

Inmersos en la complejidad de las relaciones Océano-Clima

BERENICE ROJO-GARIBALDI¹, VERÓNICA VÁZQUEZ-GUERRA² Y GUSTAVO MARTÍNEZ-MEKLER¹

¹INSTITUTO DE CIENCIAS FÍSICAS, UNAM, MÉXICO, BERENICE@ICF.UNAM.MX, MEKLER@ICF.UNAM.MX

²POSGRADO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM, VEROVAZGUERRA@GMAIL.COM

Actualmente se piensa en el clima terrestre como un sistema complejo formado por varios subsistemas, entre ellos los océanos, es por ello que nos sumergiremos un poco en el mundo de los sistemas complejos y la dinámica oceánica.

Palabras clave: Complejidad, clima, océanos.

Los océanos, a pesar de estar lejos de algunos y cerca de otros, tienen relación con nuestra vida diaria ya que varios de sus factores ayudan a la regulación del clima y es la casa de varios fenómenos climáticos, de los cuales hablaremos más adelante. Para comprender la compleja relación que existe entre el clima y los océanos comencemos por definir el primero.

El clima se refiere al estado atmosférico que se presenta con mayor frecuencia en una región del planeta, este estado se define por las condiciones estadísticas de un sitio a lo largo del tiempo. En un sentido más amplio, se habla sobre el clima del planeta Tierra como un sistema que se conforma por la interacción de varios subsistemas: la atmósfera, la hidrósfera, la biosfera, la litósfera y la criosfera.

El cambio climático se ha definido como los cambios en las temperaturas y las condiciones climáticas típicas de cada región a largo plazo (a partir de 30 años). Las causas de estos cambios incluyen forzamientos externos e internos entre los que se encuentran factores astronómicos, variaciones en la radiación solar, eventos volcánicos y tectónicos, cambios en la circulación del océano, modificaciones y alteraciones en la vegetación, cambios en el uso del suelo, aumento en los gases de efecto invernadero (GEI), deforestación y quema de combustibles fósiles, por mencionar algunos. Para entender mejor esto, imagina que pides un chocolate y te lo dan muy caliente, sería imposible beberlo así, por lo que tienes varias opciones: 1) dejar que se enfríe de manera natural, es decir, a la temperatura ambiente, 2) le agregas unos cubitos de hielo, 3) le soplas o 4) le metes una cuchara para remover y dejar que el aire pase por el hueco que vas formando con la cuchara a lo largo del trayecto. Con este ejemplo vemos que hay factores que

pueden afectar al cambio de temperatura en tu chocolate con el tiempo, “por periodos largos o cortos”, lo mismo pasa con el cambio de clima en la Tierra.

El cambio climático es un impulsor clave de los sistemas terrestres cambiantes y ha sido declarado la mayor amenaza para la salud humana mundial en el siglo XXI. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) advirtió que de seguir con el aumento de los gases de efecto invernadero los sistemas naturales y los seres humanos tendrán grandes desafíos. El grado de significancia que ha adquirido el impacto del cambio climático ha puesto en peligro la salud humana tanto directa como indirectamente, y esto lo hace a través de la alteración de los sistemas interrelacionados de la Tierra.

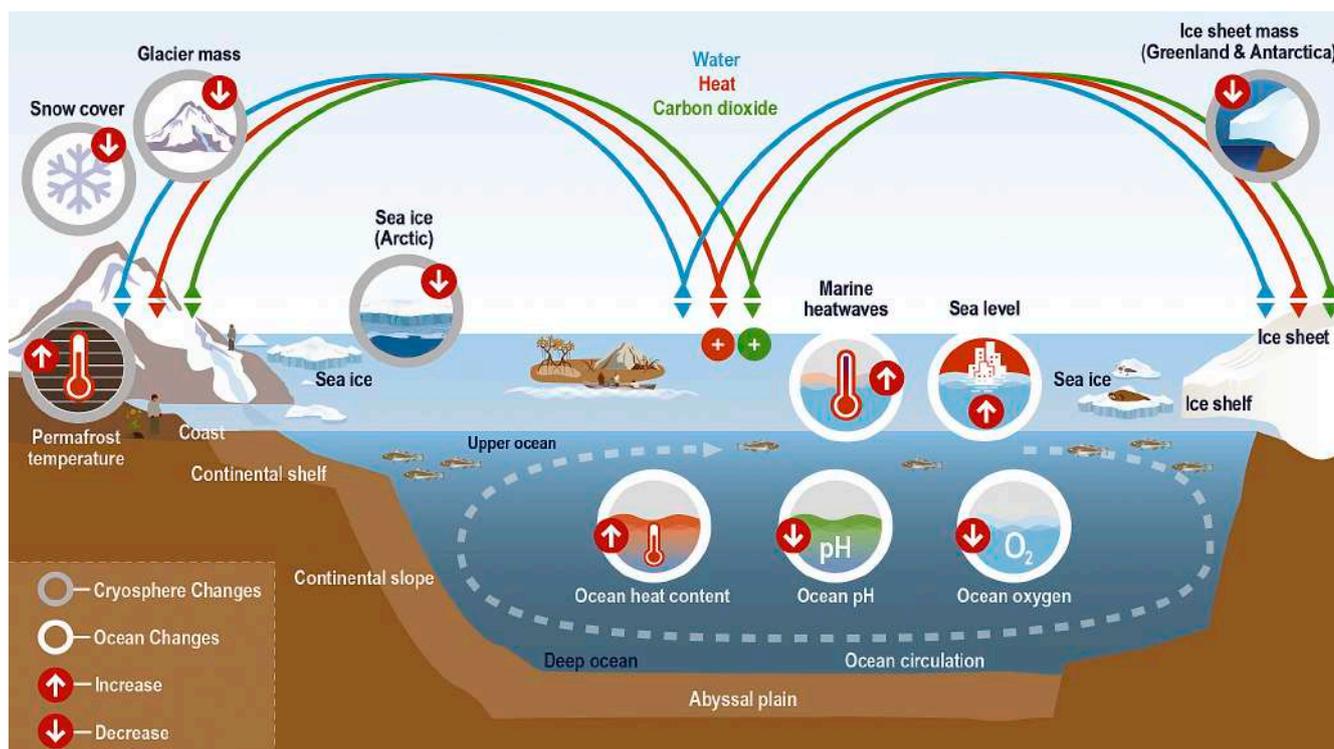
Dentro de los elementos que conforman el clima, los océanos tienen la función de almacenamiento, donde se da intercambio de calor, humedad y carbono con la atmósfera. Su influencia se da a escala local y global, y en escalas geológicas de tiempo (hablando de la historia de la Tierra), medias a largas. El Informe de Evaluación Global sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas encontró que el 66 % de la hidrósfera oceánica mundial se ve afectada por múltiples presiones humanas con “impactos severos” en la disminución de la riqueza y abundancia de la biodiversidad oceánica (IPBES, 2019).

Papel del océano en la regulación del clima del planeta

Lo significativo de los océanos es que almacenan mucha mayor cantidad de energía que la atmósfera porque tienen una mayor capacidad para almacenar calor. Una parte importante de los océanos son sus corrientes, las cuales ayudan a

regular el clima del planeta. Éstas tienen dos papeles importantes vinculados térmicamente: 1) almacenamiento y liberación estacional de calor y 2) transmisión de calor a través de sus sistemas de circulación. Debido al calentamiento del océano las corrientes se ven afectadas, provocando alteraciones en los patrones climáticos de todo el mundo, así como eventos climáticos más extremos, por ejemplo, inundaciones, huracanes, sequías y lluvias intensas que a su vez generan condiciones favorables para la reproducción del mosquito transmisor del dengue. Y de otras muchas enfermedades (malaria, chinkungunya, fiebre amarilla, zika, etc) e impactos de todo tipo.

Uno de los fenómenos climáticos más estudiados debido al impacto que tiene en el clima global, es El Niño Oscilación del Sur (ENOS), éste es un fenómeno relacionado con la interacción del océano con la atmósfera, generado en el Pacífico tropical, donde se presenta el movimiento de una alberca cálida de oeste a este, y al mismo tiempo, cambios de presión atmosférica alta a baja y viceversa, ocurre en intervalos de 3 a 7 años y sus efectos se registran desde 1525. Este fenómeno puede afectar a varias cuencas, por ejemplo, en respuesta al calentamiento que se produce en el Pacífico central ecuatorial, se produce el tren de ondas del Pacífico -norteamericano, el cual provoca más precipitaciones en California, el golfo de México y el mar Caribe. Se ha reportado que en la mayor parte del territorio mexicano El Niño produce condiciones secas durante el verano y húmedas durante el invierno. En el caso de Europa, El Niño es más difícil de detectar ya que esta parte está más influenciada por las condiciones atmosféricas del Atlántico Norte y el Mediterráneo; sin embargo, puede afectar al nivel de precipitaciones en España. ENOS es por sí mismo un fenómeno de teleconexión.



Esquema de los componentes claves y los cambios del océano y la criosfera, y sus vínculos en el sistema Tierra a través del intercambio global de calor, agua y carbono. Los efectos relacionados con el cambio climático (aumento/disminución indicados por flechas en los pictogramas) en el océano incluyen el aumento del nivel del mar, el aumento del contenido de calor del océano y las olas de calor marinas, el aumento de la pérdida de oxígeno del océano y la acidificación de los océanos. Los cambios en la criosfera incluyen la disminución de la extensión del hielo marino del Ártico, la pérdida de masa de las capas de hielo de la Antártida y Groenlandia, la pérdida de masa de los glaciares, el deshielo del permafrost y la disminución de la extensión de la capa de nieve. A modo de ilustración, se muestran algunos ejemplos de situaciones en las que los seres humanos interactúan directamente con el océano y la criosfera. Fuente: IPCC, 2019

¿Qué factores provocan el cambio de temperatura en los océanos?

La influencia humana y los GEI han sido los que más han contribuido al aumento observado en la temperatura media global superficial. Éstos son componentes gaseosos de la atmósfera, que absorben y emiten la radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Su aumento impide que el calor irradiado por la superficie de la Tierra se escape al espacio tan libremente como en la época preindustrial. Los más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2), ozono, óxido nítrico (N_2O) y metano (CH_4). Hay una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos (compuestos que contienen cloro, bromo o flúor y carbono).

El vapor de agua llega a la atmósfera por la evaporación de los océanos, lagos y tierra húmeda, sus sumideros son la condensación y la lluvia, sus concentraciones varían tanto espacialmente (los desiertos son secos, los trópicos son húmedos) como temporalmente (algunos días son secos, otros

son lluviosos). El factor que más influye en el nivel medio de este gas en la atmósfera es la temperatura. Cuanto mayor sea la temperatura, la cantidad de vapor de agua en la atmósfera, en promedio, aumenta. Dado que el vapor de agua es un GEI, este aumento conduce a un mayor calentamiento de la atmósfera, proceso al que se le conoce como *retroalimentación positiva*. Debido a esta característica, el vapor de agua es el principal GEI, sin embargo, al tener concentraciones variables, no tiene el mismo efecto que el CO_2 en el calentamiento global.

El CO_2 es el segundo GEI más importante, efectúa ciclos continuos entre varios depósitos de almacenamiento temporales (atmósfera, plantas, suelos, aguas y sedimentos oceánicos), por lo que los niveles de CO_2 son casi constantes. Además, en escalas de tiempo prolongadas, entran en juego procesos geológicos como la liberación de gases volcánicos, la meteorización de las rocas y los cambios en la circulación oceánica. En el hemisferio norte se registran las mayores emisiones antropogénicas de GEI debido a la presencia de los países industrializados, que son los principales responsables del aumento de estos

gases que se han acumulado en la atmósfera desde la Revolución Industrial.

El ozono es un gas fabricado por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. A diferencia del resto de los GEI, la concentración de ozono es casi la misma en cualquier parte del planeta y es independiente del lugar donde se produce; sin olvidar que el agujero en la capa de ozono se encuentra localizado principalmente en el hemisferio sur. El N_2O contribuye con cerca del 6 % del forzamiento del efecto invernadero. Su principal sumidero es a través de las reacciones fotoquímicas en la estratosfera, que afectan a la abundancia de ozono estratosférico. La fuente más importante son las emisiones generadas por el uso de fertilizantes nitrógenados en suelos agrícolas, y en menor grado por el consumo de combustibles fósiles para generar energía.

En el caso del océano, el CH_4 se forma principalmente como resultado de la descomposición de materiales orgánicos en un ambiente sin oxígeno. Su concentración se ha mantenido estable durante miles de años; sin embargo, recientemente se ha duplicado en la atmósfera. De acuerdo

Inmersos en la complejidad de las relaciones Océano-Clima

con Karakurt *et al.* (2012), las fuentes que causan las emisiones de metano en el sector agrícola pueden clasificarse como fermentación entérica (es un proceso que tiene lugar en el aparato digestivo de ciertas especies animales), gestión del estiércol (también da lugar a emisiones de óxido nitroso, el cual es un producto de la descomposición del amoníaco contenido en el estiércol), cultivo de arroz y otras fuentes agrícolas. Por otro lado, el entorno de los sedimentos se considera el reservorio más grande de CH₄ natural, constituyendo quizá el doble de la cantidad de todos los depósitos de combustibles fósiles conocidos.

El incremento de las temperaturas se está produciendo de forma generalizada, aunque con mayor intensidad en las zonas septentrionales y sobre todo en la región Ártica. No obstante, más allá del aumento de temperatura, debemos fijarnos en la velocidad con la que se ha presentado en los últimos años. En el resumen presentado por el IPCC, 2007 se encontró que entre 1995 y 2006, la temperatura creció más que desde 1850 y, además, el calentamiento lineal entre 1956 y 2005 fue de 0.13 °C/10 años, el doble de lo experimentado entre 1906 y 2005, que fue de 0.06 °C/10 años. En su informe de 2021 el IPCC reporta que la temperatura global en superficie fue 1.09 °C más alta en 2011–2020 que en 1850–1900, y los aumentos fueron mayores sobre la tierra (1.59 °C) que sobre el océano (0.88 °C).

La disminución de la extensión de la capa de nieve y hielo, debido al calentamiento global, evoluciona de manera alarmante desde 1900. De acuerdo con Meredith *et al.* (2019) en un informe especial del IPCC y con un estudio de la NASA en colaboración con el Centro Nacional de Datos sobre Hielo y Nieve (NSIDC, por sus siglas en inglés), realizado desde 1979, es en septiembre cuando el hielo marino del Ártico alcanza su mínima extensión, reduciéndose a un ritmo del 12.6 % por década. El NSIDC reportó que la disminución de la extensión del hielo marino de esta región durante la primera quincena de agosto de 2023 fue más rápida que el promedio. Mientras tanto, el hielo marino de la Antártida ha experimentado pocos cambios netos desde 1979, mostrando pequeñas diferencias en la reducción de su área promedio por década entre 1979–1988 y 2010–2019. En cuanto a los cambios en la criósfera terrestre, de acuerdo

con Gulev *et al.* (2021), los glaciares han retrocedido desde la segunda mitad del siglo XIX y han seguido retrocediendo a un ritmo mayor desde el decenio de 1990, de igual manera se reporta una pérdida de masa en la capa de hielo de Groenlandia y se prevén aumentos en la profundidad del derretimiento en la mayoría de las regiones de permafrost (capa de subsuelo de la corteza terrestre que se encuentra congelada de manera permanente). Estos datos son importantes ya que, debido a la degradación del permafrost y los clatratos submarinos, se presentan liberaciones de metano en el Ártico (donde se concentra la mayor cantidad de permafrost). El IPCC recientemente comenzó a incorporar el permafrost en sus proyecciones, ya que también libera carbono debido a la gran cantidad de plantas y animales enterrados en el Ártico a lo largo del tiempo. Los investigadores ahora sospechan que por cada grado Celsius de aumento en la temperatura promedio de la Tierra, el permafrost puede liberar el equivalente de cuatro a seis años de carbón, petróleo y emisiones de gas natural: del doble al triple de lo que los científicos pensaban hace unos años.

Acidificando los océanos

Además de absorber calor, los océanos son un sumidero de CO₂, cuanto más entra a la atmósfera, mayor cantidad absorben, para producir ácido carbónico, que provoca acidificación. Ésta afecta a las estructuras anatómicas de carbonato de calcio, perjudicando más a las especies que dependen de éste para formar sus estructuras óseas, que aquellas que no lo requieren, generando que las primeras sean menos competitivas. La acidificación y el calentamiento de los océanos pueden afectar a su biodiversidad al influir en la diversidad de especies, la abundancia, la detección de depredadores, la distribución y la aptitud competitiva.

Si bien los océanos han protegido a los humanos de los peores impactos del cambio climático al absorber más del 90 % del aumento excesivo de energía (favoreciendo un aumento en la temperatura superficial del mar) y alrededor del 25 % de las emisiones de CO₂, el cambio climático está provocando: 1) el calentamiento de los océanos, 2) la acidificación y 3) la desoxigenación (Watts *et al.*, 2015). Haciendo que sea cada vez más difícil para los océanos poder defendernos.

Complejidad en el sistema climático de la Tierra

Como ya hemos visto a lo largo del artículo, los océanos ayudan a regular el clima de la Tierra; sin embargo, es un trabajo que no hacen solos, debido a la interacción que tienen con diferentes elementos, lo que lleva a pensar en el clima terrestre como un sistema complejo y es por eso que se debe estudiar de esta forma, pero, ¿qué significa que un sistema sea complejo?

Antes de meternos en una “compleja” explicación recordemos el premio Nobel de Física de 2021, compartido por tres científicos: Syukuro Manabe, Klaus Hasselmann y Giorgio Parisi, los dos primeros dedicados a la modelación del clima y el tercero al descubrimiento “de patrones ocultos en materiales complejos y desordenados”, este es un claro ejemplo de la importancia de estudiar a los sistemas desde la teoría de la complejidad y, además, hacerlo desde la transdisciplinariedad.

Tomemos ahora el papel de chefs y preparemos un platillo llamado “complejidad”, ¿qué ingredientes necesitamos para poder presentar nuestro platillo?

Como ya mencionamos, para poder estudiar cualquier sistema como algo complejo, necesitamos verlo desde diferentes puntos de vista, de manera que cada chef o participante pueda aportar algún conocimiento que ayude a resolver el problema, esto es la transdisciplinariedad, el intercambio de ideas entre investigadores de varias disciplinas. Las preguntas, los planteamientos y colaboraciones que surgen a partir de aquí siguen un pensamiento en común. Vale la pena puntualizar que la complejidad no esta supeditada a la transdisciplinariedad, existen problemas y situaciones propias de una sola disciplina que pueden dar lugar a comportamientos complejos.

Otro ingrediente en nuestro platillo es la jerarquización y multiplicidad de escalas, esta parte integra distintos niveles de descripción e integración. En lo que respecta a los océanos tenemos interacciones biológicas, químicas, físicas, geológicas y limnológicas, cuyos efectos se pueden ver a escalas de resolución espacial y temporal, ya sea monitoreando las temperaturas, las corrientes, las redes tróficas o haciendo trabajo de campo en aguas continentales. Además se tienen los diferentes ciclos biogeoquímicos (ciclo del carbono, nitrógeno, azufre y fósforo). Los procesos geológicos

(erosión, subducción de placas, desgaste de rocas), así como la interacción entre los organismos, juegan un papel importante en estos ciclos, ayudando a la evolución de la vida en los océanos y su continuo mantenimiento.

Es importante resaltar que los comportamientos tanto temporales como espaciales son cruciales para la comprensión de un sistema, así como, la transmisión de información inter e intra nivel es un elemento crucial. Los desarrollos para poder integrar información y comportamientos de diferentes escalas es una de las características que ha despertado amplio interés en el enfoque de los sistemas complejos.

Como es de esperar, en nuestros ingredientes no podía faltar la no linealidad y la retroalimentación, ya que los sistemas complejos se construyen de diversos componentes con interacciones no lineales. Sabemos que los procesos de retroalimentación son determinantes para el comportamiento de los sistemas complejos, éste puede observarse como la suma de varios elementos en un nivel de descripción o como la interacción de diferentes niveles de descripción, es decir, podemos estudiar la fotosíntesis llevada a cabo por las plantas en el océano o estudiar el ciclo del carbono.

Empieza a resultar natural poner entre

los ingredientes la colectividad y los comportamientos emergentes. Este último trata de describir la formación de un sistema complejo a partir de reglas básicas. Para los procesos emergentes la naturaleza no está regulada sólo por reglas microscópicas, sino también por principios generales de organización que dependen de los individuos y del ambiente en el que éstos se encuentran inmersos. En el caso de los océanos podemos relacionarlo con el estudio de alguna especie y su respuesta al cambio climático. Primero debemos preguntarnos en qué tipo de mares la podemos encontrar (fríos, templados, cálidos), a qué profundidades, cuál es el límite de temperatura que aguanta, de qué se alimenta, por mencionar algunos factores.

Finalmente, nuestro último ingrediente es la multifactorialidad, la cual se ha llegado a considerar definitoria. El hecho de que un proceso pueda tener múltiples causas, provenientes incluso de diferentes niveles de organización, puede dar lugar a comportamientos totalmente inesperados. En la actualidad, la capacidad de obtener y almacenar información ha puesto de manifiesto una multifactorialidad/multiescala impresionante que requiere del uso de metodologías como, minería de datos y aprendizaje profundo (*Deep Learning*).

Con todos estos ingredientes logramos formar un sistema complejo como lo es el sistema climático de la Tierra, que debe ser estudiado desde diferentes ramas de la ciencia, ya que sólo así lograremos acercarnos más al entendimiento del ambiente que nos rodea.

Berenice Rojo Garibaldi es doctora en ciencias, actualmente realiza un posdoctorado en el Instituto de Ciencias Físicas UNAM, campus Cuernavaca, Morelos. Estudia la dinámica caótica y complejidad en el sistema climático.

Verónica Vázquez Guerra es candidata a doctora por el Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Su línea de investigación está enfocada en la ecología del plancton y las interacciones físico-biológicas del plancton en el océano.

Gustavo Mekler es investigador del Instituto de Ciencias Físicas y asociado al Centro de Ciencias de la Complejidad ambos de la UNAM. Con un enfoque transdisciplinario ha trabajado sobre biología cuantitativa (fecundación, origen de la vida, evolución ecológica, HIV, entre otros), fenómenos críticos, arte-ciencia (música, imágenes) y análisis de series y redes.

Referencias

- Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn, F.J. Dentener, C.M. Domingues, S. Gerland, D. Gong, D.S. Kaufman, H.C. Nnamchi, J. Quaas, J.A. Rivera, S. Sathyendranath, S.L. Smith, B. Trewin, K. von Schuckmann, and R.S. Vose, 2021: Changing State of the Climate System. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.
- IPBES. In: Brondizio, E.S., Settele, J., Díaz, S., Ngo, H.T., editors. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services. Bonn, Germany: IPBES secretariat; 2019.
- IPCC, 2007: *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I,*

II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].
- IPCC, 2021: Resumen para responsables de políticas. En: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
- Karakurt, I., Aydin, G., and Aydin, K. 2012, Sources and migration of methane emissions by sectors: A critical review, *Renewable Energy*, 39, pp. 40-48.
- Meredith, M., M. Sommerkorn, S. Cas-

sotta, C. Derksen, A. Ekaykin, A. Hollowed, G. Kofinas, A. Mackintosh, J. Melbourne-Thomas, M.M.C. Muelbert, G. Ottersen, H. Pritchard, and E.A.G. Schuur, 2019: Polar Regions. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 203–320. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.005>.

- Watts, N., Adger, W.N., Agnolucci, P., Blackstock, J., Byass, P., Cai, W., y Cox, P.M., Depledge, J., Drummond, P., Ekins, P., Galaz, V., Grace, D., Graham, H., Grubb, M., Haines, A., Hamilton, I., Hunter, A., Jiang, X., Li, M., Kelman, I., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Luo, Y., Mace, G., Maslin, M., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Pye, S., Quinn, T., Svendsdotter, M., Venevsky, S., Warner, K., Xu, B., Yang, J., Yin, Y., Yu, C., Zhang, Q., Gong, P., Montgomery, H., y Costello, A. 2015. "Health and climate change: policy responses to protect public health", *Lancet*, 386, pp. 1861–914.
- <https://climate.nasa.gov/vital-signs/arctic-sea-ice/>
- <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>