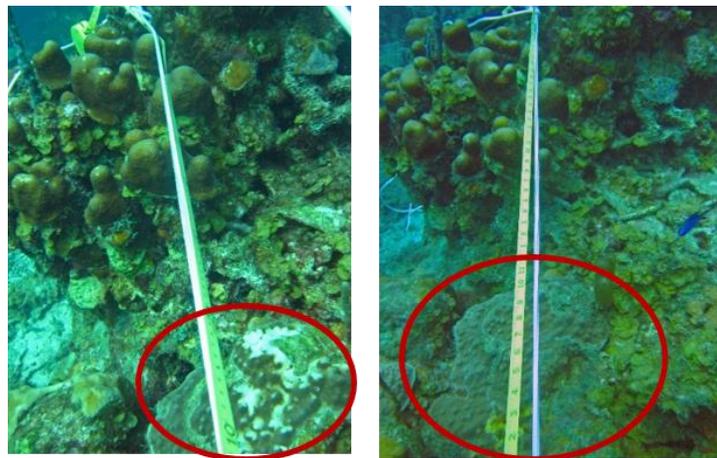
Durante el año de evaluación directa, en todas las estaciones los valores de cobertura de coral fueron cercanos entre los muestreos, y los coeficientes de variación fueron inferiores al 7,6 %. Sin embargo, Tesoro somero registró una reducción en la cobertura de coral del 5,2 % en mayo. Los valores de esta estación continuaron siendo los más altos en relación a las demás estaciones y los Tesoro medio los más bajos (Figura 3.16).



**Figura 3.16:** Cobertura de coral y frecuencia relativa de los signos de deterioro coralino (promedio  $\pm 1$  error estándar) registrados en cada una de las estaciones evaluadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. A. Tesoro somero. B. Tesoro medio. C. Pavitos somero. D. Pavitos medio. Los signos de deterioro están en el eje Y secundario.

En cuanto a la salud coralina, en general se presentaron cinco signos de deterioro coralino: blanqueamiento, enfermedades, palidecimiento, invasión y volcamiento; siendo el primer signo el más frecuente, especialmente en el muestreo del 22 de noviembre de 2014 en todas las estaciones (con el mayor valor, máximo=11,1±1,9 %, en Tesoro medio) y los tres últimos registraron valores inferiores al 2,5 %. Durante los muestreos el blanqueamiento no se encontró afectando la totalidad de las colonias sino en forma parcial. En Tesoro somero las enfermedades fueron el signo de mayor afección con un aumento paulatino en su frecuencia a partir de febrero de 2014 (2,3 ± 1,3% en febrero a 3,9 ± 1,7% en noviembre), seguido del blanqueamiento cuyo valor fue más alto en noviembre de 2013 (2,2 ± 0,5%; Figura 3.16).

En cuanto al seguimiento fotográfico realizado durante cada muestreo, en todas las estaciones no se observaron cambios significativo en los corales en cada uno de los transectos; sólo se evidenció en febrero de 2014 la recuperación de las colonias coralinas al blanqueamiento registrado en noviembre de 2013 (Figura 3.17).

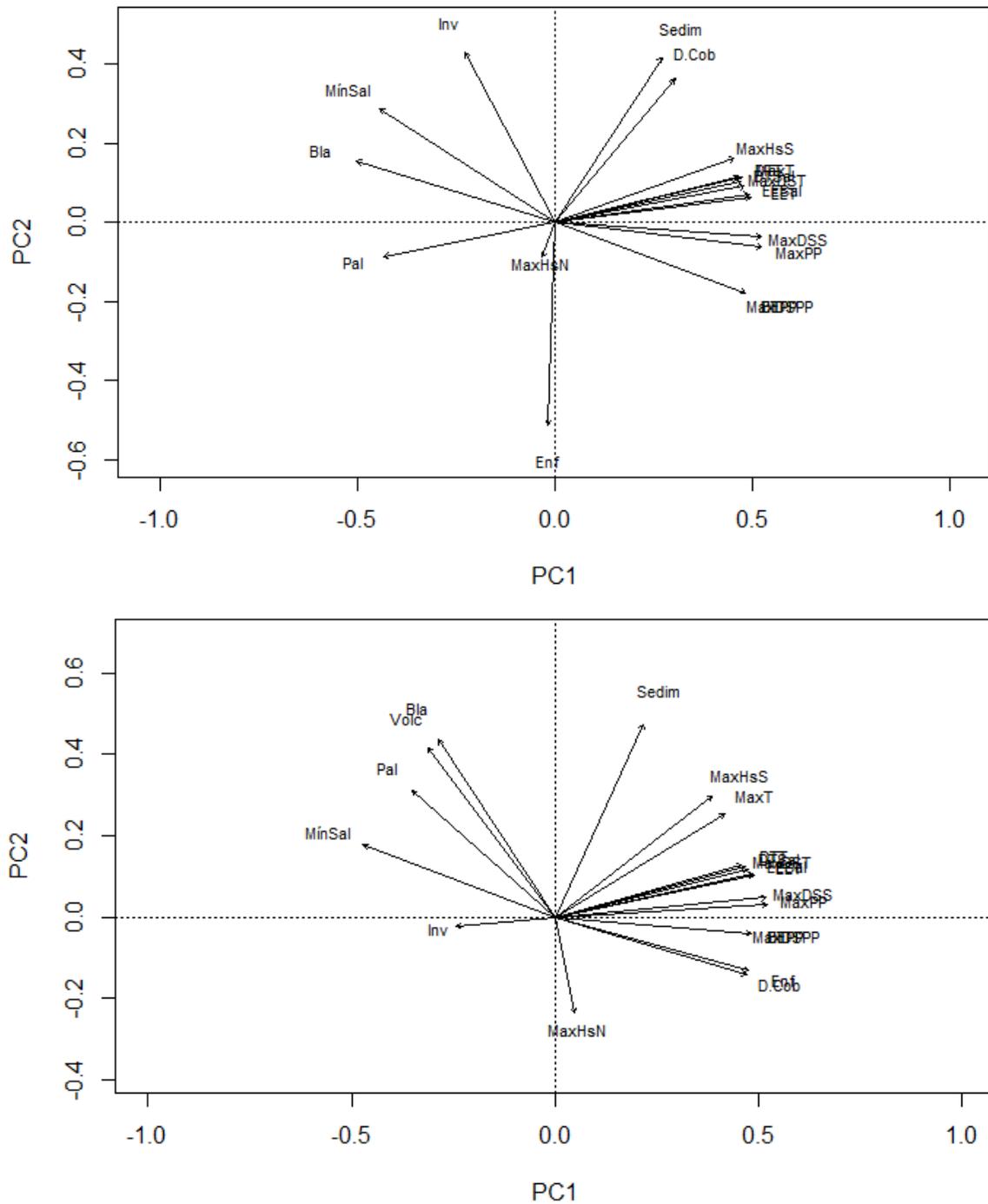


**Figura 3.17:** Seguimiento fotográfico en Tesoro medio del transecto 3. Izquierda: noviembre de 2013. Derecha: febrero de 2014. El círculo rojo señala la colonia de *Porites astreoides* parcialmente blanqueada en el 2013 y recuperada en el 2014.

### 3.2.3 Análisis de componentes principales

Para los análisis de componentes principales se incluyeron variables biológicas (cambio de cobertura de coral y frecuencia de signos de deterioro coralino) y oceanográficas (descriptoras de eventos extremos).

En general, la relación entre el cambio de cobertura, signos de deterioro y variables ambientales extremas presentan una tendencia particular para cada estación. La reducción de la cobertura de coral estuvo más asociado al incremento de los signos de deterioro durante el período anterior, que con las variables ambientales. Adicionalmente, en las estaciones medias, el palidecimiento contribuyó al descenso de la cobertura. Los eventos extremos de temperatura, salinidad y precipitación tendieron a favorecer una mayor frecuencia de blanqueamiento y palidecimiento en Tesoro somero y de enfermedades en Tesoro medio. Para los signos de deterioro restantes no hubo una clara tendencia (Figura 3.18; Figura 3.19; Tabla 3.11, Tabla 3.12).



**Figura 3.18:** Análisis de componentes principales, que reúne la información biológica y ambiental entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014 en isla Tesoro. Superior: Profundidad somera. Inferior: profundidad media. Las flechas son los vectores propios, que indican la dirección en la que cada variable está aumentando sobre el promedio. D.cob: cambio de cobertura de coral. Bla: blanqueamiento. Enf: enfermedades coralinas. Inv: invasión. Pal: palidicimiento. MínSal: mínimo valor salinidad. Sedim: máxima tasa de sedimentación. Volc: volcamiento. EE: número de eventos extremos. Q: caudal, PP: precipitación. HsS: altura de la ola dirección sur. HsN: altura de la ola dirección norte. MaxDS: máximo número de días seguidos. DT: número de días totales.



**Tabla 3.11:** Coeficientes de correlación entre las variables biológicas y ambientales y los ejes de los tres primeros componentes principales en Tesoro, entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. EE: número de eventos extremos. En negrilla se muestran los valores más altos independientemente de su signo.

Tesoro Somero				Tesoro Medio			
Variable	PC1	PC2	PC3	Variable	PC1	PC2	PC3
Explicación varianza	66 %	19 %	15 %	Explicación. varianza	66 %	18 %	16 %
Cambio cobertura	<b>0,55</b>	-0,28	0,03	Cambio cobertura	<b>0,55</b>	-0,17	-0,21
Blanqueamiento	<b>-0,60</b>	0,16	0,02	Blanqueamiento	-0,34	<b>0,51</b>	-0,04
Palidecimiento	<b>-0,50</b>	0,01	0,38	Palidecimiento	<b>-0,41</b>	0,37	0,27
Enfermedades	0,03	<b>-0,61</b>	0,12	Enfermedades	<b>0,56</b>	-0,15	0,20
Invasión	-0,31	0,34	<b>-0,42</b>	Invasión	-0,29	-0,03	<b>-0,54</b>
EE Temperatura	<b>0,58</b>	0,19	0,13	Volcamiento	-0,37	<b>0,49</b>	-0,06
Máxima temperatura	<b>0,54</b>	0,06	-0,30	EE Temperatura	<b>0,58</b>	0,12	0,17
Días totales de temperatura	<b>0,54</b>	0,27	0,16	Máxima temperatura	<b>0,49</b>	0,30	-0,22
Máximo días seguidos de temperatura	<b>0,56</b>	0,24	0,15	Días totales de temperatura	<b>0,54</b>	0,15	0,25
EE Salinidad	<b>0,57</b>	0,21	0,13	Máximo días seguidos de temperatura	<b>0,56</b>	0,14	0,22
Mínimo salinidad	<b>-0,55</b>	0,28	-0,09	EE Salinidad	<b>0,57</b>	0,13	0,19
Días totales de salinidad	<b>0,55</b>	0,25	0,16	Mínimo salinidad	<b>-0,56</b>	0,21	0,16
Máximo días seguidos de salinidad	<b>0,62</b>	0,03	0,05	Días totales de salinidad	<b>0,55</b>	0,14	0,23
EE Precipitación	<b>0,58</b>	-0,21	-0,06	Máximo días seguidos de salinidad	<b>0,61</b>	0,06	0,01
Máxima precipitación	<b>0,62</b>	-0,01	0,03	EE Precipitación	<b>0,57</b>	-0,05	-0,23
Días totales de precipitación	<b>0,58</b>	-0,21	-0,06	Máxima precipitación	<b>0,61</b>	0,04	-0,03
Máximo días seguidos de precipitación	<b>0,58</b>	-0,21	-0,06	Días totales de precipitación	<b>0,57</b>	-0,05	-0,23
Máxima altura ola dirección norte	-0,02	0,16	<b>0,60</b>	Máximo días seguidos de precipitación	<b>0,57</b>	-0,05	-0,23
Máxima altura ola dirección sur	<b>0,51</b>	0,10	-0,34	Máxima altura ola dirección norte	0,06	-0,28	<b>0,55</b>
Máxima sedimentación	0,28	<b>0,56</b>	-0,02	Máxima altura ola dirección sur	<b>0,45</b>	0,35	-0,22
				Máxima sedimentación	0,26	<b>0,56</b>	0,02

**Tabla 3.12:** Coeficientes de correlación entre las variables biológicas y ambientales y los ejes de los tres primeros componentes principales entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014. EE: número de eventos extremos. En negrilla se muestran los valores más altos independientemente de su signo.

PAVITOS SOMERO				PAVITOS MEDIO			
Variable	PC1	PC2	PC3	Variable	PC1	PC2	PC3
Explicación varianza	70 %	20 %	10 %	Explicación varianza	64 %	24 %	12 %
Cambio cobertura	-0,22	<b>0,56</b>	0,12	Cambio cobertura	0,37	<b>0,48</b>	0,10
Blanqueamiento	-0,28	<b>-0,53</b>	0,07	Blanqueamiento	<b>0,49</b>	-0,23	-0,28
Palidecimiento	-0,40	0,14	<b>0,43</b>	Palidecimiento	0,31	<b>-0,52</b>	0,13
Enfermedades	<b>0,61</b>	-0,04	-0,02	Enfermedades	0,23	<b>0,53</b>	0,21
Invasión	<b>0,47</b>	-0,29	-0,25	Invasión	-0,26	<b>-0,44</b>	-0,34
Volcamiento	0,09	<b>0,55</b>	0,23	Volcamiento	-0,21	-0,12	<b>0,56</b>
EE Temperatura	<b>0,57</b>	-0,15	0,13	EE Temperatura	<b>0,57</b>	-0,23	0,07
Máxima temperatura	<b>0,51</b>	0,27	0,19	Máxima temperatura	<b>0,54</b>	0,18	0,23
Días totales de temperatura	<b>0,53</b>	-0,22	0,19	Días totales de temperatura	<b>0,52</b>	-0,30	0,11
Máximo días seguidos de temperatura	<b>0,55</b>	-0,19	0,16	Máximo días seguidos de temperatura	<b>0,54</b>	-0,27	0,09
EE Salinidad	<b>0,57</b>	-0,16	0,14	EE Salinidad	<b>0,56</b>	-0,24	0,08
Mínimo salinidad	<b>-0,54</b>	-0,07	0,27	Mínimo salinidad	<b>-0,54</b>	-0,08	0,28
Días totales de salinidad	<b>0,55</b>	-0,20	0,17	Días totales de salinidad	<b>0,53</b>	-0,29	0,10
Máximo días seguidos de salinidad	<b>0,61</b>	-0,02	0,02	Máximo días seguidos de salinidad	<b>0,61</b>	-0,08	-0,01
EE Precipitación	<b>0,56</b>	0,18	-0,14	EE Precipitación	<b>0,58</b>	0,16	-0,12
Máxima precipitación	<b>0,61</b>	0,02	-0,01	Máxima precipitación	<b>0,61</b>	-0,03	-0,03
Días totales de precipitación	<b>0,56</b>	0,18	-0,14	Días totales de precipitación	<b>0,58</b>	0,16	-0,12
Máximo días seguidos de precipitación	<b>0,56</b>	0,18	-0,14	Máximo días seguidos de precipitación	<b>0,58</b>	0,16	-0,12
Máxima altura ola dirección norte	<b>-0,51</b>	-0,02	-0,32	Máxima altura ola dirección norte	<b>-0,53</b>	0,10	-0,30
Máxima altura ola dirección sur	<b>0,53</b>	0,23	-0,18	Máxima altura ola dirección sur	<b>0,55</b>	0,22	-0,15
Máxima sedimentación	<b>0,51</b>	0,33	-0,03	Máxima sedimentación	-0,22	<b>-0,57</b>	0,01

## 4. Discusión

### 4.1 Evaluación histórica (1998-2013)

Los ecosistemas marinos responden claramente a los cambios anómalos en la variabilidad del océano y del clima dentro de un amplio rango de escalas espaciales y temporales (Devlin *et al.*, 2012; Freeman *et al.*, 2012; Wernberg *et al.*, 2013; Johnson *et al.*, 2013). Los arrecifes coralinos son uno de los ecosistemas más sensibles frente a cambios en el sistema climático, crecen y sobreviven en un estrecho rango de condiciones ambientales y son por lo tanto particularmente susceptibles a pequeños cambios en la temperatura del mar y/o condiciones físico-químicas del medio marino (Hoegh-Guldberg, 1999; Fabricius *et al.*, 2007; Graham *et al.*, 2008; Kleypas y Hoegh-Guldberg, 2008). En este estudio se logró relacionar los cambios temporales de largo plazo en la cobertura de coral y los signos de deterioro, con valores extremos de variables oceanográficas que pueden generar estrés y mortalidad en los corales arrecifales. A corto plazo, aunque no hubo eventos extremos notorios ni cambios significativos en cobertura coralina, se pudo vislumbrar el posible efecto de variables ambientales a través de signos crónicos de deterioro coralino.

Los extremos de la mayoría de las variables ambientales evaluadas en las islas del Rosario se presentaron en el segundo semestre del año, correspondiente a la época de lluvias, mientras que sólo los eventos del oleaje proveniente del norte se presentaron el primer semestre, correspondiente a la época seca. En la región durante la época de lluvias los vientos alisios del NE son débiles, está presente la contracorriente del Darién y la pluma de turbidez del Canal del Dique desde la bahía de Barbacoas es mayor, lo cual favorece el incremento de temperatura, caudal, precipitación y la turbidez), mientras que en la época seca la climatología está influenciada por la mayor intensidad de los vientos alisios (Leblé y Cuignon, 1987, Bernal *et al.*, 2006, Romero-Rodríguez, 2010; Restrepo y Alvarado, 2011). Según lo anterior, la ocurrencia de los eventos oceánicos extremos estuvo asociada en parte al sistema climático del Caribe colombiano, que en resumen, es considerado dependiente de los vientos alisios del NE y las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (Nystuen y Andrade, 1993; Mesa *et al.*, 1997; Andrade, 2001; Díaz-Pulido y Garzón-Ferreira, 2002; Andrade y Barton, 2005).

Adicionalmente, teniendo en cuenta los eventos ENSO, a través del índice ONI, los mayores extremos de precipitación, caudal y turbidez, principalmente el de los dos últimos, ocurrieron durante niveles moderados del fenómeno de La Niña, especialmente en 2010, año en que se registraron fuertes lluvias e inundaciones en Colombia, así como un mayor flujo en la pluma del Canal del Dique (Gutiérrez-Moreno *et al.*, 2011; Euscátegui y Hurtado, 2011; IDEAM, 2011; Hoyos *et al.*, 2013; Restrepo *et al.*, 2016). En general, el caudal, proveniente del Canal del Dique, aporta agua dulce y sedimentos del continente, por lo que también contribuye al aumento de la turbidez. De esta forma, si bien la mayor

frecuencia e intensidad del Kd490 fue entre 2007 y 2008, de no ser por los vacíos de información entre septiembre y noviembre de 2010, meses de fuertes lluvias y descargas continentales, posiblemente ese año también hubiera registrado los valores más altos de Kd490.

Se evidenció una asociación entre la intensidad del fenómeno de El Niño y la frecuencia de los eventos extremos de la temperatura superficial del mar, como fue el caso de 1998 que registró el mayor número de eventos extremos (1,0 eventos/mes) y se presentó un fenómeno de El Niño en la categoría de muy fuerte. Sin embargo, su efecto en los arrecifes del Gran Caribe fue leve (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008). Asimismo, no se observó la relación con la intensidad y duración de las temperaturas extremas, las cuales fueron mayores en 2007 momento en que El Niño fue un evento débil (Figura 3.7; Tabla 3.1).

De otro lado, durante más de 30 años se ha evidenciado el gran deterioro que han sufrido los arrecifes coralinos en el mundo y cerca del 75 % están bajo amenaza como resultado de las perturbaciones antropogénicas y naturales (Burke *et al.*, 2011). Para toda el área que comprende las islas del Rosario se han observado, principalmente desde la década de 1980, cambios en la composición coralina, mortandades masivas de organismos arrecifales, reducción en el número de especies de coral, de cobertura coralina, entre otros (Werding y Sánchez, 1979; Coral y Caicedo, 1983; Ramírez, 1986; Alvarado *et al.*, 1986; Garzón-Ferrera y Kielman, 1993; Cendales *et al.*, 2002; Garzón-Ferreira y Díaz, 2003; Restrepo *et al.*, 2006; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2010). De acuerdo con los resultados del análisis de componentes principales, los valores extremos de temperatura superficial del mar, caudal y turbidez fueron las variables que tendieron a relacionarse más con la reducción de la cobertura de coral en las formaciones coralinas de las islas del Rosario entre 1998 y 2013, sumado al blanqueamiento en las estaciones someras. De hecho, las mayores afectaciones fueron por combinación y/o sucesión de extremos, cuyos efectos acumulados prolongados incrementan el deterioro, y llevan a una recuperación más lenta del ecosistema arrecifal (Pickett y White, 1985; Scheffer y Carpenter, 2003; Restrepo y Alvarado, 2011).

La temperatura es una de las variables más importantes que determina el funcionamiento de los ecosistemas marinos (Fabricius *et al.*, 2007) y de hecho las anomalías térmicas son el conductor del cambio climático que produce un estrés subletal y mortal en los corales y favorecen más la frecuencia de eventos de blanqueamiento y enfermedades (Berkelmans *et al.*, 2004; Wooldridge *et al.*, 2005; Marshall y Schuttenberg, 2006; Wilkinson y Souter, 2008; Gil-Agudelo *et al.*, 2009). El fuerte caudal, que aporta agua dulce, disminuye la salinidad del mar y aumenta la descarga de sedimentos provenientes del continente, lo que en ocasiones puede generar mortandades masivas en los arrecifes de coral cercanos, ya que reduce la tasa de reproducción y crecimiento de los corales (Van Woessik, 1991; Coles y Jokiel, 1992; Fabricius *et al.*, 2007; Devlin *et al.*, 2012). Finalmente, la turbidez produce descensos en los niveles de luz que llegan a los arrecifes reduciendo el reclutamiento coralino, la tasa de calcificación y el proceso de fotosíntesis de las microalgas simbióticas o zooxantelas (Hubbard, 1997; Restrepo y Alvarado, 2011; Martínez *et al.*, 2012). Las formaciones coralinas de las islas del Rosario están expuestas a las turbidez entre 19,6 % y 47,8 % del tiempo (Restrepo *et al.*, 2016).

Teniendo en cuenta los periodos del monitoreo SIMAC, en general, la reducción en la cobertura de coral registrada en las estaciones evaluadas entre 2004 y 2010 fue debido, inicialmente, al evento de

blanqueamiento masivo de 2005, uno de los más severos en el Gran Caribe que produjo mortalidades coralinas masivas principalmente en los primeros 10 m de profundidad en las islas del Rosario (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008; Gómez-Campo *et al.*, 2011), y posteriormente, a la combinación extremos de la temperatura superficial del mar, el caudal, la precipitación (ambos flujos de agua dulce) y el Kd490, lo cual incrementa la probabilidad de deterioro de las formaciones coralinas evaluadas.

El blanqueamiento de 2005 fue asociado a las altas temperaturas (Wilkinson y Souter, 2008; Eakin *et al.*, 2010), las cuales, según los datos de este estudio, si bien registraron el cuarto valor más alto en el número de eventos extremos (0,48 eventos/mes) y la segunda máxima duración (8 días seguidos) a temperaturas superiores a 30,2 °C, si generó una acumulación de estrés térmico reflejado en un DHW de 9,6 semanas (Figura 3.2; Tabla 4.1). Este evento afectó severamente entre 1 y 90 % de los corales en las islas del Rosario con una mortalidad asociada hasta de un 8 % (Gil-Agudelo *et al.*, 2006; Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008; Gómez-Campo *et al.*, 2011). Asimismo, parte de este evento se evidenció en cierta forma durante el monitoreo SIMAC en febrero de 2006 donde se registraron en todas las estaciones, excepto en Pavitos medio, picos en la frecuencia de blanqueamiento hasta del 19,9 % (Figura 3.8).

Hoy en día, el cambio climático se está convirtiendo en un conductor cada vez más importante del funcionamiento de los ecosistemas. Aunque los arrecifes de coral de las islas del Rosario han desarrollado cierta respuesta adaptativa al estrés térmico posterior al blanqueamiento de 2005, esta adaptación biológica es sin duda demasiado lenta para mantenerse al día con la velocidad actual del cambio climático (Fabricius *et al.*, 2007; Ainsworth *et al.*, 2016). Según lo anterior, el blanqueamiento podría llegar a tener un rol más determinante en la pérdida de cobertura coralina, considerando que se espera un incremento de los eventos masivos de este signo de deterioro, tanto en magnitud como en extensión (Marshall y Schuttenberg, 2006; Cróquer y Weil, 2009; Burke *et al.*, 2011). Adicionalmente, incluso los corales que sobreviven al blanqueamiento, son propensos a presentar una reducción en la tasa de crecimiento, una disminución en la capacidad reproductiva y un incremento en la susceptibilidad a las enfermedades (Goreau y Macfarlane, 1990; Harvell *et al.*, 1999; Ward *et al.*, 2000).

Posterior a este evento de blanqueamiento masivo de 2005, se presentó un evento débil de El Niño en 2007 y un evento moderado de La Niña en 2008, contribuyendo al registro de temperaturas extremas (alta intensidad y duración), mayores flujos de agua dulce y turbidez (Tabla 4.1). Los eventos ENSO generan efectos combinados en las variables ambientales, lo que deja a los corales aún más deteriorados y expuestos (Buddemeier *et al.*, 2004; Maina *et al.*, 2008). Sumado a lo anterior, la interacción de las altas temperaturas con otros factores fisicoquímicos es uno de los principales causantes del estrés coralino (Coles y Brown 2003). Por lo tanto, es de esperar que la combinación del incremento de eventos extremos de estas variables ambientales haya aumentado el estrés y la susceptibilidad de los corales, que sufrieron hace poco de un fuerte blanqueamiento con mortalidad asociada.

**Tabla 4.1:** Número de eventos extremos al mes (EE), valor máximo (Máx) y máximo número de días/semanas seguidos (Máx días/semanas) de las variables ambientales, teniendo en cuenta los periodos del monitoreo SIMAC, el percentil 95 (variables oceanográficas) y 99 (atmosféricas y oleaje). DHW: índice *Degree Heating Weeks*. Kd490: coeficiente de atenuación difusa a 490 nm (medida indirecta de turbidez). En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Temperatura (°C)			DHW (semanas)	Caudal (m³/s)			Precipitación (mm)			Altura ola dirección sur (m)			Altura ola dirección norte (m)			Kd490 "Turbidez" (m <sup>-1</sup> )		
	EE	Máx	Máx Días	Máx valor	EE	Máx	Máx Días	EE	Máx	Máx Días	EE	Máx	Máx Días	EE	Máx	Máx Días	EE	Máx	Máx Semanas
Ene-dic 1998	<b>1,00</b>	31,38	4	-	0	0	0	0	0	0	0,08	1,58	1	0,58	1,93	1	-	-	-
1 ene-18 dic 1998	0,33	30,75	7	-	0,08	660,3	6	0,33	31,62	1	0,08	1,78	1	0,50	2,24	1		-	
19 dic 1998-7 dic 1999	0,33	30,99	3	0,5	0	0	0	0,33	39,87	1	0,04	1,34	1	0,75	<b>2,37</b>	2	-	-	-
8 dic 1999-7 dic 2001	<b>0,92</b>	31,23	7	6,4	0	0	0	0,08	18,47	1	0,00	0	0	1,17	2,02	1	0	0	0
8 dic 2001-12 dic 2002	0,33	30,88	4	7,5	0	0	0	0,33	26,66	1	0,00	0	0	1,08	1,96	1	0,08	0,21	1
13 dic 2002-3 dic 2003	0,42	30,7	5	3,7	0	0	0	0,17	19,43	1	0,00	0	0	<b>1,33</b>	2,28	2	0	0	0
4 dic 2003-7 dic 2004	<b>0,46</b>	31,22	<b>8</b>	<b>9,6</b>	0	0	0	0,15	25,8	1	0,08	1,4	1	0,92	2,02	1	0,15	0,17	1
8 dic 2004-6 feb 2006	<b>0,55</b>	<b>31,80</b>	<b>10</b>	2,3	0,13	657,3	23	0,26	51,09	1	0,00	0	0	0,74	2,06	2	<b>0,23</b>	<b>0,30</b>	1
7 feb 2006-30 ago 2008	0,33	30,52	5	1,0	<b>0,22</b>	706,8	<b>53</b>	<b>0,56</b>	32,43	1	0,00	0	0	<b>1,56</b>	2,25	<b>3</b>	0,00	0	0
31 ago 2008-21 may 2009	0,40	30,55	5	7,25	0	0	0	0,33	28,04	1	0,00	0	0	0,53	2,1	2	0,00	0	0
22 may 2009-10 ago 2010	0,20	30,44	2	6,05	<b>0,50</b>	<b>970,1</b>	<b>91</b>	<b>0,60</b>	<b>56,72</b>	1	0,10	1,61	<b>3</b>	0,50	1,75	1	<b>0,20</b>	0,17	1
11 ago 2010-10 may 2011	0,42	30,71	3	<b>9,9</b>	0	0	0	0,33	44,54	1	0,00	0	0	1,08	2,25	1	0,17	0,20	1
11 may 2011-21 oct 2012	0,29	30,55	3	4,45	0	0	0	0,50	35,71	1	<b>0,14</b>	<b>1,83</b>	2	0,14	1,78	1	0	0	0
22 oct 2012 – 3 dic 2013	0,29	30,55	3	4,45	0	0	0	0,50	35,71	1	<b>0,14</b>	<b>1,83</b>	2	0,14	1,78	1	0	0	0

Las descargas continentales, incluyendo los flujos de sedimentos, son uno de los principales agentes contaminantes en las zonas costeras del Gran Caribe y que determinan la dinámica y salud de las formaciones coralinas a nivel mundial (Fabricius, 2005; Kaczmarek *et al.*, 2005). En el caso del caudal, correspondiente a las descargas continentales del Canal del Dique, interactúan factores de perturbación natural (e.g. reducción de la salinidad y sedimentos) y antropogénica local y regional (e.g. deforestación, contaminación y nutrientes). Las lluvias extremas conducen a un incremento mayor del caudal, que llevan a los arrecifes una mayor cantidad de agua dulce (menor salinidad), sedimentos y agua enriquecida con nutrientes y otros contaminantes (Fabricius, 2005; Fabricius *et al.*, 2007). Según esto, esta sinergia puede ocasionar una perturbación aún mayor y reducir la capacidad y velocidad de recuperación del ecosistema arrecifal. Asimismo, varias investigaciones sugieren que gran parte del proceso de degradación de los corales de las islas del Rosario es debido a los aportes del Canal del Dique (Ramírez, 1986; Leble y Cuignon, 1987; Alvarado y Corchuelo, 1992; Díaz *et al.*, 2000; Cendales *et al.*, 2002; Restrepo *et al.*, 2006, 2016), ya que la contaminación del agua ha sido producto de las malas prácticas ambientales de la cuenca (Restrepo y Alvarado, 2011) y el mayor impacto sobre la calidad del agua que llega a las Islas, es generado por las descargas de agua y material suspendido, particularmente, en la época de lluvias (Betancourt-Portela *et al.*, 2011).

Aunque en el segundo semestre de 2010 se registró un evento de blanqueamiento coralino en algunas áreas de Caribe colombiano, debido al evento moderado de La Niña (Vega-Sequeda *et al.*, 2011; Navas-Camacho *et al.*, 2015), en las islas del Rosario en el muestreo de agosto de 2010, se presentó un blanqueamiento leve, menor al 8 %, el cual fue mayor en las estaciones de profundidad media (Figura 3.8). Teniendo en cuenta el índice DHW en el 2010 y 2011, que estuvo por encima de las seis y ocho semanas, respectivamente, esta notable tolerancia de los corales de las islas del Rosario al estrés térmico sufrido, adicional a la frecuencia de blanqueamiento en el 2012 y 2013, sugiere que los corales están desarrollando una respuesta adaptativa al estrés térmico tras haber sufrido un blanqueamiento severo (Guest *et al.*, 2012). Prueba de esto se obtuvo cerca del área de estudio, donde los corales afectados por el blanqueamiento de 2005 contenían zooxantelas de clados susceptibles al blanqueamiento y con posteridad al evento predominaron las del clado con tolerancia térmica (Rodríguez-Ramírez *et al.*, 2008).

Sin embargo, los impactos del fenómeno de La Niña de 2010, que involucró los eventos extremos más fuertes de caudal y precipitación (Tabla 4.1) y que además ocasionó una condición crítica en el Canal del Dique, que superó la cota de desbordamiento (Euscátegui y Hurtado, 2011; IDEAM, 2011), sólo afectaron levemente a la formación coralina de Pavitos medio que redujo su cobertura de coral en un 5 %. En cuanto a la pérdida de cobertura entre el 2001 y 2004 en esta estación, no se encontró una clara conexión con la presencia de eventos oceánicos extremos, excepto por el incremento en la frecuencia de temperaturas extremas en 2002 (0,92 eventos/mes) por un evento moderado de El Niño en ese año y un aumento en el estrés térmico coralino en el 2002 y 2003 (índice DHW entre seis y ocho semanas; Tabla 4.1). No obstante, se sugiere que en esta estación los factores de perturbación humana (contaminación, descargas del Canal del Dique, anclaje de embarcaciones, vertimiento de aguas residuales, entre otros) pudieron tener una mayor influencia en la mortalidad coralina durante ese periodo.

En 2013 en todas las estaciones se presentó un incremento en la cobertura de coral, hasta de un 10,5 %. No es usual que de un año a otro la cobertura aumente tanto teniendo en cuenta el lento crecimiento

del coral, el cual es de sólo unos milímetros al año (Hubbard y Scaturo 1985). Este aumento puede ser consecuencia, en gran medida, al cambio de casi todos los investigadores en el monitoreo SIMAC de 2013, lo que generó un mayor margen de error debido al observador. Sin embargo, la mayor recuperación de cobertura de coral fue en Pavitos, por lo que es posible que allí exista una pequeña contribución del crecimiento de las colonias adultas, debido a la estrategia de vida oportunista de la especie más representativa de lugar, *U. tenuifolia*, la cual es de crecimiento rápido, talla pequeña, vida corta y reproducción más frecuente por fertilización interna (Szmant, 1986; Knowlton 2001, Aronson *et al.* 2002; Green *et al.*, 2008).

Los impactos acumulativos impulsados por eventos extremos, son el resultado de los intervalos de retorno de los mismos y la influencia sinérgica de la degradación de la calidad del agua en el aumento de la susceptibilidad y la disminución de la recuperación del ecosistema. Si bien no es posible controlar las perturbaciones naturales, contribuir al manejo y gestión de los factores de estrés humano local puede aumentar la resiliencia, reducir la vulnerabilidad y los tiempos de recuperación de los ecosistemas marinos.

#### **4.1.1 Evaluación anual (noviembre 2013- noviembre 2014)**

En general el año de evaluación fue relativamente tranquilo en términos de ENSO y de eventos oceánicos extremos. Los pocos eventos registrados (temperatura de fondo, salinidad y precipitación) y los valores más altos de sedimentación y del oleaje proveniente del sur como en otros años también fueron en la época de lluvias, principalmente entre septiembre y noviembre. Aunque no se registraron valores extremos para la altura de ola, los valores más altos provenientes del norte, se registraron en la época seca. Teniendo en cuenta los periodos del monitoreo, de agosto a noviembre de 2014 se registró la mayor cantidad de eventos extremos, especialmente de la temperatura de fondo (Tabla 4.2), los cuales estuvieron asociados con el sistema climático del Caribe colombiano descrito anteriormente y no tuvieron relación alguna con eventos ENSO, ya que las anomalías leves registradas, a través del índice ONI en el 2014 (Figura 3.2), no permanecieron durante al menos tres períodos de tres meses consecutivos de acuerdo a lo establecido por la NOAA (2016).

En cuanto a la tasa de sedimentación, en general, aunque no se presentaron eventos extremos, los valores más altos fueron entre agosto a noviembre, excepto Pavitos medio, lo cual coincide con el periodo de los mayores eventos extremos de caudal y turbidez mencionados en la evaluación histórica. Asimismo, las formaciones coralinas de Tesoro obtuvieron los valores más altos en el año de evaluación con respecto a Pavitos (Figura 3.15; Tabla 4.2), lo cual puede ser consecuencia, en parte, a su cercanía a un botadero de sedimentos de dragado ubicado aproximadamente a 15 km al norte de isla Tesoro (ver Henao-Castro, 2013), que por el patrón de corrientes facilita el transporte de este aporte de sedimento adicional hasta las formaciones coralinas de Tesoro.

De acuerdo con los resultados del análisis de componentes principales, aunque en el corto plazo no se evidenció una clara tendencia de los eventos oceánicos extremos en la reducción de la cobertura de coral, en general, los signos de deterioro tienden a favorecer su descenso. Esto sugiere que estos signos pueden tener un rol importante en la pérdida de cobertura viva en el corto plazo en el área evaluada, especialmente en las estaciones medias, a través del palidecimiento que puede convertirse en blanqueamiento, con mortalidad asociada, en caso de persistir las condiciones ambientales

extremas. Sumado a lo anterior, la aparición y la intensificación de las enfermedades y eventos de blanqueamiento masivo en el Caribe y en el mundo han sido ampliamente atribuidos al cambio climático inducido por el hombre (Harvell *et al.*, 1999; Hughes *et al.* 2003; Donner *et al.*, 2005). La tendencia en Tesoro somero a que la mayor frecuencia de blanqueamiento sea consecuencia de las temperaturas extremas, bajas salinidades y altas precipitaciones, coincide con lo descrito por Romero-Rodríguez *et al.* (2014), quienes afirman que las condiciones ambientales más propicias para eventuales blanqueamientos coralinos en las islas del Rosario son la combinación de altas temperaturas, abundante entrada de agua dulce y turbidez.

Teniendo en cuenta los periodos del monitoreo realizados, los corales posiblemente no fueron afectados por los eventos oceánicos extremos, ya que no se registró una reducción drástica de la cobertura de coral viva entre muestreos en cada una de las estaciones y la frecuencia de signos de deterioro como volcamiento, fragmentación y palidecimiento fueron bajas, inferiores al 2 %, así como las tasas de sedimentación, que fueron menores a 2,4 mg/cm<sup>2</sup>/día (Tabla 4.2). A nivel general, las formaciones coralinas evaluadas no registraron efectos medibles de los eventos oceánicos extremos en el ecosistema, al menos durante el periodo evaluado.

La leve reducción de cobertura en Tesoro somero en mayo, pudo ser consecuencia del efecto conjunto del incremento en la frecuencia del blanqueamiento y enfermedades en los muestreos anteriores, a pesar de presentar valores bajos, menores al 4 %. En ocasiones el aumento en la presencia de enfermedades puede presentarse después de una perturbación, incluido el blanqueamiento, cuando el coral se encuentra susceptible (Harvell *et al.*, 1999; Bruckner y Bruckner, 2006; Miller *et al.*, 2006; Muller *et al.*, 2008; Wilkinson y Souter, 2008; Cróquer y Weil, 2009), reduciendo su resistencia frente a los patógenos aumentando la virulencia de estos últimos (Aeby y Santavy, 2006; Raymundo *et al.*, 2008). De acuerdo a lo anterior, no se debe subestimar los bajos porcentajes de los signos de deterioro, ocasionalmente en el corto plazo, pues la sinergia entre estos síndromes podría contribuir a la pérdida de la cobertura de coral. Es necesario realizar investigaciones para comprender mejor el efecto conjunto de los signos de deterioro en el ecosistema arrecifal.

Los arrecifes de coral tienen un ámbito estrecho de tolerancia térmica, entre 18 y 36 °C con un intervalo óptimo entre 25 y 29 °C (Stoddard, 1969; Glynn y Stewart, 1973; Hubbard, 1997; Marshall y Schuttenberg, 2006; Raymundo *et al.*, 2008; Faxneld *et al.*, 2010), por lo que este ecosistema es extremadamente susceptible al estrés térmico (Harvell *et al.*, 2007). En febrero de 2014 los corales se recuperaron de un muy leve blanquimiento ocurrido en noviembre de 2013, ocasionado por las altas temperaturas (no extremas) y un estrés térmico acumulado (DHW superior a las ocho semanas; Figura 3.17; Tabla 4.2).

**Tabla 4.2:** Número de eventos extremos (EE), valor máximo (Máx), días totales no seguidos (Días Total) y máximo número de días seguidos (Máx Días) de todas las variables ambientales evaluadas, teniendo en cuenta los periodos en que fue realizado el monitoreo entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014 y el percentil 5 (salinidad), 95 (variables oceanográficas) y 99 (atmosféricas y oleaje). DHW: índice *Degree Heating Weeks* para Colombia. Hs N: altura de la ola dirección norte. Hs S: altura de la ola dirección sur. Sedimentos: tasa de sedimentación. SOM: estación a profundidad somera. MED: estación a profundidad media. En negrilla se indican los valores más altos.

Periodo	Temperatura (°C)				DHW (semanas)	Salinidad				Precipitación				Tesoro Hs (m). Sedimentos (mg/cm <sup>2</sup> /día)				Pavitos Hs (m). Sedimentos (mg/cm <sup>2</sup> /día)			
	EE	Max	Días Total	Max Días	Máx valor	EE	Mín	Días Total	Max Días	EE	Max	Días Total	Max Días	Max Hs N	Max Hs S	Sedimentos SOM	Sedimentos MED	Max Hs N	Max Hs S	Sedimentos SOM	Sedimentos MED
1-18 nov/13	-	-	-	-	9,1	-	-	-	-	1	18,21	1	1	0,53	<b>0,58</b>	-	-	0,58	-	-	-
19 nov/13-8 feb/14	0	30,09	0	0	9,3	0	32,63	0	0	0	0	0	0	0,69	0,37	1,91	0,95	0,90	0	0,41	0,25
9 feb-7 may/14	0	29,27	0	0	1,8	0	32,04	0	0	0	0	0	<b>0,79</b>	0	1,17	0,67	<b>0,99</b>	0	0,31	<b>0,28</b>	
8 may-12 ago/14	2	30,46	3	2	<b>10,0</b>	1	<b>30,92</b>	1	1	1	17,35	1	1	0,68	0,46	0,95	0,79	0,91	<b>0,51</b>	<b>0,60</b>	0,21
13 ago-22 nov/14	<b>9</b>	<b>30,75</b>	<b>41</b>	<b>14</b>	9,7	<b>5</b>	30,94	<b>9</b>	<b>2</b>	1	<b>29,98</b>	1	1	0,76	<b>0,58</b>	<b>2,43</b>	<b>0,98</b>	0,78	0,43	0,57	0,26

Sin embargo, noviembre de 2014 fue el periodo con mayores eventos oceánicos extremos y si bien no se evidenció cambios drásticos de cobertura coralina viva, el estrés coralino causado por los eventos de temperaturas extremas, por la acumulación térmica de varios meses atrás (DHW máximo de 10 semanas) y en menor medida por la baja salinidad, estuvo reflejado en un incremento en los porcentajes de blanqueamiento que alcanzaron un 11,1 %. Aunque la intensidad y duración de las anomalías térmicas son importantes para determinar el momento y la gravedad del blanqueamiento (Marshall y Schuttenberg, 2006), como se mencionó anteriormente, en este caso la mayor intensidad del blanqueamiento no fue sólo por la acción de estos factores, sino también fue al efecto combinado y/o sucesivo de los aportes de agua dulce.

De otro lado, al no presentarse eventos de olas extremas, no se pudo determinar su relación directa con la frecuencia de volcamiento de corales, el cual fue menor al 1 % (Figura 3.16) y sus efectos en el estado de salud de las formaciones coralinas. El estudio de sólo un año es un tiempo muy corto para evaluar sus efectos, ya sean negativos o positivos, en el arrecife coralino, por lo que es importante incluir el volcamiento y la fragmentación de corales dentro de las actividades de monitoreo y contrastar con bases de datos de oleaje.

Tanto para la evaluación de largo plazo como de corto plazo, las mayores perturbaciones naturales fueron debidas al efecto conjunto de varias variables ambientales extremas, siendo la temperatura del mar uno de los principales conductores que afectan en gran medida a las formaciones coralinas. Esta situación es preocupante frente a la velocidad de cambio de los escenarios del cambio climático, donde las temperaturas más altas, que alguna vez fueron parte de la variabilidad natural, superan la tolerancia de los corales formadores de arrecifes (Hoegh-Guldberg, 2011). Esto hace más difícil que los ecosistemas se adapten y se presenten grandes desafíos para la gestión de los ecosistemas marinos tropicales (Fabricius *et al.*, 2007). Asimismo, el análisis histórico entre 1950 y 2005 realizado por Gutiérrez-Moreno *et al.* (2011) para las islas del Rosario, muestra la tendencia al aumento de la temperatura del mar en el tiempo (0,006279°C).

Es esencial las acciones de gestión de las perturbaciones locales como la sobrepesca, degradación de la calidad del agua, contaminación, deforestación, entre otros, para detener el deterioro y comenzar a proteger los arrecifes coralinos para que puedan adaptarse a los cambios ambientales, sobrellevar los eventos extremos y así aumentar su recuperación frente al cambio climático (Wooldridge *et al.*, 2005; Hughes *et al.*, 2007; Knowlton y Jackson, 2008). Esto va de la mano con la continuidad de los programas de monitoreo de los ecosistemas marinos que son empleados a nivel mundial para generar información sobre el estado, tendencias, cambios y conservación, además para comprender su deterioro gradual y generalizado.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- La ocurrencia de la mayoría de los eventos oceánicos extremos, tanto en el largo como en el corto plazo, fueron en el segundo semestre del año, correspondiente a la época de lluvias y sólo los eventos de olas extremas provenientes del norte se presentaron el primer semestre, correspondiente a la época seca. Este patrón estuvo principalmente asociado al sistema climático del Caribe colombiano, a los eventos de La Niña y en menor medida a los eventos de El Niño.
- A nivel general, en el largo plazo (1998-2013), los eventos extremos de temperatura superficial del mar, caudal y Kd490 (medida indirecta de la turbidez) fueron las principales variables que estuvieron correlacionadas con la reducción de la cobertura de coral.
- Teniendo en cuenta el monitoreo SIMAC, en general entre 2004 y 2010 se presentó una drástica reducción de cobertura de coral de hasta un 11 %, como consecuencia del evento masivo de blanqueamiento de 2005 y posteriormente a la combinación del incremento de eventos extremos de la temperatura superficial del mar, el caudal, la precipitación y el Kd490 (los tres últimos relacionados con flujos de agua dulce), asociados un evento débil de El Niño en 2007 y un evento moderado de La Niña en 2008.
- La leve reducción de la cobertura de coral de 2011 en Pavitos medio, estuvo principalmente asociada a los mayores eventos extremos de caudal, precipitación y Kd490 como consecuencia del evento de La Niña de 2010. Por su parte, no se evidenció una clara conexión de la ocurrencia de eventos oceánicos extremos con la pérdida de cobertura entre 2001 y 2004, por lo que factores de perturbación humana pueden tener una mayor influencia en la mortalidad coralina durante ese periodo.
- En 2013 todas las estaciones evaluadas mostraron un incremento en la cobertura de coral, que puede ser consecuencia, en gran medida, al margen de error por el cambio de observadores en ese muestreo.
- El periodo entre noviembre 2013 a noviembre 2014 fue muy tranquilo, por lo que sólo se registraron eventos extremos en la temperatura del mar, salinidad y precipitación, principalmente entre septiembre y noviembre de 2014, y no hubo cambios significativos en la cobertura coralina. Sin embargo, los signos de deterioro pueden tener un rol importante en la degradación del ecosistema a través de acumulación crónica y progresiva de tejido muerto.

- En la evaluación anual se presentaron cinco signos de deterioro coralino, blanqueamiento, enfermedades, palidecimiento, invasión y volcamiento, siendo el primer signo el que registró los valores más altos, especialmente en noviembre de 2014. Sin embargo, en Tesoro somero las enfermedades fue el signo de mayor afección con un aumento paulatino en su frecuencia a partir de febrero de 2014.
- Tesoro somero registró una leve reducción de la cobertura de coral en mayo de 2014, debido posiblemente al efecto conjunto del incremento de la frecuencia de blanqueamiento y enfermedades.
- Como consecuencia de no presentarse eventos de olas extremas, no se pudo determinar su relación directa con la frecuencia de volcamiento coralino. El estudio de sólo un año es un tiempo muy corto para evaluar sus efectos, ya sean negativos o positivos, en los arrecifes coralinos.
- A nivel general, entre 2013 y 2014, las formaciones coralinas no fueron drásticamente afectadas y/o no registraron efectos medibles de los eventos oceánicos extremos en el ecosistema. No obstante, debido a las altas temperaturas extremas, acumulación de estrés térmico y en menor medida por reducciones extremas de salinidad (flujo de agua dulce), los corales experimentaron estrés que estuvo reflejado en los mayores porcentajes de blanqueamiento, particularmente en noviembre de 2014.
- Tanto para la evaluación de largo plazo como de corto plazo, las mayores perturbaciones naturales fueron consecuencia del efecto en conjunto de varias variables ambientales extremas, siendo la temperatura del mar uno de los principales conductores que afectan en gran medida a las formaciones coralinas.

## 5.2 Recomendaciones

- Se desconoce la relación de los eventos de olas extremas y su umbral en la salud coralina, específicamente el volcamiento y fragmentación, por lo tanto se sugiere incluir estos signos de deterioro dentro de las actividades de monitoreo, ya que un año de evaluación es muy poco tiempo para poder evaluar su relación con eventos de olas extremas.
- Para tener un mejor entendimiento de los efectos de las perturbaciones naturales y de los cambios estacionales en los arrecifes de coral, se sugiere incrementar la frecuencia de los muestreos de los programas de monitoreo, como mínimo dos veces al año en diferente época climática, al menos para los signos de deterioro, si no se observan cambios drásticos en cobertura coralina.
- Es importante continuar con las actividades de los programas de monitoreo de los ecosistemas marinos, ya que son una de las principales herramientas para generar información relevante y oportuna para la toma de decisiones y el cumplimiento de las metas de conservación en los planes de manejo.

## Bibliografía

- Achituv, Y. y Z. Dubinsky. 1990. Evolution and zoogeography of coral reefs. p. 1-9. En: Dubinsky, Z. (Ed). Ecosystems of the world 25. Coral Reefs. Elsevier Science B.V. Amsterdam, Holanda; 550 p.
- Aeby, G. S. y D. L. Santavy. 2006. Factors affectng susceptibility of the coral *Montastraea faveolata* to black-band disease. Mar. Ecol. Prog. Ser., 318: 103-106.
- Ainsworth, T., S. Heron, J. C. Ortiz, P. Mumby, A. Grech, D. Ogawa, C. M. Eakin y W. Leggat. 2016. Climate change disables coral bleaching protection on the Great Barrier Reef. Science, 352 (6283): 338-342.
- Alonso, D. y P. Castillo (Eds.). 2007. Plan de manejo del Área Marina Protegida de los Archipiélagos del Rosario y San Bernardo. INVEMAR-MAVDT-UAESPNN-INCODER-CARSUCRE-CARDIQUE-EPA CARTAGENA-DIMAR, Santa Marta; 159 p.
- Alvarado, E.M., F. Duque, L. Flórez y R. Ramírez. 1986. Evaluación cualitativa de los arrecifes coralinos de las islas del Rosario (Cartagena, Colombia). Bol. Ecotrópica, 15: 1-30.
- Alvarado, E. M. y M. C. Corchuelo. 1992. Los nutrientes, la temperatura y la salinidad provenientes del Canal del Dique como factores de deterioro en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (Cartagena, Colombia). Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar (Santa Marta, Octubre 26 al 30). p. 227-287.
- Andrade, C. 2001. Las Corrientes superficiales en la cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. Rev. Acad. Colomb. Cienc., 25 (96): 321 - 335.
- Andrade, C. A. y E. D. Barton. 2005. The Guajira upwelling system. Cont. Shelf. Res., 25: 1003–1022. doi: 10.1016/j.csr.2004.12.012.
- Aronson, R., I. Macintyre, W. Precht, T. Murdoch y C. Wapnick. 2002. The expanding scale of species turnover events on coral reefs in Belize. Ecol. Monogr., 72 (2): 233-249.
- Bayraktarov, E., V. Pizarro, C. Eidens, T. Wilke y C. Wild. 2013. Bleaching susceptibility and recovery of Colombian Caribbean corals in response to water current exposure and seasonal upwelling. PLoS ONE 8 (11): e80536. doi:10.1371/journal.pone.0080536.

- Berkelmans, R., G. De'ath, S. Kininmonth y W.J. Skirving. 2004. A comparison of the 1998 and 2002 coral bleaching events on the Great Barrier Reef: spatial correlation, patterns, and predictions. *Coral Reefs*, 23: 74-83.
- Bernal, G., A. Velásquez, I. Vargas, A. C. Agudelo, C. A. Andrade, J. G. Domínguez, C. Ricaurte y G. Mayo 2006. Variabilidad de los aportes a los sedimentos superficiales durante un ciclo anual en los bancos de Salmedina. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 35: 59-75.
- Bernal, G., A. F. Osorio, L. Urrego, D. Peláez, E. Molina, S. Zea, R. D. Montoya y N. Villegas. 2016. Occurrence of extreme oceanic events and their impact on the ecosystems in the Colombian Caribbean coasts: some study cases. *Journal of Marine Systems*, 164: 85-100.
- Bernhard, R. 2007. Extreme climatic events and coral reefs: how much short-term threat from global change? *Geological Approaches to Coral Reef Ecology*, 192: 315-341.
- Betancourt-Portela, J., L. Espinosa, S. Narváez, J. Vivas-Aguas y J. P. Parra. 2011. Calidad de aguas. p. 67-77. En: Zarza-González, E (Ed). *El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Parques Nacionales Naturales de Colombia*, Cartagena; 416 p.
- Birkeland, C. 1997. *Life and death of corals reefs*. Chapman y Hall, Nueva York; 536 p.
- Bohórquez, C.A. 1988. Coral bleaching in the central Colombian Caribbean. *Proc. Assoc. Is. Mar. Lab. Carib.*, 21: 52.
- Bormann, F. H. y G. E. Likens. 1979. *Pattern and process in a forested ecosystem*. Springer-Verlag. New York; 253 p.
- Bruckner, A. y Bruckner. 2006. The recent decline of *Montastraea annularis* (complex) coral populations in western Curaçao: a cause for concern?. *Rev. Biol. Trop.*, 54 (Suppl. 3): 45-58.
- Buddemeier, R. W., J. A. Kleypas y R. B. Aronson. 2004. Coral reefs and global climate change: potential contributions of climate change to stress on coral reefs ecosystems. *Pew Center on Global Climate Change*, Arlington, E.E.U.U. 44 p.
- Burke, L., K. Reytar, M. Spalding y A. Perry. 2011. *Reef at risk: revisited*. World Resources Institute. Washington. 114 p.
- CARICOMP. 1997. Studies on Caribbean coral bleaching, 1995-96. *Proc. 8th Int. Coral Reef Symp.*, 1: 673-678.
- CARICOMP. 2001. *Methods manual levels 1 and 2: Manual of methods for mapping and monitoring of physical and biological parameters in the coastal zone of the Caribbean*. CARICOMP Data Management Center. Universidad West Indies. Jamaica; 85 p.

- Cendales, M., S. Zea y J. Díaz. 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las islas del Rosario e isla Barú (mar Caribe, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 26 (101): 497–510.
- Coles, S. L. 1992. Experimental comparison of salinity tolerances of reef corals from the Arabian Gulf and Hawaii. Evidence for hypersaline adaptation. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp.*, 1: 227-234
- Coles, S. L. y P. L. Jokiel. 1992. Effects of salinity on coral reefs. p. 147-166. En: Connell D. W. y D. W. Hawker (Eds). *Pollution in tropical aquatic systems*. CRC Press Inc, London; 252 p.
- Coles, S. L. y B. E. Brown. 2003. Coral bleaching-capacity for acclimatization and adaptation. *Advances in Marine Biology*, 46: 183-223.
- Coral, D. A. y A. Caicedo. 1983. Descripción de la formación arrecifal de isla Grande (islas del Rosario) con anotaciones ecológicas. Tesis de pregrado. Facultad de Biología Marina. Universidad Jorge Tadeo Lozano. Cartagena; 110 p.
- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias-Prieto, J. Sheinbaum, M. López y F. J. Ocampo-Torres. 2007. On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. *Coral Reefs*, 26 (1): 149-163. DOI 10.1007/s00338-006-0175-9.
- Coronado, K., J. Selvaraj y A. Guzmán. 2013. Efecto de El Niño en la productividad primaria y temperatura superficial del mar del Pacífico colombiano. p 8751-8758. *Anales XVI Simposio Brasileiro de Sensoramento Remoto - SBSR*. Brasil.
- Crabbe, M. 2012. The influence of extreme climate events on models of coral colony recruitment and survival in the Caribbean. *American Journal of Climate Change*, 1: 33-40.
- Cróquer A. y E. Weil. 2009. Changes in Caribbean coral disease prevalence after the 2005 bleaching event. *Dis. Aquat. Org.*, 87: 33-43.
- Denny, M. y B. Gaylord. 2010. Marine ecomechanics. *Annu. Rev. Marine. Sci.*, 2: 89-114.
- Devlin, M., J. Brodie, A. Wenger, E. da Silva, J. G. Alvarez- Romero, J. Waterhouse y L. McKenzie. 2012. Extreme weather conditions in the Great Barrier Reef: Drivers of change? *Proc. 12th Int. Coral Reef Symp. 21A Watershed management and reef pollution*. Cairns, Australia.
- Díaz, J. M., L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Ángel, F. Zapata y S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR. Serie Publicaciones Especiales, No. 5. Santa Marta; 176 p.
- Díaz-Pulido G. y J. Garzón-Ferreira. 2002. Seasonality in algal assemblages on upwelling-influenced coral reefs in the Colombian Caribbean. *Bot Mar.*, 45: 284-292.
- Dodge, R., A. Logan y A. Antonius. 1982. Quantitative reef assessment studies in Bermuda: a comparison of method and preliminary results. *Bull. Mar. Sci.*, 32 (3): 745-760.

- Donner S. D., W. J. Skirving, C. M. Little, M. Oppenheimer y O. Hoegh-Guldberg. 2005. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. *Global Change Biol.*, 11 (12): 2251-2265.
- Eakin, C. M., J. A. Morgan, S. F. Heron, T. B. Smith, G. Liu, L. Alvarez-Filip, B. Baca, E. Bartels, C. Bastidas, C. Bouchon, M. Brandt, A. W. Bruckner, L. Bunkley-Williams, A. Cameron, B. D. Causey, M. Chiappone, T. R. L. Christensen, M. J. Crabbe, O. Day, E. de la Guardia, G. Díaz-Pulido, D. DiResta, D. L. Gil-Agudelo, D. S. Gilliam, R. N. Ginsburg, S. Gore, H. M. Guzmán, J. C. Hendee, E. A. Hernández-Delgado, E. Husain, C. F. G. Jeffrey, R. J. Jones, E. Jordán-Dahlgren, L. S. Kaufman, D. I. Kline, P. A. Kramer, J. C. Lang, D. Lirman, J. Mallela, C. Manfrino, J. Maréchal, K. Marks, J. Mihaly, W. J. Miller, E. M. Mueller, E. M. Muller, C. A. Orozco, H. A. Oxenford, D. Ponce-Taylor, N. Quinn, K. B. Ritchie, S. Rodríguez, A. Rodríguez Ramírez, S. Romano, J. F. Samhuri, J. A. Sánchez, G. P. Schmahl, B. V. Shank, W. J. Skirving, S. C. C. Steiner, E. Villamizar, S. M. Walsh, C. Walter, E. Weil, E. H. Williams, K. Woody y Y. Yusuf. 2010. Caribbean corals in crisis: record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLoS ONE*, 5 (11): e13969. doi:10.1371/journal.pone.0013969.
- Erfteimeijer, P., B. Riegl, B. W. Hoeksema y P. A. Todd. 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: A review. *Mar. Poll. Bull.*, 64: 1737-1765.
- Euscátegui, C. y G. Hurtado. 2011. Análisis del impacto del fenómeno “La Niña” 2010-2011 en la hidroclimatología del país. IDEAM. Bogotá; 32 p.
- Fabricius, K. 2005. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Mar. Poll. Bull.*, 50: 125-146.
- Fabricius, K., O. Hoegh-Guldberg, J. Johnson, L. McCook y J. Lough. 2007. Vulnerability of coral reefs of the Great Barrier Reef to climate change. p. 515-554. En: Johnson, J. y Marshall PA (Eds). *Climate change and the Great Barrier Reef*. Capítulo 17. Great Barrier Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia; 801 p.
- Faxneld, S., T. Jörgensen y M. Tedengren. 2010. Effects of elevated water temperature, reduced salinity and nutrient enrichment on the metabolism of the coral *Turbinaria mesenterina*. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 88: 482-487.
- Ferrier-Pages, C., J. P. Gatusso y J. Jaubert. 1999. Effect of small variations in salinity on the rates of photosynthesis and respiration of the zooxanthellate coral *Stylophora pistillata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 181: 309-314.
- Freeman, L. A., A. J. Miller, R. D. Norris y J. E. Smith. 2012. Classification of remote Pacific coral reefs by physical oceanographic environment. *J. Geophys. Res.*, 117, C02007, doi:10.1029/2011JC007099.
- Furnas, M. 2003. *Catchments and corals: terrestrial runoff to the Great Barrier Reef*. Australian Institute of Marine Science and CRC Reef Research Centre, Townsville, Australia; 334 p.

- Garzón-Ferreira, J. 1997. Arrecifes coralinos: ¿Un tesoro camino a la extinción? Colombia Ciencia y Tecnología, 15 (1): 11-19.
- Garzón-Ferreira, J. y M. Kielman. 1993. Extensive mortality of corals in the Colombian Caribbean during the last two decades. p. 247-253. En: Ginsburg, R.N (Ed.). Proceedings of the colloquium on global aspect of coral reefs. Health, hazards and history. RSMAS, University of Miami, Miami, USA; 420 p.
- Garzón-Ferreira, J., M.C. Reyes-Nivia y A. Rodríguez-Ramírez. 2002. Manual de métodos del SIMAC-Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos en Colombia. INVEMAR, Santa Marta; 102p.
- Garzón-Ferreira, J. y J. M. Díaz. 2003. The Caribbean coral reefs of Colombia. p. 275-301. En: Cortés, J. (Ed). Latin American Coral Reefs. Elsevier Science B.V. Amsterdam; 497 p.
- Garzón-Ferreira, J. y A. Rodríguez-Ramírez. 2010. SIMAC: Development and implementation of a coral reef monitoring network in Colombia. Rev. Biol. Trop., 58 (Suppl. 1): 67-80.
- GBRMPA. 2011 Extreme weather and the Great Barrier Reef. Australian Government. Great Barrier Reef Marine Park Authority. Townsville, Australia; 25 p.
- Gil-Agudelo, D. L., J. Garzón-Ferreira, A. Rodríguez-Ramírez, M. C. Reyes-Nivia, R. Navas-Camacho, D. E. Venera-Pontón, G. Díaz-Pulido y J. A. Sánchez. 2006. Blanqueamiento coralino en Colombia durante el año 2005. p. 83-87. En: INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros de Colombia: año 2005. Serie Publicaciones Periódicas INVEMAR No 8, Santa Marta; 360 p.
- Gil-Agudelo D.L., R. Navas-Camacho, A. Rodríguez-Ramírez, M.C. Reyes-Nivia, S. Bejarano-Chaparro, J. Garzón-Ferreira y G. W. Smith. 2009. Enfermedades coralinas y su investigación en los arrecifes colombianos. Bol. Invest. Mar. Cost., 38 (2): 189-224.
- Glynn, P. W. 1993. Coral reef bleaching: ecological perspectives. Coral Reefs, 12: 1-17.
- Glynn, P. W. y R. Stewart. 1973. Distribution of coral reefs in the Pearl Islands (Gulf of Panama) in relation to thermal conditions. Limnol. Oceanogr., 18: 367-379.
- Glynn, P. W. y L. D'Croz. 1990. Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Nino coincident coral mortality. Coral Reefs, 8: 181-191.
- Gómez, R. C. y L. F. Sánchez. 1987. El fenómeno de blanqueamiento en el Parque Corales del Rosario, su identificación y explicación. INDERENA. Cartagena; 25 p.
- Gómez-Campo, K., T. López-Londoño, D. L. Gil-Agudelo, R. Navas-Camacho, J. A. Rojas y J. Garzón-Ferreira. 2011. Blanqueamiento coralino, amenaza para el futuro de los arrecifes de coral de los archipiélagos Nuestra Señora del Rosario y San Bernardo. p. 319-328 En: Zarza-González, E (Ed). El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Parques Nacionales Naturales de Colombia, Cartagena; 416 p.

- Graham, N. A., T. R. McClanahan, M. A. MacNeil, S. K. Wilson, N. V. C. Polunin, S. Jennings, P. Chabanet, S. Clark, M. D. Spalding, Y. Letourneur, L. Bigot, R. Galzin, M. C. Ohman, K. C. Garpe, A. J. Edwards, C. R. C. Sheppard. 2008. Climate warming, Marine Protected Areas and the ocean-scale integrity of coral reef ecosystems. *PLoS ONE*, 3 (8): e3039.
- Green, D., P. Edmunds y R. Carpenter. 2008. Increasing relative abundance of *Porites astreoides* on Caribbean reefs mediated by an overall decline in coral cover. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 359: 1-10.
- Guest, J. R., A. H. Baird, J. A. Maynard, E. Muttaqin, A. J. Edwards, S. J. Campbell, K. Yewdall, Y. A. Affendi y L. M. Chou. 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.
- Goreau, T. J. y A. H. Macfarlane. 1990. Reduced growth rate of *Montastrea annularis* following the 1987-1988 coral bleaching event. *Coral Reefs*, 8: 211-215.
- Gutiérrez-Moreno, C., M. Marrugo, P. Lozano-Rivera, P. Cristina Sierra y C. Andrade. 2011. Clima marino. p. 39-47. En: Zarza-González, E (Ed). El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo. Parques Nacionales Naturales de Colombia, Cartagena; 416 p.
- Harvell, C. D., K. Kim, J. Burkholder, R. R. Coldwell, P. R. Epstein, D. J. Grimes, E. E. Hoffman, E. K. Lipp, A. D. M. E. Osterhaus, R. M. Overstreet, J. Porter, G. W. Smith y G. R. Vasta. 1999. Emerging marine diseases: climate links and anthropogenic factors. *Science*, 285: 1505-1510.
- Harvell., D., E. Jordán-Dahlgren, S. Merkel, E. Rosenberg, L. Raymundo, G. Smith, E. Weil y B. Willis. 2007. Coral diseases environmental drivers and the balance and balance between coral and microbial associates. *Oceanography*, 20 (1): 172-195.
- Henaó-Castro, A. 2013. Efectos de los aportes del Canal del Dique sobre el reclutamiento de especies de coral en los arrecifes del Archipiélago Nuestra Señora del Rosario, área marina protegida. Tesis Magister en Ciencias Marinas. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Bogotá; 125 p.
- Hill, J. y C. Wilkinson. 2004. Methods for ecological monitoring of coral reefs: version 1. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia; 117 p.
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching, and the future of the world's coral reefs. *Mar. Freshwater Res.*, 50: 839-866.
- Hoegh-Guldberg, O., P. J. Mumby, A. J. Hooten, R. S. Steneck, P. Greenfield, E. Gomez, C. D. Harvell, P. F. Sale, A. J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C. M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R. H. Bradbury, A. Dubi y M. E. Hatziolos. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*, 318: 1737-1742.

- Hoegh-Guldberg, O. 2011. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change. *Reg Environ Change*, 11 (Suppl. 1): S215–S227. DOI 10.1007/s10113-010-0189-2.
- Hoyos, N., J. Escobar, J. C. Restrepo, A. M. Arango y J. C. Ortiz. 2013. Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Applied Geography*, 39: 16-25.
- Hubbard, D. 1997. Reefs as dynamic systems. p. 43-67. En: Birkeland, C. (Ed) *Life and death of coral reefs*. Chapman y Hall. Nueva York, USA; 536 p.
- Hubbard, D. K. y D. Scaturro. 1985. Growth rates of seven species of scleractinian corals from Cane Bay and Salt River, St. Croix, USVI. *Bull. Mar. Sci.*, 36: 325-338.
- Hughes, T., A. H. Baird, D. R. Bellwood, M. Card, S. R. Connolly, C. Folke, R. Grosberg, O. Hoegh-Guldberg, J. B. C. Jackson, J. Kleypas, J. M. Lough, P. Marshall, M. Nyström, S. R. Palumbi, J. M. Pandolfi, B. Rosen y J. Roughgarden. 2003. Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *Science*, 301: 929-933. DOI: 10.1126/science.1085046.
- Hughes, T. P., M. J. Rodríguez, D. R. Bellwood, D. Ceccarelli, O. Hoegh-Guldberg y L. McCook. 2007. Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Curr. Biol.*, 17: 360–365.
- IDEAM. 2011. Boletín informativo sobre el monitoreo del fenómeno de "La Niña". IDEAM. Boletín No. 24. Bogotá; 7 p.
- INVEMAR. 2014. Sistema de Monitoreo de Arrecifes de Colombia. 86.348 registros (subconjunto), aportados por Garzón-Ferreira, J (Proveedor de contenido, autor), A. Rodríguez-Ramírez (Proveedor de contenido, autor), D. L. Gil-Agudelo (Proveedor de contenido, autor), S. Bejarano (Proveedor de contenido), R. Navas-Camacho (Proveedor de contenido), R. C. (Proveedor de contenido), F. Zapata (Proveedor de contenido), J. Rojas (Proveedor de contenido), O. Caucali (Proveedor de contenido), N. Santodomingo (Proveedor de contenido), K. Gómez-Campo (Proveedor de contenido), K. Bernal (Proveedor de contenido), J. Olaya-Restrepo (Proveedor de contenido), G. Duque Nivia (Proveedor de contenido), D. L. Duque (Proveedor de contenido), A. Taborda (Proveedor de contenido), J. Vega-Sequeda (Proveedor de contenido), T. López-Londoño (Proveedor de contenido). En línea, <http://siam.invemar.org.co/sibm>, publicado el 01/03/2014.
- IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, USA; 582 p.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Working Group I to the IPCC 5th Assessment Report. WMO, UNEP. Suecia. 32 p.
- Jentsch, A. y C. Beierkuhnlein. 2008. Research frontiers in climate change: effects of extreme meteorological events on ecosystems. *C. R. Geoscience*, 340: 621-628

- Johnson, J., J. Maynard, M. Devlin, S. Wilkinson, K. Anthony, H. Yorkston, S. Heron, M. Puotinen y R. van Hooidek. 2013. Resilience of Great Barrier Reef ecosystems and drivers of change. En: Brodie, J., J. Waterhouse, B. Schaffelke, F. Kroon, P. Thorburn, J. Rolfe, J. Johnson, K. Fabricius, S. Lewis, M. Devlin, M. Warne y L. McKenzie. Scientific Consensus Statement 2013. Capítulo 2. The State of Queensland 2013. Australia; 35 p.
- Kaczmarzky, L., M. Draud, y E. Williams. 2005. Is there a relationship between proximity to sewage effluent and the prevalence of coral disease? En: *Caribb. J. Sci.*, 41 (1): 124-137.
- Kerr, J. T. y M. Ostrovsky. 2003. From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology and Evolution*, 18 (6): 299-305.
- Kleypas, J. y O. Hoegh-Guldberg. 2008. Coral reefs and climate change: susceptibility and consequences. p. 19-29. En: Wilkinson, C. y D. Souter (Eds). Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia; 152 p.
- Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. *PNAS*, 98 (10): 5419-5425.
- Knowlton, N. y J. B. C. Jackson. 2008. Shifting baselines, local impacts, and global change on coral reefs. *PLoS Biol.*, 6: 215–220.
- Lang, J. C. 1987. The 1987 bleaching event at Islas del Rosario. Informe INDERENA y Universidad de Texas, Austin; 23 p.
- Leblé, S. y R. Cuignon. 1987. El Archipiélago islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 37-52.
- Lirman, D. y D. Manzello. 2009. Patterns of resistance and resilience of the stress-tolerant coral *Siderastrea radians* (Pallas) to sub-optimal salinity and sediment burial. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 369: 72-77.
- Liu, G., A. E. Strong y W. Skirving. 2003. Remote sensing of sea surface temperature during 2002 Barrier Reef coral bleaching. *EOS*, 84 (15): 137-144.
- Liu G, A. E. Strong, W. Skirving, L. F. Arzayus. 2005. Overview of NOAA Coral Reef Watch Program's near-real time satellite global coral bleaching monitoring activities. *Proc 10th Int Coral Reef Symp, Okinawa, Japan, 2004*, 1: 1783-1793.
- López-Victoria, M. y S. Zea. 2004. Storm-mediated coral colonization by an excavating Caribbean sponge. *Clim. Res.*, 26: 251-256.
- Lucas, E. Y. y A. E. Strong. 2012. Product development plan for the next generation of satellite remote sensing products for NOAA coral reef ecosystem management activities. NOAA Technical Report NESDIS 142. Washington, D. C. USA; 69 p.

- Maina, J., V. Venus, T. R. McClanahan y M. Ateweberhan. 2008. Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological Modelling*, 212 (3): 180-199.
- Marshall, P. y H. Schuttenberg. 2006. A reef manager's guide to coral bleaching. IUCN Publications Services Unit. Cambridge, Reino Unido; 163p.
- Martínez, J., C. Smith y R. Richmond. 2012. Invasive algal mats degrade coral reef physical habitat quality. *Est. Coast.Shelf Sci.*, doi:10.1016/j.ecss.2011.12.022.
- McClanahan T. R. 2004. Coral bleaching, diseases and mortality in the western Indian Ocean. p. 157–176. En: Rosenberg, E. y Y. Loya (Eds) *Coral health and disease*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania; 484 p.
- Mesa, O. J., G. Poveda y L. F. Carvajal. 1997. Introducción al clima de Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Medellín, Colombia; 390 p.
- Miller, J., R. Waara, E. Muller y C. Rogers. 2006. Coral bleaching and disease combine to cause extensive mortality on corals reefs in US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 25 (3): 418.
- Montealegre, E. y D. Pabón. 1992. Características climáticas relevantes en el Nor-occidente sudamericano durante la ocurrencia de Fenómenos El Niño – Oscilación del Sur (ENOS). *Bol. Cient. CIOH*, 12: 55-68.
- Muller, E., C. S. Rogers, A. S. Spitzack y R. van Woesik. 2008. Bleaching increases likelihood of disease on *Acropora palmata* (Lamarck) in Hawksnest Bay, St John, US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 27: 191-195.
- Navas-Camacho, R., C. M. Díaz-Sánchez, E. Galeano-Galeano, D. I. Gómez-López, T. López-Londoño, K. Gómez-Campo, J. Vega-Sequeda. 2015. Blanqueamiento masivo de las comunidades coralinas de la bahía de Chengue, PNN Tayrona, por el evento Niña del año 2010. Simposio 5. Resumen 884. XVI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar – COLACMAR- y XVI Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar – SENALMAR-. Santa Marta, Octubre 19 al 22.
- NOAA Coral Reef Watch. 2013. Datos de series de tiempo diarias de las estaciones satelitales virtuales de la NOAA Coral Reef Watch 5-km para Colombia Atlántico, desde noviembre 1, 2013-noviembre 30, 2014. College Park, Maryland, USA. NOAA Coral Reef Watch. [http://coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/colombia\\_atlantic.txt](http://coralreefwatch.noaa.gov/vs/data/colombia_atlantic.txt)
- NOAA Coral Reef Watch. 2015. Datos de series de tiempo, dos veces a la semana, de las estaciones satelitales virtuales de la NOAA Coral Reef Watch 50-km para las islas de San Bernardo, Caribe, desde enero 1, 2001-noviembre 30, 2013. College Park, Maryland, USA. NOAA Coral Reef Watch. [http://www.ospo.noaa.gov/data/cb/TS\\_vs/vs\\_ts\\_SanBernardo\\_Colombia.txt](http://www.ospo.noaa.gov/data/cb/TS_vs/vs_ts_SanBernardo_Colombia.txt)

- NOAA. 2016. Historical El Niño/ La Niña episodes (1950-present). Climate Prediction Center. Consulta 2016. Disponible en Internet: [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- Nystuen, J. A. y C. A. Andrade. 1993. Tracking mesoscale ocean features in the Caribbean Sea using geosat altimetry. *Journal of Geophysical Research*, 98 (C5): 8389-8394.
- Pickett, S. T. A. y P. S. White (Eds). 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press. Nueva York, USA; 472 p.
- Pizarro, O. y A. Montecinos. 2004. El Niño y la Oscilación del Sur. p. 197-224. En: Werlinger, C. (Ed.). *Biología Marina y Oceanografía: conceptos y procesos*. Tomo I. Consejo Nacional del Libro y la Lectura - Universidad de Concepción. Trama Impresores S.A. Chile.
- Ramírez, A. 1986. Ecología descriptiva de las llanuras madreporarias del Parque Nacional Submarino Los Corales del Rosario (Mar Caribe) Colombia. *Bol. Ecotróp.*, 14: 34-63.
- Raymundo, L., C. Couch y C. Harvell. 2008. *Coral disease handbook: guidelines for assessment monitoring and management*. Coral Reef Targeted Research and Capacity Building for Management Program. Melbourne, Australia. 121 p.
- Restrepo J., P. Zapata, J. Díaz, J. Garzón-Ferreira y C. García. 2006. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50: 33-49.
- Restrepo, J. y E. Alvarado. 2011. Los sedimentos de río Magdalena y su impacto sobre los arrecifes coralinos de las islas del Rosario: una prioridad de investigación nacional. p. 78-94. En: Zarza-González, E. (Ed). *El entorno ambiental del Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo*. Parques Nacionales Naturales de Colombia, Cartagena; 416 p.
- Restrepo, J., E. Park, S. Aquino y E. M. Latrubesse. 2016. Coral reefs chronically exposed to river sediment plumes in the southwestern Caribbean: Rosario Islands, Colombia. *Science of the Total Environment*, 553: 316-329.
- Rodríguez-Ramírez, A. y J. Garzón-Ferreira. 2003. *Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la Bahía de Chengue (Caribe colombiano): 1993-1999*. INVEMAR, Santa Marta; 170 p.
- Rodríguez-Ramírez, R. y M. C. Reyes-Nivia. 2008. Evaluación rápida de los efectos del huracán Beta en la isla Providencia (Caribe colombiano). *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 37 (1): 217-224.
- Rodríguez-Ramírez, A., C. Bastidas, S. Rodríguez, Z. Leão, R. Kikuchi, M. Oliviera, D. Gil, J. Garzón-Ferreira, M. C. Reyes-Nivia, R. Navas-Camacho, N. Santodomingo, G. Díaz-Pulido, D. Venera-Pontón, L. Flórez-Leiva, A. Rangel-Campo, C. Orozco, J. C. Márquez, S. Zea, M. López-Victoria, J. A. Sánchez y M. C. Hurtado. 2008. The effects of coral bleaching in Southern Tropical America: Brazil, Colombia, and Venezuela. p 105-114. En: Wilkinson, C. y D. Souter (Eds). *Status of Caribbean Coral Reefs after Bleaching and Hurricanes in*

2005. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre, Townsville, Australia; 152 p.
- Rodríguez-Ramírez, A., M. C. Reyes-Nivia, S. Zea, R. Navas-Camacho, J. Garzón-Ferreira, S. Bejarano, P. Herrón y C. Orozco. 2010. Recent dynamics and condition of coral reefs in the Colombian Caribbean. *Rev. Biol. Trop.*, 58 (Suppl. 1): 107-131.
- Rogers, C. S. 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 62: 185-202.
- Romero-Rodríguez, D. 2010. Variables ambientales durante eventos de blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano. Tesis Magister en Medio Ambiente y Desarrollo. Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín-; 105 p.
- Romero-Rodríguez, D., G. Bernal y S. Zea. 2014. Variables ambientales durante blanqueamiento coralino en el Caribe colombiano. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 38 (149): 347-55.
- Ruiz-Moreno, D., B. L. Willis, A. C. Page, E. Weil, A. Cróquer, B. Vargas-Ángel, A. G. Jordan-Garza, E. Jordán-Dahlgren, L. Raymundo y C. D. Harvell. 2012. Global coral disease prevalence associated with sea temperature anomalies and local factors. *Dis. Aquat. Org.*, 100: 249-261.
- Scheffer, M. y S. R. Carpenter. 2003. Catastrophic regime shifts in ecosystems: linking theory to observation. *TRENDS in Ecology and Evolution*, 18 (12): 648-656.
- Szmant, A. 1986. Reproductive ecology of Caribbean reef corals. *Coral Reefs*, 5: 43-53.
- Smith, M.D. 2011a. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *Journal of Ecology*, 99: 651-655.
- Smith, M.D. 2011b. An ecological perspective on extreme climatic events: a synthetic definition and framework to guide future research. *Journal of Ecology*, 99: 656-663.
- Solano, O. D. 1994. Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betin*, 23: 149-163.
- Solano, O. D., G. R. Navas-Suarez y S. K. Moreno-Forero. 1993. Blanqueamiento coralino de 1990 en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario (Caribe colombiano). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, 22: 97-111.
- Sousa, W. 1984. The role of disturbance in natural communities. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 15: 353-391.
- Stoddart, D. 1969. Ecology and morphology of recent coral reefs. *Biol. Rev. Cambridge Phil. Soc.*, 44: 433-498.
- Sutherland, K., J. Porter y C. Torres. 2004. Diseases and immunity in Caribbean and Indo-Pacific zooxanthellate corals. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 266: 273-302.

- Taylor, E., D. Hernández, F. Howard, G. Peñaloza, S. Posada, N. Howard, R. Robinson y M. Prada. 2007. Impactos en los arrecifes de coral ocasionados por el huracán Beta en la plataforma insular de Old Providence y Santa Catalina. *Bol. Cient. CIOH*, 25: 71-77.
- Van Woosik, R. 1991. Immediate impact of the January 1991 floods on the coral assemblages of the Keppel Islands. *Great Barrier Reef Marine Park Authority Res. Publ.*, 23; 30 p.
- Vega-Sequeda, J., R. Navas-Camacho, K. Gómez-Campo, T. López-Londoño y D.L. Duque. 2011. Estado del conocimiento de los arrecifes coralinos. p. 88-119. En: INVEMAR. Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia: Año 2010. *Serie Publicaciones Periódicas*, No. 8. Santa Marta; 322 p.
- Vellinga, P. y W. J. van Verseveld. 2000. *Climate change and extreme weather events*. WWF. *Ámsterdam*; 46 p.
- Wachenfeld, D., J. Johnson, A. Skeat, R. Kenchington, P. Marshall y J. Innes. 2007. Introduction to the Great Barrier Reef and climate change. p. 1 - 13. En: Johnson, J. E. y P. A. Marshall (eds). *Climate Change and the Great Barrier Reef*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office, Australia; 801 p.
- Ward S, P. Harrison y O. Hoegh-Guldberg. 2000. Coral bleaching reduces reproduction of scleractinian corals and increases susceptibility to future stress. *Proc. 9th Int. Coral Reef Symp.*, 2: 1123-1128.
- Warding, B. y H. Sánchez. 1979. Informe faunístico y florístico de las islas del Rosario en la costa norte de Colombia. Situación general y estructuras arrecifales. *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*, 11: 7-20.
- Wernberg, T., D. A. Smale, F. Tuya, M. S. Thomsen, T. J. Langlois, T. de Bettignies, S. Bennett y C. S. Rousseaux. 2013. An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change*, 3: 78-82.
- Wilkinson, C. y D. Souter. 2008. Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. *Global Coral Reef Monitoring Network y Reef and Rainforest Research Centre*, Townsville, Australia; 152 p.
- WMO. 2010. *Climate, carbon and coral reefs*. World Meteorological Organization (WMO) - Convention on Biological Diversity (CBD). Ginebra, Suiza; 28 p.
- Wooldridge, S., T. Done, R. Berkelmans, R. Jones y P. Marshall. 2005. Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 295: 157-169 doi:10.3354/meps295157.
- Zar, J. 2010. *Biostatistical analysis*. 5ta edición. Pearson, Prentice Hall. New Jersey. USA; 960 p.
- Zea, S. 1991. Establecimiento de estaciones base para monitorear el efecto de condiciones naturales y de origen humano en comunidades coralinas de Santa Marta y Parque Nacional Natural Tayrona. Informe Final. INVEMAR. Santa Marta. 62 p.

Zea, S. y F. Duque-Tobón. 1989. Bleaching of reef organisms in the Santa Marta region, Colombia: 1987 Caribbean-wide event. *Trianea*, 3: 37-51.

**A. Anexo: Cobertura coralina (%) por especie en Tesoro somero registrada en las evaluaciones realizadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014.**

EE: error estándar.

Especie	Noviembre de 2013		Febrero de 2014		Mayo de 2014			
	Promedio	EE	Promedio	EE	Promedio	EE		
<i>Colpophyllina natans</i>	0,2	0,2	<i>Colpophyllina natans</i>	0,2	0,2	<i>Colpophyllina natans</i>	0,2	0,2
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	11,6	3,4	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	10	2,9	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	10,8	2,7
<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2	<i>Helioseris cucullata</i>	0,2	0,2	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,8	0,6
<i>Montastraea cavernosa</i>	1,6	0,8	<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella annularis</i>	29,4	8,6
<i>Orbicella annularis</i>	25,2	6,2	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,8	0,5	<i>Orbicella faveolata</i>	6,4	2,2
<i>Orbicella faveolata</i>	13,4	5,5	<i>Orbicella annularis</i>	31,8	8,1	<i>Porites astreoides</i>	2	1,3
<i>Porites astreoides</i>	1,8	1,1	<i>Orbicella faveolata</i>	8,8	2,8	<i>Porites porites</i>	0,6	0,4
<i>Porites porites</i>	0,2	0,2	<i>Porites astreoides</i>	2,8	2,1	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,6	0,7
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,8	0,9	<i>Porites porites</i>	0,4	0,2	<i>Stephanocoenia intersepta</i>	0,4	0,4
<i>Siderastrea siderea</i>	1,6	1,4	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,8	0,8	<i>Siderastrea radians</i>	0,2	0,2
<i>Undaria tenuifolia</i>	2,6	0,9	<i>Siderastrea siderea</i>	2,2	1,5	<i>Siderastrea siderea</i>	1,8	1,6
			<i>Undaria agaricites</i>	0,2	0,2	<i>Undaria tenuifolia</i>	3,8	0,7
			<i>Undaria tenuifolia</i>	3,8	1,4			

## Continuación Anexo A.

Agosto de 2014			Noviembre de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Colpophyllina natans</i>	0,4	0,4	<i>Colpophyllina natans</i>	0,4	0,4
<i>Diploria labyrinthiformis</i>	9,4	3,0	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	10,4	2,4
<i>Montastraea cavernosa</i>	0,2	0,2	<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2
<i>Orbicella annularis</i>	31,8	8,8	<i>Millepora complanata</i>	0,2	0,2
<i>Orbicella faveolata</i>	8	2,7	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,4
<i>Porites astreoides</i>	1,8	1,1	<i>Orbicella annularis</i>	32,4	8,3
<i>Porites porites</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella faveolata</i>	7,8	3,2
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,8	0,8	<i>Orbicella franksi</i>	0,6	0,6
<i>Siderastrea siderea</i>	2,2	1,5	<i>Porites astreoides</i>	2,2	1,0
<i>Undaria agaricites</i>	0,2	0,2	<i>Porites porites</i>	0,2	0,2
<i>Undaria tenuifolia</i>	2,2	1,0	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,8	1,0
			<i>Siderastrea siderea</i>	1,8	1,6
			<i>Undaria tenuifolia</i>	2,6	1,6

**B. Anexo: Cobertura coralina (%) por especie en Tesoro medio registrada en las evaluaciones realizadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014.**

EE: error estándar.

Noviembre de 2013			Febrero de 2014			Mayo de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Colpophyllina natans</i>	4,2	1,3	<i>Agaricia humilis</i>	0,6	0,6	<i>Colpophyllina natans</i>	3,4	1,0
<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,4	0,2	<i>Colpophyllina natans</i>	4,0	1,4	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,4	0,2
<i>Madracis auretenra</i>	0,4	0,4	<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,2	0,2	<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2
<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella annularis</i>	10,8	2,4	<i>Madracis decactis</i>	0,2	0,2
<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,4	<i>Orbicella faveolata</i>	2,0	0,5	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,2	0,2
<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,4	0,4	<i>Orbicella franksi</i>	7,0	2,9	<i>Orbicella annularis</i>	8,8	2,9
<i>Orbicella annularis</i>	9,6	2,2	<i>Porites astreoides</i>	1,8	0,9	<i>Orbicella faveolata</i>	2,2	0,9
<i>Orbicella faveolata</i>	2,0	0,7	<i>Porites porites</i>	1,0	0,3	<i>Orbicella franksi</i>	6,8	3,1
<i>Orbicella franksi</i>	7,4	3,5	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	0,8	0,8	<i>Mycetohpyllia aliciae</i>	0,2	0,2
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,0	1,0	<i>Siderastrea siderea</i>	1,0	0,5	<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,2	0,2
<i>Porites astreoides</i>	2,6	1,6	<i>Undaria agaricites</i>	1,0	0,6	<i>Porites astreoides</i>	2,4	0,9
<i>Porites porites</i>	1,4	0,7	<i>Undaria tenuifolia</i>	1,8	0,4	<i>Porites porites</i>	0,8	0,4
<i>Siderastrea siderea</i>	0,4	0,2				<i>Pseudodiploria strigosa</i>	1,0	1,0
<i>Undaria agaricites</i>	1,2	1,2				<i>Siderastrea siderea</i>	0,6	0,2
<i>Undaria tenuifolia</i>	3,8	1,2				<i>Undaria agaricites</i>	1,0	0,8
						<i>Undaria tenuifolia</i>	1,8	0,7

## Continuación Anexo B.

Agosto de 2014			Noviembre de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Agaricia lamarcki</i>	0,4	0,4	<i>Colpophyllina natans</i>	3,2	1,1
<i>Colpophyllina natans</i>	3,6	1,1	<i>Helioseris cucullata</i>	0,4	0,4
<i>Madracis decactis</i>	0,4	0,4	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,2	0,2
<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,4	<i>Orbicella annularis</i>	11,6	2,9
<i>Orbicella annularis</i>	10,2	3,1	<i>Orbicella faveolata</i>	3,0	1,3
<i>Orbicella faveolata</i>	2,2	0,9	<i>Orbicella franksi</i>	8,2	3,0
<i>Orbicella franksi</i>	7,6	3,7	<i>Mycetohpyllia aliciae</i>	0,4	0,4
<i>Mycetohpyllia aliciae</i>	0,2	0,2	<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,6	0,6
<i>Porites astreoides</i>	2,6	1,5	<i>Porites astreoides</i>	2,2	0,7
<i>Porites porites</i>	1,2	0,5	<i>Porites porites</i>	1,6	0,9
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	0,8	0,8	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	0,8	0,8
<i>Siderastrea siderea</i>	1,2	0,6	<i>Siderastrea siderea</i>	0,4	0,2
<i>Undaria agaricites</i>	2,6	0,7	<i>Undaria agaricites</i>	2,0	1,2
<i>Undaria tenuifolia</i>	0,2	0,2	<i>Undaria tenuifolia</i>	2,0	0,9

**C. Anexo: Cobertura coralina (%) por especie en Pavitos somero registrada en las evaluaciones realizadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014.**

EE: error estándar.

Noviembre de 2013			Febrero de 2014			Mayo de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Colpophyllina natans</i>	1,8	1,0	<i>Agaricia humilis</i>	0,8	0,6	<i>Colpophyllina natans</i>	1,4	0,9
<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,4	0,4	<i>Colpophyllina natans</i>	2,4	1,3	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,2	0,2
<i>Madracis auretenra</i>	0,6	0,4	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,4	0,4	<i>Madracis auretenra</i>	1,6	1,4
<i>Millepora alcicornis</i>	1,6	0,8	<i>Madracis auretenra</i>	1,8	1,0	<i>Millepora alcicornis</i>	2,2	1,0
<i>Millepora complanata</i>	3,0	2,1	<i>Millepora alcicornis</i>	1,0	0,6	<i>Millepora complanata</i>	2,6	2,4
<i>Orbicella annularis</i>	3,2	1,6	<i>Millepora complanata</i>	3,2	1,3	<i>Orbicella annularis</i>	3,4	1,6
<i>Orbicella faveolata</i>	0,8	0,6	<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,4	0,4	<i>Orbicella faveolata</i>	0,8	0,6
<i>Porites astreoides</i>	3,2	0,6	<i>Orbicella annularis</i>	2,6	1,4	<i>Porites astreoides</i>	3,0	1,0
<i>Porites porites</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella faveolata</i>	1,2	0,8	<i>Porites porites</i>	0,6	0,4
<i>Siderastrea siderea</i>	1,2	0,7	<i>Porites astreoides</i>	3,0	0,6	<i>Siderastrea siderea</i>	1,4	0,9
<i>Undaria agaricites</i>	0,4	0,2	<i>Porites porites</i>	0,8	0,5	<i>Undaria agaricites</i>	0,4	0,2
<i>Undaria tenuifolia</i>	26,2	1,4	<i>Siderastrea siderea</i>	1,6	0,8	<i>Undaria tenuifolia</i>	29,4	2,0
			<i>Undaria tenuifolia</i>	29,2	3,2			

## Continuación Anexo C.

Agosto de 2014			Noviembre de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Colpophyllina natans</i>	2,0	0,9	<i>Colpophyllina natans</i>	1,8	1,1
<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,6	0,4	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	0,4	0,4
<i>Madracis auretenra</i>	1,4	1,2	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,6	0,4
<i>Millepora alcicornis</i>	4,8	1,6	<i>Madracis auretenra</i>	2,0	1,4
<i>Millepora complanata</i>	0,2	0,2	<i>Millepora alcicornis</i>	4,6	2,2
<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,4	0,4	<i>Millepora complanata</i>	0,4	0,4
<i>Orbicella annularis</i>	2,6	1,7	<i>Mycetohpyllia lamarckiana</i>	0,4	0,4
<i>Orbicella faveolata</i>	1,4	0,9	<i>Orbicella annularis</i>	3,6	1,5
<i>Porites astreoides</i>	2,8	0,7	<i>Orbicella faveolata</i>	1,4	1,0
<i>Porites porites</i>	0,2	0,2	<i>Porites astreoides</i>	4,0	1,8
<i>Siderastrea siderea</i>	1,4	0,9	<i>Siderastrea siderea</i>	1,2	1,0
<i>Undaria tenuifolia</i>	34,0	4,6	<i>Undaria tenuifolia</i>	29,6	2,9

**D. Anexo: Cobertura coralina (%) por especie en Pavitos medio registrada en las evaluaciones realizadas trimestralmente entre noviembre de 2013 y noviembre de 2014.**

EE: error estándar.

Noviembre de 2013			Febrero de 2014			Mayo de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Agaricia lamarcki</i>	0,6	0,4	<i>Agaricia humilis</i>	1,0	0,6	<i>Agaricia humilis</i>	1,0	0,6
<i>Colpophyllina natans</i>	0,4	0,2	<i>Agaricia lamarcki</i>	0,2	0,2	<i>Colpophyllina natans</i>	1,8	1,1
<i>Eusmilia fastigiata</i>	1,0	0,4	<i>Colpophyllina natans</i>	1,2	0,8	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,2	0,2
<i>Helioseris cucullata</i>	0,4	0,2	<i>Diploria labyrinthiformis</i>	0,2	0,2	<i>Madracis auretenra</i>	0,2	0,2
<i>Madracis auretenra</i>	0,8	0,4	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,8	0,4	<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2
<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2	<i>Helioseris cucullata</i>	0,2	0,2	<i>Millepora complanata</i>	0,4	0,4
<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,2	<i>Madracis auretenra</i>	0,4	0,2	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,4
<i>Orbicella annularis</i>	0,2	0,2	<i>Millepora alcicornis</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella franksi</i>	0,4	0,2
<i>Orbicella faveolata</i>	0,6	0,6	<i>Orbicella franksi</i>	0,8	0,8	<i>Meandrina meandrites</i>	0,4	0,4
<i>Orbicella franksi</i>	0,2	0,2	<i>Porites astreoides</i>	0,4	0,2	<i>Porites astreoides</i>	1,0	0,6
<i>Porites astreoides</i>	0,4	0,4	<i>Siderastrea siderea</i>	0,4	0,4	<i>Siderastrea siderea</i>	0,2	0,2
<i>Pseudodiploria strigosa</i>	0,4	0,4	<i>Undaria agaricites</i>	0,6	0,4	<i>Undaria agaricites</i>	1,4	0,9
<i>Siderastrea siderea</i>	0,4	0,4	<i>Undaria tenuifolia</i>	37,4	4,2	<i>Undaria tenuifolia</i>	34,0	4,2
<i>Undaria agaricites</i>	0,8	0,6						
<i>Undaria tenuifolia</i>	35,6	2,6						

## Continuación Anexo D.

Agosto de 2014			Noviembre de 2014		
Especie	Promedio	EE	Especie	Promedio	EE
<i>Agaricia lamarcki</i>	0,4	0,4	<i>Agaricia lamarcki</i>	0,4	0,4
<i>Colpophyllina natans</i>	2,0	0,9	<i>Colpophyllina natans</i>	2,0	1,1
<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,8	0,4	<i>Eusmilia fastigiata</i>	0,8	0,4
<i>Madracis auretenra</i>	1,0	0,6	<i>Helioseris cucullata</i>	0,2	0,2
<i>Montastraea cavernosa</i>	0,2	0,2	<i>Madracis auretenra</i>	0,8	0,5
<i>Orbicella franksi</i>	0,2	0,2	<i>Meandrina meandrites</i>	0,6	0,6
<i>Meandrina meandrites</i>	0,2	0,2	<i>Montastraea cavernosa</i>	0,4	0,2
<i>Porites astreoides</i>	0,6	0,4	<i>Orbicella faveolata</i>	0,2	0,2
<i>Siderastrea siderea</i>	0,2	0,2	<i>Orbicella franksi</i>	0,2	0,2
<i>Undaria agaricites</i>	3,0	1,4	<i>Porites astreoides</i>	1,2	0,5
<i>Undaria tenuifolia</i>	37,6	3,8	<i>Porites porites</i>	0,2	0,2
			<i>Siderastrea siderea</i>	0,2	0,2
			<i>Undaria agaricites</i>	0,4	0,4
			<i>Undaria tenuifolia</i>	40,4	5,3