



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

La expresión del cambio global en las variables físico-químicas del medio marino regional y su impacto en los ecosistemas marino-costeros colombianos

Paula Judith Rojas Higuera

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía
Bogotá, D. C., Colombia

2013

La expresión del cambio global en las variables físico-químicas del medio marino regional y su impacto en los ecosistemas marino-costeros colombianos

Paula Judith Rojas Higuera

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Geografía

Director:

Doctor José Daniel Pabón Caicedo

Línea de Investigación:

Aspectos biogeofísicos y socioeconómicos del cambio global

Grupo de Investigación:

Tiempo, Clima y Sociedad

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Humanas, Departamento de Geografía

Bogotá, D. C., Colombia

2013

A mis padres, hermanos y sobrinos, por su gran amor y apoyo incondicional.

Los momentos, las situaciones, las circunstancias y los sucesos son como deben ser, porque todo el universo es como debe ser.

Deepak Chopra

Agradecimientos

A la Dirección de Investigación Sede Bogotá por el apoyo a través de su programa de Apoyo de la DIB a tesis de investigación en postgrados, Quinto Corte, Modalidad 1 (Apoyo a proyectos de tesis y trabajos de investigación) que se desarrolló en el marco de la línea de investigación sobre “Aspectos biogeofísicos y socioeconómicos del cambio global”, que desarrolla el grupo de investigación “Tiempo, Clima y Sociedad” en los programas de postgrado (maestría y doctorado) del Departamento de Geografía, Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia.

Al Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (INVEMAR) y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), entidades que suministraron los datos necesarios para el desarrollo de la investigación.

Resumen

Con base en el análisis de datos de temperatura superficial del mar (TSM) y de pH en sectores marino-costeros del mar Caribe y el océano Pacífico colombianos, se identifican las tendencias de largo plazo, que constituyen la expresión regional de los fenómenos globales, calentamiento y acidificación del océano. A partir del establecimiento de estos cambios se infiere su potencial impacto en los ecosistemas marinos presentes en los sectores analizados.

Se evidenció un incremento en la TSM, que en el Caribe es del orden de $0,23^{\circ}\text{C}/\text{decenio}$ y en el Pacífico de $0,18^{\circ}\text{C}/\text{decenio}$. Se encontró una disminución del pH de $-0,071$ unidades/decenio y $0,090$ unidades/decenio, para el Caribe y el Pacífico, respectivamente.

Se estima que hacia finales del siglo XXI habría un aumento de la TSM de hasta 2°C en relación con la observada a comienzos de siglo en los sectores analizados del Caribe y el Pacífico. El pH, por su parte, hacia finales del siglo XXI con el escenario más drástico de los analizados en este trabajo, el A2, habría disminuido hasta en $0,5$ sus valores en las regiones de estudio.

Se estableció que estos cambios en el medio físico marino impactarán significativamente los ecosistemas, especialmente los arrecifes coralinos, las praderas de pastos marinos y los manglares, los cuales se verán afectados en su estructura, funcionamiento y en los organismos y comunidades marinas que los componen.

Palabras clave: calentamiento del océano, acidificación del océano, temperatura superficial del mar, pH, impacto de ecosistemas marinos, Mar Caribe colombiano, Océano Pacífico colombiano.

Abstract

Based on the analysis of the sea surface temperature (SST) and pH data recorded in sectors of the Colombian Caribbean and Pacific coast, the long term trends, which represent the ocean warming and acidification phenomena, were identified. With these changes, the potential impacts on the marine ecosystems were deduced.

It was evidenced a rise of the SST of about 0,23°C/decade for Caribbean, and 0,18°C/decade for Pacific. Also, it was found a reduction of the pH approximately of 0,071 units/decade for Caribbean, and 0,090 units/decade for Pacific sectors.

The estimation of the SST change for the end of 21st century showed an increase of SST of about 2°C compared with the temperature observed at the beginning of this century. At the end of the 21st Century the pH could reduce 0,5 units its value under the A2 scenarios.

Changes in the physical marine environment will impact the ecosystems, specially coral reefs, seagrasses and mangroves, which will be affected on their structure, functioning and their marine organisms and communities.

Key words: ocean warming, ocean acidification, sea surface temperature, pH, marine ecosystems impact, Colombian Caribbean Sea, Colombian Pacific Ocean.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Introducción	1
1. Estado del tema	3
2. Marco geográfico	21
2.1 Provincia Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.....	26
2.1.1 Características meteorológicas y climatológicas	26
2.1.2 Características oceanográficas	26
2.1.3 Ecosistemas insulares.....	27
2.2 Provincia Mar Caribe	28
2.2.1 Características meteorológicas y climatológicas	28
2.2.2 Características oceanográficas	30
2.2.3 Ecosistemas marinos y costeros	31
2.3 Provincia Océano Pacífico Tropical	32
2.3.1 Características meteorológicas y climatológicas	32
2.3.2 Características oceanográficas	34
2.3.3 Ecosistemas marinos, costeros e insulares.....	35
3. Planteamiento del problema	37
4. Objetivos	39
4.1 Objetivo general.....	39
4.2 Objetivos específicos.....	39
5. Marco conceptual y teórico	41
6. Metodología	45
6.1 Operacionalización del modelo conceptual	45
6.2 Datos e información.....	46
6.3 Organización y procesamiento de datos	52
6.4 Análisis de las tendencias.....	52
6.5 Establecimiento de las relaciones TSM(TSA), pH(TSM) y pH(CO ₂) para la construcción de los modelos y estimación de cambios futuros en la TSM y en el pH.....	53

6.6	Calibración, validación y ajuste de los modelos de relación	53
6.7	Análisis de los posibles cambios futuros.....	54
6.8	Determinación del impacto en los ecosistemas marinos.....	55
7.	Resultados y discusión	57
7.1	Comportamiento de la temperatura superficial del mar y pH en el mar Caribe y océano Pacífico colombianos	57
7.2	Relaciones pH vs temperatura superficial del mar	59
7.3	Relación entre la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la temperatura del aire en superficie (TSA)	62
7.4	Relaciones entre pH del agua marina regional y el CO ₂ atmosférico global....	64
7.5	Los posibles cambios futuros en la TSM y el pH del mar en la zona marino-costera colombiana	67
7.6	Impacto en los ecosistemas marinos colombianos	70
7.6.1	Impacto del aumento de la temperatura del mar	70
7.6.2	Impacto de la disminución del pH	73
7.6.3	Impacto socioeconómico del cambio global en los ecosistemas marinos.....	75
8.	Conclusiones	79
	Bibliografía	81

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Distribución del pH de las aguas superficiales marinas en el océano mundial (Doney, 2006).	11
Figura 2-1: Áreas marítimas colombianas.....	23
Figura 2-2: División regional de los espacios marinos de Colombia (IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).	28
Figura 5-1: Intercambio de CO ₂ océano atmosfera (Hönisch et al., 2012).....	42
Figura 5-2: Reacción química del dióxido de carbono en el océano.....	43
Figura 5-3: Fenómenos marinos globales y su expresión regional en ecosistemas marinos y costeros.....	44
Figura 6-1: Operacionalización del modelo conceptual.....	45
Figura 6-2: Puntos con registros de temperatura de la superficie del mar y de pH en el mar Caribe colombiano.....	62
Figura 6-3: Puntos con registros de temperatura de la superficie del mar y de pH en el océano Pacífico colombiano.	51

- Figura 7-1:** Comportamiento de la temperatura media anual del mar (a) y del pH (b) en el mar Caribe colombiano..... 58
- Figura 7-2:** Comportamiento de la temperatura media anual del mar (a) y del pH (b) en el océano Pacífico colombiano. 59
- Figura 7-3:** Modelo de relación entre la temperatura media anual del mar con el pH medio anual en el mar Caribe (arriba) y el Pacífico (abajo) colombianos. 60
- Figura 7-4:** Comparación de las series de los pH observados y los modelados para el Caribe (arriba) y Pacífico (abajo) colombianos. 61
- Figura 7-5:** Comparación del comportamiento interanual de la temperatura del aire (TA) y la temperatura superficial del mar (TSM) en el mar Caribe colombiano (arriba) y Pacífico (centro y abajo)..... 63
- Figura 7-6:** Cuantificación de la relación existente entre la TSM y la TSA en el Caribe colombiano..... 64
- Figura 7-7:** Comparación de la TSM observada y la TSM simulada para el Caribe analizado..... 64
- Figura 7-8:** Cuantificación de la relación $\text{pH}(\text{CO}_2)$ para el Caribe (arriba) y el Pacífico (abajo) colombianos. 65
- Figura 7-9:** Comparación del comportamiento del pH observado y el obtenido a partir de las relaciones (7.4) y (7.5) para el Caribe y para el Pacífico respectivamente..... 67

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Regiones biogeográficas marinas, provincias, ecozonas y ecorregiones del territorio marino colombiano (IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).....	24
Tabla 6-1: Coordenadas estaciones costeras y oceánicas en el mar Caribe colombiano.....	47
Tabla 6-2: Coordenadas estaciones costeras y oceánicas en el océano Pacífico colombiano.....	48
Tabla 7-1: Tendencia por decenio de la temperatura superficial del mar y pH en el mar Caribe colombiano.....	58
Tabla 7-2: Concentraciones de CO ₂ atmosférico (en ppmv) para diferentes cortes en el siglo XXI en los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000).....	68
Tabla 7-3: Cambios en el promedio multianual (norma de 30 años) en la temperatura media anual del aire sobre el Caribe y el Pacífico bajo varios escenarios futuros, en relación con la norma observada a finales de siglo XX (1971-2000), según lo establecido por Pabón (2012).....	69
Tabla 7-4: Posibles valores de la temperatura media del mar (°C) en el Caribe y el Pacífico, bajo los escenarios A2 y B2.....	69
Tabla 7-5: Posibles valores del pH (en unidades) en los años 2025, 2050, 2075 y 2100, bajo los escenarios A2 y B2.....	69

Tabla 7-6:	Posibles impactos identificados del aumento de la temperatura superficial del mar en los ecosistemas marinos colombianos.....	72
Tabla 7-7:	Posibles impactos identificados de la disminución del pH en los ecosistemas marinos colombianos.....	74
Tabla 7-8:	Posibles impactos socioeconómicos identificados en los ecosistemas marinos colombianos.....	77

Introducción

El cambio climático global que se está presentando en la actualidad y que podría acentuarse en los próximos decenios (IPCC, 2007) afectará el ecosistema planetario e impactará sensiblemente los sistemas socioeconómicos de los países del mundo. Diversos autores (Bindoff et al., 2007, entre otros) han señalado que el ambiente marino, uno de los grandes componentes del ecosistema planetario en donde se desarrollan diversos procesos físicos, químicos, biológicos y ecológicos de los cuales depende en alto grado el desarrollo de la sociedad mundial, está presentando cambios en sus características físico-químicas.

La incidencia del cambio global en los procesos físicos, químicos y biogeoquímicos de los océanos y costas ha modificado la biodiversidad marina y la estructura ecológica, funciones, beneficios y servicios de los ecosistemas marinos (Fischlin et al., 2007). Este fenómeno planetario se ha evidenciado en los océanos por el aumento de la temperatura del agua, la acidificación y el aumento del nivel del mar (Solomon et al., 2007).

Los espacios marinos y costeros son el motor del desarrollo y la base de la sobrevivencia de las comunidades de muchos países. En Colombia, cerca de la mitad de su territorio son espacios marinos en donde reside una rica diversidad de ecosistemas y son un elemento ecológico, socioeconómico y cultural importante; estos espacios son afectados por el cambio global que se presenta en el océano.

Algunos estudios (Ruiz, 2010; Pabón, 2012) han mostrado que en la región en donde se encuentra localizado el territorio colombiano están ocurriendo cambios de las variables climatológicas, oceanográficas y del ambiente marino. Si las tendencias de cambio continúan, los efectos sobre el ambiente marino serían considerables, impactando a los ecosistemas marinos y a la comunidad nacional directamente asociada a dichos espacios.

Por lo anterior, en el presente trabajo se plantea el estudio de las tendencias del cambio global relacionadas con el calentamiento y la acidificación del océano y de su impacto en los ecosistemas marinos y costeros en el territorio marítimo colombiano, evaluando la expresión regional.

1. Estado del tema

El cambio global incide en los procesos físicos, químicos y biogeoquímicos de los océanos y costas, con lo que modifica su estructura ecológica, sus funciones, beneficios y servicios. Los patrones de distribución de las variables oceánicas y de circulación marina están asociados al clima predominante en la región. Por ello, el cambio en las variables climatológicas tiene efectos en los procesos biogeofísicos del océano e impacta los ecosistemas. La evidencia más clara sobre la relación clima-océano está en los efectos del cambio climático en el ambiente marino (Fischlin et al., 2007).

Diferentes autores han señalado las diversas vías y formas a través de las cuales se expresa el cambio global en el medio marino, el cual se ha evidenciado principalmente por el incremento en las concentraciones de CO₂, el ascenso del nivel del mar y el aumento de la temperatura del agua (Najjar et al., 2010). La incidencia del cambio global en el océano se ha observado principalmente en los ciclos biogeoquímicos (Durrieu de Madron et al., 2011; Jennerjahn, 2012), en los procesos físicos y químicos del océano (Carmack y McLaughlin, 2011), en la biología del océano (Miller et al., 2007; Brierley y Kingsford, 2009), en la biodiversidad marina (Worm y Lotze, 2009; Lejeusne et al., 2010), en la ecología del océano (Jennerjahn, 2012), en la calidad química de la biota acuática (Carere et al., 2011), en los ecosistemas marinos (Brander; 2010; Schwing et al., 2010; Eissa y Zaki, 2011; Firth y Hawkins, 2011; Wassman, 2011) y, en los usos y servicios de los ecosistemas marinos, como la pesquería y el turismo (Kopke y O'Mahony, 2011; Norman-López et al., 2012).

El cambio global ha afectado la reproducción, conducta y crecimiento de algunos organismos marinos (Pörtner, 2008); la estructura, abundancia, distribución y fenología de las comunidades de plancton (Hays et al., 2005); la abundancia y expansión de cianobacterias tóxicas (O'Neil et al., 2012; Paerl y Paul, 2012); la fecundidad y supervivencia de algunos copépodos (Richmond et al., 2007); el estado larval de los percebes (Pansch et al., 2012); las tasas de compensación y respiración de algunos

mejillones (Chinellato et al., 2010); la respuesta respiratoria y metabólica de las estrellas de mar (McElroy, et al., 2012); la sobrevivencia de las plánulas y crecimiento de los pólipos de algunos corales (Anlauf et al., 2011); la distribución de algunas especies de macroalgas (Merzouk y Johnson, 2011; Wernberg et al., 2011); el crecimiento, reclutamiento y diversidad del arenque (Hay et al., 2008); y la fisiología, crecimiento, actividad y maduración del bacalao del Atlántico (Mieszowska et al., 2009).

Igualmente, algunos efectos del cambio global se han observado en la dinámica de la cadena trófica (Travers et al., 2007; Jennings y Brander, 2010; Moloney et al., 2011), en las comunidades de macroalgas y algunos invertebrados (Wernberg et al., 2009), en las comunidades de erizos de mar, crustáceos y peces (Byrne et al., 2010b; Henderson et al., 2011), en las comunidades de tortugas marinas (Poloczanska et al., 2009), en los ecosistemas pelágico y planctónico (Edwards, 2009), en la estructura y función de los ecosistemas abisales (Smith et al., 2008), en los procesos fisiológicos de los organismos de los ecosistemas intermareales (Helmuth et al., 2011), en la distribución y abundancia de la fauna de las costas rocosas (Poloczanska et al., 2011), en las pesquerías del sur de África (Clark, 2006), del Ártico (Schrank, 2007), de Noruega (Stenevik y Sundby, 2007), del noreste de Asia (Kim, 2010), en la distribución de las especies dominantes de los ecosistemas marinos (Cury et al., 2008), en la dispersión y conectividad de las poblaciones marinas (Lett et al., 2010) y en las comunidades de cetáceos (Gambiani et al., 2009; Alter et al., 2010).

La expresión más amplia de cambio global en el medio oceánico es el calentamiento y la acidificación del océano, este último incentivado por el incremento de CO₂ en la atmósfera. La incidencia del cambio global en los procesos físicos, químicos y biogeoquímicos de los océanos y costas ha modificado la biodiversidad marina y la estructura ecológica, funciones, beneficios y servicios de los ecosistemas marinos (Fischlin et al., 2007).

El calentamiento del océano se ha observado en todos los océanos y mares del planeta y ha causado varios impactos en las comunidades ecológicas marinas (Kordas et al., 2011); en los organismos y ecosistemas marinos, costeros y estuarinos (Madeira et al., 2012); en la distribución de algunas especies en los mares europeos del norte y sur

(Philippart et al., 2011); en la densidad del crustáceo *Euphasia superba*, ocasionado por cambios atmosféricos y criosféricos en el Pacífico Sur (Whitehouse et al., 2008); en la dominancia de especies, la estructura, diversidad y el funcionamiento de los ecosistemas marinos y, desplazamientos biogeográficos en el Atlántico Norte (Beaugrand, 2009); y en la cadena alimenticia, alterando el flujo de energía y la estructura trófica en el Mar de Bering (Coyle et al., 2007).

Con el fin de realizar seguimiento y monitoreo de esta variable en el océano, se han realizado varios estudios de medición y estimaciones sobre el calentamiento de los océanos en el mundo (Gouretski et al., 2007; Lyman et al., 2010) y, se han realizado observaciones y modelaciones sobre la incidencia de las fuerzas antropogénicas en el calentamiento del océano (Pierce et al., 2006). Así mismo, se han realizado observaciones del calentamiento de las aguas profundas del océano, ocasionando cambios en la circulación termohalina global (Fukasawa et al., 2004) y del calentamiento en la columna de agua en el océano Atlántico Sur (Johnson y Doney, 2006); y, estudios sobre los cambios de temperatura en el océano Atlántico Norte y las implicaciones sobre el calentamiento del océano en el sistema climático (Levitus et al., 2000; Levitus et al., 2005; Dmitrenko et al., 2008).

El aumento de la temperatura del mar ha afectado las afloraciones del fitoplancton en las interacciones de la cadena trófica, el balance entre la producción primaria y la producción secundaria y entre las producciones secundarias pelágica y bentónica (IGBP, 2003; Freitas et al., 2007; Maar y Hansen, 2011) y, la fisiología algal de algunas especies (Lassen et al., 2010). Estas alteraciones se ha evidenciado en Colombia con los estudios realizados por Castillo y Vizcaíno (1993) durante el fenómeno El Niño 1991-1992 en el océano Pacífico colombiano y por García-Hansen (2001) durante el evento El Niño 1997-1998 en la Ensenada de Tumaco, reportando una notable disminución de la abundancia de algunas especies de fitoplancton, debido al aumento de la temperatura superficial del mar durante estos eventos; no obstante, algunas especies de fitoplancton aparecen únicamente durante el evento El Niño, de acuerdo con lo reportado por Medina (1998) y CCCP (2002).

Igualmente, el calentamiento del océano ha ocasionado impactos en la abundancia y distribución de los copépodos de los géneros *Acartia*, *Calanus*, *Pseudocalanus* y

Centropages y del grupo *Paracalanus–Pseudocalanus* (IGBP, 2003; Neuheimer et al., 2010; Stegert et al., 2010; McGinty et al., 2011), lo cual se ha demostrado por algunos estudios realizados en la Bahía Narragansett de Estados Unidos (Sullivan et al., 2007), en la costa de Oregon, Estados Unidos (Peterson et al., 2002) y en el Atlántico Norte (Stegert et al., 2010; McGinty et al., 2011). Igualmente, la distribución del zooplancton en las áreas costeras del océano Pacífico colombiano ha sido afectada por el aumento de la temperatura superficial del mar (CCCP, 2002).

De otra parte, los efectos directos e indirectos del aumento de la temperatura del mar también se han observado en los productores primarios epilíticos y la lapa *Lottia scabra* (Morelissen y Harley, 2007); en las interacciones presa – depredadores de bivalvos epibénticos y en los crustáceos de los estuarios (Freitas et al., 2007); en la tasa metabólica de los ofiuros (Christensen et al., 2011); en el asentamiento larval de los erizos mar del Mar Mediterráneo (Byrne et al., 2011; Privitera et al., 2011); y en la bioacumulación de radionúclidos y elementos traza en los huevos de la sepia *Sepia officinalis* (Lacoue-Labarthe et al., 2012). Así mismo, el calentamiento del océano en el territorio marítimo colombiano ha presentado efectos en los organismos marinos, como el registrado en Bahía Málaga (Pacífico), en donde el fenómeno El Niño 1997 - 1998 afectó el ciclo reproductivo del bivalvo *Donax dentifer*, causando desoves débiles y anormales (Riascos, 2006).

Otras comunidades afectadas por el calentamiento del océano son las macroalgas *Macrocystis pyrifera* (Johnson et al., 2011); las macroalgas endémicas de Australia (Wernberg et al., 2011), de las Islas Canarias (Sangil et al., 2012) y del Mar de Cantabria oriental (Díez et al., 2012); y las poblaciones de gorgonáceos (Bensoussan et al., 2010). Así mismo, los impactos causados por el calentamiento del océano están relacionados con las respuestas de los peces demersales al cambio de la temperatura del agua (Dulvy et al., 2008); el comportamiento de los peces juveniles de arrecifes coralinos (Nowicki et al., 2012); la reducción del tamaño del cuerpo en el salmón japonés (Kishi et al., 2010); la migración, la distribución y la pesquería del pez aleta amarilla en el mar del Japón (Tian et al., 2012); la reducción de la tolerancia de la hipoxia en algunos peces coralinos (Nilsson et al., 2010); y el rendimiento de la reproducción y biología de las tortugas marinas (Fuentes y Cinner, 2008; Mazaris et al., 2009).

Los arrecifes coralinos han sido uno de los ecosistemas marinos más afectados por el aumento de la temperatura del mar, lo cual ha causado la pérdida de la resistencia y resiliencia al blanqueamiento, ocasionando a su vez la pérdida de cobertura y la disminución de tasas de crecimiento en algunas zonas (Kennedy et al., 2002; Obura, 2005; Manzello et al., 2007; Baker et al., 2008; Brierley y Kingsford, 2009; INVEMAR, 2009; Lough y Cooper, 2011; Putnam y Edmunds, 2011); la disminución de las tasas de calcificación del coral *Porites* (Lough, 2008) y del coral *Acropora digitifera* (Inoue et al., 2012); la disminución de la expresión genética en los juveniles del coral *Acropora tenuis* (Yuyama et al., 2012); y la mortalidad del coral rojo *Corallium rubrum* en el Mar Mediterráneo (Torrents et al., 2008).

El blanqueamiento de coral ocurre en condiciones de calentamiento del océano, lo que se ha corroborado en episodios de calentamiento del mar en el Pacífico oriental asociado al fenómeno de El Niño, el cual afecta el crecimiento (Spencer, 2000; IPCC, 2002; Crabbe, 2007; Crabbe, 2008; Hetzinger et al., 2010), ocasiona la pérdida de cobertura en algunas áreas, cambia la estructura de la comunidad coralina, aumenta las enfermedades del coral, disminuye la biodiversidad asociada al arrecife coralino (Baker et al., 2008) y ocasiona la mortalidad de grandes áreas coralinas (Edwards et al., 2001; Sheppard y Rioja-Nieto, 2005; Miller et al., 2006; Veron et al., 2009; Yu et al., 2012).

Los corales se desarrollan normalmente entre 17°C y 34°C, sin embargo, la mayoría vive dentro de su límite máximo; por lo tanto, cambios bruscos en la temperatura pueden causar deterioro de las especies y comunidades de los arrecifes coralinos (Díaz et al., 2000). El incremento de la temperatura superficial del mar ha causado blanqueamiento de coral, lo cual se ha evidenciado en los eventos El Niño, causando blanqueamientos masivos de algunas especies de coral y en algunas áreas de Colombia (INVEMAR, 2011), como lo reportan los estudios de Alvarado et al. (1986) y Solano (1994) en Islas del Rosario, el estudio de Solano (1994) en Bahía Portete y el estudio de Garzón-Ferreira et al. (2002) en Chengue y San Andrés.

Las aguas superficiales del mar Caribe aumentaron su temperatura entre 1.5°C y 2.5°C en el año 2005, ocasionando blanqueamiento masivo en los archipiélagos de Nuestra Señora del Rosario y de San Bernardo, con un porcentaje promedio de 42%, siendo las

especies más afectadas *Porites astreoides*, *P. furcata*, *Manicina aerolata*, *Acropora plamata*, *A. cervicornis*, *Colpophyllia natans*, *Montastraea annularis*, *M. faveolata*, *M. franski*, *Agaricia tenuifolia*, *Diploria labyrinthiformis* y *Siderastrea siderea* (INVEMAR, 2011).

Así mismo, en el océano Pacífico colombiano se han reportado casos de blanqueamiento de coral durante el evento El Niño de 1982-1983, en el cual la temperatura del agua aumentó entre 1°C y 2°C, generando un deterioro del 85% de los corales de Isla Gorgona (Díaz et al., 2000). Durante el evento El Niño 1997 – 1998, con un incremento de la temperatura del agua de 3°C a 4°C, se observó blanqueamiento y mortalidad de coral en Utría, Gorgona y Malpelo (Díaz et al., 2000). De acuerdo con Vargas-Ángel et al. (2001), en Isla Gorgona se presentó un blanqueamiento de coral entre el 21 y 24%, siendo la especie más afectada *Pocillopora damicornis*, lo cual es similar a lo reportado por Jiménez et al. (2001) en Costa Rica y por Reyes (2001) en México, encontrando en ambos casos, altos porcentajes de blanqueamiento de *Pocillopora spp.*

Los arrecifes coralinos del Golfo de Panamá y de Isla Galápagos también presentaron blanqueamiento durante el evento El Niño 1997 – 1998 (Podestá y Glynn, 2001), situación similar a lo ocurrido en Brasil, según Garzón-Ferreira et al. (2002), en donde se presentó blanqueamiento del 80% de la cobertura de las especies de *Agaricia agaricites*, *Mussismilia hispida* y *Porites astreoides*. Igualmente, en este evento El Niño se presentó blanqueamiento de los corales en el Pacífico de Panamá, disminuyendo su cobertura entre el 50 y el 100% y, en Venezuela, alcanzando una reducción de la cobertura en un 40% (Garzón-Ferreira et al., 2002).

No obstante, de acuerdo por Idso y Ferguson (2009), se ha encontrado un aumento en las tasas de calcificación de *Montastraea annularis* y *M. flaveolata* con el incremento de la temperatura del agua marina, en diferentes localidades del Golfo de México, Belice, las Islas Vírgenes y Curazao.

Las praderas de pastos marinos también han sido afectados por el calentamiento del agua de mar, ocasionando cambios en la tasa de crecimiento, en las funciones fisiológicas de las plantas, en sus patrones de reproducción, en las comunidades (Short y

Neckles, 1999; Waycott et al., 2007), en el metabolismo (Waycott et al., 2007; Brierley y Kingsford, 2009), en la capacidad fotosintética (Campbell et al., 2006) y, la disminución de la cobertura (García et al., 2012).

Las praderas de pastos marinos se desarrollan bien entre 28°C y 30°C, siendo su temperatura límite 37°C; por tal motivo, alteraciones bruscas y prolongadas de la temperatura pueden afectar este ecosistema marino (Díaz et al., 2003). El incremento de la temperatura del mar ha afectado a los pastos marinos en Colombia, de acuerdo con Díaz et al. (2003), el fenómeno El Niño ha incidido en la floración y maduración de los frutos de los pastos. Aunque no existen reportes sobre los efectos del aumento de la temperatura del mar en las praderas de pastos marinos del territorio marítimo colombiano, se han realizado investigaciones relacionados con la disminución de la capacidad fotosintética de algunas especies tropicales de los géneros *Halophila*, *Zostera* y *Syringodium* (Campbell et al., 2006).

Así mismo, en otras regiones del Atlántico y el Pacífico americano se han reportado casos del impacto durante el evento El Niño 1997 - 1998, disminuyendo la cobertura en un 7% de pastos marinos en la Bahía de Tampa, Estados Unidos (Tomasko, 2002), lo cual fue comprobado con el estudio de Carlson et al. (2003) en la especie *Thalassia testudinum*, y los géneros *Halodule* y *Syringodium*. Igualmente, durante este mismo evento se presentó una alteración en las comunidades de pastos marinos en la Bahía de San Diego, Estados Unidos, en donde se observó una disminución de la densidad de la especie dominante de esa región, *Zostera marina* y un aumento en la abundancia de *Ruppia maritima*, reemplazando en algunos casos a la especie dominante (Johnson et al., 2003). En otro estudio, realizado por Echavarría-Heras et al. (2006), se evidenció que el evento El Niño también disminuyó la cobertura de *Zostera marina* en la Bahía de San Quintín, Baja California (México).

Otro de los ecosistemas impactados por el calentamiento global son los manglares, los cuales han sido afectados en la biología de las especies, las tasas de crecimiento, la capacidad reproductiva, las condiciones fisiográficas adecuadas para el suministro de propágulos, la composición de las especies, el desarrollo estructural del bosque y su expansión a otras zonas de los manglares (IPCC, 2002; Gilman et al., 2008; Brierley y Kingsford, 2009; Gomes Soares et al., 2012).

El incremento de la temperatura superficial del mar afecta los ecosistemas de manglar, incidiendo en la salinidad, los ciclos biogeoquímicos, la productividad primaria, la actividad microbiana, la fisiología de las especies y en los organismos marinos asociados a este ecosistema, entre otros (IPCC, 2002; Jarvie et al., 2012; Jennerjahn, 2012; Tabot y Adams, 2013). En Colombia, no se han reportado investigaciones especiales sobre el efecto del calentamiento del agua de mar en los manglares; no obstante, se ha evidenciado la incidencia del evento El Niño 1997 – 1998, causando cambios en los patrones hidrológicos y sedimentarios, lo cual aumenta la salinidad y por tanto, disminuye la densidad de *Avicennia germinans* en la costa Caribe de Venezuela (Barreto, 2008) y del género *Rhizophora* en Micronesia (Drexler y Ewel, 2001). Así mismo, Tolan (2007) manifiesta que el fenómeno El Niño incide en los patrones de salinidad, disminuyendo ésta y a su vez, afectando la productividad en los estuarios en el Golfo de Texas (Estados Unidos). Igualmente, en el estuario Schelde, Bélgica, se evidenció el impacto del aumento de la temperatura en la disminución de las concentraciones de los nutrientes (nitrato, amonio, fosfato y sílice disuelto), en un 50% (Struyf et al., 2004).

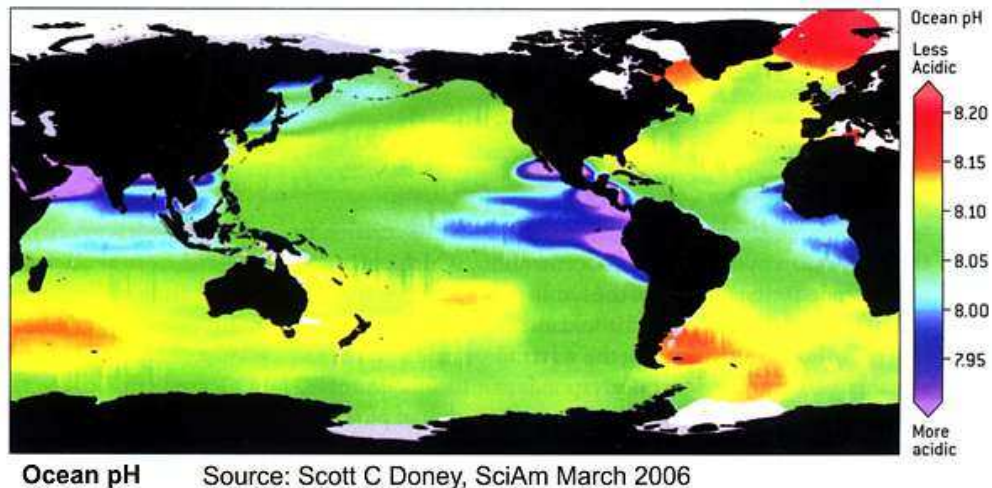
La acidificación del océano ha sido evidente, pues los cambios del pasado en la química del océano, infieren sobre los cambios presentes y futuros de la misma (Pelejero et al., 2010); según Marsh (2005), el pH podría disminuir 0.5 unidades en el 2100, comparado con los registros históricos del pH, tomados a partir de isótopos de boro en los foraminíferos planctónicos (Hönisch y Hemming, 2005). No obstante, Gibbs et al. (2010) mostraron, a través de conteos de nanoplancton calcáreo fósil y de datos de estroncio/calcio específico del taxón, que la producción del nanoplancton no varía significativamente, indicando que en las escalas de tiempo geológicas no hay evidencia de interrupción de producción del carbonato del fitoplancton.

El interés por hacer el seguimiento a la acidificación del océano ha impulsado diversos programas de mediciones y proyectos de investigación. Como resultado, se dispone de la distribución espacial del pH (Figura 1-1), con las estimaciones realizadas de la acidificación de los océanos del mundo (Feely et al., 2009). En éstos, además de las mediciones puntuales en diversos períodos y lugares, se ha tratado de reconstruir series de datos de pH a partir de la temperatura superficial del mar y la clorofila-a en el Pacífico

Norte (Nakano y Watanabe, 2005) y se han desarrollado procesos de interpolación para estimar el carbono orgánico disuelto y la alcalinidad total del agua marina a partir del oxígeno, salinidad y temperatura en el Mar Mediterráneo (Touratier y Goyet, 2011).

Así mismo, se ha reconstruido el comportamiento de la acidificación del océano en el tiempo geológico, utilizando modelos matemáticos (Kump et al., 2009); se han estimado variaciones del pH del océano australiano, a partir de registros radioisotópicos del boro ($\delta^{11}\text{B}$) extraídos del coral *Porites* (Wei et al., 2009); se han realizado observaciones directas del descenso del pH en el océano Pacífico Norte (Dore et al., 2009; Byrne et al., 2010a) y en el sistema de la Corriente de California (Hauri et al., 2009); y, se han estimado las tendencias de la disminución del pH en el Pacífico Norte occidental, utilizando series de tiempo de 25 años de variables de carbonato (Midorikawa et al. 2010) y en la costa Honshu en Japón, utilizando estimaciones de la presión parcial de CO_2 (Ishii et al., 2011). De otra parte, la predicción de los impactos de la acidificación del océano, por medio del modelamiento (Blackford, 2010) y el monitoreo de la acidificación del océano, utilizando imágenes de satélite (Gledhill et al., 2009) son herramientas importantes para observar las respuestas de los sistemas marinos.

Figura 1-1: Distribución del pH de las aguas superficiales marinas en el océano mundial (Doney, 2006).



El pH del agua de mar está muy relacionado con las concentraciones de CO_2 atmosférico; la absorción oceánica de CO_2 proveniente de la quema de combustible fósil

podría generar grandes cambios del pH en el agua de mar en los próximos siglos, comparado con los registros geológicos de los pasados 300 millones de años (Caldeira et al., 2003). Igualmente, Khatiwala et al. (2009) sugieren que la absorción de CO₂ antropogénico por parte del océano durante la revolución industrial, ha aumentado notablemente desde 1950 y que la biosfera terrestre ha sido una fuente neta de CO₂ durante este periodo, contribuyendo también a la absorción oceánica de este gas durante el mismo período.

Así mismo, se ha demostrado que la variabilidad del pH ha afectado los procesos biológicos y ambientales relacionados con el CO₂, como la fotosíntesis y la respiración (Blackford y Gilbert, 2007); la saturación del carbonato en el estuario de Puget Sound en el Pacífico noroccidental de Estados Unidos (Feely et al., 2010); y el ciclo del carbono y otras propiedades biogeoquímicas en el Océano Atlántico (Tsung-Hung y Wanninkhof, 2010).

De otra parte, la acidificación del océano afecta algunos procesos físicos, químicos y biológicos marinos (Doney et al., 2009), como la frecuencia del sonido, disminuyendo su absorción en un 40% (Brewer y Hester, 2009); las propiedades ópticas del agua debido a la disminución de la calcificación de los cocolitóforos (Balch y Utgoff, 2009); el carbono inorgánico disuelto en aguas superficiales (Ali y Atekwana, 2009); la estabilidad de los sedimentos carbonatados de aguas someras (Tynan y Opdyke, 2011); la solubilidad, absorción, toxicidad y tasas de los procesos redox de los metales del agua de mar (Millero et al., 2009); y los organismos y ecosistemas marinos (Turley y Findlay, 2009).

La disminución del pH en el océano ha tenido impactos en diferentes organismos marinos como bacterias, moluscos bentónicos, equinodermos, cocolitóforos, foraminíferos, pterópodos, pastos marinos, medusas y peces, entre otros (Guinotte y Fabry, 2008; Doney et al., 2009; Fabry et al., 2009). Dentro de estos impactos se puede mencionar el aumento de la producción bacteriana marina (Lidbury et al., 2012); la variación en los estados de fertilización, segmentación, larval, asentamiento y reproducción de equinodermos, bivalvos, corales y crustáceos (Kurihara, 2008); la disminución de las tasas de calcificación de los organismos marinos calcificadores (Orr et al., 2005; Balch y Fabry, 2008; Hofman et al., 2008; Rost et al., 2008; Cooley et al., 2009;

Anderson et al., 2010; Kroeker et al., 2013); y la disminución en la producción del nauplio de algunas especies de copépodos (Fitzer et al., 2012). De otra parte, de acuerdo con Kurihara e Ishimatsu (2008), la supervivencia, tamaño del cuerpo y la velocidad del copépodo *Acartia tsuensis*, no son afectados significativamente por la disminución del pH en agua de mar; y otros organismos como la diatomea *Thalassiosira weissflogii*, son afectados por el aumento en el pH (Milligan et al., 2009).

Así mismo, la disminución del pH oceánico ha afectado la dinámica de especies bentónicas (Wootton et al., 2008); las tasas de crecimiento de foraminíferos (Kuroyanagi et al., 2009); el desarrollo embrionario de algunos anfípodos intermareales (Egilsdottir et al., 2009); el crecimiento y el desarrollo de las post-larvas de algunos percebes (Findlay et al., 2010); el desarrollo larval de los caracoles (Crim et al., 2011); los procesos de calcificación y metabolismo de la sepia (Gutowska et al., 2008); la bioacumulación de elementos traza en algunas especies de calamar y en la sepia (Lacoue-Labarthe et al., 2011; Lacoue-Labarthe et al., 2012); la reducción de la presión parcial de oxígeno en el hemolinfa, causado por la hipercapnia, en algunos cangrejos (Metzger et al., 2007); y la reducción en un 20% de la tasa de calcificación y aumento de las tasas de fotosíntesis en un 13% del alga coralina *Hydrolithon sp* (Semese et al., 2009). Sin embargo, Range et al. (2011) y Schram et al. (2011) no identificaron efecto alguno de la acidificación del océano sobre las almejas juveniles *Ruditapes decussatus*, ni sobre las tasas de regeneración y crecimiento de la estrella de mar *Luidia clathrata*, respectivamente.

Otros impactos de la acidificación del océano están relacionados con la variación de los estados de todo el ciclo de vida y los principales procesos biológicos de los equinodermos (Dupont et al., 2010); con el desarrollo temprano, la locomoción, alimentación, las elevadas tasas metabólicas y el balance ácido-base extracelular del erizo de mar (Moulin et al., 2011; Spicer et al., 2011; Stumpp et al., 2011a; Stumpp et al., 2011b; Yu et al., 2011); con la tasa metabólica de algunos ofiuros (Christensen et al., 2011); con el desarrollo larval de algunas especies de estrellas de mar (Dupont et al., 2008); y con el balance ácido-base de algunas especies intermareales, como en la especie *Psammechinus miliaris*, la cual alcanza una mortalidad del 100% a un pH de 6.63 (Miles et al., 2007). Igualmente, la presencia del erizo cavador *Echinocardium cordatum* y la reducción de pH oceánico afectan los perfiles del pH dentro del sedimento

y ocasionan cambios en la comunidad de nematodos en los sedimentos submareales (Dashfield et al., 2008).

Sin embargo, Hendriks y Duarte (2010) y, Hendriks et al. (2010) consideran que la biota marina presenta más resistencia a la acidificación del océano, ya que este efecto en los organismos marinos durante los estados adulto, juvenil y larval, es diferente en las especies y existe variación en la reacción de los organismos en los estados del ciclo de vida y por tanto, el impacto no es significativo en la diversidad marina.

De otra parte, la acidificación del océano ha impactado los ecosistemas marinos, incluyendo corales tropicales constructores de arrecifes, corales de agua fría, algas coralinas incrustantes y pastos marinos, entre otros, ocasionando cambios en sus funciones (Fabry et al., 2008; Guinotte y Fabry, 2008; Widdicombe y Spicer, 2008; Kleypas y Yates, 2009). Las comunidades de macroalgas han sido afectadas por la acidificación del océano, disminuyendo la riqueza de algunas especies y alterando sus hábitats (Porzio et al., 2011).

Los arrecifes coralinos han sido muy afectados por la acidificación del océano, causando la reducción de su biodiversidad, blanqueamiento y en algunas ocasiones la muerte (Baker et al., 2008; Crabbe, 2009; Veron et al., 2009), la disminución del crecimiento del esqueleto (Krief et al., 2010), la reducción de la densidad de las zooxantelas (Krief et al., 2010; Anlauf et al., 2011), la disminución de la calcificación (Buck y Folger, 2010; Iguchi et al., 2012) y cambios en las comunidades marinas asociadas (Atkinson y Cuet, 2008; Ishimatsu et al., 2008).

Los arrecifes de coral están formados por carbonato de calcio (CaCO_3), el cual se disuelve con la adición de dióxido de carbono (CO_2) al agua marina, acidificando el medio y ocasionado a su vez, la disminución de la tasa de calcificación (Kleypas y Yates, 2009), lo cual indica esqueletos más frágiles y de menor densidad (INVEMAR, 2009). De acuerdo con Caldeira y Wickett (2003), durante el siglo pasado, el pH ha disminuido 0.1 unidades, lo que significa un aumento en la acidez del océano en un 30% (INVEMAR, 2009; Feely et al., 2010), causando efectos negativos en las especies y comunidades de coral.

Actualmente, en el país se están realizando estudios sobre los efectos de la acidificación del océano en los corales, por lo tanto, aún no se ha publicado los resultados de estas investigaciones. No obstante, en el ámbito mundial se ha evidenciado la incidencia de la disminución del pH en los arrecifes de coral, lo cual se evidencia con las investigaciones realizadas sobre la disminución en el crecimiento del esqueleto y la densidad de las zooxantelas de los corales *Porites sp* y *Stylophora pistillata* (Krief et al., 2010) y en *Porites panamensis* (Anlauf et al., 2011); de *Porites australiensis* (Iguchi et al., 2012) y de los corales escleractinios de aguas frías (McCulloch et al., 2012); y el blanqueamiento del coral de los géneros *Porites* (Anthony et al., 2008; Wei et al., 2009) y *Acropora* (Anthony et al., 2008).

Así mismo, la disminución del pH ha afectado otras especies de coral, como *Cladocora caespitosa*, especie muy importante en el Mar Mediterráneo y la cual ha disminuido su tasa de calcificación de acuerdo con Movilla et al. (2012) y Trotter et al. (2011); otra especie del Mar Mediterráneo, *Oculina patagonica*, también ha reducido su tasa de calcificación en un 35% (Movilla et al., 2012). Así mismo, Krief et al. (2010) indica la reducción de la densidad de las zooxantelas y de la tasa de calcificación en un 60% de *Stylophora pistillata*.

No obstante, según Idso y Ferguson (2009), aunque durante el siglo pasado, el pH ha disminuido 0.1 unidades, las tasas de calcificación de los corales han aumentado, al igual que la temperatura y la concentración de CO₂; por lo tanto, la disminución potencial del pH oceánico no demuestra un detrimento en los corales y otra vida marina.

Las praderas de pastos marinos también pueden ser afectados por la acidificación del océano, cuyo impacto varía según la especie y las condiciones ambientales, afectando la distribución de las especies, debido a la alteración de la competencia entre las especies de pastos marinos y entre las poblaciones de pastos marinos y las poblaciones algales (Short y Neckles, 1999; Waycott et al., 2007; Brierley y Kingsford, 2009).

Los pastos marinos utilizan el bicarbonato de calcio (HCO₃⁻) y el dióxido de carbono (CO₂) como fuente de carbono inorgánico, dependiendo de la especie (Short y Neckles, 1999; Waycott et al., 2007; Guinotte y Fabry, 2008); las especies tropicales como

Halophila ovalis, *Cymodocea rotundata*, *Syringodium isoetifolium* y *Thalassia testudinum* utilizan el bicarbonato de calcio como fuente de carbono inorgánico, mientras que otras especies como *Enhalus acoroides*, *Halodule wrightii* y *Cymodocea serrulata* utilizan el dióxido de carbono (Waycott et al., 2007). Dentro de este contexto, en ambos casos, las especies estarían beneficiadas por el aumento del dióxido de carbono y por ende, del bicarbonato de calcio; no obstante, de acuerdo con Waycott et al. (2007) existen algunas especies, como *Cymodocea serrulata*, que disminuyen su productividad con grandes cantidades de carbono inorgánico.

Aunque en Colombia no se han realizado estudios sobre el impacto de la disminución del pH en los ecosistemas de pastos marinos, existen investigaciones realizadas en otras regiones tropicales del mundo, como el de Waycott et al. (2007), quienes plantean que algunas especies de los géneros *Zostera* y *Posidonia*, en Australia, han reducido su productividad ante la acidificación del océano; sin embargo, de acuerdo con Short y Neckles (1999), las praderas de *Thalassia testudinum* del mar Caribe, han aumentado su productividad con la disminución del pH del agua marina.

Otro de los ecosistemas afectados por la acidificación del océano son los manglares, pues la reducción del pH incide en la solubilidad química, la disponibilidad de nutrientes, la descomposición de la materia orgánica, la mineralización diagenética de la materia orgánica y, ocasiona alteraciones en la cadena trófica de los estuarios asociados a este ecosistema (IPCC, 2002; Gilman et al., 2008; Feely et al, 2010; Comeaux et al., 2012; Jennerjahn, 2012).

Los efectos de la acidificación del océano en los ecosistemas de manglar son poco conocidos en el ámbito mundial y no han sido estudiados en Colombia. No obstante, se tiene evidencia del efecto de la disminución del pH en la oxidación y degradación de la materia orgánica durante las reacciones diagenéticas del manglar del género *Avicennia*, en el golfo de México (Comeaux et al., 2012) y, en los procesos biológicos y químicos de las aguas estuarinas de los manglares de la costa noroccidental del Pacífico en Estados Unidos, afectando organismos marinos como fitoplancton, zooplancton, crustáceos y peces, entre otros (Feely et al, 2010).

Otro fenómeno asociado al cambio global en el océano es el ascenso del nivel del mar. Éste ha aumentado entre 1 y 2 mm por año, durante el siglo XX, debido al calentamiento del océano ocasionado principalmente por la expansión térmica del agua y por el intercambio de agua con los océanos y otros reservorios (glaciares, capas de hielo, ciclo hidrológico); no obstante, algunos procesos oceanográficos, como la circulación oceánica y la presión atmosférica, también afectan el nivel del mar en la escala regional y a su vez, en el global (IPCC, 2007; Bindoff, et al., 2007). El aumento del nivel del mar afecta la margen continental, incluyendo inundación de humedales, erosión costera y aumento de mares de leva (IPCC, 2007).

El nivel del mar puede afectar algunos ecosistemas marinos como estuarios y manglares, pues al aumentar el nivel del mar rápidamente, podría inundar los suelos y causar la muerte de la flora por estrés salino, la cual podría moverse tierra adentro sobre costas sedimentarias poco desarrolladas con pendientes suaves. Así mismo, los estuarios y manglares contribuyen a la productividad biológica de sistemas costeros; por lo tanto, su agotamiento o pérdida podría afectar el flujo de nutrientes, la circulación de energía y el hábitat esencial para gran cantidad de especies (Kennedy et al., 2002; Hoegh-Guldberg, 2005).

De otra parte, los ecosistemas marinos y costeros tiene la capacidad de ofrecer bienes y servicios esenciales a la sociedad y están siendo afectados positiva y negativamente por el cambio global, ocasionando cambios en los patrones de las corrientes, cambio en la disposición de nutrientes, alteración de la productividad, cambio en los organismos y ecosistemas marinos y, el desplazamiento de las poblaciones humanas costeras, entre otros (Constanza et al., 1999). Estos impactos en el ambiente marino pueden ocasionar a su vez, impactos económicos y sociales en las regiones costeras, ya que afectan las pesquerías, la comercialización de recursos marinos, el turismo, la acuicultura y la identidad cultural, entre otros (Constanza et al., 1999; IPCC, 2002; Madin et al., 2012; Cooley et al., 2009; Rodrigues et al., 2013).

Es importante aclarar que los impactos en los bienes y servicios de los ecosistemas marinos, no solo son ocasionados por el cambio global, existen otros factores de alteración como la sobre explotación de los recursos marinos, la contaminación del ambiente acuático, los eventos climáticos extremos, los métodos inapropiados de pesca,

modificación de los sistemas bióticos por el humano y el turismo excesivo, entre otros (Constanza et al., 1999; Moberg y Folke, 1999; Díaz et al., 2000; Martínez et al., 2007; Mooney et al., 2009; Laurans et al., 2013).

De acuerdo con Malone et al. (2010), los bienes y servicios de los ecosistemas marinos pueden afectarse, particularmente, por el calentamiento y acidificación del océano, ya que puede afectar la regulación natural y la calidad agua, la productividad primaria, el hábitat de la biodiversidad, los ciclos biogeoquímicos y la salud de los habitantes. El aumento de la temperatura y la disminución del pH en el océano generan el desplazamiento de las especies demersales y pelágicas hacia los polos, reduciendo las poblaciones de peces locales, afectando la pesca y por tanto, la economía de las regiones costeras en el mundo (Perry et al., 2010b).

Así mismo, el deterioro de los ecosistemas marinos, causado por el calentamiento y la acidificación del océano, como los arrecifes coralinos, praderas de pastos marinos y los manglares, tiene un gran impacto en los organismos asociados, reduciendo la población de organismos comerciales, lo cual incide en la economía de las regiones costeras, ya que la pesca de estos organismos es el sustento de la mayoría de los habitantes (Gilbert y Janssen, 1998; Cooley et al., 2009; Remoundou et al., 2009; Barange et al., 2010; Duarte, 2010; Barbier, 2012; Madin et al., 2012), afectando la seguridad alimentaria y la generación de empleo en las regiones costeras (Cooley et al., 2009; Perry et al., 2010b; Madin et al., 2012; Tuan Vo et al., 2012; Rodrigues et al., 2013). Esto se refleja en los mares colombianos, con la reducción de la cobertura de los arrecifes de coral (Díaz et al., 2000), generando la reducción de las poblaciones de especies comerciales de pargos, meros, chernas, langostas, cangrejos y caracoles, entre otros (Díaz et al., 2000; INVEMAR, 2011).

El turismo es otro aspecto económico afectado por el calentamiento y la acidificación del océano, pues los cambios ambientales que éstos ocasionan, como la proliferación de algas tóxicas y de medusas, pueden causar problemas de salud en los turistas (Rodrigues et al., 2013); igualmente, el deterioro de los ecosistemas marinos pueden disminuir el buceo ecológico y recreacional (Forsius et al., 2013; Rodrigues et al., 2013; Ruckelshaus et al., 2013), causando efectos económicos en actividades asociadas, como

transporte, hoteles, restaurantes, procesamiento industrial de alimentos y construcción, entre otros (Cooley et al., 2009; Rodrigues et al., 2013) y, por lo tanto, afectando negativamente la generación de empleo y el sustento económico de las poblaciones costeras (Moberg y Folke, 1999).

Dada la magnitud de los impactos que los cambios en el medio marino traen a la economía mundial, el tema, pasó de ser de interés netamente científico a constituirse en preocupación de la esfera económica y política de diferentes países, de tal manera que han impulsado estudios aplicados específicos a sectores y regiones sobre el tema con miras a disponer de estrategias para la mitigación y adaptación al cambio global futuro (McNeil, 2006), para el manejo de las pesquerías y su adaptación al cambio global (Grafton, 2010; Arnason, 2012; Ruckelshaus et al., 2013), para la sinergia entre la gobernanza y la ciencia integral que faciliten el desarrollo de una política en pesquerías más efectiva (Miller et al., 2010), para el manejo socio-ecológico de los ecosistemas marinos (Barange et al., 2010; Perry et al., 2010a; Perry et al., 2010b) y para incluir la actividad humana en el manejo de los ecosistemas marinos (Barange et al., 2010), entre otros. Así mismo, de acuerdo con Forsius et al. (2013) y Mooney et al. (2009), se requiere desarrollar herramientas y técnicas para mantener y restaurar la resiliencia de los sistemas biológicos y sociales y, según Galaz et al. (2012) y Jones y Clark (2013), explorar las posibilidades de gobernanza global, garantizando la coordinación, la dinámica de comunicación y los patrones de redes estructuradas de los actores involucrados en el manejo ambiental de los ecosistemas marinos.

Conscientes de la importancia de este tema en lo ambiental y socioeconómico para Colombia, se planteó el análisis de los cambios de largo plazo en la temperatura de la superficie del mar y del pH en el sector de la zona costera del Caribe y Pacífico colombiano, cuyos resultados se exponen en este trabajo.

2. Marco geográfico

El área de estudio son las áreas marítimas colombianas que representan el 48% del territorio colombiano, las cuales están localizadas en el mar Caribe y el océano Pacífico (Figura 2-1). La Zona de Uso Económico Exclusivo en el Mar Caribe, tiene 1800 km de línea de costa y un área superficial aproximada de 589560 km². La Zona de Uso Económico Exclusivo en el océano Pacífico tiene 1300 km de línea costera y un área superficial de 339100 km² aproximadamente (IDEAM, 1998b; DNP, 2007). Estas áreas son riqueza ecológica y elemento importante para el sistema socioeconómico colombiano (como se puede deducir de la breve descripción que se hace a continuación) que juegan un papel importante en el sistema climático global.

Un área de 658000 km² aproximadamente comprenden las aguas jurisdiccionales de Colombia, en el mar Caribe. La localización geográfica de la zona marítima del Caribe colombiano, se extiende desde aproximadamente los 08°00' hasta los 19°00' de latitud norte y entre 69° y 84° de longitud oeste (Thomas et al., 2012). El área marítima del Caribe correspondiente a Colombia es una amplia zona que se extiende en el sector central del mar Caribe cubriendo aproximadamente la quinta parte de éste. Dentro de esta área se encuentran al noroccidente el sector insular formado por el archipiélago de San Andrés, Providencia, Santa Catalina y los cayos de Roncador, Quitasueño, Serrana, Serranilla, Albuquerque, Rosalinda y Bajo Nuevo (IDEAM, 1988a).

El área del océano Pacífico correspondiente a Colombia es de 330000 km², los cuales se extienden entre los 1°30' y 7°10' latitud norte y entre los 77°40' y 82°00' longitud oeste (CCCP, 2002). El área del océano Pacífico correspondiente a Colombia incluye a la isla de Malpelo, la tierra emergente más occidental del territorio colombiano y la isla de Gorgona. La profundidad media de esta área es de cerca de 3000 m, sin embargo, es posible encontrar profundidades cercanas a los 3800 m; las áreas marítimas colombianas, frente a Chocó forman un triángulo con vértices 5°00' N, 79°52' W; 7°2'N, 77°53' W y 5°00' N, 77°22' W (IDEAM, 1998a).

En las áreas marítimas colombianas se presenta una rica diversidad de ecosistemas marinos y costeros, dentro de los cuales se pueden mencionar las lagunas costeras, estuarios, arrecifes de coral, manglares, praderas de pastos marinos, costas arenosas, litorales rocosos y fondos sedimentarios. Las lagunas costeras y manglares son considerados ecosistemas costeros y, las praderas de pastos marinos y áreas coralinas, como ecosistemas bénticos marinos (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007). Se dispone de diversos estudios en los que se ha efectuado la clasificación de los ambientes marinos y costeros colombianos, con base en sistemas de clasificación y regionalización internacionalmente reconocidos, adaptadas al caso colombiano, dentro de las que se destacan IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP (2007), que con base en los criterios estándar¹, regionaliza las áreas marítimas colombianas como se muestra en la Tabla 2-1.

¹ El nivel más general de organización del ambiente marino es la región biogeográfica, definida en términos de grandes regiones costeras, bentónicas o de aguas oceánicas con una fauna característica a niveles taxonómicos superiores, resultado de su historia evolutiva común. El siguiente nivel de división son las provincias, definidas como grandes regiones delimitadas por la presencia de una biota particular que puede desarrollarse dentro de ventanas discretas del tiempo evolutivo. La ecozona, siguiente nivel, es un término utilizado para la descripción de las grandes divisiones regionales del océano canadiense a partir de las características fisiográficas generales del lecho marino (IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).

Figura 2-1: Áreas marítimas colombianas

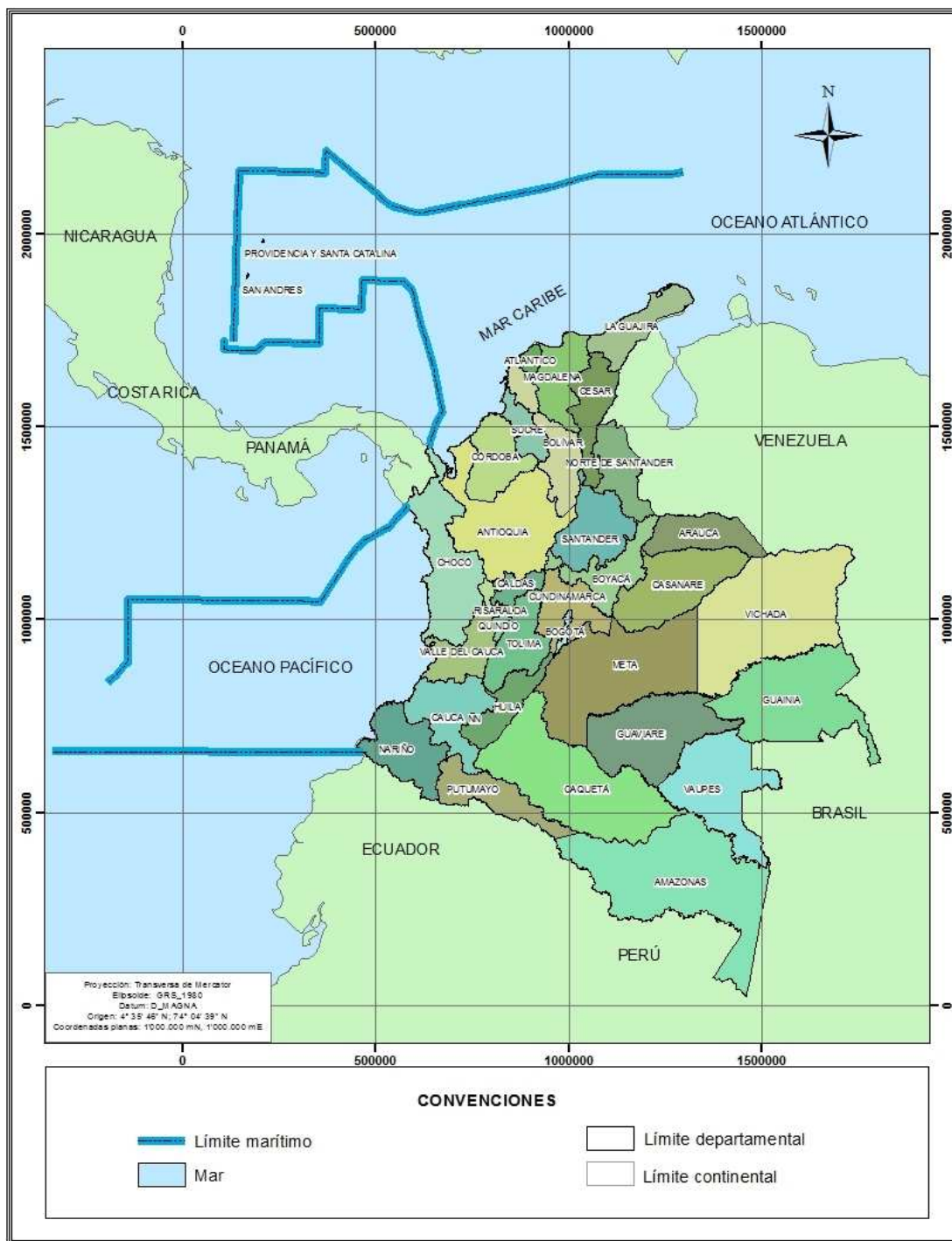


Tabla 2-1: Regiones biogeográficas marinas, provincias, ecozonas y ecorregiones del territorio marino colombiano (IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).

REGIONES BIOGEOGRÁFICAS MARINAS	PROVINCIAS	ECOZONAS	ECORREGIONES	
Atlántico Tropical	Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	Cuenca Kuiva	Archipiélago de San Andrés y Providencia -ASP-	
		Cordillera Tayrona		
		Plataforma Continental Mesoamericana		
	Mar Caribe		Plataforma Continental del Caribe	Guajira -GU-
				Palomino -PA-
				Tayrona -TAY-
				Golfo de Salamanca -GS-
				Galerazamba -GA-
				Archipiélagos coralinos -AC-
				Golfo de Morrosquillo -GM-
				Arboletes -AR-
				Capurganá -CA-
				Atrato -AT-
Talud Caribaná	Cuenca Colombia	Cordillera Beata	Oceánica del Caribe -OC-	
Pacífico Este Tropical	Océano Pacífico Tropical	Plataforma Continental del Pacífico	Pacífico Norte -PN-	
			Baudó -BA-	
			Buenaventura -BU-	
			Naya -NA-	
			Gorgona -GO-	
			Sanquianga -SA-	
		Tumaco -TU-		
		Talud Baudó	Oceánica del Pacífico -OP-	
		Cuenca del Pacífico		
		Zona de Fractura de Panamá		
Elevación Oceánica Tumaco				
Cordillera Malpelo	Malpelo -MA-			

Dentro de los ambientes marinos y costeros colombianos, se encuentran varios ecosistemas que brindan diversos bienes y servicios, importantes para el funcionamiento de la biosfera y suministran beneficios tangibles para la sociedad, como la absorción de CO₂, regulación del clima, descomposición de la materia orgánica, regeneración de nutrientes, pesca, protección costera, provisión de energía, suministro de recursos naturales, recreación, turismo y transporte, entre otros (Constanza et al., 1999; Fischlin et al., 2007; Martínez et al., 2007; Lange y Jiddawi. 2009; Mooney et al., 2009; Remoundou et al., 2009; Tuan Vo et al., 2012; Ruckelshaus et al., 2013).

Dentro de este contexto, los arrecifes coralinos ofrecen varios bienes y servicios relacionados con la regulación y amortiguación de los impactos en la zona costera, el suministro de recursos alimenticios y mineros, la recreación y el turismo, el potencial de la biodiversidad asociada como fuente de productos naturales para uso farmacéutico y cosmético, entre otros (Moberg y Folke, 1999; Díaz et al., 2000; Fischlin et al. 2007; INVEMAR, 2011; Laurans et al., 2013).

Así mismo, de acuerdo con Short y Neckles (1999), Duarte (2000) y Díaz et al. (2003), las praderas de pastos marinos proveen servicios ecosistémicos como la recirculación de nutrientes y estabilización de los sedimentos, alimento y sala-cuna para diversas especies de organismos marinos de interés comercial, suministro de recursos alimenticios y, recreación y turismo, entre otros.

De otra parte, los manglares son ecosistemas muy importantes, ya que cumplen un papel en la regulación de energía y sustancias entre el océano y la tierra, la filtración del material proveniente de la tierra para evitar la eutroficación y sedimentación de las praderas de pastos marinos y arrecifes de coral (Jennerjahn, 2012), la reproducción, crianza y alimentación de diversas especies marinas, el suministro de recursos alimenticios y madereros, la depuración de agua, la protección de la línea de costa, el control de inundaciones, la disminución de los efectos de los fenómenos naturales como los huracanes, grandes olas de marea, ciclones y tsunamis, la recreación y el turismo, entre otros (Gilbert and Janssen, 1998; Alongi, 2002; Kennedy et al. 2002; INVEMAR, 2005; McLeod y Salm, 2006; Alongi, 2008; Lange y Jiddawi. 2009).

2.1 Provincia Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina

2.1.1 Características meteorológicas y climatológicas

En la provincia del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina predominan los vientos alisios del Noreste y Este-Noreste, con velocidades mensuales promedio de 7 m/s en diciembre, enero y julio y, de 4 m/s en mayo, septiembre y octubre; en algunas ocasiones se presentan tormentas con velocidades de hasta 20 m/s. Esta provincia está situada dentro del cinturón de ciclones tropicales del Caribe y se han registrado pasos de huracanes por San Andrés, en diferentes años (Marriaga, 2009).

El clima de esta provincia es cálido y seco tropical, según Marriaga (2009), ubicado dentro de los de bajas latitudes, los cuales están controlados por los vientos alisios provenientes de los núcleos de alta presión subtropicales, presentándose una estación húmeda, controlada por masas de aire ecuatoriales marítimas cálidas, desde marzo hasta noviembre y, una estación seca, controlada por masas de aire tropicales, desde diciembre hasta febrero. La temperatura del aire media anual es de 27,2°C, con variaciones mínimas durante el año. De otra parte, de acuerdo con IDEAM (1998a), en esta región se presentan las “Ondas del Este”, que son ondulaciones del flujo de los alisios sobre los océanos, entre los 5° 30' Latitud Norte y 5° 30' Latitud Sur, las cuales se desplazan hacia el Oeste a 300 ó 500 km/día, produciendo lluvias y tormentas que duran uno o dos días.

2.1.2 Características oceanográficas

La corriente marina superficial correspondiente a la corriente del Caribe fluye de Este a Oeste y presenta un desvío hacia el Suroeste cuando enfrenta la parte sur de la elevación de Nicaragua, formando un remolino en sentido contrario a las manecillas del reloj en el Caribe Suroccidental. Esta corriente enfrenta el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina por el este en el Norte y por el noreste en el Sur, con velocidades entre 0,5 y 1 m/s (Marriaga, 2009).

Así mismo, de acuerdo con los registros presentados por Marriaga (2009), las aguas superficiales marinas son cálidas, la temperatura promedio oscila entre 26,8°C y 30,2°C, la salinidad oscila entre 34‰ y 36,3‰, las mareas son mixtas con una amplitud máxima de 40 a 60 cm y, el oleaje presentado es de un impacto fuerte, generado por los vientos alisios en una amplitud de aproximadamente 2000 km.

2.1.3 Ecosistemas insulares

En la provincia del archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina (Figura 2-2), se encuentran ecosistemas de arrecifes coralinos distribuidos a lo largo del archipiélago, encontrando dos arrecifes de barrera antepuestos a las islas de San Andrés y Providencia, cinco atolones verdaderos, los cayos de Albuquerque y Courtown, los bancos Serrana, Roncador, Quitasueño y Bolívar, además de los cayos Serranilla, Bajo Nuevo y Bajo Alicia (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).

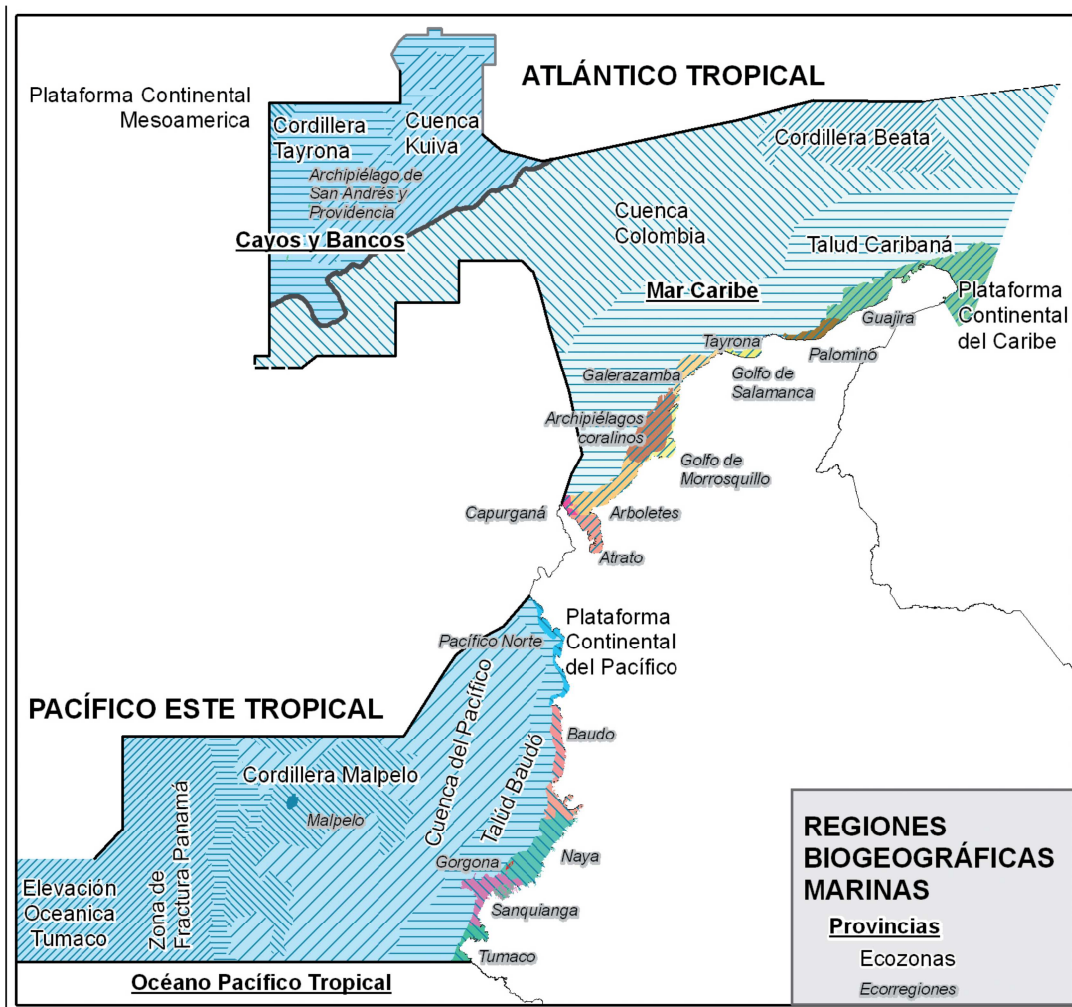
Según el IUCN/UNEP (1988), EXPOLISBOA (1998) y Díaz et al. (2000), los arrecifes coralinos que forman los bajos en el Archipiélago de San Andrés y Providencia están representados por especies de *Palythoa spp*, *Millepora spp*, *Diploria clivosa*, *D. strigosa*, *Manicina areolata*, *Porites porites*, *P. astreoides*, *Synderastrea radians*, *Acropora palmata*, *A. cervicornis*, *Montastrea annularis*, *Eusmilia fastigiata*, *Colpophyllia natans*, *Meandrina meandrites*, *Dendrogyra cylindrus*, entre otras.

Así mismo, los ecosistemas de praderas de pastos marinos en esta provincia se encuentran sobre fondos cubiertos por arenas finas, al abrigo de las formaciones coralinas alrededor de las islas de San Andrés y Providencia y, a manera de pequeños parches en algunos sectores alrededor de los cayos y atolones de Albuquerque y Courtown (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007). Las especies de pasto marino más comunes, de acuerdo con EXPOLISBOA (1998) y Díaz et al. (2000) son: *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *H. decipiens* y *Halophylla babilonica*.

De otra parte, los ecosistemas de manglar en esta provincia se encuentran localizados en diferentes zonas de San Andrés y Providencia (Alvarez-León, 2009), siendo las especies más representativas *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicenia germinans*

(mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Conocarpus erecta* (mangle botón) y *Pelliciera rhizophorae* (EXPOLISBOA, 1998; Díaz y Acero, 2003).

Figura 2-2: División regional de los espacios marinos de Colombia (IDEAM-IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).



2.2 Provincia Mar Caribe

2.2.1 Características meteorológicas y climatológicas

La Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y los alisios condicionan las propiedades físicas de la atmósfera que definen el tiempo y el clima, en este territorio marítimo

nacional. Actúan también sobre las características climáticas del Caribe colombiano, las condiciones físicas regionales que le son propias por su localización en la franja de transición de la zona ecuatorial a la subtropical y por la fisiografía del norte de Suramérica (IDEAM, 1998b).

La precipitación media en el área marítima del Caribe colombiano, controlada por la ZCIT y la acción de los ciclones tropicales, presenta un comportamiento cuasibimodal con un mínimo entre diciembre y marzo, un primer máximo en junio, un receso de lluvias en julio y el máximo principal entre septiembre y noviembre (IDEAM, 1998b). En su distribución espacial los valores más altos se observan en el sector suroccidental, cerca del litoral y los valores más bajos en el extremo oriental.

El comportamiento de la temperatura media del aire en el área marítima del Caribe colombiano es de tipo monomodal; en el sector norte y central el valor del promedio mensual más bajo se presenta en el mes de enero, con registros ligeramente superiores a 27.0°C y el valor más alto en el mes de septiembre, con valores ligeramente superiores a 28.5°C. El rango de oscilación no supera los 2.0° C. En el sector sur, no lejos del litoral, igualmente el comportamiento es monomodal; frente al litoral nororiental el valor medio más bajo tiene ocurrencia en el mes de febrero con promedios que oscilan entre 25 y 25.5°C, mientras que el valor normal más alto se presenta en el mes de septiembre con cerca de 27.0°C; aguas adentro frente al litoral central, los valores medios más bajos ocurren en noviembre en tanto que los registros más altos son en marzo; finalmente, afuera de las aguas del golfo de Urabá, el valor bajo se presenta en enero y el valor alto en mayo (IDEAM, 1998b).

La presión atmosférica media en el área marítima del Caribe colombiano presenta un comportamiento bimodal, con un valor promedio de 1012 hPa, presentando los valores más altos siempre en el sector norte. En enero, en el sector marítimo norte se presenta el registro más alto del año, mientras que en el sur, el valor alto se presenta en el mes de julio. Los valores bajos se presentan en los meses de mayo y octubre, para el sector norte y, en abril y noviembre para el sector sur; en el sector norte, el valor más bajo se presenta en el mes de octubre; mientras que en el sector sur, se registra en el mes de abril (IDEAM, 1998b).

El comportamiento del flujo de los vientos a 10 metros de altura, en términos generales oscila entre el este y el noreste, durante todo el año, situación que depende de la posición en que se encuentre la Zona de Confluencia Intertropical. Esto quiere decir que los vientos Alisios son los reguladores del flujo en vastos sectores del mar Caribe colombiano y zona continental adyacente. En los primeros tres meses del año, el flujo está definido en toda el área del mar Caribe colombiano del noreste; en los meses de abril y mayo, los vientos proceden del este-noreste para luego soplar del este en los meses siguientes. En el mes de agosto el flujo es del este-noreste y luego nuevamente del este; para el mes de noviembre la característica típica es la procedencia del este-noreste. Finalmente, en diciembre comienza el comportamiento, en donde el flujo es del noreste, situación que se mantendrá hasta el mes de marzo (IDEAM, 1998b).

2.2.2 Características oceanográficas

En el fondo marino de estas áreas se destaca la depresión de Colombia que cubre gran parte del Caribe colombiano con profundidades promedio de 3000 m. Sin embargo, existen profundidades de cerca de 3800 m (IDEAM, 1998a).

Según Donoso (1990) y Cabrera y Donoso (1992), en el Mar Caribe se presentan un mecanismo de renovación constante de aguas profundas, lo cual está afectado por la circulación atmosférica de los vientos Alisios. A lo largo de la costa Caribe sur, la ocurrencia de una fuerte divergencia en el campo de los vientos, crea condiciones adecuadas para el desarrollo de procesos de surgencia caracterizados por la presencia de aguas frías y altas salinidades. La surgencia en el Caribe se caracteriza por tener una marcada estacionalidad. El máximo transporte vertical ocurre durante la estación seca (diciembre-mayo), lo contrario sucede en la estación lluviosa (junio-noviembre), en donde dicho transporte es mínimo, en ocasiones nulo (Corredor, 1981), lo cual se explica por el efecto acumulativo de varios procesos de mezcla vertical de calor y la advección de la masa de agua. Algunos autores consideran que estas variaciones estacionales en el transporte generado por el viento del Caribe pueden ser una fuente de carácter cíclico anual del transporte de masa (IDEAM, 1998a).

Un elemento importante de la circulación del Caribe colombiano que vale la pena mencionar es la contracorriente Panamá-Colombia, la cual es ocasionada por la variación de la intensidad y dirección de los vientos alisios. Esta contracorriente se interrelaciona con el sistema de surgencia colombiano, en términos de la localización de la zona de convergencia de estas dos masas de agua, lo cual ocurre entre Urabá y las Islas del Rosario en la estación seca. Como se mencionó anteriormente en la estación húmeda no hay movimientos ascendentes. Así la contracorriente Panamá-Colombia avanza a lo largo de la costa colombiana hasta la Guajira donde sus aguas son desviadas y arrastradas por la corriente central del mar Caribe (IDEAM, 1998a).

En el Caribe colombiano, el proceso de surgencia eleva aguas desde 150 y 200 m de profundidad (Donoso, 1990) y se extiende hasta 180 km mar afuera de la costa (Fajardo, 1978). En el Caribe colombiano, la productividad del fitoplancton varía de acuerdo con las condiciones físicas, químicas y oceanográficas que predominen en determinada época del año. Esto quiere decir que durante el proceso de surgencia, ocurre la mayor productividad, mientras que en ausencia de este fenómeno, la producción primaria disminuye (Bermúdez y Herrera, 1989; IDEAM, 1988a).

2.2.3 Ecosistemas marinos y costeros

En la provincia del mar Caribe (Figura 2-2) se encuentran los arrecifes de coral, los cuales están distribuidos en grupos discretos a lo largo del litoral sobre la plataforma continental. La mayor concentración se encuentra en el sector central sobre una serie de altorrelieves del fondo de la plataforma continental, a cierta distancia de la costa. Igualmente, se encuentran formaciones coralinas a lo largo de porciones de costa en las que se alternan ensenadas o bahías con cabos de acantilados rocosos, como en las áreas del Urabá chocoano, cerca de la frontera con Panamá y de Santa Marta, el Parque Nacional Natural Tayrona y en otras zonas de las ecorregiones: Arboletes, Archipiélagos coralinos, Capurganá, Galerazamba, Salamanca, Guajira y Tayrona (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007).

Dentro de la especies de coral representativas de esta provincia se puede mencionar: *Manicina areolata*, *Siderastrea radians*, *S. siderea*, *Acropora palmata*, *Agaricia tenuifolia*, *Millepora spp*, *Colpophylia natans*, *Madracis mirabilis*, *Tubastrea tenuilamellosa*, *Porites*

porites, *Dichocoenia stellaris*, *D. stokesii*, *Millepora squamosa*, *M. alcicornis*, *Diploria strigosa*, *Favia fragum* y *Montastrea cavernosa* (IUCN/UNEP, 1988; EXPOLISBOA, 1998; Díaz et al., 2000).

Los ecosistemas de praderas de pastos marinos también se encuentran en esta provincia, identificando varias áreas geográficas de praderas de pastos marinos, a lo largo de todas las ecorregiones de esta provincia (Figura 2-2). Su mayor área de distribución se encuentra en la plataforma continental de La Guajira, abarcando el 80% aproximadamente y, los sectores de Cartagena y el extremo suroccidental del golfo de Morrosquillo concentran en buena parte el 20% del área restante (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007). Las especies de pasto marino más comunes son: *Thalassia testudinum*, *Syringodium filiforme*, *Halodule wrightii*, *H. decipiens* y *Halophyla babilónica* (EXPOLISBOA, 1998; Díaz et al., 2000; Díaz y Acero, 2003).

Los ecosistemas de manglar en la provincia del mar Caribe, se encuentra localizado en diferentes zonas de las ecorregiones de la provincia del mar Caribe (Figura 2-2) como la Ciénaga Grande de Santa Marta (Magdalena), el Parque Nacional Isla Salamanca, Bahía de Media Luna (Guajira), desde Punta las Playas (Bolívar) hasta Punta Comisaria (Sucre), Punta Alto de Julio (Sucre), desde Punta Los Muertos hasta Punta el Boquerón (Sucre), golfo de Morrosquillo y desde Boca del Medio hasta Playa Tinajones (Córdoba), Ciénaga de la Virgen y Bahía de Barbacoas (Bolívar) y, golfo de Urabá (Antioquia) de la ecorregión Capurganá (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007). Existen cinco especies de mangle: *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicenia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), *Conocarpus erecta* (mangle botón) y *Pelliciera rhizophorae* (EXPOLISBOA, 1998; Díaz y Acero, 2003).

2.3 Provincia Océano Pacífico Tropical

2.3.1 Características meteorológicas y climatológicas

En el pacífico colombiano la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) y el sistema de los alisios asociado a ella también juega un papel importante como factor regulador del clima y de los fenómenos meteorológicos. En enero, el flujo atmosférico dominante proviene

del Noroeste en la zona norte del sector occidental, mientras que en la zona central y sur, el flujo se hace zonal del Oeste (CCCP, 2002). El flujo, en términos generales, es similar en el sector occidental con un ligero cambio en la zona central en donde proviene del oeste-noroeste. En junio y julio, el flujo en el sector occidental es del suroeste y a medida que se acerca al litoral, el flujo tiende a ser del Oeste-Suroeste (Villegas y Malikov, 2006). La migración sur-norte-sur de la ZCIT durante el año, genera dos períodos muy lluviosos (marzo-mayo, septiembre-noviembre) y dos menos lluviosos en los sectores sur y centro del Pacífico colombiano; en la parte norte, dicho desplazamiento genera un sistema monzónico regional (Pabón-Caicedo et al., 2010) que en su fase de mayo a agosto forma un centro de baja presión conocido como la Baja Anclada de Panamá. Esta última es generadora de convección intensa, alta nubosidad y de fuertes lluvias acompañadas de tormentas eléctricas.

El régimen de la temperatura media del aire en el área marítima del Pacífico colombiano, no presenta oscilaciones significativas en su ciclo anual, pues los valores medios mensuales se mantienen muy cerca del valor medio anual (26.5°C) con una amplitud no mayor de 1.8°C (IDEAM, 1998c).

La presión atmosférica media en el área marítima del Pacífico colombiano presenta un valor promedio de 1011 hPa. En el mes de enero se presenta el valor más bajo, con un núcleo de baja presión en el extremo nororiental del Pacífico colombiano, en donde se incluyen territorios continentales del norte del Chocó y sur de Panamá. El valor máximo se presenta en agosto, aproximándose a lo largo del litoral de Valle y Cauca; el área marítima central y sur del Pacífico colombiano predominan los valores entre 1012.0 y 1011.5 hPa (IDEAM, 1998c).

El clima del área marítima y continental del Pacífico colombiano está expuesta a los efectos de los fenómenos La Niña y El Niño que inducen anomalías climáticas en la escala interanual en la región, particularmente en el comportamiento de la temperatura del aire y de la precipitación (IDEAM, 1998a).

2.3.2 Características oceanográficas

El océano Pacífico colombiano está caracterizado por la confluencia de aguas de diverso origen: la corriente del Perú, la corriente Ecuatorial y la corriente Ecuatorial Sur (Kessler, 2006). La corriente del Perú avanza hacia el norte bañando el litoral del Pacífico colombiano, zona en la cual se forman surgencias, remolinos y aducciones (IDEAM, 1998a). Las propiedades de las aguas superficiales están determinadas por la advección estacional de las aguas más frías de la corriente del Perú y por la surgencia ecuatorial; la temperatura del agua fría disminuye hacia el este progresivamente, por la surgencia de aguas más frías de la corriente sub-superficial ecuatorial que fluye de oeste a este (Fiedler y Talley, 2006).

De acuerdo con la distribución superficial de temperatura, la principal característica para el Pacífico colombiano consiste en la presencia de aguas relativamente frías provenientes del sur, que alcanzan en promedio los 2° de latitud Norte. La existencia de estas aguas frías se comprueba aún sobre los 4° de latitud Norte. En la zona costera durante el transcurso del año, el valor de la temperatura superficial del mar es en promedio de 27°C alcanzando en ocasiones valores superiores (Aguilera y Castillo, 1988; IDEAM, 1998a).

En el Pacífico colombiano los valores de salinidad en la superficie del mar son bajos, generalmente no superan 32‰. El valor máximo de salinidad se registra para el mes de mayo, ingresando por el sur y alcanzando hasta 5° de latitud norte. En el tiempo restante del año, predominan los valores bajos de salinidad, de 32‰ y menores. Los registros más bajos de salinidad se obtienen para la zona costera y se encuentran oscilando entre 25 y 31‰ (IDEAM, 1998a).

Según IDEAM (1998a), en el Pacífico colombiano se presentan afloramientos en varias localidades relacionadas con el régimen de circulación oceánica; éstos se producen alrededor de la isla Gorgona, en la zona de influencia del delta del río San Juan y al norte del cabo Corrientes, en donde ascienden aguas ricas en nutrientes, con bajas temperaturas y altas salinidades.

En el océano Pacífico colombiano, el proceso de surgencia eleva aguas desde los 100 a 200 m de profundidad (IDEAM, 1988a; Rodríguez-Rubio y Stuardo, 2002; Villegas y Malikov, 2006); así mismo, se presenta una capa de mezcla caracterizada por la turbulencia y la casi homogeneidad de la temperatura y la salinidad y, la profundidad de esta capa llega hasta los 150 m de profundidad (Donoso, 1990).

El Pacífico colombiano presenta una productividad de fitoplancton más alta que el mar Caribe, la cual también está influenciada por las condiciones físicas, químicas y oceanográficas que predominen en la zona en determinada época del año. Como se mencionó anteriormente, la producción primaria de fitoplancton es mayor en zonas de surgencia (isla Gorgona), la cual se presenta aproximadamente entre julio y noviembre; cuando desaparece dicho proceso, la producción primaria regresa a la normalidad (IDEAM, 1988a).

2.3.3 Ecosistemas marinos, costeros e insulares

En la provincia del océano Pacífico tropical, las áreas coralinas más extensas se encuentran en la ensenada de Utría y el arrecife del Riscal de la Chola; esta área es muy diversa, con pequeñas islas de coral y formaciones rocosas. En Punta Ardita, Punta Tebada, Bahía Octavia, Ensenada de Utría y Bahía Solano (ecorregión Pacífico Norte) se presentan parches o pequeñas poblaciones coralinas, pero no verdaderos arrecifes (Figura 2-2). Las formaciones coralinas de la isla Gorgona (ecorregión Gorgona) poseen el mayor número de especies de coral del Pacífico Este; son de tipo borde o costero, desarrollados principalmente en la costa este de la isla (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007; INVEMAR, 2009).

Los arrecifes coralinos que se encuentran en esta provincia están poco representados en extensión y diversidad de especies. Los arrecifes de coral encontrados en la isla de Gorgona están conformados por especies como *Pocillopora damicornis*, *P. capitata*, *P. lacera*, *P. robusta*, *Porites panamensis*, *P. lobata*, *Pavona varians*, *P. gigantea*, *P. clivosa*, *Psammocora stellata* y *Acropora valida*; en la isla de Malpelo, las especies de coral más representativas son: *Pocillopora robusta*, *Porites panamensis*, *P. lobata*, *Pavona clivosa* y *Agariciella planulata*; y en la Ensenada de Utría se encuentran dos

especies de coral principalmente, *Pocillopora damicornis* y *Psammocora stellata* (EXPOLISBOA, 1998; Díaz et al., 2000).

De otra parte, los ecosistemas de manglar en el océano Pacífico tropical, se localizan en diferentes ecorregiones (Figura 2-2), distribuidos desde Punta Jurubida hasta Playa Panguí, golfo de Tribugá, desde Playa Tortuga hasta Punta Charambira (Chocó) en la ecorregión del Chocó; desde Boca Cacagual hasta Playa el Choncho (Chocó), desde Bocas de San Juan hasta Boca la Barra (Nariño), Bahía Málaga, Ensenada el Tigre, La Bocana, Bahía de Buenaventura, desde Punta Soldado hasta Bahía Guapí (Valle del Cauca) en la ecorregión de Buenaventura; desde Bahía Guapi hasta Cocalito (Cauca), desde Playa del Caballo hasta Punta Cascajal (Nariño) en la ecorregión Sanquianga; y desde la Bahía de Tumaco hasta Bahía Ancón de Sardinas (Nariño) en la ecorregión Tumaco (IGAC-IAvH-INVEMAR-I.SINCHI-IIAP, 2007). Las especies de mangle encontradas son: *Rhizophora sp*, *R. mangle*, *R. harrisonii*, *R. racemosa*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erecta*, *Avicenia germinans*, *A. tonduzzi* y *Pelliciera rizophorae* (EXPOLISBOA, 1998).

3. Planteamiento del problema

Los tres principales efectos del cambio global en los océanos, calentamiento y acidificación del agua y, ascenso del nivel del mar, constituyen amenazas potenciales para los ecosistemas en las áreas marítimas colombianas. Sin embargo, el grado de amenaza y vulnerabilidad con respecto a los dos primeros son muy poco conocidos en el contexto nacional.

Dada la situación planteada anteriormente, es necesario producir conocimiento sobre la expresión regional del calentamiento y la acidificación del océano y su impacto en los ecosistemas marinos y costeros colombianos. Específicamente se busca responder a los siguientes cuestionamientos:

¿Cómo se expresan regionalmente el calentamiento y la acidificación del océano?

¿Cómo estos fenómenos afectarán los ecosistemas marinos y costeros en las áreas marítimas colombianas?

¿Cuáles serían las consecuencias en la sociedad colombiana de este impacto en el medio marino?

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Describir las tendencias del cambio global y su impacto en los ecosistemas de sectores de la zona costera del territorio colombiano.

4.2 Objetivos específicos

Caracterizar el ambiente marino-costero a partir de la temperatura superficial del mar y el pH.

Establecer la relación de los ecosistemas de sectores de la zona costera con la temperatura superficial del mar y el pH de las aguas marinas.

Identificar las tendencias de largo plazo en las variables de temperatura de la superficie del mar y pH.

Plantear escenarios de cambio global en el ambiente marino y costero asociados con el calentamiento global y la acidificación del océano y, evaluar la expresión regional.

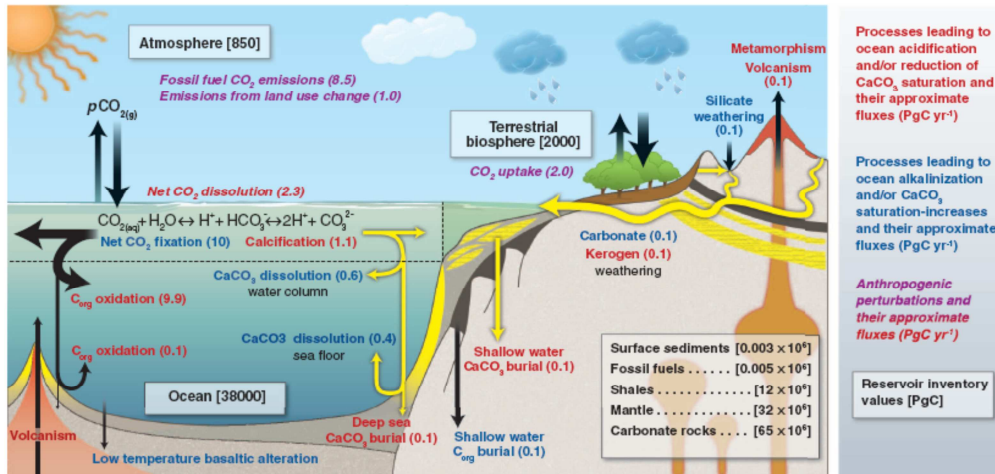
Identificar los potenciales impactos del cambio global en los ecosistemas de sectores de la zona costera del territorio colombiano.

5. Marco conceptual y teórico

El sistema climático es un sistema complejo, interconectado y autorregulado, compuesto por la atmósfera, la litosfera, la hidrosfera (océanos y otros cuerpos de agua), la biosfera y la antropósfera. Así mismo, se desarrolla por la influencia de sus dinámicas internas y por cambios en los factores externos que afectan el clima, como erupciones volcánicas, variaciones solares y la actividad humana (Le Treut et al., 2007). El clima del planeta está determinado por la energía solar que entra a la Tierra y por las propiedades de ésta y su atmósfera, como reflexión, absorción y emisión de energía dentro de la atmósfera y en la superficie (Solomon et al., 2007).

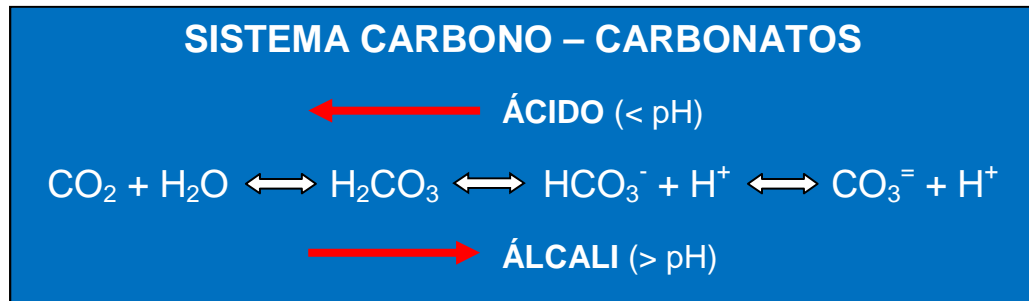
El océano juega un papel importante en el ambiente global y está influenciado por el intercambio de masa y energía con la atmósfera (Figura 5-1). La capacidad de calentamiento del océano es mil veces mayor que el de la atmósfera y la capacidad de absorber calor es veinte veces mayor que el de la atmósfera (Bindoff et al., 2007; Solomon, 2007). La gran cantidad de calor que se almacena en las capas superficiales de los océanos, juega un papel importante en el cambio global, en escalas de tiempo estacionales y decadales. El transporte de calor y agua por las corrientes oceánicas pueden tener un efecto en el clima regional; y la circulación termohalina influye en el clima global (Bindoff et al., 2007).

Figura 5-1: Intercambio de CO₂ océano-atmósfera (Hönisch et al., 2012).



El calentamiento del océano se ha evidenciado desde 1995, con un aumento de la temperatura superficial del mar de 0,1°C por década, en promedio, el cual se está extendiendo hasta cerca de los 700 metros de profundidad. Este aumento de la temperatura superficial del mar afecta la fisiología, abundancia y distribución de la flora y fauna marina; y la interacción entre los organismos (IPCC, 2002).

De otra parte, la absorción de carbono antropogénico desde 1750, ha convertido al océano en un ambiente más ácido, disminuyendo el pH superficial 0.1 unidades, en promedio. El dióxido de carbono absorbido por el océano reacciona con el agua formando ácido carbónico (figura 5-2); así, al aumentar la concentración de CO₂, disminuye el pH del océano, ocasionando cambios en la química del carbonato oceánico (Solomon et al., 2007). Esto puede tener efectos negativos en organismos planctónicos que utilizan el carbonato de calcio para construir sus estructuras calcáreas y en la construcción de arrecifes de coral (Kennedy et al., 2002).

Figura 5-2: Reacción química del dióxido de carbono en el océano.

En la Figura 5-3 se muestra los fenómenos marinos globales asociados al calentamiento global y a los cambios en la composición de la atmósfera, los cuales tiene una expresión regional que se manifiesta a través de los impactos en el medio marino y costero regionales.

El calentamiento del océano puede afectar la productividad oceánica y la composición de las comunidades planctónicas y zooplanctónicas, afectando las cadenas tróficas de muchas poblaciones marinas. Así mismo, los cambios en la temperatura del océano afectan la fisiología y reproducción de cetáceos y pinípedos (Fischlin et al., 2007), la distribución, la abundancia y la salud de los ecosistemas de arrecifes de coral, ocasionando blanqueamiento y, la reducción o aumento de la conectividad genética de sus poblaciones marinas (Hoegh-Guldberg, 2005).

La acidificación del océano puede afectar la calcificación de un amplio rango de organismos marinos, incluyendo organismos planctónicos, organismos bentónicos con estructuras calcáreas (equinodermos, crustáceos y moluscos) y corales. Así mismo, puede afectar la cadena trófica marina, afectando diferentes organismos marinos (peces y crustáceos) y el ciclo del carbono oceánico (Fischlin et al., 2007).

Figura 5-3: Fenómenos marinos globales y su expresión regional en ecosistemas marinos y costeros.



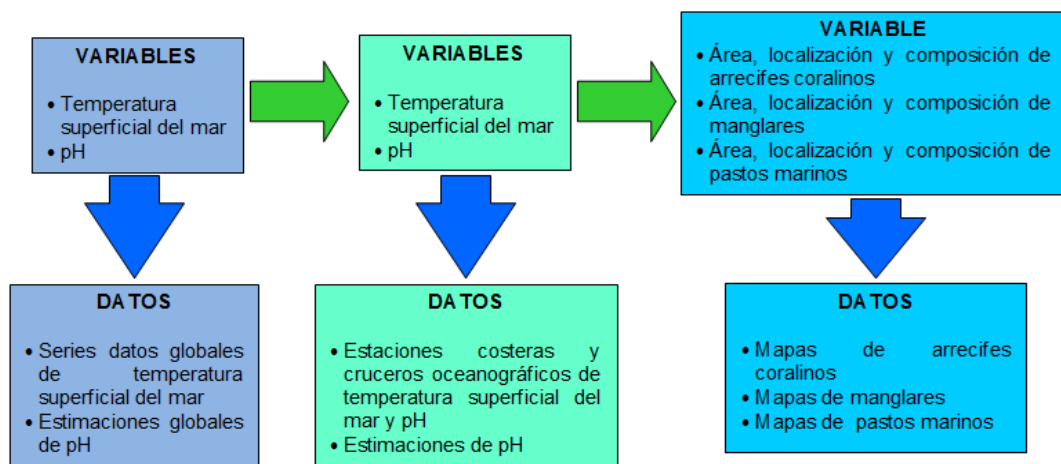
6. Metodología

Para la construcción del modelo que representa el marco conceptual se utilizaron los datos de temperatura superficial del mar y pH medidos en diferentes puntos del Caribe y del Pacífico, durante el período comprendido entre el 16 de febrero de 1993 y 25 de mayo de 2011.

6.1 Operacionalización del modelo conceptual

Con el fin de establecer la expresión regional y sus impactos en el medio marino y costero de los fenómenos marinos globales asociados al calentamiento global y a los cambios en la composición de la atmósfera (calentamiento y acidificación del océano), se definen las variables para cada uno de los ambientes (global, regional e impactos). Estas variables se representan por los datos de temperatura superficial del mar y pH (Figura 6-1).

Figura 6-1: Operacionalización del modelo conceptual.



Para establecer las posibles condiciones futuras en cuanto a la temperatura de la superficie del mar (TSM) y el pH, se exploran las relaciones de estas con la temperatura del aire en superficie TSA y las concentraciones de CO₂ atmosférico, variables sobre las que se tienen proyecciones basadas en escenarios para el siglo XXI. Una vez establecidas las relaciones para la época actual (el período estudiado) expresadas en ecuaciones, se utilizan los valores de TSA y de CO₂ futuros planteados en los escenarios A2 y B2 establecidos por IPCC (2000) para las concentraciones de CO₂ y los estimados para la TSA.

Una vez establecida la magnitud de los posibles cambios en la TSM y el pH en el futuro para los sectores del Caribe y del Pacífico estudiados, se infieren los impactos que estas condiciones podrían tener en los ecosistemas marino-costeros de las respectivas regiones.

6.2 Datos e información

La información sobre temperatura superficial del mar y pH para el Caribe colombiano fueron suministrados en archivo digital por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras - INVEMAR, cuyos datos fueron tomados en diferentes estaciones costeras, oceánicas y estuarinas (Tabla 6-1). Para el Pacífico, los datos de las variables mencionadas se tomaron del Sistema de Información de la Red de Vigilancia de la Calidad Ambiental Marina de Colombia (REDCAM) a través de la página Web del INVEMAR (Tabla 6-2). Los sitios para los cuales se dispone de información se distribuyen según se muestra en los mapas de las Figuras 6-2 y 6-3.

Tabla 6-1: Coordenadas estaciones costeras y oceánicas en el mar Caribe colombiano.

SECTOR	LUGAR	LATITUD	LONGITUD
Isla del Rosario - Barbacoas	Isla Barú - Bahía de Barbacoas - Estancia	10°9' 29" N	75°39' 15.1" W
Isla del Rosario - Barbacoas	Banco de Coral frente a Isla Arena	10°9' 31.6" N	75°45' .3" W
Isla del Rosario - Barbacoas	Islas del Rosario - Caño Ratón	10°10' 48.1" N	75°45' 18.4" W
Isla del Rosario - Barbacoas	Isla Grande frente al Hotel del Pirata	10°11' 12.3" N	75°44' 9" W
Bahía de Cartagena	Canal del Dique - 1	10°16' 35" N	75°30' 58.2" W
Bahía de Cartagena	Canal del Dique - 2	10°17' 50.4 " N	75°31' 27.2" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 1	10°18' 5.5" N	75°33' 2.9" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 2	10°19' 0 " N	75°31' 40" W
Bahía de Cartagena	Boya roja Frente a CORELCA	10°19' 50.1" N	75°31' 6.8" W
Bahía de Cartagena	Boya verde N° 17 - Frente a Caño Loro	10°20' 0.8" N	75°33' 2.5" W
Bahía de Cartagena	Boya roja N° 6- Astillero Naval COTECMAR	10°21' 35.4" N	75°31' 19.9" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 3	10°22' 3 6.7" N	75°31' 55.3" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 4	10°22' 3 7.4" N	75°32' 52.1" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 5	10°23' 1 8.2" N	75°33' 46.6" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 6	10°23' 4 0.1" N	75°33' 13.1" W
Bahía de Cartagena	Bahía de Cartagena - 7	10°23' 4 3" N	75°33' 22.3" W
Bahía de Cartagena	Playas de Bocagrande	10°24' 19. 2" N	75°33' 52.6" W
Bahía de Cartagena	Playas de Marbella	10°26' 14.2" N	75°32' 53.6" W
Bahía de Cartagena	Playas de Marbella frente a Texaco	10°26' 46.7" N	75°32' 0.2" W
Bahía de Cartagena	Playas de Crespo - DAMARENA	10°27' 8.7" N	75°31' 25.5" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Río Fundación	10°43' 1.8" N	74°26' 16.4" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Frente a Río Fundación	10°43' 54" N	74°25' 56.4" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Río Aracataca	10°45' 57.8" N	74°21' 47.5" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Frente a Río Aracataca	10°46' 37.3" N	74°22' 47.2" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Boca del Caño Grande	10°50' 38.9" N	74°29' 9.3" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Centro Ciénaga Grande de Santa Marta	10°51' 25" N	74°24' 40.7" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Río Sevilla	10°52' 0.9" N	74°18' 45.4" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Frente a Río Sevilla	10°52' 28.2" N	74°19' 47.6" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Rinconada	10°58' 2.2 " N	74°29' 44.3" W
Ciénaga Grande de Santa Marta	Boca de la Barra	10° 59' 38.4" N	74°17' 39.6" W
Guajira Alta	Guajira - 1	11°43' 6.3" N	72°44' 32. 9" W
Guajira Alta	Guajira - 2	11°43' 37.4" N	72°44' 53 .5" W
Guajira Alta	Guajira - 3	11°44' 44.9" N	72°46' 1. 5" W
Guajira Alta	Guajira - 4	11°46' 11.1" N	72°46' 54 .6" W
Ciénaga de la Virgen	Ciénaga - Sur de la pantalla de Bocana	10°26' 4.5" N	75°30' 15.7" W
Ciénaga de la Virgen	Ciénaga - Norte de la pantalla de Boca	10°26' 46.2" N	75°29' 24" W
Ciénaga de la Virgen	Ciénaga de la Virgen - 1	10°2 9' 6.9" N	75°29' 0.6" W
Río Magdalena	Boca Caño Clarín	10°57' 12.8" N	74° 45' 10" W

Tabla 6-2: Coordenadas estaciones costeras y oceánicas en el océano Pacífico colombiano.

SECTOR	LUGAR	LATITUD	LONGITUD
Boca Naya hasta Bahía Timbiquí	Boca Río Micay	3° 2' 42.6" N	-77° 39' 25.4" W
Boca Naya hasta Bahía Timbiquí	Boca Río Saija	2° 51' 38.48" N	-77° 40' 9.8" W
Boca Naya hasta Bahía Timbiquí	Frente a Río Micay	3° 3' 21.5" N	-77° 44' 20.4" W
Boca Naya hasta Bahía Timbiquí	Frente a Río Saija	2° 54' 3.6" N	-77° 45' 45.8" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Bocana Río Guajui	2° 41' 55.2" N	-77° 48' 36.6" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Bocana Río Guapi	2° 39' 38.1" N	-77° 55' 22.5" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Boca Río Timbiquí	2° 46' 56.6" N	-77° 44' 24.8" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Frente a Boca Río Guajui	2° 46' 9" N	-77° 51' 5.3" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Frente a Boca Río Guapi (Boya)	2° 44' 18.2" N	-77° 57' 55.7" W
Timbiquí a Guapi - límite con Nariño	Frente a Timbiquí	2° 50' 1.3" N	-77° 48' 14.4" W
Isla Gorgona	Norte del Horno Gorgona	3° 0' 29.6" N	-78° 10' 5.5" W
Isla Gorgona	Gorgonilla	2° 55' 57.1" N	-78° 12' 54.6" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Boca Quebrada Chocolatal	6° 14' 4.9" N	-77° 24' 23" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Boca Río Valle	6° 6' 48.4" N	-77° 26' 8.4" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Bahía Solano (ESSO)	6° 14' 19.8" N	-77° 24' 51.5" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Frente a Río Valle	6° 6' 31.1" N	-77° 26' 19.4" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Frente a R. Nuquí	5° 42' 44.6" N	-77° 16' 52.4" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Boca R. Nuquí	5° 42' 14.9" N	-77° 16' 39.2" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Frente Bahía Solano	6° 15' 4.7" N	-77° 24' 42.2" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Playa Nuquí	5° 43' 2" N	-77° 16' 16" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Boca R. Nuquí	5° 42' 14.9" N	-77° 16' 39.2" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Frente Bahía Solano	6° 15' 4.7" N	-77° 24' 42.2" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Playa Nuquí	5° 43' 2" N	-77° 16' 16" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Estero Tribugá	5° 46' 36" N	-77° 15' 3" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Playa Tribugá	5° 45' 49" N	-77° 16' 0.3" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Frente Playa Jurubidá	5° 50' 37" N	77° 17' 11" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Ensenada de Utría	6° 0' 41.5" N	-77° 21' 12.6" W

Tabla 6-2: (Continuación)

SECTOR	LUGAR	LATITUD	LONGITUD
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Playa Almejal	6° 6' 52" N	-77° 26' 28" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Playa Huina	6° 17' 15.5" N	-77° 27' 21.7" W
Chocó Norte - límite con Panamá hasta Cabo Corrientes	Estero Jurubidá	5° 50' 51" N	-77° 16' 57.1" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	La Barra	3° 57' 36.5" N	-77° 23' 2.1" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Frente a cabaña Amarilla	3° 57' 4.2" N	-77° 22' 33.6" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Frente a cabañas Carvajal	3° 56' 52.2" N	-77° 22' 25.6" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Frente al Hotel Medellín	3° 56' 39.9" N	-77° 22' 17.7" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Puente Juanchaco - Ladrilleros	3° 55' 54.1" N	-77° 21' 49.2" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Diagonal Hotel Palm View	3° 55' 49.6" N	-77° 21' 31.7" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Frente Río San Juan	4° 1' 54.2" N	-77° 27' 9.6" W
Boca de San Juan hasta bahía Málaga	Boca Río San Juan	4° 4' 33.8" N	-77° 26' 22.5" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Boca Río Anchicayá	3° 47' 43.7" N	-77° 6' 55.3" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Boca Río Dagua	3° 51' 28.6" N	-77° 3' 34.6" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Boca Río Potedo	3° 48' 11.6" N	-77° 5' 44.6" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 1	3° 49' 24.9" N	-77° 11' 12.1" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 2	3° 49' 24.9" N	-77° 10' 23.5"
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 3	3° 49' 56.5" N	-77° 9' 52" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 4	3° 51' 12.2" N	-77° 9' 17.1" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 5	3° 50' 30.1" N	-77° 9' 17" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 6	3° 51' 18.9" N	-77° 7' 41.5" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 7	3° 51' 51.5" N	-77° 7' 9" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 8	3° 51' 35.2" N	-77° 6' 20.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 9	3° 52' 4.9" N	-77° 6' 13.5" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 10	3° 53' 12.8" N	-77° 5' 48" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 11	3° 54' 1.7" N	-77° 5' 31.8" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 12	3° 53' 45.4" N	-77° 5' 31.8" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 13	3° 52' 16.2" N	-77° 5' 45.8" W

Tabla 6-2: (Continuación)

SECTOR	LUGAR	LATITUD	LONGITUD
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 14	3° 53' 29.1" N	-77° 5' 15.6" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 15	3° 54' 1.7" N	-77° 4' 59.4"
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 16	3° 53' 45.5" N	-77° 4' 59.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 17	3° 53' 29.1" N	-77° 4' 59.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 18	3° 53' 12.9" N	-77° 4' 59.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 19	3° 54' 18" N	-77° 4' 43.1" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 20	3° 52' 56.6" N	-77° 4' 43.1" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 21	3° 53' 45.5" N	-77° 4' 27" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 22	3° 54' 18" N	-77° 4' 10.8" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 23	3° 54' 1.1" N	-77° 4' 3" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 24	3° 52' 40.3" N	-77° 4' 10.8" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 25	3° 52' 14.5" N	-77° 3' 45.7" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 26	3° 53' 45.5" N	-77° 3' 38.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 27	3° 52' 14.5" N	-77° 3' 29.5" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 28	3° 52' 56.6" N	-77° 3' 22.2" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 29	3° 54' 34.2" N	-77° 3' 6" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 30	3° 53' 45.4" N	-77° 3' 6" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Bahía de Buenaventura - 31	3° 53' 29.1" N	-77° 3' 38.4" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente al muelle - Bocana	3° 49' 33.8" N	-77° 11' 49.9" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente hotel Bocana	3° 49' 55" N	-77° 11' 25.2" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Pianguita - Juanchaco	3° 50' 5.4" N	-77° 11' 53" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente a Río Anchicayá	3° 49' 0" N	-77° 8' 58" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente a Río Dagua	3° 52' 16.4" N	-77° 4' 22" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente a Río Potodo	3° 49' 34.9" N	-77° 7' 30.1" W
Bahía Málaga hasta Bahía de Buenaventura	Frente a Río Raposo	3° 45' 55.2" N	-77° 10' 12.3" W
Sur Bahía de Buenaventura hasta Boca Naya	Boca R. Raposo	3° 44' 18.5" N	-77° 10' 27.8" W

Figura 6-2: Puntos con registros de temperatura de la superficie del mar y de pH en el mar Caribe colombiano.

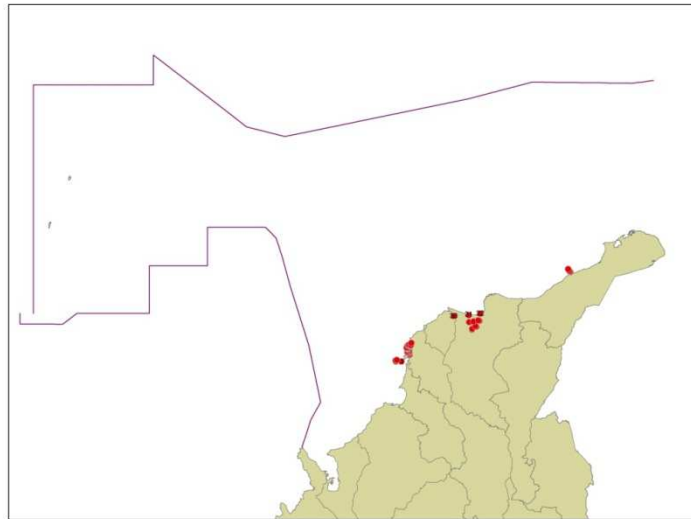
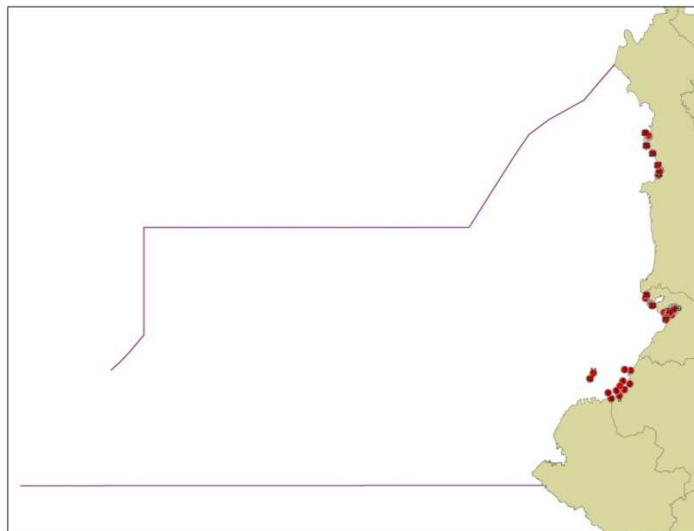


Figura 6-3: Puntos con registros de temperatura de la superficie del mar y de pH en el océano Pacífico colombiano.



El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) suministró los datos de temperatura mensual del aire y de la superficie del mar para algunos sitios costeros del Mar Caribe y el océano Pacífico colombianos.

Los datos de concentración de CO₂ atmosférico se tomó de la base de datos de la National Ocean and Atmosphere Administration (NOAA) disponibles sin costo al público en el sitio ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_mlo.txt.

Los valores futuros de TSA se obtuvieron de los escenarios elaborados por Ruiz (2010) y Pabón (2012) y los datos de las futuras concentraciones de CO₂ se obtuvieron del informe de escenarios de IPCC (2000).

6.3 Organización y procesamiento de datos

La información suministrada por el INVEMAR fue organizada en una tabla que contiene los datos de fecha (día-mes-año), latitud, longitud, temperatura superficial del mar y pH. Posteriormente, se procedió a calcular los promedios diurnos (datos entre 12:00 m y 5:00 pm), promedios nocturnos (datos entre 0:00 y 5:00 am), con los cuales se calculan los promedios diarios (promedios entre los nocturnos y los diurnos). Así, se organizan series de datos nocturnos, diurnos y diarios. Igualmente, estos datos fueron verificados, con el fin de construir los promedios anuales por área (Caribe o Pacífico).

Los procesos de largo plazo asociados al cambio global se analizan a partir de los promedios anuales por área (Caribe y Pacífico) de temperatura de la superficie del mar y pH. Este promedio filtra la estacionalidad y variabilidad espacio-temporal de alta y media frecuencia, dejando los procesos de largo plazo.

Al verificar las series de datos anuales, se encontró que en el período 1993-1995 los valores de la TSM y del pH son atípicamente altos y no están dentro del rango característico de las dos variables para la región; por ello, para el análisis se consideró solamente el período a partir del año 1996.

6.4 Análisis de las tendencias

Con los datos anuales del período 1996-2011 se calcularon las tendencias lineales en las dos variables y se presentan en términos de cambio por decenio.

6.5 Establecimiento de las relaciones TSM(TSA), pH(TSM) y pH(CO₂) para la construcción de los modelos y estimación de cambios futuros en la TSM y en el pH

Con las series de datos anuales de las dos variables se exploraron las relaciones TSM(TSA), pH(TSM) y pH(CO₂) con el fin de estimar los cambios que podrían ocurrir en la TSM y en el pH, debido a los cambios de la TSA y en las concentraciones de CO₂ atmosférico que generarían diferentes escenarios climáticos. Para el establecimiento de la relación pH(TSM) se exploraron diversas formas de regresión entre las variables correspondientes.

La relación TSM(TSA) se calculó utilizando la temperatura media anual del aire por área (calculados a partir de datos suministrados por el IDEAM) y la TSM media anual por área para utilizarla en la estimación de la magnitud del calentamiento futuro.

En cuanto a la relación pH(TSM) se exploró la dependencia del pH de la TSM, utilizando las series de valores anuales medios por área de la TSM y la de valores anuales de pH medio por área.

Para la relación pH(CO₂) se tomaron los datos de concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera medidos en la estación de Mauna Loa, a los cuales se accedió a través de la página ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_annmean_mlo.txt.

6.6 Calibración, validación y ajuste de los modelos de relación

Las fórmulas polinomiales obtenidas como modelo se trataron para acercar los resultados a la realidad. Inicialmente, se hizo una calibración que consistió en sintonizar manualmente la constante de cada ecuación hasta obtener valores cercanos. También se realizó la aplicación de un coeficiente k_{ajuste} (ecuación 6.1):

$$k_{ajuste} = \frac{pH_{observado}}{pH_{modelado}} \quad (6.1)$$

Así, los resultados obtenidos del modelo se ajustan de la siguiente manera (ecuación 6.2):

$$pH_{\text{modelado}}^{\text{ajustado}} = k_{\text{ajuste}} * pH_{\text{modelado}} \quad (6.2)$$

La validación se efectuó con base en el cálculo del error cuadrático medio (RMSE) obtenido de la comparación de los pH modelados con los observados.

6.7 Análisis de los posibles cambios futuros

La posible magnitud del calentamiento del mar hacia el 2050 y el 2100 se estimó utilizando los escenarios A2 y B2 de calentamiento de la atmósfera sobre la región, obtenidos por Ruiz (2010) y Pabón (2012) y aplicando la relación establecida entre la temperatura superficial del aire (TSA) y la temperatura superficial del mar (TSM) descrita en el punto anterior.

Tal relación supone que el calentamiento de la atmósfera induce un aumento de la TSM dados los cambios que habría en los flujos desde la atmósfera hacia la superficie, en particular la radiación de onda larga, el calor sensible y el calor latente; los cambios en la cantidad de radiación de onda larga incidente estarían asociados a la modificación de la humedad del aire o de la nubosidad.

Establecer con exactitud la proporción del calentamiento de la superficie del mar, debido al calentamiento de la atmósfera es una tarea compleja que implica un estudio específico el cual no forma parte de este trabajo. Por ello, para efectos de este trabajo se utiliza la diferencia directa entre TSM y TSA que según Jackson y Wick (2010) con mayor frecuencia se ubica entre 0,5 y 0,6°C (un análisis similar ha sido publicado en <http://bobtisdale.blogspot.com/2010/12/toa-project-sea-air-and-sea-surface.html>). No obstante, tal diferencia tiene particularidades regionales (Galbraith et al., 2012, por ejemplo), por lo que para el presente estudio se analizarán las diferencias a partir de los datos anuales de TSM y de TSA obtenidos para el Caribe y el Pacífico colombianos.

Para estimar los posibles cambios futuros del pH regional se utilizó la relación establecida pH (TSM) en la que se introdujeron los cambios de la temperatura del mar que generarían hacia el 2050 y el 2100, los escenarios A2 y B2 (IPCC, 2000) de concentraciones de gases de efecto invernadero.

6.8 Determinación del impacto en los ecosistemas marinos

Como se mencionó en la descripción de la región, en el territorio marítimo colombiano se encuentran varios ecosistemas marinos como las lagunas costeras, estuarios, arrecifes de coral, manglares, praderas de pastos marinos, costas arenosas, litorales rocosos y fondos sedimentarios; no obstante, en este trabajo el análisis se enfoca en los ecosistemas marinos más sensibles a los cambios de las características físicas y químicas del océano, como los arrecifes coralinos, las praderas de pastos marinos y los manglares (Kennedy et al., 2002; Fischlin et al. 2007).

El estudio del impacto de los cambios futuros de la temperatura superficial del mar sobre los ecosistemas marinos colombianos se efectuó por inferencia a partir de situaciones análogas observadas en el pasado, que están suficientemente documentados en publicaciones y reportes especializados. Para el Océano Pacífico, por ejemplo, los análogos de calentamiento son los eventos El Niño; para enfriamiento, si fuera el caso, se tomarían los eventos La Niña. Para el Caribe se analizarán las descripciones publicadas sobre el efecto de las condiciones especiales en el campo térmico en los ecosistemas regionales.

El impacto de los cambios en el pH en los ecosistemas marinos se infiere a partir de información secundaria sobre resultados de investigaciones efectuadas hasta ahora por diferentes autores.

Igualmente, el impacto de estos fenómenos del cambio global en el ámbito socioeconómico de los ecosistemas marinos seleccionados se realiza a partir de reportes y publicaciones especializados.

7.Resultados y discusión

A continuación se exponen los resultados del análisis de tendencias de largo plazo en las variables de estudio, se presenta la cuantificación de relaciones de variables con lo que se pretende estimar condiciones futuras, se plantean los escenarios de cambio en temperatura superficial del mar y en el pH, para finalmente señalar cuales podrían ser los impactos de los cambios en los ecosistemas marinos.

7.1 Comportamiento de la temperatura superficial del mar y pH en el mar Caribe y océano Pacífico colombianos

El comportamiento de la temperatura superficial del mar y el pH promedios anuales por área para el mar Caribe colombiano y el área marítima colombiana en el océano Pacífico se presenta en las figuras 7-1a, b y 7-2a, b respectivamente. Ver síntesis en la Tabla 7-1.

Las tendencias de largo plazo muestran en los dos casos calentamiento cercano a los 0,2°C por decenio, siendo un tanto mayor en el Caribe (0,23°C/decenio) comparado con lo que está ocurriendo en el Pacífico (0,18°C/decenio).

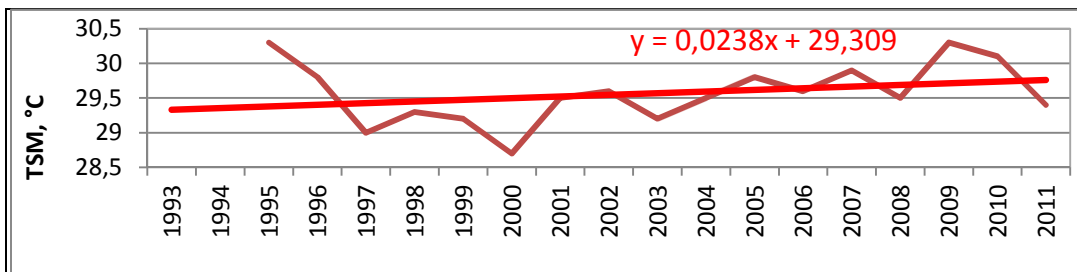
La tendencia de largo plazo de los promedios anuales de pH por área (Figuras 7-1b y 7-2b) muestra que en el Caribe está disminuyendo con una tendencia de -0,071 unidades/decenio, lo que indica un ritmo de acidificación mayor que el promedio mundial (entre -0.015 y -0,024 unidades/decenio, según Santana-Casiano et al. (2007), Dore et al. (2009), Olafsson et al. (2009) y González-Dávila et al. (2010)). En el área marítima de Colombia del océano Pacífico la tendencia del pH es negativa (-0,09 unidades/decenio) e igual un tanto superior al promedio mundial. De todas maneras, en los dos casos la tendencia negativa indica una acidificación del agua marina en los sectores de estudio, siendo este proceso mayor en el Pacífico que en el Caribe.

Tabla 7-1: Tendencia por decenio de la temperatura superficial del mar y pH en el mar Caribe colombiano.

VARIABLE	TENDENCIA POR DECENIO MAR CARIBE	TENDENCIA POR DECENIO OCÉANO PACÍFICO
TSM	0,23°C	0,18°C
pH	-0,071	-0,090

Figura 7-1: Comportamiento de la temperatura media anual del mar (a) y del pH (b) en el mar Caribe colombiano.

a)



b)

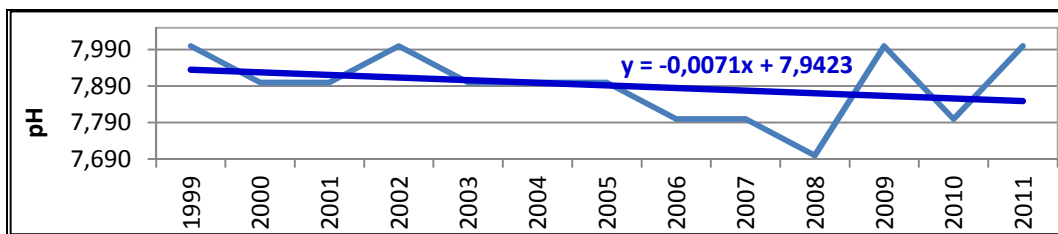
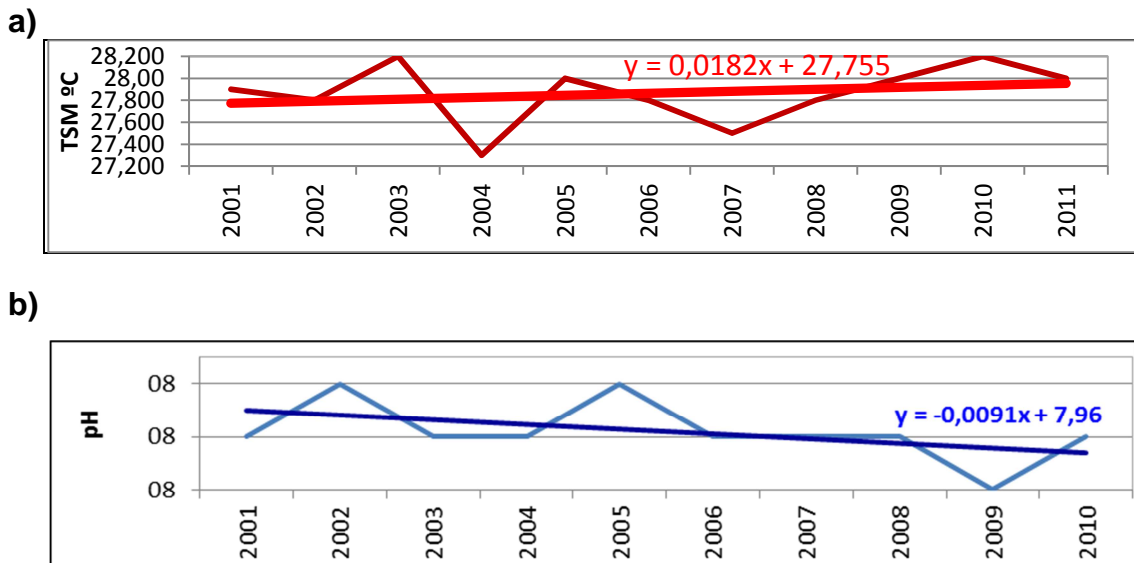


Figura 7-2: Comportamiento de la temperatura media anual del mar (a) y del pH (b) en el océano Pacífico colombiano.



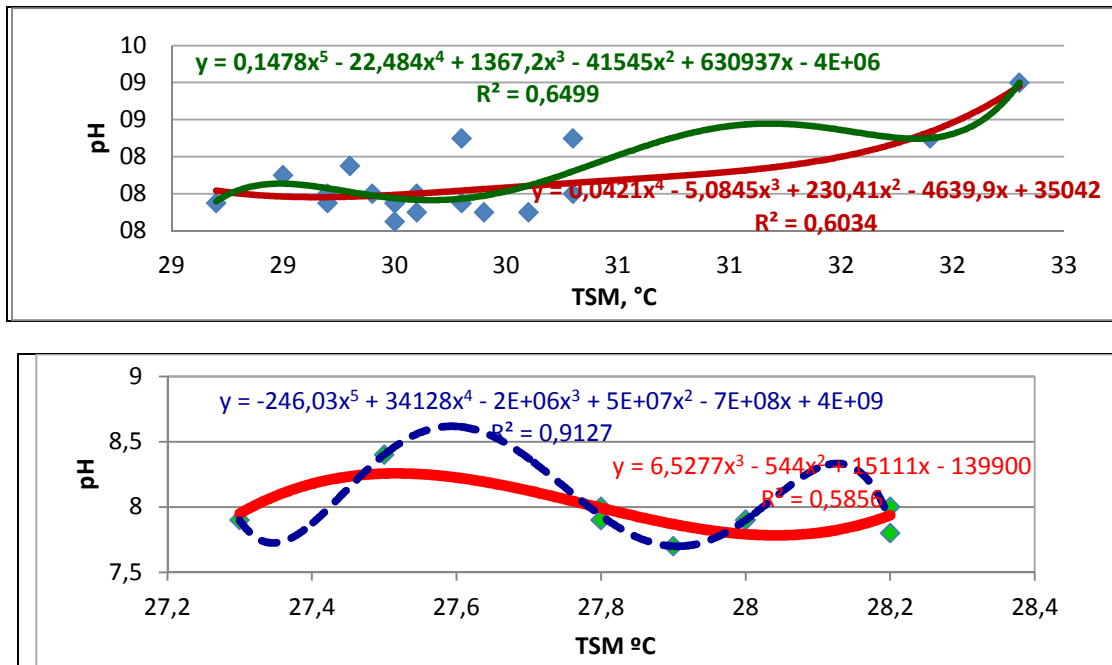
7.2 Relaciones pH vs temperatura superficial del mar

La Figura 7-3 presenta modelos de la relación pH (TSM) para el mar Caribe y el Pacífico colombianos. Se observa que para los dos casos el modelo que mejor aproxima (con $R^2=0,65$ y $R^2=0,91$) es el basado en polinomio de quinto orden.

El modelo para el Caribe se calibró modificando la constante que está al final de la fórmula (ecuación 7.1) del polinomio de quinto orden (verde en la Figura 7-3), quedando de la siguiente manera:

$$pH(TSM) = 0,1478 * TSM^5 - 22,484 * TSM^4 + 1367,2 * TSM^3 - 41545 * TSM^2 + 630937 * TSM - 3831502,738 \quad (7.1)$$

Figura 7-3: Modelo de relación entre la temperatura media anual del mar con el pH medio anual en el mar Caribe (arriba) y el Pacífico (abajo) colombianos.



Para el Pacífico, la fórmula señalada en el gráfico correspondiente en la Figura 7-3 se ajustó mediante la aplicación de un coeficiente $k_{ajuste} = -2,24638 \cdot 10^{-9}$ (ecuación 7.2), con lo que el modelo para esta región quedó así:

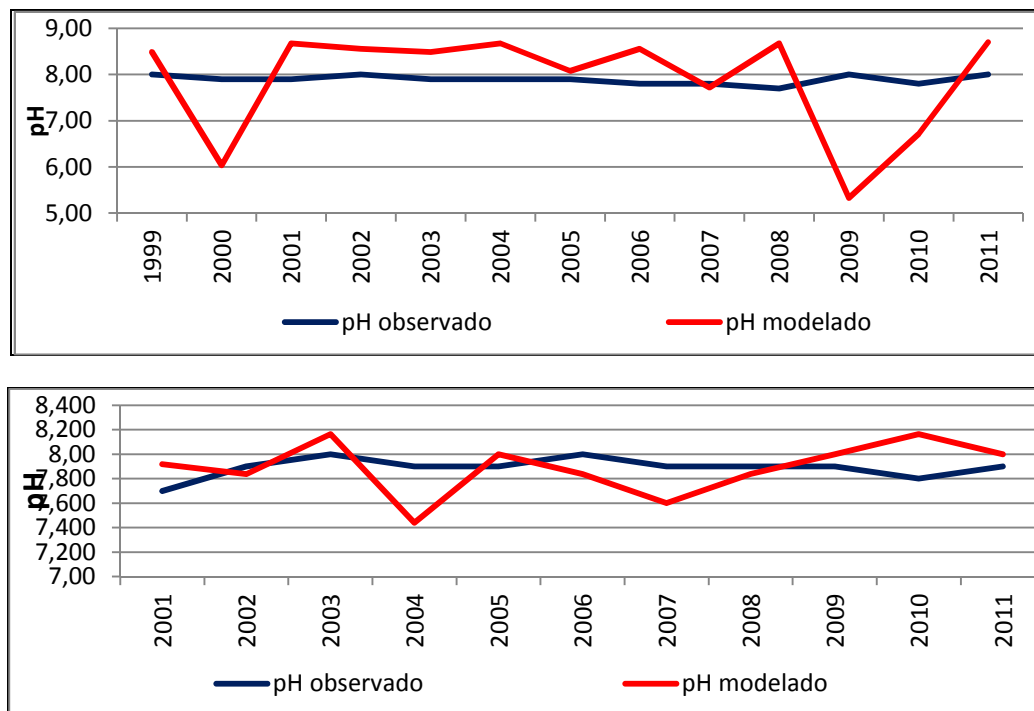
$$pH(TSM) = -2,24638 \cdot 10^{-9}[-246,03 \cdot TSM^5 + 34128 \cdot TSM^4 - 2000000 \cdot TSM^3 + 50000000 \cdot TSM^2 - 700000000 \cdot TSM + 4000000000] \quad (7.2)$$

La comparación de los resultados generados por estos modelos y los datos de observaciones reales (ver Figura 7-4) permitió establecer que para el Pacífico la aproximación es mejor que para el Caribe. La validación de los resultados de los modelos de relación pH (TSM), se realizó utilizando la comparación de los datos observados y modelados de pH, mediante el cálculo de error cuadrático medio (RMSE). Como resultado se obtuvieron RMSE del orden de 1,11 para el modelo del Caribe y de 0,29

para el del Pacífico. Esto representa un 14% y un 3,6% del valor promedio de las series de pH correspondiente.

Los resultados de los valores de pH obtenidos para el Caribe y el Pacífico colombianos mediante estas fórmulas tuvieron un orden de magnitud similar a los valores reales observados en estas dos regiones del océano mundial (Figura 1-1). (En los sectores analizados del mar Caribe, los valores de pH promedio por área oscilan entre 8,0 y 8,1; mientras que en el océano Pacífico, el pH varía entre 7,95 y 8,0). Las fórmulas 7.1 y 7.2 se podrían utilizar entonces para cálculos con otros valores de temperatura superficial del mar de otro período y establecer el promedio de pH del mismo, aunque habría que tener cuidado con el uso de las mismas dado que en los dos casos hay alta sensibilidad a los cambios de TSM: cambios de décimas de grado producen grandes cambios en el pH.

Figura 7-4: Comparación de las series de los pH observados y los modelados para el Caribe (arriba) y Pacífico (abajo) colombianos.



7.3 Relación entre la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la temperatura del aire en superficie (TSA)

La relación entre la TSA y la TSM para el mar Caribe y el océano Pacífico colombianos, se muestra en la Figura 7-5. En el mar Caribe (Figura 7-5, arriba), se observa una relación directa entre la temperatura del aire y de la superficie del mar; la diferencia entre las dos variables es de 1,5-1,6°C, la cual se mantiene prácticamente uniforme a través de los años. Para el Pacífico la relación es un tanto más compleja y difícilmente se podría establecer un modelo TSM(TSA) para estos sectores del estudio.

La relación de TSA y TSM en el Caribe se cuantifica en la Figura 7-6. Según ésta, la TSM se puede obtener con alto grado de acierto ($R^2=0,52$) con la fórmula (ecuación 7.3) señalada en el gráfico, la cual después de la calibración y ajuste quedó así:

$$TSM (TSA) = 1,09 * [-0,0009 * TSA^3 - 0,0044 * TSA^2 + 0,1503 * TSA + 39,5] \quad (7.3)$$

Con la que se obtuvieron los resultados que se ilustran en la Figura 7-7. En este caso hay un RMSE=0,77, que representa cerca del 2,5% del valor promedio de la TSM observada, lo que permitiría elaborar las proyecciones futuras de TSM a partir de la TSA calculada en diferentes escenarios de cambio climático.

Para el Pacífico (Figura 7-5 centro y abajo) la relación TSA y TSM no sigue un patrón determinado. En el sector de Guapi, por ejemplo, la TSA es mayor que la TSM en épocas de influencia del fenómeno de El Niño (2002-203 y 2010-2011). Aún si se intentara encontrar la relación entre los promedios de TSA y de TSM en los dos sectores del Pacífico, tal relación no incluiría la variedad de situaciones que se presentan en la ventana 2001-2011.

Figura 7-5: Comparación del comportamiento interanual de la temperatura del aire (TA) y la temperatura superficial del mar (TSM) en el mar Caribe colombiano (arriba) y Pacífico (centro y abajo).

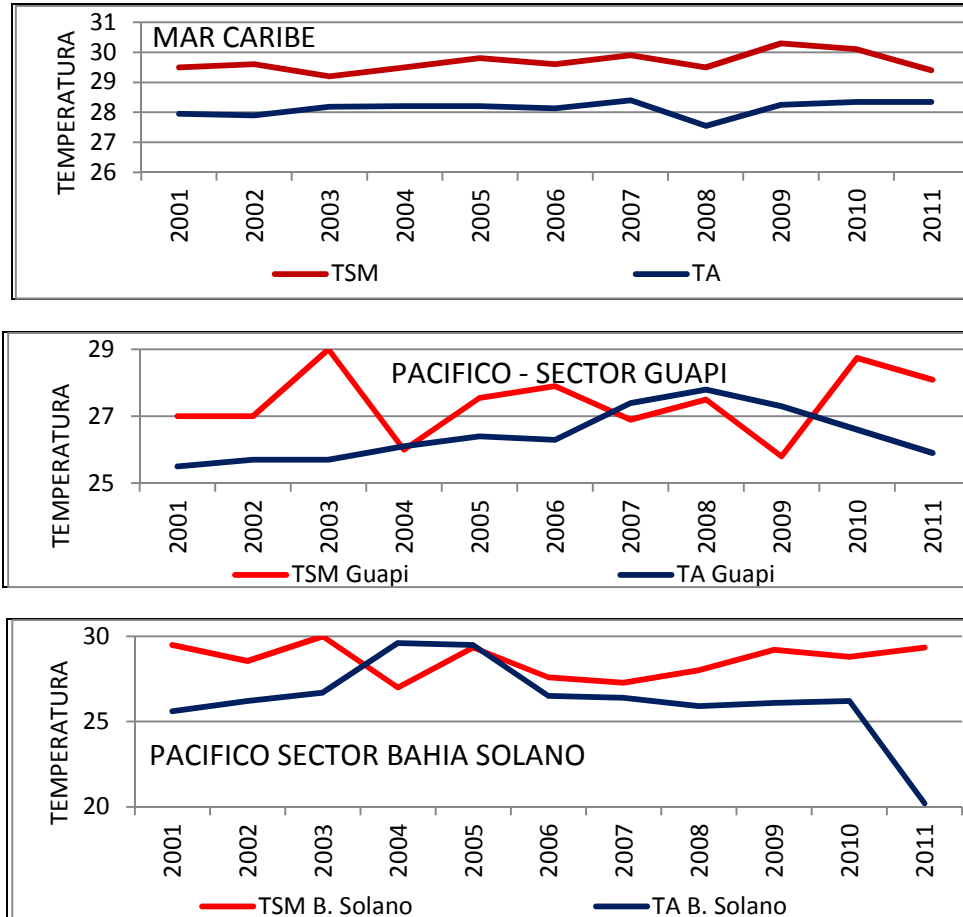


Figura 7-6: Cuantificación de la relación existente entre la TSM y la TSA en el Caribe colombiano.

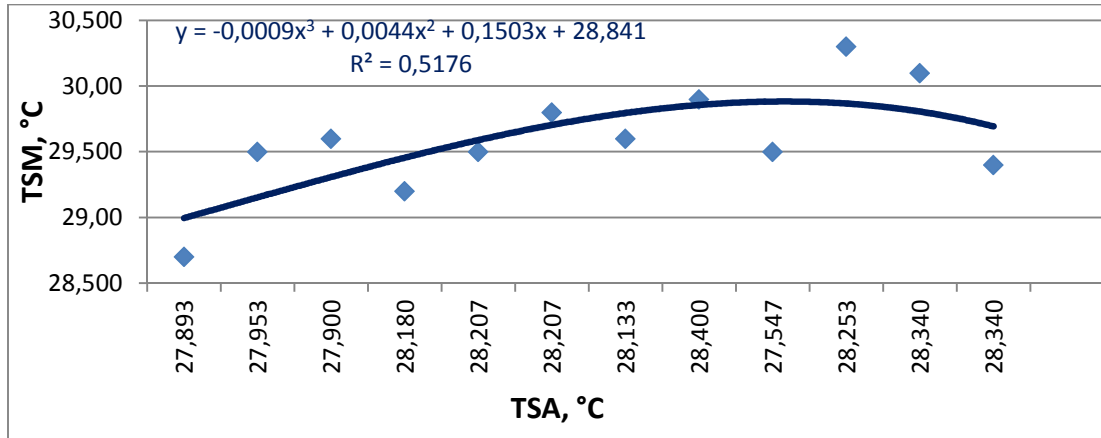
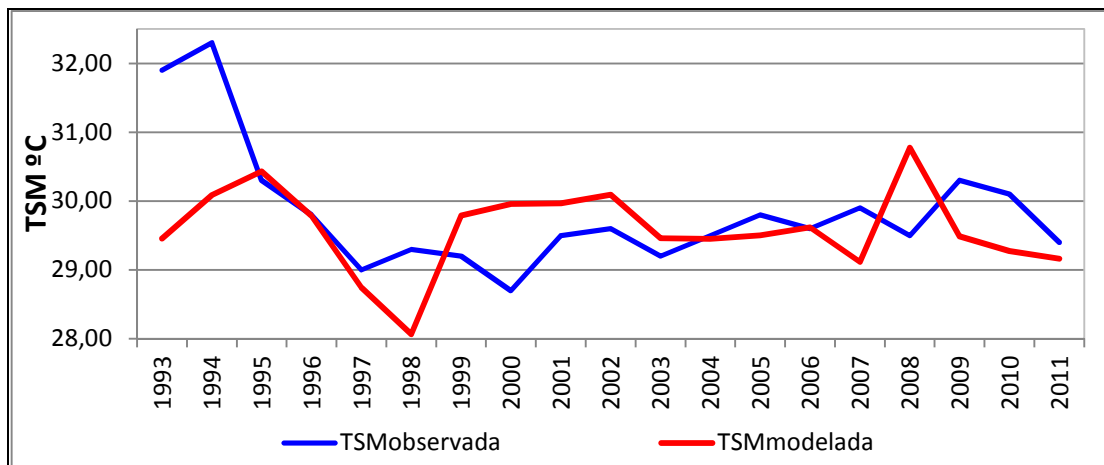


Figura 7-7: Comparación de la TSM observada y la TSM simulada para el Caribe analizado.

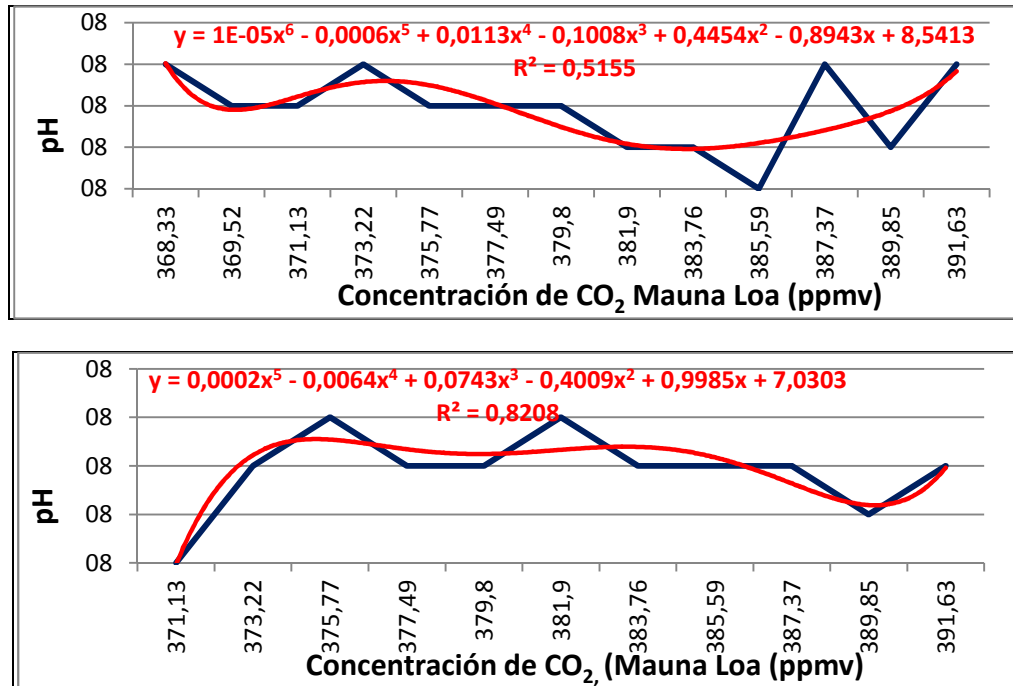


7.4 Relaciones entre pH del agua marina regional y el CO₂ atmosférico global

La exploración de la relación pH(CO₂) se realizó con las series de pH correspondiente a los sectores del Caribe y del Pacífico analizados y las concentraciones de dióxido de carbono medidas en Mauna Loa (Hawai). En la Figura 7-8 se presenta esta relación en

las ecuaciones sobre los gráficos (ecuaciones 7.4 y 7.5, Caribe y Pacífico, respectivamente). Allí se señalan los polinomios con los que se obtuvo el máximo R^2 en cada caso.

Figura 7-8: Cuantificación de la relación $\text{pH}(\text{CO}_2)$ para el Caribe (arriba) y el Pacífico (abajo) colombianos.



Una vez calibrados estos modelos de relación $\text{pH}(\text{CO}_2)$ quedaron respectivamente de la siguiente manera:

$$\text{pH}(\text{CO}_2) = 3,58184 * 10^{11} / [0,00001 * \text{CO}_2^6 - 0,0006 * \text{CO}_2^5 + 0,0113 * \text{CO}_2^4 - 0,1008 * \text{CO}_2^3 + 0,4454 * \text{CO}_2^2 - 0,8943 * \text{CO}_2 + 20000000000,541] \quad (7.4)$$

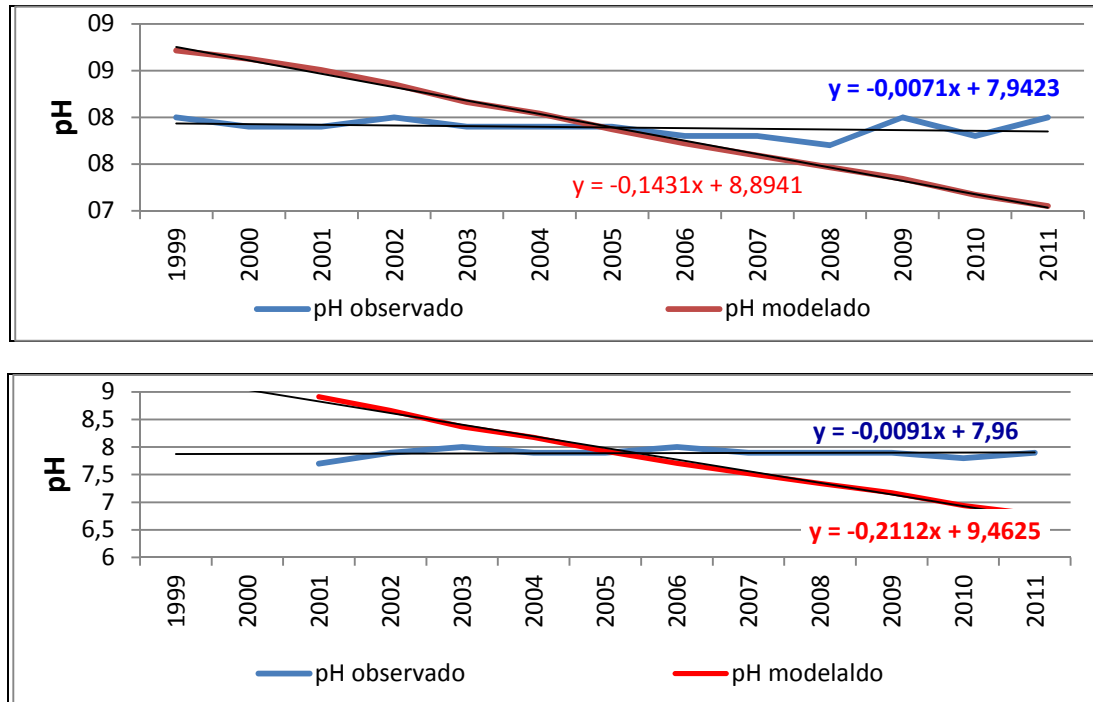
$$\text{pH}(\text{CO}_2) = 11503689098 / [0,0002 * \text{CO}_2^5 - 0,0064 * \text{CO}_2^4 + 0,0743 * \text{CO}_2^3 - 0,4009 * \text{CO}_2^2 + 0,9985 * \text{CO}_2 + 7,0303] \quad (7.5)$$

La fuerte tendencia lineal de las concentraciones de CO_2 imprime una tendencia exagerada en la disminución del pH modelado (Figura 7-9). Esto implicó hacer un ajuste

de tendencia, que consistió en multiplicar la tendencia de la serie modelada por $3,6 \times 10^{11}$ para el Caribe (ecuación 7.4) y por 1150368908 para el Pacífico (ecuación 7.5). Los promedios de las series de mediciones de pH para el período analizado en el Caribe y en el Pacífico fueron de 7,9 en los dos casos (recordemos que en la distribución global presentada en la Figura 1-1, el pH es más bajo en el Pacífico que en el Caribe); los promedios de los modelados fueron 7,9 y 7,8 respectivamente.

Los resultados obtenidos después del ajuste resulta ser similares a los ya establecidos por otros autores (ver, por ejemplo, The Royal Society, 2005; Feely et al, 2009), cuyos resultados sugieren que un incremento de aproximadamente 100 ppmv de CO₂ atmosférico conlleva a una reducción de 0,1 unidades de pH en el agua marina superficial. En el período 1999 - 2011 analizado en el presente trabajo, según las mediciones en Mauna Loa, el incremento del CO₂ atmosférico fue del orden de 20 ppmv, lo que generó disminución del pH de 0,07 unidades/decenio y de 0,09 unidades/decenio en los sectores marino-costeros analizados para el Caribe y el Pacífico, respectivamente. La aplicación de los modelos ajustados pH(CO₂) generan tendencias similares.

Figura 7-9: Comparación del comportamiento del pH observado y el obtenido a partir de las relaciones (7.4) y (7.5) para el Caribe y para el Pacífico respectivamente.



En las estaciones con ambientes estuarinos también se presenta una acidificación de sus aguas; no obstante, esta acidificación no solo es ocasionada por el proceso global, sino también, de acuerdo con Feely et al. (2010), puede ser inducida por procesos costeros, como la surgencia, rica en CO_2 y, por los flujos de agua dulce, sedimentos, materia orgánica, nutrientes y contaminantes, provenientes del continente. Las tendencias del pH establecidas son el promedio para la franja marino-costero, por lo que incluiría tanto el efecto del proceso global de acidificación como el generado por los procesos regionales. Así las cosas, estas tendencias solo son evidencia de un proceso de acidificación en estas zonas, atribuible no solo al proceso global.

7.5 Los posibles cambios futuros en la TSM y el pH del mar en la zona marino-costera colombiana

En la metodología se propuso que para establecer los cambios futuros de la TSM se procedería con el uso de valores de temperatura media anual del aire proveniente de

escenarios futuros y su inclusión en el modelo de relación entre TSM(TSA) establecido. Para los cambios de pH se utilizaría la relación pH(TSM) y $\text{pH(CO}_2\text{)}$; infortunadamente, la relación pH(TSM) no funcionó lo suficientemente bien, por lo que se opta obtener el pH futuro con los datos de CO_2 de Mauna Loa. Por ello, en la Tabla 7-2 se presentan las concentraciones de CO_2 bajo los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000), mientras que en la Tabla 7-3 se presentan los cambios que habría en la TSA en dos ventanas temporales del siglo XXI bajo los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000); los datos regionales de TSA en esos escenarios se extractaron de Pabón (2012).

Con la información de las Tablas 7-2 y 7-3 y las fórmulas de las relaciones anteriormente establecidas, se calcularon los cambios que habría en la TSM hacia los períodos 2011-2040 y 2070-2100 y los posibles valores futuros de pH hacia el 2025, 2050, 2075 y 2100 bajo los escenarios A2 y B2. Los cambios de TSM están referenciados a la norma observada en 1971-2000. Los resultados para la TSM en los sectores analizados del Caribe y del Pacífico se muestran en la Tabla 7-4. Es posible constatar que en ambos casos hacia finales de siglo XXI los valores promedio de la TSM sobrepasan los 30°C.

Los resultados para el pH en diferentes períodos del siglo XXI se exponen en la Tabla 7-5. Como se puede apreciar, hacia finales del siglo XXI con el escenario A2 se tendrían valores en 0,5 por debajo de los registrados a comienzos del siglo; bajo el escenario B2 la reducción del pH sería del orden de 0,3.

Tabla 7-2: Concentraciones de CO_2 atmosférico (en ppmv) para diferentes cortes en el siglo XXI en los escenarios A2 y B2 de IPCC (2000).

AÑO	ESCENARIO A2	ESCENARIO B2
2025	450	425
2050	550	500
2075	625	550
2100	850	600

Tabla 7-3: Cambios en el promedio multianual (norma de 30 años) en la temperatura media anual del aire sobre el Caribe y el Pacífico bajo varios escenarios futuros, en relación con la norma observada a finales de siglo XX (1971-2000), según lo establecido por Pabón (2012).

REGION	2011-2040		2070-2100	
	A2	B2	A2	B2
Caribe	1,5	1	3	2
Pacífico	1,2	1	2,5	2

Tabla 7-4: Posibles valores de la temperatura media del mar (°C) en el Caribe y el Pacífico, bajo los escenarios A2 y B2.

REGIÓN	TSM promedio en 2000-2010	2011-2040		2070-2100	
		A2	B2	A2	B2
Caribe	29,6	31,0	30,5	32,0	31,4
Pacífico	27,9	29,2	28,6	30,4	29,8

Tabla 7-5: Posibles valores del pH (en unidades) en los años 2025, 2050, 2075 y 2100, bajo los escenarios A2 y B2.

REGIÓN	pH promedio en 2000-2010	AÑOS			
		2025	2050	2075	2100
ESCENARIO A2					
Caribe	7,892	7,812	7,712	7,637	7,412
Pacífico	7,891	7,811	7,711	7,636	7,411
ESCENARIO B2					
Caribe	7,892	7,837	7,762	7,712	7,662
Pacífico	7,891	7,836	7,761	7,711	7,661

7.6 Impacto en los ecosistemas marinos colombianos

Dado que los resultados expuestos arriba en el capítulo anterior sugieren que en el mar Caribe y en el océano Pacífico colombianos, está ocurriendo calentamiento y acidificación de las aguas marinas, estos fenómenos se constituyen en amenaza para los ecosistemas de este sector del territorio nacional; sin embargo, como se mencionó en la metodología este trabajo enfoca el análisis en los ecosistemas de arrecifes coralinos, praderas de pastos marinos y manglares, basados en que según Kennedy et al. (2002) y Fischlin et al. (2007), estos son en general los más sensibles a los cambios de las características físicas y químicas del océano.

7.6.1 Impacto del aumento de la temperatura del mar

Según se estableció en el análisis realizado hasta el momento, está ocurriendo un aumento de la temperatura de la superficie del mar de cerca de 0,2°C en el Caribe y el Pacífico colombianos y, en el siglo XXI, este calentamiento puede alcanzar los 2°C. Estos cambios indudablemente impactarán los ecosistemas de las áreas marítimas colombianas, los cuales se pueden inferir a partir de la evidencia de los impactos encontrados por diversos autores en otras regiones o para la misma región en otros períodos, casos que pueden servir de análogos para prever lo que podría ocurrir en la región de análisis. La Tabla 7-6 resume los posibles impactos del calentamiento del mar inferidos a partir de diversas investigaciones realizadas sobre el tema.

Así, los arrecifes coralinos colombianos, en la medida como transcurra el siglo XXI, presentarían una paulatina disminución de su cobertura, debido a que el aumento de la temperatura del agua reduce la resistencia y resiliencia, lo que posibilita la disminución de las tasas de calcificación y el blanqueamiento. Esta reducción de los arrecifes coralinos implica una disminución de los organismos y comunidades asociados.

El calentamiento del medio marino también propiciará la disminución en la extensión de las praderas de pastos marinos en el mar Caribe colombiano, debido a los diversos cambios en sus tasas de crecimiento, funciones fisiológicas y la reducción de la capacidad fotosintética.

Otro de los ecosistemas marinos colombianos impactados por el calentamiento del agua de mar son los manglares, ya que este fenómeno podría ocasionar un aumento en la salinidad y una reducción de los nutrientes, disminuyendo la productividad primaria del estuario y la densidad de algunas especies de manglar. Estos cambios en el ecosistema significarían a su vez, una reducción de la abundancia de los organismos asociados.

Tabla 7-6: Posibles impactos identificados del aumento de la temperatura superficial del mar en los ecosistemas marinos colombianos.

ECOSISTEMA MARINO - COSTERO	POSIBLE IMPACTO IDENTIFICADO	EVIDENCIA QUE SUSTENTA EL IMPACTO
Arrecifes coralinos	<p>Pérdida de la resistencia y la resiliencia al blanqueamiento.</p> <p>Blanqueamiento de coral</p> <p>Pérdida de la cobertura y disminución de las tasas de calcificación.</p> <p>Mortalidad de algunas especies y áreas coralinas.</p>	<p>Resiliencia de coral en el océano Índico occidental (Obura, 2005); respuesta de coral a calentamiento del océano (Putnam y Edmunds, 2011).</p> <p>Blanqueamiento de coral y calentamiento del océano (Manzello et al., 2007; Baker et al., 2008); blanqueamiento de coral causado por el evento El Niño en el mundo (Spencer, 2000; Jiménez et al., 2001; Podestá y Glynn, 2001; Reyes, 2001; Garzón-Ferreira et al., 2002; IPCC, 2002; Crabbe, 2007; Crabbe, 2008; Hetzinger et al., 2010) y en Colombia (Alvarado et al., 1986; Solano, 1994; Díaz et al., 2000; Vargas-Ángel et al., 2001; Garzón-Ferreira et al., 2002; INVEMAR, 2009; INVEMAR, 2011).</p> <p>Disminución de tasas de calcificación en especies de coral (Lough, 2008; Inoue et al., 2012); calentamiento del océano y crecimiento de coral (Lough y Cooper, 2011); disminución de cobertura coralina en Colombia (Díaz et al., 2000; INVEMAR, 2009; INVEMAR, 2011).</p> <p>Mortalidad de coral rojo en el Mar Mediterráneo (Torrents et al., 2008); mortalidad de áreas coralinas (Edwards et al., 2001; Sheppard y Rioja-Nieto, 2005; Miller et al., 2006; Veron et al., 2009; Yu et al., 2012).</p>
Praderas de pastos marinos	<p>Disminución de la tasa de crecimiento y de la cobertura.</p> <p>Cambio en las funciones fisiológicas de las plantas.</p> <p>Reducción de la capacidad fotosintética.</p> <p>Cambio en el metabolismo.</p>	<p>Disminución de cobertura en el Mar Mediterráneo (García et al., 2012); disminución de cobertura ocasionado por evento El Niño (Tomasko, 2002; Carlson et al., 2003; Johnson et al., 2003; Echavarría-Heras et al., 2006).</p> <p>Impacto del aumento de la temperatura del mar en pastos marinos (Short y Neckles, 1999); cambio en floración y maduración causado por evento El Niño en Colombia (Díaz et al., 2003).</p> <p>Reducción de capacidad fotosintética en algunas especies (Campbell et al., 2006).</p> <p>Efecto del calentamiento del océano en pastos marinos australianos (Waycott et al., 2007).</p>
Manglar	<p>Cambio en la fisiología de las especies.</p> <p>Disminución de la densidad.</p> <p>Cambio en la salinidad y los ciclos biogeoquímicos.</p> <p>Cambio en la productividad primaria, la actividad microbiana y en organismos de aguas estuarinas.</p>	<p>Efecto del calentamiento del océano en manglares (Gilman et al., 2008; Gomes Soares et al., 2012).</p> <p>Disminución de densidad causada por el fenómeno El Niño (Drexler y Ewel, 2001; Barreto, 2008).</p> <p>Efecto del evento El Niño en la salinidad (Tolan, 2007); efecto del calentamiento del océano en ciclos biogeoquímicos (Jarvie et al., 2012; Jennerjahn, 2012) y en la concentración de nutrientes (Struyf et al., 2004).</p> <p>Efecto del calentamiento del océano en estuarios de manglar (Tabot y Adams, 2013); efecto del evento el Niño en los estuarios de manglar (Tolan, 2007).</p>

7.6.2 Impacto de la disminución del pH

De acuerdo con los resultados obtenidos, se está presentando una disminución del pH en el territorio marítimo colombiano, de -0,071 para el mar Caribe y de -0,090 para el océano Pacífico y, la acidificación del océano puede ser del orden de 0,5 unidades a finales del siglo XXI. Estas alteraciones pueden afectar significativamente a los ecosistemas marinos de Colombia, las cuales son posibles de deducir por medio de los estudios realizados por diferentes autores en diferentes regiones del planeta. En la Tabla 7-7 se presenta un resumen de los posibles impactos de la acidificación del océano inferidos a partir de diversas investigaciones realizadas sobre el tema.

Los ecosistemas de arrecifes coralinos localizados en los mares colombianos, podrían reducir su biodiversidad durante el siglo XXI, ya que la disminución del pH reduce la densidad de las zooxantelas y las tasas de calcificación, ocasionando el blanqueamiento y en ocasiones la muerte de algunas especies. La reducción de la cobertura de los arrecifes de coral significa a su vez, la disminución de los organismos y comunidades asociados.

Igualmente, la acidificación del océano afectará la distribución de las especies de las praderas de pastos marinos en el mar Caribe colombiano, debido a la disminución de la productividad y la competencia con otras especies de pastos marinos y con poblaciones algales asociadas a este ecosistema.

Los manglares del territorio marítimo colombiano también serán impactados por la disminución del pH, la cual ocasiona cambios en la solubilidad química, la disponibilidad de nutrientes y la degradación de la materia orgánica, afectando la cadena trófica y los organismos marinos asociados a los estuarios del manglar.

Tabla 7-7: Posibles impactos identificados de la disminución del pH en los ecosistemas marinos colombianos.

ECOSISTEMA MARINO - COSTERO	POSIBLE IMPACTO IDENTIFICADO	EVIDENCIA QUE SUSTENTA EL IMPACTO
Arrecifes coralinos	<p>Blanqueamiento de coral.</p> <p>Disminución en la densidad de las zooxantelas.</p> <p>Reducción de la biodiversidad y las tasas de calcificación.</p> <p>Cambios en las comunidades marinas asociadas.</p> <p>Mortalidad de algunas especies.</p>	<p>Blanqueamiento de coral y acidificación del océano (Baker et al., 2008; Veron et al., 2009); blanqueamiento de <i>Porites</i> (Anthony et al., 2008; Wei et al., 2009) y <i>Acropora</i> (Anthony et al., 2008).</p> <p>Disminución de densidad de zooxantelas en <i>Porites sp</i> y <i>Stylophora pistillata</i> (Krief et al., 2010) y en <i>Porites panamensis</i> (Anlauf et al., 2011).</p> <p>Disminución de tasas de calcificación en especies de coral (Kleypas y Yates, 2009; Buck y Folger, 2010; Krief et al., 2010; Trotter et al., 2011; Iguchi et al., 2012; McCulloch et al., 2012; Movilla et al., 2012); disminución de biodiversidad (Crabbe, 2009).</p> <p>Efectos de acidificación del océano en comunidades marinas asociadas (Atkinson y Cuet, 2008; Ishimatsu et al., 2008).</p> <p>Mortalidad de coral causada por la acidificación del océano (Veron et al., 2009).</p>
Praderas de pastos marinos	<p>Cambio en la distribución de las especies.</p> <p>Alteración de la competencia entre especies de pastos marinos y entre poblaciones de pastos marinos y poblaciones algales.</p> <p>Disminución de la productividad.</p> <p>Aumento de la productividad.</p>	<p>Impacto de la acidificación del océano en pastos marinos (Short y Neckles, 1999).</p> <p>Efecto de acidificación del océano en praderas de pastos marinos (Waycott et al., 2007; Brierley y Kingsford, 2009).</p> <p>Disminución de productividad de <i>Cymodocea</i>, <i>Zostera</i> y <i>Posidonia</i> en Australia (Waycott et al., 2007).</p> <p>Aumento de la productividad de <i>Thalassia testudinum</i> en el mar Caribe (Short y Neckles, 1999).</p>
Manglar	<p>Cambios en la solubilidad química y en la disponibilidad de nutrientes.</p> <p>Cambios en los procesos de degradación y de mineralización diagenética de la materia orgánica.</p> <p>Cambios en los procesos biológicos y químicos de las aguas estuarinas.</p> <p>Alteraciones en la cadena trófica y organismos asociados de aguas estuarinas.</p>	<p>Efecto de acidificación del océano en manglares (Comeaux et al., 2012; Jennerjahn, 2012).</p> <p>Efecto de disminución del pH en manglares de México (Comeaux et al., 2012).</p> <p>Impacto de acidificación del océano en estuarios de manglares de Estados Unidos (Feely et al, 2010).</p> <p>Impacto de acidificación de océano en estuarios de manglares (Feely et al, 2010).</p>

7.6.3 Impacto socioeconómico del cambio global en los ecosistemas marinos

Con base en el conocimiento de los impactos en otras regiones tropicales o en otros períodos, descritos en la síntesis sobre el progreso del tema en el capítulo 1, es posible inferir los impactos para las regiones costeras del mar Caribe y el océano Pacífico colombianos causados por el calentamiento y la acidificación del océano, los cuales afectarían las pesquerías, la comercialización de recursos marinos, el turismo y otras actividades comerciales.

Dentro de este contexto, es posible prever que el deterioro de los bienes y servicios de los ecosistemas marinos colombianos, traería efectos negativos, principalmente, en la pesca (artesanal e industrial) y el turismo, aspectos económicos que generan la seguridad alimentaria, la generación de empleo y el sustento económico de los habitantes de estas regiones del país. De acuerdo con CCI (2006), en el mar Caribe colombiano, se desarrolla la pesca industrial de camarón, atún y pesca blanca y, la pesca artesanal, realizada por comunidades de pescadores de las diferentes regiones; así mismo, en el océano Pacífico, se desarrolla la pesca industrial (camaronera, atunera, pesca blanca y pequeños pelágicos), la pesca artesanal y la pesca tradicional de piangua (CCI, 2006; Díaz et al, 2011).

Dado que en años anteriores, en el océano Pacífico colombiano se evidenció la migración de la plumuda, *Opisthonema sp*, hacia el norte del Pacífico durante el evento El Niño 1997 – 1998 (Zapata, 2002), lo que disminuyó la abundancia de esta especie, con el calentamiento del agua marina en la región podría haber desplazamiento definitivo del hábitat de la especie, lo que generaría un importante impacto negativo en la pesquería artesanal de los habitantes de esta región.

En Colombia se podría prever una reducción en las poblaciones de especies comerciales como pargos, meros, chernas, langostas, cangrejos y caracoles, debido al deterioro de los ecosistemas de arrecifes coralinos.

El turismo en las regiones costeras del territorio colombiano, también podría afectarse por el calentamiento y la acidificación del océano, debido a que disminuiría el atractivo

paisajístico para el buceo ecológico y recreacional y, afectarían negativamente la economía de otras actividades asociadas.

Con base en lo anterior, el impacto socioeconómico del calentamiento y la acidificación del océano identificado se resume en la tabla 7-8.

Tabla 7-8: Posibles impactos socioeconómicos identificados en los ecosistemas marinos colombianos.

SECTOR	POSIBLE IMPACTO IDENTIFICADO	EVIDENCIA QUE SUSTENTA EL IMPACTO
Pesca	Reducción de la pesca por desplazamiento de especies comerciales.	Desplazamiento de especies hacia los polos (Perry et al., 2010b); migración de plumuda del Pacífico colombiano hacia el norte, durante el evento El Niño 1997 – 1998 (Zapata, 2002).
	Reducción de poblaciones de organismos comerciales.	Estudios sobre impacto socioeconómico del cambio global en ecosistemas marinos (Gilbert y Janssen, 1998; Remoundou et al, 2009; Madin et al., 2012); impacto socioeconómico de la acidificación del océano (Cooley et al., 2009); reducción de especies comerciales en Colombia (Díaz et al., 2000; Zapata, 2002; INVEMAR, 2011).
	Afectación de la seguridad alimentaria.	Impacto socioeconómico del cambio global en ecosistemas marinos (Perry et al., 2010b; Madin et al., 2012; Tuan Vo et al., 2012); impacto socioeconómico de la acidificación del océano (Rodrigues et al., 2013).
	Afectación de la generación de empleo.	Impacto socioeconómico del cambio global en ecosistemas marinos (Moberg y Folke, 1999; Perry et al., 2010b; Madin et al., 2012; Tuan Vo et al., 2012).
Turismo	Problemas de salud en los turistas.	Impacto socioeconómico de la acidificación del océano (Rodrigues et al., 2013).
	Disminución del buceo ecológico y recreacional.	Impacto socioeconómico del cambio global en los ecosistemas marinos (Forsius et al., 2013; Ruckelshaus et al., 2013); impacto socioeconómico de la acidificación del océano (Rodrigues et al., 2013).
	Efectos económicos en actividades asociadas.	Impacto socioeconómico de la acidificación del océano en ecosistemas marinos (Cooley et al., 2009; Rodrigues et al., 2013).

8. Conclusiones

Según el análisis de las series de datos de TSM y de pH recolectados por INVEMAR en diferentes sectores de la zona costera del Caribe y del Pacífico colombiano, se establece que:

- Hay una tendencia de largo plazo al incremento de la temperatura media del mar, que en el Caribe es del orden de $0,23^{\circ}\text{C}/\text{decenio}$ y en el Pacífico de $0,18^{\circ}\text{C}/\text{decenio}$, lo que corrobora la expresión del calentamiento del océano en estos sectores.
- Hay una tendencia en el largo plazo a la disminución del pH en los sectores marino-costeros analizados del Caribe y del Pacífico, la cual se estimó en $-0,071$ unidades/decenio y $-0,090$ unidades/decenio, respectivamente, lo que evidencia un ritmo de acidificación ligeramente mayor que el promedio mundial.

Se identificó una disminución de pH de $0,07$ unidades/decenio para el Caribe y de $0,09$ unidades/decenio para el Pacífico y este proceso está ocurriendo en el territorio marítimo colombiano; no obstante, dado que hay estaciones en ambientes estuarinos, dicha acidificación no se podría atribuir completamente al proceso global, ya que puede ser inducido por procesos que se están desarrollando en la costa y en el continente.

En lo que se refiere a las condiciones marinas en los sectores de estudio durante el siglo XXI, se encontró que:

- La TSM hacia finales del siglo tendría un aumento de hasta 2°C en relación con la observada a comienzos de siglo en los sectores analizados del Caribe y del Pacífico.

- El pH hacia finales del siglo XXI, con el escenario más drástico de los analizados en este trabajo, el A2, habría disminuido hasta en 0,5 sus valores.

El calentamiento y la acidificación del océano pueden ocasionar impactos tanto en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos y costeros (especialmente los arrecifes coralinos, las praderas de pastos marinos y los manglares), como en los organismos y comunidades marinas que los componen, en diferentes regiones del mar Caribe y el océano Pacífico colombianos.

A través del efecto sobre los bienes y servicios de los ecosistemas marinos y costeros de la región, el calentamiento y la acidificación del océano, traerá impactos económicos y sociales que se expresarían en las pesquerías, la comercialización de recursos marinos, y el turismo, lo que a su vez incidiría negativamente en el sustento económico, la seguridad alimentaria, la generación de empleo y la identidad cultural de los habitantes de las regiones costeras colombianas.

Bibliografía

Aguilera, J. y F. A. Castillo. 1988. Las condiciones oceanográficas del Pacífico colombiano durante Marzo-Abril/88 – Crucero ERFEN IX. Memorias, VI Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Comisión Colombiana de Oceanografía - Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, D. C (Colombia). pp. 512-525.

Ali, H. N. and E. A. Atekwana. 2009. Effect of progressive acidification on stable carbon isotopes inorganic carbon in surface waters. *Chemical geology*. 260: 102-111.

Alongi, D. M. 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29 (3): 331-349.

Alongi, D. M. 2008. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76 (1): 1-13.

Alter, S. E., M. P. Simmonds and J. R. Brandon. 2010. Forecasting the consequences of climate-driven shifts in human behavior on cetaceans. *Marine Policy*, 34 (5): 943-954.

Alvarado, E. M., F. Duque, L. Flórez y R. Ramírez. 1986. Evaluación cualitativa de los arrecifes coralinos de Islas del rosario (Cartagena-Colombia). *Boletín Ecotrópica: Ecosistemas Tropicales*, 15: 1 – 30.

Alvarez-León, R. 2009. Ecosistemas costeros de la costa Caribe colombiana: Biodiversidad y caracterización ambiental. *Revista Biociencias, Unitau*, 15 (2): 115-132.

Anderson, L.G., T. Tanhua, G. Björk, S. Hjalmarsson, E. P. Jones, S. Jutterström, B. Rudels, J. H. Swift and I. Wahlström. 2010. Arctic ocean shelf – basin interaction: an active

continental shelf CO₂ pump and its impact on the degree of calcium carbonate solubility. *Deep-Sea Research I*, 57: 869-879.

Anlauf, H., L. D'Croz and A. O'Dea. 2011. A corrosive concoction: The combined effects of ocean warming and acidification on the early growth of a stony coral are multiplicative. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 397: 13-20.

Anthony, K. R. M., D. I. Kline, G. Díaz-Pulido, S. Dove and O. Hoegh-Guldberg. 2008. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105 (45): 17442-17446.

Arnason, R. 2012. Global warming: New challenges for the common fisheries policy? *Ocean and Coastal Management*, 70: 4-9.

Atkinson, M. J. and P. Cuet. 2008. Possible effects of ocean acidification on coral reef biogeochemistry: topics for research. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 249-256.

Baker, A. C., P. W. Glynn and B. Riegl. 2008. Climate change and coral reef bleaching: AN ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80 (4): 435-471.

Balch, W. M. and V. J. Fabry. 2008. Ocean acidification documenting its impact on calcifying phytoplankton at basin scales. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 239-247.

Balch, W. M. and P. E. Utgoff. 2009. Potential interactions among ocean acidification, coccolithophores, and the optical properties of seawater. *Oceanography* 22 (4): 146–159.

Barange. M., W. W. L. Cheung, G. Merino and R. I. Perry. 2010. Modelling the potential impacts of climate change and human activities on the sustainability of marine resources. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2: 326-333.

Barbier, E. B. 2012. A spatial model of coastal ecosystem services. *Ecological Economics*, 78: 70-79.

Barreto, M. B. 2008. Diagnostics about the state of mangroves in Venezuela: case studies from The National Park Morrocoy and Wildlife Refuge Cuare. In: *Mangroves and Halophytes: Restoration and utilization*. pp. 51-64.

Beaugrand, G. 2009. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56 (8-10): 656-673.

Bensoussan, N., J. C. Romano, J. G. Harmelin and J. Garrabou. 2010. High resolution characterization of Northwest Mediterranean coastal waters thermal regimes: To better understand responses of benthic communities to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87: 431-441.

Bermúdez, V. F. y G. A. Herrera. 1989. *Compilación bibliográfica sobre biología marina en el Pacífico y Atlántico colombiano*. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Cartagena de Indias, Colombia. 158 p.

Bindoff, N. L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. D. Talley and a. Unnikrishnan. 2007. Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. J. Miller (eds.)). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. pp. 385-432.

Blackford, J. C. and F. J. Gilbert. 2007. pH variability and CO₂ induced acidification in the North Sea. *Journal of Marine Systems*, 64: 229-241.

Blackford, J. C. 2010. Predicting the impacts of ocean acidification: Challenges from an ecosystem perspective. *Journal of Marine Systems*, 81: 12-18.

Brander, K. 2010. Impacts of climate change on fisheries. *Journal of Marine Systems*, 79 (3-4): 389-402.

Brewer, P. G. and K. Hester. 2009. Ocean acidification and the increasing transparency of the ocean to low-frequency sound. *Oceanography*, 22(4): 86-93.

Brierley, A. S. and M. J. Kingsford. 2009. Impacts of climate change on marine organisms and ecosystems. *Current Biology*, 19: R602-R614.

Buck, E. H. and P. Folger. 2010. Ocean acidification. Congressional Research Service. United States of America. 12 p.

Byrne, R. H., S. Mecking, R. A. Feely and X. W. Liu. 2010a. Direct observations of basin-wide acidification of the North Pacific Ocean. *Geophysical Research Letters*, 37, L02601.

Byrne, M., N. Soars, P. Selvakumaraswamy, S. A. Dworjanyn and A. R. Davis. 2010b. Sea urchin fertilization in a warm, acidified and high pCO₂ ocean across a range of sperm densities. *Marine Environmental Research*, 69: 234-239.

Byrne, M., P. Selvakumaraswamy, M. A. Ho, E. Woolsey and H. D. Nguyen. 2011. Sea urchin development in a global change hotspot, potential for southerly migration of thermotolerant propagules. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 58 (5): 712-719.

Cabrera, E. E. y M. C. Donoso. 1992. Estudio de las características oceanográficas del Caribe Colombiano, Región III, Zona 1, PDCTM. En: Estudio de las condiciones

oceanográficas del Caribe Colombiano Región III - Zonas 1 y 2 - Fase I. Armada Nacional. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Cartagena de Indias, Colombia. 76 p.

Caldeira, K. and M. E. Wickett, 2003. Anthropogenic carbon and ocean pH. *Nature*, 425: 365-365.

Campbell, S. J., L. J. MacKenzie and S. P. Kerville. 2006. Photosynthesis responses of seven tropical seagrasses to elevated seawater temperature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 330: 455-468.

Carere, M., R. Miniero and M. R. Cicero. 2011. Potential effects of Climate change on the chemical quality of aquatic biota. *Trends in Analytical Chemistry*, 30 (8): 1214-1221.

Carlson, P. R. Jr., L. A. Yarbrow, K. Madley, H. Arnold, M. Merello, L. Vanderbloemen, G. McRae and J. Durako. 2003. Effect of El Niño on demographic morphological, and chemical parameters in turtle-grass (*Thalassia testudinum*): an expected test of indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 81: 393-408.

Carmack, E. and F. McLaughlin. 2011. Towards recognition of physical and geochemical change in Subarctic and Arctic Seas. *Progress in Oceanography*, 90: 90-104.

Castillo, F. A. y Z. Vizcaíno. 1993. Observación del fitoplancton del Pacífico colombiano durante 1991-1992 en condiciones El Niño. *Bull. Inst. fr. études andines*. 22 (1): 179-190.

Centro Control Contaminación del Pacífico – CCCP. 2002. Compilación oceanográfica de la Cuenca Pacífica colombiana. Imágenes de la Naturaleza. Tumaco, Colombia. 109 p.

Chinellato, A., M. Munari, V. Matozzo, M. Bressan and M. G. Marin. 2010. First attempts in evaluating acidification effects on physiological responses in *Mytilus galloprovincialis*. *Abstracts / Comparative Biochemistry and Physiology*. Part A. 157. S13.

Christensen, A. B., H. D. Nguyen and M. Byrne. 2011. Thermotolerance and the effects of hypercapnia on the metabolic rate of the ophiuroid *Ophionereis schayeri*: interferences for survivorship in a changing ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 403: 31-38.

Clark, B. M. 2006. Climate change: A looming challenge for fisheries management un southern Africa. *Marine Policy*, 30 (1): 84-95.

Comeaux, R. S., M. A. Allison and T. S. Bianchi. 2012. Mangrove expansion in the Gulf of Mexico with climate change: Implications for wetland health and resistance to rising sea levels. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96: 81-95.

Constanza, R., F. Andrade, P. Antunes, M. van den Belt, D. Boesch, D. Boersma, F. Catarino, S. Hanna, K. Limburg, B. Low, M. Molitor, J. Gil-Pereira, S. Rayner, R. Santos, J. Wilson and M. Young. 1999. Ecological economics and sustainable governance of the oceans. *Ecological Economics*, 31: 171-187.

Cooley, S. R., H. L. Kite-Powell and S. C. Doney. 2009. Ocean acidification's potential to alter global marine ecosystem services. *Oceanography* 1. 22(4): 172-181.

Corporación Colombiana Internacional – CCI. 2006. Pesca y Acuicultura Colombia 2006. Bogotá, D. C., Colombia. 138 p.

Corredor, J. E. 1981. Apuntes sobre la circulación costera en el Caribe noroccidental colombiano. Boletín científico Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Cartagena de Indias, Colombia. 3: 3-8.

Coyle, K. O., B. Konar, A. Blanchard, R. C. Highsmith, J. Carroll, M. Carroll, S. G. Denisenko and B. I. Sirenko. 2007. Potential effects of temperature on the benthic infaunal community on the southeastern Bering Sea shelf: Possible impact of climate change. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54 (23-26): 2885-2905.

Crabbe, M. J. C. 2007. Global warming and coral reefs: Modelling the effects of temperature on *Acropora palmata* colony growth. *Computational Biology and Chemistry*, 31: 294-297.

Crabbe, M. J. C. 2008. Climate change, global warming and coral reefs: Modelling the effects of temperature. *Computational Biology and Chemistry*, 32: 311-314.

Crabbe, M. J. C. 2009. Modelling of geoengineering options in response to climate change and global warming: Implications for coral reefs. *Computational Biology and Chemistry*, 33: 415-420.

Crim, R. N., J. M. Sunday and C.D.G. Harley. 2011. Elevated seawater CO₂ concentrations impair larval development and reduce larval survival in endangered northern abalone (*Haliotis kamtschatkana*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400: 272-277.

Cury, P. M., Y. J. Shin, B. Planque, J. M. Durant, J. M. Fromentin, S. Kramer-Schadt, N. C. Stenseth, M. Travers and V. Grimm. 2008. Ecosystem oceanography for global change in fisheries. *Trends in Ecology & Evolution*, 23 (6): 338-346.

Dashfield, S. L., P. J. Somerfield, S. Widdicombre, M. C. Austen and M. Nimmo. 2008. Impacts of ocean acidification and burrowing urchins on within-sediment pH profiles and subtidal nematode communities. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 365: 46-52.

Departamento Nacional de Planeación - DNP. 2007. Visión Colombia II Centenario 2019: Aprovechar el territorio marino-costero en forma eficiente y sostenible. Excelsior impresores. Bogotá, D. C., Colombia. 100 p.

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-Angel, F. A. Zapata y S.

Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. INVEMAR. Serie de Publicaciones Especiales No. 5. Santa Marta, Colombia. 176 p.

Díaz, J. M., L. M. Barrios y D. I. Gómez-López (Eds). 2003. Las praderas de pastos marinos en Colombia: Estructura y distribución de un ecosistema estratégico. INVEMAR. Serie de Publicaciones Especiales No. 10. Santa Marta, Colombia. 160 p.

Díaz, J. M. and A. Acero. 2003. Marine biodiversity in Colombia: achievements, status of knowledge, and challenges. *Gayana*, 67 (2): 261-274.

Díaz, J. M., C. A. Vieira y G. J. Melo (eds). 2011. Diagnóstico de las principales pesquerías del Pacífico colombiano. Fundación Marviva – Colombia. Bogotá, D. C. 242 p.

Díez, I., N. Muguerza, A. Santolaria, U. Ganzedo and J. M. Gorostiaga. 2012. Seaweed assemblage changes in the eastern Cantabrian Sea and their potential relationship to climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 99: 108-120.

Dmitrenko, I. A., I. V. Polyakov, S. A. Kirillov, L. A. Timokhov, I. E. Frolov, V. T. Sokolov, H. L. Simmons, V. V. Ivanov and D. Walsh. 2008. Toward a warmer Arctic Ocean: spreading of the early 21st century Atlantic Water warm anomaly along the Eurasian Basin margins. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 113, C05023.

Doney, S. C. 2006. The dangers of ocean acidification. *Scientific American*, March, pp. 58-65.

Doney, S. C., W. M. Balch, V. J. Fabry and R. A. Feely. 2009. Ocean acidification: a critical emerging problem for the ocean sciences. *Oceanography* 22 (4):16-25.

Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely and J. A. Kelypas. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Review of Marine Science*, 1: 169-192.

Donoso, M. C. 1990. Circulación de las aguas en el Mar Caribe. Memorias VII Seminario de Ciencias y Tecnologías del Mar. Comisión Colombiana de Oceanografía. Cali, Colombia. pp. 345-356.

Dore, J. E., R. Lukas, D. W. Sadler, M. J. Church and D. M. Karl. 2009. Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 106: 12235-12240.

Drexler, J. D. and K. C. Ewel. 2001. Effect of the 1997 – 1998 ENSO-related drought on hydrology and salinity in a Micronesian wetland complex. *Estuaries*, 24 (3): 347-356.

Duarte, C. M. 2010. Marine biodiversity and ecosystem services: an elusive link. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 250: 117-131.

Dulvy, N. K., S. I. Rogers, S. Jennings, V. Stelzenmüller, S. R. Dye and H. R. Skjoldal. 2008. Climate change and deepening of the North Sea fish assemblage: a biotic indicator of warming seas. *Journal of Applied Ecology*, 45: 1029-1039.

Dupont, S., J. Havenhand, W. Thorndyke, L. Peck and M. Thorndyke. 2008. Near-future level of CO₂-driven ocean acidification radically affects larval survival and development in the brittlestar *Ophiothrix fragilis*. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 285-294.

Dupont, S., N. Dorey and M. Thorndyke. 2010. What meta-analysis can tell us about vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89: 182-185.

Durrieu de Madron, X., C. Guieu, R. Sempéré, P. Conan, D. Cossa, F. D'Ortenzio, C. Estournel, F. Gazeau, C. Rabouille, L. Stemmann, S. Bonnet, F. Diaz, P. Koubbi, O. Radakovitch, M. Babin, M. Baklouti, C. Bancon-Montigny, S. Belviso, N. Bensoussan, B. Bonsang, I. Bouloubassi, C. Brunet, J. F. Cadiou, F. Carlotti, M. Chami, S. Charmasson, B. Charrière, J. Dachs, D. Doxaran, J. C. Dutay, F. Elbaz-Poulichet, M. Eléaume, F. Eyrolles, C. Fernandez, S. Fowler, P. Francour, J. C. Gaertner, R. Galzin, S. Gasparini, J.

F. Ghiglione, J. L. Gonzalez, C. Goyet, L. Guidi, K. Guizien, L. E. Heimbürger, S. H. M. Jacquet, W. H. Jeffrey, F. Joux, P. Le Hir, K. Leblanc, D. Lefèvre, R. Lemé, M. D. Loye-Pilot, M. Mallet, L. Méjanelle, F. Melin, C. Mellon, B. Mérigot, P. L. Merle, C. Migon, W. L. Miller, L. Mortier, B. Mostajir, L. Mousseau, T. Moutin, J. Para, T. Perez, A. Petrenko, J. C. Poggiale, L. Prieur, M. Pujo-Pay, Pulido-Villena, P. Raimbault, A. P. Rees, C. Ridame, J. F. Rontani, D. Ruiz-Pino, M. A. Sicre, V. Taillandier, C. Tamburini, T. Tanaka, I. Taupier-Letage, M. Tedetti, P. Testor, H. Thébault, B. Thouvenin, F. Touratier, J. Tronczyński, C. Ulses, F. Van Wambeke, V. Vantrepotte, S. Vaz and R. Verney. 2011. Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean by 'The MERMEX Group'. *Progress in Oceanography*, 91 (2): 97-166.

Echavarría-Heras, H. A., E. Solana-Arellano and E. Franco-Vizcaíno. 2006 The role of increased sea surface temperature on eelgrass leaf dynamics: onset on El Niño as a proxy for global climate change in San Quintín Bay, Baja California. *Bulletin Southern California Academy of Sciences*, 105 (3): 113-127.

Edwards, A. J., S. Clark, H. Zahir, A. Rajasuriya, A. Naseer and J. Rubens. 2001. Coral Bleaching and Mortality on Artificial and Natural Reefs in Maldives in 1998, Sea Surface Temperature Anomalies and Initial Recovery. *Marine Pollution Bulletin*, 42 (1): 7-15.

Edwards, M. 2009. Sea life (pelagic and planktonic ecosystems) as an indicator of climate and global change. In: *Climate and global change: observed impacts on Planet Earth*, Letcher T (ed). pp 233-251.

Egilsdottir, H., J. I. Spicer and S. D. Rundle. 2009. The effect of CO₂ acidified sea water and reduced salinity on aspects of the embryonic development of the amphipod *Echinogammarus marinus* (Leach). *Marine Pollution Bulletin*. 58: 1187-1191.

Eissa, A. E. and M. M. Zaki. 2011. The impact of global climatic changes on the aquatic environment. *Procedia Environmental Sciences*, 4: 251-259.

EXPOLISBOA, 1998: Colombia: Patria de tres mares. Diego Samper ediciones. Santa Fe de Bogotá, D. C. 240 p.

Fabry, V. J., B. A. Seibel, R. A. Feely, and J. Orr. 2008. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystems processes. *Journal of Marine Sciences*, 65: 414-432.

Fabry, V. J., J. B. McClintock, J. T. Mathis and J. M. Grebmeier. 2009. Ocean acidification at high latitudes: The bellwether. *Oceanography* 22 (4): 160–171.

Fajardo, G. E. 1978. Surgencia costera en las proximidades de la península colombiana de la Guajira. Boletín científico Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH. Cartagena de Indias, Colombia. 2: 7-19.

Feely, R. A., S. C. Doney and S. R. Cooley. 2009. Ocean acidification: present conditions and future changes in a high-CO₂ world. *Oceanography*, 22 (4): 36-47.

Feely, R. A., S. R. Alin, J. Newton. C. L. Sabine, M. Warner, A. Devol, C. Krembs and C. Maloy. 2010. The combined effects of ocean acidification, mixing and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88: 442-449.

Fiedler, P. C. and L. D. Talley. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific . A review. *Progress in Oceanography*, 69: 143-180.

Findlay, H. S., M. A. Kendall. J. I. Spicer and S. Widdicombe. 2010. Relative influences of ocean acidification and temperature on intertidal barnacle post-larvae at the northern edge of their geographic distribution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86: 675-682.

Firth, L. B. and S. J. Hawkins. 2011. Introductory comments – Global change in marine ecosystems: Patterns, processes and interactions with regional and local scale impacts. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 1-6.

Fischlin, A., G. F. Midgley, J. T. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M. D. A. Rounsevell, O. P. Dube, J. Tarazona and A. A. Velickho. 2007. Ecosystems, their properties, goods, and services. In: *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden and C. E. Hanson (eds.)). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. pp. 211-272.

Fitzer, S. C., G. S. Caldwell, A. J. Close, A. S. Clare, R. C. Upstill-Goddard and M. G. Bentley. 2012. Ocean acidification induces multi-generational decline in copepod naupliar production with possible conflict for reproductive resource allocation. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 418-419: 30-36.

Forsius, M. S. Anttila, L. Arvola, I. Bergström, H. Hakola, H. I. Heikkinen, J. Helenius, M. Hyvärinen, K. Jylhä, J. Karjalainen, T. Keskinen, K. Laine, E. Nikinmaa, P. Peltonen-Sainio, K. Rankinen, M. Reinikainen, H. Setälä and J. Vuorenmaa. 2013. Impacts and adaptation options of climate change on ecosystem services in Finland: a model based study. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5: 26-40.

Freitas, V., J. Campos, M. Fonds and H. W. Van der Veer. 2007. Potential impact of temperature change on epibenthic predator-bivalve prey interactions in temperate estuaries. *Journal of Thermal Biology*, 32 (6): 328-340.

Fuentes, M. M. P. B. and J.E. Cinner. 2008. Using expert opinion to prioritize impacts of climate change on sea turtles' nesting grounds. *Journal of Environmental Management*, 91 (12): 2511-2518.

Fukasawa, M., H. Freeland, R. Perkin, T. Watanabe, J. Uchida and A. Nishina. 2004. Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*. 427 (6977): 825 – 827.

Galaz, V., B. Crona, H. Österblom, P. Olsson and C. Folke. 2012. Polycentric systems and interacting planetary boundaries — Emerging governance of climate change–ocean acidification–marine biodiversity. *Ecological Economics*, 81: 21-32.

Galbraith, P. S., P. Larouche, J. Chassé and B. Petrie. 2012. Sea-surface temperature in relation to air temperature in the Gulf of St. Lawrence: Interdecadal variability and long term trends. *Deep Sea Research II*, 77-80: 10-20.

Gambiani, D. D., P. Mayol, S. J. Isaac and M. P. Simmonds. 2009. Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89 (1): 179-201.

García-Hansen. 2001. Efectos de los eventos El Niño y La Niña sobre la comunidad de fitoplancton al interior de la Ensenada de Tumaco 1997 – 2000. *Boletín Científico CCCP*, 8: 15-21.

García, R., M. Sánchez-Camacho, C. M. Duarte and N. Marbà. 2012. Warming enhances sulphide stress of Mediterranean seagrass (*Posidonia oceanica*). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 113: 240-247.

Garzón-Ferreira, J., J. Cortés, A. Croquer, H. Guzmán, Z. Leao y A. Rodríguez-Ramírez. 2002. Status of coral reefs in Southern Tropical America in 2000-2002: Brazil, Colombia, Costa Rica, Panamá and Venezuela. In: Status of coral reef of the world. Australian Institute of Marine Science. pp. 343-360.

Gibbs, S. J., H. M. Stoll, P. R. Bown and T. J. Bralower. 2010. Ocean acidification and surface water carbonate production across the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Earth and Planetary Science Letters*, 295: 583-592.

Gilbert, A. J. and R. Janssen. 1998. Use of environmental functions to communicate the values of a mangrove ecosystem under different management regimes. *Ecological Economics*, 25: 323-346.

Gilman, E. L., J. E. Ellison, N. C. Duke and C. Field. 2008. Threats to mangroves from climate change and adaptation options: A review. *Aquatic Botany*, 89 (2): 237-250.

Gledhill, D. K., R. Wanninkhof and C.M. Eakin. 2009. Observing ocean acidification from space. *Oceanography* 22 (4): 48–59.

Gomes Soares, M. L., G. C. Duque Estrada, V. Fernandez y M. M. Pereira Tognella. 2012. Southern limit of the Western South Atlantic mangroves: Assessment of the potential effects of global warming from a biogeographical perspective. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 101: 44-53.

Gonzalez-Dávila, M., J. M. Santana-Casiano, M. J. Rueda, and O. Llinas. 2010. The water column distribution of carbonate system variables at the ESTOC site from 1995 to 2004. *Biogeosciences*, 7: 3067-3081.

Gouretski, V. and K. P. Koltermann. 2007. How much is the ocean really warming? *Geophysical Research Letters*, 34, L01610.

Grafton, R. Q. 2010. Adaptation to climate change in marine capture fisheries. *Marine Policy*, 34 (3): 606-615.

Guinotte, J. M. and V. J. Fabry. 2008. Ocean acidification and its potential effects on marine ecosystems. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1134: 320-342.

Gutowska, M. A., H. O. Pörtner and F. Melzner. 2008. Growth and calcification in the cephalopod *Sepia officinalis* under elevated seawater pCO₂. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 303-309.

Hauri, C., N. Gruber, G. K. Plattner, S. Alin, R. A. Feely, B. Hales and P. A. Wheeler. 2009. Ocean acidification in the California Current System. *Oceanography* 22 (4): 60–71.

Hay, D. E., K. A. Rose, J. Schweigert and B. A. Megrey. 2008. Geographic variation in North Pacific herring populations: Pan-Pacific comparisons and implications for climate change impacts. *Progress In Oceanography*, 77 (2-3): 233-240.

Hays, G. C., A. J. Richardson and C. Robinson. 2005. Climate change and marine phytoplankton. *Trends in Ecology & Evolution*, 20 (6): 337-344.

Helmuth, B., L. Yamane, S. Lalwani, A. Matzelle, A. Tockstein and N. Gao. 2011. Hidden signals of climate change in intertidal ecosystems: What (not) to expect when you are expecting. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 191-199.

Henderson, P. A., R. M. H. Seaby and J. R. Somes. 2011. Community level response to climate change: The long-term study of the fish and crustacean community of the Bristol Channel. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 78-89.

Hendriks, I. E. and C. M. Duarte. 2010. Ocean acidification: Separating evidence from judgment – A reply to Dupont et al. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89: 186-190.

Hendriks, I. E., C. M. Duarte and M. Álvarez. 2010. Vulnerability of marine biodiversity to ocean acidification: A meta-analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86: 157-164.

Hetzinger, S., M. Pfeiffer, W. C. Dullo, D. Garbe-Schönberg and J. Halfar. 2010. Rapid 20th century warming in the Caribbean and impact of remote forcing on climate in the northern tropical Atlantic as recorded in a Guadeloupe coral. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 296(1–2): 111-124.

Hoegh-Guldberg, O. 2005. Climate change and marine ecosystems. En: Climate change and biodiversity. Lovejoy, T. and L. Hannah, editors. Yale University. United States of America. pp. 256-273.

Hofman, G. E., M. J. O'Donnell and A. E. Todgham. 2008. Using functional genomics to explore the effects of ocean acidification on calcifying marine organisms. In: Effects of

ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 373: 219-225.

Hönisch, B. and N. G. Hemming. 2005. Surface ocean pH response to variations in pCO₂ through two full glacial cycles. *Earth and Planetary Science Letters*, 236: 305-314.

Hönisch, B., A. Ridgwell, D. N. Schmidt, E. Thomas, S. J. Gibbs, A. Sluijs, R. Zeebe, L. Kump, R. C. Martindale, S. E. Greene, W. Kiessling, J. Ries, J. C. Zachos, D. L. Royer, S. Barker, T. M. Marchitto Jr., R. Moyer, C. Pelejero, P. Ziveri, G. L. Foster and B. Williams. 2012. The geological record of ocean acidification. *Science*, 335: 1058 – 1063.

IDEAM, IGAC, IAvH, INVEMAR, I. SINCHI e IIAP. 2007. Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico Jhon von Neumann, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives De Andrés e Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. Bogotá, D. C, 276 p. + 37 hojas cartográficas.

Idso, C. and E. H. Ferguson. 2009. Effects of ocean acidification on marine ecosystems. Science and Public Policy Institute. USA. 43 p.

Iguchi, A., S. Ozaki, T. Nakamura, M. Inoue, Y. Tanaka, A. Suzuki, H. Kawahata and K. Sakai. 2012. Effects of acidified seawater on coral calcification and symbiotic algae on the massive coral *Porites australiensis*. *Marine Environmental Research*, 73: 32-36.

Inoue, M., K. Shinmen, H. Kawahata, T. Nakamura, Y. Tanaka, A. Kato, C. Shinzato, A. Iguchi, H. Kan, A. Suzuki and K. Sakai. 2012. Estimate of calcification responses to thermal and freshening stress base on culture experiments with symbiotic and aposymbiotic primary polyps of a coral, *Acropora digitifera*. *Global and Planetary Change*, 92-93: 1-7.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 1998a. El Medio ambiente en Colombia. Primera edición. OP Gráficas S. A. Bogotá, D. C., Colombia. 495 p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 1998b. Pronóstico de pleamares y bajamares en la costa Caribe colombiana 1999. Bogotá, D. C., Colombia. 105 p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. 1998c. Pronóstico de pleamares y bajamares en la costa Pacífica colombiana 1999. Bogotá, D. C., Colombia. 81 p.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. 2005. Actualización y ajuste del diagnóstico y zonificación de los manglares de la zona costera del departamento del Atlántico, Caribe colombiano. Informe final. Editado por: A. López y P. C. Sierra-Correa. INVEMAR – CRA. Santa Marta, Colombia. 191 p.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. 2009. Lineamientos para un plan de manejo de arrecifes coralinos del Área Marina Protegida Corales del Rosario, San Bernardo e Isla Fuerte en el contexto de cambio climático. Informe técnico final. Proyecto INAP: Diseño e implementación de un programa de adaptación al cambio climático en las áreas insulares del Caribe continental colombiano. Santa Marta, Colombia. 91 p.

Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. 2011. Análisis de las condiciones ambientales históricas del Área Marina Protegida Corales del Rosario, San Bernardo e Isla fuerte y sus implicaciones en el mantenimiento de los arrecifes coralinos. Informe técnico final. Proyecto INAP: Diseño e implementación de un programa de adaptación al cambio climático en las áreas insulares del Caribe continental colombiano. Santa Marta, Colombia. 54 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. Edited by N. Nakicenovic and R. Swart. /. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NJ, USA.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2002. Climate change and biodiversity. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza. 87 p.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC. 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R. K. and A. Reisinger (eds.)). IPCC. Geneva, Switzerland. 104 p.

International Geosphere-Biosphere Programme. 2003. Marine ecosystems and global change. IGBP Science No. 5. 36 p.

Ishii, M., N. Kosugi, D. Sasano, S. Saito, T. Midorikawa and H. Y. Inoue. 2011. Ocean acidification off the south coast of Japan: a result from time series observations of CO₂ parameters from 1994 to 2008. *Journal of Geophysical Research – Oceans*, 116, C06022.

Ishimatsu, A., M. Hayashi and T. Kikkawa. 2008. Fishes in high-CO₂, acidified oceans. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 295-302.

IUCN/UNEP, 1988: Coral reefs of the world: Atlantic and Eastern Pacific. Volume 1. UNEP Regional Seas Directories and Bibliographies. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK/UNEP, Nairobi, Kenia. 373 p.

Jackson D. L. and Wick, G. A. 2010. Near-surface air temperature retrieval derived from AMSU-A and sea surface temperature observations. *J. Atmos. Oceanic Techno*, 27: 1769–1776.

Jarvie, H. P., T. D. Jickells, R. A. Skeffington and P. J. A. Withers. 2012. Climate change and coupling of macronutrient cycles along the atmospheric, terrestrial, freshwater and estuarine continuum. *Science of the Total Environment*, 434: 252-258.

Jennerjahn, T. C. 2012. Biogeochemical response of tropical coastal systems to present and past environmental change. *Earth Science Reviews*, 114: 19-41.

Jennings, S. and K. Brander. 2010. Predicting the effects of climate change on marine communities and the consequences for fisheries. *Journal of Marine Systems*, 79 (3-4): 418-426.

Jiménez, C., J. Cortés, A. León and E. Ruiz. 2001. Coral bleaching and mortality associated with the 1997-98 El Niño in an upwelling environment in the Eastern Pacific (Gulf of Papagayo, Costa Rica). *Bulletin of Marine Science*, 69 (1): 151 – 169.

Johnson, M. R., S. L. Williams. C. H. Lieberman and a. Solbak. 2003. Changes in the abundance of the seagrasses *Zostera marina* L. (eelgrass) and *Ruppia maritima* L. (widgeongrass) in San Diego, California, following an El Niño event. *Estuaries*, 26 (1): 106-115.

Johnson, G. C. and S. C. Doney. 2006. Recent western South Atlantic bottom water warming. *Geophysical Research Letters*, 33, L14614.

Johnson, C. R., S. C. Banks, N. S. Barrett, F. Cazassus, P. K. Dunstan, G. J. Edgar, S. D. Frusher, C. Gardner, M. Haddon, F. Helidoniotis, K. L. Hill, N. J. Holbrook, G. W. Hosie, P. R. Last, S. D. Ling, J. Melbourne-Thomas, K. Miller, G. T. Pecl, A. J. Richardson, K. R. Ridgway, S. R. Rintoul, D. A. Ritz, D. J. Ross, J. C. Sanderson, S. A. Shepherd, A. Slotwinski, K. M. Swadling and N. Taw. 2011. Climate change cascades: Shifts in oceanography, species' ranges and subtidal marines community dynamics in eastern Tasmania. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 17-32.

Jones, N. and J. R. A. Clark. 2013. Social capital and climate change mitigation in coastal areas: a review of current debates and identification of future research directions. *Ocean & Coastal Management*, 80: 12-19.

Kennedy, V. S., R. R. Twilley, J. A. Kleypas, J. M. Cowan Jr. and S. R. Hare. 2002. Coastal and marine ecosystems & global climate change. PEW Center on Global Climate Change. Arlington, Estados Unidos. 64 p.

Kessler, W. S. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69: 181-217.

Khaliwala, S., F. Primeau and T. Hall. 2009. Reconstruction of the history anthropogenic CO₂ concentration in the ocean. *Nature*, 462: 346-U110.

Kim, S. 2010. Fisheries development in northeastern Asia in conjunction with changes in climate and social systems. *Marine Policy*, 34 (4): 803-809.

Kishi, M. J., M. Kaeriyama, H. Ueno and Y. Kamezawa. 2010. The effect of Climate change on the growth of Japanese chum salmon (*Oncorhynchus keta*) using a bioenergetics model coupled with a three-dimensional lower trophic ecosystem model (NEMURO). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 57 (13-14): 1257-1265.

Kleypas, J. A. and K. K. Yates. 2009. Coral reefs and ocean acidification. *Oceanography* 22 (4): 108–117.

Kopke, K. and C. O'Mahony. 2011. Preparedness of key coastal and marine sectors in Ireland to adapt to climate change. *Marine Policy*, 35 (6): 800-809.

Kordas, R. L., C. D. G. Harley and M. I. O'Connor. 2011. Community ecology in a warming world; the influence of temperature on interspecific interactions in marine systems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 400: 218-226.

- Krief, S., E. J. Hendy, M. Fine, R. Yam, A. Meibom, G. L. Foster and A. Shemesh. 2010. Physiological and isotopic responses of scleractinian corals to ocean acidification. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 4988-5001.
- Kroeker, K. J., F. Micheli and M. C. Gambi. 2013. Ocean acidification causes ecosystem shifts via altered competitive interactions. *Nature Climate Change*, 3: 156–159.
- Kump, L. R., T. J. Bralower and A. Ridgwell. 2009. Ocean acidification in deep time. *Oceanography* 22 (4): 94–107.
- Kurihara, H. 2008. Effects of CO₂-driven ocean acidification on the early developmental stages of invertebrates. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 275-284.
- Kurihara, H. and A. Ishimatsu. 2008. Effects of high CO₂ seawater on the copepod (*Acartia tsuensis*) through all life stages and subsequent generations. *Marine Pollution Bulletin*, 56 (6): 1086-1090.
- Kuroyanagi, A., H. Kawahata, A. Suzuki, K. Fujita and T. Irie. 2009. Impacts of ocean acidification on large benthic foraminifers: Results from laboratory experiments. *Marine Micropaleontology*, 73: 190-195.
- Lacoue-Labarthe, T., E. Réveillac, F. Oberhänsli, J. L. Teyssié, R. Jeffree and J. P. Gattuso. 2011. Effects of ocean acidification on trace element accumulation in the early-life stages of squid *Loligo vulgaris*. *Aquatic toxicology*, 105: 166-176.
- Lacoue-Labarthe, T., S. Martin, F. Oberhänsli, J. L. Teyssié, R. Jeffree, J. P. Gattuso and P. Bustamante. 2012. Temperature and pCO₂ effect on the bioaccumulation of radionuclides and trace elements in the eggs of the common cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 413: 45-49.

Lange, G. M. and N. Jiddawi. 2009. Economic value of marine ecosystem services in Zanzibar: implications for marine conservation and sustainable development. *Ocean & Coastal Management*, 52: 521-532.

Lassen, M. K., K. D. Nielsen, K. Richardson, K. Garde and L. Schlüter. 2010. The effects of temperature increases on a temperate phytoplankton community – A mesocosm climate change scenario. 2010. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 383 (1): 79-88.

Laurans, Y., N. Pascal, T. Binet, L. Brander, E. Clua, G. David, D. Rojat and A. Seidl. 2013. Economic valuation of ecosystem services from coral reefs in the South Pacific: taking stock of recent experience. *Journal of Environmental Management*, 116: 135-144.

Le Treut, H. R. Somerville, U. Cubasch, Y. Ding, C. Mauritzen, A. Mokssit, T. Peterson and M. Prather. 2007. Historical overview of climate change. In: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. pp 93-127.

Lejeusne, C., P. Chevaldonné, C. Pergent-Martini, C. F. Boudouresque and T. Pérez. 2010. Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea. *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (4): 250-260.

Lett, C., S. D. Ayata, M. Huret and J. O. Irisson. 2010. Biophysical modelling to investigate the effects of climate change on marine population dispersal and connectivity. *Progress In Oceanography*, 87 (1-4): 106-113.

Levitus, S., J. I. Antonoy, T. P. Buyer and C. Stephens. 2000. Warming of the world. *Science*. 287 (5461): 2225 – 2230.

Levitus, S., J. Antonov and T. Boyer. 2005. Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophysical Research Letters*, 32, L02604.

Lidbury, I., V. Johnson, J. M. Hall-Spencer, C. B. Munn and M. Cunliffe. 2012. Community-level response of coastal microbial biofilms to ocean acidification in a natural carbon dioxide vent ecosystem. *Marine Pollution Bulletin*, 64: 1063-1066.

Lough, J. M. 2008. Coral calcification from skeletal records revisited. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 257-264.

Lough, J. M. and T. F. Cooper. 2011. New insights from coral growth band studies in an era of rapid environmental change. *Earth-Science Reviews*, 108: 170-184.

Lyman, J. M., S. A. Good, V. V. Gouretski, M. Ishii, G. C. Johnson, M. D. Palmer, D. G. Smith and J. K. Willis. 2010. Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, 465: 334-337.

Maar, M. and J. L.S. Hansen. 2011. Increasing temperatures change pelagic trophodynamics and the balance between pelagic and benthic secondary production in a water column model of the Kattegat. 2011. *Journal of Marine Systems*, 85 (1-2): 57-70.

Madeira, D., L. Narciso, H. N. Cabral and C. Vinagre. 2012. Thermal tolerance and potential impacts of climate change on coastal and estuarine organisms. *Journal of Sea Research*, 70: 32-41.

Madin, E. M. P., N. C. Ban, Z. A. Doubleday, T. H. Holmes, G. T. Pecl and F. Smith. 2012. Socio-economic and management implications of range-shifting species in marine systems. *Global Environmental Change*, 22: 137-146.

Malone, T., M. Davidson, P. DiGiacomo, E. Goncalves, T. Knap, J. Muelbert, J. Parslow, N. Sweijid, T. Yanagai and H. Yap. 2010. Climate change, sustainable development and coastal ocean. Information needs. *Procedia Environmental Sciences*, 1: 324-341.

Manzello, D. P., R. Berkelmans and J. C. Hendee. 2007. Coral bleaching indices and thresholds for the Florida Reef Tract, Bahamas, and St. Croix, US Virgin Islands. *Marine Pollution Bulletin*, 54 (12): 1923-1931.

Marriaga, L. 2009. Características generales del Caribe colombiano. En: Caracterización físico-biótica del litoral Caribe colombiano. Tomo I. Dirección General Marítima – Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Ed. DIMAR, Serie Publicaciones Especiales. Cartagena de Indias, Colombia. pp 17-23.

Martínez, M. L., A. Intralawan, G. Vásquez, O. Pérez-Maqueo, P. Sutton and R. Landgrave. 2007. The coasts of our world: ecological, economic and social importance. *Ecological Economics*, 63: 254-272.

Marsh. G. 2005. Seawater pH and anthropogenic carbon dioxide. Argonne National Laboratory. University of Chicago. USA. 15 p.

Mazaris, A. D., A. S. Kallimanis, J. Tzanopoulos, S. P. Sgardelis and J. D. Pantis. 2009. Sea surface temperature variations in core foraging grounds drive nesting trends and phenology of loggerhead turtles in the Mediterranean Sea. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 379 (1-2): 23-27.

McCulloch, M., J. Trotter, P. Montagna, J. Falter, R. Dunbar, A. Freiwald, G. Försterra, M. López-Correa, C. Maier, A. Rüggeberg and M. Taviani. 2012. Resilience of cold-water scleractinian corals to ocean acidification: boron isotopic systematic of pH saturation state up-regulation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 87: 21-34.

McElroy, D. J., H. D. Nguyen and M. Byrne. 2012. Respiratory response of the intertidal seastar *Parvulastra exigua* to contemporary and near-future pulses of warming and hypercapnia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 416–417: 1–7.

McGinty, N., A. M. Power and M. P. Johnson. 2011. Variation among northeast Atlantic regions in the responses of zooplankton to climate change: Not all areas follow the same path. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 120-131.

McLeod, E. and R. V. Salm. 2006. Managing mangroves for resilience to climate change. IUCN. Gland, Switzerland. 64 p.

McNeil, B. I. 2006. Oceanic implications for climate change policy. *Environmental Science & Policy*. 9: 595-606.

Medina, L. 1998. Cambios en la composición y abundancia de la comunidad microalgal del Pacífico colombiano, en relación con el evento El Niño 1997 – 1998. *Boletín Científico CCCP*, 7: 58 – 66.

Merzouk, A. and L. E. Johnson. 2011. Kelp distribution in the northwest Atlantic Ocean under a changing climate. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 90-98.

Metzger, R., F. J. Sartoris, M. Langenbuch and H. O. Pörtner. 2007. Influence of elevated CO₂ concentrations on thermal tolerance of the edible crab *Cancer pagurus*. 2007. *Journal of Thermal Biology*, 32 (3): 144-151.

Midorikawa, T., M. Ishii, S. Saito, D. Sasano, N. Kosugi, T. Motoi, H. Kamiya, A. Nakadate, K. Neomoto and H. Inoue. 2010. Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology*, 62: 649-659.

Mieszkowska, N., M. J. Genner, S. J. Hawkins and D. W. Sims. 2009. Chapter 3. Effects of climate change and commercial fishing on Atlantic cod *Gadus morhua*. *Advances in Marine Biology*, 56: 213-273.

Miles, H., S. Widdicombe, J. I. Picer and J. Hall-Spencer. 2007. Effects of anthropogenic seawater acidification on acid-base balance in the sea urchin *Psammechinus miliaris*. *Marine Pollution Bulletin*, 54: 89-96.

Miller, A. J., A. J. Gabric, J. R. Moisan, F. Chai, D. J. Neilson, D. W. Pierce and E. Di Lorenzo. 2007. Chapter 2. Global change and oceanic primary productivity: Effects of ocean-atmosphere-biological feedbacks. *Elsevier Oceanography Series*, 73: 27-63, 473-477.

Miller, K., A. C. Charles, M. Barange, K. Brander, V. F. Gallucci, M. A. Gasalla, A. Khan, G. Munro, R. Murtugudde, R. E. Ommer and R. I. Perry. 2010. Climate change, uncertainty, and resilient fisheries: Institutional responses through integrative science. *Progress In Oceanography*, 87 (1-4): 338-346.

Miller, M. W., G. A. Piniak and D. E. Williams. 2011. Coral mass bleaching and reef temperatures at Navassa Island, 2006. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91 (1): 42-50.

Millero, F. J., R. Woosley, B. DiTrollo and J. Waters. 2009. Effect of ocean acidification on the speciation of metals in seawater. *Oceanography* 22 (4): 72–85.

Milligan A. J., C. Mioni, F. M. M. Morel. 2009. Response of cell surface pH to pCO₂ and iron limitation in the marine diatom *Thalassiosira weissflogii*. *Marine chemistry*, 114: 31-36.

Moberg, F. and C. Folke. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics*, 29: 215-233

Moloney, C. L., M. A. St John, K. L. Denman, D. M. Karl, F. W. Köster, S. Sundby and R. P. Wilson. 2011. Weaving marine food webs from end to end under global change. *Journal of Marine Systems*, 84 (3-4): 106-116.

Mooney, H., A. Larigauderie, M. Cesario, T. Elmquist, O. Hoegh-Guldberg, S. Lavorel, G. M. Mace, M. Palmer, R. Scholes and T. Yahara. 2009. Biodiversity, climate change and ecosystem services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1: 46-54.

Morelissen, B. and C. D.G. Harley. 2007. The effects of temperature on producers, consumers, and plant-herbivores interactions in an intertidal community. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 348 (1-2): 162-173.

Moulin, L., A. I. Catarino, T. Claessens and P. Dubois. 2011. Effects of seawater acidification on early development of the intertidal sea urchin *Paracentrotus lividus* (Lamarck 1816). *Marine Pollution Bulletin*, 62: 48-54.

Movilla, J. E. Calvo, C. Pelejero, R. Coma, E. Serrano, P. Fernández-Vallejo y M. Ribes. 2012. Calcification reduction and recovery in native and non-native Mediterranean corals in response to ocean acidification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 438: 144-153.

Najjar, R. G., C. R. Pyke, M. B. Adams, D. Breitburg, C. Hershner, M. Kemp, R. Howarth, M. R. Mulholland, M. Paolisso, D. Secor, K. Sellner, D. Wardrop and R. Wood. 2010. Potential climate-change impacts on the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86 (1): 1-20.

Nakano, Y. and Y. W. Watanabe. 2005. Reconstruction of pH in the surface seawater over the North Pacific Basin for all seasons using temperature and chlorophyll-*a*. *Journal of Oceanography*, 61: 673-680.

Neuheimer, A. B., W. C. Gentleman, P. Pepin and E. J .H. Head. 2010. Explaining regional variability in copepod recruitment: implications for a changing climate. *Progress In Oceanography*, 87 (1-4): 94-105.

Nilsson, G. E., S. Östlund-Nilsson and P. L. Munday. 2010. Effects of elevated temperature on coral reef fishes: Loss of hypoxia tolerance and inability to acclimate.

Comparative Biochemistry and Physiology - Part A: Molecular & Integrative Physiology, 156 (4): 389-393.

Norman-López, A., É. Plagányi, T. Skewes, E. Poloczanska, D. Dennis, M. Gibbs and P. Bayliss. 2012. Linking physiological, population and socio-economic assessments of climate change impacts of fisheries. *Fisheries Research*, doi: 10.1016/j.fishres.2012.02.026. Article in press.

Nowicki, J. P., G. M. Miller and P. L. Munday. 2012. Interactive effects of elevated temperature and CO₂ on foraging behavior of juvenile coral reef fish. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 412: 46-51.

Obura, D. O. 2005. Resilience and climate change: lessons from coral reefs and bleaching in the Western Indian Ocean. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63 (3): 353-372.

Olafsson, J., S. R. Olafsdottir, A. Benoit-Cattin, M. Danielsen, T. S. Arnarson, and T. Takahashi. 2009. Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. *Biogeosciences*, 6: 2661-2668.

O'Neil, J. M., T. W. Davis, M. A. Burford and C. J. Gobler. 2012. The rise of harmful cyanobacteria blooms: the potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful algae*, 14: 313-334.

Orr, J., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G. K. Plattner, K. B. Rodgers and C. L. Sabine. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*. 437 (7059): 681 – 686.

Paerl, H. W. and V. J. Paul. 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. *Water Research*, 46: 1349-1363.

- Pabón, J. D. 2012. Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 36 (139): 127-144.
- Pabón-Caicedo, J. D., W. Murillo-López, R. Palomino-Lemus y S. Cordoba-Machado. 2010: Presencia de una oscilación monzónica en el Oeste de América Ecuatorial. *Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*, 29 (1), pp. 133-142.
- Pansch, C., A. Nasrolahi, Y. S. Appelhans and M. Wahl. 2012. Impacts of ocean warming and acidification on the larval development of the barnacle *Amphibalanus improvisus*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 420–421: 48–55.
- Pelejero, C., E. Calvo and O. Hoegh-Guldberg. 2010. Paleo-perspectives on ocean acidification. *Trends in Ecology and Evolution*, 25 (6): 332-344.
- Perry, R. I., M. Barange and R. E. Ommer. 2010a. Global changes in marine systems: A social-ecological approach. *Progress In Oceanography*, 87 (1-4): 331-337.
- Perry, R. I., R. E. Ommer, M. Barange and F. Werrner. 2010b. The challenge of adapting marines social-ecological systems to the additional stress of climate change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2: 356-363.
- Peterson, W. T., J. E. Keister and L. R. Feinberg. 2002. The effects of the 1997-99 El Niño/La Niña events on hydrography and zooplankton off the central Oregon coast. *Progress in Oceanography*, 54: 381-398.
- Philippart, C. J. M., R. Anadón, R. Danovaro, J. W. Dippner, K. F. Drinkwater, S. J. Hawkins, T. Oguz, G. O'Sullivan and P.C. Reid. 2011. Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 52-69.

Pierce, D. W., T. P. Barnett, K. M. AchutaRao, P. J. Glecker, J. M. Gregory and W. M. Washington. 2006. Anthropogenic warming of the ocean: observations and model results. *Journal of Climate*, 19: 1873 – 1900.

Podestá, G. P. and P. W. Glynn. 2001. The 1997-98 El Niño event in Panama and Galápagos: an update of thermal stress indices relative to coral bleaching. *Bulletin of Marine Science*, 69 (1): 43 – 59.

Poloczanska, E. S., C. J. Limpus and G. C. Hays. 2009. Chapter 2. Vulnerability of marine turtles to climate change. *Advances in Marine Biology*, 56: 151-211.

Poloczanska, E. S., S. Smith, L. Fauconnet, J. Healy, I. R. Tibbetts, M. T. Burrows and A. J. Richardson. 2011. Little change in the distribution of rocky faunal communities on the Australian east coast after 50 years of rapid warming. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 145-154.

Pörtner, H. O. 2008. Ecosystem effects of ocean acidification in times of ocean warming: a physiologist's view. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 203-217.

Porzio, L., M. C. Buia and J. M. Hall-Spencer. 2011. Effects of ocean acidification on macroalgal communities. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 278-287.

Privitera, D., M. Noli, C. Falugi and M. Chiantore. 2011. Benthic assemblages and temperature effects on *Paracentrotus lividus* and *Arbacia lixula* larvae and settlement. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 407: 6-11.

Putnam, H. M. and P. J. Edmunds. 2011. The physiological response of reef corals to diel fluctuations in seawater temperature. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 396 (2): 216-223.

- Range, P., M. A. Chícharo, R. Ben-Hamadou, D. Piló, D. Matias, S. Joaquim, A. P. Oliveira y L. Chícharo. 2011. Calcification growth and mortality of juvenile clams *Ruditapes decussatus* under increased pCO₂ and reduced pH: Variable responses to ocean acidification at local scales? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 396: 177-184.
- Remoundou, K., P. Koundouri, A. Kontogianni, P. A. L. D. Nunes and M. Skourtos. 2009. Valuation of natural marine ecosystems: an economic perspective. *Environmental Science & Policy*, 12: 1040-1051.
- Reyes, H. 2001. Effects of the 1997 – 1998 El Niño – Southern Oscillation on coral communities on the Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 69 (1): 251 – 266.
- Riascos, J. M. 2006. Effects of El Niño-Southern oscillation on the population dynamics of the tropical bivalve *Donax dentifer* from Málaga Bay, Colombian Pacific. *Marine Biology*, 148: 1283 – 1293.
- Richmond, C. E., D. S. Wethey and S. A. Woodin. 2007. Climate change and increased environmental variability: Demographic responses in an estuarine harpacticoid copepod. *Ecological Modelling*, 209 (2-4): 189-202.
- Rodrigues, L. C., J. C. J. M. van den Bergh and A. Ghermandi. 2013. Socio-economic impacts of ocean acidification in the Mediterranean Sea. *Marine Policy*, 38: 447-456.
- Rodríguez-Rubio, E. and J. Stuardo. 2002. Variability of photosynthetic pigments in the Colombian Pacific Ocean and its relationship with the wind field using ADEOS-I data. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci)*, 111 (3): 227-236.
- Rost, B., I. Zondervan and D. Wolf-Gladrow. 2008. Sensitivity of phytoplankton to future changes in ocean carbonate chemistry: current knowledge, contradictions and research directions. In: Effects of ocean acidification on marine ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*. 373: 227-237.

Ruckelshaus, M., S. C. Doney, H. M. Galindo, J. P. Barry, F. Chan, J. E. Duffy, C. A. English, S. D. Gaines, J. M. Grebmeier, A. B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina, N. N. Rabalais, W. J. Sydeman and L. D. Talley. 2013. Securing ocean benefits for society in the face of climate change. *Marine Policy*, 40: 154-159.

Ruiz F. 2010. Cambio climático en temperatura, precipitación y humedad relativa para Colombia usando modelos meteorológicos de alta resolución (panorama 2011-2100). Nota Técnica de IDEAM, No. IDEAM-METEO/005-2010, Bogotá D.C., 91 p.

Sangil, C., M. Sansón, J. Afonso-Carrillo, R. Herrera, A. L. Martín-García y T. Díaz-Villa. 2012. Changes in subtidal assemblages in a scenario of warming: Proliferations of ephemeral benthic algae in the Canary Islands (eastern Atlantic Ocean). *Marine Environmental Research*, 77: 120-128.

Santana-Casiano, J. M., M. Gonzalez-Davila, M. J. Rueda, O. Llinas, and E. F. Gonzalez-Davila, 2007: The interannual variability of oceanic CO₂ parameters in the northeast Atlantic subtropical gyre at the ESTOC site. *Global Biogeochemical Cycles*, 21: GB1015 (1-16).

Schram, J. B., j. B. McClintock, R. A. Angus and J. M. Lawrence. 2011. Regenerative capacity and biochemical composition of the sea star *Luidia clathrata* (Say) (Echinodermata: Asteroidea) under conditions of near-future ocean acidification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 407: 266-274.

Schrank, W. E. 2007. The ACIA, climate change and fisheries. *Marine Policy*, 31 (1): 5-18.

Schwing, F. B., R. Mendelssohn, S. J. Bograd, J. E. Overland, M. Wang, and S. Ito. 2010. Climate change, teleconnection patterns, and regional processes forcing marine populations in the Pacific. *Journal of Marine Systems*, 79 (3-4): 245-257.

Semesi, I. S, J. Kangwe and M. Björk. 2009. Alterations in seawater pH and CO₂ affect calcification and photosynthesis in the tropical coralline alga, *Hydrolithon* sp. (Rhodophyta). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84: 337-341.

Sheppard, C. and R. Rioja-Nieto. 2005. Sea surface temperature 1871–2099 in 38 cells in the Caribbean region. *Marine Environmental Research*, 60 (3): 389-396.

Short, F. T. and H. A. Neckles. 1999. The effects of global climate change on seagrasses. *Aquatic Botany*, 63 (3–4): 169-196.

Smith, C. R., F. C. De Leo, A. F. Bernardino, A. K. Sweetman and P. Martinez-Arbizu. 2008. Abyssal food limitation, ecosystem structure and climate change. *Trends in Ecology & Evolution*, 23 (9): 518-528.

Solano, O. D., G. R. Navas, 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.

Solano, O. D. 1994. Corales, formaciones arrecifales y blanqueamiento de 1987 en Bahía Portete (Guajira, Colombia). *An. Inst Invest. Mar. Punta Betín*. 23: 149 – 163.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T. F. Stocker, P. Whetton, R. A. Wood and D. Wratt. 2007. Technical Summary. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)). Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, USA. pp 19-91.

Spencer, T., K. A. Teleki, C. Bradshaw and M. D. Spalding. 2000. *Marine Pollution Bulletin*, 40 (7): 569-586.

Spicer, J. I., S. Widdicombe, H. R. Needham and J. A. Berge. 2011. Impact of CO₂-acidified seawater on the extracellular acid-base balance of the northern sea urchin *Strongylocentrotus dröebachiensis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 407: 19-25.

Stegert, C., R. Ji and C. S. Davis. 2010. Influence of projected ocean warming in population growth potential in two North Atlantic copepod species. *Progress in Oceanography*, 87: 264-276.

Stenevik, E. K. and S. Sundby. 2007. Impacts of climate change on commercial fish stock in Norwegian water. *Marine Policy*, 31 (1): 19-31.

Struyf, E., S. Van Damme and P. Meire. 2004. Possible effects of climate change on estuarine nutrient fluxes: a case study in the highly nitrified Schelde estuary (Belgium, The Netherlands). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60: 649-661.

Stumpp, M., J. Wren, F. Melzner, M. C. Thorndyke and S. T. Dupont. 2011a. CO₂ induced seawater acidification impacts sea urchin larval development I: elevated metabolic rates decrease scope for growth and induce developmental delay. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 160: 331-340.

Stumpp, M., S. Dupont, M. C. Thorndyke and F. Melzner. 2011b. CO₂ induced seawater acidification impacts sea urchin larval development II: gene expression patterns in pluteus larvae. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A*, 160: 320-330.

Sullivan, B. K., J. H. Costello and D. Van Keuren. 2007. Seasonality of the copepods *Acartia hudsonica* and *Acartia tonsa* in Narragansett Bay, RI, USA during a period of climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 73 (1-2): 259-267.

Tabot, P. T. and J. B. Adams. 2013. Ecophysiology of salt marshes plants and predicted responses to climate change in South Africa. *Ocean and Coastal Management*, 80: 89-99.

The Royal Society. 2005. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. Policy document. The Clyvedon Press Ltd. Cardiff, UK. 60 p.

Thomas, Y. F., A. Nicolae-Lerma y B. Posada. 2012. Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias – Gobernación del Magdalena – Invemar. Serie de publicaciones especiales No. 25. Santa Marta., Colombia. 132 p.

Tian, Y., H. Kidokoro, T. Watanabe, Y. Igeta, H. Sakaji and S. Ino. 2012. Response of yellowtail, *Seriola quinqueradiata*, a key large predatory fish in the Japan Sea, to sea water temperature over the last century and potential effects of global warming. *Journal of Marine Systems*, 91: 1–10.

Tolan, J. M. 2007. El Niño-Southern Oscillation impacts translated to the watershed scale: Estuarine salinity patterns along the Texas Gulf Coast, 192 to 2004. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 72: 247-260.

Tomasko, D. A. 2002. Status trends of seagrasses coverage in Tampa Bay, with reference to other southwest Florida estuaries. En: Seagrass management: it's not just nutrients! Greening, H. S. editor. St. Petersburg, FL. pp. 11-20.

Torrents, O., E. Tambutté, N. Caminiti and J. Garrabou. 2008. Upper thermal thresholds of shallow vs. deep populations of the precious Mediterranean red coral *Corallium rubrum* (L.): Assessing the potential effects of warming in the NW Mediterranean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 357 (1): 7-19.

Touratier, F. and C. Goyet. 2011. Impact of the Eastern Mediterranean Transient on the distribution of anthropogenic CO₂ and first estimate of acidification for the Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research I*, 58: 1-15.

Travers, M., Y. J. Shin, S. Jennings and P. Cury. 2007. Towards end-to-end models for investigating the effects of climate and fishing in marines ecosystems. *Progress In Oceanography*, 75 (4): 751-770.

Trotter, J., P. Montagna, M. McCulloch, S. Silenzi, S. Reynaud, G. Mortimer, S. Martin, C. Ferrier-Pagès, J. P. Gattuso and R. Rodolfo-Metalpa. 2011. Quantifying the pH 'vital effect' in the temperate zooxanthellate coral *Cladocora caespitosa*: validation of the boron seawater pH proxy. *Earth and Planetary Science Letters*, 303: 163-173.

Tsung-Hung, P. and R. Wanninkhof. 2010. Increase of anthropogenic CO₂ in the Atlantic Ocean in the last two decades. *Deep-Sea Research I*, 57: 755-770.

Tuan Vo, Q., C. Kuenzer, Q. Minh Vo, F. Moder and N. Oppelt. 2012. Review of valuation methods for mangrove ecosystem services. *Ecological Indicators*, 23: 431-446.

Turley, C. and H. Findlay. 2009. Ocean acidification as an indicator for climate change. In: *Climate and global change: observed impacts on Planet Earth*, Letcher T (ed). pp 367-390.

Tynan, S. and B. D. Opdyke. 2011. Effects of lower surface ocean pH upon the stability of shallow water carbonate systems. *Science of the Total Environment*, 409: 1082-1086.

Vargas-Ángel, B., F. A. Zapata, H. Hernández and J. M. Jiménez. 2011. Coral and coral responses to the 1997-98 El Niño event on the Pacific coast of Colombia. *Bulletin of Marine Science*, 69 (1): 111 – 132.

Veron, J. E. N., O. Hoegh-Guldberg, T. M. Lenton, J. M. Lough, D. O. Obura, P. Pearce-Kelly, C. R. C. Sheppard, M. Spalding, M. G. Stafford-Smith and A. D. Rogers. 2009. The coral reef crisis: The critical importance of <350 ppm CO₂. *Marine Pollution Bulletin*, 58: 1428-1436.

Villegas, N. e I. Malikov. 2006. Modelación de la estructura dinámica de las aguas de la cuenca del Pacífico colombiano. *Boletín Científico CCCP*, 13: 97-114.

Wassman, P. 2011. Arctic marine ecosystems in an era of rapid climate change. *Progress in Oceanography*, 90: 1-17.

Waycott, M., C. Collier, K. McMahon, R. P. McKenzie, L. Udy, J. Alana and G. Alana. 2007. Vulnerability of seagrasses in the Great Barrier Reef to climate change. In: *Climate Change and the Great Barrier Reef: a vulnerability assessment*. Great Barrier Reef Marine Park Authority and Australian Greenhouse Office. Townsville, QLD, Australia. pp. 193-236.

Wei, G., M. T. McCulloch, G. Mortimer, W. Deng and L. Xie. 2009. Evidence for ocean acidification in the Great Barrier Reef of Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 2332-2346.

Wernberg, T., A. Campbell, M. A. Coleman, S. D. Connell, G. A. Kendrick, P. J. Moore, B. D. Russell, D. Smale, P. D. Steinberg. 2009. Macroalgae and temperate rocky reefs. In: *A Marine Climate Change Impacts and Adaptation Reports Card for Australia 2009* (Eds. E. S. Poloczanska, A. J. Hobday and A. J. Richardson). NCCARF Publication 05/09. 21 p.

Wernberg, T., B. D. Russell, P. J. Moore, S. D. Ling, D. A. Smale, A. Campbell, M. A. Coleman, P. D. Steinberg, G. A. Kendrick and S. D. Connell. 2011. Impacts of climate change in a global hotspot for temperate marine biodiversity and ocean warming. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 7-16.

Whitehouse, M. J., M.P. Meredith, P. Rothery, A. Atkinson, P. Ward and R.E. Korb. 2008. Rapid warming of the ocean around South Georgia, Southern Ocean, during the 20th century: Forcings, characteristics and implications for lower trophic levels. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55 (10): 1218-1228.

Widdicombe, S. and J. I. Spicer. 2008. Predicting the impact of ocean acidification on benthic biodiversity: What can animal physiology tell us? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 366: 187-197.

Wootton, J. T., C. A. Pfister and J. D. Forester. 2008. Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a High resolution multi-year dataset. *PNAS*. 105 (48): 18848-18853.

Worm, B. and H. K. Lotze. 2009. Changes in marine biodiversity as an indicator of climate and global change. In: *Climate and global change: observed impacts on Planet Earth*, Letcher T (ed). pp 263-279.

Yu, P. C., P. G. Matson, T. R. Martz and G. E. Hofmann. 2011. The ocean acidification seascape and its relationship to the performance of calcifying marine invertebrates: Laboratory experiments on the development of urchin larvae framed by environmentally-relevant pCO₂/pH. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 400 (1-2): 288-295.

Yu, K., J. Zhao, O. Shi and G. J. Price. 2012. Recent massive coral mortality events in the South China Sea: Was global warming and ENSO variability response? *Chemical Geology*, 320–321: 54-65.

Yuyama, I., S. Harii and M. Hidaka. 2012. Algal symbiont type affects gene expression in juveniles of the coral *Acropora tenuis* exposed to thermal stress. *Marine Environmental Research*, 76: 41-47.

Zapata, L. A. 2002. Effects of El Niño and La Niña on the Fisheries of the Colombian Pacific. *Investig. Mar*, 30 (1): 205-206.