ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

# ¿El océano, el cambio climático, y El Niño?

**Dra. Ivonne Montes**

INVESTIGADORA CIENTÍFICA DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ

*Doctora en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y Licenciada en Física de la Universidad Nacional del Callao. Desde el 2014, es investigadora científica en el IGP en donde uno de sus primeros objetivos fue conducir un proyecto para implementar un sistema de computación de alto rendimiento que, actualmente, forma parte del Laboratorio de Dinámica de Fluídos Geofísicos Computacional del IGP, el cual está disponible para toda la comunidad científica. Es autora de varios artículos científicos y sus estudios están enfocados en entender el rol del océano sobre el clima y los procesos asociados al Cambio climático (tal como la desoxigenación).*

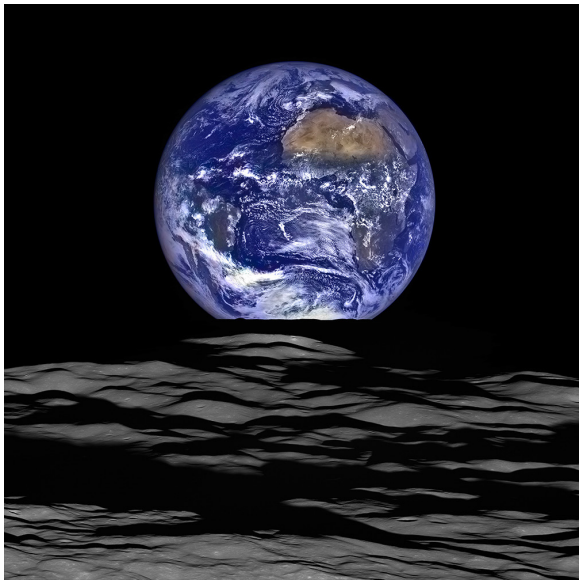

***Figura 1.*** *Vista de la Tierra desde el Orbitador de Reconocimiento Lunar de la NASA en diciembre 2015, https://solarsystem.nasa.gov/resources/459/nasa-releases-new-high-resolution-earthrise-image/*

Nuestro planeta, denominado como Planeta Azul por el color que se evidencia en las fotografías tomadas desde el espacio (Foto 1), está cubierto por agua en un 71% de su superficie. Pero ¿por qué esta gran masa de agua, denominada océano, es tan importante y crucial para el desarrollo de la vida en nuestro planeta?

¡Por varias razones! El océano es el reservorio más importante de agua disponible en estado líquido del planeta que, a su vez, es crucial para el ciclo hidrológico del agua (Figura 2). Su combinación de ~97% de agua y 3% de sales disueltas, partículas, material orgánico y gases disueltos mantiene una inmensurable riqueza biológica que lo convierte en una de las principales fuentes de vida animal y vegetal. El océano además soporta el funcionamiento y la estabilidad de los ecosistemas a través de la diversidad biológica que alberga, donde muchas de las especies marinas son fuente de alimentación y sustentan la pesca artesanal e industrial la que, por consiguiente, contribuye a la seguridad alimentaria de las diferentes naciones así como son fuente importante de divisas. Asimismo, la extracción de recursos naturales tales como el petróleo, gas y minerales que están en el lecho oceánico también contribuye a la economía de las naciones, al igual que la recreación y el turismo. El océano además es el medio principal para la globalización, ya que es utilizado diariamente para el transporte de mercancias. Último, pero no menos importante, el océano brinda más del 60% del oxígeno que respiramos y actúa como un regulador del clima del planeta. Esto último se debe a que distribuye el calor a través de las corrientes marinas y absorbe el dióxido de carbono ($CO_2$, gas de efecto invernadero) de la atmósfera ¿Cómo es posible esto?

***Figura 2.*** *Esquema de ciclo hidrológico del agua (http://zonaeduca.aguasdecordoba.es/ciclo-hidrologico-natural-del-agua)*

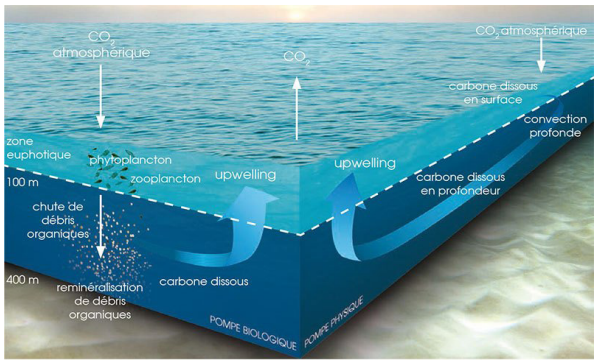


***Figura 3.*** *Representación de las bombas física y biológica (https://ocean-climate.org/?attachment_id=1814)*

Se sabe que de manera natural, el océano y la atmósfera están en constante interacción (Figura 3). Desde el punto de vista físico, en las altas latitudes, donde el agua de mar de superficie tiene bajas temperaturas, el $CO_2$ atmosférico es transferido hacia el océano por el incremento de la solubilidad del gas, lo cual luego es transportado por las corrientes oceánicas hacia las zonas profundas del océano. A este proceso se le denomina "bombeo físico" (también identificado como "bomba física"). Desde el punto de vista biológico, las plantas del océano (es decir el fitoplancton) remueven el carbono inorgánico disuelto mediante el proceso de fotosíntensis, lo que genera materia orgánica rica en carbono - que constituye la base de la cadena trófica (es decir la fuente de alimentación para organismos no-fontosintéticos) - y oxígeno. Esto ocurre en un escala temporal que va de pocos días a varias semanas en la zona eufótica, es decir en las capas superficiales del océano donde hay disponibilidad de luz y nutrientes, y que se encuentra en constante comunicación con la atmósfera. Por tanto, al igual que los bosques, el fitoplancton absorbe $CO_2$ y produce oxígeno ($O_2$), pudiendo ser considerado como el pulmón del planeta. Bajo la superficie, una parte del material orgánico producido en las capas superiores, que no se consume o muere en la columna de agua, se hunde hasta llegar al fondo marino donde se acumula formando parte del sedimento, lo cual a escala geológica (es decir periodos muy largos de tiempo) se convertirá en petróleo o gas (también conocidos como "depósitos de combustible fósiles"). A este proceso se le denominada "bombeo biológico" (también identificado como "bomba biológica"). Ambos procesos, es decir los bombeos físico y biológico, se desarrollan como parte de la variabilidad natural de la Tierra y constituyen los mecanismos de mitigación más importante para reducir los efectos del cambio climático.

Pero ¿qué es el cambio climático? Según lo define el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), el cambio climático se refiere "a un cambio en el estado del clima que puede identificarse (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante largos períodos de

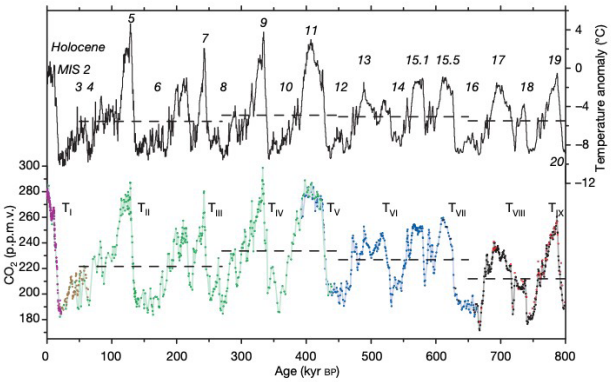


***Figura 4.*** *Compilación de registros de CO2 y anomalías de temperatura en los últimos 800,000 años antes del presente extraído de Lüthi et al. (2008).*

tiempo, generalmente décadas o períodos más largos", que "puede deberse a procesos internos naturales o forzamientos externos, tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas y cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo." El IPCC también considera tener en cuenta lo señalado en el artículo 1 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) que define el cambio climático como "cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables". Si tuviéramos que explicarlo, el clima de la Tierra ha cambiado a lo largo de la historia debido a las variaciones orbitales que han permitido recibir mayor o menor energía solar principalmente, lo cual ha estado asociado con ciertos niveles de dióxido de carbono (CO2) en la atmósfera que está acompañado del aumento o disminución de la temperatura global del planeta (Figura 4). A partir de 1830 aproximadamente, los registros de CO2 muestran un aumento gradual y significativo, es decir una tendencia positiva que llega a registrar en la actualidad concentraciones de casi el doble del máximo conocido antes de ese periodo, lo cual ha derivado en el aumento de la temperatura global del planeta (Figura 5), fenómeno conocido como Calentamiento Global.

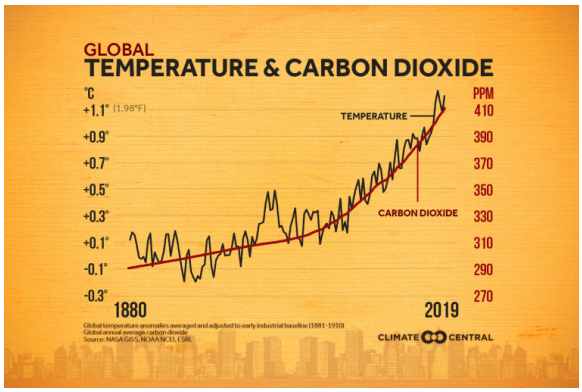


***Figura 5.*** *Anomalías de temperatura global y registro de CO2 entre 1880 y 2019 (https://www.climatecentral.org/gallery/graphics/global-temperatures-and-co2-concentrations-2020)*

Dicho periodo coincide con el inicio de la revolución industrial, donde se denota un fuerte incremento de la utilización de combustible fósil y, por consiguiente, de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al crecimiento industrial y a la demanda poblacional.

Cabe señalar que el IPCC es el organismo internacional para evaluar la ciencia relacionada con el cambio climático, creado y conformado por los gobiernos que son miembros de las Naciones Unidas (UN por sus siglas en inglés) o de la Organización Meteorológica Mundial (WMO por sus siglas en inglés) desde 1988; del cual el Perú es miembro. Básicamente, "el IPCC provee la base científica a los gobiernos para la formulación de políticas relacionadas con el clima, y sirven de apoyo para las negociaciones de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Clima y la CMNUCC" (ver en https://www.ipcc.ch/about/). La integración del conocimiento sobre el cambio climático se presenta a través de los Informes de Evaluación (AR por sus siglas en inglés *Assessment Report*) elaborados cada 5 años por científicos expertos, siendo divididos en tres grupos de trabajo: Grupo I (base científica), Grupo II (Impactos, adaptación y vulnerabilidad) y Grupo III (Mitigación del cambio climático) y el equipo especial sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Adicionalmente a los AR, a solicitud de los gobiernos, el IPCC ha elabora *Reportes Especiales* en temáticas específicas: "Calentamiento global de 1.5°C", el cual trata sobre los impactos del calentamiento global de 1.5 ° C por encima de los niveles preindustriales y las vías de emisión de gases de efecto invernadero globales relacionadas, en el contexto del fortalecimiento de la respuesta global a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos para erradicar la pobreza; "Cambio climático y la tierra", que trata sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres; y, finalmente, "Océanos y la criósfera en un clima cambiante", el cual evidencia que los océanos y la criósfera han sido afectados gravemente por el cambio climático causado por las emisiones de gases de efecto invernadero pasadas y presentes, lo cual ha promovido cambios en los ecosistemas y el clima, proyectándose consecuencias abrumadoras en los océanos y la criósfera y en el bienestar de la humanidad.

Según señala el reporte especial "Cambio Climático de 1.5°C" (IPCC SR1.5; 2018), la temperatura global del planeta ya registra un calentamiento por encima de 1°C respecto a los niveles preindustriales como resultado del incremento del $CO_2$ y otros gases. Todo esto producido por la actividad humana. También se indica en el reporte "Océanos y la criósfera en un clima cambiante" (IPCC SROCC, 2019) que entre 20 y 30% de las emisiones de $CO_2$ antropogénico han sido absorbidas por el océano desde la década de 1980. Por tanto, al absorber esta cantidad de $CO_2$, el océano ha contribuido ha reducir el cambio climático inducido por los humanos (Bopp et al., 2002) pero, al mismo tiempo, ha provocado cambios considerables en la física y química del océano, lo cual ha causado alteraciones significativas en los sistemas marinos (incluyendo composición de especies, abundancia, producción de biomasa de los ecosistemas, estructura y funcionamiento); lo que representa una grave amenaza para la vida en nuestros mares y subsecuentes efectos en las naciones, tanto en lo económico como social. Cabe señalar que si el calentamiento global incrementa a 1.5°C los cambios descritos previamente continuarán, y si se sobrepasa los 2°C los cambios serán aún mayores y/o irreversibles (IPCC SR 1.5).

¿Cuáles son los cambios observados? Al absorber más $CO_2$, la superficie del océano ha experimentado una reducción del pH (fenómeno denominado como acidificación marina) que reduce la disponibilidad de iones de carbono utilizados por los organismos marinos para construir sus esqueletos y caparazones. Asimismo, se ha registrado la pérdida de oxígeno oceánico sobre los 1000 m de la columna de agua, fenómeno denominado como desoxigenación marina, que es un factor determinante para los hábitats marino y en la regulación de los ciclos biogeoquímicos (tales como de los nutrientes y el carbono). Además, entre los cambios observados se incluyen el aumento del nivel del mar, el incremento del contenido de calor del océano, y el aumento de la frecuencia de las olas de calor marinas (*Marine heatwaves* en inglés). Estas últimas de definen como los periodos de temperatura oceánica extremadamente alta cuyo generador principal es el evento El Niño, los cuales habrían duplicado su frecuencia e intensidad desde 1982, impactando negativamente a los organismos marinos y ecosistemas de todas las cuencas oceánicas en las últimas dos décadas según cita el IPCC SROCC (2019).

Por otro lado, los efectos del cambio climático en el océano no sólo estarían evidenciando cambios en las propiedades físicas y biogeoquímicas del agua de mar y los ecosistemas sino también en el clima del planeta. Según muestra el IPCC SROCC, los cambios incluyen el

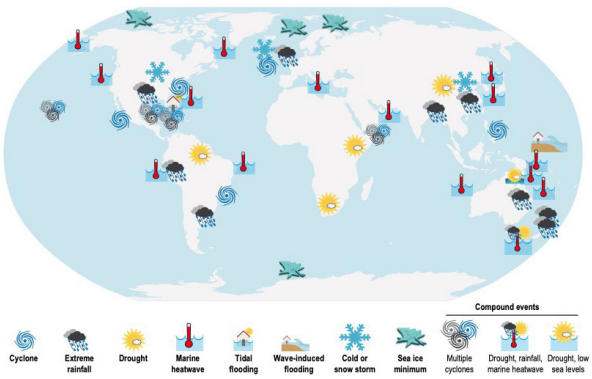


***Figura 6.*** *Localización de los eventos extremos vinculados a los cambios oceánico producto del cambio climático extraído de Collins et al. (2019)*

aumento en las precipitaciones, los vientos y los eventos extremos; este último definido como un evento que es raro en un lugar y época del año en particular tal como El Niño, La Niña, sequías, inundaciones, etc (Figura 6). Si nos referimos a los eventos El Niño, los desarrollados durante 1951–2000 fueron más altos en frecuencia e intensidad que los eventos desarrollados en el período 1901–1950. Mientras que, durante los últimos cincuenta años, se habrían producido los eventos más fuertes de El Niño y La Niña, tres de los cuales se desarrollaron entre 1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016.

¿Qué se espera en el futuro? En base a las proyecciones climáticos generadas a partir de modelos numéricos, los cambios proyectados indican que el océano pasará a condiciones sin precedentes. Para el siglo XXI, en el caso de los eventos extremos de El Niño y La Niña, se prevé que aumenten su frecuencia y, como consecuencia, intensificarán los riesgos existentes, teniendo zonas más secas o húmedas en varias regiones del plantea según cita el IPCC SROCC.

Por tanto, si queremos reducir los riesgos actuales y cambios futuros en el océano y, subsecuentes cambios en las economías y las sociedades, entonces es necesario limitar el calentamiento global a través de la reducción de las emisiones de $CO_2$ antropogénico. Según señala el IPCC SROCC es necesario tomar acciones coordinadas entre los diferentes actores que permitan recurrir a la mitigación para abordar las causas del cambio climático, pero también de adaptación para apoyar tanto en lo biológico y ecológico, como en lo social (Abram et al., 2019); todo lo cual debe estar sustentado en base a la investigación científica. Por tal motivo desde el IGP, siguiendo el método científico, establecemos las líneas de base del conocimiento sobre los diferentes componentes del sistema climático para estudiar los procesos y entender la naturaleza de las variaciones asociadas al cambio climático, así como los impactos en el Perú.

## BIBLIOGRAFÍA

Abram, N., J.-P. Gattuso, A. Prakash, L. Cheng, M.P. Chidichimo, S. Crate, H. Enomoto, M. Garschagen, N. Gruber, S. Harper, E. Holland, R.M. Kudela, J. Rice, K. Steffen, and K. von Schuckmann, 2019: Framing and Context of the Report. 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.)]. In press.

Bopp et al. The Ocean: a Carbon Pump, https://ocean-climate.org/wp-content/uploads/2015/03/ocean-carbon-pump_ScientificItems_BD-2.pdf

Collins M., M. Sutherland, L. Bouwer, S.-M. Cheong, T. Frölicher, H. Jacot Des Combes, M. Koll Roxy, I. Losada, K. McInnes, B. Ratter, E. Rivera-Arriaga, R.D. Susanto, D. Swingedouw, and L. Tibig, 2019: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. 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.)]. In press.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IPCC, 2018: Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. In Press.

IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. In press.

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.)]. In press.

Lüthi, D. et al. (2008): High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000 - 800,000 years before present. Nature, 453, 379-382, https://doi.org/10.1038/nature06949