

Directrices científicas para la creación de redes de
áreas marinas protegidas
en un contexto de cambio climático



cec.org

Este informe de proyecto fue compilado por R. J. Brock, E. Kenchington y A. Martínez Arroyo, junto con el grupo de trabajo SGMPAN del Consejo Internacional para la Exploración del Mar (CIEM), para el Secretariado de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA). La información contenida es responsabilidad de los autores y no necesariamente refleja los puntos de vista de la CCA o de los gobiernos de Canadá, Estados Unidos o México.

Se permite la reproducción de este material sin previa autorización, siempre y cuando se haga con absoluta precisión, su uso no tenga fines comerciales y se cite debidamente la fuente, con el correspondiente crédito a la Comisión para la Cooperación Ambiental.

A menos que se indique lo contrario, el presente documento está protegido mediante licencia de tipo “Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada”, de Creative Commons.



© Comisión para la Cooperación Ambiental, julio de 2012

ISBN : 978-2-89700-016-5 (*versión impresa*)

ISBN : 978-2-89700-017-2 (*versión electrónica*)

Available in English:

ISBN : 978-2-89700-014-1 (*print version*)

ISBN : 978-2-89700-015-8 (*electronic version*)

Depósito legal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012

Depósito legal – Library and Archives Canada, 2012

Particularidades de la publicación

Tipo: informe de proyecto de la CCA

Fecha: julio de 2012

Idioma original: inglés

QA12.07

Citar como:

R. J. Brock, E. Kenchington y A. Martínez Arroyo (comps.), *Directrices científicas para la creación de redes de áreas marinas protegidas en un contexto de cambio climático*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 2012.

La CCA desea manifestar su gratitud a las diversas personas que generosamente aportaron sus conocimientos especializados y su tiempo a la elaboración de estas directrices científicas. En particular, agradece a los expertos de Canadá, Estados Unidos y México que ofrecieron su saber y sus ideas a esta labor conjunta. En el anexo 3 aparece la lista completa de los participantes en el taller realizado a fin de formular las directrices en cuestión.

Asimismo, la CCA expresa su profundo reconocimiento al grupo técnico de la Red de Áreas Marinas Protegidas de América del Norte (RAMPAN) por su apoyo.

La realización de esta publicación corrió por cuenta de Karen Richardson, con apoyo de Jeffrey Stoub, Sarah Heiberg, Itzia Sandoval, Joanne Padulo, Douglas Kirk y Jacqueline Fortson. Diseño gráfico: Gray Fraser.

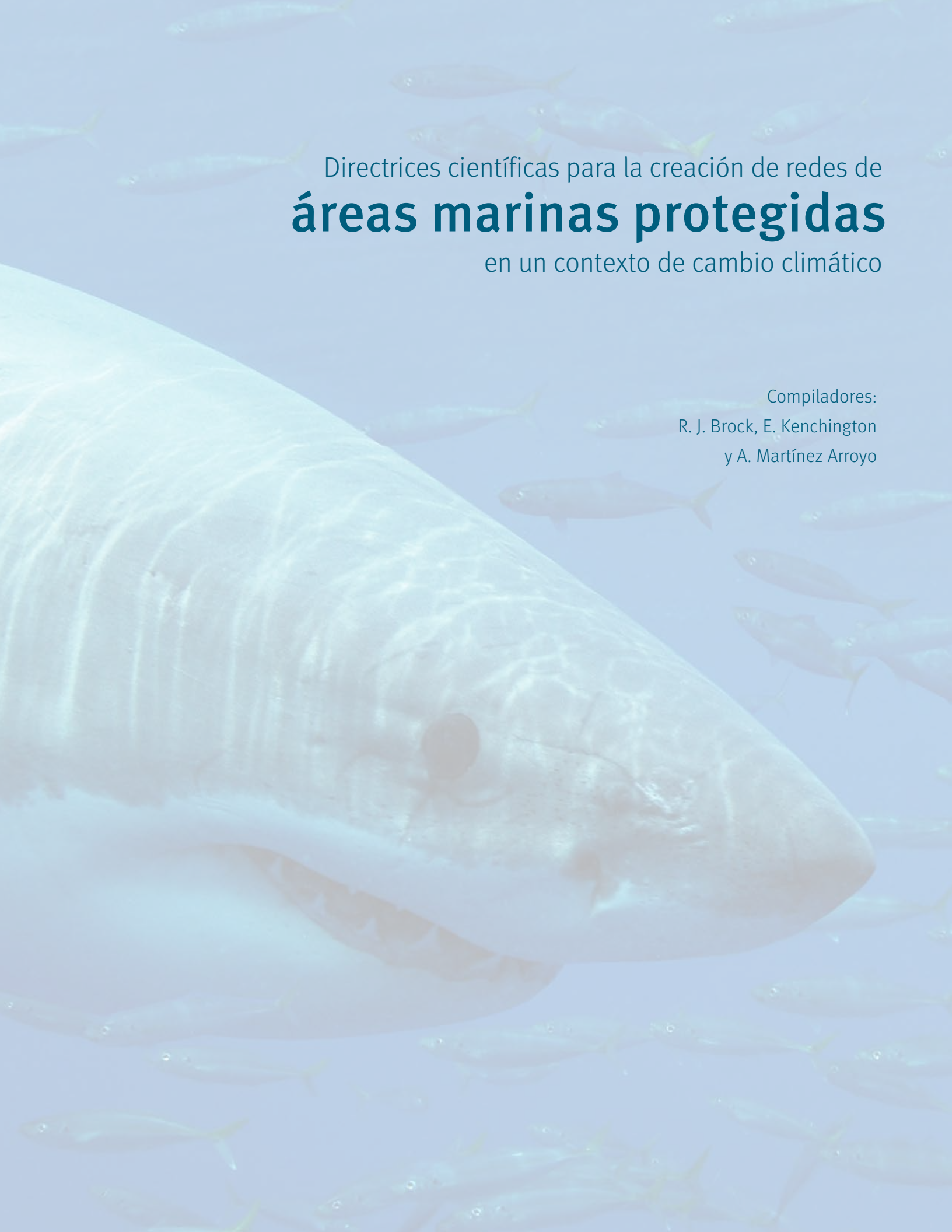
Foto portada: Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas

Si desea obtener mayor información sobre ésta y otras publicaciones de la CCA, diríjase a:



Comisión para la Cooperación Ambiental

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200
Montreal (Quebec), Canadá H2Y 1N9
t (514) 350-4300 f (514) 350-4314
info@cec.org / www.cec.org



Directrices científicas para la creación de redes de
áreas marinas protegidas
en un contexto de cambio climático

Compiladores:
R. J. Brock, E. Kenchington
y A. Martínez Arroyo



Índice

Algunas definiciones	iv
Siglas y acrónimos	v
Lista de gráficas y cuadros	vi
Prólogo	vii
Introducción	
Directrices científicas para la creación de redes de áreas marinas protegidas resilientes en un contexto de cambio climático	1
Línea directriz 1	
Proteger especies y hábitats con una función crucial en los ecosistemas o cuya conservación es de particular preocupación	9
Línea directriz 2	
Proteger posibles sumideros de carbono	15
Línea directriz 3	
Proteger los vínculos ecológicos y las rutas de conectividad de una amplia gama de especies	19
Línea directriz 4	
Proteger toda la gama de la biodiversidad presente en el área geográfica objetivo	27
Anexo 1	
Análisis de la información atmosférica y oceanográfica	33
Anexo 2	
Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas	62
Anexo 3	
Participantes en el taller	69

Algunas definiciones

En estas directrices nos apegamos a las definiciones de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas (CMAP) de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) para “área protegida” y “red de áreas protegidas”.¹ Obsérvese que las definiciones se aplican a cualquier o toda área protegida terrestre o de aguas interiores, marinas y costeras. Las definiciones para “mitigación” y “adaptación” se tomaron del Cuarto Informe de Evaluación (*Cambio climático 2007*) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).²

Área protegida

Espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, a través de medios legales, o de otros tipo, eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados.

[Nota: “Reserva marina” es un término más específico, que denota una zona vedada al uso.]

Red de áreas protegidas

Conjunto de áreas protegidas individuales que operan de manera colaborativa y sinérgica, en diferentes escalas espaciales y con diversos niveles de protección, a fin de cumplir objetivos ecológicos con mayor eficacia y de manera más integral de lo que se podría con sitios aislados.

La *función* de una red de áreas marinas protegidas consiste en conectar y proteger aquellas áreas necesarias para fortalecer el funcionamiento de un ecosistema, de modo que la salud general del océano no se vea perjudicada por los usos humanos. En este informe se presentan directrices que consideran la capacidad de las áreas marinas protegidas —individuales y en redes— para adaptarse al cambio climático actual y futuro, así como mitigar sus efectos.

Mitigación

Cambio y sustitución tecnológicos con el propósito específico de reducir los insumos de recursos y las emisiones por unidad de producción. Aunque varias políticas sociales, económicas y tecnológicas pueden generar una reducción de emisiones, en lo relativo al cambio climático la mitigación implica aplicar políticas para reducir los gases de efecto invernadero y ampliar los sumideros de carbono.

Adaptación

Iniciativas y medidas para reducir la vulnerabilidad de los sistemas naturales y humanos frente a los efectos reales o esperados del *cambio climático*. Existen varios tipos de adaptación; por ejemplo, *anticipatoria y reactiva, privada y pública, autónoma y planeada*.

1. UICN, *Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas*, N. Dudley (comp.), Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y de los Recursos Naturales, Gland, Suiza, 2008; disponible en línea, en: <<http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/PAPS-016-Es.pdf>>.
2. IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report*, Cuarto Informe de Evaluación, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza, 2007; disponible en línea, en: <www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html>.

Siglas y acrónimos

AIEB	Áreas de importancia ecológica y biológica
AMOC	Circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés)
AMP	Área marina protegida
ANOC	Atlántico noroccidental
ANOC-SP	Atlántico noroccidental subpolar
ANOC-ST	Atlántico noroccidental subtropical
AOcT	Atlántico occidental tropical
AOr	Ártico oriental
AWP	“Piscina de agua cálida” del Atlántico (AWP, por sus siglas en inglés)
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CDB	Convenio sobre la Diversidad Biológica
CIEM	Consejo Internacional para la Exploración del Mar
CMAP	Comisión Mundial de Áreas Protegidas (de la UICN)
CO₂	Dióxido de carbono
COP	Conferencia de las Partes
DWBC	Corriente profunda límite occidental (DWBC, por sus siglas en inglés)
EAP	Programa de Evaluación de Ecosistemas (<i>Ecosystem Assessment Program</i>) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> , NOAA)
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
GEI	Gases de efecto invernadero
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés)
MCGAO	Modelos de la circulación general atmósfera-océano
MIA	Mar Intramericano
OAN	Oscilación del Atlántico Norte
OAr	Oscilación del Ártico
OER-NOAA	Oficina de Exploración e Investigación Oceánica de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (en inglés: <i>National Oceanic and Atmospheric Administration/Ocean Exploration and Research</i>)
OMA	Oscilación Multidecadal del Atlántico
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RAMPAN	Red de Áreas Marinas Protegidas de América del Norte
SMA	Sistema Arrecifal Mesoamericano
SGMPAN	Grupo de Estudio sobre la Planeación y Creación de Redes de Áreas Marinas Protegidas en un Clima Cambiante
TSM	Temperatura de la superficie del mar
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
VAT	Variabilidad del Atlántico tropical
WCMC-PNUMA	Centro Mundial de Vigilancia de la Conservación (WCMC, por sus siglas en inglés) del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ZCI	Zona de convergencia intertropical
ZT-LM	Zona de transición de latitud media

Lista de gráficas

Gráfica 1	Interacciones entre la atmósfera, el océano y los organismos vivos	2
Gráfica 2	El cambio climático: en raras ocasiones único factor de deterioro en los sistemas marinos	3
Gráfica 3	Marcos de referencia cambiantes	3
Gráfica 4	Sumidero azul de carbono	15
Gráfica 5	Pérdida mundial de un sumidero de carbono: los pastos marinos	16
Gráfica 6	Flujo de genes y relación de dispersión de las poblaciones de peces marinos	21
Gráfica A1.1	Ecorregiones marinas de América del Norte	34
Gráfica A1.2	Topografía del fondo del Atlántico noroccidental	36
Gráfica A1.3	Temperatura y salinidad medias anuales de largo plazo	37
Gráfica A1.4	Índices de la Oscilación del Atlántico Norte y de la corriente del Golfo durante el invierno, 1950-2009	42
Gráfica A1.5	Variabilidad superficial océano-atmósfera en la región del Atlántico tropical	43
Gráfica A1.6	Variación estacional de la temperatura de la superficie del mar para la piscina de agua cálida del hemisferio occidental tropical	44
Gráfica A1.7	Anomalía en la temperatura de la superficie del mar, sin tendencia, en el Atlántico norte	45
Gráfica A1.8	Vínculos entre la circulación meridional de retorno del Atlántico y los flujos de entrada y salida del Ártico	46
Gráfica A1.9	Esquema de la Oscilación del Atlántico Norte, la variabilidad del Atlántico tropical y la circulación meridional de retorno del Atlántico	47

Lista de cuadros

Cuadro 1	Propiedades con una influencia marcada en la resiliencia de los sistemas marinos que pueden resultar afectadas por el cambio climático	4
Cuadro A1.1	Principales regiones oceanográficas de gran escala en el ANOC o que lo afectan	40
Cuadro A1.2	Resumen de los modos de variabilidad climática que afectan el Atlántico noroccidental y sus principales características y efectos desde la perspectiva del Atlántico subtropical y tropical	48
Cuadro A1.3	Tendencias del cambio climático antropogénico en las principales propiedades oceanográficas físicas de la capa superior del océano que afectan a los ecosistemas del Atlántico noroccidental	51
Cuadro A1.4	Tendencias del cambio climático antropogénico por medio de procesos físicos en propiedades oceanográficas químicas de la capa superior del océano que son fundamentales y afectan los ecosistemas en el Atlántico noroccidental	55
Cuadro A2.1	Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas	64

El presente documento, *Directrices científicas para la creación de redes de áreas marinas protegidas resilientes en un contexto de cambio climático*, se desprende de un informe más amplio del Grupo de Estudio sobre la Planeación y Creación de Redes de Áreas Marinas Protegidas en un Clima Cambiante (SGMPAN, por sus siglas en inglés), que es una alianza de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), mediante su grupo técnico de la Red de Áreas Marinas Protegidas de América del Norte (RAMPAN), y el Consejo Internacional para la Exploración del Mar (CIEM). El SGMPAN elaboró este informe en un taller realizado en Woods Hole, Massachusetts, del 15 al 19 de noviembre de 2010.³ El área de interés para el Grupo de Estudio y el informe epónimo se extendió desde el Atlántico occidental tropical —incluidos el mar Caribe y el golfo de México— hacia el norte, hasta el mar de Labrador.

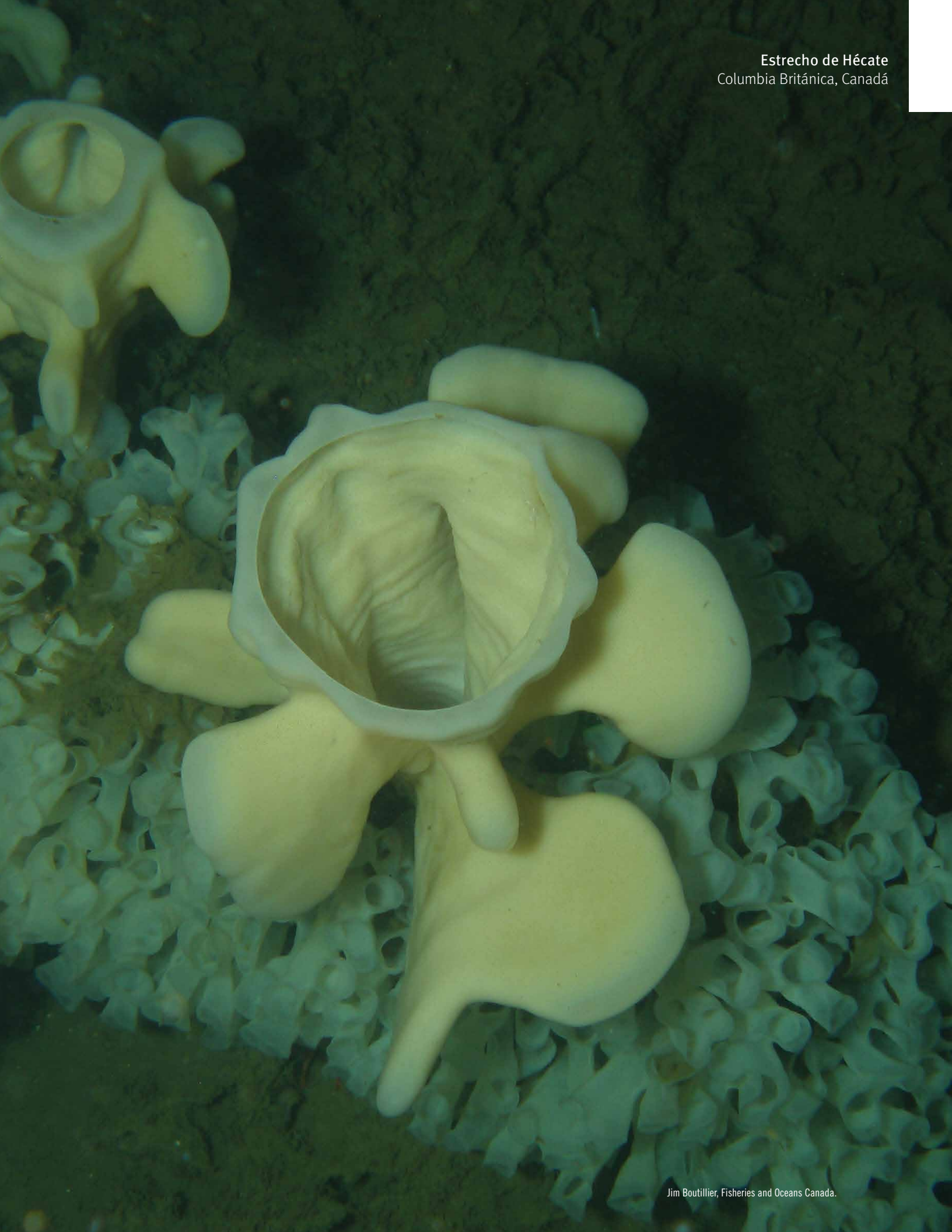
Los miembros del SGMPAN, presidido por Robert Brock (Estados Unidos), Ellen Kenchington (Canadá) y Amparo Martínez Arroyo (México), se reunieron de nuevo en Woods Hole del 9 al 11 de agosto de 2011 para incorporar cambios a la versión preliminar del informe, luego de una revisión de pares que duró seis meses. Asimismo, formularon directrices apoyadas en información científica para la planeación y creación de redes de áreas marinas protegidas (AMP) teniendo en cuenta los efectos previstos del cambio climático en los ecosistemas marinos.

Considérese el informe completo (CIEM 2011a)⁴ producto del proceso de redacción y revisión del SGMPAN como el documento de referencia de estas directrices. Los presidentes agradecen a los miembros del Grupo de Estudio y a todas aquellas personas que participaron en la redacción, revisión, edición y publicación de las directrices preliminares su dedicación y su tiempo, pues gracias a su esfuerzo conjunto podemos contar hoy con un conjunto integrado de directrices generales para planear y crear AMP y redes de AMP en un contexto de cambio climático.

3. En el **anexo 3** se incluye la lista de participantes (de Canadá, Estados Unidos y México) en el taller.

4. CIEM, *Report of the Study Group on Designing Marine Protected Area Networks in a Changing Climate* (SGMPAN), 15 a 19 de noviembre de 2010, Woods Hole, Massachusetts, Estados Unidos, ICES CM 2011-SSGSUE:01, 2011. Véase <<http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2011-055.pdf>>.

Estrecho de Hécate
Columbia Británica, Canadá



Introducción

Directrices científicas para la creación de redes de áreas marinas protegidas resilientes en un contexto de cambio climático

Se prevé que el cambio climático —una consecuencia de factores tanto naturales como antropogénicos— afecte prácticamente todos los aspectos de la estructura y la función de los ecosistemas marinos: desde los ciclos biogeoquímicos y la composición de las comunidades hasta la prevalencia de enfermedades. El clima puede afectar todas las etapas de la historia de vida de las especies mediante procesos directos e indirectos. Entre los posibles efectos del cambio climático en las poblaciones marinas figuran las alteraciones en la dinámica poblacional (talla, reproducción), en la composición de las comunidades y en su distribución geográfica. Cabe esperar que el cambio climático afecte de manera distinta a poblaciones, hábitats y ecosistemas, dependiendo de sus características básicas (CIEM, 2011a, b). Aunque hay muchas dudas sobre la velocidad y la estructura espacial del futuro cambio climático, es necesario considerar las alteraciones probables y posibles al planear la gestión de los ecosistemas.

Los ecosistemas son redes complejas y dinámicas de componentes abióticos y bióticos que interactúan, con cierta capacidad intrínseca para adaptarse a las perturbaciones, como las producidas por el cambio climático. Al interior de los ecosistemas, cada organismo percibe las perturbaciones y responde ante éstas ya sea de manera directa, mediante respuestas físicas a factores abióticos, o de manera indirecta, a través de mecanismos de interacción como la depredación y la competencia. Cuando un gran número de individuos se ve afectado, la respuesta se propaga a niveles de organización más altos.

Aquellos espacios del medio ambiente que en conjunto integran un lugar para que los organismos sobrevivan y prosperen reciben el nombre de “hábitat” e incluyen componentes físicos, químicos y biológicos. La estructura física suele ser el aspecto más visible de un hábitat y, por consiguiente, constituye la base para la mayoría de las clasificaciones de hábitats. Sin embargo, la estructura física por sí sola no basta para brindar un hábitat funcional a un organismo. Los hábitats también pueden ser disfuncionales, aunque esté presente la estructura física básica, si se han alterado aspectos como las redes alimentarias o la producción primaria. Además, hay propiedades ambientales, como temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes (alimento), que tienen una influencia marcada en el funcionamiento de estas áreas.

¿Qué propiedades permiten a un ecosistema absorber perturbaciones de mayor magnitud?

En la **gráfica 1** se ilustran algunas de las rutas que pueden seguir los efectos atmosféricos en la dinámica de los océanos y la respuesta biológica. Los cambios producidos se manifestarán en distintas escalas espaciales y temporales: desde las

CONCEPTO CLAVE

El término **resiliencia** es muy utilizado en el contexto teórico, pero rara vez se le ha definido de manera operativa. A grandes rasgos, puede decirse que la resiliencia es el atributo de un ecosistema relacionado con su capacidad para recuperarse de perturbaciones o su resistencia a tales perturbaciones. Para efectos de estas directrices se adoptó la definición original de Holling (1973): “la magnitud de la perturbación que un sistema puede absorber sin sufrir cambios fundamentales”.

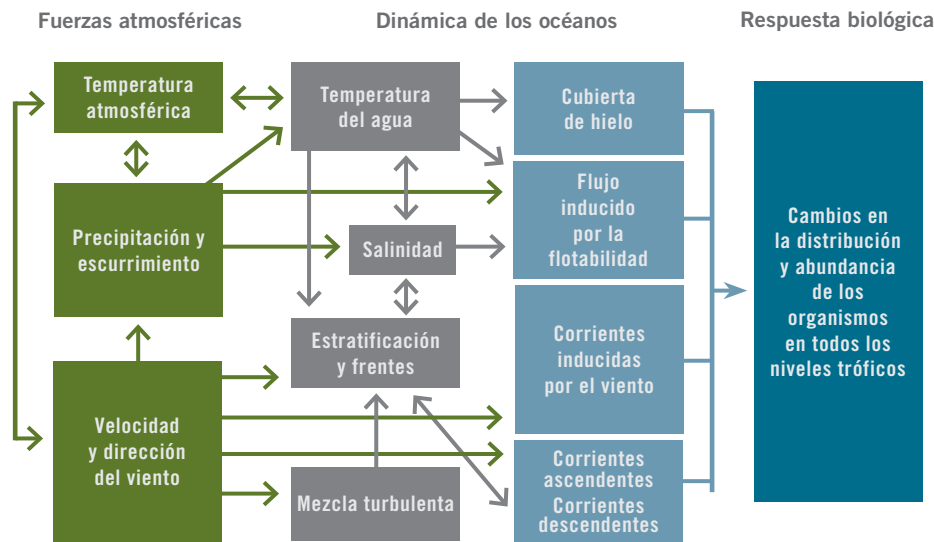
relativamente menores, características de los procesos de mezcla turbulenta, hasta las alteraciones de alcance mundial en la circulación oceánica profunda, que se producen en el transcurso de milenios. Dar seguimiento a los procesos en este espectro de escalas espaciales y temporales resulta crucial para entender los posibles efectos del cambio climático mundial en las poblaciones marinas y los ecosistemas oceánicos. En el **cuadro 1** (p. 4) se indican algunas de las propiedades de las poblaciones, los hábitats y los ecosistemas marinos que pueden ser sensibles al cambio climático y, por ende, resultar afectadas. Dada la importancia de la conectividad para la planeación y creación de redes de áreas marinas protegidas (AMP), comprender las influencias del cambio climático en los distintos componentes de la conectividad (**gráfica 2**) seguirá siendo una necesidad primordial en la investigación orientada al aprovechamiento de las AMP, ya sea aisladas o en redes, para lograr que los componentes de los ecosistemas se vuelvan más resilientes a estos efectos previstos del cambio climático (**gráfica 3**).

¿Qué efectos generalizados tienen los cambios oceanográficos causados por el clima en componentes fundamentales de los ecosistemas?

En el informe del SGMPAN (CIEM, 2011a) se identifica una serie de efectos generalizados del cambio climático en ciertos componentes de los ecosistemas:

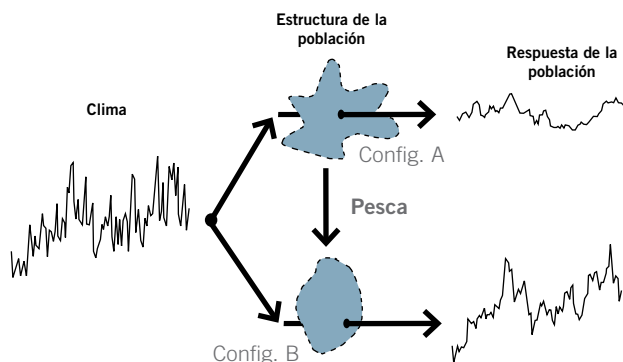
- Se anticipan cambios en la distribución en todos los niveles tróficos.
- Se prevén disminuciones de la productividad primaria en ecosistemas ubicados en latitudes bajas y, viceversa, aumentos de la productividad primaria en sistemas de latitudes altas.
- Se producirán cambios en las interacciones en los niveles tróficos.
- Los procesos de los niveles tróficos inferiores se integrarán por medio de los depredadores superiores.

Gráfica 1 Interacciones entre la atmósfera, el océano y los organismos vivos



En este diagrama se ilustran algunas de las posibles rutas de interacción de los efectos atmosféricos en la dinámica de los océanos y la respuesta biológica en los procesos de producción. Los cambios en la temperatura atmosférica, la precipitación y los vientos afectarán, entre otros factores, la estratificación, los flujos inducidos por la flotabilidad, las corrientes ascendentes y descendentes y el hielo marino. Estos cambios pueden afectar la producción en todos los niveles tróficos y se manifestarán en distintas escalas espaciales y temporales: desde las relativamente menores, características de los procesos de mezcla turbulenta, hasta las alteraciones de alcance mundial en la circulación oceánica profunda, que se producen en el transcurso de milenios. Dar seguimiento a los procesos que ocurren en este espectro de escalas espaciales y temporales resulta crucial para entender los posibles efectos del cambio climático mundial en las poblaciones marinas y los ecosistemas oceánicos.

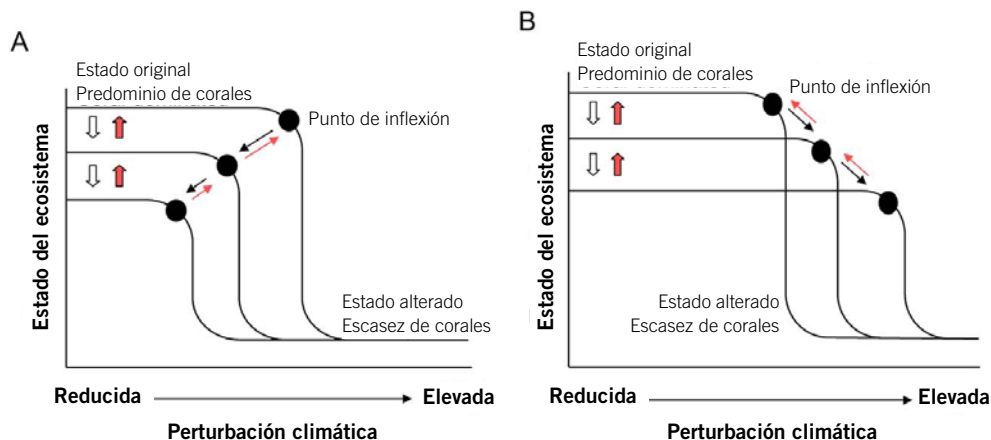
Gráfica 2 El cambio climático: en raras ocasiones único factor de deterioro en los sistemas marinos



El pronóstico de múltiples influencias climáticas sumadas a otros factores de deterioro, como la pesca, agrega complejidades, efectos indirectos e incertidumbres relacionadas. Esta gráfica es una representación esquemática de la mayor vulnerabilidad a los efectos del cambio climático de una variable de una población marina (en este caso, la abundancia) cuando también resulta afectada por la explotación pesquera.

Fuente: Perry *et al.*, 2010.

Gráfica 3 Marcos de referencia cambiantes



Gestión de arrecifes de coral para lograr resiliencia frente al cambio climático

A. Idea convencional de resiliencia. Las comunidades naturales son muy resilientes al cambio climático, es decir, el punto de inflexión (círculo negro) que lleva a otro estado del ecosistema se encuentra a la extrema derecha y sólo se alcanza cuando hay altos niveles de perturbación climática. A medida que las perturbaciones antropogénicas crónicas degradan el ecosistema original (flechas blancas), el punto de inflexión en respuesta al cambio climático se recorre paulatinamente a la izquierda (flechas negras), lo que vuelve al ecosistema menos resiliente a las perturbaciones climáticas. Una gestión orientada a controlar las perturbaciones antropogénicas locales debe revertir la degradación (flechas rojas gruesas) haciendo que el punto de inflexión vuelva a recorrerse a la derecha, hacia una mayor resiliencia (flechas rojas delgadas).

B. Posible efecto contradictorio de la gestión de arrecifes de coral en busca de resiliencia al cambio climático. Si las perturbaciones antropogénicas crónicas, que gradualmente degradan el ecosistema original (flechas blancas), tienen por efecto la eliminación de individuos o especies sensibles a las perturbaciones, el punto de inflexión en respuesta al cambio climático poco a poco se recorrerá a la derecha (flechas negras), de modo que el ecosistema se volverá más resiliente a las perturbaciones climáticas. De manera inadvertida, la gestión orientada a controlar las perturbaciones antropogénicas locales y revertir la degradación (flechas rojas gruesas) hará que el punto de inflexión vuelva a la izquierda, hacia una menor resiliencia (flechas rojas delgadas) a las perturbaciones climáticas. Fuente: Côté y Darling, 2010.

Los responsables de la creación de redes de AMP deben considerar el impacto de anteriores factores de deterioro antropogénicos al fijar objetivos relacionados con el estado actual de los ecosistemas. Aunque no todas las características —de especies y de hábitats— vulnerables a los efectos del cambio climático pueden fortalecerse o adaptarse por medio de AMP, aisladas o en redes, en términos generales las AMP son una herramienta útil en la adaptación al cambio climático.

Cuadro 1 Propiedades con una influencia marcada en la resiliencia de los sistemas marinos que pueden resultar afectadas por el cambio climático

Poblaciones	Hábitats	Ecosistemas
Conectividad	Heterogeneidad	Conectividad (flujos espaciales, conexiones tróficas y especies que fungen como enlaces móviles)
Dependencia de hábitats críticos	Disposición y composición espaciales	Estructura de los niveles tróficos superiores respecto a su abundancia y tamaño
Sensibilidad a las condiciones ambientales	Especies fundadoras	Estructura de las comunidades de plancton respecto a su tamaño
Flexibilidad en las rutas migratorias	Ingenieros del ecosistema	Correspondencias fenológicas
Estructura de la población respecto a su tamaño y edad	Nivel de perturbación	Riqueza de especies
Distribución geográfica	Batimetría, topografía y rugosidad	Redundancia funcional (diversidad taxonómica)
Número de subunidades de población o metapoblaciones	Hábitats que sustentan etapas de vida cruciales	Diversidad de respuestas
Fenología	Zonas de transición biogeográfica	Equidad de las comunidades
		Diversidad beta

¿Qué papel pueden desempeñar las redes de áreas marinas protegidas en la adaptación a los efectos del cambio climático y su mitigación?

Las redes de áreas marinas protegidas (AMP) se deben concebir de tal forma que queden integradas, se sustenten recíprocamente y se orienten al mantenimiento de funciones, servicios y recursos ambientales fundamentales. De este modo podrán ofrecer un mecanismo que ayude a la adaptación de los ecosistemas a los efectos del cambio climático, así como a su mitigación. Las redes de AMP son particularmente apropiadas para abordar cuestiones espaciales de conectividad (por ejemplo, conectar sitios de importancia crucial para ciertas etapas de vida de especies clave), heterogeneidad de los hábitats, y disposición y composición espaciales de los hábitats constitutivos, todo lo cual contribuye a la resiliencia de los ecosistemas. Algunas de esas propiedades se pueden favorecer mediante el tamaño y la ubicación de las áreas protegidas (por ejemplo, estructura de los niveles tróficos superiores en lo que respecta a su abundancia y tamaño; riqueza de especies) y con la reducción de otras presiones como la pesca. En otros casos, quizá no puedan aplicarse las herramientas de gestión espacial a ciertas propiedades, pero aun así se trata de características que pueden servir para predecir la vulnerabilidad del ecosistema al cambio climático (por ejemplo, correspondencias fenológicas, flexibilidad de las rutas migratorias, dependencia de hábitats críticos, redundancia funcional, diversidad de respuestas y equidad de las comunidades [CIEM, 2011a]).

Incluso las características ecológicas para las que *no se pueden* mitigar los efectos del cambio climático por medio de AMP podrían beneficiarse de otros enfoques de protección o conservación. Los gestores de AMP (con el apoyo de expertos y una buena orientación científica) habrán de determinar si esas propiedades deberán seguir protegiéndose dentro de la red (es decir, optar por: dejarlas sin protección; darles una protección de corto plazo hasta que el cambio climático produzca sus efectos, o protegerlas de manera permanente con la esperanza de que puedan salvarse parcialmente del cambio climático), o bien si podrán aplicarse medidas alternativas de manejo a fin de protegerlas.

Considerar cómo pueden formarse redes de AMP para conseguir una adaptación a las influencias del cambio climático en los ecosistemas y su mitigación es algo relativamente novedoso. A pesar de las variaciones espaciales y temporales previstas en los efectos climáticos, hoy día la planeación y la creación de redes de AMP siguen obedeciendo a las condiciones actuales del medio ambiente y los hábitats (Gaines *et al.*, 2010). Los gestores y los planificadores tendrán que evaluar si el objetivo o los objetivos que hoy se consideran al establecer sitios y redes de AMP se cumplirán el día de mañana en escenarios de cambio climático y sus incertidumbres. Por otro lado, también podrían estar interesados

en establecer sitios y redes de AMP *con el objetivo* de aumentar o mantener la resiliencia de poblaciones, hábitats y ecosistemas a los efectos del cambio climático. En ambos casos, tanto los gestores como los planificadores deben adaptar su uso de las herramientas disponibles e idear nuevos enfoques cuando tales herramientas resultan insuficientes para incorporar la naturaleza dinámica de este reto.

La iniciativa de la RAMPAN-CCA y el CIEM

La Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), por medio de su grupo técnico de la Red de Áreas Marinas Protegidas de América del Norte (RAMPAN), se sumó al Consejo Internacional para la Exploración del Mar (CIEM) y estableció el Grupo de Estudio sobre la Planeación y Creación de Redes de Áreas Marinas Protegidas en un Clima Cambiante (SGMPAN, por sus siglas en inglés) a fin de elaborar lineamientos con un fundamento científico para planificar y crear redes de

áreas marinas protegidas (AMP) tomando en cuenta los efectos del cambio climático esperados en los ecosistemas marinos (CIEM, 2011a). El área de interés se extendió desde el Atlántico occidental tropical —incluidos el mar Caribe y el golfo de México— hacia el norte, hasta el mar de Labrador. Colaboraron participantes de Canadá, Estados Unidos y México. El informe general del SGMPAN se considera el documento de referencia para las directrices científicas presentadas en esta publicación.

El propósito es que estas directrices mejoren la capacidad de los tres países para planificar, crear, gestionar, evaluar y adaptar redes de AMP a escalas nacional y regional, en el marco del cambio climático probable o posible. Sin embargo, subrayamos que el uso de un mecanismo “basado en el lugar” como el establecimiento de áreas marinas protegidas —y, por extensión, redes de AMP— para la gestión eficaz de estos ecosistemas se debe emprender con cierta cautela y como parte de un proceso más amplio de planeación marina en los ámbitos nacional e internacional. Se requiere una política integral que reúna otras medidas de gestión para abordar factores de deterioro antropogénicos, como la pesca y el control de la contaminación, y que se vincule con otras áreas protegidas y redes (por ejemplo, las áreas terrestres que influyen en los sistemas estuarinos y marinos). Este enfoque permitirá la formulación de recomendaciones científicas para evaluar y monitorear la eficacia de varias acciones de gestión como parte de todo un paquete. Estamos plenamente conscientes de que los tres países pueden tener mecanismos jurídicos muy distintos para aplicar una gestión “basada en el lugar” o cualquier otra respuesta más adecuada ante el cambio climático que se espera. También reconocemos la posibilidad de que los tres países posean diferentes capacidades técnicas y financieras para aplicar y evaluar cualquier iniciativa de gestión de un área u otra decisión relacionada en respuesta al cambio climático. Por consiguiente, la investigación científica encaminada a mejorar las proyecciones sobre el cambio climático y sus efectos en las comunidades marinas también deberá formar parte de la estrategia mundial.

Uso de estas directrices

Las presentes directrices científicas tienen la finalidad de fomentar prácticas óptimas, coherencia en el enfoque y colaboración para la planeación y creación de sitios y redes de AMP, entre gestores, planificadores y científicos dedicados estudiar los efectos del cambio climático en las poblaciones, los hábitats y los ecosistemas. En varios documentos se tocan diversos aspectos de estos lineamientos; en particular: los informes *Establishing Marine Protected Area Networks—Making It Happen* [Establecimiento de redes de áreas marinas protegidas: cómo hacerlo realidad], de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas (CMAP) de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), y *Adapting to*

CONCEPTO CLAVE

Deberán hacerse ajustes en la **gestión oceánica** para dar cuenta de un nuevo imperativo: mantener la estructura, función, procesos y biodiversidad de los ecosistemas a fin de aumentar la resiliencia al cambio. En este sentido, un enfoque altamente coordinado, integrado y adaptativo será, sin duda, elemento fundamental para responder a este nuevo imperativo, lo que a su vez exigirá algún mecanismo que permita mejorar la compatibilidad y la coherencia entre sectores y regiones (Gjerde *et al.*, 2008). Esto será de particular importancia con respecto al establecimiento y operación de redes transfronterizas de AMP.

CONCEPTO CLAVE

La vinculación de las redes nacionales con redes internacionales más extensas trae consigo beneficios adicionales:

- Se facilita la protección de un ecosistema o especie que no se puede proteger adecuadamente en un solo país, como las especies migratorias.
- Aumenta, hasta llegar a ser adecuado, el nivel de atención que se presta a las áreas protegidas transfronterizas.
- Se intercambian enfoques de conservación eficaces para sitios similares en diferentes regiones.
- Se establece una colaboración entre los países vecinos para enfrentar retos y asuntos en común.
- Se fortalece la capacidad a través del intercambio de experiencias y enseñanzas obtenidas, nuevas tecnologías y estrategias de gestión, al igual que mediante un mayor acceso a información pertinente.

Climate Change: A Planning Guide for State Coastal Managers [Adaptación al cambio climático: guía de planificación para gestores costeros estatales], de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, NOAA) de Estados Unidos, que ofrecen ambas un panorama general excelente y relevante.

En diversos foros internacionales se han presentado las propiedades básicas para la planeación y creación de una red de AMP. En el documento de referencia de estas directrices científicas (CIEM, 2011a), el análisis en el contexto del cambio climático se centra en la siguiente combinación de propiedades planteadas por la UICN (2008) y el WCMC-PNUMA (2008):

- *Representatividad (o representación)*: se abarca toda la gama de la biodiversidad, incluidas especies raras y amenazadas.
- *Conectividad*: se aseguran los vínculos entre sitios mediante corrientes, especies migratorias, dispersión de larvas.
- *Replicación-redundancia*: se protege más de un ejemplo de determinada característica.
- *Adecuación-viabilidad*: adecuados tamaño, espaciamiento y forma de las AMP.

El cuadro 4.2.1 del informe del SGMPAN (CIEM, 2011a) es un recurso informativo en el que se ponen de relieve tanto estas propiedades de las redes como criterios específicos por sitio para las AMP que forman parte de una red —por ejemplo, áreas de importancia ecológica y biológica (AIEB)—, tomados de fuentes como el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) (2009). A su vez, el cuadro 1 del informe del taller *Ecologically or Biologically Significant Areas in the Pelagic Realm: Examples and Guidelines*⁵ [Áreas de importancia ecológica o biológica en el dominio pelágico: ejemplos y directrices] de la UICN (2011) presenta los diversos criterios aplicados por organismos y programas de Naciones Unidas para identificar AIEB. En él se incluyen criterios específicos por sitio a fin de identificar los atributos de AMP que pueden facilitar el establecimiento de redes de AMP propiciadoras de la resiliencia de los ecosistemas ante el cambio climático. Cada componente y propiedad se especifica y define, acompañado con ejemplos concretos, la escala o escalas en las que opera y su relación con el cambio climático.

Para nuestro informe, hemos decidido presentar como directrices cuatro objetivos de alto nivel que el SGMPAN consideró cruciales para generar resiliencia ante el cambio climático:

- **Línea directriz 1:** *Proteger especies y hábitats con una función crucial en los ecosistemas o cuya conservación es de particular preocupación.*
- **Línea directriz 2:** *Proteger posibles sumideros de carbono.*
- **Línea directriz 3:** *Proteger los vínculos ecológicos y las rutas de conectividad de una amplia gama de especies.*
- **Línea directriz 4:** *Proteger toda la gama de la biodiversidad presente en el área biogeográfica objetivo.*

5. Véase <<http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/2011-055.pdf>>.

Para cada línea directriz exponemos los pasos que científicos, gestores y planificadores deben seguir al evaluar el efecto del cambio climático en el o los ecosistemas objetivo. Uno de estos pasos consiste en preguntarse si las herramientas de gestión espacial (en particular, sitios o redes de AMP y cierres de pesquerías) pueden usarse para mitigar los efectos esperados o adaptarse a ellos. Se prevé que grupos de especialistas sigan los pasos propuestos y elaboren informes con bases científicas que serán de utilidad para la formulación de cualquier respuesta apropiada; por ejemplo, un marco dinámico de áreas protegidas que se extienda desde el Caribe hasta el mar de Labrador y que llegue, si es preciso, a alta mar. Cabe señalar que desde el punto de vista político otros enfoques podrían resultar más factibles que las AMP dinámicas. Corresponderá a los gestores considerar una diversidad de enfoques que incluyan: AMP dinámicas; AMP más grandes; AMP donde la zonificación es dinámica, pero no así las fronteras exteriores de los sitios; restricción de ciertos tipos de aparejos de pesca; restricciones espaciales, etcétera.

Además, contar con una guía de gestión para las directrices, elaborada por profesionales de las AMP, será de especial utilidad para orientar a los gestores y planificadores de AMP sobre la mejor manera de interpretar y aplicar estos lineamientos (fecha de publicación prevista: otoño de 2012).

Estas directrices científicas también pueden complementarse entre sí. Una acción de gestión correspondiente a una línea directriz bien puede también satisfacer objetivos de otro u otros lineamientos. Por ejemplo, proteger los manglares costeros puede, sin duda alguna, cumplir con las cuatro directrices: 1) es un hábitat con una función crucial en el ecosistema; 2) se trata claramente de un posible sumidero de carbono; 3) los peces que nacen de huevos desovados en un arrecife de coral pueden migrar, en su etapa juvenil, para cobijarse bajo las raíces aéreas de los manglares y en el lecho de pasto marino adyacente, y 4) al proteger un hábitat de manglar también se protege la biodiversidad relacionada con ese hábitat. En este caso, se estaría obteniendo el máximo provecho al ejecutar esta acción.

El monitoreo permanente y coordinado de las principales variables ambientales —terrestres, atmosféricas y oceanográficas— a lo largo de la red de AMP permitirá una gestión adaptativa y, por tanto, debe ser un factor estratégico al evaluar las redes de AMP y su desarrollo. Sería conveniente evaluar de antemano el nivel de información disponible y trazar una estrategia clara para subsanar cualquier laguna de información. Es asimismo recomendable que se indique claramente el nivel de dificultad y el costo relacionado con cada uno de los lineamientos considerados, ya que para cada directriz pueden registrarse grandes disparidades en lo que respecta a la información necesaria, el nivel de especialización técnica para obtener la información requerida y los costos que suponen los distintos pasos. Cada línea directriz se deberá, pues, monitorear, evaluar y revisar usando los métodos analíticos apropiados.

Las mayores lagunas de información corresponden a cambios y efectos registrados en el pasado en latitudes más bajas, en latitudes altas (el Ártico) y en ecosistemas costa afuera. A fin de entender el efecto de múltiples factores de deterioro en un ecosistema, es necesario coordinar la investigación y la recopilación de datos en todos los niveles tróficos. Resulta aún más difícil proyectar el futuro cambio climático y sus efectos, en especial en algunas de las escalas espaciales y temporales que son importantes para los ecosistemas. Así pues, cuando se tomen decisiones a partir de proyecciones futuras, deberán considerarse la fiabilidad y las incertidumbres que éstas entrañan.

En el **anexo 1** de este informe se presenta un panorama detallado de las propiedades físicas (atmosféricas y oceanográficas) para las que se prevén cambios en las próximas décadas; la información incluye no sólo la dirección, la magnitud y la extensión espacial de los cambios previstos, sino también una indicación del nivel de



Fisheries and Oceans Canada.

Estuario del San Lorenzo, Canadá.

incertidumbre. Los especialistas pueden usar este anexo para calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y, en función de ello, proceder entonces a una reevaluación de los límites de las AMP. En vista de la rápida evolución del conocimiento sobre el cambio climático y dado el mejoramiento continuo en las capacidades de predicción al respecto, se espera contar con proyecciones más confiables y específicas del cambio climático durante el proceso de planeación de AMP, de modo que regularmente se deberá considerar información actualizada.

En el **anexo 2** se presentan los efectos generalizados en los componentes del ecosistema como resultado de los cambios oceanográficos provocados por el cambio climático. Se invita a los profesionales a consultar el informe completo (CIEM, 2011a) para obtener más información, incluidas técnicas analíticas, disponibilidad de bases de datos adecuadas y un análisis mucho más detallado del material aquí resumido.

Referencias

- CDB, *Azores Scientific Criteria and Guidance for identifying ecologically or biologically significant marine areas and designing representative networks of marine protected areas in open ocean waters and deep sea habitats*, Secretariado del Convenio sobre Diversidad Biológica, Montreal, Quebec, 2009, <www.cbd.int/marine/doc/azores-brochure-en.pdf>.
- CIEM, *Report of the Study Group on Designing Marine Protected Area Networks in a Changing Climate (SGMPAN)*, 15 a 19 de noviembre de 2010, Woods Hole, Massachusetts, Estados Unidos, ICES CM 2011/SSGSUE:01, 2011a.
- CIEM, *ICES Status Report on Climate Change in the North Atlantic*, ICES Cooperative Research Report [informe de investigación conjunta del CIEM], núm. 310, 2011b.
- CMAP-UICN, *Establishing Marine Protected Area Networks—Making It Happen*, IUCN-WCPA, National Oceanic and Atmospheric Administration y The Nature Conservancy, Washington, D.C., 2008.
- Côté, I. M. y E. S. Darling, *Rethinking ecosystem resilience in the face of climate change*, PLoS Biology doi:10.1371/journal.pbio.1000438.g001, 2010.
- Gaines, S. D., C. White, M. H. Carr y S. R. Palumbi, *Designing marine reserve networks for both conservation and fisheries management*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA [memorias de la Academia Nacional de Ciencia de Estados Unidos] 107(43), 2010, pp. 18286-18293.
- Gjerde, K. M., H. Dotinga, H. Sharelle, E. J. Molenaar, R. Rayfuse y R. Warner, *Regulatory and Governance Gaps in the International Regime for the Conservation and Sustainable Use of Marine Biodiversity in Areas beyond National Jurisdiction*, UICN, Gland, Suiza, 2008.
- Holling, C. S., “Resilience and stability of ecological systems”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, núm. 4, 1973, pp. 1–23.
- NOAA, *Adapting to Climate Change: A Planning Guide for State Coastal Managers*, National Oceanic and Atmospheric Administration, Office of Ocean and Coastal Resource Management, 2010, <<http://coastalmanagement.noaa.gov/climate/adaptation.html>>.
- Perry, R. I., P. Cury, K. Brander, S. Jennings, C. Mollmann y B. Planque, “Sensitivity of marine systems to climate and fishing: concepts, issues and management responses”, *Journal of Sea Research*, núm. 79, 2010, pp. 427–435.
- WCMC-PNUMA, *The State of the World’s Protected Areas 2007: An Annual Review of Global Conservation Progress*, United Nations Environment Programme-World Conservation Monitoring Centre (UNEP-WCMC), Cambridge, 2008.

Línea directriz 1

Proteger especies y hábitats con una función crucial en los ecosistemas o cuya conservación es de particular preocupación

-
- Paso 1** Identificar especies y hábitats con una función crucial en los ecosistemas o cuya conservación es de particular preocupación.
- Paso 2** Identificar las características de las especies y hábitats identificados en el paso 1 que son vulnerables a los efectos previstos del cambio climático.
- Paso 3** Determinar si los efectos del cambio climático en las características vulnerables identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.
- Paso 4** Si los efectos del cambio climático en las características identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.
-

Paso 1

Identificar especies y hábitats con una función crucial en los ecosistemas o cuya conservación es de particular preocupación.

Es importante proteger las especies y los hábitats que parecen “impulsar” o “estructurar” ecosistemas y sus procesos. Es decir, que se consideran “cruciales” ya sea para una especie o grupo de especies en particular, o por su funcionamiento dentro de un ecosistema. La presencia de determinados depredador, presa, especie que se alimenta de pastos marinos, bioingeniero o hábitat puede repercutir en muchos otros miembros de la comunidad, de modo que las consecuencias para el ecosistema resultantes de la reducción o desaparición de su población pueden ser enormes. Si, por ejemplo, se elimina a un depredador, se producirán cambios radicales en la variedad y la densidad de población del resto de las especies de la comunidad. Si se elimina a una presa, las especies que dependen de esa fuente de alimento también podrían reducirse en número o desaparecer. La pérdida de un hábitat y de las funciones ecológicas que provee (por ejemplo, congrega especies para que desoven o se alimenten, u ofrecer refugio a los individuos más jóvenes) podría acarrear cambios en la distribución y abundancia de una especie en particular, así como en toda la estructura de la comunidad. De acuerdo con los criterios internacionales del CDB, las áreas que albergan especies o hábitats con funciones cruciales para los ecosistemas o que revisten un especial interés para la conservación se consideran áreas de importancia ecológica y biológica (AIEB). Sin embargo, no todas las AIEB indican la presencia de especies y hábitats con una función crucial para los ecosistemas; por ejemplo, las AIEB identificadas por sus atributos naturales no lo harían, a diferencia de algunas AIEB identificadas por su singularidad y rareza que sí indicarían dicha presencia.

En el Atlántico norte, **especies de plancton** como el copépodo *Calanus finmarchicus* y el eufáuido *Meganyctiphanes norvegica* sirven de alimento para una amplia gama de especies de importancia comercial y ecológica ubicadas en un nivel trófico superior. La disponibilidad de estos organismos para muchas especies de peces en sus estadios larvario y juvenil tiene un papel fundamental en el éxito del reclutamiento. Los **peces forrajeros** como el capelán (*Mallotus villosus*), el arenque (*Clupea spp.*), la sardina (*Sardinella aurita*) y la anguililla de arena (*Ammodytes spp.*) desempeñan un papel muy similar pues son consumidos por diversos depredadores, como aves marinas, mamíferos marinos, otras

especies de peces y depredadores ápice como los peces de pico (marlín, vela, espada) y los atunes. Estos peces forrajeros cumplen una función crucial en la dinámica de los ecosistemas al transferir la energía del plancton y los peces pequeños a las especies más grandes. El estado de la población de muchos **mamíferos marinos**, sobre todo los cetáceos, depende en gran medida de que haya condiciones favorables para sus presas y, por ende, de que éstas prosperen y haya grandes cantidades de copépodos, calamar y peces forrajeros. De manera similar, muchas **aves marinas** se alimentan de semejantes especies forrajeras y dependen de que haya una población numerosa de, por ejemplo, macarela del Atlántico o caballa (*Scomber scombrus*) para alimentar a sus polluelos. Las **especies depredadoras superiores** como los tiburones y algunos peces de pico y atunes pueden tener un efecto “de arriba hacia abajo” en la estructura de los ecosistemas, pues consumen grandes cantidades de la base de presas. De acuerdo con análisis de su contenido estomacal, el atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) consume las mencionadas especies forrajeras y la variación espacial en la disponibilidad de las presas es el factor que más influye en la distribución de los depredadores superiores.

Las **especies que se alimentan por filtración** —como los mejillones, los ostiones, las almejas y los callos de hacha— se encuentran en hábitats muy diversos (por ejemplo, costas rocosas, arrecifes de coral, planicies lodosas y fondos arenosos). Además de ser acérrimos competidores por el espacio, pueden alterar la composición química de los sedimentos al cavar y la disponibilidad de nutrientes al alimentarse por filtración. Las **especies proveedoras de estructura**, como los arrecifes de coral zooxantelados, alteran el flujo de agua, proporcionan sustrato para organismos sésiles y refugio para individuos juveniles o especies presa, y son centros de forrajeo para diversas especies. Las esponjas y corales (zooxantelados) de agua fría desempeñan funciones ecosistémicas de similar importancia. Los arrecifes de coral brindan servicios ambientales esenciales para decenas de millones de personas en todo el mundo.

Las especies cuya conservación es de particular preocupación son todas aquellas (especies o subespecies) que han visto mermada su abundancia en el largo plazo o que son vulnerables a una disminución significativa debido a baja población, distribución restringida, dependencia de recursos de hábitat limitados o sensibilidad a las perturbaciones ambientales. Estas especies pueden, o no, tener una función crucial en los ecosistemas y estar, o no, protegidas por la legislación.

Un hábitat es el espacio físico donde vive un conjunto de organismos y reúne atributos como tipo de sustrato, rugosidad, profundidad, temperatura, etcétera. Se considera que un hábitat es único si se sabe que no existe en otra parte ninguno igual o sólo existen unos cuantos. Un hábitat es vulnerable si puede ser dañado con facilidad (por causas humanas o naturales) y su recuperación tardará largo tiempo. Los hábitats vulnerables pueden ser únicos, pero también los hay comunes. Su vulnerabilidad puede ser el resultado de la fragilidad física (por ejemplo, un coral) o de la lentitud para recuperarse de los impactos recibidos (por ejemplo, por tener un bajo índice de crecimiento). Es probable que los hábitats vulnerables se vean desproporcionadamente afectados por el cambio climático. Un hábitat puede ser usado de manera transitoria por otras especies para forrajeo, asentamiento o reproducción. En tales casos, los hábitats pueden ser cruciales para la supervivencia de una especie. Por ejemplo, sólo hay seis colonias reproductivas de bobo norteño (*Morus bassanus*) en América del Norte, tres de ellas ubicadas en el golfo de San Lorenzo (*Waterbird Colony Database* [Base de Datos de Colonias de Aves Marinas], Servicio de Vida Silvestre del ministerio de Medio Ambiente de Canadá). Estas aves pasan el invierno en el golfo de México.

Los hábitats únicos, raros o vulnerables suelen ser relativamente reducidos en extensión espacial, pero su relevancia puede ser mucho mayor en escala y afectar los ecosistemas circundantes. También es importante considerar la manera en que el cambio climático puede afectar estos hábitats, así como la escala de tiempo de los efectos. Los hábitats vulnerables pueden resultar dañados con mayor severidad y demorar más en recuperarse cuando por primera vez enfrentan factores de deterioro. Por ejemplo, un solo lance de una red de arrastre puede destruir longevos corales de aguas profundas, cuya recuperación, si acaso es posible, podría llevar cientos de años. En cambio, en comunidades integradas por especies con una elevada tasa de recambio en hábitats con alto nivel de energía, las consecuencias de un lance similar pueden ser mucho más efímeras.

Ejemplo de una situación que podría monitorearse y mitigarse reubicando los límites de un área marina protegida a fin de abarcar el hábitat objetivo

El banco de coral oculina o arbusto de marfil, cerca del borde de la plataforma (70 a 120 metros de profundidad submarina) costa afuera del centro este de Florida, constituye un ejemplo de un hábitat singular y vulnerable. Es el único sitio conocido de arrecifes de *Oculina varicosa*, delicado coral ramificado de aguas profundas (azooxantelado) que puede formar montículos y cimas de decenas de metros de alto. Este hábitat es un próspero sitio de desove y forrajeo para varias especies de peces económicamente importantes, incluidos meros (abadejo, cuna garopa, mero negro, cherna pintada y mero pintarroja) y el jurel de aleta amarilla. Asimismo, el patrón de crecimiento tipo matorral del coral ofrece complejos intersticios que sustentan una comunidad sumamente diversa de moluscos y crustáceos (Reed *et al.*, 1982; Reed y Mikkelsen, 1987; Gilmore y Jones, 1992).

En el banco de coral oculina y las áreas de plataforma adyacentes, la pesca de camarón por arrastre efectuadas durante décadas ha destruido muchas de las cimas de coral (Koenig *et al.*, 2000). La *Oculina varicosa* se rompe fácilmente y crece con suma lentitud, lo que la vuelve particularmente vulnerable a los impactos físicos y de lenta recuperación. El Consejo de Gestión de Pesquerías del Atlántico Sur (*South Atlantic Fishery Management Council*) designó “área de hábitat de particular preocupación” alrededor de 777 kilómetros cuadrados del banco de oculina, designación que protege el resto del hábitat coralino del uso de artes de pesca móviles y otros efectos mecánicos potencialmente dañinos. De hecho, esta protección ha permitido generar un nuevo crecimiento del coral en bloques de trasplante experimental, realizados con el afán de contribuir a la recuperación de los arrecifes de coral oculina. Ya se han avistado grandes meros en el área confinada.

El establecimiento de una AMP alrededor del banco de coral oculina parece haber sido una buena estrategia para mitigar los efectos del arrastre y los impactos de las anclas en este hábitat único y vulnerable. Sin embargo, no queda del todo claro si los efectos del cambio climático —como la mayor temperatura del agua, la acidificación del océano o los regímenes cambiantes de las corrientes— podrían enfrentarse de manera eficaz mediante un área marina protegida. Por ejemplo, si la corriente que lleva alimento a los corales en el banco de *Oculina varicosa* se desplazara más costa afuera, el hábitat dejaría de ser propicio para el crecimiento del coral y los arrecifes restantes morirían, al margen de la existencia de un área protegida. Por otro lado, podrían asentarse nuevos reclutamientos y nuevos montículos de coral crecer en la ruta de la corriente reubicada y el suministro de alimento que ésta arrastre. En este escenario, el hábitat vulnerable podría dejar de estar dentro de la AMP.

Paso 2

Identificar las características de las especies y hábitats identificados en el paso 1 que son vulnerables a los efectos previstos del cambio climático.

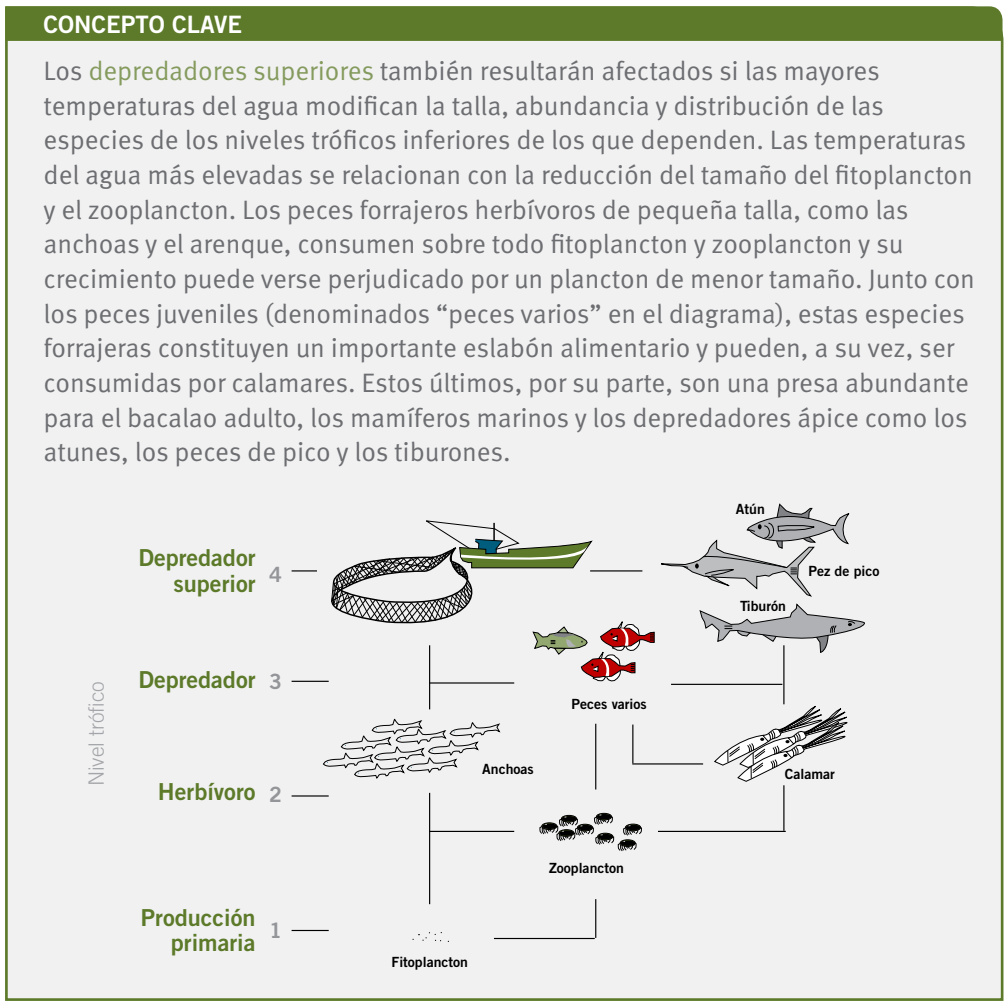
Las **especies de plancton** son muy sensibles a la temperatura del agua, factor que también tiene una fuerte influencia en la talla corporal, el crecimiento, el desarrollo y los índices metabólicos de las especies. Algunas especies de microzooplancton y mesozooplancton son intolerantes a temperaturas del agua más elevadas, mientras que el aumento esperado de megazooplancton —como las medusas— en condiciones de aguas más cálidas puede modificar la disponibilidad del alimento para el ictioplancton y los peces juveniles a causa de la mayor depredación de especies de zooplancton menores. La temperatura cada vez mayor del agua también eleva los niveles de estratificación en la columna de agua y afecta la producción primaria.

Junto con la salinidad y el oxígeno disuelto, la temperatura tiene efectos similares en la fisiología y la distribución de las **especies de peces forrajeros**. Estados Unidos reconoce que las especies forrajeras —por ejemplo, el arenque y la macarela— cumplen un importante papel como alimento para otras especies y que la distribución de las especies presa influye en la distribución de sus depredadores; por consiguiente, dadas sus características covariables de pequeña talla corporal y gran abundancia, las especies forrajeras son el foco de atención de varios planes de gestión basados en los ecosistemas. El arenque, la macarela y otras especies forrajeras pequeñas son particularmente sensibles a los cambios de temperatura y modifican su distribución geográfica en busca de la temperatura que prefieren (Murawski, 1993; Perry *et al.*, 2005).

Los **mamíferos marinos**, en particular las ballenas, son sensibles a la disponibilidad de refugios estacionales adecuados (por ejemplo, aguas sin hielo) para aparearse y parir, así como a la presencia de la presa adecuada. Relativamente a salvo de la caza de ballenas, hoy día la principal afectación para los mamíferos marinos son precisamente los niveles de población de las especies presa, el tráfico y las colisiones de embarcaciones y el enmalle en artes de pesca.

Las **especies de aves marinas** parecen ser oportunistas en cuanto a su alimentación, sensibles tanto a los niveles de población de presas adecuadas como a la disponibilidad de un hábitat adecuado (por ejemplo, acantilados, pantanos, costas rocosas). Todo indica que el bobo norteño es sensible a la disponibilidad de la macarela, mientras que el frailecillo común (*Fratercula arctica*) parece tener una dieta flexible en cuanto a sus presas y, dependiendo de la disponibilidad, cambia del capelán, su preferida, a las anguilillas de arena en estadio poslarvario.

Muchas **especies de depredadores superiores** (por ejemplo, los tiburones, los peces de pico y los atunes, muy buscados en las pesquerías recreativas y comerciales) son al mismo tiempo especies de importancia ecológica y de particular preocupación. Según parece, su abundancia y distribución coincide con ciertas condiciones oceanográficas físicas que les son más favorables y con la disponibilidad de la presa adecuada. Las influencias del cambio climático en el lugar y en el vigor de tales características oceanográficas pueden afectar de manera directa su abundancia y distribución. Otras especies, como las tortugas marinas, son muy sensibles a las perturbaciones antropogénicas en los hábitats donde anidan, se desarrollan y se alimentan (por ejemplo, playas arenosas y lechos de pasto marino).



cercanos a la costa). Un hábitat adecuado se puede ver fácilmente afectado (modificarse o perderse) a causa de los crecientes niveles del mar ocasionados por el cambio climático, por ejemplo.

Se plantea la hipótesis de que los cambios en la temperatura y los movimientos del agua tendrán repercusiones significativas en la distribución y abundancia de los invertebrados bentónicos marinos. La acidificación de los océanos afectará a los organismos bentónicos que usan carbonato de calcio para formar su concha. En estudios recientes sobre especies de importancia comercial, como el ostión, la almeja suave y la almeja de Islandia, se ha documentado el reblandecimiento de su concha y disminuciones en su crecimiento en aguas que registran una acidez cada vez mayor.

En el **anexo 2** se presenta una descripción de los efectos del cambio climático en ciertos componentes de los ecosistemas. Cabe observar que también en el apartado 5.2 del informe del SGMPAN (CIEM, 2011a) se aborda como tema central la manera en que el cambio climático afectará los componentes de los ecosistemas y se identifican fuentes de datos para detectar tales cambios. La selección de componentes de ecosistemas marinos se basa, a grandes rasgos, en las diferentes técnicas de muestreo necesarias para dar seguimiento a los cambios en la abundancia y distribución, así como en la disponibilidad de bases de datos. Los componentes de los ecosistemas abordados incluyen fitoplancton y zooplancton, invertebrados bentónicos, peces, aves marinas, tortugas, mamíferos marinos, plantas (manglares y pastos marinos) y corales. En el apartado 7.3 de dicho informe se describen los métodos estadísticos necesarios para analizar los datos de monitoreo de redes de AMP y tratar de distinguir los efectos del cambio climático de otros factores de cambio antropogénicos y naturales. En términos generales, los enfoques disponibles incluyen métodos estadísticos para determinar la relación entre las variables de respuesta a una o más variables independientes que representan los forzadores climáticos y otros factores cambio.

Paso 3

Determinar si los efectos del cambio climático en las características vulnerables identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.

No todas las características vulnerables a los efectos del cambio climático necesariamente responderán al confinamiento espacial o establecimiento de áreas protegidas, y ello incluye hábitats (como los corales) y especies (como el zooplancton formado por crustáceos copépodos) de importancia ecológica. Tal es el caso, por ejemplo, de los organismos calcificadores marinos, cuyos exoesqueletos podrían ser vulnerables a la acidificación oceánica ocasionada por los cambios atmosféricos (véase el **anexo 2**).

Paso 4

Si los efectos del cambio climático en las características identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.

Consúltese el **anexo 1** de este informe para tener un panorama detallado de las propiedades físicas (atmosféricas y oceanográficas) para las que se prevén cambios en las próximas décadas, lo que incluye no sólo la dirección, magnitud y extensión espacial de los cambios, sino también una indicación del nivel de incertidumbre. Los especialistas pueden usar este anexo para calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y, así, proceder a una reevaluación de los límites de las áreas marinas protegidas.

El ejemplo del “coto de la platija”

En 1989 se estableció un área parcialmente confinada, el “coto de la platija”, en el mar del Norte con el propósito de reducir el descarte de platijas de talla inferior. El coto de la platija ha tenido una eficacia limitada porque las platijas juveniles se desplazaron costa afuera, más allá del área protegida, al aumentar la temperatura del agua (Van Keeken *et al.*, 2007). Este ejemplo pone de relieve la necesidad de reevaluar las fronteras de las AMP a intervalos apropiados frente a condiciones ambientales cambiantes.

Referencias

- Beaugrand, G., C. Luczak y M. Edwards, "Rapid biogeographical plankton shifts in the North Atlantic Ocean", *Global Change Biology*, núm.15, 2009, pp. 1790-1803.
- Burek, K. A., F. M. D. Gulland y T. M. O'Hara, "Effects of climate change on Arctic marine mammal health", *Ecological Applications*, núm. 18, 2008, pp. 126-134.
- Cochrane, K., C. de Young, D. Soto y T. Bahria (comps.), "Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos", Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, núm. 530, FAO, Roma, 2009.
- Gilmore, R. G. y R. S. Jones, "Color variation and associated behavior in the epinepheline groupers, *Mycteroperca microlepis* (Goode and Bean) and *M. phenax* (Jordan and Swain)", *Bull. Mar. Sci.*, núm. 51(1), 1992, pp. 83-103.
- Koenig, C. C., F. C. Coleman, C. B. Grimes, G. R. Fitzhugh, C. T. Gledhill, K. M. Scanlon y M. A. Grace, "Protection of fish spawning habitat for the conservation of warm temperate reef fish fisheries of shelf-edge reefs of Florida", *Bull. Mar. Sci.*, núm. 66(3), 2000, pp. 593-616.
- Koenig, C. C., A. N. Shepard, J. K. Reed, F. C. Coleman, S. D. Brooke, J. Brusher y K. Scanlon, "Habitat and fish populations in the deep-sea *Oculina* coral ecosystem of the Western Atlantic", *Proceedings of the Benthic Habitat Meeting*, American Fisheries Society, publicación especial, Tampa, Florida, 2004.
- Murawski, S. A., "Climate change and marine fish distributions: forecasting from historical analogy", *Trans. Am. Fish Soc.*, núm. 122(5), 1993, pp. 647-658.
- Oedekoven, C.S., D. G. Ainley y L. B. Spear, "Variable responses of seabirds to change in marine climate: California Current 1985-1994", *Marine Ecology Progress Series*, núm. 212, 2001, pp. 265-281.
- Perry, A. K, P. J. Low, J. R. Ellis y J. D. Reynolds, "Climate change and distribution shifts in marine fishes", *Science*, núm. 308(5730), 2005, pp. 1912-1915.
- Reed, J. K., R. H. Gore, L. E. Scotto y K. A. Wilson, "Community composition, structure, areas and trophic relationships of decapods associated with shallow and deep water *Oculina varicosa* reefs.", *Bull. Mar. Sci.*, núm. 32, 1982, pp. 761-786.
- Reed, J. K. y P. M. Mikkelsen, "The Molluscan community associated with the scleractinian coral *Oculina varicosa*", *Bull. Mar. Sci.*, núm. 40, 1987, pp. 99-131.
- Turley, C. M., J. M. Roberts y J. Guinotte, "Corals in deep-water: will the unseen hand of ocean acidification destroy cold-water ecosystems?", *Coral Reefs*, núm. 26, 2007, pp. 445-448.

Línea directriz 2:

Proteger posibles sumideros de carbono

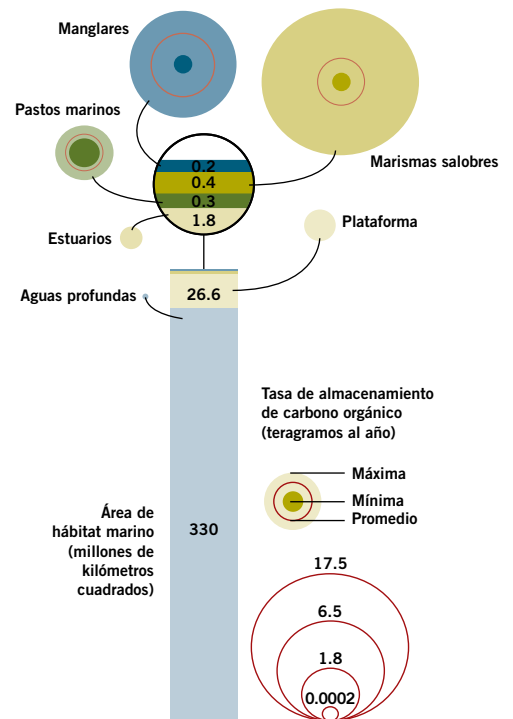
- Paso 1** Identificar hábitats y especies que funcionen como posibles sumideros de carbono.
- Paso 2** Describir el sistema de flujos de carbono, incluidas fuentes de carbono además de los sumideros identificados en el paso 1.
- Paso 3** Determinar si el sistema de flujos de carbono es vulnerable a efectos del cambio climático que pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.
- Paso 4** Si los efectos del cambio climático en el sistema de flujos de carbono identificados en el paso 3 pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular las tendencias y la escala de tiempo en las que se espera que el sistema responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.

Las mayores emisiones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) están contribuyendo al cambio climático. Las AMP y sus redes constituyen herramientas importantes que pueden contribuir a mitigar los efectos del cambio climático al preservar y proteger las especies, ecosistemas y hábitats costeros y marinos cruciales para el secuestro de carbono. Estas redes también pueden generar cobeneficios para la seguridad alimentaria y la protección de los litorales. Sin embargo, como muchos de estos ecosistemas son costeros y estuarinos, resultan afectados por una serie de factores de deterioro —por ejemplo, efectos originados tierra adentro— y requerirán estrategias de gestión integrada.

Un **sumidero de carbono** puede definirse como cualquier proceso, actividad o mecanismo que elimina de la atmósfera un GEI, un aerosol o un precursor de GEI o de aerosol (IPCC, 2007). Un sumidero de carbono es, pues, un reservorio de carbono. Por su parte, un “sumidero azul de carbono” es aquel donde organismos vivos capturan carbono en los sedimentos de manglares, marismas salobres y pastos marinos (véase la **gráfica 4**). El proceso por el que se forman los sumideros de carbono recibe el nombre de **secuestro de carbono** (Chopra *et al.*, 2005).

Los hábitats que actúan como sumideros naturales de carbono revisten una importancia crucial requieren una gestión apropiada para asegurar que retengan la mayor cantidad posible del carbono atrapado en el sistema y no tiendan a convertirse en “fuentes” de emisión a la atmósfera como resultado de una gestión deficiente. Con frecuencia, la emisión de carbono atrapado en forma de dióxido de carbono va acompañada de la liberación de otros GEI potentes como el metano, lo que exagera las preocupaciones por el clima mundial (Laffoley y Grimsditch, 2009).

Gráfica 4 Sumidero azul de carbono



Fuente: Nellemann *et al.*, 2009.

Fitoplancton y sumideros de carbono azules

El fitoplancton pequeño tiene menores tasas de hundimiento y mayores relaciones área de superficie/volumen que maximizan la absorción y la competencia por nutrientes limitados en condiciones de temperaturas oceánicas más cálidas. Se espera que con las mayores temperaturas ocasionadas por el cambio climático se produzcan cambios similares en la estructura de talla de la comunidad de plancton (Finkel *et al.*, 2010). Estas disminuciones en la talla del fitoplancton también tendrán implicaciones para el secuestro de carbono y los ciclos biogeoquímicos.

Las células grandes desempeñan un importante papel pues se hunden con mayor rapidez al envejecer; además, es más eficiente el pastoreo de estas células por formas más grandes de zooplancton, cuyas heces fecales se sumergen a mayor velocidad por ser también más grandes. Así, la pérdida de células grandes puede reducir las tasas de secuestro de carbono.

Por otra parte, las salpas y las apendicularias consumen partículas pequeñas, incluido el fitoplancton de menor talla que los copépodos no pastorean, y producen heces fecales densas que se hunden rápidamente, lo que contribuye de manera significativa al secuestro de carbono (Pfannkuche y Lochte, 1993; Urban *et al.*, 1993).

Así, las AMP actuales y las que posiblemente haya en el futuro deben evaluarse, de manera individual y regional, en relación con su capacidad de secuestro de carbono, teniendo en cuenta no sólo los ecosistemas y la composición de especies, sino también su integridad biológica (funcionamiento). En comparación con una AMP individual, una red de AMP ofrece, entre otros beneficios, el de asegurar que: 1) se están protegiendo los mejores sitios para sumideros de carbono, y 2) se está protegiendo un número suficiente de estos sitios (número y tamaño).

Paso 1

Identificar hábitats y especies que funcionen como posibles sumideros de carbono.

Los océanos del mundo son el principal sumidero de dióxido de carbono. Las marismas salobres de marea, los manglares, el pasto marino y el kelp constituyen los hábitats marinos con mayores capacidades como sumideros de carbono (Laffoley y Grimsditch, 2009; Nellemann *et al.*, 2009). Lamentablemente, actividades humanas como el desarrollo costero han hecho que el tamaño de estos hábitats disminuya en todo el mundo, pérdida que, a su vez, conlleva una pérdida en la capacidad de secuestro de carbono. En la **gráfica 5** se ilustra el alarmante empequeñecimiento del hábitat de pasto marino en todo el mundo en los últimos 60 o 70 años.

Se ha señalado que la biomasa y la productividad de otras especies y poblaciones tienen implicaciones para el secuestro de carbono. Los organismos más pequeños también constituyen un sumidero de carbono considerable. De acuerdo con investigaciones recientes, el fitoplancton efectúa cerca de 50 por ciento de los procesos de fijación de carbono del océano (Jardillier *et al.*, 2010).

Gráfica 5 Pérdida mundial de un sumidero de carbono: los pastos marinos



Fuente: WCMC-PNUMA, 2009; Waycott *et al.*, 2009.

CONCEPTO CLAVE

Los océanos desempeñan un importante papel en el ciclo global del carbono. No sólo representan el mayor sumidero de carbono de largo plazo, sino que también redistribuyen el CO₂ que captan. Alrededor de 93 por ciento del CO₂ del planeta (40 teratoneladas) se almacena y circula por medio de los océanos. De todo el carbono biológico secuestrado en el mundo, más de la mitad (55 por ciento) es capturado por organismos marinos vivos (Nellemann *et al.*, 2009). Si se pierden esos hábitats y organismos marinos, se perderá también dicha capacidad.

Paso 2

Describir el sistema de flujos de carbono, incluidas fuentes de carbono además de los sumideros identificados en el paso 1.

Los ecosistemas costeros y marinos también producen carbono orgánico e inorgánico, dióxido de carbono y metano que, dependiendo de varias condiciones bióticas y abióticas (hidrodinámica, microorganismos productores de metano, temperatura del agua, etc.), se liberan al medio ambiente o se capturan en el agua, los sedimentos o las estructuras biológicas. Se puede elaborar un plan de gestión mediante la identificación de las condiciones ambientales y de las escalas de espacio y tiempo en que ocurren los procesos de flujo de carbono generados por las emisiones o la captura de carbono (es decir, identificando tanto las fuentes como los sumideros para preservar los sistemas).

Los organismos que son importantes para crear y modificar hábitats, como las especies fundadoras (productores primarios dominantes como las marismas salobres, los manglares y el kelp) y los ingenieros del ecosistema (cualquier organismo que crea, construye o modifica un hábitat, como los corales y los bioturbadores), pueden causar algunos de los efectos más profundos e irreversibles en los ecosistemas en respuesta al cambio climático (Jordan y Scheuring, 2002). Por ello, el mantenimiento de estas especies fundadoras e ingenieros del ecosistema es esencial para asegurar la resiliencia de los ecosistemas al cambio climático, meta que coincide con la eficiencia de los ciclos biogeoquímicos del carbono.

Paso 3

Determinar si el sistema de flujos de carbono es vulnerable a efectos del cambio climático que pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.

El ciclo del carbono podría verse afectado por varias condiciones relacionadas con el cambio climático (acidificación de los océanos, temperaturas más cálidas, fuerza de los vientos) que deben identificarse local y regionalmente a escala de los ecosistemas y también de las poblaciones o las especies.

Las medidas propuestas deben incluir la elaboración de un mapa integrado del área biogeográfica o ecorregión marina objetivo, en el que se documenten todos los tipos de sumideros de carbono marinos y costeros, a fin de identificar, mediante una evaluación de riesgos, aquéllos cuya preservación es una necesidad más apremiante y donde es factible emprender acciones de mitigación. Aunque este proceso puede iniciarse en diferentes escalas (local y regional), para lograr una plena identificación de las influencias de largo alcance se requiere una visión con una escala espacial suficientemente amplia que permita ubicar las áreas más críticas para el secuestro de carbono en una dimensión oceánica, que es precisamente en la que algunos de estos sistemas de flujo de carbono operan.

Paso 4

Si los efectos del cambio climático en el sistema de flujos de carbono identificados en el paso 3 pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular las tendencias y la escala de tiempo en las que se espera que el sistema responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.

Es probable que las interacciones directas e indirectas derivadas de una serie de cambios en el clima (por ejemplo, frecuencia e intensidad de las tormentas) tengan efectos de gran magnitud en la producción y el almacenamiento de carbono. Entender más a fondo los procesos por medio de modelos

predictivos, así como de monitoreo *in situ*, permitirá establecer mejores programas de gestión para maximizar la absorción de carbono dentro de una red de áreas marinas protegidas.

Consúltese el **anexo 1** de este informe para tener un panorama detallado de las propiedades físicas (atmosféricas y oceanográficas) para las que se prevén cambios en las próximas décadas, lo que incluye no sólo la dirección, magnitud y extensión espacial de los cambios, sino también una indicación del nivel de incertidumbre. Los especialistas pueden usar este anexo para calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y, así, proceder a una reevaluación de los límites de las áreas marinas protegidas.

Referencias

- Chopra, K., R. Leemans, P. Kumar y H. Simons, *Ecosystems and Human Well-being: Policy responses*, vol. 3: *Findings of the Responses Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*, Island Press, Washington, Covelo, Londres, 2005.
- Finkel, Z. V., J. Beardall, K. J. Flynn, A. Quigg, A. V. Rees y J. A. Raven, "Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry", *Journal of Plankton Research*, núm. 32, 2010, pp. 119-137.
- Jardillier, L., M. V. Zubkov, J. Pearman, D. J. Scanlan, "CO₂ fixation by small prymnesiophytes in the subtropical and tropical northeast Atlantic Ocean", *The ISME Journal: Multidisciplinary Journal of Microbial Ecology*, núm. 4(9), 2010, pp. 1180-1192.
- Laffoley, D. d'A. y G. Grimsditch (comps.), *The management of natural coastal carbon sinks*, UICN, Gland, Suiza, 2009.
- Nellemann, C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdés, C. de Young, L. Fonseca y G. Grimsditch (comps.), *Blue Carbon—The Role of Healthy Oceans in Binding Carbon. A Rapid Response Assessment*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, GRID-Arendal, 2009.
- Pfannkuche, O. y K. Lochte, "Open ocean pelago-benthic coupling: cyanobacteria as tracers of sedimenting salp faeces", *Deep-Sea Research I*, núm. 40, 1993, pp. 727-737.
- Urban, J., C. H McKenzie y D. Deibel, "Nanoplankton found in fecal pellets of macrozooplankton in coastal Newfoundland waters", *Botánica Marina*, núm. 36, 1993, pp. 267-281.

Línea directriz 3

Proteger los vínculos ecológicos y las rutas de conectividad de una amplia gama de especies

- Paso 1** Identificar posibles vínculos ecológicos e inductores físicos como las corrientes imperantes.
 - Paso 2** Construir y aplicar modelos dinámicos de movimiento y migración de adultos para poner a prueba la conectividad hipotética entre áreas, lo que incluye posibles regiones fuente-sumidero y patrones migratorios.
 - Paso 3** Elaborar y aplicar modelos dinámicos de transporte de larvas para estimar la conectividad entre regiones e identificar fuentes y sumideros.
 - Paso 4** Determinar si los vínculos y rutas críticos antes identificados son vulnerables a efectos del cambio climático que pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.
 - Paso 5** Si los efectos en los vínculos y rutas antes identificados pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular la escala de tiempo y las distancias en las que se espera que tales vínculos y rutas respondan al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.
-

Desde el punto de vista de la ecología, la **conectividad** es el intercambio de individuos entre poblaciones geográficamente separadas. Establecer redes de AMP que optimicen la conectividad es algo con lo que constantemente deben lidiar los planificadores de áreas marinas protegidas. En el ámbito de la gestión pesquera, por ejemplo, si se crea una AMP demasiado pequeña, las larvas que se asienten en ésta serán insuficientes para sostener la población. Ello disminuye la conectividad general porque pocos organismos se mantendrán dentro de la AMP “conectándose” con aquellos que están fuera, y la mayoría simplemente migrará. Por otro lado, en una AMP demasiado grande, las larvas se asientan y los individuos juveniles no salen de ahí, lo que reduce los beneficios del derrame o exportación de larvas y adultos hacia las áreas contiguas. Esto, a su vez, disminuye la conectividad general porque pocos organismos de la AMP saldrán y se “conectarán” con organismos de esas áreas contiguas. Quizá la conectividad resulta más evidente en el movimiento de las especies, pues la mayoría de los ecosistemas marinos mantienen sólidas conexiones con ecosistemas adyacentes y distantes gracias al movimiento de organismos juveniles y adultos a través de sus fronteras (Shanks *et al.*, 2003; Planes *et al.*, 2009).

La variación entre especies en la conectividad de adultos o larvas puede generar dificultades cuando se crea una red de AMP con el propósito de aumentar la biomasa de una determinada serie de especies. El espaciamiento entre AMP individuales óptimo para una especie tal vez no sea el apropiado para otras cuya etapa larvaria observa una duración diferente. En el caso de las especies sedentarias, un gran número de AMP pequeñas puede ser óptimo para maximizar la exportación de larvas. En cambio, para las especies más móviles, unas cuantas AMP grandes, que aumenten la probabilidad de que los adultos permanezcan dentro de ellas, probablemente sea una solución más apropiada. Las redes de AMP deben incluir áreas de diversos tamaños y con diferentes espaciamientos si el movimiento de larvas y adultos varía mucho entre especies. Se puede aplicar un enfoque “de peldaños” (*stepping-stone*) para proteger hábitats de especies migratorias que se sabe son esenciales y están muy espaciados (por ejemplo, una zona esencial de alimentación y reproducción de ballenas). Además, contar con una red de AMP bien

estructurada que incorpore hábitats representativos y AIEB, y aplique el principio de redundancia o replicación, asegurará cierto grado de conectividad. Las medidas convencionales o la gestión basada en cuotas en zonas fuera de las AMP pueden también ayudar a reducir los efectos dispares de las AMP en especies con distintos patrones de movimiento. Las comunidades asociadas con arrecifes u otras estructuras pueden tener más coherencia en el movimiento de adultos y, por ende, ser especialmente atractivas para establecer una AMP u otro tipo de programa de gestión basado en el espacio. Sin embargo, el cambio climático podría alterar los patrones de conectividad al modificar la duración del estadio larvario, los patrones de movimiento de los adultos y la distribución de las especies. Dada la importancia de la conectividad para el establecimiento de las redes de AMP, entender las influencias del cambio climático en los diferentes componentes de la conectividad sigue siendo una necesidad fundamental para la investigación.

Paso 1

Identificar posibles vínculos ecológicos e inductores físicos como las corrientes imperantes.

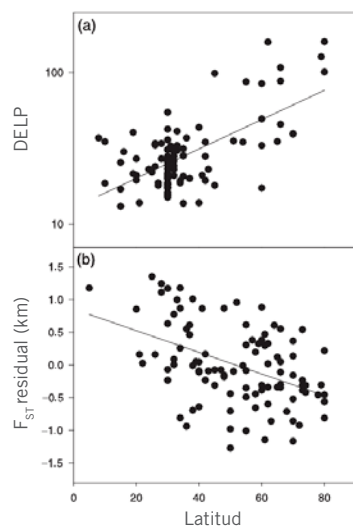
Entre las especies marinas, la **conectividad de la población** es una característica esencial que tiene una relevancia directa para la escala y el espaciamiento de las redes de AMP. La duración de los estadios larvarios planctónicos de las distintas especies de peces e invertebrados marinos representa un índice del potencial de conectividad que varía en pequeñas escalas y de una región biogeográfica a otra (véase la **gráfica 6**). La disminución del aislamiento reproductivo que las mayores duraciones de los estadios larvarios planctónicos traen consigo y la relación negativa entre esas duraciones y la temperatura, tanto para cada especie como entre ellas (O'Connor *et al.*, 2007), indican ambas que los cambios en las corrientes oceánicas, la estratificación y la temperatura afectarán la dispersión y la supervivencia de poblaciones durante esta etapa de la historia de vida.

Además de la dispersión pasiva, los organismos que se desplazan activamente por el paisaje y conectan hábitats en espacio y tiempo (“**organismos que fungen como enlaces móviles**”: Lundberg y Moberg, 2003) pueden contribuir de manera importante a la resiliencia de los ecosistemas marinos. Estos organismos que fungen como enlaces móviles pueden ser componentes esenciales en la dinámica de desarrollo y la resiliencia de los ecosistemas porque ofrecen una capacidad amortiguadora entre sitios y pueden ser fuentes de recolonización luego de una perturbación. Sin embargo, aún no se conoce bien su función en la dinámica de los ecosistemas y se desconoce si la probabilidad de que ocurran efectos de arriba hacia abajo aumenta cuando se reúnen depredadores móviles grandes en áreas o ecosistemas específicos. La

ESTUDIO DE CASO

Para ayudar a reconstruir las poblaciones de peces de fondo y ostras, a partir de diciembre de 1994 se cerraron tres grandes áreas del banco de Georges y los bajos de Nantucket a la mayor parte de la pesca de arrastre y la extracción de ostras con draga. Anteriormente, estas áreas sólo se cerraban en la primavera y tenían el propósito de proteger las congregaciones de peces de fondo para el desove. Unas cuantas poblaciones —la vieira americana (*Placopecten magellanicus*), el eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*) y la platija amarilla (*Limanda ferruginea*)— han registrado aumentos sustanciales al interior de las áreas confinadas. Sin embargo, muchas otras especies, como el bacalao del Atlántico (*Gadus morhua*), han mostrado poca o ninguna respuesta (Murawski *et al.*, 2000, 2005; Stone *et al.*, 2002; Hart y Rago, 2006; O'Brien *et al.*, 2008), porque tienden a salir de estas áreas en los meses más cálidos. Este ejemplo demuestra que es necesario considerar los patrones migratorios cuando se trata de proteger durante todo el año a especies como el bacalao. También pone de relieve la necesidad de considerar los objetivos de conservación originales de una AMP o una red de AMP cuando se suman nuevos objetivos a un sitio ya delimitado.

Gráfica 6 Relación entre flujo de genes y dispersión en poblaciones de peces marinos



Características generales de la relación entre el flujo de genes (expresado como F_{ST}) y la dispersión en poblaciones de peces marinos.

a) Duración de los estadios larvarios planctónicos (DELDP) de 96 especies de peces marinos en comparación con la latitud máxima (norte o sur) ocupada por tales especies.

b) F_{ST} residual en comparación con la latitud máxima (norte o sur) ocupada por cada una de cien especies de peces marinos.

Fuente: Laurel y Bradbury, 2006.

escasez de datos científicos sobre los patrones migratorios de los organismos que fungen como enlaces móviles y su uso de áreas geográficamente separadas representa un obstáculo fundamental para tener una comprensión cabal de la conectividad y su contribución a la resiliencia de los ecosistemas. No obstante, el surgimiento de dispositivos de marcaje electrónico en la última década empieza a generar interesantes datos sobre las patrones de movimiento de estas y otras especies.

Una característica fundamental de las poblaciones de especies migratorias es la **flexibilidad en las rutas migratorias**. Al ser elevada, esta flexibilidad puede conferir cierta resiliencia al cambio climático en las poblaciones de grandes ballenas, tortugas marinas, atunes, peces espada, tiburones y aves marinas. Ahora bien, otros factores entran en juego. Gracias a su tolerancia a un amplio intervalo de temperaturas, los peces pelágicos grandes, como el atún aleta azul (*Thunnus thynnus*), pueden ser capaces de adaptarse a temperaturas variables durante la migración y mientras se encuentran en sus zonas de alimentación, (Walli *et al.*, 2009); no obstante, son sumamente sensibles a la temperatura de la superficie del mar en sus zonas de desove en el golfo de México (Teo *et al.*, 2007), lo que reducirá ahí su resiliencia al cambio climático. Las ballenas barbadas migratorias quizá sean bastante resilientes al cambio climático, pero hoy enfrentan travesías más largas y menores oportunidades de alimentarse (Learmonth *et al.*, 2006); la posible pérdida de sitios de reposo y las rutas migratorias aún más extensas como consecuencia del cambio climático probablemente tengan efectos nocivos en su capacidad adaptativa.

Conexiones de las redes alimentarias

Las interacciones tróficas también mantienen conexiones de **redes alimentarias** dentro de los ecosistemas y entre éstos. Las alteraciones inducidas por el cambio climático en la disponibilidad de recursos en el extremo inferior de las redes alimentarias se propagarán hacia arriba, lo que modificará la abundancia en los niveles tróficos superiores. Además, las alteraciones estructurales en lo que respecta a la abundancia o la talla corporal de las **especies de niveles tróficos superiores** pueden precipitar, directa o indirectamente, cambios en la abundancia de los niveles tróficos inferiores por medio de la depredación (Deegan *et al.*, 2007), así como alteraciones en el comportamiento de otras especies (Heithaus *et al.*, 2008). Gracias al trabajo de muchos años con distintas especies, desde comunidades en costas rocosas hasta nutrias marinas y tiburones, se ha establecido que los depredadores superiores ejercen una profunda influencia en la estructura y la función de los ecosistemas marinos. Un tipo específico de efecto de arriba hacia abajo, denominado “cascada trófica”, es un patrón alternante de mayor y menor abundancia en niveles tróficos cada vez más bajos (Terborgh y Estes, 2010). En algunos ecosistemas,

la pérdida de herbívoros en los arrecifes de coral o de nutrias marinas en los bosques de kelp ocasiona cambios de arriba hacia abajo que originan un viraje de gran alcance en la estructura y el flujo de energía de los ecosistemas. Como consecuencia, la condición de la red alimentaria es un factor determinante para la resiliencia de muchos ecosistemas. Así se explica, por ejemplo, la reducida resiliencia a los efectos de los huracanes que muestran los arrecifes de coral mexicanos sometidos a una pesca intensiva. Investigar cómo el cambio climático repercute en la importancia relativa de los factores de forzamiento de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba resulta crucial para entender la conectividad trófica y la resiliencia de los ecosistemas (Hoekman, 2010).

Paso 2

Construir y aplicar modelos dinámicos de movimiento y migración de adultos para poner a prueba la conectividad hipotética entre áreas, lo que incluye posibles regiones fuente-sumidero y patrones migratorios.

Las tasas de movimiento de adultos pueden inferirse a partir de los datos obtenidos mediante el marcaje (véanse, por ejemplo, Quinn y Deriso, 1999, cap. 10, y Miller y Anderson, 2008). Hay tres tipos característicos de movimiento de adultos: trayecto aleatorio (difusivo), movimiento migratorio periódico y movimiento dirigido no periódico. El trayecto aleatorio puede ocurrir debido a un comportamiento de forrajeo de pequeña escala o a la huida de los depredadores. El movimiento migratorio periódico ocurre cuando una especie se traslada de acuerdo con las estaciones u otras escalas de tiempo periódicas; esto incluye no sólo migraciones de gran escala, sino también el movimiento estacional regular costa adentro-costa afuera y el movimiento estacional relacionado con la densidad de las poblaciones de presas. El movimiento dirigido no periódico, por su parte, ocurre en casos como el del movimiento ontogenético (por ejemplo, de menores a mayores profundidades).

El movimiento aleatorio o difusivo se puede modelar mediante modelos de trayecto aleatorio (estocásticos) o de difusión (ecuación diferencial parcial). A ambos enfoques de modelación puede agregarse el movimiento dirigido, con lo que entonces se convierten en modelos de trayecto aleatorio con deriva y de advección-difusión, respectivamente. La modelación del movimiento variable, tanto entre especies como entre individuos en una especie, es posible mediante modelos basados en individuos. Un enfoque más sencillo consiste en usar modelos de metapoblación o de caja (Tuck y Possingham, 2000). En la versión para una sola AMP, se modelarían poblaciones dentro y fuera de la AMP como subpoblaciones bien combinadas. Las subpoblaciones se vinculan mediante parámetros de movimiento entre dos áreas. Este enfoque se puede ampliar fácilmente para incluir tanto múltiples AMP como múltiples zonas de pesca. Aunque es mucho más sencillo que los enfoques estocásticos o de ecuaciones diferenciales parciales, este modelo requiere estimar por fuera los parámetros de movimiento. Como se señaló ya, gran parte de la bibliografía sobre AMP se centra en los sistemas de arrecifes de coral, donde la mayoría de los peces permanece en un arrecife específico, de modo que se puede soslayar el movimiento de adultos que salen de él. En los sistemas que carecen de una estructura definitoria como la de un arrecife de coral, cabe esperar mayores niveles de movimiento, al igual que una mayor variabilidad en el movimiento entre especies o incluso entre individuos en una misma especie. En tales casos, la propuesta de establecimiento de una red de AMP debe ponerse a prueba usando un modelo de especies múltiples que incluya el movimiento de adultos. Los datos genéticos, biogeoquímicos y de marcaje pueden ayudar a reunir información sobre el movimiento de adultos.

Paso 3

Elaborar y aplicar modelos dinámicos de transporte de larvas para estimar la conectividad entre regiones e identificar fuentes y sumideros.

El movimiento de larvas, en especial la magnitud de la exportación o derrame de larvas a partir de una AMP, también puede ser una importante consideración en la creación de una red de AMP. En algunos casos, los procesos que dependen de la densidad después del asentamiento pueden limitar los efectos del suministro de larvas para reclutamiento. En particular, el transporte y el suministro de larvas pueden resultar irrelevantes para la dinámica poblacional si antes de que se establezca una AMP hay ya suficientes larvas para inducir una saturación de reclutamiento. Aparentemente, éste fue el caso

de las vieiras del banco de Georges, cuyo reclutamiento no ha registrado aumento significativo alguno a pesar de que la biomasa de vieiras se incrementó en más de un orden de magnitud dentro de tres grandes AMP luego de que sus aguas se confinaron (Hart y Rago, 2006).

El transporte de larvas es un problema con un doble componente: tanto biológico como físico, y con una gran influencia en la conectividad biológica de los ecosistemas marinos (Cowen *et al.*, 2006). Los factores que inciden en el crecimiento, la supervivencia y la distribución de las larvas de peces (por ejemplo, temperatura y abundancia del zooplankton) reciben, a su vez, la influencia del movimiento del agua (Werner *et al.*, 2007). Por este motivo, además de los modelos biológicos del organismo, se requieren modelos espacialmente explícitos de la circulación para entender la dispersión y el movimiento de las larvas de peces (DeYoung *et al.*, 2010). Diversas características de la circulación costera influyen en el movimiento y la dinámica de las larvas, entre otras: las corrientes inducidas por el viento y la flotabilidad; los frentes y corrientes de chorro asociadas; las olas (incluidas corrientes residuales, olas internas y olas de marea), y las capas límite de superficie y de fondo. En su mayoría, estos modelos se han aplicado a larvas planctónicas, por ser ésta la etapa en la que el movimiento está inducido principalmente por corrientes. Por tanto, los modelos deben considerar la variabilidad del comportamiento de las larvas y la duración entre especies y dentro de las especies, así como la variabilidad interanual en el transporte físico (por ejemplo, fuerza de los giros oceánicos y ubicación de las zonas frontales). Los datos genéticos o bioquímicos pueden ayudar a confirmar las conexiones planteadas como hipótesis.

El avance en los modelos de circulación oceánica costera —hoy a menudo insertos en modelos de mayores dimensiones, ya sea regionales, de cuencas o mundiales— ha permitido el estudio cuantitativo de los procesos físicos que determinan el transporte de larvas. Lo más común es representar a los organismos como individuos dentro del modelo. Estos individuos pueden tener diversos grados de realismo biológico: desde ninguno (lo que significa que sólo son partículas) hasta modelos de crecimiento y comportamiento bastante realistas que incluyen aspectos como las interacciones depredador-presa. La representación individual permite incluir comportamientos como la migración vertical diaria, comportamiento importante de muchos organismos marinos que con frecuencia raya en la dispersión.

Estos modelos se han usado para determinar las rutas de los peces en etapa larvaria desde las zonas de cría hasta las de asentamiento; la retención en bancos submarinos; la dispersión de largo plazo por medio de corrientes de marea, y la influencia de la variabilidad interanual en la dispersión. Aunque en algunos de estos modelos se incluye una representación explícita de la depredación y la alimentación, en la mayoría se usa un valor sustituto, como la temperatura, para modelar el crecimiento.

Asimismo, estos modelos se han aplicado ya para explorar directamente la variabilidad interanual, por lo general mediante simulaciones retrospectivas, pero también pueden servir para un pronóstico basado en simulación si se les acopla o relaciona con simulaciones de pronóstico climático. Por ejemplo, hay versiones de simulaciones climáticas mundiales que incluyen modelos de plataforma de alta resolución a los que se pueden acoplar modelos biológicos. Esos modelos pueden usarse entonces para explorar cómo podría cambiar la dinámica de dispersión en el futuro. Aun sin ese acoplamiento explícito a modelos climáticos, tal análisis podría llevarse a cabo simplemente tomando los pronósticos resultantes de esos modelos, por ejemplo, los campos de temperatura del océano, y determinando de qué manera un campo de temperatura cambiante en un planeta más cálido podría influir en la dispersión de larvas.

Paso 4

Determinar si los vínculos y rutas críticos antes identificados son vulnerables a efectos del cambio climático que pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.

En los pasos 2 y 3 anteriores se ofrecen algunas pautas para identificar y modelar cambios biofísicos esperados. Una vez que se identifican los posibles vínculos ecológicos y se elaboran suficientes modelos, el conocimiento adquirido con el producto de los modelos permitirá tener una mejor idea de cómo configurar una red de AMP que mejore la conectividad y si estas conexiones son suficientes para resistir los efectos que, según las previsiones, traerá consigo el cambio climático. De ser posible, deberán modelarse redes alimentarias conocidas para determinar si cabe esperar una interrupción o alteración en los vínculos y rutas críticas en el contexto del cambio climático.

Paso 5

Si los efectos en los vínculos y rutas antes identificados pueden mitigarse mediante AMP, aisladas o en red, los especialistas deben calcular la escala de tiempo y las distancias en las que se espera que tales vínculos y rutas respondan al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.

Consúltese el **anexo 1** de este informe para tener un panorama detallado de las propiedades físicas (atmosféricas y oceanográficas) para las que se prevén cambios en las próximas décadas, lo que incluye no sólo la dirección, magnitud y extensión espacial de los cambios, sino también una indicación del nivel de incertidumbre. Los especialistas pueden usar este anexo para calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y, así, proceder a una reevaluación de los límites de las áreas marinas protegidas.

Referencias

- Cowen, R. K., C. B. Paris y A. Srinivasan, "Scaling of connectivity in marine populations", *Science*, núm. 311, 2006, pp. 522-527.
- Deegan, L. A., J. L. Bowen, D. Drake, J. W. Fleeger, C.T. Friedrichs, K. A. Galván, J. E. Hobbie, C. Hopkinson, J. M. Johnson, D. S. Johnson, L. E. Lemay, E. Miller, B. J. Peterson, C. Picard, S. Sheldon, J. Vallino y R. S. Warren, "Susceptibility of salt marshes to nutrient enrichment and predator removal", *Ecological Applications*, núm. 17, 2007, pp. 42-63.
- DeYoung, B., F. Werner, H. Batchelder, F. Carlotti, O. Fiksen, E. E. Hofmann, S. Kim, H. Yamazaki y M. Kishi, "Dynamics of marine ecosystems: integration through models of biological-physical interactions", en: M. Barange, J. G. Field, R. H. Harris, E. Hofmann, R. I. Perry y F. Werner (comps.), *Global Change and Marine Ecosystems*, Oxford University Press, 2010.
- Hart, D. R. y P. J. Rago, "Long-term dynamics of US Atlantic sea scallop *Placopecten magellanicus* populations", *North American Journal of Fisheries Management*, núm. 26, 2006, pp. 490-501.
- M. R., Heithaus, A. Frid, A. J. Wirsing y B. Worm, "Predicting ecological consequences of marine top predator declines", *Trends in Ecology and Evolution*, núm. 23, 2008, pp. 202-210.
- Hoekman, D., "Turning up the heat: temperature influences on the relative importance of top-down and bottom-up effects", *Ecology*, núm. 91, 2010, pp. 2819-2825.
- Laurel, B. J. e I. R. Bradbury, "'Big' concerns with high latitude marine protected areas (MPAs): trends in connectivity and MPA size", *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, núm. 63, 2006, pp. 2603-2607.
- Learmonth, J. A., C. D. Macleod, M. B. Santos, G. J. Pierce, H. Q. P. Crick y R. A. Robinson, "Potential effects of climate change on marine mammals. Oceanography and Marine Biology", *Annual Review*, núm. 44, 2006, pp. 429-456.
- Lundberg, J. y F. Moberg, "Mobile link organisms and ecosystem functioning: implications for ecosystem resilience and management", *Ecosystems*, núm. 6, 2003, pp. 87-98.
- Miller, T. J. y P. K. Andersen, "A finite-state continuous-time approach for inferring regional migration and mortality rates from archival tagging and conventional tag-recovery experiments", *Biometrics*, núm. 64, 2008, pp. 1196-1206.

- Murawski, S. A., R. Brown, H. L. Lai, P. J. Rago y L. Hendrickson, "Large-scale closed areas as a fishery-management tool in temperate marine systems: the Georges Bank experience", *Bull. Mar. Sci.*, núm. 66, 2000, pp. 775-798.
- Murawski, S. A., S. E. Wigley, M. J. Fogarty, P. J. Rago y D. G. Mountain, "Effort distribution and catch patterns adjacent to temperate MPAs", *ICES J. Mar. Sci.*, núm. 62(6), 2005, pp. 1150-1167.
- O'Brien, L., K. Clark, N. Shepherd, M. Traver, J. Tang y B. Holmes, "Georges Bank cod.", en: *Groundfish Assessment Review Meeting (GARM III)*, Northeast Fisheries Science Center Reference Document CRD 08-15, 2008.
- O'Connor, M. I., J. F. Bruno, S. D. Gaines, B. S. Halpern, S. E. Lester, B. P. Kinlan y J. M. Weiss, "Temperature control of larval dispersal and the implications for marine ecology, evolution, and conservation", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, núm. 104, 2007, pp. 1266-1271.
- Planes, S., S. Geoffrey, P. Jones y S. R. Thorrold, "Larval dispersal connects fish populations in a network of marine protected areas", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2009, en: <10.1073/pnas.0808007106>.
- Quinn, T. J. y R. B. Deriso, *Quantitative Fish Dynamics*, Oxford University Press, 1999.
- Shanks, A. L., B. A. Grantham y M. H. Carr, "Propagule dispersal distance and the size and spacing of marine reserves", *Ecological Applications*, núm. 13, 2003, pp. 159-169.
- Stone, H. H., S. Gavaris, C. M. Legault, J. D. Nelson y S. X. Cadrin, "Collapse and recovery of the yellowtail flounder (*Limanda ferruginea*) fishery on Georges Bank", *J. Sea Res.*, núm. 51, 2004, pp. 261-270.
- Teo, S. L. H., A. Boustany, H. Dewar, M. J. Stokesbury, K. C. Weng, S. Beemer, A. C. Seitz, C. J. Farwell, E. D. Prince y B. A. Block, "Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds", *Marine Biology*, núm. 151, 2007, pp. 1-18.
- Terborgh, J. y J. A. Estes (comps.), *Trophic Cascades: predators, prey and the changing dynamics of nature*, Island Press, 2010.
- Tuck, G. N. y Possingham, H. P., "Marine protected areas for spatially structured exploited stocks", *Marine Ecology Progress Series*, núm. 192, 2000, pp. 89-101.
- Van Keeken, O. A., M. van Hoppe, R. E. Grift y A. D. Rijnsdorp, "Changes in the spatial distribution of North Sea plaice (*Pleuronectes platessa*) and implications for fisheries management", *J. Sea Res.*, núm. 57, 2007, pp. 187-197.
- Walli, A., S. L. H. Teo, A. Boustany, C. J. Farwell, T. Williams, H. Dewar, E. Prince y B. A. Block, "Seasonal movements, aggregations and diving behavior of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) revealed with archival tags", *PLoS One*, núm. 4, 2009, e6151.
- Werner, F. E., R. K. Cowen y C. B. Paris, "Coupled biological and physical models: Present capabilities and necessary developments", *Oceanography*, núm. 20, 2007, pp. 54-69.



Línea directriz 4

Proteger toda la gama de la biodiversidad presente en el área geográfica objetivo

-
- Paso 1** Identificar la biodiversidad en el área geográfica o ecorregión marina objetivo.
- Paso 2** Evaluar los factores de deterioro y las amenazas para la biodiversidad identificada en el paso 1 con respecto a su vulnerabilidad ante los efectos previstos del cambio climático.
- Paso 3** Determinar si los efectos del cambio climático en las características vulnerables identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.
- Paso 4** En el supuesto de que las AMP, aisladas o en red, puedan mitigar los efectos en las características identificadas, los especialistas deben calcular las escalas de espacio y de tiempo en las que se espera que su tema de estudio responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.
-

Paso 1

Identificar la biodiversidad en el área geográfica o ecorregión marina objetivo.

La biodiversidad, uno de los conceptos de uso corriente en la conservación, puede abordarse desde dos perspectivas: la funcional y la composicional, con sus respectivas distinciones. La primera se refiere sobre todo al ecosistema y los procesos evolutivos, mientras que la segunda agrupa a los organismos en poblaciones, especies, taxones superiores, comunidades y otras categorías (Callicott *et al.*, 1999).

La biodiversidad no sólo abarca las especies del mundo, con sus historias evolutivas únicas, sino también la variabilidad genética en el seno de las poblaciones de especies y entre éstas, así como la distribución de especies en hábitats locales, ecosistemas, paisajes y océanos o continentes enteros. Entender qué constituye y define la biodiversidad es esencial para los gestores, planificadores y responsables de la formulación de políticas, que deben tratar de incorporar los valores de la biodiversidad a sus planes de gestión del suelo y el agua. Las opciones para la gestión de la biodiversidad están inevitablemente restringidas por una combinación de realidades biológicas y sociopolíticas.

En las ciencias relacionadas con la biodiversidad, como la biología de poblaciones, la ecología, la sistemática, la evolución y la genética, la biodiversidad tiene un significado específico: “la variedad y la variabilidad de los organismos biológicos” (Keystone Center, 1991; Noss y Cooperrider, 1994; Wilson y Peter, 1988). De manera similar, el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) define diversidad biológica como la “variabilidad de organismos vivos de cualquier fuente”.

Los componentes individuales de la biodiversidad —genes, especies y ecosistemas— proveen a la sociedad de una amplia gama de bienes y servicios. Los genes, las especies y los ecosistemas de uso directo, indirecto o potencial para la humanidad a menudo reciben el nombre de “recursos biológicos” (McNeely *et al.*, 1990; Reid y Miller, 1989). Como ejemplos podemos citar los genes que usan los fitogenetistas u obtentores de plantas para desarrollar nuevas variedades de cultivos; las especies que usamos para diversos alimentos, medicamentos y productos industriales, y los ecosistemas que prestan servicios como purificación del agua, prevención o mitigación del cambio climático y control de inundaciones. Los componentes de la biodiversidad están interconectados. Por ejemplo, la diversidad genética sienta las bases para la adaptación continua a condiciones

cambiantes. De igual modo, un cambio en la composición y la abundancia de las especies que conforman un ecosistema puede alterar los servicios que éste ofrece.

Los océanos cubren 70 por ciento de la superficie del planeta, con entornos marinos y costeros en los que distintos hábitats sustentan una rica biodiversidad. La vida en nuestros mares produce un tercio del oxígeno que respiramos, ofrece una valiosa fuente de proteínas y atempera el cambio climático mundial. Entre los ejemplos de hábitats marinos y costeros figuran los bosques de manglar, los arrecifes de coral, los lechos de pasto marino, los estuarios en zonas costeras, las fuentes hidrotermales, las montañas submarinas y los sedimentos suaves en el fondo oceánico a pocos kilómetros bajo la superficie (Norse, 1993).

Como parte de un enfoque general en relación con los ecosistemas, el Programa de Trabajo sobre Áreas Protegidas (2004) del CDB encomendó a sus Partes el establecimiento de una red integral de AMP para 2012. Este objetivo coincide con el compromiso de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de 2002 en cuanto al establecimiento de áreas marinas protegidas, incluidas redes representativas, para 2012. En la reciente Cumbre sobre la Biodiversidad de Nagoya (COP 10 del CDB), las naciones miembro acordaron proteger 10 por ciento del área marina y costera mundial para 2020, especialmente las áreas de particular importancia para la biodiversidad y los servicios ambientales, mediante sistemas de áreas protegidas ecológicamente representativas y bien conectadas, bajo esquemas de gestión eficaz y equitativa, así como otras medidas de conservación eficaces basadas también en áreas.

Áreas biogeográficas

Por lo general, los patrones de distribución de las especies en distintas áreas geográficas y diversas escalas se pueden explicar mediante una combinación de factores históricos; por ejemplo: la especiación, la extinción, la deriva continental, la glaciación —sumada a las limitaciones geográficas de las áreas de masa continental y el aislamiento— y las reservas de energía disponibles del ecosistema.

Las áreas biogeográficas son grandes extensiones definidas por la presencia de distintas biotas que registran al menos algo de cohesión en los periodos evolutivos. Estas áreas pueden presentar cierto nivel de endemismo, sobre todo con respecto a las especies. Aunque el aislamiento histórico desempeña una función, muchas de estas biotas han surgido como resultado de características abióticas distintivas que circunscriben sus límites. Tales características pueden ser geomorfológicas (sistemas de plataforma y de islas aisladas, mares semicerrados), hidrográficas (corrientes, áreas de afloramiento de aguas, dinámica del hielo) o geoquímicas (influencias de elementos de aporte de nutrientes y salinidad en la escala más amplia). Desde el punto de vista de la ecología, es probable que las unidades cohesivas, por ejemplo, abarquen la mayor variabilidad que suponen las historias de vida de muchos taxones constitutivos, incluidas las especies móviles y dispersivas. Para englobar el abanico completo de la biodiversidad en una red de AMP, es importante proteger las muestras representativas de cada tipo de hábitat en un área biogeográfica, así como todas las especies y hábitats que parecen desempeñar un papel crucial en el ecosistema.

Las ecorregiones marinas son áreas con una composición de especies relativamente homogénea y a todas luces distinta de los sistemas adyacentes. Es probable que la composición de especies esté determinada por el predominio de un pequeño número de ecosistemas o un conjunto diferenciado de características oceanográficas o topográficas. Los agentes de forzamiento biogeográficos dominantes que definen las ecorregiones varían dependiendo de la ubicación, pero pueden incluir aislamiento, afloramiento de aguas, aporte de nutrientes, afluencia de agua dulce, regímenes de temperatura, regímenes del hielo, exposición, sedimentos, corrientes y complejidad batimétrica o costera. Desde la óptica ecológica, se trata de unidades muy cohesivas, lo bastante grandes para abarcar procesos ecológicos o de historias de vida para la mayoría de las especies sedentarias. Aunque algunas ecorregiones marinas pueden tener niveles importantes de endemismo, éste no es un factor determinante fundamental para identificar ecorregiones, como sí lo ha sido en el caso de las ecorregiones terrestres (Spalding *et al.*, 2007).

Paso 2

Evaluar los factores de deterioro y las amenazas para la biodiversidad identificada en el paso 1 con respecto a su vulnerabilidad ante los efectos previstos del cambio climático.

En términos generales, se supone que existe una relación positiva entre la riqueza de especies y la resiliencia de los ecosistemas a las perturbaciones. Sin embargo, esta relación se ha estudiado en diversos contextos ecológicos y escalas espaciales, y la gran variabilidad de respuestas ha limitado las generalizaciones o predicciones a variables y contextos tróficos específicos (Schläpfer y Schmid, 1999). La diversidad de especies nativas junto con la conectividad y la heterogeneidad de los hábitats son los tres atributos ecológicos que con mayor frecuencia se identifican como cruciales para mantener en funcionamiento los ecosistemas marinos (Foley *et al.*, 2010).

La abundancia relativa de individuos entre especies, o “equidad” dentro de los ecosistemas, representa la distribución de características funcionales (Hillebrand *et al.*, 2008) y contribuye a la resiliencia y el funcionamiento de los ecosistemas. Considerando distintas escalas espaciales biogeográficas y diversos agrupamientos, aquellos ecosistemas con una gran riqueza de especies también tienden a mostrar una equidad relativamente elevada (Hubbell, 2001). Además, las pruebas experimentales han demostrado que cuando las comunidades son altamente inequitativas o la abundancia o biomasa se concentra en unas cuantas especies, su funcionamiento es menos resistente al estrés ambiental (Wittebolle *et al.*, 2009).

En escalas espaciales grandes, la diversidad beta (es decir, el recambio espacial en la composición de especies de las comunidades) puede tener una influencia positiva en la resiliencia de los ecosistemas ante los cambios ambientales de gran escala. Asimismo, los conjuntos de especies locales pueden brindar un nivel de redundancia con posibilidades de conferir resiliencia. Este concepto no se ha elaborado tanto en la bibliografía sobre temas marinos, aunque el potencial de una mayor resiliencia mediante el “rescate” de comunidades de sitios locales y regionales se ha degradado en décadas recientes en algunos ecosistemas marinos explotados.

ESTUDIO DE CASO

Con una extensión de poco más de mil kilómetros a lo largo de las costas de Honduras, Guatemala, Belice y México, el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) es la segunda barrera arrecifal más grande del mundo. Abarca un rico mosaico de humedales costeros, lagunas, manglares, pastos marinos, cayos arenosos y una estructura común: los arrecifes de coral. Estos ecosistemas albergan más de 500 especies de peces, 60 especies de corales y 350 moluscos, así como mamíferos marinos, algas y pastos marinos. Son hogar de especies en grave peligro de extinción, como el manatí (cuya mayor población se encuentra en el Caribe occidental), el cocodrilo marino, tortugas marinas (verde, carey y caguama), el mero criollo y la cherna, al igual que la mayor agrupación de tiburones ballena del mundo. El SAM es un importante sitio de reposo en la principal ruta América del Norte-América del Sur para las aves migratorias, y la primera parada luego de surcar el golfo de México. Muchas especies de aves residen ahí todo el año.

Se estima que dos millones de personas dependen en alto grado de los ecosistemas saludables del SAM en lo que respecta a alimento, agua, medios de subsistencia e ingreso. Miles de pescadores artesanales (de pequeña escala) y la industria pesquera de Honduras dependen de sus pesquerías: de langosta, caracol, pargo y mero, entre otras. Sus ecosistemas marinos y costeros son el pilar de la rica industria turística de la región, que genera anualmente alrededor de cinco mil millones de dólares estadounidenses y recibe a más de once millones de turistas.

En futuros escenarios de cambio climático, la estabilización de las playas será importante dada la vulnerabilidad del SAM al aumento del nivel del mar y a tormentas tropicales más intensas.

www.reefresilience.org/Toolkit_Coral/C8_MAR.html.

Los ecosistemas funcionales son uno de los factores importantes que controlan el clima mundial. El ciclo biogeoquímico de los gases está controlado en gran medida por la biota viva, en particular en el ámbito marino. Por ejemplo, el fitoplancton elimina el dióxido de carbono de las aguas superficiales y libera oxígeno. Cuando muere el fitoplancton, se hunde y se agrega a la supersaturación de dióxido de carbono en aguas profundas. Esto tiene como resultado un gradiente vertical de CO₂ en el océano, lo que se ha denominado como “bomba biológica”. Cualquier impacto en el fitoplancton marino o en otra biota podría perturbar la bomba biológica y generar una pérdida de eficiencia en el secuestro CO₂ en aguas profundas, pérdida que, a su vez, podría aumentar el nivel de CO₂ en la atmósfera. Dado que el nivel de CO₂ ha ido en aumento desde la revolución industrial y ya es elevado, no es deseable un mayor incremento a causa de la pérdida de eficiencia de la bomba biológica. De este modo, preservar la diversidad de estos organismos es esencial para controlar el nivel de CO₂ en la atmósfera (Raven y Falkowski, 1999).

En el **anexo 2** se resumen algunas previsiones de posibles cambios climáticos físicos en varios componentes de los ecosistemas. Al evaluar los distintos componentes de los ecosistemas relativos a la biodiversidad (identificados en el paso 1) que se espera sufran cambios debido a las condiciones físicas, tal vez sería posible elaborar un modelo de evaluación de amenazas. ¿Cuál es el nivel de amenaza previsto para los diversos componentes biológicos y de los hábitats en la red de AMP? Puesto que la hipótesis importante es que las áreas biodiversas probablemente sean resilientes y, por ende, menos vulnerables al cambio climático, las redes de AMP deben tener el propósito de albergar un conjunto lo más diverso posible de organismos y hábitats.

Paso 3

Determinar si los efectos del cambio climático en las características vulnerables identificadas en el paso 2 pueden mitigarse mediante AMP, ya sea aisladas o en red.

La elaboración de un modelo de evaluación de amenazas (por ejemplo, la vulnerabilidad de organismos y hábitats al cambio climático previsto) puede contribuir a aclarar si es posible mejorar la resiliencia mediante el establecimiento de áreas confinadas. Por ejemplo, un hábitat podría ser menos vulnerable al cambio climático si está menos sujeto a presiones como las derivadas de la pesca por arrastre de fondo; del uso de artes de pesca que tocan el fondo, palangres y anclas, o de otras perturbaciones humanas. Lo mismo ocurre con los organismos: éstos pueden ser menos vulnerables a los efectos del cambio climático si no están sujetos a la presión de la pesca. Por desgracia, el establecimiento de áreas protegidas no repercute en todas las características vulnerables con posibilidades de responder a los efectos del cambio climático. Esto habrá de determinarse analizando cuáles son las características que implican una mayor vulnerabilidad al cambio climático y si se pueden fortalecer mediante el cierre de áreas.

Paso 4

En el supuesto de que las AMP, aisladas o en red, puedan mitigar los efectos en las características identificadas, los especialistas deben calcular las escalas de espacio y de tiempo en las que se espera que su tema de estudio responda al cambio climático y entonces proceder a una reevaluación de los límites de las AMP, o bien establecer nuevas AMP o redes de AMP, de modo que sean vigorosas ante estos cambios.

Consúltese el **anexo 1** de este informe para tener un panorama detallado de las propiedades físicas (atmosféricas y oceanográficas) para las que se prevén cambios en las próximas décadas, lo que incluye no sólo la dirección, magnitud y extensión espacial de los cambios, sino también una indicación del nivel de incertidumbre. Los especialistas pueden usar este anexo para calcular la escala de tiempo en la que se espera que su objeto de estudio responda al cambio climático y, en función de ello, proceder a una reevaluación de los límites de las áreas marinas protegidas.

Referencias

- Callicott, J. B., L. B. Crowder y K. Mumford, "Current normative concepts in conservation", *Conservation Biology*, núm. 13, 1999, pp. 22-35.
- CIEM, 2011a, *Report of the Study Group on Designing Marine Protected Area Networks in a Changing Climate (SGMPAN)*, ICES, Woods Hole, MA., 15-19 de noviembre de 2010.
- Foley, M. M., B. S. Halpern, F. Micheli, M. H. Armsby, M. R. Caldwell, C. R. Crian, E. Prahler, N. Rohr, D. Sivas, M. W. Beck, M. H. Carr, L. B. Crowder, J. E. Duffy, S. D. Hacker, K. L. McLeod, S. R. Palumbi, C. H. Peterson, H. M. Regan, M. H. Ruckelshaus, P. A. Sandifer y R. S. Steneck, "Guiding ecological principles for marine spatial planning", *Marine Policy*, núm. 34, 2010, pp. 995-966.
- Hillebrand, H., D. M. Bennett y M. W. Cadotte, "Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes", *Ecology*, núm. 89, 2008, pp. 1510-1520.
- Hubbell, S. P., "The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography", *Princeton Monographs in Population Biology*, núm. 32, Princeton University Press, 2001.
- Keystone Center, *Final consensus report of the Keystone policy dialogue on biological diversity on Federal lands*, The Keystone Center, Keystone, Colorado, 1991.
- McNeely, J. A., K. R. Miller, W. V. Reid, R. A. Mittermeier y T. B. Werner, *Conserving the world's biological diversity*, disponible por medio de Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, Instituto de Recursos Mundiales, Conservación Internacional, Fondo Mundial para la Naturaleza-Estados Unidos, Banco Mundial.
- Norse, E. A., *Global marine biological diversity: A strategy for building conservation into decision making*, Island Press, Washington, DC, 1993.
- Noss, R. F. y A. Cooperrider, *Saving nature's legacy: protecting and restoring biodiversity*, Island Press, Washington, DC, 1994.
- Raven, J. A. y P. G. Falkowski, "Oceanic sinks for atmospheric CO₂", *Plant, Cell and Environment*, núm. 22(6), 1999, pp. 741-755.
- Reid, W. V. y K. R. Miller, *Keeping options alive: the scientific basis for conserving biodiversity*, Instituto de Recursos Mundiales, Washington, DC, 1989.
- Schläpfer, F. y B. Schmid, "Ecosystem effects of biodiversity: A classification of hypotheses and exploration of empirical results", *Ecological Applications*, núm. 9, 1999, pp. 893-912.
- Spalding, M. D., H. E. Fox, G. R. Allen, N. Davidson, Z. A. Ferdaña, M. Finlayson, B. S. Halpern, M. A. Jorge, A. Lombana, S. A. Lourie, K. D. Martin, E. McManus, J. Molnar, C. A. Recchia y J. Robertson, "Marine Ecoregions of the World: A Bioregionalization of Coastal and Shelf Areas", *BioScience*, núm. 57(7), julio-agosto 2007, pp. 573-583.
- Wilson, E. O. y E. M. Peter (comps.), *Biodiversity*, National Acad Pr., Washington, DC, 1988.
- Wittebolle, L., M. Marzorati, L. Clement, A. Balloi, D. Daffonchio, K. Heylen, P. De Vos, W. Verstraete y N. Boon, "Initial community evenness favours functionality under selective stress", *Nature*, núm. 458, 2009, pp. 623-626.



Anexo 1

Análisis de la información atmosférica y oceanográfica

La meta general del Grupo de Estudio sobre la Planeación y Creación de Redes de Áreas Marinas Protegidas en un Clima Cambiante (SGMPAN, por sus siglas en inglés) es formular y aplicar directrices que sirvan de base para planear y crear redes de áreas marinas protegidas (AMP) en un contexto de cambio climático a lo largo de la costa atlántica de América del Norte, incluidos estuarios, plataformas y aguas profundas. Esta vasta área, que se extiende del mar Caribe a la parte norte de la plataforma de Labrador, incluye las ecorregiones marinas catalogadas entre el mar Caribe y el Ártico de Baffin y Labrador en estudio sobre ecorregiones marinas que Wilkinson *et al.* elaboraron para la CCA (2009; véase la **gráfica A1.1**).

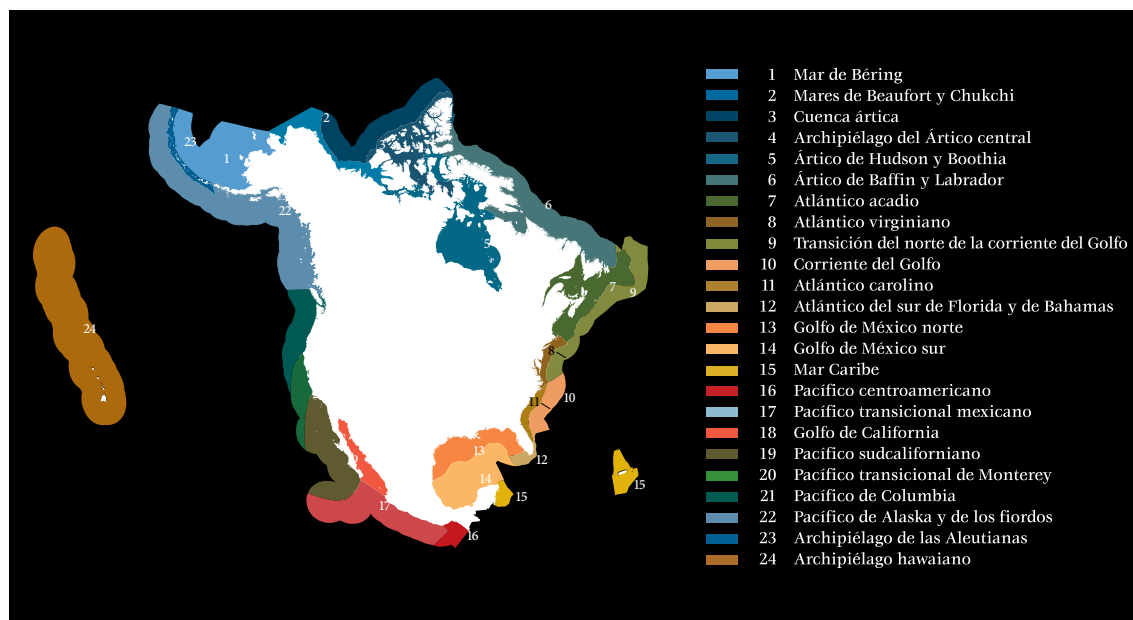
El análisis atmosférico y oceanográfico que se presenta en este anexo reproduce en buena medida el contenido en el apartado 5.1 del informe del SGMPAN (CIEM, 2011a). Una de sus fuentes más importantes es el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 2007), además de evaluaciones regionales, y de otro tipo, posteriores o contemporáneas (por ejemplo, CCSP, 2008a,b; CCSP, 2009; Cochrane *et al.*, 2009; EAP, 2009; FOCC, 2009; Frumhoff *et al.*, 2007; CIEM, 2008a,b; CIEM, 2011b; New *et al.*, 2011; Nicholls *et al.*, 2011; Ning *et al.*, 2003; PCGCC, 2009; Richardson *et al.*, 2009; Vasseur y Cato, 2007).

Se abordan los aspectos del cambio climático que deben considerarse al elaborar y aplicar proyecciones en relación con el océano, en particular las dificultades e incertidumbres relacionadas con la limitada capacidad de predicción del sistema climático de la Tierra. También se describen las principales características oceanográficas del Atlántico noroccidental (ANOC) y los modos dominantes de la variabilidad natural en tiempo y

espacio que afectan el clima oceánico y que deberán tenerse en cuenta al implementar las acciones de gestión necesarias para cumplir las diversas directrices. Con base en esta descripción del estado actual del océano, se hace una exposición de los cambios que probablemente ocurran en propiedades oceanográficas fundamentales, sin dejar de señalar las diferencias regionales e incertidumbres asociadas. Se anticipa que estos cambios atmosféricos y oceanográficos serán también los principales impulsores de cambios biológicos.

Nuestra capacidad para prever en forma fiable la magnitud de los futuros cambios climáticos está sujeta a limitaciones considerables, en especial en las escalas regionales más relevantes para los ecosistemas costeros y marinos. La mayoría de las previsiones disponibles sobre el cambio climático se derivan, directa o indirectamente, de simulaciones basadas en modelos realizadas hace más de cinco años para el IPCC (2007). Empieza a surgir la preocupación (Betts *et al.*, 2011) de que el cambio en la temperatura media mundial por causas antropogénicas bien puede alcanzar los 4 °C en este siglo. Con miras al Quinto Informe de Evaluación del IPCC, actualmente se lleva a cabo un nuevo conjunto de simulaciones basadas en modelos climáticos acoplados con un mejor nivel de resolución y representación de los procesos físicos y biogeoquímicos. La difusión de dicho informe está prevista para 2013, aunque de aquí a uno o dos años se espera la publicación de artículos al respecto en revistas con revisión de pares. En consecuencia, el presente análisis se concentra en las características destacadas y las tendencias esperadas del cambio climático, y no en estimaciones cuantitativas, pues es de esperar que la precisión de estas últimas mejore

Gráfica A1.1 Ecorregiones marinas de América del Norte



significativamente durante el periodo en el que realmente se estarán planeando y creando las redes de AMP en el Atlántico noroccidental.

El cambio climático y factores relevantes

Las pruebas de que el clima de la atmósfera y el océano está sufriendo cambios a causa de las mayores concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera son contundentes. En todo el mundo se registran claras las tendencias en propiedades como la temperatura oceánica, la acidez y el nivel del mar que reflejan alteraciones en la generalidad de las regiones, mientras que los cambios en otras propiedades como el escurrimiento continental y la salinidad oceánica se manifiestan de manera distinta dependiendo de la región (Bindoff *et al.*, 2007). Estos cambios se deben considerar en la planeación y en las muy diversas decisiones relacionadas con la gestión marina y costera (de acuerdo, por supuesto, con su magnitud respecto a otras presiones que afecten los ecosistemas de interés).

A menudo se usan términos como “clima cambiante”, “clima en proceso de cambio” y “cambio climático” con significados diversos, de

modo que, antes de seguir adelante, conviene esclarecer a qué se refieren en este trabajo. Por lo general, se considera que el “clima” es el estado o las estadísticas de variabilidad de menor plazo (por ejemplo, el estado del tiempo) durante un periodo amplio. Incluye medias, ciclos estacionales y otros descriptores de variabilidad (por ejemplo, extremos) en diversas escalas temporales dentro del periodo de interés.

Los términos “clima cambiante” y “cambio climático” se usarán de manera indistinta en el presente análisis. Con acuerdo a la convención adoptada en el IPCC (2007), el cambio climático se entiende como cualquier modificación o variación del clima en el transcurso del tiempo. En este caso, el periodo de interés inmediato son los siglos XX y XXI, y se considerarán los componentes tanto naturales como antropogénicos de la variabilidad reciente y futura en el sistema climático acoplado del planeta: atmósfera-hielo-océano-factores biogeoquímicos.

El clima de la Tierra posee una fuerte variabilidad natural. La pronunciada estacionalidad en la atmósfera y las capas superiores del océano, en particular en latitudes medias y altas, es una variación de gran escala muy conocida a la que se han adaptado diversos organismos

vivos. Hay otras variaciones, menos regulares, en escalas espaciales comparables a las de los continentes y las cuencas oceánicas. En el caso del clima oceánico a lo largo de la costa atlántica de América del Norte, ocurren cambios regionales importantes en décadas, o en otras escalas de tiempo, asociados con modos de variabilidad natural, como la Oscilación del Atlántico Norte (OAN; Hurrell y Deser, 2010), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA; Enfield *et al.*, 2001) y El Niño-Oscilación Sur (ENOS; Trenberth y Caron, 2000), en muchos casos con indicios de alteraciones en los ecosistemas marinos relacionados. En este contexto, para algunas variables es necesario considerar, al menos en las próximas décadas, las contribuciones antropogénicas al cambio climático; por ejemplo, las asociadas con la mayor presencia de gases de efecto invernadero en la atmósfera. También se debe considerar que quizás el clima cambiante en tiempos recientes sea consecuencia de una posible interacción de una serie de factores naturales y antropogénicos. Así, han de tenerse en cuenta las influencias tanto naturales como antropogénicas en el análisis de los posibles cambios climáticos en el futuro, en particular en las próximas dos décadas.

La complejidad del sistema climático acoplado y las múltiples escalas espaciales y temporales que interactúan dificultan la proyección del futuro cambio climático en la jerarquía de escalas espaciales relevantes para los ecosistemas costeros y marinos. En la actualidad, resulta imposible predecir, en sentido determinista, el cambio climático con una resolución de escala decenal y variabilidad natural regional. Las proyecciones del IPCC disponibles (2007) son probabilísticas y están muy suavizadas por la combinación de conjuntos de simulaciones de múltiples modelos de la circulación general atmósfera-oceano (MCGAO). Aunque hay pautas espaciales y temporales claras y al parecer firmemente establecidas para muchas variables, por lo general corresponden a escalas espaciales grandes con cambios relativamente monótonos en el tiempo debido a la combinación de modelos y la suavización espacial, así como a la limitada resolución de la variabilidad natural.

En la obtención de proyecciones regionales de cambio climático se suelen usar técnicas de

reducción de la escala espacial lo mismo dinámicas (mediante modelos de mayor resolución) que estadísticas (mediante relaciones empíricas) (Hayhoe *et al.*, 2008). No obstante, estos enfoques resultan más útiles para los cambios antropogénicos de largo plazo (mediados a finales de siglo), que normalmente serán de mayor magnitud que los esperados en las próximas dos décadas y, por consiguiente, revestirán más importancia en relación con la variabilidad natural.

Considerando la creciente magnitud que se prevé tendrán los cambios climáticos de origen antropogénico y dada la limitada capacidad para predecir la variabilidad climática natural de más corto plazo, resulta conveniente el uso de dos horizontes de tiempo para proyectar el cambio climático en relación con el establecimiento de una red de áreas marinas protegidas:

- El “**corto plazo**” (digamos, las siguientes dos décadas), donde la guía más útil para predecir el cambio en el futuro puede ser la variabilidad observada recientemente, al margen de que ésta sea una tendencia de largo plazo o corresponda a periodos —de años a décadas— que puedan asociarse con cierto modo natural de variabilidad. Para algunas propiedades oceánicas —como el contenido de calor, la acidez y el nivel del mar a gran escala— cuyas tendencias recientes son “acumulables” (lo que en gran medida refleja el calentamiento, las emisiones de CO₂ y el deshielo de origen antropogénico registrados en el último medio siglo), una tendencia continua ajustada regionalmente puede ser un indicador razonable del cambio probable en este horizonte de tiempo. En cambio, en el caso de otras propiedades, como la estratificación regional, cuyos cambios recientes pueden haber tenido como influencia predominante la variabilidad natural, la variabilidad reciente puede resultar mucho menos confiable, e incluso engañosa, para la proyección de corto plazo. Como los cambios antropogénicos previstos para este periodo de acuerdo con las proyecciones suavizadas son de pequeña magnitud para algunas variables, ciertos aspectos del clima cambiante podrían estar dominados por la variabilidad natural (una

forma posiblemente modificada de esta variabilidad).

- El “**largo plazo**” (mediados a finales de siglo, o un periodo más largo), en el que los cambios antropogénicos suavizados según las proyecciones disponibles son de una magnitud sustancialmente mayor y puede esperarse que dominen la variabilidad natural en la escala decenal o modifiquen en forma considerable los extremos del intervalo de variabilidad en algunas propiedades oceánicas. Las proyecciones disponibles suelen ser muy útiles para este horizonte de tiempo (aunque no incluyen modos regionales de variabilidad natural que se prevé continuarán siendo importantes). Cabe señalar, sin embargo, que hoy día empieza a generalizarse la preocupación de que las proyecciones del IPCC (2007) para algunas variables, como el nivel del mar en las costas (véase más adelante), puedan en realidad ser subestimaciones significativas.

Un reto particular para la predicción de la variabilidad climática antropogénica en el ANOc es la inadecuada resolución de los MCGAO en áreas con elementos de dinámica clave como la separación de la corriente del Golfo y los enlaces con los océanos adyacentes: el Ártico y el Atlántico tropical. Los modelos de la circulación general atmósfera-océano usados en las proyecciones del IPCC (2007) no reproducen características oceánicas importantes en esas regiones y, por tanto, no resuelven algunas influencias importantes del océano en el clima atmosférico regional (De Jong *et al.*, 2009). En consecuencia, reducir la escala de los escenarios de cambio climático disponibles puede no ser adecuado para las escalas espaciales de muchos aspectos de los ecosistemas del Atlántico noroccidental.

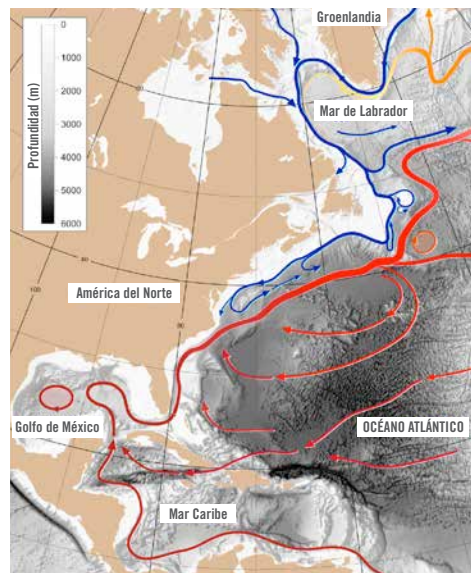
Regiones oceanográficas del Atlántico noroccidental

Configuración de gran escala

La configuración de la costa atlántica de América del Norte en relación con el continente y el océano mundial se ilustra en el mapa de topografía del fondo y principales características de

las corrientes en la capa oceánica superior del ANOc (véase la **gráfica A1.2**), así como en sus distribuciones climatológicas de temperatura y salinidad (véase la **gráfica A1.3**). La región costera del Atlántico es bastante compleja (**gráfica A1.2**), con grandes salientes y entrantes costeros, una plataforma continental de ancho variable y una geometría muy compleja en el golfo de México y el mar Caribe. Las pronunciadas influencias de la entrada de agua dulce relativamente fría del océano Ártico y de agua relativamente cálida del Atlántico occidental tropical (AOT) son aparentes en los patrones de temperatura y salinidad, así como en los giros horizontales de gran escala del Atlántico Norte y sus corrientes limítrofes occidentales: la corriente de Labrador y la corriente del Golfo (Loder *et al.*, 1998a). Estas características predominantes de circulación hacen que el ANOc presente un alto grado de conectividad por advección, sobre todo en los giros subpolar y

Gráfica A1.2 Topografía del fondo del Atlántico noroccidental



Este mapa muestra la compleja topografía del fondo del Atlántico noroccidental, junto con una representación esquemática de las principales características de circulación en la capa superior del océano. Los flujos cálidos están indicados en rojo, los flujos fríos en azul y las temperaturas intermedias en naranja-amarillo. Cortesía de Igor Yashayev, Instituto Bedford de Oceanografía, ministerio de Pesca y Océanos de Canadá (*Fisheries and Oceans Canada*).

subtropical. Un importante factor adicional del clima oceánico costero de la región es su ubicación a sotavento de América del Norte, con las influencias resultantes de los vientos del oeste prevalecientes y el escurrimiento continental.

Principales regiones oceanográficas en el ANOc y que lo afectan

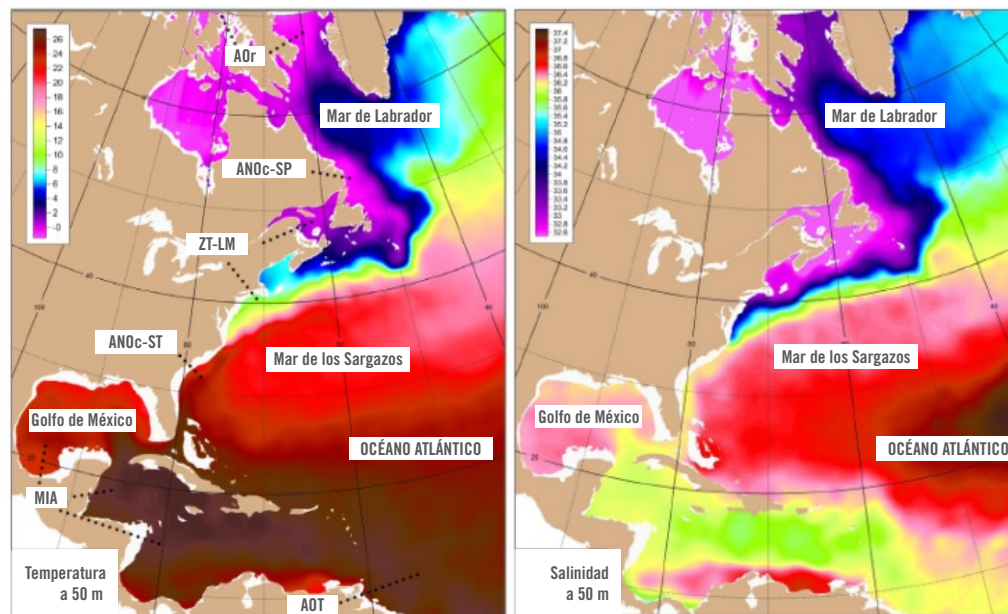
Se pueden identificar cuatro regiones oceanográficas latitudinales principales en el ANOc a partir de la estructura de gran escala del litoral, la distribución de propiedades del agua y la circulación asociada (véanse las **gráficas A1.2 y A1.3**).

- El **Atlántico noroccidental subpolar (ANOc-SP)**, que se extiende desde el estrecho de Davis, a alrededor de 65°N, 60°O, hasta la cola de los Grandes Bancos, 42°N, 50°O. Esta región tiene una marcada influencia del giro subpolar del Atlántico Norte (Loder *et al.*, 1998b) y, en particular,

de la corriente de Labrador (Colbourne *et al.*, 2010), que transporta agua subártica y subpolar hacia el sur a latitudes medias en la capa superior del océano (2,000 metros).

- El **Atlántico noroccidental subtropical (ANOc-ST)**, que corre a lo largo del margen continental desde las Antillas Mayores, a alrededor de 20°N, hasta el cabo Hatteras, a alrededor de 35°N. Esta región recibe una fuerte influencia del giro subtropical del Atlántico norte (Boicourt *et al.*, 1998) y, en particular, de la corriente del Golfo, que transporta agua subtropical hacia el norte en la capa superior del océano antes de virar al noreste y alejarse del borde de la plataforma en el cabo Hatteras. (El golfo de México y el mar Caribe podrían incluirse de cierta forma en el ANOc-ST, pero para efectos del presente análisis se identificarán como una región principal independiente por

Gráfica A1.3 Temperatura y salinidad medias anuales de largo plazo



Temperatura y salinidad medias anuales de largo plazo a una profundidad de 50 m en el ANOc, de acuerdo con la climatología de Yashayaev (1999). Las principales regiones oceanográficas en el ANOc y que lo afectan se identifican en el mapa de temperatura (véanse el **cuadro A1.1** y el texto de los incisos siguientes para las explicaciones). Principales regiones oceanográficas: **AOr** = Ártico oriental; **ANOc-SP** = Atlántico noroccidental subpolar; **ZT-LM** = Zona de transición de latitud media; **ANOc-ST** = Atlántico noroccidental subtropical; **MIA** = Mar Intramericano; **AOT** = Atlántico occidental tropical. Cortesía de Igor Yashayaev, Instituto Bedford de Oceanografía, ministerio de Pesca y Océanos de Canadá (*Fisheries and Oceans Canada*).

su pronunciada variabilidad costera y batimétrica, así como su mayor proximidad al océano Pacífico oriental.)

- Una **zona de transición de latitud media (ZT-LM)**, que se extiende hacia el norte a lo largo de la costa este de América del Norte desde el cabo Hatteras, a alrededor de 35°N, 76°O, para incluir el golfo de San Lorenzo (a 52°N, 60°O), en gran medida cerrado, y luego hacia el este hasta la cola de los Grandes Bancos, a 42°N, 50°O. En esta región rivalizan en influencia las aguas subpolares y subtropicales, que fluyen en direcciones opuestas, y una amplia región de “aguas de talud” (con una mezcla de aguas de origen subpolar y subtropical) al norte de la corriente del Golfo (Loder *et al.*, 1998b). En general, las aguas de origen subpolar han dominado la plataforma de esta zona en la historia reciente (Wanamaker *et al.*, 2007), pero se registra una influencia cada vez mayor de las aguas subtropicales a medida que se avanza hacia el cabo Hatteras. (Asimismo, como se expone más adelante, hay razones para esperar que la influencia subtropical aumente con el cambio climático antropogénico.)
- El **golfo de México y mar Caribe (GM-MC)**, también llamado **mar Intramericano (MIA)** según un enfoque del cambio climático basado en los sistemas oceanográficos (Mooers y Maul, 1998). El golfo es un mar grande, casi cerrado, con profundidades que alcanzan los 3,700 m, plataformas anchas y estrechas, y más de 30 ríos que desembocan en su cuenca. Su circulación se caracteriza por la intrusión de la corriente del Lazo en el este y la formación, separación y posterior propagación de remolinos de la corriente del Lazo en la parte occidental del golfo. El mar Caribe, parcialmente cerrado, tiene una profunda depresión en el oeste y un amplio complejo topográfico e insular en el este. El golfo se comunica con el mar Caribe por medio del canal de Yucatán (profundidad de umbral: ~2,000 m) y con la región del ANOc-ST por medio de los estrechos de Florida (profundidad de umbral: ~800 metros).

Además de estas regiones oceanográficas principales, es posible identificar dentro del ANOc otras dos importantes regiones oceanográficas latitudinales que lo vinculan con el océano mundial y que lo afectan, debido a las fuertes influencias que su variabilidad oceanográfica ejerce por advección, particularmente en las regiones adyacentes del Atlántico noroccidental.

- El **Ártico oriental (AO_r)**, que abarca el archipiélago ártico canadiense (un amplio conjunto de islas y canales estrechos) y la bahía de Baffin, a través de los cuales fluyen las aguas del Ártico directamente al ANOc-SP (Dickson *et al.*, 2007). Las aguas del Ártico también fluyen hacia el Atlántico norte por el este de Groenlandia, y afectan al ANOc-SP mediante la circulación alrededor del sur de Groenlandia en el giro subpolar (véase CIEM, 2011b para obtener más detalles sobre las influencias del Ártico y el Atlántico nororiental).
- El **Atlántico occidental tropical (AOT)** mediante las corrientes asociadas con el giro subtropical, la corriente del Norte de Brasil y sus remolinos (Johns *et al.*, 2003). También hay una importante influencia del Atlántico oriental tropical, que es la región donde se originan los ciclones y huracanes tropicales del Atlántico norte, algunos de los cuales se desplazan hacia el oeste al mar Intramericano, mientras que otros viran hacia el norte al ANOc-ST y en ocasiones llegan a la ZT-LM y el ANOc-SP.

Las seis regiones oceanográficas recién descritas constituyen un punto de partida natural para un análisis de las tendencias del cambio climático en escalas que, de acuerdo con la mayoría de los MCGAO, se encuentran más allá de la resolución espacial de las principales características oceanográficas. El vínculo de estas regiones con características oceanográficas tanto de mayor como de menor escala abre espacio para mejorar las proyecciones combinando los resultados de los MCGAO, la comprensión dinámica, estudios recientes basados en modelos de mayor resolución y el análisis de datos observacionales.

Al interior de estas seis regiones, hay varias subregiones costeras o de plataforma con distintas condiciones oceanográficas que, se sabe, influyen en la estructura de los ecosistemas y la distribución de las especies, y para las que se podrían proyectar diferentes condiciones. En el **cuadro A1.1** se presenta una lista de estas subregiones y algunas de sus características distintivas. Puede ser necesario considerar el cambio climático en esta escala subregional (en los casos en que ello sea posible) para identificar los efectos en los ecosistemas y formular estrategias de gestión (como el establecimiento de redes de AMP, precisamente el tema de este trabajo). Por ejemplo, el golfo de San Lorenzo y el golfo de Maine-bahía de Fundy son subregiones claramente definidas dentro de la ZT-LM, asociadas con su cobertura de hielo marino estacional y fuertes olas, respectivamente, además de estar parcialmente cerradas (a diferencia de otras subregiones de plataforma abierta de la ZT-LM). De manera similar, hay varias características distintivas de las subregiones comprendidas en el complejo mar Intramericano, por ejemplo, las estructuras batimétricas contrastantes del golfo de México y el mar Caribe, y las configuraciones específicas de la plataforma occidental de Florida, la plataforma Texas-Luisiana y el banco de Campeche.

Las regiones y subregiones oceanográficas identificadas en este documento guardan una estrecha semejanza con las “ecorregiones marinas” (véase la **gráfica A1.1**) identificadas por Wilkinson *et al.* (2009), aunque los nombres difieran en muchos casos (véase el **cuadro A1.1**). Las ecorregiones marinas se identificaron con base en consideraciones ecológicas y oceanográficas, y en algunos casos pueden ser más apropiadas para la gestión de ecosistemas. Por otro lado, las regiones y subregiones oceanográficas deberán resultar de particular utilidad para reducir la escala de las proyecciones de cambio climático.

Dentro de las subregiones mencionadas en el **cuadro A1.1** hay también un sinnúmero de áreas de menor escala con características oceanográficas distintivas que afectan aspectos particulares de los ecosistemas costeros y marinos (por ejemplo, agrupamientos, poblaciones, fases de los ciclos de historia de vida). Estas

características “locales” incluyen estuarios, humedales, plumas de agua dulce costeras, frentes, zonas de corrientes ascendentes y descendentes, y giros y masas de agua relacionados con bancos, cuencas y canales. Esta jerarquía de escalas espaciales oceanográficas plantea la dificultad de reducir escalas de múltiples niveles al proyectar algunos aspectos del cambio climático. No obstante, el importante papel de las características atmosféricas y oceanográficas de gran escala descritas en este análisis, sumado a las tendencias de cambio climático de gran escala que predominan para muchas variables (por ejemplo, temperatura, nivel del mar y acidez), puede orientar el abordaje de esta cuestión.

Estructura de transición entre márgenes

Otra importante característica espacial horizontal es el amplio gradiente que se registra en muchas propiedades oceanográficas al avanzar de la costa hacia aguas profundas, a causa tanto de la profundidad cada vez mayor del agua como del alejamiento creciente de las influencias continentales (por ejemplo, el escurrimiento). Como primera aproximación, las regiones (y muchas de las subregiones) oceanográficas descritas se pueden subdividir en tres dominios de transición entre márgenes (continentales):

- La **zona costera**, que incluye la plataforma interior, estuarios pequeños a medianos y humedales: sistemas donde hay fuerte influencia de las aguas someras, las interacciones con el litoral, el nivel del mar cambiante (por ejemplo, la marea) y el escurrimiento local.
- Los **mares de plataforma**, incluidos grandes estuarios, como el golfo de San Lorenzo, y el talud continental superior en lugares donde no predomina la corriente limítrofe occidental (del cabo Hatteras a la cola de los Grandes Bancos).
- Las **aguas profundas** costa afuera, que abarcan las cuencas (depressiones profundas) del MIA y también el talud continental en lugares donde predomina la corriente limítrofe occidental (por ejemplo, de los estrechos de Florida al cabo Hatteras, y el mar de Labrador).

Cuadro A1.1 Principales regiones oceanográficas de gran escala en el ANOc o que lo afectan

Principales regiones oceanográficas	Características oceanográficas distintivas	Modos de variabilidad climática	Ecorregiones marinas	Subregiones oceanográficas costeras y de plataforma	Otras características subregionales fundamentales
Ártico oriental (AO _r)	Hielo marino Corrientes de salida del Ártico al ANOc-SP	OAN OAr	Archipiélago del Ártico central	Archipiélago ártico canadiense	Estrechos; flujos subsuperficiales (<i>throughflows</i>)
Atlántico noroccidental subpolar (ANOc-SP)	Corriente de Labrador (flujo hacia el sur) Hielo marino estacional Convección profunda de invierno Estratificación estacionalmente variable	OAN por advección OMA AMOC	Ártico de Baffin y Labrador	Bahía de Baffin	Giro ciclónico; glaciares en deshielo
				Plataforma, talud y mar de Labrador	Escurrimiento; flujo de salida del estrecho de Hudson
				Plataforma y talud del noreste de Terranova	Estratificación de 2-3 capas
Zona de transición de latitud media (ZT-LM) del Atlántico noroccidental (ANOc)	Extensión de la corriente de Labrador (flujo de plataforma hacia el ecuador) Aguas de talud Corriente del Golfo (costa afuera) Marcada estacionalidad (sotavento continental) Estuarios	OAN directa OAr remota AMOC OMA	Atlántico acadiano (plataforma) Transición del norte de la corriente del Golfo (talud)	Grandes bancos y cabo Flemish	Giros en dirección de las manecillas de reloj; estratificación de 2-3 capas
				Golfo de San Lorenzo	Escurrimiento; hielo marino estacional
			Atlántico virginiano (plataforma) Transición del norte de la corriente del Golfo	Plataforma Escocesa	Flujo de salida del golfo de San Lorenzo; bancos y cuencas
				Golfo de Maine y bahía de Fundy	Influencias de la marea; escurrimiento; bancos y cuencas
Atlántico noroccidental subtropical (ANOc-ST)	Corriente del Golfo (flujo hacia el norte) Playas de barrera y humedales costeros Huracanes y ciclones	OAN OMA AMOC VAT AWP	Atlántico carolino (plataforma) Corriente del Golfo (talud)	Cuenca del Atlántico sur	Corriente del Golfo en el borde de la plataforma; flujo de plataforma inverso; escurrimiento
			Atlántico del sur de Florida y Bahamas	Plataforma y talud del sur de Florida	Corriente del Golfo predominante; giros en los cayos
Golfo de México y mar Caribe (GM-MC) o Mar Intramericano (MIA)	Corriente del Lazo Remolinos Corrientes estacionales inducidas por el viento, y corrientes ascendentes y descendentes Playas de barrera y humedales costeros Huracanes y ciclones	VAT AWP ENOS OMA AMOC	Golfo de México norte	Plataforma de Florida occidental	Estratificación variable según la estación; corrientes de plataforma inducidas por el viento; giros y remolinos costa afuera; escurrimiento
				Plataforma de Texas-Luisiana	
			Golfo de México sur	Plataforma de Tamaulipas-Veracruz	
				Banco de Campeche	
			Mar Caribe	Mar Caribe occidental	
Mar Caribe oriental	Islas y canales				
Atlántico occidental tropical (AOT)	Flujo hacia el norte de aguas tropicales	VAT AWP ENOS OMA AMOC			Corriente del Norte de Brasil

Principales regiones oceanográficas de gran escala en el ANOc o que lo afectan, sus características predominantes, modos básicos de variabilidad climática y meteorológica (véase el texto de los incisos siguientes), subregiones oceanográficas costeras y de plataforma y otras características distintivas fundamentales. También se indican (para referencias cruzadas) las “ecorregiones marinas” identificadas para la CCA (Wilkinson *et al.*, 2009).

Estructura vertical

Una característica espacial muy importante en la mayoría de la regiones oceánicas, en particular desde la perspectiva del cambio climático inducido por la atmósfera y del cambio de abajo hacia arriba en los ecosistemas, es la pronunciada variación de muchas propiedades oceanográficas y componentes submarinos de los ecosistemas. En este análisis nos ocuparemos principalmente de la capa superior del océano, que se ventila anualmente (con una capa de mezcla en invierno a profundidades de 100 a 1,000 m normalmente) o bien en escalas de tiempo que se calculan en años, mediante una combinación de la mezcla en la capa superficial, la subducción y las corrientes ascendentes y descendentes. No obstante, es posible que los cambios climáticos alcancen profundidades intermedias (1,000-2,500 m) e incluso mayores en escalas de tiempo que van de años a décadas en gran parte del margen continental del ANOc, lo que se asocia con la circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés; véase descripción *infra*) y el flujo hacia el ecuador de aguas profundas relativamente “nuevas” en la corriente profunda limítrofe occidental (DWBC, por sus siglas en inglés).

Modos de variabilidad naturales y observados

Se ha demostrado que varios modos regionalmente amplificadas de variabilidad natural acoplada atmósfera-hielo-océano, en escalas que van de meses a varias décadas, influyen en la variabilidad del clima oceánico en el ANOc. En algunos casos se extienden a través de las escalas espaciales de múltiples cuencas oceánicas y continentes, por lo que se les denomina mecanismos de “teleconexión” (CIEM, 2011b). A continuación se describen brevemente esos modos de variabilidad como aspectos importantes en la proyección del cambio climático a corto plazo.

Oscilación del Atlántico Norte

La Oscilación del Atlántico Norte (OAN) es el modo natural predominante de variabilidad meteorológica y climática en la atmósfera en el noreste de América del Norte y la parte septentrional del Atlántico norte, en escalas de tiempo que van de meses a varias décadas (Hurrell y Deser, 2010). Se manifiesta sobre todo en los

cambios en la presión a nivel del mar y en los campos de viento de gran escala, pero también incluye cambios en la temperatura del aire y la precipitación, lo cual altera las condiciones oceánicas y del hielo. En general, se considera que la OAN forma parte de patrones de variabilidad climática de mayor escala en latitudes medias a altas en el hemisferio norte, como la Oscilación del Ártico (OAr) y el modo anular del norte. Su influencia es mayor en el invierno, cuando una OAN positiva (entendida habitualmente como un gradiente más amplio de presión atmosférica entre las Azores e Islandia) produce una más intensa depresión de Islandia; vientos occidentales de latitud media más fuertes y desplazados hacia el norte del Atlántico, y vientos noroccidentales más fuertes y fríos procedentes del subártico canadiense, que se extienden costa afuera sobre el ANOc-SP.

Se han identificado múltiples mecanismos de influencia de la OAN en el clima oceánico, incluidas las influencias directas del ANOc-SP, tanto mediante la circulación oceánica inducida por el viento y la modificación de la masa de agua durante el invierno en el mar de Labrador (con varios años de OAN positiva que producen una mayor convección profunda) (Yashayaev y Loder, 2009), como a través de una mayor circulación inducida por el viento (OAN positiva), que origina agua más fría y más hielo marino en la región de la plataforma y el talud de Terranova y Labrador (Han *et al.*, 2010). Cabe destacar que la OAN también influye en la temperatura y la salinidad en la plataforma y el talud de la ZT-LM, pero con cambios opuestos a los registrados en el ANOc-SP (es decir, una OAN positiva que da como resultado aguas más cálidas y saladas en la zona de transición). Esto ocurre mediante una influencia más indirecta de la variabilidad de la OAN al registrarse una oscilación positiva que contribuye a un giro subpolar más estrecho, con un transporte reducido de la corriente de Labrador, fría (y de agua dulce), alrededor de la cola de los Grandes Bancos y, por ende, una mayor influencia de las aguas subtropicales en la zona de transición (Han, 2007; Petrie, 2007). En trabajos recientes se ha encontrado una correlación significativa (véase la **gráfica A1.4**) entre la OAN y la posición

norte-sur de la corriente del Golfo entre el cabo Hatteras y los Grandes Bancos (costa afuera en la ZT-LM), con una OAN más positiva que ocasiona un desplazamiento hacia el norte tanto de la corriente del Golfo como de aguas subtropicales y algunas distribuciones de peces (Nye *et al.*, 2011).

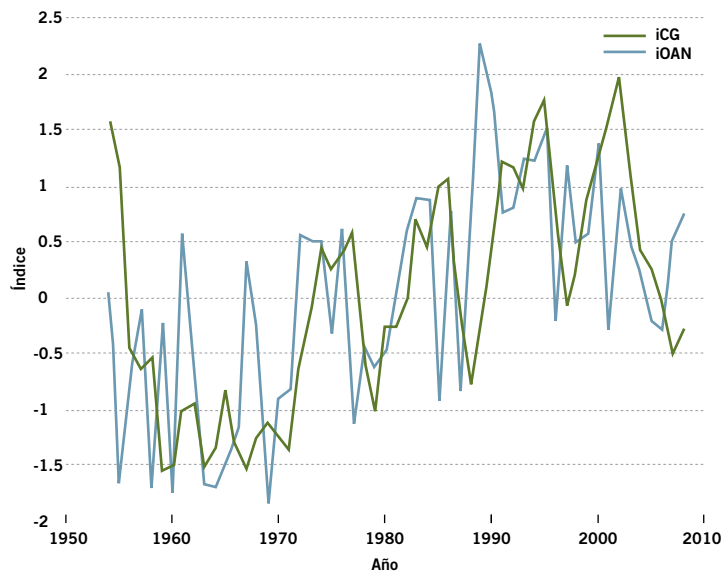
Aunque la OAN constituye un patrón bipolar de la diferencia norte-sur de presión a nivel del mar, entre Islandia y las Azores, también se correlaciona con el patrón tripolar de las anomalías en la temperatura de la superficie del mar (TSM) en el Atlántico norte durante el invierno y la primavera boreales. Este patrón tripolar se debe principalmente a la respuesta oceánica a la variabilidad atmosférica en el invierno asociada con la OAN.

El Niño-Oscilación del Sur

Otro modo muy conocido de variabilidad natural acoplada atmósfera-oceano que afecta el clima

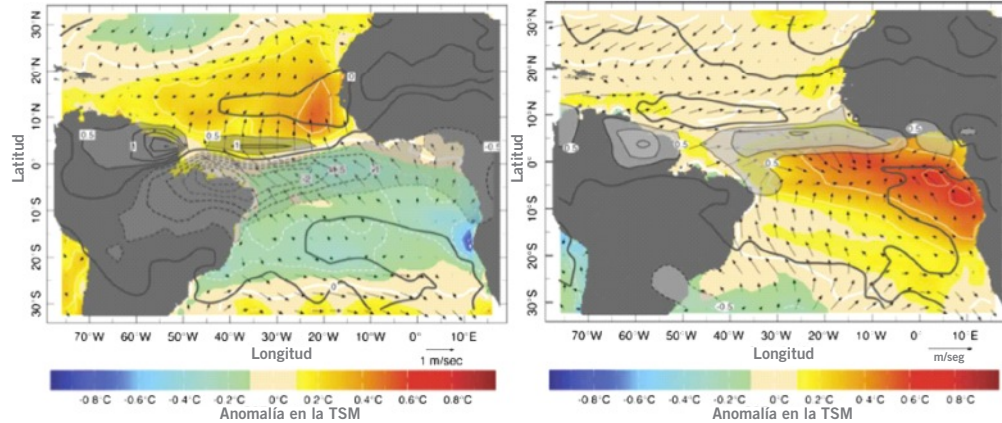
oceánico en el ANOc, sobre todo en el MIA y el ANOc-ST, es el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Chen y Taylor, 2002; Trenberth y Caron, 2000). Los eventos ENOS se originan en el océano Pacífico ecuatorial, pero afectan la circulación atmosférica en gran parte de América del Norte y, en particular, en el sur y el oeste de Estados Unidos, México, el golfo de México y el mar Caribe. Las condiciones de El Niño generan una corriente de chorro del Pacífico más persistente, que se extiende por el golfo de México, mientras que La Niña hace que la corriente de chorro se desplace hacia el norte, desde el oeste de América del Norte, y que circule un aire más seco y caliente sobre el ANOc-ST. El acoplamiento entre el Pacífico oriental y el ANOc por medio de la atmósfera influye de manera particular en las trayectorias de los huracanes y tormentas tropicales en el ANOc, cuyos efectos pueden extenderse hacia los polos en el ANOc-SP.

Gráfica A1.4 Índices de la Oscilación del Atlántico Norte y de la corriente del Golfo durante el invierno, 1950-2009



Índice de la Oscilación del Atlántico Norte (iOAN) durante el invierno, tomado del análisis de teleconexión mensual del Centro de Predicción Climática (*Climate Prediction Center*) de la NOAA, e índice de la corriente del Golfo (iCG), de Joyce y Zhang (2010). En el periodo moderno, ambos índices mantienen una correlación significativa, aunque tal correlación disminuye (sin dejar de ser significativa) cuando se elimina linealmente la tendencia de los datos. La corriente del Golfo se rezaga alrededor de un año respecto a la Oscilación del Atlántico Norte. Este resultado es una actualización de lo que observaron por primera vez Joyce *et al.* (2000).

Gráfica A1.5 Variabilidad superficial océano-atmósfera en la región del Atlántico tropical



Patrón dominante de la variabilidad superficial océano-atmósfera en la región del Atlántico tropical durante la primavera (izquierda) y el verano (derecha) boreales. Los contornos negros representan la primera función ortogonal empírica de la anomalía regional en la lluvia (mm/día^{-1}) de marzo a abril y de junio a agosto (datos de *Global Precipitation Climatology Project 1979-2001*). El campo de color es la regresión de la anomalía en la TSM de marzo a abril y de junio a agosto en las principales series de tiempo que componen la función ortogonal empírica de la precipitación pluvial. Las flechas representan la regresión del viento superficial medio estacional en las mismas series de tiempo. *Fuente: De Chang et al., 2006.*

Durante El Niño, la zona de convergencia intertropical (ZCI) en el Pacífico migra hacia el sur, lo que ocasiona lluvias anómalas negativas en áreas de considerable extensión del Caribe, América Central y las regiones sur y centro de México en el verano. Asimismo, la actividad de los huracanes se reduce en el Atlántico, en tanto que —si bien no de una forma completamente simétrica— lo contrario ocurre durante La Niña.

Según resumen Chang *et al.* (2006), las influencias más importantes de El Niño en el sector del Atlántico tropical son: 1) un vaivén zonal en la presión a nivel del mar entre los océanos Pacífico y Atlántico ecuatoriales durante las fases inicial y de pico de los eventos ENOS, con una anomalía de alta presión a nivel del mar en el Atlántico tropical norte; 2) un debilitamiento en el gradiente de la presión a nivel del mar meridional entre el anticiclón de las Azores y la ZCI, acompañado de alisios del noreste más débiles que el promedio; 3) un calentamiento de la superficie del mar durante la primavera boreal luego de la fase madura de los eventos ENOS, y 4) un desplazamiento de la ZCI hacia el norte y una disminución de la precipitación durante la temporada de lluvias en el noreste de Brasil. Los efectos del fenómeno ENOS en el MIA son más intensos en el invierno porque en el verano

las anomalías relacionadas con la “piscina de agua cálida” del Atlántico (véase *infra*) tienden a ser opuestas a las del ENOS.

Variabilidad del Atlántico tropical

En la **gráfica A1.5** se ilustran los dos modos fundamentales de la variabilidad del Atlántico tropical (VAT) (Chang *et al.*, 2006):

- Un modo “meridional”, activo en la primavera boreal cuando la ZCI en el Atlántico se encuentra en su posición más austral. En este modo, un gradiente en la TSM más pronunciado que lo normal hacia el norte induce vientos transecuatoriales hacia el norte. Los alisios son más débiles que lo normal en el norte y más fuertes en el sur. La desviación de la lluvia del ciclo estacional se caracteriza por un patrón bipolar a través del ecuador térmico. Este modo guarda una relación más estrecha con el comportamiento de la ZCI que el modo zonal. La ZCI tiende a permanecer más tiempo en el hemisferio con una anomalía positiva en la TSM. Las anomalías en la TSM, los alisios y los patrones de flujo de calor indican una conexión (no del todo clara) con otros

modos de variabilidad en el Atlántico como la OAN.

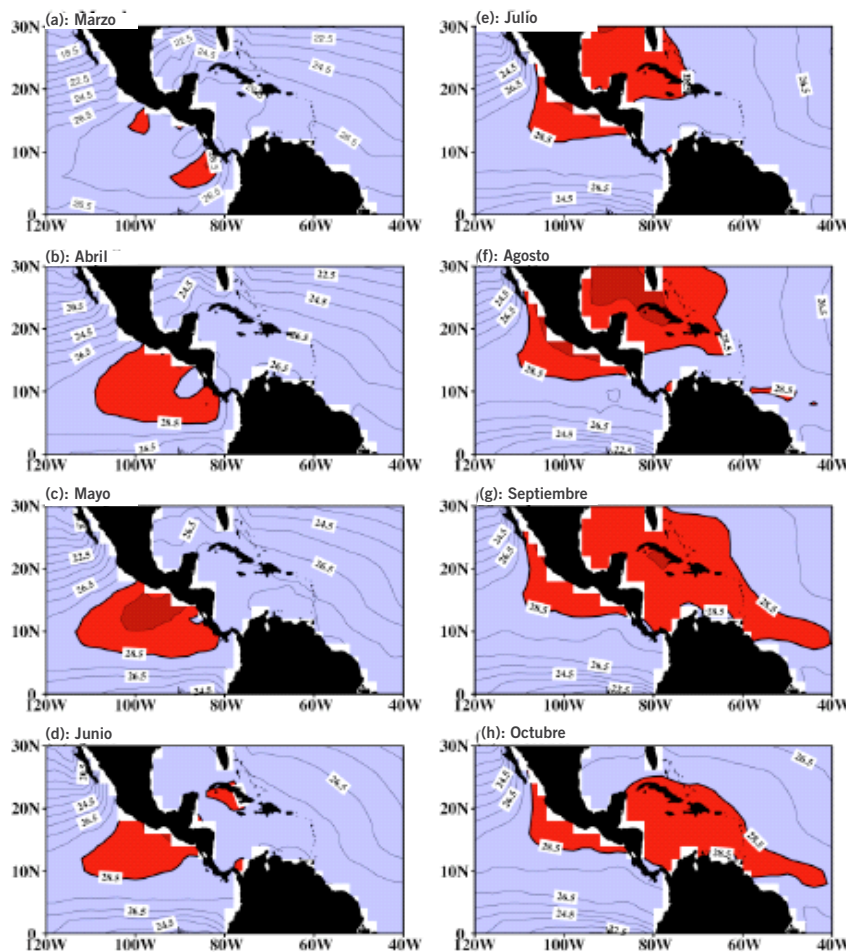
- Un modo “zonal” activo en el verano, cuando la ZCI se encuentra en su posición más septentrional. Se forma una lengua fría en la temperatura de la superficie en el Atlántico oriental ecuatorial. Las anomalías en la TSM máxima en la cuenca oriental se relacionan con un patrón convergente de alisios ecuatoriales. En ocasiones este modo recibe el nombre de “El Niño-Oscilación del Sur” del Atlántico, aunque en realidad es muy distinto del fenómeno ENOS del Pacífico (véanse Xie y Carton, 2004,

y Chang *et al.*, 2006, para obtener más detalles al respecto).

“Piscina de agua cálida” del Atlántico

La “piscina de agua cálida” del Atlántico (AWP, por sus siglas en inglés) es una región en el ANOc y el MIA con TSM superiores a los 28.5 °C (Wang y Enfield, 2001). Forma parte de la “piscina de agua cálida” del hemisferio occidental, que también incluye un componente en el Pacífico oriental ecuatorial. La AWP alcanza su mayor extensión en el verano y desaparece en el invierno (**gráfica A1.6**). Guarda una estrecha relación con la actividad de huracanes: cuanto

Gráfica A1.6 Variación estacional de la temperatura de la superficie del mar para la piscina de agua cálida del hemisferio occidental tropical



El sombreado y el contorno oscuro representan agua a más de 28.5 °C.

Fuente: De Wang y Enfield, 2001; IASCLIP, 2008.

mayor su extensión, más intensa será la actividad de huracanes en el Atlántico, y viceversa. Por ser una fuente de calor para la atmósfera en el verano, se forman teleconexiones importantes que establecen un vínculo climático entre el continente americano y el Atlántico y el Pacífico. El tamaño y la intensidad de la AWP en el verano son resultado del forzamiento atmosférico en el invierno y la primavera previos, lo que permite predecir las condiciones del verano. La variabilidad interanual e interdecadal de su extensión puede ser tan grande como el cambio estacional.

Oscilación Multidecadal del Atlántico

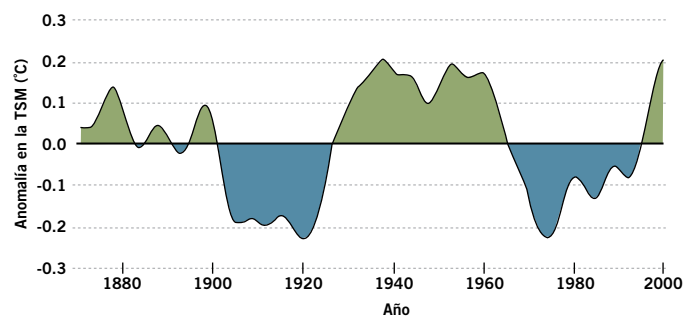
Otro de los modos de variabilidad del clima oceánico de gran escala y de importancia para el ANOC es la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA), que provoca variaciones fuera de fase en la TSM del Atlántico norte y sur en un periodo de 65-75 años (Enfield *et al.*, 2001). La OMA tuvo una fase cálida en el Atlántico norte que se extendió de 1930, aproximadamente, hasta principios de los años sesenta; luego una fase fría hasta mediados de los años noventa (**gráfica A1.7**), y ahora se encuentra de nuevo en un fase cálida, que podría prolongarse hasta la década de 2020. Las estadísticas, el origen y la dinámica de la OMA no se conocen tan bien (en comparación con los de la OAN y del fenómeno ENOS), en parte porque habitualmente sólo tiene uno o dos periodos en muchos registros instrumentales. La variabilidad en la circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés) suele ser uno de los factores que da origen a la

OMA, pero aún no se conocen bien la dinámica y la extensión de su interrelación (CIEM, 2011b). También se ha señalado que la OMA influye en la variabilidad atmosférica tanto en el sur como en el norte de América del Norte, en África occidental y en todo el Atlántico norte, de modo que se registra cierto acoplamiento atmosférico. El calentamiento oceánico y algunos cambios biológicos en la parte sur de la ZT-LM registrados entre la década de los sesenta y la de los noventa se han atribuido a la OMA (EAP, 2009) y hay indicios de una posible influencia en las temperaturas de las plataformas en la parte sur del ANOC-SP. Sin embargo, resulta problemático separar el calentamiento antropogénico de la variabilidad de la OMA en los registros de temperatura oceánica en décadas recientes (Polyakov *et al.*, 2010), lo que pone de relieve lo importante que es considerar la variabilidad tanto natural como antropogénica en las proyecciones del cambio climático.

Circulación meridional de retorno del Atlántico

Componente fundamental del sistema climático mundial, la circulación meridional de retorno del Atlántico (AMOC, por sus siglas en inglés) contribuye en gran medida a la circulación en el ANOC, incluido el flujo al Caribe. Comprende el enfriamiento y hundimiento durante el invierno de las aguas superficiales en los mares de Labrador y Nórdico; su flujo hacia el sur a profundidades intermedias y mayores en el Atlántico norte y sur, y un flujo compensador hacia el norte de aguas cálidas y saladas en la capa superior del océano (en la **gráfica A1.8** se

Gráfica A1.7 Anomalía en la temperatura de la superficie del mar, sin tendencia, en el Atlántico norte



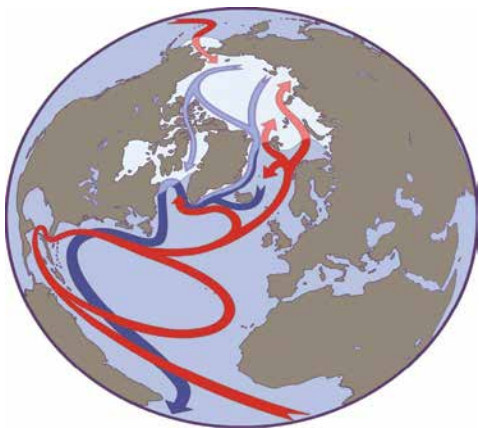
La anomalía en la TSM en el Atlántico norte a menudo se usa como índice de la OMA.
Fuente: Knight *et al.*, 2005.

muestra esquemáticamente). El flujo ecuatorial asociado de agua recientemente ventilada en la DWBC hace que los cambios en las propiedades del agua inducidos atmosféricamente penetren en la columna de agua inferior sobre el talud y la elevación continentales del ANOC más rápidamente que en la mayoría de las regiones profundas del océano mundial. La variabilidad en la AMOC se ha considerado un factor primordial en el origen de los antiguos periodos glaciales y se espera que sea un factor relevante en la respuesta del sistema climático a los mayores niveles actuales de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera por causas antropogénicas. En las simulaciones basadas en modelos MCGAO para el siglo XXI se prevé una desaceleración en la AMOC (Meehl *et al.*, 2007) y se muestra un área de calentamiento reducido en el sur de Groenlandia, en consonancia con una reducción en el transporte de aguas cálidas hacia el polo en la capa superior del océano en el Atlántico norte (lo que compensa la tendencia mundial del calentamiento de la superficie oceánica). De acuerdo con cálculos observacionales, la AMOC se ha desacelerado en el último

medio siglo, pero los resultados de simulaciones basadas en modelos indican también una variabilidad significativa a escala decenal (Balmaseda *et al.*, 2007). Se han señalado varias conexiones entre la circulación meridional de retorno del Atlántico y las oscilaciones del Atlántico Norte y Multidecadal del Atlántico, además de conexiones entre la AMOC y la posición norte-sur de la corriente del Golfo en la ZT-LM. Una tendencia relevante que se desprende de varios estudios observacionales y de modelación (Joyce y Zhang, 2010) es que una AMOC debilitada asociada con una convección profunda reducida en los mares de Labrador y Nórdico produce un desplazamiento hacia el norte de la corriente del Golfo en la ZT-LM y temperaturas oceánicas más elevadas en las aguas de talud que se extienden de los Grandes Bancos a la cuenca del Atlántico medio.

Puesto que el flujo de retorno superficial de la AMOC contribuye en gran medida a la circulación del Caribe y las corrientes que alimentan la corriente del Golfo (corrientes de Yucatán y del Lazo), las alteraciones en su fuerza y trayectoria pueden afectar sustancialmente la circulación oceánica en la región del MIA. Diversos estudios observacionales y de modelación (Johns *et al.*, 2002; Andrade *et al.*, 2003; Jouanno *et al.*, 2008) indican que sin la contribución de la AMOC la energía cinética media y de turbulencias sería considerablemente más débil. Asimismo, es a causa de la contribución de la AMOC que el transporte medio a través de los pasajes sureños en la Antillas Menores ocurre hacia el Caribe. A lo largo de estos pasajes se observa y modela un flujo de retorno subsuperficial que se ha vinculado con el flujo de retorno de Sverdrup, asociado con el giro tropical. Los modelos indican que el fuerte corte entre esta corriente subsuperficial y el flujo superficial de la corriente del Norte de Brasil-Guyana es una importante fuente de formación de remolinos en el Caribe (Cherubin y Richardson, 2007). Los cambios en la fuerza de las principales corrientes y las características generales del campo de remolinos en mar abierto (por ejemplo, a causa de un cambio en la AMOC en la región) pueden afectar la circulación en las lagunas de arrecife de coral del Sistema Arrecifal Mesoamericano, como lo demuestran Coronado *et al.* (2007).

Gráfica A1.8 Vínculos entre la circulación meridional de retorno del Atlántico y los flujos de entrada y salida del Ártico



Representación esquemática de los vínculos entre la circulación meridional de retorno del Atlántico y los flujos de entrada y de salida del Ártico. El rojo indica los flujos cálidos y el azul, los flujos fríos.

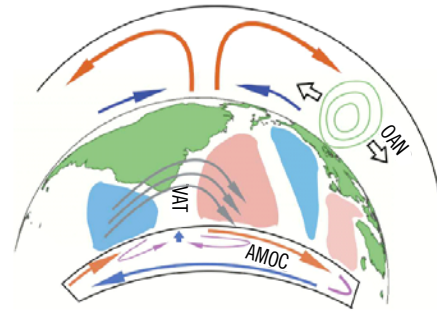
Fuente: Greg Holloway, Instituto de Ciencias Oceanográficas, ministerio de Pesca y Océanos de Canadá (*Institute of Ocean Sciences, Fisheries and Oceans Canada*).

Vínculos entre modos de variabilidad

Según se desprende de la exposición anterior, resulta claro que diversos modos de variabilidad climática natural, generalmente interrelacionados, influyen en regiones oceanográficas particulares del ANOc. Ello se ejemplifica en la descripción que Hurrell *et al.* (2006) ofrecen sobre la relación entre la OAN, la VAT y la AMOC, esquematizada en la **gráfica A1.9**:

La OAN [Oscilación del Atlántico Norte] se asocia con un desplazamiento meridional de los vientos del oeste de latitud media (contornos verdes de la velocidad de los vientos zonales centrada a 40°). El lóbulo tropical [del hemisferio norte] del patrón tripolar de las anomalías en la temperatura de la superficie del mar (cuya manifestación se asocia con la fase de índice negativo de la Oscilación del Atlántico Norte) también se relaciona con la VAT [variabilidad del Atlántico tropical], donde los cambios en el gradiente de la TSM transecuatorial interactúan con la atmósfera suprayacente para producir cambios en la precipitación pluvial en la ZCI [zona de convergencia intertropical]. Una anomalía cálida al norte del ecuador (que también se puede inducir durante una fase cálida de El Niño-Oscilación del Sur) genera vientos transecuatoriales anómalos (indicados por tres flechas gris claro). Durante esta fase, la ZCI se desplaza hacia el norte, produciendo condiciones de sequía en el noreste y de humedad en el África subsahariana. Los cambios en la fuerza y la posición de la convección tropical también pueden afectar la posición y la fuerza de la trayectoria de las tormentas de latitud media (flechas azules) y, por ende, la fase de la OAN. El esquema de la circulación meridional de retorno del Atlántico norte [AMOC, por sus siglas en inglés] representa el transporte de aguas cálidas hacia el norte y de aguas frías que recién pasaron por el proceso de ventilación hacia el sur. Los cambios en la densidad superficial dentro del giro subpolar y las cuencas subárticas pueden influir en la fuerza de la circulación de retorno y del transporte de calor. Tal densidad en

Gráfica A1.9 Esquema de la Oscilación del Atlántico Norte, la variabilidad del Atlántico tropical y la circulación meridional de retorno del Atlántico



OAN = Oscilación del Atlántico Norte
VAT = variabilidad del Atlántico tropical
AMOC = circulación meridional de retorno del Atlántico
Fuente: De Marshall *et al.*, 2001; Hurrell *et al.*, 2006.

latitudes elevadas puede modificarse como consecuencia de una advección anómala de las aguas dulces del Ártico o bien de cambios en los flujos aire-mar. A su vez, la OAN influye sistemáticamente en la fuerza de la circulación meridional de retorno [del Atlántico] en relación con ambos efectos. El océano tropical tiene dos celdas de retorno someras (flechas delgadas) adicionales, inducidas por el transporte de Ekman en la zona de los alisios. Estas celdas de retorno pueden comunicar anomalías de la temperatura superficial de las regiones subtropicales hacia las zonas tropicales de corrientes ascendentes y, por ende, atrasar la retroalimentación en las temperaturas superficiales tropicales. Los tres principales fenómenos climáticos del Atlántico interactúan...

Para dar otro ejemplo de la interconectividad entre los distintos modos de variabilidad climática y sus influencias en una región en particular, en el **cuadro A1.2** se presenta un resumen de los seis modos descritos y sus efectos desde la perspectiva del Atlántico tropical y subtropical (las regiones del ANOc-ST, el MIA y el AOT).

Las diversas interconexiones que se han identificado (o sugerido) entre los seis modos

Cuadro A1.2 Resumen de los modos de variabilidad climática que afectan el Atlántico noroccidental y sus principales características y efectos desde la perspectiva del Atlántico subtropical y tropical

Modo	Principales características o definición	Efecto en el ANOc o en la región del MIA
OAN	<i>Oscilación del Atlántico Norte</i> Índice del gradiente de presión superficial meridional del Atlántico norte. Manifestación en el invierno y primavera boreales, asociada con un patrón tripolar de la TSM en el Atlántico norte.	Efectos en los alisios del noreste mediante la modificación del anticiclón subtropical que afecta la VAT (anomalías en la TSM y el flujo de calor latente). Modifica el giro subtropical.
ENOS	<i>El Niño-Oscilación del Sur</i> Modo atmosférico global y del Pacífico tropical posiblemente modulado por algunos fenómenos de los océanos Índico y Atlántico y oscilaciones de media latitud de largo plazo (por ejemplo, la Oscilación Multidecadal del Pacífico).	(+) Desplazamiento hacia el sur de la ZCI en el Pacífico, pero hacia el norte en el Atlántico oriental tropical. Anomalías negativas en la precipitación pluvial en el Caribe y América Central, así como en el sur y centro de México. Menor número de huracanes en el Atlántico. Efecto importante en el invierno boreal en el MIA.
VAT	<i>Variabilidad tropical del Atlántico</i> Modo meridional (primavera boreal) relacionado con los gradientes de TSM tropicales interhemisféricos cerca del ecuador. Modo zonal (verano boreal) relacionado con la lengua fría en la TSM ecuatorial.	Modificación de la ZCI en el MIA a causa del modo meridional de la VAT.
AWP	<i>Piscina de agua cálida del Atlántico</i> Área del Atlántico donde la TSM > 28.5 °C. Variabilidad de escalas múltiples (estacional, interanual, multidecadal).	Gran extensión relacionada con una mayor actividad de huracanes y con (parte de) la OMA. Gran extensión relacionada con anomalías positivas en la precipitación pluvial en el MIA.
OMA	<i>Oscilación Multidecadal del Atlántico</i> Variación bipolar en la TSM en el Atlántico norte y sur.	Relacionada con la AWP y la circulación meridional de retorno. Celdas subtropicales someras en la capa superior del océano.
AMOC	<i>Circulación meridional de retorno del Atlántico</i> Flujo de agua cálida hacia el norte en la capa superior del océano y de agua fría hacia el sur en la capa inferior del océano.	Contribución importante a la circulación oceánica en el MIA. Conexión entre celdas someras tropicales y subtropicales.

anteriores indican una fuerte conectividad espacial en el sistema climático regional. Los modos conforman una base valiosa para reducir la escala de las proyecciones de cambio climático de más largo plazo a escalas menores, relevantes para los ecosistemas costeros y marinos. Asimismo, las relaciones que se sugieren

(aunque aún no se han establecido con detalle) entre la OAN y la fuerza del vórtice polar atmosférico; entre la OMA y la AMOC, y entre la posición de la corriente del Golfo y la OAN y la AMOC (en diferentes escalas de tiempo), abren espacio para reducir la escala de dichas proyecciones a la escala regional de la ZT-LM.

Cambios climáticos recientes y probables en variables importantes

Variables atmosféricas e hidrológicas

El siguiente es un breve resumen de los cambios previstos en las variables atmosféricas importantes para el clima oceánico del ANOc, con base en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (en especial, Trenberth *et al.*, 2007, y Meehl *et al.*, 2007), estudios recientes antes citados, una revisión bibliográfica de Van der Baaren (2011) y otros artículos también publicados hace poco tiempo (Betts *et al.*, 2011).

- Durante el siglo pasado se observaron temperaturas del aire en la superficie cada vez más altas en América del Norte y el ANOc, tendencia que “se prevé” continuará durante el siglo en curso. En general, la magnitud del cambio aumenta hacia el norte en el este de América del Norte y, en menor grado, en el Atlántico norte, y varía estacionalmente con cambios mayores en el invierno, en especial en latitudes elevadas. El gradiente latitudinal reducido en el Atlántico norte se asocia con un área de calentamiento menor al sur de Groenlandia, que a su vez coincide con una AMOC debilitada. El IPCC (2007) indicó que el intervalo probable de aumento de la temperatura media mundial de finales del siglo XX a finales del siglo XXI para una amplia serie de escenarios de emisiones es de 1.1 a 6.4 °C. Sin embargo, considerando las emisiones actuales y las que se esperan a corto plazo, parece poco probable que el aumento quede cerca del extremo inferior de este intervalo. Hoy es cada vez mayor la preocupación por el llamado cambio climático “peligroso” (Richardson *et al.*, 2009) y existen indicios de que para la década de 2070 podría registrarse un aumento mundial de 4 °C (Betts *et al.*, 2011). Los MCGAO indican en general que el cambio en el noreste de América del Norte podría ser casi el doble de la media mundial.
- Hay más estructura y variabilidad espaciales en los cambios previstos en la precipitación que en la temperatura. Se espera que en invierno la precipitación aumente en la mayor parte de América del Norte como resultado de un ciclo

hidrológico mundial intensificado, pero que disminuya en el suroeste de Estados Unidos y México. Por otro lado, se prevé que en el verano la precipitación aumente en la mitad norte de América del Norte y disminuya en la mitad sur, excepto a lo largo de la costa del Atlántico. Según los pronósticos, se reducirá la fracción de la precipitación en forma de nieve y habrá un derretimiento temprano de la nieve en el este de América del Norte.

- En términos generales, se espera que las tasas de evaporación aumenten en la mitad este de América del Norte y el ANOc-ST, pero disminuyan en México y el ANOc-SP.
- Se pronostican cambios generalizados en el ciclo estacional del escurrimiento de agua dulce al océano, con picos en la primavera más tempranos y en general más pronunciados. Los cambios en el escurrimiento medio anual variarán dependiendo de la región y las tasas de precipitación y evaporación, así como del deshielo y el derretimiento de la nieve. Es previsible una mayor descarga de agua dulce en el ANOc-SP, proveniente tanto de América del Norte como de Groenlandia (deshielo de glaciares), misma que podría acrecentarse aún más a causa de un flujo más abundante de agua dulce del Ártico. Los cambios en la descarga de agua dulce en la ZT-LM son menos predecibles dada la presencia de múltiples sistemas fluviales con zonas de drenaje de extensión variable en el interior continental. Se espera que el escurrimiento del golfo de San Lorenzo aumente en el invierno y disminuya en el verano, probablemente con un incremento medio anual neto (aunque esta predicción es aún tentativa). También se prevé un aumento en la descarga media anual de agua dulce en la parte sur de la ZT-LM (golfo de Maine y cuenca del Atlántico medio). A grandes rasgos, es probable que el escurrimiento en el ANOc-ST y el norte del golfo de México aumente en el invierno y disminuya en el verano, mientras que puede registrarse una reducción general del escurrimiento en el resto del mar Intramericano. No obstante, la operación

de las presas será un factor clave en varias cuencas hidrológicas; por ejemplo, en el Papaloapan y el Grijalva-Usumacinta, en el suroeste del golfo de México.

- Se anticipa que el vórtice polar se profundice y que la corriente de chorro de latitud media se intensifique y vire hacia el norte. Se pronostica una tendencia en la OAN a volverse más positiva (Meehl *et al.*, 2007), pero los cambios en la variabilidad temporal mensual a decenal son inciertos.
- Es previsible que aumente la ocurrencia de huracanes fuertes y ciclones extratropicales intensos en el ANOc y que sus trayectorias se desplacen hacia el norte, aunque se prevé una reducción del número total de ciclones en el invierno (Mann y Emanuel, 2006; Ulbrich *et al.*, 2009).

VARIABLES OCEANOGRÁFICAS FÍSICAS

En el **cuadro A1.3** se presenta un resumen de las tendencias de probables cambios antropogénicos en variables oceanográficas físicas de la capa superior del océano que son fundamentales en el ANOc. Para cada variable o característica, se indica la magnitud relativa de los cambios esperados en las cuatro regiones oceanográficas principales, con base en la documentación y el conocimiento actual. También se indica el grado de confianza de las previsiones con base en la incertidumbre y las lagunas en nuestro conocimiento actual sobre la dinámica y el cambio climáticos (por ejemplo, física, modelos e interpretaciones de observaciones). Se anticipa que todos los cambios indicados se volverán importantes a largo plazo (hacia mediados de siglo), aunque a corto plazo algunos pueden ser menos relevantes que la variabilidad natural. En general, se considera que los cambios señalados como “altamente probables” ya están ocurriendo, si bien la magnitud observada en algunas regiones puede incluir una contribución de la variabilidad natural.

En relación con las implicaciones de estos cambios proyectados, es fundamental considerar la variabilidad natural documentada en el clima oceánico del Atlántico norte, en particular en las escalas de tiempo de una o varias décadas. En el reciente *Status Report on Climate Change in the North Atlantic* [Informe sobre el estado del

cambio climático en el Atlántico Norte], el CIEM (2011b) presenta un panorama de conjunto de muchos aspectos de esta variabilidad, en especial en el Atlántico nororiental. Por su parte, Häkkinen *et al.* (2011) presentan un ejemplo de la importancia de la variabilidad de escala decenal en la parte septentrional del Atlántico norte en su reciente estudio retrospectivo asimilativo.

a) Circulación oceánica de gran escala

Como se describió en el apartado anterior, se espera que la AMOC se debilite a largo plazo (Meehl *et al.*, 2007), lo que reduciría el transporte oceánico de calor hacia la parte septentrional del Atlántico norte y desplazaría la corriente del Golfo hacia el norte en la ZT-LM. También cabe esperar que una OAN más positiva contribuya a una expansión del giro subtropical hacia el norte (Joyce *et al.*, 2000; Han, 2007) y una retracción (estrechamiento) del giro subpolar en el ANOc (Lohmann *et al.*, 2009a,b), con efectos significativos lo mismo en el ANOc-SP que en la ZT-LM. Asimismo —como se expuso *supra*—, se puede prever que una AMOC debilitada reduzca el flujo hacia el MIA y la energía de remolinos en ese mar, lo que tendría implicaciones de mayor alcance tanto para el MIA como para el ANOc-ST.

b) Temperatura oceánica

El calentamiento general intensificado en la superficie del océano ya está ocurriendo (Trenberth *et al.*, 2007) y se espera que continúe en promedios de gran escala y escala decenal tanto a corto como a largo plazos. Asimismo, se prevé que los cambios en los ciclos y extremos estacionales, con diferencias regionales, revestirán particular importancia para los procesos biológicos.

De acuerdo con los pronósticos, el calentamiento de largo plazo relacionado con la tendencia mundial continuará en el ANOc-ST y el MIA. Se espera una tasa reducida de calentamiento en la parte septentrional del Atlántico norte, al sur de Groenlandia, asociada con el debilitamiento de la AMOC. Cabe resaltar que se pronostica que los cambios en el ANOc-SP varíen espacialmente a causa de las influencias rivales del calentamiento atmosférico amplificado y la mayor estratificación (que favorece el calentamiento) en latitudes elevadas, por un lado, y una AMOC

Cuadro A1.3 Tendencias del cambio climático antropogénico en las principales propiedades oceanográficas físicas de la capa superior del océano que afectan a los ecosistemas del Atlántico noroccidental

Variable oceánica	Característica	Tendencias de gran escala para el ANOc	ANOc-SP	ZT-LM	ANOc-ST	MIA
Circulación oceánica de gran escala	AMOC	AMOC desacelerada	–	–	–	–
	Giros subpolar (SP) y subtropical (ST)	Giro SP retraído	–			
	Flujo de entrada del MIA	Giro ST expandido y corriente del Golfo desplazada hacia el norte		++	+	
	Corriente del Lazo	Menor flujo medio y de remolinos en el MIA				–
Temperatura	Cerca de la superficie	Calentamiento general intensificado en la superficie de magnitud reducida en el norte Expansión de las aguas subtropicales en la ZT-LM	+	++++	++	++
	Capa modificada en el invierno		+	++	+	+
	Fondo de plataforma o talud		+	++++	+	+
Extensión y volumen del hielo marino	Sólo en invierno y primavera	Reducidos en los sitios o casos en que están presentes	--	---		
Nivel del mar en las costas (respecto al nivel de la superficie terrestre)	Medias	Aumento generalizado con variaciones regionales a causa de múltiples factores	+++	++++	+++	++++
	Extremos	Aumento adicional generalizado a causa de huracanes y ciclones más intensos	++	+++	+++	++++
Inundación y erosión costeras	Retroceso de la línea de costa	Aumento generalizado a causa del nivel del mar medio y fluctuante, con variaciones regionales debido a las zonas costeras bajas	+	+++	++++	++++
Salinidad	Costa afuera (en los primeros 100 m de profundidad aproximadamente)	Disminución en el ANOc-SP Aumento en la ZT-LM, ANOc-ST y GM	---	+++	++	++
	Costera (en los primeros 100 m de profundidad)	Disminución en el ANOc-SP	I: ---	I: --	I: -	I: --
		Disminución en invierno-primavera (I) y aumento en verano (V) en otros lugares, con variabilidad subregional	V: ---	V: +	V: ++	V: ++
Estratificación y mezcla vertical de la capa superior del océano	Capas superficiales mezcladas	Mayor estratificación generalizada, capas de mezcla más delgadas y menor mezcla vertical	+++	++	+	+
Circulación costera y de plataforma	Corrientes inducidas por la flotabilidad y los vientos Frentes	Mayores flujos y frentes por flotabilidad	+	+	+	+
		Corrientes modificadas en función de los vientos locales	?	?	?	?

Nota: El horizonte de tiempo en el que podría esperarse que estos cambios adquieran más importancia que la variabilidad natural de escala decenal difiere según la variable, pero es posible que ello ocurra para todas en unas cuantas décadas. En este cuadro se señalan las tendencias de gran escala (en el ANOc) para características particulares de estas variables, mientras que la magnitud relativa de tales tendencias en las principales regiones oceanográficas se indica usando los signos + (aumento) y – (disminución) (“?” indica incertidumbre en cuanto al sentido de la tendencia). Las diferentes incertidumbres en las tendencias, asociadas con las actuales lagunas de conocimiento, afectan la probabilidad de ocurrencia y se indican mediante el siguiente código de color: **altamente probable**, **probable**.

reducida, una OAN más positiva y tal vez mayores flujos de salida del Ártico (que favorecen el enfriamiento), por el otro.

En la ZT-LM se espera un mayor calentamiento (Fogarty *et al.*, 2007) asociado con una expansión del giro subtropical hacia los polos (desplazamiento de la corriente del Golfo hacia el norte) (Nye *et al.*, 2011) y una retracción del giro subpolar (que se suma al calentamiento superficial). Hay indicios (Friedland y Hare, 2007; Lucey y Nye, 2010) de que ya se registra un desplazamiento de régimen hacia el norte a causa de una combinación de presiones climática y pesquera en la parte sur de la ZT-LM (de la cuenca del Atlántico medio al golfo de Maine). Cabe esperar que este desplazamiento continúe y se amplíe hacia el norte en el largo plazo. En conjunto, estas alteraciones pueden ampliar el gradiente de temperatura latitudinal en la ZT-LM y en la parte sur del ANOc-SP, en contraste con el menor gradiente latitudinal previsto en términos más generales.

También puede esperarse un aumento en la temperatura de las aguas intermedias y profundas sobre el talud y la elevación continentales en el ANOc-SP, la ZT-LM y el ANOc-ST, pero de manera más lenta y de mucho menor magnitud que en las aguas de la capa superior del océano. Los detalles de estos cambios dependerán de la variabilidad en la estructura e intensidad de la AMOC —y de la DWBC, en particular—, así como de su interacción con otras características de circulación que afectan las aguas profundas en el ANOc. Una posibilidad contraria a lo que indica la intuición es que en aguas más profundas afectadas por el desbordamiento del estrecho de Dinamarca (profundidades superiores a 3,500 m) puedan producirse cambios más rápidamente que en las aguas profundas del Atlántico nororiental (profundidades entre 2,500 y 3,500 metros) a causa de la actual intensificación en el fondo de la DWBC. Por otra parte, en condiciones de una AMOC reducida, quizá la rama inferior de la AMOC no penetre a la misma profundidad, de modo que la ventilación de las aguas profundas del ANOc podría ser mucho más lenta que la actual. Los cambios que podrían registrarse en la temperatura de las aguas profundas del MIA son aún menos claros dada la posibilidad

de alteraciones en la circulación local relacionadas con su compleja geometría.

c) Extensión y volumen del hielo marino

La extensión y el volumen del hielo marino en el Ártico durante el verano han disminuido sustancialmente en las últimas dos décadas (Kwok y Rothrock, 2009), incluso en el archipiélago ártico canadiense (Howell *et al.*, 2009). Se espera que, en general, el hielo marino del Ártico siga disminuyendo en extensión y volumen como consecuencia del cambio climático antropogénico, probablemente a una mayor velocidad (Wang y Overland, 2009; CIEM, 2011b) (aunque puede haber desviaciones locales dentro del archipiélago). A largo plazo se prevén grandes reducciones en la extensión y el volumen del hielo marino en las partes del ANOc-SP (por ejemplo, las plataformas y los taludes de Labrador y el noreste de Terranova) y la ZT-LM (golfo de San Lorenzo) donde actualmente se forma hielo estacional. Puede esperarse que esto tenga implicaciones de gran magnitud para algunas partes de los ecosistemas regionales. La extensión y duración del hielo marino disminuyeron en la plataforma y el talud del noreste de Terranova (al sur de 55°N) durante la década pasada (Templeman, 2010), pero no queda claro si esto se asocia con la variabilidad natural (OAN o OMA) o bien con el cambio antropogénico.

d) Nivel del mar en las costas

Se tiene bien documentado un aumento mundial en el nivel del mar en el último medio siglo (Bindoff *et al.*, 2007), con contribuciones de la expansión térmica del océano y el derretimiento del hielo marino y los glaciares en general consecuentes con el cambio climático antropogénico. Otros factores que contribuyen a la variabilidad del nivel del mar en las costas, de manera estacional y en escalas de tiempo más amplias, son los cambios regionales y subregionales relacionados con: i) la circulación oceánica (por ejemplo, la AMOC y los giros horizontales) y las corrientes (por ejemplo, las inducidas por los vientos locales y la flotabilidad), y ii) los movimientos verticales de las tierras costeras y el fondo marino a causa del rebote o el hundimiento continentales, y el

hundimiento de los deltas fluviales. Es de esperar que estos factores adicionales intensifiquen el aumento del nivel del mar (respecto al nivel local de la superficie terrestre) en muchas partes de la costa atlántica de América del Norte, lo que ya está sucediendo en algunos casos. En particular, actualmente el hundimiento de la tierra intensifica el aumento relativo del nivel del mar en partes de la ZT-LM (por ejemplo, Nueva Escocia) y el mar Intramericano (por ejemplo, delta del Misisipi y Ciudad Madero). Según los pronósticos, este aumento seguirá intensificándose en la ZT-LM y también en el ANOc-SP a causa de la desaceleración de la AMOC (Yin *et al.*, 2009) y la expansión hacia el norte del giro subtropical.

Ahora hay buenas razones para creer que el nivel del mar aumentará a un ritmo más rápido que el previsto en el informe de 2007 del IPCC porque el hielo de Groenlandia se está derriendiendo a una velocidad mayor que la pronosticada y la tasa de calentamiento global también parece más alta de lo esperado. Mientras que en el informe del IPCC (2007) se preveía un aumento medio mundial para la década de 2090 (en relación con la de 1980) del orden de 0.18 a 0.59 metros según los diversos escenarios de emisiones, en artículos recientes se indica un probable aumento del nivel del mar de 0.5 a 1 metros para 2100 (Richardson *et al.*, 2009; Nicholls *et al.*, 2010) y en algunos estudios se llega incluso a plantear la posibilidad de que sean dos metros.

Además del mencionado aumento generalizado en el nivel del mar “medio” (estacional o en periodos más prolongados), para muchas zonas se prevé una amplificación de la variabilidad extrema de alta frecuencia (lapsos de horas) en el nivel del mar, asociada con los ciclones y huracanes más intensos en el ANOc. Se puede esperar que ambos aumentos sumados contribuyan a un significativo incremento en las crecidas extremas en la mayoría de las zonas. Esto último puede verse exacerbado en zonas con fuertes mareas semidiurnas, como el sistema de mareas de la bahía de Fundy-golfo de Maine, pues hay indicios de que estas mareas están creciendo en amplitud, posiblemente también como resultado del cambio climático (Müller, 2011).

e) Inundación y erosión costeras

Puede esperarse que la mayor ocurrencia prevista de crecidas extremas a lo largo de la costa atlántica exacerbe la inundación costera y de humedales, y provoque un aumento de la erosión y otras alteraciones de la zona costera. Esto puede empeorar en algunas zonas a causa de olas de mayor magnitud, asociadas con tormentas y huracanes más intensos, y el menor amortiguamiento de las olas (debido al mayor nivel del mar “medio”). Éste es un caso de múltiples factores de reforzamiento asociados con distintos aspectos de variabilidad antropogénica y natural que contribuyen a considerables amplificaciones regionales y subregionales de la tendencia mundial al aumento del nivel del mar y los daños costeros. El menor aporte de sedimentos a causa de la construcción de embalses, junto con el aumento del nivel del mar, también incrementará la erosión costera en algunas zonas deltaicas.

Este tema se ve agravado por las extensas zonas de playas de barrera, humedales y tierras costeras bajas en el MIA, el ANOc-ST y la ZT-LM (FOCC, 2009; Wu *et al.*, 2009). Como resultado de estos factores múltiples, y dada la nueva información sobre un aumento del nivel del mar más rápido que el antes previsto, resulta necesario considerar especialmente el cambio climático en las estrategias de gestión y adaptación para los ecosistemas costeros en estas regiones, al igual que para la infraestructura y las poblaciones humanas en las costas.

f) Salinidad oceánica

Se espera que los cambios en la salinidad de la capa superior del océano tengan diferentes manifestaciones, dependiendo de las regiones y quizá de las subregiones (Meehl *et al.*, 2007). En el ANOc-SP se prevé una disminución generalizada de la salinidad, derivada de una combinación de mayores descargas fluviales (asociadas, a su vez, con el ciclo hidrológico amplificado), el mayor derretimiento de glaciares y hielo marino, y posiblemente mayores flujos de agua dulce del Ártico. En cambio, se espera un aumento general de la salinidad en el ANOc-ST y el MIA a causa de la mayor evaporación conforme se incrementen las temperaturas. Una probable excepción son las zonas costeras donde

la descarga fluvial sustancial puede ocasionar amplificaciones o reducciones locales de la salinidad. Parecería que las aguas costeras afectadas por el flujo de salida del Misisipi presentarían las mayores posibilidades de registrar una anomalía subregional, con probables aumentos en la descarga durante primavera-verano, lo que reduciría el incremento de la salinidad (o reduciría la salinidad a escala local), y probables disminuciones en el escurrimiento durante el verano, lo que generaría aumentos estacionales amplificados de la salinidad.

Las alteraciones de la salinidad en la ZT-LM son menos predecibles y probablemente posean una estructura más espacial que en las otras dos regiones. Con la expansión del giro subtropical hacia el norte y la retracción del giro subpolar, se espera un aumento general de la salinidad de la capa superior del océano en las aguas profundas y taludes costa afuera de la ZT-LM, y probablemente también en profundidades superiores a los 100 m en las plataformas exterior y central. En cambio, en el océano costero y en aguas cercanas a la superficie en la plataforma interior, la salinidad quizá tenga como influencia predominante las alteraciones en el escurrimiento local o subregional, al menos en el invierno y la primavera. Así pues, parece probable que en el invierno y la primavera la salinidad disminuya en las capas superiores del golfo de San Lorenzo, al igual que en las zonas costeras de la mitad sur de la ZT-LM, como consecuencia del mayor escurrimiento estacional. Por otro lado, se esperan mayores salinidades cerca del fondo en el golfo de San Lorenzo, así como en el resto de las cuencas y canales de plataforma en la ZT-LM, a causa de la intrusión de aguas de talud más saladas.

g) Estratificación y mezcla vertical en la capa superior del océano

Se espera que las alteraciones en la estratificación de la densidad y la mezcla vertical en la capa superior del océano se interrelacionen con los cambios en la temperatura y la salinidad superficiales y subsuperficiales, así como con los cambios en la mezcla inducidos por los vientos y la marea, y dependen de ellos. También cabe esperar que el calentamiento de la superficie oceánica presente una tendencia

de amplia escala hacia una estratificación creciente cerca de la superficie y capas de mezcla más someras (delgadas). Se prevé que los cambios en la salinidad del océano refuercen esta tendencia en el ANOc-SP y en las zonas costeras de la ZT-LM, pero que la compensen, al menos en parte, en el ANOc-ST. La influencia de los cambios en la mezcla inducidos por los vientos y la marea probablemente sea más variable desde los puntos de vista espacial y estacional, quizá con una mayor mezcla a finales de la temporada de huracanes y ciclones en el verano-otoño, pero con una mezcla reducida en la primavera y el verano, cuando se produce la estratificación estacional.

En décadas recientes se ha observado una cada vez mayor y más temprana estratificación estacional en partes de la plataforma de la ZT-LM, con aparentes influencias en la producción de fitoplancton (EAP, 2009; Worcester y Parker, 2010; Petrie *et al.*, 2011), lo que indica que en esta región ya está ocurriendo un cambio antropogénico significativo con efectos biológicos. Otro resultado previsto de la mayor estratificación es una reducción en la extensión espacial de las áreas verticalmente bien mezcladas durante todo el año en zonas energéticas por su marea como el golfo de Maine (por ejemplo, el banco de Georges).

h) Circulación costera y sobre la plataforma

Se pueden esperar cambios en los patrones de circulación, corrientes, frentes, plumas de agua dulce y corrientes ascendentes y descendentes a escalas subregional y local en la zona costera y en la plataforma continental. Aunque en muchas de estas alteraciones tal vez influyan las tendencias regionales y de mayor escala antes descritas, en general se prevé una fuerte influencia de factores locales como el escurrimiento y los vientos. Es de esperar que la tendencia de gran escala de un mayor escurrimiento en el invierno y la primavera contribuya a una estratificación estacional más temprana y frentes más intensos, junto con sus flujos asociados, en la mayoría de las regiones costeras durante la primavera. Sin embargo, los frentes costeros pueden ser más débiles en algunas áreas con un escurrimiento reducido en el verano. Por otro lado,

las influencias espacial y estacionalmente variables de los vientos (magnitud y dirección) pueden ser el principal factor que contribuya a los cambios de las corrientes costeras en muchas áreas.

Propiedades oceanográficas químicas

En el **cuadro A1.4** se resumen las tendencias relativas a cambios en propiedades oceanográficas químicas fundamentales, asociados con cambios climáticos en procesos no biológicos.

Se pronostica que las temperaturas oceánicas más elevadas, la mayor estratificación y la mezcla vertical reducida en la capa superior del océano establezcan una tendencia a la reducción del abastecimiento atmosférico de oxígeno a aguas subsuperficiales y, por ende, a menores concentraciones de oxígeno disuelto en profundidades bajo la zona de ventilación durante el invierno (Keeling *et al.*, 2010). Esto, a su vez, deberá establecer una tendencia en las aguas subtropicales subsuperficiales “más viejas” a acercarse más a condiciones hipóxicas,

lo que podría agravar la situación al sumarse a problemas de hipoxia y anoxia en las zonas costeras derivados de la concentración significativa de nutrientes en las descargas costeras. Por otra parte, los cambios en los procesos biológicos tal vez predominen en algunas zonas y contribuyan de manera importante a propiciar alteraciones en el oxígeno disuelto. La mayor producción primaria prevista en las regiones subpolares (véase *infra*) puede reducir aún más las concentraciones de oxígeno en estas zonas, mientras que una menor producción en aguas subtropicales costa afuera podría compensar parcialmente la reducción de oxígeno provocada por una menor ventilación (Keeling *et al.*, 2010). En aguas costeras con un mayor escurrimiento, cualquier carga adicional de nutrientes puede acrecentar la producción biológica y disminuir más las concentraciones de oxígeno.

Una consecuencia clara y directa de las mayores concentraciones de CO₂ en la atmósfera es un aumento generalizado del carbono

Cuadro A1.4 Tendencias en propiedades oceanográficas químicas de la capa superior del océano fundamentales para los ecosistemas en el Atlántico noroccidental como resultado del cambio climático antropogénico en procesos oceanográficos físicos

Variable oceánica	Característica	Tendencias de gran escala para el ANOc	ANOc-SP	ZT-LM	ANOc-ST	MIA
Oxígeno disuelto	Concentraciones mínimas subsuperficiales	Concentración reducida general en la capa ubicada bajo la nueva menor profundidad de la ventilación en el invierno	--	-	-	-
Acidez oceánica	Capa superior del océano	Aumento general en las áreas ventiladas en el invierno Mayor en los inviernos más fríos	+++	+	+	+
Nutrientes	Aporte vertical a la zona eufótica	Reducción general Diferencias subregionales en zonas costeras y de plataforma	-	-	-	-
	Niveles alterados a causa de cambios en la circulación	Aumentos y disminuciones de distintos nutrientes asociados con los flujos de salida cambiantes del Ártico Disminución en la ZT-LM a causa de la mayor influencia subtropical	+/-	+/-	-	?

Nota: El formato y las convenciones utilizados en este cuadro son los mismos que los del cuadro A1.3. La magnitud relativa de los cambios en las diferentes regiones se indica con los signos + (aumento) y - (disminución) (“?” indica incertidumbre en cuanto al sentido de la tendencia), y la probabilidad de la ocurrencia, mediante el siguiente código de color: **altamente probable**, **probable**. No se incluyen las influencias de los cambios en los procesos biológicos asociados con el cambio climático.

inorgánico disuelto y la acidez (menor pH), así como la menor saturación de carbonato de calcio en la capa superior del océano, en particular en aguas frías que pueden contener más CO₂ que aguas más cálidas (Doney *et al.*, 2009; Hoegh-Guldberg y Bruno, 2010). Como resultado, algunas aguas del Ártico ya se están volviendo corrosivas para los organismos calcáreos y es previsible que durante el próximo siglo aumenten paulatinamente los (distintos) niveles de profundidad en los que el crecimiento de conchas calcáreas y aragoníticas resultará afectado. Se anticipa que el aumento de la acidez oceánica tendrá efectos adversos sobre todo en los ecosistemas de arrecifes de coral, pero también supondrá toda una serie de posibles efectos adversos en los procesos biogeoquímicos que afectan a los organismos y ecosistemas marinos (CIEM, 2011b).

Se puede esperar que la mayor estratificación de la capa superior del océano contribuya a una reducción generalizada en el aporte de nutrientes a la zona eufótica, lo que deberá reducir el crecimiento del fitoplancton en zonas templadas y subtropicales, donde el crecimiento está limitado por los nutrientes. En cambio, en aguas subpolares, donde el crecimiento está limitado por la luz, se prevé que la mayor estratificación aumente el crecimiento del fitoplancton (debido a una mayor permanencia en la zona eufótica). En las regiones costeras, la variabilidad estacional y espacial de diversos procesos oceanográficos físicos subregionales (por ejemplo, las corrientes ascendentes) puede ser la influencia predominante en la disponibilidad de nutrientes para la zona eufótica. Los cambios de gran escala en la circulación también pueden propiciar cambios en las concentraciones de nutrientes en zonas como el ANOc-SP y la ZT-LM asociados con los flujos de salida del Ártico (Yamagoto-Kawai *et al.*, 2006; Harrison y Li, 2008; Yeats *et al.*, 2010) y un desplazamiento en la corriente del Golfo, respectivamente.

Índices para estudios de covariables

Dadas la complejidad, múltiples factores e incertidumbres asociadas con el cambio climático, será importante contar con índices tanto de los forzamientos climáticos como de

las principales variables oceanográficas para establecer vínculos con la variabilidad de los ecosistemas. En general, será necesario que los índices de la variabilidad pasada se basen en la observación, pero podrían incluir algunos modelos asimilativos para fenómenos oceanográficos y atmosféricos fundamentales que se prevé sufran cambios y afecten algunos aspectos del ecosistema. Cabe esperar que la principal utilidad de los índices de las variables y características oceanográficas que afectan directamente a los organismos marinos sea para entender los efectos del cambio climático y elaborar previsiones confiables al respecto. También serán importantes los índices de las variables atmosféricas e hidrológicas que pueden considerarse forzamientos esenciales del cambio climático en el océano, sobre todo para identificar conexiones y vínculos de gran escala.

Existen ya muchos índices para la variabilidad climática del océano y la atmósfera en el ANOc y para sus importantes modos naturales antes descritos. El CIEM (2011a) ofrece un panorama general de la variabilidad de los ecosistemas e incluye un gran número de variables e índices que se han utilizado para identificar los vínculos entre el clima y los ecosistemas, y los posibles mecanismos de acoplamiento. Estos índices son candidatos naturales para un mayor uso, en especial aquellos para los vínculos más sólidos y comprensibles y que seguirán estando disponibles. Sin embargo, conforme aumente nuestro conocimiento sobre los vínculos entre el clima y los ecosistemas marinos en años venideros, mediante simulaciones basadas en modelos y la interpretación de datos observacionales, será importante evaluar la representatividad de estos índices e identificar los más relevantes. No obstante, será igualmente importante mantener series de tiempo con las que ya se cuenta (CIEM, 2010), aunque no sean los mejores indicadores de algunas características.

Referencias

- Andrade, C. B., E. D. Barton y C. N. L. Mooers, "Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast", *Journal of Geophysical Research*, núm. 108, 3185. doi:10.1029/2002JC001549, 2003.
- Balmaseda, M. A., G. C. Smith, K. Haines, D. Anderson, T. N. Palmer y A. Vidard, "Historical reconstruction of the Atlantic Meridional Overturning Circulation from the ECMWF operational ocean reanalysis", *Geophysical Research Letters*, núm. 34, L23615, doi:10.1029/2007GL031645, 2007.
- Betts, R. A., M. Collins, D. L. Hemming, C. D. Jones, J. A. Lowe y M. G. Sanderson, "When could global warming reach 4 °C?", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, núm. A 369, 2011, pp. 67-84.
- Bindoff, N. L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C. K. Shum, L. D. Talley y A. Unnikrishnan, "Observations: oceanic climate change and sea level", en: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller (comps.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 2007, pp. 385-432.
- Boicourt, W. C., W. W. Wiseman, A. Valle Levinsony y L. P. Atkinson, "Continental shelf of the southeastern United States and Gulf of Mexico: In the shadow of the western boundary current", en: A. R. Robinson y K. H. Brink (comps.), *The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis*, The Sea, vol. 11, John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 135-182.
- CCSP, "Coastal sensitivity to sea-level rise: a focus on the Mid-Atlantic region", en: J. G. Titus (coord.), *A Report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, NOAA National Climatic Data Center, Washington, DC, 2009.
- CCSP, "Weather and extremes in a changing climate. Regions of focus: North America, Hawaii, Caribbean and US Pacific Islands", en: T. R. Karl, G. A. Meehl, C. D. Miller, S. J. Hassol, A. M. Waple y W. L. Murray (comps.), *A Report by the US Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, NOAA National Climatic Data Center, Washington, DC, 2008a.
- CCSP, "Abrupt climate change", en: P. U. Clark y A. J. Weaver (coords.), *A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, National Climatic Data Center de la NOAA, Washington, DC, 2008b.
- Chang, P., T. T. Yamagata, P. Schopf, S. K. Behera, J. Carton, W. S. Kessler, G. Meyers, T. Qu, F. Schott, S. Shetye y S.-P. Xie, "Climate fluctuations of tropical coupled system – the role of ocean dynamics", *Journal of Climate*, núm. 19, 2006, pp. 5122-5174.
- Chen, A. A. y M. A. Taylor, "Investigating the link between early season Caribbean rainfall and the El Niño plus 1 year", *International Journal of Climatology*, núm. 22, 2002, pp. 87-106.
- Chérubin, L. M. y P. Richardson, "Caribbean current variability and the influence of the Amazon and Orinoco fresh water plumes", *Deep-Sea Research I*, núm. 54, 2007, pp. 1451-1473.
- Cochrane, K., C. de Young, D. Soto y T. Bahria (comps.), *Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos*, Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, núm. 530, FAO, Roma, 2009.
- Colbourne, E. B., J. Craig, C. Fitzpatrick, D. Senciall, P. Stead y W. Bailey, *An assessment of the physical oceanographic environment on the Newfoundland and Labrador Shelf in NAFO Subareas 2 and 3 during 2009*, NAFO Scientific Council Research Document, 10/16, núm. seriado N5770, Organización de Pesquerías del Atlántico Noroeste (NAFO), Dartmouth, NS, 2010.

- Coronado, C., J. Candela, R. Iglesias, J. Sheinbaum, M. López y F. O. Torres, "On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon", *Coral Reefs*, núm. 26, 2007, pp. 149-163.
- Dickson, R., B. Rudels, S. Dye, M. Karcher, J. Meincke e I. Yashayaev, "Current estimates of freshwater flux through Arctic and subarctic seas", *Progress in Oceanography*, núm. 73, 2007, pp. 210-230.
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely y J. A. Kleypas, "Ocean acidification: the other CO₂ problem", *Annual Review of Marine Science*, núm. 1, 2009, pp. 169-192.
- EAP, "Ecosystem Assessment Report for the Northeast US continental shelf large marine ecosystem", Northeast Fisheries Center Reference Document 09-11, Ecosystem Assessment Program, NOAA y NMFS, Woods Hole, MA, 2009.
- Enfield, D. B., A. M. Mestas Nunez y P. J. Trimble, "The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental US", *Geophysical Research Letters*, núm. 28, 2001, pp. 2077-2080.
- FOCC, *The effects of climate change on Florida's ocean and coastal resources*, Florida Oceans and Coastal Council, Tallahassee, Florida, 2009.
- Fogarty, M., L. Incze, R. Wahle, D. Mountain, A. Robinson, A. Pershing, K. Hayhoe, A. Richards y J. Manning, *Potential climate change impacts on marine resources of the Northeastern United States*, Northeast Climate Impacts Assessment Technical Series, 2007, <www.northeastclimateimpacts.org/pdf/miti/fogarty_et_al.pdf>.
- Friedland, K. D. y J. A. Hare, "Long-term trends and regime shifts in sea surface temperature on the continental shelf of the northeast United States", *Continental Shelf Research*, núm. 27, 2007, pp. 2313-2328.
- Frumhoff, P. C., J. J. McCarthy, J. M. Melillo, S. C. Moser y D. J. Wuebbles, *Confronting climate change in the U.S. Northeast: Science, impacts and solutions*, Synthesis report of the Northeast Climate Impacts Assessment (NECIA), Cambridge, Massachusetts, 2007.
- Häkkinen, S., P. B. Rhines y D. L. Worthen, "Warm and saline events embedded in the meridional circulation of the northern North Atlantic", *Journal of Geophysical Research*, núm. 116, C03006, doi: 10.129/2010/JC006275, 2011.
- Han, G., "Satellite observations of seasonal and interannual changes of sea level and currents over the Scotian Slope", *Journal of Physical Oceanography*, núm. 37, 2007, pp. 1051-1065.
- Han, G., K. Ohashi, N. Chen, P. G. Myers, N. Nunes y J. Fischer, "Decline and partial rebound of the Labrador Current 1993-2004: Monitoring ocean currents from altimetric and conductivity-temperature-depth data", *Journal of Geophysical Research*, núm. 115, C12012, 2010.
- Harrison, W. G. y W. K. W. Li, "Phytoplankton growth and regulation in the Labrador Sea: light and nutrient limitation", *Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science*, núm. 39, 2007, pp. 71-82.
- Hayhoe, K., C. Wake, B. Anderson, X.-Z. Liang, E. Maurer, J. Zhu, J. Bradbury, A. DeGaetano, A. M. Stoner y D. Wuebbles, "Regional climate change projections for the Northeast USA", *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13(5-6), 2008, pp. 425-436.
- Hoegh-Guldberg, O. y J. F. Bruno, "The impact of climate change on the world's marine ecosystems", *Science*, núm. 328, 2010, pp. 1523-1528.
- Howell, S. E. L., C. R. Duguay y T. Markus, "Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979-2008", *Geophysical Research Letters*, núm. 36: L10502, doi:10.101029/2009GL037681, 2009.
- Hurrell, J. W. y C. Deser, "North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation", *Journal of Marine Systems*, núm. 79, 2010, pp. 231-244.
- Hurrell, J. W., M. Visbeck, A. Busalacchi, R. A. Clarke, T. L. Delworth, R. R. Dickson, W. E. Johns, K. P. Koltermann, Y. Kushnir, D. Marshall, C. Mauritzen, M. S. McCartney, A. Piola, C. Reason, G. Reverdin, F. Schott, R. Sutton, I. Wainer y D. Wright, "Atlantic climate variability and predictability: A CLIVAR perspective", *Journal of Climate*, núm. 19, 2006, pp. 5100-5126.
- IASCLIP, "A science and implementation plan for the Intra America Studies of Climate Processes", *Prospectus for an Intra-Americas study of climate processes*, preparado para el panel VAMOS, Intra-Americas Study of Climate Processes, 2008, <www.eol.ucar.edu/projects/iasclip/documentation/iasclip_prospectus_latest.pdf>.

- CIEM, "Report of the Study Group on Designing Marine Protected Area Networks in a Changing Climate (SGMPAN)", 15 a 19 de noviembre de 2010, Woods Hole, Massachusetts, ICES CM 2011/SSGSUE:01, 2011a.
- CIEM, "ICES status report on climate change in the North Atlantic", *ICES Cooperative Research Report*, núm. 310, 2011b.
- CIEM, "Report of the Working Group on the Northwest Atlantic Regional Sea (WGNARS)", ICES CM 2010/SSGRSP:03, 2010.
- CIEM, "Report of the Workshop on Cod and Future Climate Change", ICES CM 2008/OCC:09, 2008a.
- CIEM, "The effect of climate change on the distribution and abundance of marine species in the OSPAR Maritime Area", *ICES Cooperative Research Report*, núm. 293, 2008b.
- IPCC, *Climate Change 2007: The physical science basis*, contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor y H. L. Miller (comps.), Cambridge University Press, 2007.
- Johns, D. G., M. Edwards, A. Richardson y J. I. Spicer, "Increased blooms of a dinoflagellate in the NW Atlantic", *Marine Ecology Progress Series* 265, 2003, pp. 283-287.
- Johns, W. E., T. L. Townsend, D. M. Fratantoni y W. D. Wilson, "On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea", *Deep Sea Research I*, núm. 49, 2002, pp. 211-243.
- Jouanno, J., J. Sheinbaum, B. Barnier, J. M. Molines, L. Debreu y F. Lemarié, "The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: simulations with an embedded model and characteristics", *Ocean Modeling*, núm. 23, 2008, pp. 82-101.
- Joyce, T. M., C. Deser y M. A. Spall, "The relation between decadal variability of Subtropical Mode Water and the North Atlantic Oscillation", *Journal of Climate*, núm. 13, 2000, pp. 2550-2569.
- Joyce, T. M. y R. Zhang, "On the path of the Gulf Stream and the Atlantic Meridional Overturning Circulation", *Journal of Climate*, núm. 23, 2010, pp. 3146-3154.
- Keeling, R. F., A. Körtzinger y N. Gruber, "Ocean de-oxygenation in a warming world", *Annual Review of Marine Science*, núm. 2, 2010, pp. 199-229.
- Knight, J. R., R. J. Allan, C. Folland, M. Vellinga y M. E. Mann, "A signature of persistent natural thermohaline cycles in observed climate", *Geophysical Research Letters*, núm. 32, L20708, doi:10.1029/2005GL024233, 2005.
- Kwok, R. y D. A. Rothrock, "Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958-2008", *Geophysical Research Letters*, núm. 36, L15501, doi:10.1029/2009GL039-35, 2009.
- Loder, J. W., W. C. Boicourt y J. H. Simpson, "Overview of western ocean boundary shelves", en: A. R. Robinson y K. H. Brink (comps.), *The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis*, The Sea, vol. 11, John Wiley & Sons, Inc., 1998a, pp. 3-27.
- Loder, J. W., B. Petrie y G. Gawarkiewicz, "The coastal ocean off northeastern North America: a large-scale view", en: A. R. Robinson y K. H. Brink (comps.), *The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis*, The Sea, vol. 11, John Wiley & Sons, Inc., 1998b, pp. 105-133.
- Lohmann, K., H. Drange y M. Bentsen, "A possible mechanism for the strong weakening of the North Atlantic subpolar gyre in the mid-1990s", *Geophysical Research Letters*, núm. 36: L15602, doi:10.10129/2009GL039166, 2009a.
- Lohmann, K., H. Drange y M. Bentsen, "Response of the North Atlantic subpolar gyre to persistent North Atlantic oscillation like forcing", *Climate Dynamics*, núm. 32, 2009b, pp. 273-285.
- Lucey, S. M. y J. A. Nye, "Shifting species assemblages in the Northeast US continental shelf large marine ecosystem", *Marine Ecology Progress Series* 415, 2010, pp. 23-33.
- Mann, M. E. y K. Emanuel, "Atlantic hurricane trends linked to climate change", *EOS*, núm. 87, 2006, pp. 233-241.
- Marshall, J., Y. Kushnir, D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, R. Dickson, J. Hurrell, M. McCartney, R. Saravanan y M. Visbeck, "North Atlantic climate variability: Phenomena, impacts and mechanisms", *International Journal of Climatology*, núm. 21, 2001, pp. 1863-1898.
- Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J. M. Murphy, A. Noda, S. C. B. Raper, I. G. Watterson, A. J. Weaver y Z.-C. Zhao, "Global climate projections", en: *Climate Change 2007: The Physical*

- Science Basis*, contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, 2007, pp. 747-845.
- Montane, M. M. y H. M. Austin, "Effects of hurricanes on Atlantic croaker (*Micropogonias undulatus*) recruitment to Chesapeake Bay", en: K. Sellner (ed.), *Hurricane Isabel in Perspective*, Chesapeake Research Consortium, CRC Publication 05-160, Edgewater, MD, 2005, pp. 185-192.
- Mooers, C. N. K. y G. A. Maul, "Intra-Americas Sea circulation", en: A. R. Robinson y K. H. Brink (comps.), *The Global Coastal Ocean: Regional Studies and Synthesis*, The Sea, vol. 11., John Wiley & Sons, Inc., 1998, pp. 183-208.
- Müller, M., "Rapid change in the semi-diurnal tides in the North Atlantic since 1980", *Geophysical Research Letters*, núm. 38, L11602, doi:10.1029/2011GL047312, 2011.
- New, M., D. Liverman, H. Schroder y K. Anderson, "Four degrees and beyond: the potential for a global temperature increase of four degrees and its implications", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, núm. A 369, 2011, pp. 6-19.
- Nicholls, R. J., N. Marinova, J. A. Lowe, S. Brown, P. Vellinga, D. de Gusmao, J. Hinkel y R. S. J. Tol, "Sea-level rise and its possible impacts given a 'beyond 4°C world' in the twenty-first century", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, núm. A 369, 2010, pp. 161-181.
- Nye, J. A., T. M. Joyce, Y.-O. Kwon y J. S. Link, "Silver hake tracks changes in Northwest Atlantic circulation", *Nature Communications*, núm. 2: 412 doi:10.1038/ncomms1420, 2011.
- Ning, Z. H., R. T. E. Turner, T. Doyle y K. K. Abdollahi, *Preparing for a changing climate: Potential consequences of climate variability and change – Gulf Coast region*, Gulf Coast Regional Assessment, Baton Rouge, LA, 2003.
- PCGCC, *Key scientific developments since the IPCC Fourth Assessment Report*, Pew Center on Global Climate Change, 2009, <www.pewclimate.org/brief/science-developments/June2009>.
- Petrie, B., "Does the North Atlantic Oscillation affect hydrographic properties on the Canadian Atlantic continental shelf?", *Atmosphere-Ocean*, núm. 45, 2007, pp. 141-151.
- Petrie, B., R. G. Pettipas y D. Hebert, "Physical oceanographic conditions on the Scotian Shelf and in the eastern Gulf of Maine (NAFO areas 4V,W,X) during 2010", NAFO Scientific Council Research Document 11/014 [documento de investigación del Consejo Científico de la NAFO], núm. seriado N5896, Organización de Pesquerías del Atlántico Noroeste (NAFO), Dartmouth, NS, 2011.
- Polyakov, I. V., V. A. Alexeev, U. S. Bhatt, E. I. Polyakov y X. Zhang, "North Atlantic warming: patterns of long-term trend and multidecadal variability", *Climate Dynamics*, núm. 34, 2010, pp. 439-457.
- Richardson, K., W. Steffen, H. J. Schellnhuber, J. Alcamo, T. Barker, D. Kammen, R. Leemans, D. Liverman, M. Monasinghe, B. Osman-Elasha, N. Stern y O. Waever, *Synthesis report from climate change: Global risks, challenges and decisions*, Copenhagen, 10-12 de marzo de 2009.
- Templeman, N. D., "Ecosystem status and trends report of the Newfoundland and Labrador Shelf", CSAS Research Document 2010/026, 2010, <<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>>.
- Trenberth, K. E. y J. M. Caron, "The Southern Oscillation revisited: sea level pressures, surface temperatures and precipitation", *Journal of Climate*, núm. 13, 2000, pp. 4358-4365.
- Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden y P. Zhai, "Observations: Surface and atmospheric climate change", en: *Climate Change 2007. The Physical Science Basis*, contribución del Grupo de Trabajo I al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Cambridge University Press, 2007, pp. 235-336.
- Ulbrich, U., G. C. Leckebusch y J. G. Pinto, "Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review", *Theoretical and Applied Climatology*, núm. 96, 2009, pp. 117-131.
- Van der Baaren, A., *Summary of climate change in the Northwest Atlantic. Unpublished draft manuscript*, Fisheries and Oceans Canada, Dartmouth, Nueva Escocia, 2011.
- Vasseur, L. y N. R. Cato, "Atlantic Canada", en: D. S. Lemmon, F. J. Warren, J. Lacroix

- y E. Bush (comps.), *From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate*, Gobierno de Canadá, Ottawa, 2007.
- Wanamaker, A. D. Jr., K. J. Kreutz, B. R. Schone, N. Petigrew, H. W. Borns, D. S. Introne, D. Belknap, K. A. Maasch y S. Feindel, “Coupled North Atlantic slope water forcing on Gulf of Maine temperatures over the past millennium”, *Climate Dynamics*, núm. 31, 2007, pp. 183-194.
- Wang, C. y D. B. Enfield, “The tropical Western Hemisphere warm pool”, *Geophysical Research Letters*, núm. 28, 2001, pp. 1635-1638.
- Wang, M. y J. E. Overland, “A sea ice free summer Arctic within 30 years?”, *Geophysical Research Letters*, núm. 36, L07502. doi:10.101029/2009/GL037820, 2009.
- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury-Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan y M. Padilla, *Ecorregiones marinas de América del Norte*, Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 2009.
- Worcester, T. y M. Parker, “Ecosystem status and trends report for the Gulf of Maine and Scotian Shelf”, CSAS Research Document 2010/070, 2010, <<http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas/>>.
- Wu, S.-Y., R. Najjar y J. Siewert, “Potential impacts of sea-level rise on the Mid- and Upper-Atlantic region of the United States”, *Climate Change*, núm. 95, 2009, pp. 121-138.
- Xie, S.-P. y J. A. Carton, “Tropical Atlantic variability: patterns, mechanisms, and impacts”, en: C. Wang, S.-P. Xie y J. A. Carton (comps.), *Ocean-Atmosphere Interaction and Climate Variability*, AGU Press, 2004.
- Yamamoto-Kawai, M., E. Carmack y F. McLaughlin, “Brief communications: Nitrogen balance and Arctic throughflow”, *Nature*, núm. 443, 2006, p. 43.
- Yashayaev, I., *Computer Atlas of the Northwest Atlantic, 1999*, <<http://www2.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/canwa/canwa.htm>>.
- Yashayaev, I. y J. W. Loder, “Enhanced production of Labrador Sea Water in 2008”, *Geophysical Research Letters*, núm. 36, L01606, 2009.
- Yeats, P., S. Ryan y G. Harrison, “Temporal trends in nutrient and oxygen concentrations in the Labrador Sea and on the Scotian Shelf”, en: *Atlantic Zone Monitoring Program Bulletin 9*, Fisheries and Oceans Canada, 2010.
- Yin, J., M. E. Schlesinger y R. J. Stouffer, “Model projections of rapid sea-level rise on the northeast coast of the United States”, *Nature Geoscience*, núm. 2, 2009, pp. 262-266.



Anexo 2

Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas

En el resumen ejecutivo del CIEM (2011a) se describe el trabajo del Grupo de Estudio sobre la Planeación y Creación de Redes de Áreas Marinas Protegidas en un Contexto de Cambio Climático (SGMPAN, por sus siglas en inglés) para exponer los efectos generales de los cambios oceanográficos en los componentes de los ecosistemas del Atlántico tomando como base las actuales condiciones físicas tanto atmosféricas como oceanográficas. De particular relevancia son los apartados 5 y 6:

El apartado 5 se inicia con un panorama a fondo sobre la naturaleza y las tendencias de los cambios climáticos probables en el océano dentro de la zona de estudio. Se trata de información que los biólogos pueden considerar cuando tratan de pronosticar con detalle el posible impacto de estos cambios en poblaciones, hábitats y ecosistemas específicos. En ese mismo apartado se presenta un panorama similar, basado en la bibliografía, de las respuestas biológicas esperadas ante los pronósticos físicos: con base en los datos disponibles, se indican las tendencias en los parámetros ambientales que podrían relacionarse con la distribución y abundancia de las especies (y servir como covariables en futuros análisis).

En el apartado 6 se presentan una lista de especies y hábitats que prestan importantes servicios ecosistémicos, junto con un resumen de los datos disponibles, a fin de asegurar que no se les pase por alto en ninguna red de AMP u otro ejercicio de planeación espacial marina. El siguiente es un breve resumen de nuestras conclusiones:

El clima oceánico al este de América del Norte registra fuertes variaciones naturales dependiendo de la latitud y la estación; incluso, la intensidad de la estacionalidad misma varía también con la latitud.

El forzamiento atmosférico, el escurrimiento continental, los flujos de salida del Ártico, los flujos de entrada tropicales, las principales circulaciones de giros en el Atlántico norte y la compleja geometría de la línea costera y el margen continental ejercen todos una gran influencia. El clima de la región también recibe una fuerte influencia de varios modos naturales de la variabilidad atmosférica y oceánica de gran escala y en periodos que van de meses a décadas. Estos modos de variabilidad incluyen la Oscilación del Atlántico Norte (OAN), la variabilidad del Atlántico tropical (VAT) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA). Se espera que algunos de ellos, o sus versiones modificadas, continúen siendo muy importantes para el clima oceánico de la región, al menos durante las próximas décadas (apartado 5.1).

En muchas variables oceánicas al este de América del Norte se registran ya cambios antropogénicos y se prevé que éstos adquieran una relevancia cada vez mayor en relación con la variabilidad natural (volviéndose predominantes en muchos casos) a medida que avanza el siglo (véanse el cuadro 5.1.4.2.1 y texto relacionado). Según los pronósticos, el sentido de los cambios recientes en algunas variables —como los aumentos en la temperatura oceánica, la acidez, el nivel del mar costero y la erosión costera— seguirá siendo generalizado, de acuerdo con la

tendencia mundial, aunque probablemente se registren importantes variaciones regionales en magnitud. Por otro lado, los cambios en algunas variables costeras (por ejemplo, las corrientes y la estratificación) en las que el escurrimiento local y los vientos influyen fuertemente pueden presentar importantes variaciones regionales y estacionales, de manera que resulta más difícil pronosticar sus efectos relevantes en relación con ciertos aspectos o componentes de los ecosistemas.

Las principales corrientes limítrofes occidentales del Atlántico norte, la corriente de Labrador y la corriente del Golfo, ofrecen un alto nivel de conectividad espacial (latitudinal) en las aguas subpolares y subtropicales, respectivamente, al este de América del Norte. Además, el agua dulce fría transportada hacia el sur por la corriente de Labrador y el agua salada cálida transportada hacia el norte por la corriente del Golfo forman una pronunciada “zona de transición” del clima oceánico situada a latitud media entre los Grandes Bancos y el cabo Hatteras. Se esperan cambios climáticos más amplios en algunas variables (por ejemplo, la salinidad) en esta zona, asociados con el probable desplazamiento de la corriente del Golfo hacia el norte.

Aunque las proyecciones disponibles en materia de cambio climático ofrecen un buen indicio de las alteraciones probables en muchas variables a grandes escalas, los modelos aplicados no resuelven adecuadamente muchas características oceanográficas regionales importantes en el Atlántico noroccidental. Por consiguiente, persiste un grado sustancial de incertidumbre respecto a la magnitud del futuro cambio climático oceánico en escalas de espacio y tiempo relevantes para muchos aspectos costeros y de los ecosistemas marinos. Asimismo, las tasas de emisión de gases de efecto invernadero —tanto las actuales como las previstas— indican que el día de mañana los índices

del cambio climático antropogénico tal vez se acerquen al extremo superior del intervalo señalado en el Cuarto Informe de Evaluación (Cambio climático 2007) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Esto significa que algunos cambios climáticos de envergadura (como el aumento del nivel del mar y la erosión costera) podrían ocurrir antes de lo previsto.

También hay incertidumbre respecto a la manera en que los ecosistemas responderán al cambio climático, aunque se pronostican algunos efectos generalizados (apartados 5.2 y 5.4). En todos los niveles tróficos se esperan alteraciones en la distribución de las especies, pero es poco probable que estas alteraciones sean sincrónicas, lo que a su vez producirá cambios en las interacciones tróficas y la función de los ecosistemas. Se prevé, asimismo, un cambio en el ciclo de la energía como consecuencia de las disminuciones y los aumentos en la productividad primaria en ecosistemas de latitudes bajas y elevadas, respectivamente. Los efectos generalizados del cambio oceanográfico inducido por el clima en relación con componentes fundamentales del ecosistemas se resumen (apartado 5.4) [...]

En el apartado 6 del informe se identifican especies y hábitats que son cruciales para el funcionamiento ecológico y cuya conservación tal vez amerite un abordaje especial.

Las interpretaciones y justificaciones que aparecen a continuación (**cuadro A2.1**: “Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas”) se apoyan en los análisis y deducciones del CIEM (2011a).⁶

6 CIEM, “Report of the Study Group on Designing Marine Protected Area Networks in a Changing Climate (SGMPAN)”, 15 a 19 de noviembre de 2010, Woods Hole, Massachusetts, ICES CM 2011/SSGSUE.01.

Cuadro A2.1 Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas*

Efectos en los componentes del ecosistema

Factor de presión	Fitoplancton	Zooplancton	Bentos	Peces
Aumento de la temperatura (agua o aire)	Menor tamaño promedio. Dominio de especies más pequeñas. Cambio en las tasas vitales.	Mayor abundancia de medusas. Aceleración del metabolismo, el crecimiento y el desarrollo. Efectos tróficos que producen condiciones mermadas.	Desplazamiento de la distribución hacia el norte. Desplazamientos a mayores profundidades. Cambio en las tasas vitales. Episodios de mortalidad masiva en especies sésiles. Más enfermedades.	Desplazamiento de la distribución hacia el norte o a mayores profundidades. Cambio en las tasas vitales.
Intensificación del ciclo hidrológico	Cambios en la producción primaria en aguas costeras. Mayor escurrimiento de nutrientes, que causará más floraciones de algas nocivas.	Mayor carga de sedimentos, lo que perjudicará la alimentación de las especies costeras. Las floraciones de algas nocivas pueden o no afectar las tasas vitales del zooplancton.	Cambios en la salinidad que afectarán el crecimiento, sobre todo en zonas costeras.	La salinidad resultante afectará el crecimiento, sobre todo en zonas costeras. Cambios en el éxito reproductivo que alterarán la composición de las especies.
Cambios en la estratificación	Mayor producción primaria en el norte y menor en el sur y las regiones de plataforma. Floraciones de primavera más tempranas e intensas en latitudes templadas. Cambios en la composición de especies.	Alteraciones resultantes de los cambios en la producción primaria.	Cambios en el flujo de materia orgánica al bentos que generarán alteraciones en la productividad.	Cambio en la posición vertical de huevos y larvas en la zona pelágica. Cambio en las interacciones tróficas.
Aumento del nivel del mar	?	?	Aumento del hábitat para especies costeras.	Aumento del hábitat para especies costeras.

* *Nota:* Los colores indican la probabilidad de la respuesta: azul significa “extremadamente probable”; verde, “más que probable”, y rojo, “probable”, en tanto que “?” significa “efectos desconocidos”. Los efectos esperados se describen a escala ecorregional o más amplia, habida cuenta de que en escalas espaciales menores los efectos variarán y que algunos efectos no influirán directamente en algunas ecorregiones (por ejemplo, el deshielo no afectará directamente a las especies tropicales, pero sí indirectamente por medio de los cambios en la circulación mundial). “Cambio en las tasas vitales” se refiere a alteraciones en el crecimiento, el éxito reproductivo o la mortalidad que, en última instancia, modifican la abundancia de una población. No se indican el aumento o la disminución relativos en las tasas vitales porque el sentido y la magnitud de su cambio son específicos de cada especie.

	Mamíferos marinos	Tortugas	Aves marinas	Manglares y pastos marinos	Corales
	<p>Cambio en las tasas vitales, dependiente de la respuesta de las presas.</p> <p>Aspectos de termorregulación.</p>	<p>Cambios en la distribución, periodos de migración y reproducción.</p> <p>Cambio en la proporción de sexos al momento de la eclosión.</p> <p>Cambio en las tasas vitales, dependiente de la respuesta de las presas.</p>	<p>Cambio en los periodos y rutas de migración.</p> <p>Cambios en la distribución.</p> <p>Efectos indirectos de especies invasoras.</p> <p>Estrés por termorregulación.</p>	<p>Cambio en la composición y distribución de especies.</p>	<p>Blanqueamiento y menor calcificación, causantes de mortalidad en muchos casos.</p> <p>Cambio en las tasas vitales.</p> <p>Cambios en la distribución.</p>
	<p>Cambio en las tasas vitales, dependiente de la respuesta del fitoplancton, en particular las floraciones de algas nocivas.</p>	<p>Dstrucción de hábitats de anidación.</p>	<p>Reducción de los hábitats de reproducción y los sitios de anidación.</p> <p>Mayor tiempo de incubación y alteraciones en desarrollo.</p> <p>Procesos de termorregulación afectados, sobre todo en jóvenes, debido a plumaje mojado.</p> <p>Aumento de contaminantes y sedimentos en hábitats de reproducción costeros.</p>	<p>Cambios en la tasa de sedimentación que disminuirán la disponibilidad de luz y perjudicarán la productividad de los pastos marinos.</p>	<p>Mayor incidencia de blanqueamiento, lo que provocará mortalidad en muchos casos.</p> <p>El nivel de salinidad afectará la salud.</p> <p>Ahogamiento causado por algas.</p>
	<p>Cambios en la propagación del sonido que afectarán la comunicación y la elusión de depredadores.</p> <p>Menores oportunidades de alimentarse.</p>	<p>Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.</p>	<p>Cambios en las tasas vitales dependientes de la disponibilidad de presas.</p> <p>?</p>	<p>Efectos insignificantes para manglares.</p> <p>Tal vez menor disponibilidad de luz para los pastos marinos.</p> <p>?</p>	<p>Cambios en la disponibilidad de luz y migración vertical.</p> <p>Cambios en la distribución.</p>
	<p>Aumento del hábitat en márgenes costeros para manatíes.</p>	<p>Cambio en la disponibilidad de sitios de anidación.</p>	<p>Inundación de hábitats de reproducción ubicados en tierras bajas.</p> <p>Cambios en el ciclo de reproducción.</p> <p>Cambio en la calidad del hábitat intermareal.</p>	<p>Menor diversidad de especies.</p> <p>Cambio en la composición y distribución de especies.</p> <p>Aumento de tamaño de las hojas del pasto marino.</p>	<p>Cambios en la disponibilidad de luz y migración vertical.</p> <p>Ahogamiento de especies tropicales.</p> <p>Cambios en la distribución.</p>

Cuadro A2.1 Efectos generalizados de los cambios oceanográficos inducidos por el clima en los componentes de los ecosistemas*

Efectos en los componentes del ecosistema

Factor de presión	Fitoplancton	Zooplancton	Bentos	Peces
Cambio en los patrones del viento, así como en la actividad y trayectoria de tormentas y huracanes	Aumento en la mezcla vertical, lo que incrementará la producción primaria en primavera.	Mayores crecimiento y desarrollo si la producción primaria aumenta.	Efectos en la dispersión pelágica de huevos y larvas, lo que afectarán el reclutamiento.	Efectos en la dispersión pelágica de huevos y larvas, lo que afectará el reclutamiento.
Cambios en los patrones de circulación oceánica	Desplazamiento hacia el norte de especies de aguas cálidas. Introducción de especies del Pacífico a través del Ártico.	Desplazamiento hacia el norte de especies de aguas cálidas. Introducción de especies del Pacífico a través del Ártico. Mayor diversidad en latitudes del norte.	Desplazamiento hacia el norte de especies de aguas cálidas. Cambio en la dispersión de larvas y la conectividad de las poblaciones.	Desplazamiento hacia el norte de especies de aguas cálidas. Cambio en la dispersión de larvas y la conectividad de las poblaciones.
Acidificación del océano	Menor producción de fitoplancton calcificador y su posible extinción.	Menor producción de organismos calcificadores si no logran formar un esqueleto y su posible extinción.	Menor crecimiento y disminución en la resistencia de la concha de calcificadores bentónicos.	Pequeño cambio en el crecimiento o la mortalidad, pero menor habilidad para asentarse en arrecifes de coral o eludir depredadores.
Aumento de zonas de oxígeno mínimo e hipoxia	Sin efecto	Posible cambio en la distribución de especies, mayor prevalencia de medusas.	Aumento en la mortalidad a causa de la hipoxia costera. Cambio en la composición y distribución de especies.	Disminución de hábitats. Disminución del crecimiento y la tolerancia térmica. Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.
Reducciones en la cobertura de hielo marino	Cambio en el agrupamiento de especies, floraciones pelágicas más tempranas. Mayor producción primaria.	Cambio en el agrupamiento de especies, mayor producción.	Cambio en la composición de especies. Desaparición de depredadores.	Desplazamiento hacia el sur de especies del Ártico. Aumento del hábitat costero disponible en el norte.
AMOC reducida (desplazamiento de la corriente del Golfo hacia el norte)	Introducción de especies de aguas cálidas en ecosistemas del norte.	Introducción de especies de aguas cálidas en ecosistemas del norte.	Introducción de especies de aguas cálidas en ecosistemas del norte.	Cambio en la migración. Introducción de especies de aguas cálidas en ecosistemas del norte.

* Nota: Los colores indican la probabilidad de la respuesta: azul significa “extremadamente probable”; verde, “más que probable”, y rojo, “probable”, en tanto que “?” significa “efectos desconocidos”. Los efectos esperados se describen a escala ecorregional o más amplia, habida cuenta de que en escalas espaciales menores los efectos variarán y que algunos efectos no influirán directamente en algunas ecorregiones (por ejemplo, el deshielo no afectará directamente a las especies tropicales, pero sí indirectamente por medio de los cambios en la circulación mundial). “Cambio en las tasas vitales” se refiere a alteraciones en el crecimiento, el éxito reproductivo o la mortalidad que, en última instancia, modifican la abundancia de una población. No se indican el aumento o la disminución relativos en las tasas vitales porque el sentido y la magnitud de su cambio son específicos de cada especie.

	Mamíferos marinos	Tortugas	Aves marinas	Manglares y pastos marinos	Corales
	Cambio en el sustrato de hielo donde se reproducen los pinnípedos. Mayor tasa de encallamiento; disponibilidad de presas.	Perturbación del anidamiento y el forrajeo. Efectos en el éxito de eclosión.	Cambio en la disponibilidad de presas. Cambio en la distribución y los periodos de migración. Destrucción del hábitat de reproducción, menor éxito reproductivo.	Destrucción de estos hábitats durante tormentas y huracanes de gran magnitud.	Destrucción de arrecifes durante tormentas y huracanes de gran magnitud.
	Patrones migratorios y de residencia alterados. Alteraciones en la disponibilidad de presas, lo que afectará las tasas vitales.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas. Cambios en las rutas migratorias.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	Cambio en la dispersión de semillas.	Cambio en la dispersión de larvas y la conectividad de arrecifes, lo que ocasionará alteraciones en la distribución. Alteración en la disponibilidad de alimento.
	Mejor propagación del sonido. Cambios en la disponibilidad y abundancia de presas.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la respuesta de las presas.	?	Disminución en las tasas de calcificación. Cambios en la reproducción. Menor disponibilidad de alimento.
	Cambio en las tasas vitales dependiente de la disponibilidad de presas.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	Efectos insignificantes para los manglares. Mayor sombra para los pastos marinos a causa de la hipoxia.	Efectos insignificantes para corales tropicales. Mortalidad y disminución de hábitats para corales de aguas frías.
	Reducción del hábitat del oso polar y las focas, incluido el hábitat de reproducción de las focas.	Sin efecto	Arribo más temprano de aves a los sitios de reproducción, cambios en la reproducción.	Sin efecto	Sin efecto en corales tropicales. Cambios en el aporte de alimento para corales de aguas frías y someras. Sobrecrecimiento de algas.
	Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	Efectos en la distribución, la migración y la disponibilidad de presas.	Alteración en la distribución. Cambio en las tasas vitales, dependiente de la disponibilidad de presas.	?	?



Anexo 3

Participantes en el taller

Nombre	Domicilio
Karel Allard	Canadian Wildlife Service, Environment Canada, PO Box 6227, 17 Waterfowl Lane, Sackville, NB, Canada E4L 4N1
Amparo Martínez Arroyo (copresidenta)	Departamento de Ciencias Ambientales, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Circuito Exterior Ciudad Universitaria, México, D.F., 04510, México
Carin Ashjian	Woods Hole Oceanographic Institution, Department of Biology, Redfield 1-3, Mail Stop #33, 266 Woods Hole Road, Woods Hole, MA, USA 02543
Brad Barr	National Ocean Service, Office of National Marine Sanctuaries, 384 Woods Hole Road, Woods Hole, MA, USA 02543
Robert Brock (copresidente)	NOAA National Marine Protected Areas Center, 1305 East-West Highway (N/OCRM), Silver Spring, Maryland, USA 20910-3282
Juan Pablo Carricart Ganivet	Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, Estación Puerto Morelos, Quintana Roo, México
David Gutiérrez Carbonell	Dirección General de Operación Regional, Camino al Ajusco núm. 200, 2o. piso, Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan, México D.F., 14210, México
Linda Deegan	The Ecosystems Center, Marine Biological Laboratory, CAMEO Science Program Office, 7 MBL Street, Woods Hole, MA, USA 02543
Brad DeYoung	Department of Physics and Physical Oceanography, Memorial University, St. John's, NL, Canada A1B 3X7
Jonathan Fisher	Centre for Fisheries Ecosystems Research, Fisheries and Marine Institute of Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL, Canada A1C 5R3
Álvaro Hernández Flores	Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de Yucalpetén, Inapesca, Calle 5C, núm. 456 por 48 y 50, Fracc. Pensiones, Mérida, Yucatán, 99237 México
Michael Fogarty	NOAA Fisheries Service, Northeast Fisheries Science Center, Fisheries & Ecosystem Monitoring & Analysis Division, 166 Water Street (F/NEC), Woods Hole, MA, USA 02543
Carlos García Sáez	Dirección General de Operación Regional, Conanp, Camino al Ajusco núm. 200, 2o. piso, Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan, México D.F., 14210, México
Dvora Hart	NOAA Fisheries Service, Northeast Fisheries Science Center, Population Dynamics Branch, 166 Water Street, Woods Hole (F/NEC31), MA, USA 02543
Erica Head	Department of Fisheries & Oceans, Bedford Institute of Oceanography, PO Box 1006, Dartmouth, NS, Canada B2Y 4A2
Hans Herrmann	Natureserve Canada, 12 Normandy, Baie D'Urfe, QC Canada H9X 3E3

Nombre	Domicilio
Jorge Zavala Hidalgo	Departamento de Ciencias Atmosféricas, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, Circuito Exterior de Ciudad Universitaria, México, D.F., 04510, México
Terry Joyce	Woods Hole Oceanographic Institution, Department of Physical Oceanography, Clark 339A, Mail Stop #21, 266 Woods Hole Road, Woods Hole, MA, USA 02543
Ellen Kenchington (copresidenta)	Department of Fisheries & Oceans, Bedford Institute of Oceanography, PO Box 1006, Dartmouth, NS, Canada B2Y 4A2
Dave Kulka	50 Fernlilly Place, Waverley, NS, Canada B2R 1X2
Jack Lawson	Department of Fisheries & Oceans, Environmental Sciences Division, NAFC, 80 East White Hills Rd., St. John's, NL, Canada A1C 5X1
John Loder	Department of Fisheries & Oceans, Ocean Sciences Division, Bedford Institute of Oceanography, PO Box 1006, Dartmouth, NS, Canada B2Y 4A2
Camille Mageau	Director Oceans Policy and Planning, Department of Fisheries & Oceans, 12 th Floor East, 12E240, 200 Kent Street, Ottawa, ON, Canada K1A 0E6
Adriana Laura Sartí Martínez	Conanp, Camino al Ajusco núm. 200, 2o. piso, Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan, México D.F., 14210, México
Michael Moore	Woods Hole Oceanographic Institution, Department of Biology, Marine Research Facility 221, Mail Stop #50, 266 Woods Hole Road, Woods Hole, MA, USA 02543
Kimberly Murray	NOAA Fisheries Service, Northeast Fisheries Science Center, Protected Species Branch, 166 Water Street (F/NEC32), Woods Hole, MA, USA 02533
Janet Nye	U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research & Development, Atlantic Ecology Division, 27 Tarzwell Drive, Narragansett, RI, USA 02882
Julio Sheinbaum Pardo	CICESE, Oceanografía Física, Carretera Ensenada-Tijuana núm. 3918, C.P. 22860, Apdo. postal 360, Ensenada, B.C., México
Vladimir Pliego	Dirección General de Proyectos Estratégicos, Conanp, Camino al Ajusco núm. 200, 2o. piso, Col. Jardines en la Montaña, Del. Tlalpan, México D.F., 14210, México
Mary Rothfels	Department of Fisheries & Oceans, Oceans Policy and Planning Branch, 12 th Floor East, 12E240, 200 Kent Street, Ottawa, ON, Canada K1A 0E6
Kathryn M. Scanlon	U.S. Geological Survey, 384 Woods Hole Road, Woods Hole, MA, USA 02543-1598
Porfirio Álvarez Torres	<i>Evaluación y manejo integrado del gran ecosistema marino del golfo de México</i> , Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), Blvd. Adolfo Ruiz Cortines 4209, 3er. piso, ala "A", Del. Tlalpan, México D.F., 14210, México
Angelia Vanderlaan	Department of Fisheries & Oceans, St. Andrews Biological Station, 531 Brandy Cove Road, St. Andrews, NB, Canada E5B 2L9



Comisión para la Cooperación Ambiental

393 rue St-Jacques Ouest, bureau 200
Montreal (Quebec), Canadá H2Y 1N9
t (514) 350-4300 f (514) 350-4314
info@cec.org / www.cec.org