



FadARA
Facultad de la
Armada

**SEDE EDUCATIVA UNIVERSITARIA
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR**



UNDEF
Universidad de la
Defensa Nacional



**Trabajo Final Integrador para el Curso de
Capacitación Secundaria en Meteorología para
Oficiales Cuerpo Comando Escalafón Naval**

La producción primaria del océano y su
función reguladora del clima, a partir de la
toma de Dióxido de Carbono atmosférico.

Autor: PR Jorge Daniel Tribbia.

Tutora: Dra. Valeria Segura.

AÑO 2023

ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

1. Índice general

| | |
|---|----|
| 1. Índice general | 2 |
| 1.1. Índice de cuadros | 3 |
| 1.2. Lista de abreviaturas o definiciones | 4 |
| 2. Resumen | 5 |
| 3. Introducción | 6 |
| 3.1. Justificación del trabajo | 6 |
| 3.2. Metodología | 8 |
| 3.3. Plan de Trabajo | 9 |
| 4. Cuerpo del trabajo | 10 |
| 4.1. Desarrollo del tema | 10 |
| 4.1.1. Ciclo del Carbono | 10 |
| 4.1.2. Ciclo del carbono en el océano | 11 |
| 4.1.3. Efecto invernadero | 12 |
| 4.1.4. Gases de Efecto Invernadero, Reactivos y Aerosoles: | 12 |
| 4.1.5. Fotosíntesis: | 16 |
| 4.1.6. Energía solar y Fotosíntesis: | 17 |
| 4.1.7. Los productores primarios | 17 |
| 4.1.8. Producción primaria Bruta y Neta | 18 |
| 4.1.9. Producción primaria en el mar | 18 |
| 4.1.10. Bomba Biológica y Bomba de Carbonatos | 18 |
| 4.1.11. Distribución de los servicios ecosistémicos de los océanos. | 20 |
| 4.1.12. Caso particular del Mar Argentino (sumidero de CO ₂) | 23 |
| 4.1.13. Comparación entre Tipos del Fitoplancton: estimación Satelital y de Campo | 23 |
| 4.1.14. Sensor MODIS (<i>Moderate resolution Imaging Spectroradiometer</i>) | 26 |
| 4.1.15. Monitoreo de los GEIs | 27 |
| 4.1.16. Un indicador del cambio climático, la acidificación de los océanos | 28 |
| 5. Conclusiones | 29 |
| 6. Bibliografía | 30 |

1.1. Índice de cuadros

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Bomba Física y Biológica de Carbono..... | 15 |
| Ilustración 2: Ecuación de Fotosíntesis | 17 |
| Ilustración 3: Esquema de bombas biológica y de solubilidad..... | 20 |
| Ilustración 4: Producción primaria como parte de la bomba biológica.. | 22 |
| Ilustración 5 Producción primaria | 22 |
| Ilustración 6: Bandas del sensor MODIS producto Fitoplancton | 27 |



1.2. Lista de abreviaturas o definiciones

- CFCs**: Clorofluorocarbonos.
- CH₄**: Metano.
- Cl_a**: Clorofila a.
- CO**: Monóxido de carbono.
- CO₂**: Dióxido de Carbono.
- CO₃²⁻**: Ion carbonato.
- DIC**: Carbono Inorgánico Disuelto.
- DiPlamCC**: Dinámica del Plancton Marino y Cambio Climático.
- EPEA**: Estación Permanente de Estudios Ambientales.
- FA**: Fracción Aerotransportada.
- GEI**: Gas de Efecto Invernadero.
- GR**: Gas Reactivo.
- GtC**: Giga-tonelada de Carbono (1 Gt C = 10¹⁵ g C).
- HCFCs**: Hidroclorofluorocarbonos.
- H₂CO₃**: Ácido carbónico.
- HCO₃⁻**: Ion bicarbonato.
- HFCs**: Hidrofluorocarbonos.
- INIDEP**: Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero.
- NMM**: Nivel Medio del Mar.
- N₂O**: Óxido nitroso.
- O₃**: Ozono.
- PFCs**: Perfluorocarbonos.
- PFT**: Tipos Funcionales del Fitoplancton.
- PP**: Producción Primaria.
- Proxi**: Dato indirecto que se utiliza para deducir valores de variables que no se pueden medir directamente.
- SF₆**: Hexafluoruro de azufre.
- STME**: Serie de Tiempo Marina Ecológica.
- SMN**: Servicio Meteorológico Nacional.
- VAG**: Vigilancia Atmosférica Global.

2. Resumen

En el presente trabajo, se intenta focalizar la importancia del fitoplancton en el ciclo del carbono, como así también la incidencia que tiene el Dióxido de Carbono (CO₂) como Gas de Efecto Invernadero (GEI) en la acidificación de los océanos y las consecuencias en el cambio climático.

Mediante la indagación de bibliografía al respecto, en particular las desarrolladas por investigadores argentinos en la temática del trabajo, se identificaron las variables que interactúan en el ciclo del carbono como así también la incidencia que tiene en el clima el sistema océano-atmósfera, desde el punto de vista oceanográfico, considerando las ramas física, química y particularmente la biológica, haciendo foco en el rol que cumple el fitoplancton.

Además, se describe el uso de sensores remotos para estimar la concentración de la clorofila a, como un proxy de la biomasa fitoplanctónica. Se aborda la validación de imágenes de color satelitales con datos in situ (medidos), lo que generalmente implica comparar y contrastar la información recopilada a través de observaciones satelitales con mediciones o datos recolectados directamente en el lugar. A su vez, se reconoce la ventaja de que los sensores remotos permiten la observación de áreas geográficas extensas.

3. Introducción

3.1. Justificación del trabajo

La justificación del presente trabajo tiene su génesis en la problemática actual respecto al incremento de las emisiones de GEIs, particularmente del CO₂, con el correspondiente aumento en los valores medios de la temperatura global, asociado a otras consecuencias, entre las que se destacan el aumento del nivel medio del mar (NMM) y la acidificación de los océanos.

El 70 % de la superficie del planeta está cubierta por agua. Los océanos regulan el clima, pues en ellos se produce al menos la mitad del oxígeno que los seres vivos respiramos.

El fitoplancton, que son organismos marinos fotosintéticos, es esencial para la producción primaria (PP) en los océanos. Asimismo, es un importante generador de oxígeno, a través del proceso de fotosíntesis, desempeñando además un papel crucial en la captación del CO₂ de la atmósfera, ayudando a regular el equilibrio de gases de efecto invernadero en el planeta.

El fitoplancton y otros organismos planctónicos son también una fuente de alimento para numerosos organismos marinos ya que están en la base de la red alimentaria o trófica. Muchos autores consideran que el fitoplancton alimenta al mundo, al estar al inicio de la cadena trófica.

En este orden de ideas, como seres humanos estamos ligados de una manera muy cercana a los océanos pues: somos una parte más de la red trófica, respiramos el oxígeno que en ellos se genera, nos alimentamos de lo que originariamente se produce e incluso ellos forman parte de nuestra economía, ya que el 80 % del comercio mundial se realiza a través de los océanos.

Las emisiones de CO₂ producidas por las actividades de origen antropogénico han ido aumentando a escala mundial desde la época preindustrial; actualmente la mitad del CO₂ emitido por actividades humanas permanece en la atmósfera, mientras que el resto es absorbido por los océanos y los ecosistemas terrestres (*Barlasina, et al., 2022*).

Por lo expuesto, como Objetivo del Trabajo, se intenta demostrar la importancia del fitoplancton en el ciclo del carbono, la participación del CO₂ en el efecto invernadero de la Tierra la consecuente acidificación de los océanos por efecto de las emisiones de las actividades humanas de este GEI y los efectos en el cambio climático.



3.2. Metodología

El presente trabajo se realizó a partir de la revisión bibliográfica del objetivo del mismo. Posteriormente, se llevó a cabo una descripción del tipo cualitativa de los trabajos y los artículos de diferentes autores en referencia a la temática, siempre teniendo en cuenta los puntos de vista de interés para el curso (Meteorología, Climatología, Hidrografía, Oceanografía y Sensores Remotos).

En cuanto a la extensión temporal de la revisión bibliográfica, se basó íntegramente en textos y artículos publicados a partir del año 2000. La extensión espacial no fue definida de manera específica, aunque predominan investigaciones de autores argentinos o trabajos con participación de investigadores de nuestro país.



3.3. Plan de Trabajo

Se inicia con la descripción del ciclo del carbono, que es el protagonista central para el presente trabajo, representando el elemento de intercambio que fluye en ambos sentidos entre los sistemas que interactúan, es decir, desde la atmósfera hacia el océano y viceversa. Luego, se centra en la parte del ciclo que ocurre en el océano describiendo de manera escueta las reacciones que experimenta el carbono al asociarse con los demás elementos presentes en ese ambiente, mencionando también los diferentes reservorios de los que pasa a formar parte y la localización de cada uno de ellos. Posteriormente, se menciona el efecto invernadero, los diferentes gases que lo originan y sus consecuencias a nivel terrestre.

Se continúa con la descripción del proceso de fotosíntesis, los elementos que intervienen para su desarrollo, haciendo hincapié en aquella que ocurre en los océanos, los organismos que la llevan a cabo y los resultados de la misma, involucrando en el proceso la captura de CO₂ y producción de O₂, utilizando la energía solar como fuente de energía y produciendo materia orgánica, es decir, lo que da lugar a la producción primaria y su vital importancia para la subsistencia de los demás seres vivos que forman parte de la cadena trófica, para lo cual se mencionan los diferentes servicios ecosistémicos que realizan los océanos, describiendo de manera particular lo que sucede en el Mar Argentino.

Por último, se describen algunos de los métodos para estimar la concentración de la clorofila a, como un proxy de la biomasa fitoplanctónica de fitoplancton particularmente aquellos que incluyen el uso de sensores remotos, tal el caso de los satélites, como así también las tareas correspondientes que se realizan para validar las estimaciones, mediante trabajos de campo como, por ejemplo, en los estudios de las Series de Tiempo.

4. Cuerpo del trabajo.

4.1. Desarrollo del tema

4.1.1. Ciclo del Carbono

La transferencia entre los diferentes componentes del sistema climático incluye intercambio de elementos tales como oxígeno, carbono, fósforo y nitrógeno. A nivel climático, el más importante es el carbono ya que puede cambiar la composición química de la atmósfera y por lo tanto el efecto invernadero a través de cambios en las concentraciones de CO₂ y CH₄.

Existen diferentes reservorios de carbono en el planeta. De todos ellos, la atmósfera es el más pequeño en relación con las rocas sedimentarias, los océanos y la biósfera terrestre (incluyendo el suelo). Comparando los stocks de cada reservorio, más de 50x10⁶ gigatoneladas (GtC) se encuentran en la corteza terrestre, lo cual es el equivalente a más de 1000 veces al existente en el océano, más de 20000 al del suelo y más de 50000 veces al de la atmósfera. No obstante, los cambios en la concentración de carbono en las rocas sedimentarias son muy pequeños y los flujos asociados son mucho menores que aquellos entre el océano, la atmósfera y el suelo. (Barreiro, 2020).

De este último párrafo se deduce la importancia del reservorio que constituye el océano para el ciclo del carbono, no solamente por su capacidad como sumidero sino también por su alta tasa de transferencia con la atmósfera.

4.1.2. Ciclo del carbono en el océano

El flujo de CO_2 océano-atmósfera ocurre cuando el contenido de CO_2 en la superficie oceánica no está en equilibrio con la concentración en la atmósfera. En ese sentido, existen zonas del océano que están supersaturadas (la presión de CO_2 en el agua es mayor que en el aire) y por lo tanto tienen un flujo positivo desde el océano hacia la atmósfera (en condiciones actuales eso ocurre particularmente en las lenguas frías oceánicas). Por otro lado, en las zonas subsaturadas, como en latitudes medias de ambos hemisferios, el flujo es desde la atmósfera hacia los océanos por lo que estas regiones constituyen los sumideros oceánicos del carbono atmosférico.

En base a lo mencionado en el párrafo anterior, en general se dan flujos hacia la atmósfera en regiones tropicales (océano supersaturado) y hacia el océano en regiones de altas latitudes (océano subsaturado). Además, en la región de las lenguas frías el agua que llega a la superficie está más fría que sus alrededores y se calienta dando lugar a una mayor liberación de CO_2 .

En regiones de formación de aguas profundas (frías) se transporta carbono a grandes profundidades y este proceso se denomina bomba de solubilidad (*Barreiro, 2020*).

Cuando el CO_2 gaseoso es transferido desde la atmósfera al océano, éste reacciona inmediatamente con el agua para formar ácido carbónico (H_2CO_3) que se disocia dando lugar a iones bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-}). La suma de estas tres formas de carbono se denomina Carbono Inorgánico Disuelto (*DIC-Disolved Inorganic Carbon* en inglés). La transferencia de CO_2 entre el océano y la atmósfera se da en función de la concentración de H_2CO_3 . La solubilidad de CO_2 decrece con un aumento de la temperatura o

salinidad del agua por lo que el contenido de DIC será mayor en aguas frías. (Barreiro, 2020).

En el océano en equilibrio (con pH=8.2 de promedio), el 89% del DIC es bicarbonato, 10.5% es carbonato y sólo 0.5% es ácido carbónico. La predominancia de los iones (correspondientes al HCO_3^- y al CO_3^{2-}) explica por qué los océanos son capaces de guardar mucho más carbono que la atmósfera, lo cual no se cumple para otros gases con solubilidad similar (como el oxígeno).

4.1.3. Efecto invernadero

El efecto invernadero es la forma en que el calor queda atrapado cerca de la superficie de la Tierra por acción de los GEIs, manteniendo al planeta más cálido de lo que sería si no existiera ese efecto. Los científicos han determinado que el efecto de calentamiento del CO_2 ayuda a estabilizar la atmósfera terrestre; al quitarlo, el efecto invernadero terrestre colapsaría y la superficie de la Tierra sería unos 33°C más fría. (NASA, 2023).

Venus y la Tierra tienen cantidades similares de carbono, pero en la Tierra el carbono está principalmente en las rocas mientras que en Venus está en la atmósfera. Por lo tanto, el efecto invernadero de Venus es mucho mayor que en la Tierra, produciendo un calentamiento de 285°C . La Tierra es entonces habitable no sólo por su distancia al Sol, sino también por su efecto invernadero no demasiado intenso (Barreiro, 2020).

4.1.4. Gases de Efecto Invernadero, Reactivos y Aerosoles:

Los gases de efecto invernadero (GEI), juntamente con los gases reactivos (GR) y los aerosoles componen la atmósfera de origen natural y antropogénico. Los GEIs absorben y emiten radiación en

determinadas longitudes de onda del espectro electromagnético (lo que se conoce como radiación de onda larga), provocando el efecto invernadero. Es necesario mencionar que este efecto existe de forma natural en la atmósfera y mantiene la temperatura necesaria para las diferentes formas de vida en el planeta; sin embargo, cuando las concentraciones de estos gases aumentan de manera significativa (producto de las actividades antropogénicas) también lo hace su retención de calor, lo que da lugar al fenómeno de calentamiento global con sus consecuencias asociadas. (Barlasina, et al., 2022).

Los principales GEI naturales y antropogénicos son:

- Vapor de agua (H_2O);
- Dióxido de carbono (CO_2);
- Óxido nitroso (N_2O);
- Metano (CH_4) y
- Ozono (O_3) superficial.

Además, el monóxido de carbono (CO) es considerado gas reactivo, ya que durante su oxidación puede generar CO_2 y O_3 .

Asimismo, en la atmósfera hay una serie de GEIs originados únicamente por las actividades humanas, como son:

- Clorofluorocarbonos (CFCs): principales responsables del deterioro de la capa de ozono;
- Halocarbonos (como hidrofluorocarbonos (HFCs);
- Perfluorocarbonos (PFCs) e
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFCs).

También existen sustancias fluorinadas como resultado de las actividades de origen antropogénico, como ser:

-Hexafluoruro de azufre (SF_6): tiene un potencial de calentamiento global y un tiempo de vida en la atmósfera muy elevado.

Se ha verificado desde la época preindustrial un aumento sostenido, a escala mundial, de las emisiones antropogénicas de CO_2 . Se estima que la mitad del CO_2 emitido por las actividades humanas permanece en la atmósfera, mientras que el resto es absorbido por los océanos y los ecosistemas terrestres (*Barlasina, et al., 2022*).

La fracción de las emisiones que permanecen en la atmósfera, se denomina Fracción Aerotransportada (FA) que indica el equilibrio entre las fuentes y los sumideros de los GEIs. La FA varía de forma interanual y, en los últimos 60 años los promedios anuales han oscilado entre 0,2 (20%) y 0,8 (80%), siendo el valor medio actual alrededor de 0,42 (2022), o sea que el 42% de las emisiones de las actividades humanas de CO_2 permanecen en la atmósfera, con el correspondiente aumento del efecto invernadero (*Barlasina, et al., 2022*).

No solamente interviene el efecto térmico en la transferencia y captura del CO_2 atmosférico por parte del océano, sino que existe un proceso biológico que se complementa al anterior y que juega un rol importante en la distribución de los flujos de CO_2 (Ilustración 1). En ese sentido, un primer efecto es a través de la fotosíntesis en la cual fitoplancton utiliza la radiación solar para formar materia orgánica de CO_2 y agua. También, la materia orgánica puede disociarse para formar carbono inorgánico (proceso inverso a la fotosíntesis) a través de la respiración y remineralización de fitoplancton muerto y otros organismos. (*Barreiro, 2020*).

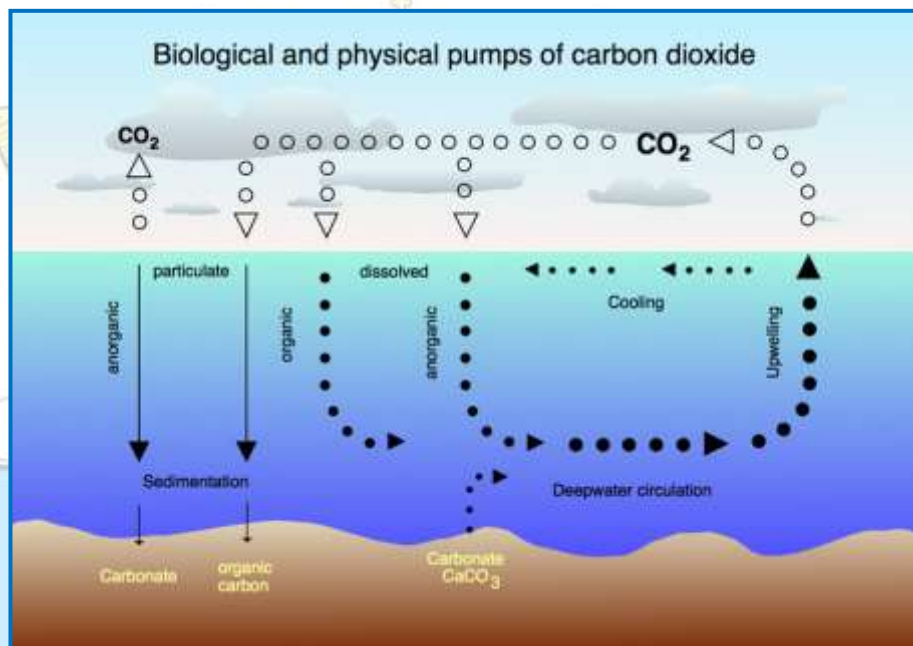


Ilustración 1: Bomba Física y Biológica de Carbono¹

¹ Imagen extraída del artículo "Change in major stores of carbon" (MAR)
(https://www.coolgeography.co.uk/advanced/Change_Stores_of_Carbon.php)

4.1.5. Fotosíntesis:

La fotosíntesis es el proceso físico-químico por el cual plantas, algas, bacterias fotosintéticas y algunos protistas (Protoctistas) utilizan la energía de la luz solar para sintetizar compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos (agua, CO_2). La fotosíntesis tiene un profundo impacto sobre la atmósfera y el clima en la Tierra ya que cada año los organismos con capacidad fotosintética convierten en carbohidratos más del 10% del CO_2 atmosférico.

El conocimiento básico de este proceso es esencial para entender las relaciones entre los seres vivos y la atmósfera, así como el balance de la vida sobre la tierra (Pérez, 2009).

Sin embargo, es necesario aclarar que no todos los procesos fotosintéticos liberan oxígeno a la atmósfera. Se denomina fotosíntesis oxigénica al proceso por el cual las plantas, algas y algunos tipos de bacterias fotosintéticas, liberan oxígeno molecular y utilizan dióxido de carbono atmosférico para sintetizar compuestos orgánicos.

Complementariamente, algunos tipos de bacterias realizan fotosíntesis anoxigénica, es decir, utilizan la energía proveniente del sol (u otra fuente de radiación en la región visible del espectro electromagnético) para formar compuestos orgánicos, pero sin producir oxígeno (Pérez, 2009).

4.1.6. Energía solar y Fotosíntesis:

Todos los organismos con capacidad fotosintética contienen uno o más pigmentos capaces de absorber la radiación visible que desencadena las reacciones fotoquímicas de la fotosíntesis, aunque, para que esta ocurra, es necesario que intervengan varios factores, uno de ellos es la luz del sol y de allí deriva la importancia de la energía solar en la fotosíntesis. Después de todo, es gracias a esa energía que las plantas adquieren la energía necesaria para realizar los procesos químicos.

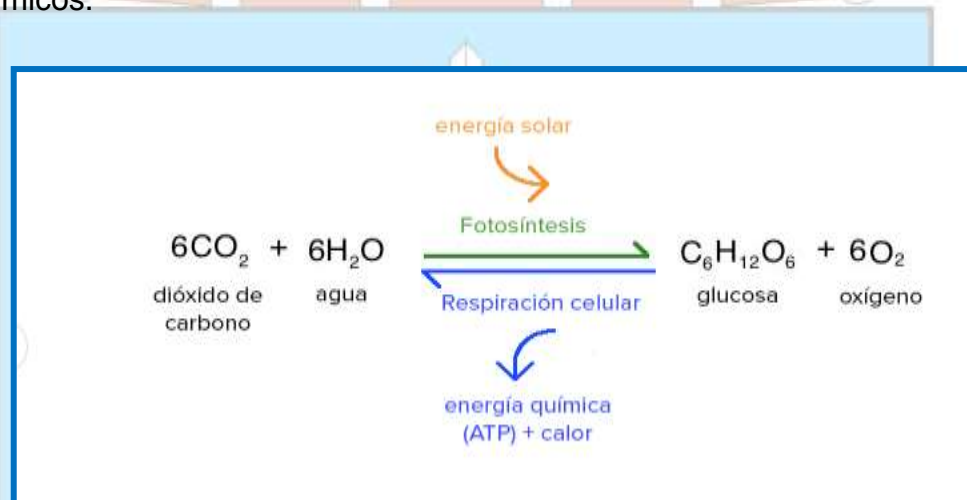


Ilustración 2: Ecuación de Fotosíntesis²

4.1.7. Los productores primarios

Los productores primarios son los organismos que hacen entrar la energía en los ecosistemas. Los principales productores primarios son las plantas verdes terrestres y el plancton. Forman el 99,9% en peso de los seres vivos de la biosfera.

² Imagen extraída del artículo "Introducción a la fotosíntesis" (<https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/intro-to-photosynthesis>)

4.1.8. Producción primaria Bruta y Neta

La Producción Primaria Bruta de un ecosistema es la energía total fijada por fotosíntesis, mientras que la Producción Primaria Neta es la energía fijada por fotosíntesis menos la energía empleada en la respiración, es decir, la Producción Primaria Bruta menos la respiración.

4.1.9. Producción primaria en el mar

Se estima que hace unos 3 millones de años aparecieron los primeros organismos fotosintéticos en el océano. Estos organismos, con capacidad de sintetizar productos orgánicos utilizando la luz solar como fuente de energía y aportando, a partir de este proceso, oxígeno a la atmósfera, contribuyeron al desarrollo de la vida en la Tierra. Aún en la actualidad, el fitoplancton marino aporta la mitad de la producción primaria mundial (Segura, 2013).

Acorde Segura 2013, el fitoplancton cumple dos roles fundamentales:

- 1- Sostiene en forma directa o indirecta la vida de todos los organismos marinos ya que se encuentra en la base de las tramas tróficas.
- 2- Participa en la regulación del clima en la tierra, mediante la fijación de CO₂ en materia orgánica, gran parte de la cual se hunde y queda fuera del sistema por largos períodos de tiempo.

4.1.10. Bomba Biológica y Bomba de Carbonatos

La materia orgánica que se transfiere a mayores profundidades conlleva un transporte de carbono; el flujo neto de carbono que se da en ese proceso de hundimiento se denomina Bomba Biológica ("soft

tissue pump", en inglés). En ese sentido, una parte significativa de la remineralización ocurre en el océano profundo donde se produce un aumento del Carbono Inorgánico Disuelto (DIC) y aumenta la concentración de nutrientes, razón por la cual las aguas profundas son ricas en alimentos y en las regiones donde afloran a la superficie, dan lugar a una alta productividad biológica.

Un segundo proceso biológico está relacionado a la producción de carbonato de calcio (CaCO_3) por diferentes especies, en particular en sus caparazones, proceso que reduce la concentración de iones carbonato (CO_3^{2-}), situación que tiene una influencia en la concentración de DIC. Este proceso de disolución de CaCO_3 , que ocurre en el océano profundo y que lleva DIC hacia las profundidades, se denomina Bomba de Carbonatos, también conocida como Bomba de Solubilidad, que funciona por la acción de dos efectos que se dan en el océano:

-La solubilidad del CO_2 está relacionada de manera inversa a la temperatura superficial marina, es decir la solubilidad es mayor cuanto más fría es el agua.

-La circulación termohalina debida a la formación de agua profunda en altas latitudes, donde el agua de mar normalmente es más fría y densa.

Gracias a la bomba biológica y a la de solubilidad, el DIC es entre un 10% y un 15% mayor en profundidad que en la superficie. La bomba biológica juega el rol más importante en el gradiente vertical. La distribución resultante influye de manera significativa en la concentración de CO_2 atmosférico (Barreiro, 2020).

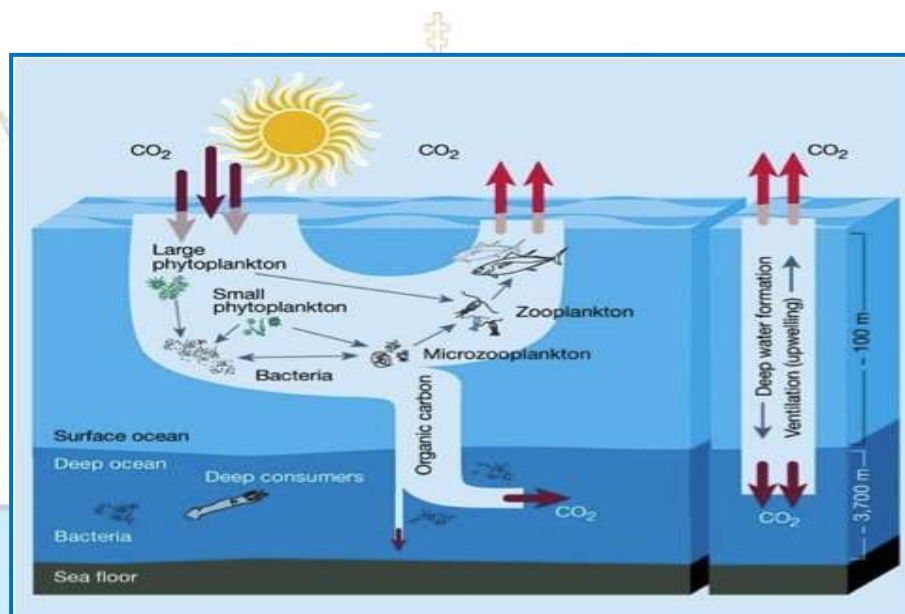


Ilustración 3: Esquema de bombas biológica y de solubilidad.³

4.1.11. Distribución de los servicios ecosistémicos de los océanos.

Los diferentes servicios ecosistémicos que brindan los océanos no se dan de forma homogénea y tampoco están disponibles en toda su extensión, dependiendo de diferentes factores, para lo cual una forma para referirse a esta situación es usar algún método de clasificación del fitoplancton en base a cierta particularidad que los diferencie y los defina, como por ejemplo los Tipos Funcionales de Fitoplancton (PFT).

Los Tipos Funcionales de Fitoplancton, o PFT por sus siglas en inglés, es una clasificación basada en el hecho de que diferentes grupos de fitoplancton tienen diferentes roles ecológicos, sin tener necesariamente el mismo origen filogenético. (Segura, 2013).

³ Imagen extraída del artículo: "Ciclo del Carbono" (http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2020/FisicaSistemaClimatico/Tema10_2020.pdf)

Las zonas de plataforma son más activas y heterogéneas que el océano abierto. Asimismo, existe una variabilidad estacional en la composición del fitoplancton y sus efectos fisiológicos (*Lutz et al, 2018*).

De los servicios ecosistémicos que prestan los océanos, el presente trabajo se centra en la regulación de la atmósfera a través del intercambio gaseoso de CO_2 y O_2 , proceso que se lleva a cabo mediante la captura del primero y la producción del segundo.

Existe una extendida creencia errónea de que son los bosques los principales productores de oxígeno de nuestro planeta. En realidad, es el fitoplancton el que produce entre el 50 y el 85 % del O_2 que se libera cada año a la atmósfera, dependiendo según la ubicación geográfica y las otras condiciones locales). Aproximadamente produce unos 27.000 millones de toneladas de O_2 al año y captura en el mismo período unas 10 Gigatoneladas de Carbono (GtC) de la atmósfera. Por lo tanto, la acción del fitoplancton en nuestro planeta cumple una doble función, cediendo por un lado el oxígeno a la atmósfera, y retirando de ella a su vez el CO_2 , transformando este carbono en carbohidratos que los demás organismos podrán incluir en sus estructuras biológicas. (*Rodriguez H., 2023*).

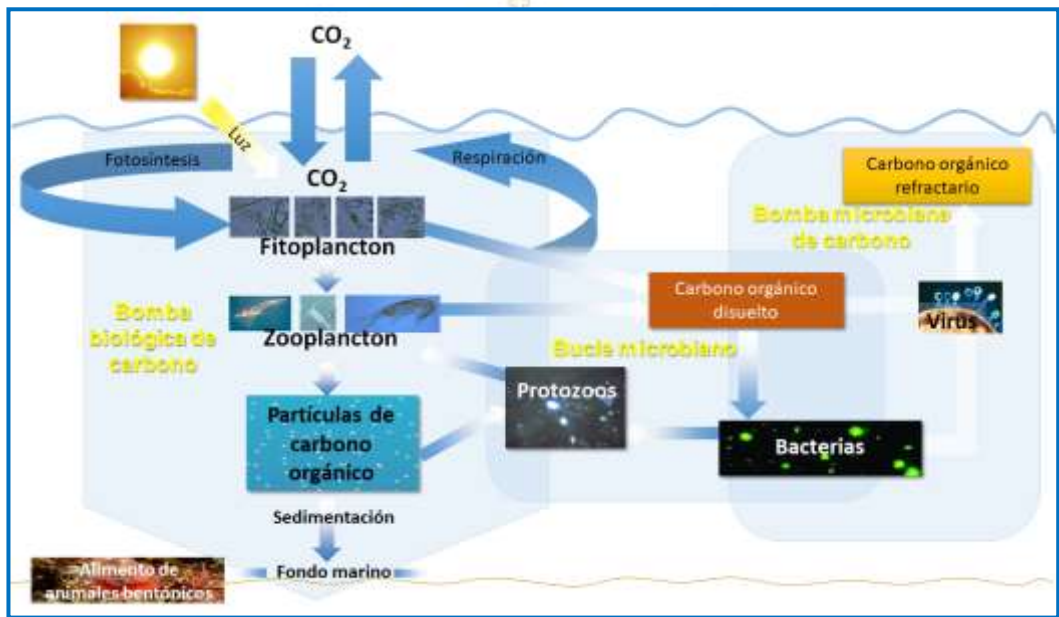


Ilustración 4: Producción primaria como parte de la bomba biológica⁴

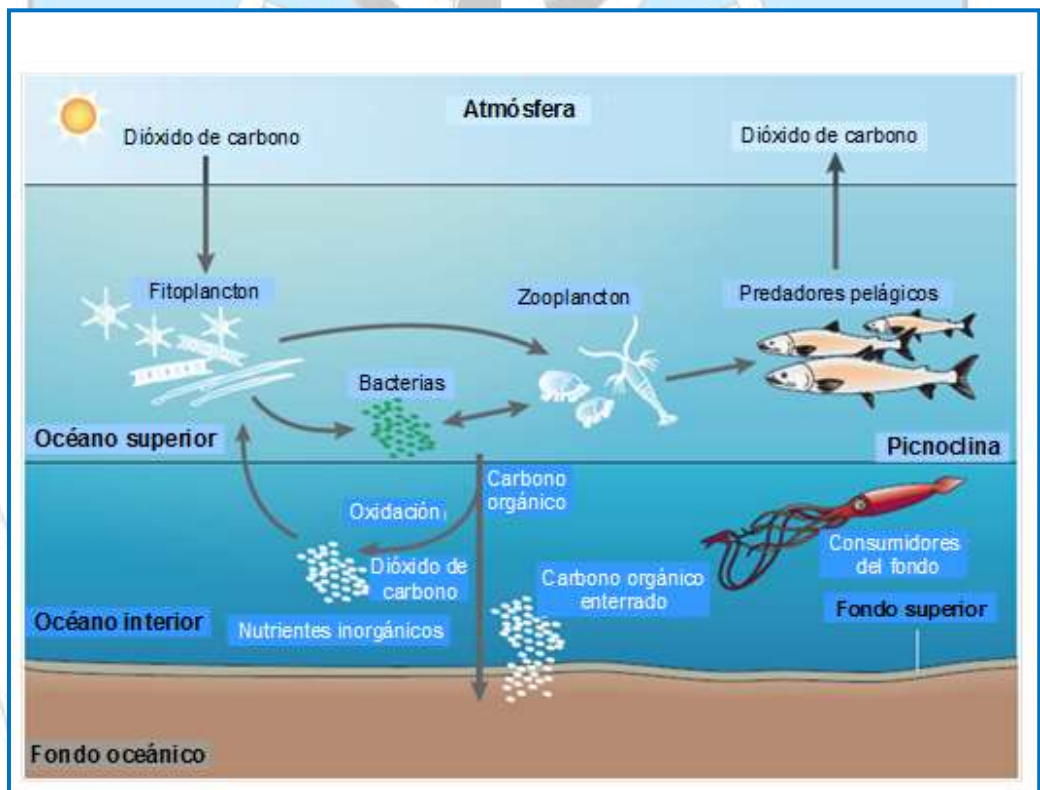


Ilustración 5 Producción primaria⁵

⁴ Ilustración gentileza de la Dra. Valeria Segura

⁵ Ilustración extraída de la presentación: Cambio Global en el Mar Argentino: Estudios de Series de Tiempo Ecológicas (Epherra L. y Segura V., 2023)

4.1.12. Caso particular del Mar Argentino (sumidero de CO₂)

El Mar Argentino se caracteriza por tener un ambiente heterogéneo y una alta concentración de fitoplancton, lo que resulta en una gran riqueza biológica y en un importante rol como sumidero de CO₂ atmosférico (*Bianchi et al., 2009*).

El Atlántico Sudoccidental, y el Mar Argentino en particular, están entre las áreas del mundo con mayor concentración de clorofila *a* (C1a) de acuerdo a las imágenes satelitales de color del océano (*Segura, 2013*).

El Atlántico Suroccidental aparece como una de las zonas más productivas del océano mundial según modelos satelitales de producción primaria. Sin embargo, la información disponible sobre Producción Primaria en esta región es escasa, en comparación con la información disponible para otras áreas del mundo (*Lutz et al, 2018*).

Las estimaciones globales generalmente se realizan utilizando métodos indirectos, como satélite o modelos biogeoquímicos, los cuales deben ser validados y ajustados con datos de campo para producir resultados confiables (*Lutz et al, 2018*).

4.1.13. Comparación entre Tipos del Fitoplancton: estimación Satelital y de Campo

Es difícil comparar la distribución de tipos del fitoplancton estimados en forma satelital y de campo con exactitud ya que no están definidos por los mismos principios (*Segura, 2013*).

Hay modelos que diferencian tipos del fitoplancton a gran escala (regional y global) a través del uso de información satelital. Algunos de éstos usan algoritmos que permiten diferenciar entre grupos

taxonómicos individuales basados en sus características ópticas únicas. Otros modelos intentan describir la distribución de los grupos de tamaños del fitoplancton agrupándolas en diferentes PFT (a escala regional y global) usando, como criterio para distinguir los diferentes tipos del fitoplancton, el tamaño celular (micro, nano y picofitoplancton). (Segura, 2013).

Es necesario aclarar que los modelos satelitales de producción primaria necesitan de la asignación de los parámetros fotosintéticos, los que solamente pueden ser estimados mediante trabajo de campo. En ese sentido, el valor de las series temporales de observaciones en sitios locales se convierte entonces en fundamental, ya que aportan datos necesarios para mejorar los algoritmos utilizados en los modelos satelitales de estimación por ejemplo de la producción primaria.

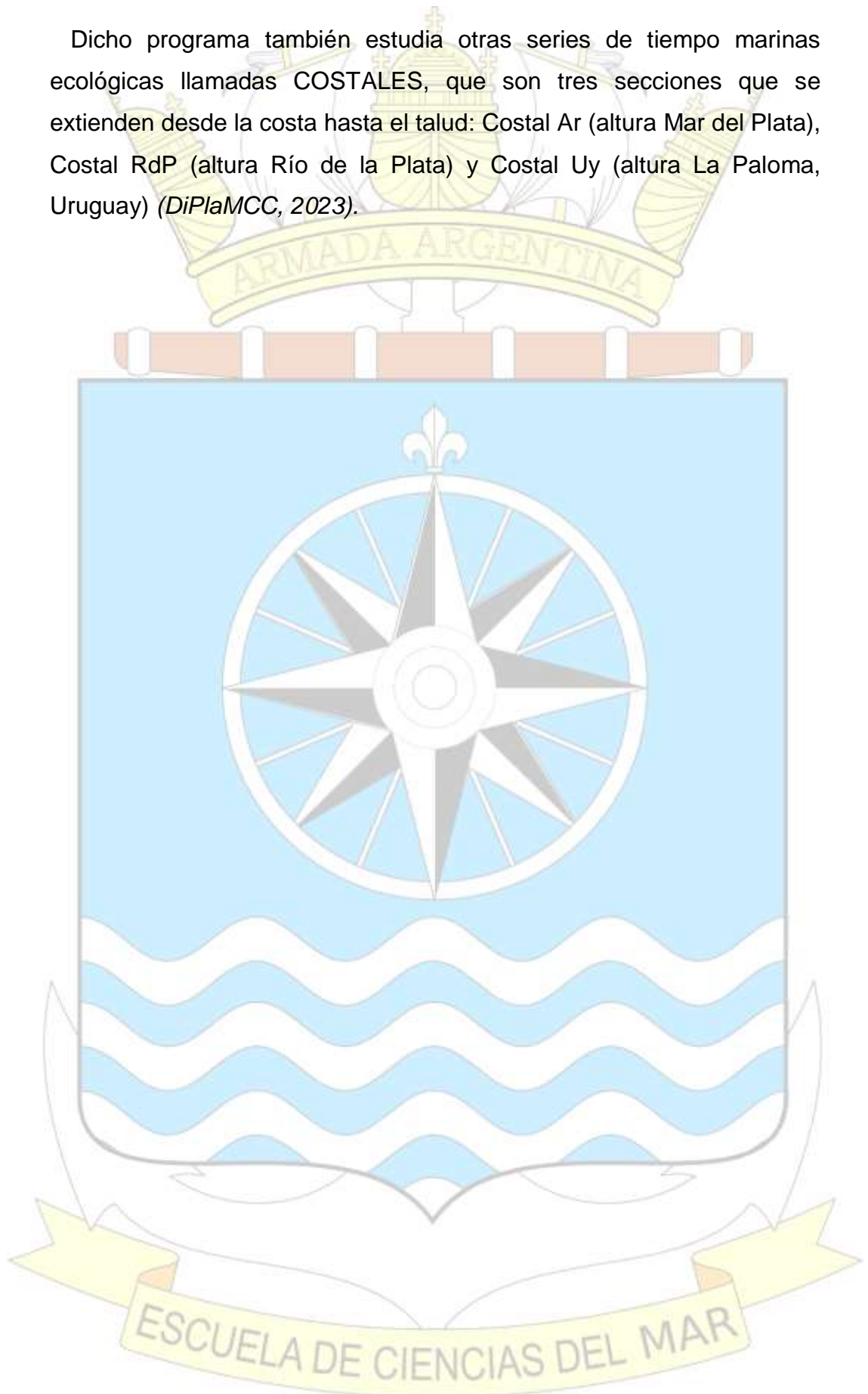
La Estación Permanente de Estudios Ambientales (EPEA) es una estación de Serie de Tiempo Marina Ecológica (STME) que se muestrea con frecuencia aproximadamente mensual desde febrero de 2000 hasta el presente y es parte del programa “Dinámica del Plancton Marino y Cambio Climático” (DiPlaMCC) del Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero (INIDEP), que tiene como objetivos:

- Analizar las variaciones en la diversidad y dinámica de las comunidades planctónicas y las variables ambientales y su posible relación con los cambios climáticos.

- Elaborar un marco conceptual sobre la estructura trófica planctónica y sus variaciones temporales.

- Proveer información relevante para la interpretación de las fluctuaciones de los recursos pesqueros.

Dicho programa también estudia otras series de tiempo marinas ecológicas llamadas COSTALES, que son tres secciones que se extienden desde la costa hasta el talud: Costal Ar (altura Mar del Plata), Costal RdP (altura Río de la Plata) y Costal Uy (altura La Paloma, Uruguay) (*DiPlamCC, 2023*).



4.1.14. Sensor MODIS (*Moderate resolution Imaging Spectroradiometer*)

El instrumento MODIS es un espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada) instalado a bordo de los satélites Terra (originalmente conocido como EOS AM-1) y Aqua (originalmente conocido como EOS PM-1). La órbita de Terra alrededor de la Tierra está programada para que pase de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador por la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS observan toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. (NASA, 2023)

La importancia de los datos disponibles originados mediante el sensoramiento a través de este instrumento, radica en que ayudan a mejorar “la comprensión de la dinámica y los procesos globales que ocurren en la tierra, los océanos y la atmósfera inferior. MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos validados, globales e interactivos del sistema terrestre capaces de predecir el cambio global con suficiente precisión para ayudar a los responsables de políticas a tomar decisiones acertadas relativas a la protección de nuestro medio ambiente”. (NASA, 2023)

| Uso primario | Banda | Ancho de banda ¹ | Resplandor ² espectral | SNR requerida ³ |
|---|-----------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Límites de tierra/nube/aerosoles | 1 | 620 - 670 | 21.8 | 128 |
| | 2 | 841 - 876 | 24.7 | 201 |
| Propiedades de la tierra/nube/aerosoles | 3 | 459 - 479 | 35.3 | 243 |
| | 4 | 545 - 565 | 29.0 | 228 |
| | 5 | 1230 - 1250 | 5.4 | 74 |
| | 6 | 1628 - 1652 | 7.3 | 275 |
| | 7 | 2105 - 2155 | 1.0 | 110 |
| Color del océano/ Fitoplancton/ Biogeoquímica | 8 | 405 - 420 | 44,9 | 880 |
| | 9 | 438 - 448 | 41,9 | 838 |
| | 10 | 483 - 493 | 32,1 | 802 |
| | 11 | 526 - 536 | 27,9 | 754 |
| | 12 | 546 - 556 | 21,0 | 750 |
| | 13 | 662 - 672 | 9,5 | 910 |
| | 14 | 673 - 683 | 8,7 | 1087 |
| | 15 | 743 - 753 | 10,2 | 586 |
| | dieciséis | 862 - 877 | 6,2 | 516 |
| Vapor de agua atmosférico | 17 | 890 - 920 | 10,0 | 167 |
| | 18 | 931 - 941 | 3,6 | 57 |
| | 19 | 915 - 965 | 15,0 | 250 |

Ilustración 6: Bandas del sensor MODIS para el producto Fitoplancton⁶

4.1.15. Monitoreo de los GEIs

El programa de mediciones de Vigilancia Atmosférica Global (VAG), coordina y pone a disposición a nivel mundial las observaciones de GEI, GR, aerosoles y O₃ estratosférico y troposférico. En Argentina, este programa se desarrolla a partir de la década del noventa, situando puntos de monitoreo en estaciones dependientes del SMN (Barlasina, et al., 2022).

⁶ Imagen extraída del artículo "MODIS Specifications" (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>)

4.1.16. Un indicador del cambio climático, la acidificación de los océanos

Como se vio anteriormente, el CO_2 al estar en contacto con el agua de los océanos reacciona formando H_2CO_3 . Este proceso genera un cambio en la química del agua, dando como resultado una disminución en los valores del pH, es decir, el agua de mar se torna más ácida. A este proceso se lo conoce como acidificación de los océanos.

La disminución del pH oceánico, en los últimos 200 años ha caído en 0,1 unidades, desde 8,2 hasta 8,1, lo que equivale a un aumento del 26% en la acidez. Se espera que el pH al menos caiga en 0,3 a 0,4 unidades hasta valores de 7,8 o 7,7 al final del siglo 21; esta disminución es 100 veces mayor que en cualquier otro momento en la historia del planeta.⁷

La acidificación oceánica altera el equilibrio de la vida de numerosos organismos marinos, dificultando su reproducción y su crecimiento, pues el medio se torna corrosivo y genera una “osteoporosis”, al hacer menos disponibles los iones carbonato, que son los bloques de construcción que utilizan ciertas algas, el plancton, los mariscos y los corales para sus conchas y esqueletos.⁸

⁷ Fuente: Dinámica de Plancton marino y Cambio Climático INIDEP.

⁸ Fuente: Dinámica de Plancton marino y Cambio Climático INIDEP.

5. Conclusiones

Las interacciones entre la atmósfera y el océano, que se dan no solamente desde el punto de vista físico sino también involucrando al biológico, quedan expresadas en las descripciones sintéticas que mencionan a los diferentes elementos que intervienen en cada una de ellas.

Además de identificar los procesos que intervienen y el o los productos que generan cada uno, se puede comprender la importancia de cada proceso y cada integrante del sistema que lo lleva adelante, como así también los inconvenientes que puede generar el desequilibrio en ese ecosistema y los demás que interactúan con él de manera directa e indirecta, tal el caso de la acidificación de los océanos, provocado por el aumento de las concentraciones de CO₂ como consecuencia de las actividades antropogénicas.

Otro aspecto que queda demostrado es que los servicios ecosistémicos de los océanos no se dan de manera homogénea en toda la columna de agua ni tampoco en toda la extensión horizontal de los mares. Tampoco es homogénea la distribución temporal de estos servicios.

Lo mencionado en el párrafo anterior conlleva una dificultad a la hora de realizar las estimaciones precisas de las variables, pues se trata de grandes extensiones que, si bien podemos asistarnos de las bondades de los productos que brinda el sensoramiento remotos a través de los satélites, las validaciones y ajustes se deben llevar a cabo mediante muestreo de las variables in situ, es decir mediante campañas o series de tiempo.

6. Bibliografía

- 6.1.** Barlasina María Elena, Carbajal Benítez Gerardo, Condori Lino Fabián. (2022). Boletín Gases de Efecto Invernadero. Servicio Meteorológico Nacional. https://www.smn.gob.ar/sites/default/files/Boletin%20Gases%20Efecto%20Invernadero%202022_0.pdf
- 6.2.** Barreiro, Marcelo. (2020). Física del Sistema Climático 2020. Meteorología. http://www.meteorologia.edu.uy/wp-content/uploads/2020/FisicaSistemaClimatico/Tema10_2020.pdf
- 6.3.** Bianchi, A.A., Ruiz Pino, D., Isbert Perlender, H.G., Piola, A.R., Osiroff, A.P., Segura, V., Lutz, V., Luz Clara, M., Balestrini, C.F. 2009. Annual balance and seasonal variability of sea-air CO₂ fluxes in the Patagonian Sea: Their relationship with fronts and chlorophyll distribution. Journal of Geophysical Research. Vol114, C03018, doi, 10.1029/2008JC004854.
- 6.4.** Grobe Hannes. (2015). Change in major stores of carbon. www.coolgeography.co.uk. <https://www.coolgeography.co.uk/advanced/ChangeStoresofCarbon.php>
- 6.5.** Lutz Vivian, Segura Valeria, Dogliotti Ana, Tavano Virginia, Brandini Frederico, Calliari Danilo, Ciotti Aurea, Villafañe Virginia, Schloss Irene, Saldanha Corrêa Flavia, Benavides Hugo y Vizziano Cantonnet Denise. (2018). Overview on Primary Production in the Southwestern Atlantic. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77869-3_6
- 6.6.** NASA. (2023). NASA MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. [modis.gsfc.nasa.gov](https://modis.gsfc.nasa.gov/about/). <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>

6.7. NASA. (2023). ¿Qué es el Efecto Invernadero? NASA Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/faq/70/que-es-el-efecto-invernadero/>

6.8. Pérez Elena y Carril Urria. (2009). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. REDUCA (Biología). <http://revistareduca.es/index.php/biologia/article/view/793>

6.9. Programa Dinámica del Plancton marino y Cambio Climático. (2023). Acidificación Oceánica. Argentina.gov.ar. <https://www.argentina.gov.ar/inidep/programa-dinamica-del-plancton-marino-y-cambio-climatico/acidificacion-oceanica>

6.10. Rodríguez, Héctor. (2023). El verdadero pulmón del planeta está en los océanos. National Geographic España. https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/verdadero-pulmon-planeta-esta-oceanos_14776

6.11. Segura Valeria. (2013). Variaciones en la Producción Primaria en relación con los distintos Tipos Funcionales del Fitoplancton en el Mar Argentino. [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Mar del Plata Facultad de Ciencias Exactas y Naturales]. <https://exactas.mdp.edu.ar/escuela-de-postgrado/tesis-de-posgrado/>.

6.12. Segura Valeria, Silva Ricardo, Clara Moira, Martos Patricia, Cozzolino Ezequiel, Lutz Vivian. (2020). Primary production and plankton assemblages in the fisheries ground around San Jorge Gulf (Patagonia) during spring and summer. CONICET. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/167990/CONICET_Digital_Nro.98607ea9-343b-4951-aa2d-e2453ad85989_B.pdf?sequence=2&isAllowed=y

6.13. Segura, V, Lutz V, Dogliotti, AI, Silva, RI, Negri, R. and Akselman, R. 2013. Phytoplankton types and primary production in the Argentine Sea. MEPS: 491:15-31.

