

¿Que es un ciclo?

Un ciclo se refiere al intercambio de nutrimentos de un ser vivo con el ambiente o de éste con los organismos. Por ejemplo, el agua que para beber pudo haber sido parte de una nube o resultado de la transpiración de algún ser vivo.

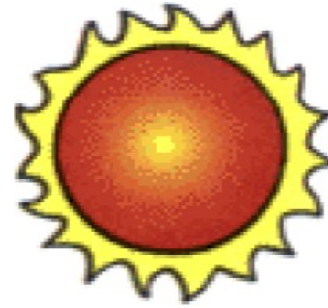
¿Qué son los ciclos biogeoquímicos?

Son procesos naturales que reciclan elementos en diferentes formas químicas desde el medio ambiente hacia los organismos, y luego a la inversa. Agua, carbón, oxígeno, nitrógeno, fósforo y otros elementos recorren estos ciclos, conectando los componentes vivos y no vivos de la Tierra.

En los ciclos biogeoquímicos se pueden reconocer dos partes o compartimientos: la biótica y la abiótica.

La parte biótica: Comprende la inclusión de sustancias inorgánicas en el organismo y la subsiguiente descomposición y remineralización. El intercambio de elementos es rápido, pero la cantidad de sustancias inorgánicas no es mayor. El organismo vivo toma elementos inorgánicos y al morir y descomponerse éstos son devueltos al ambiente para ser nuevamente aprovechados.

La parte abiótica: El medio contiene gran cantidad de sustancias inorgánicas, que se descomponen con lentitud y están a disposición del organismo en forma abundante y fácil (agua, dióxido de carbono, oxígeno) o escasa y difícil (fósforo y nitrógeno, por ejemplo). En el primer caso se trata de ciclos atmosféricos con grandes reservas de materiales; en el segundo se trata de materiales sedimentarios (fósforo, hierro, azufre, magnesio, y elementos menores).



Ciclo del carbono:

La mayor parte del carbono de la Tierra: **unos 65,500 millones toneladas métricas** esta almacenado en rocas, carbono esencialmente inerte a escalas de cientos de miles de años. El resto está en los océanos, atmósfera, plantas, animales, suelo y reservas de combustibles fósiles. CO₂ en la atmósfera (**2%**), biomasa en plantas terrestres y suelo (**5%**), reservas geológicas de combustibles fósiles (**8%**) y como iones disueltos en los océanos (**85%**). El océano contiene unas 50 veces más CO₂ que la atmósfera y unas 20 veces más que la biosfera. Los bosques, océanos y suelos son los **principales precipitadores o secuestradores de carbono** en la tierra.

El carbono se intercambia o se "cicla" entre los océanos (hidrosfera), atmósfera, biosfera, geosfera y antroposfera. La circulación del carbono entre los organismos y el medio ambiente se conoce como el ciclo del carbono. El carbono fluye entre cada reservorio en un intercambio llamado ciclo del carbono, integrado por dos ciclos: **ciclos lento y rápido**.

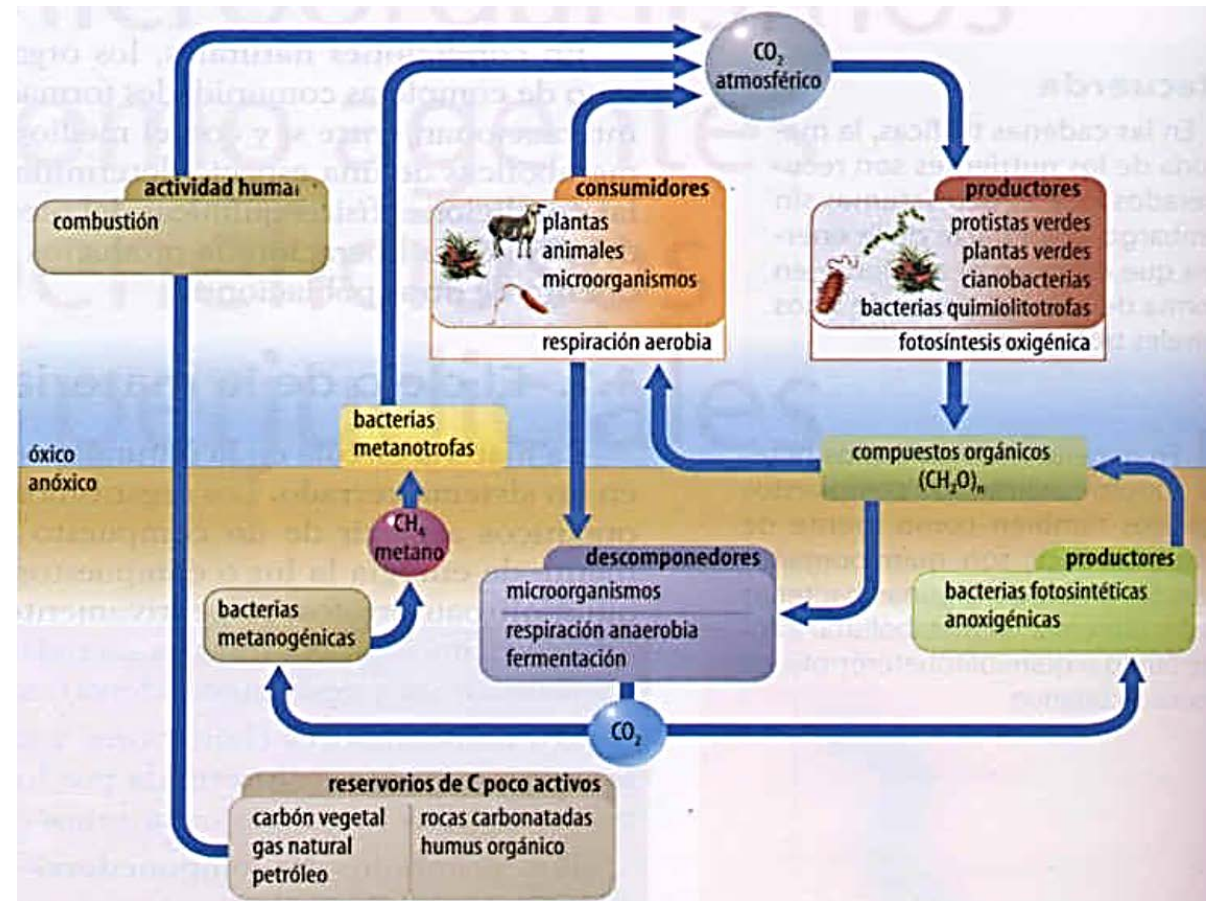
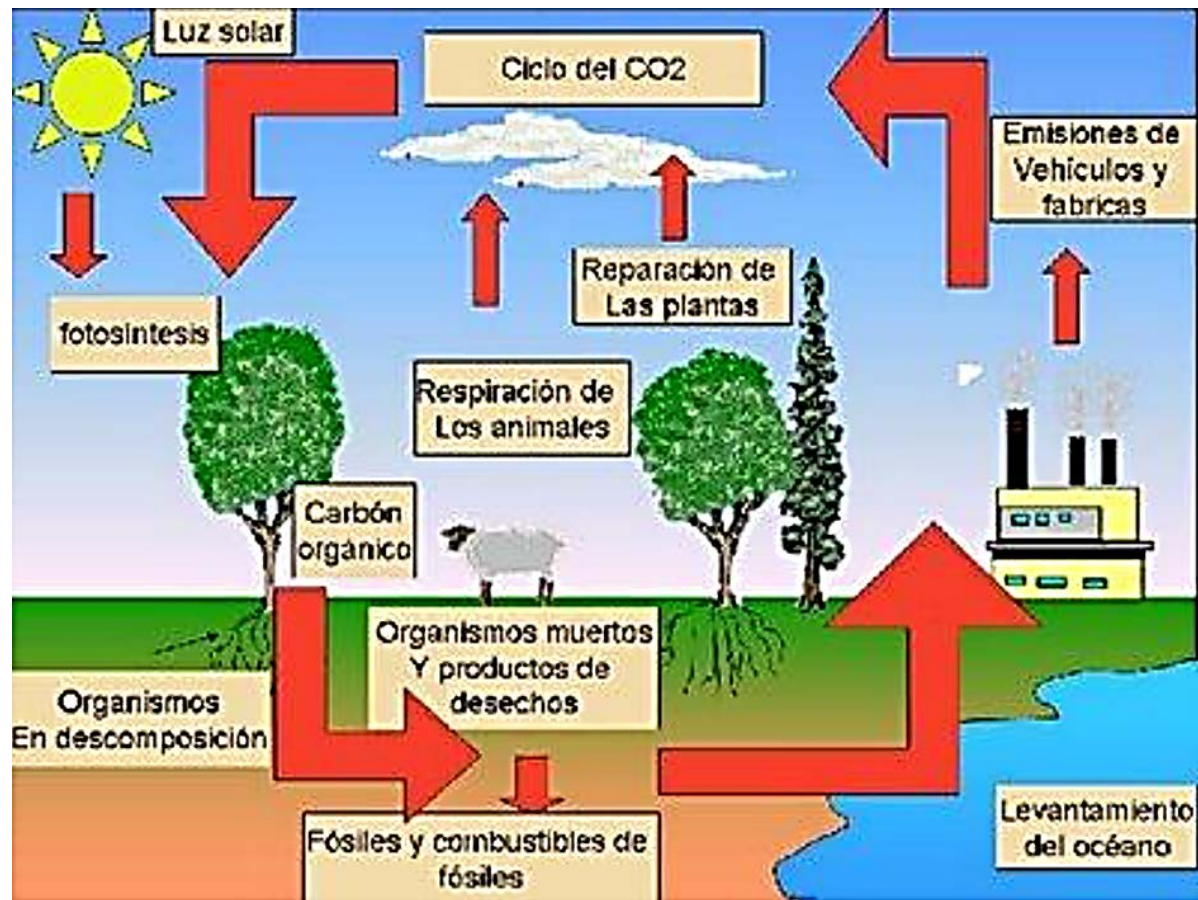
CICLO DEL CARBONO

Reservorios:

- Depósitos de rocas carbonatadas (dolomitas y calizas), combustibles fósiles y sedimentos (humus orgánico).
- La atmósfera (CO_2 , CO y CH_4), además de las inorgánicas disueltas en agua (carbonato y bicarbonato); en equilibrio el CO_2 atmosférico.

La proporción de microorganismos que intervienen en el ciclo del Carbono es mayor en agua que en tierra; allí la producción de materia orgánica corre a cuenta de las algas y cianofíceas unicelulares del fitoplancton y su degradación es llevada a cabo por eubacterias.

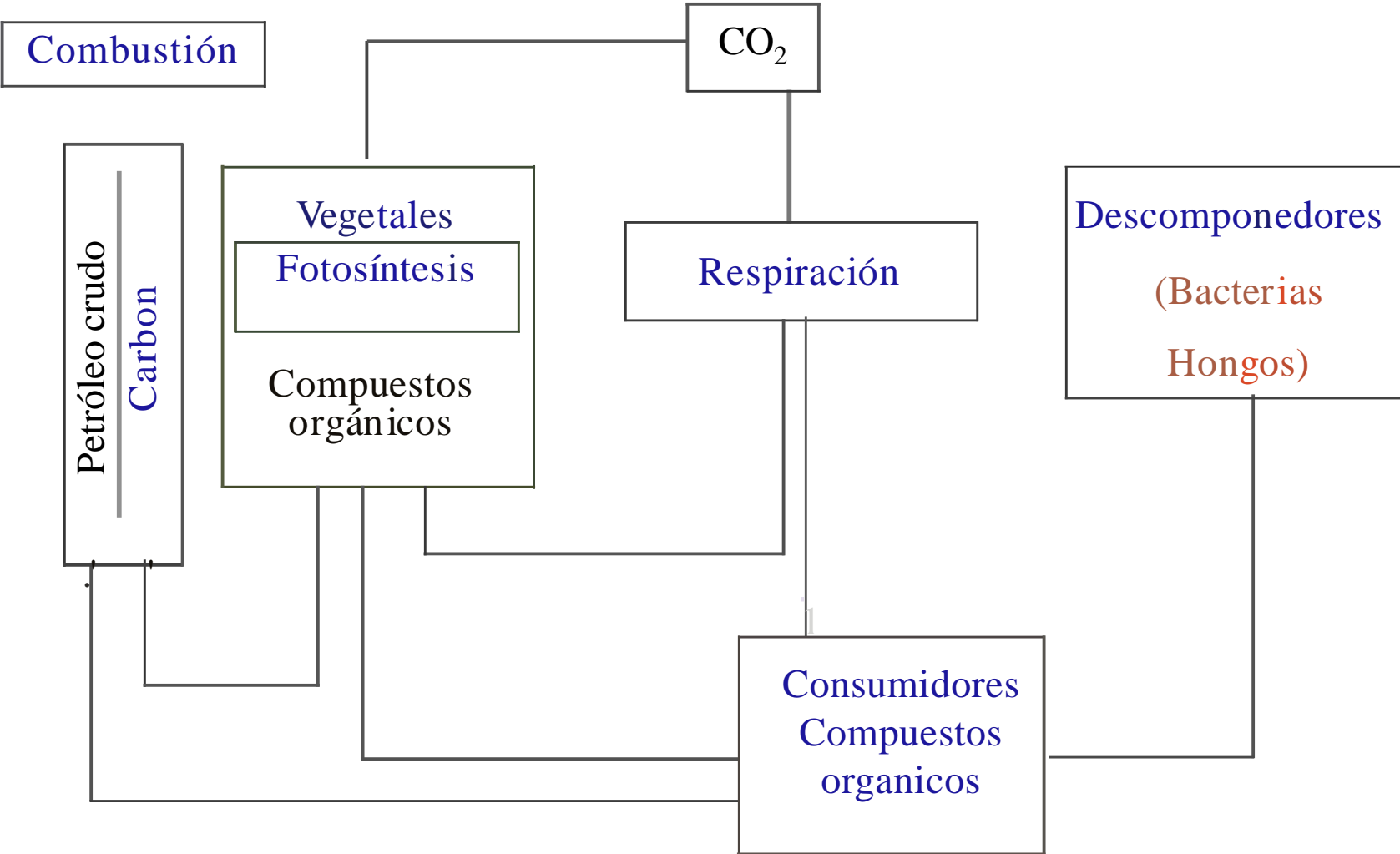
El ciclo del Carbono consta de dos fases: **asimilación** (síntesis de la materia orgánica y formación de compuestos carbonados) y **desasimilación** (degradación de estas sustancias en la respiración de animales y plantas heterótrofos).



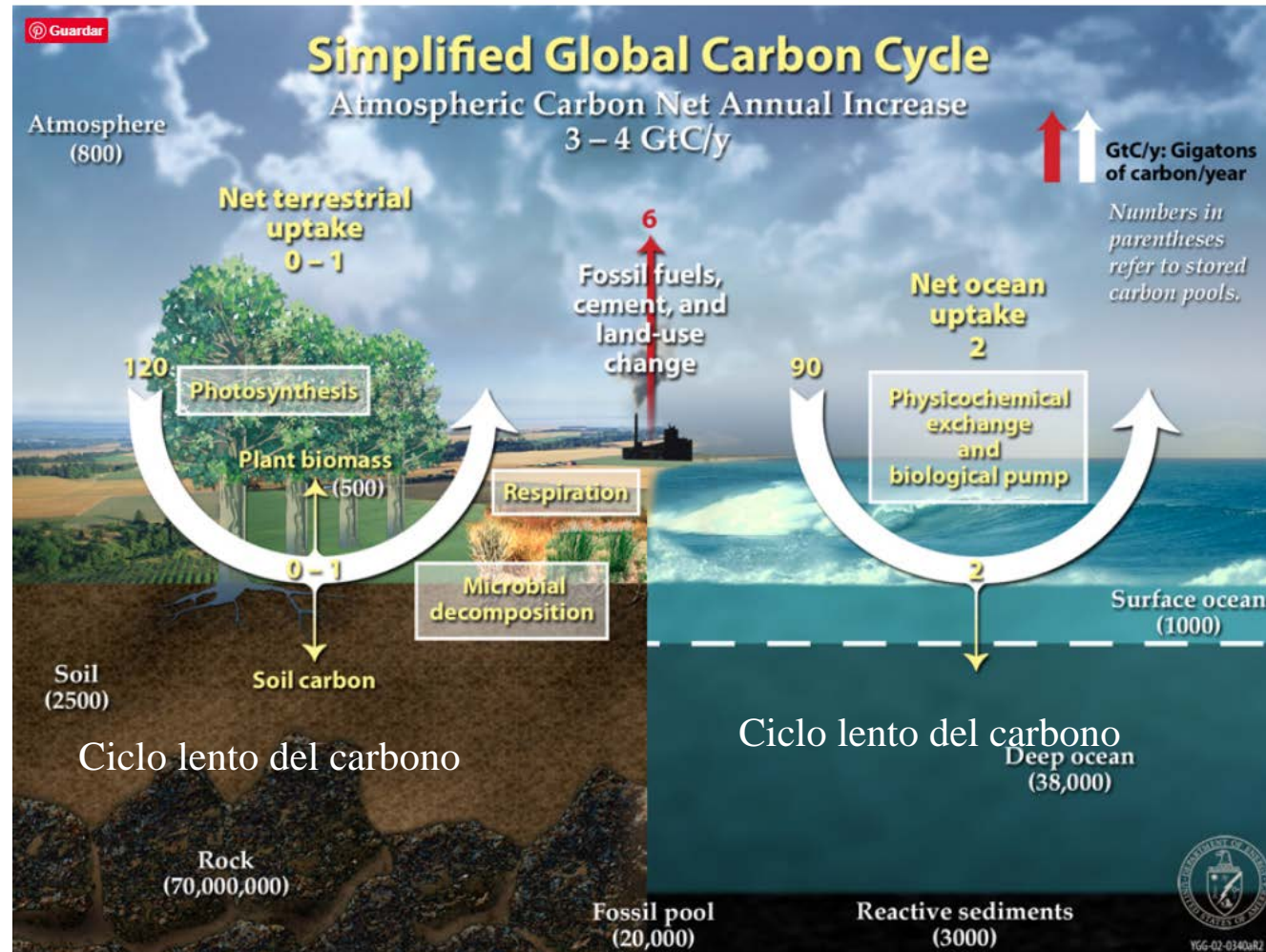
Cuando las plantas y los animales mueren, se pudren por la acción de los hongos y bacterias, que convierten las macromoléculas de carbono en dióxido de carbono, el cual regresa a la atmósfera, de donde lo toman las plantas, y también de este modo se inicia el ciclo.

En base a la cantidad de CO_2 , que hay en la atmósfera y al tiempo que tardan las plantas en transformarlo en oxígeno y carbohidratos, se ha calculado que son necesarios alrededor de 300 años para que se lleve a cabo un ciclo completo.

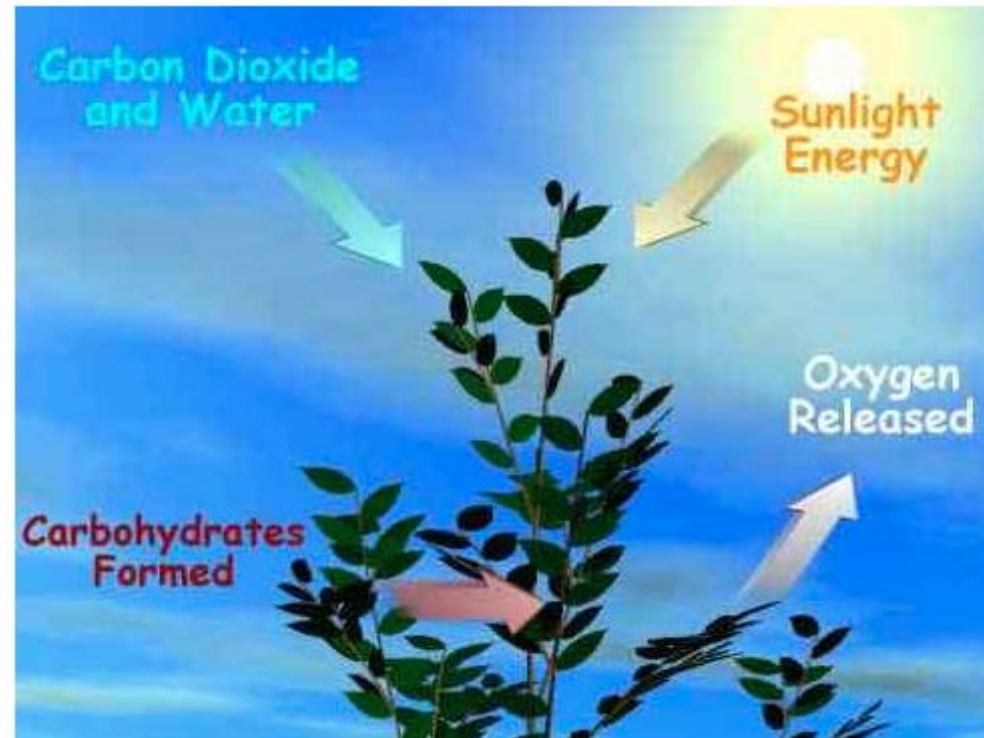
EL CICLO DE LA MATERIA : EL CICLO DEL CARBONO.



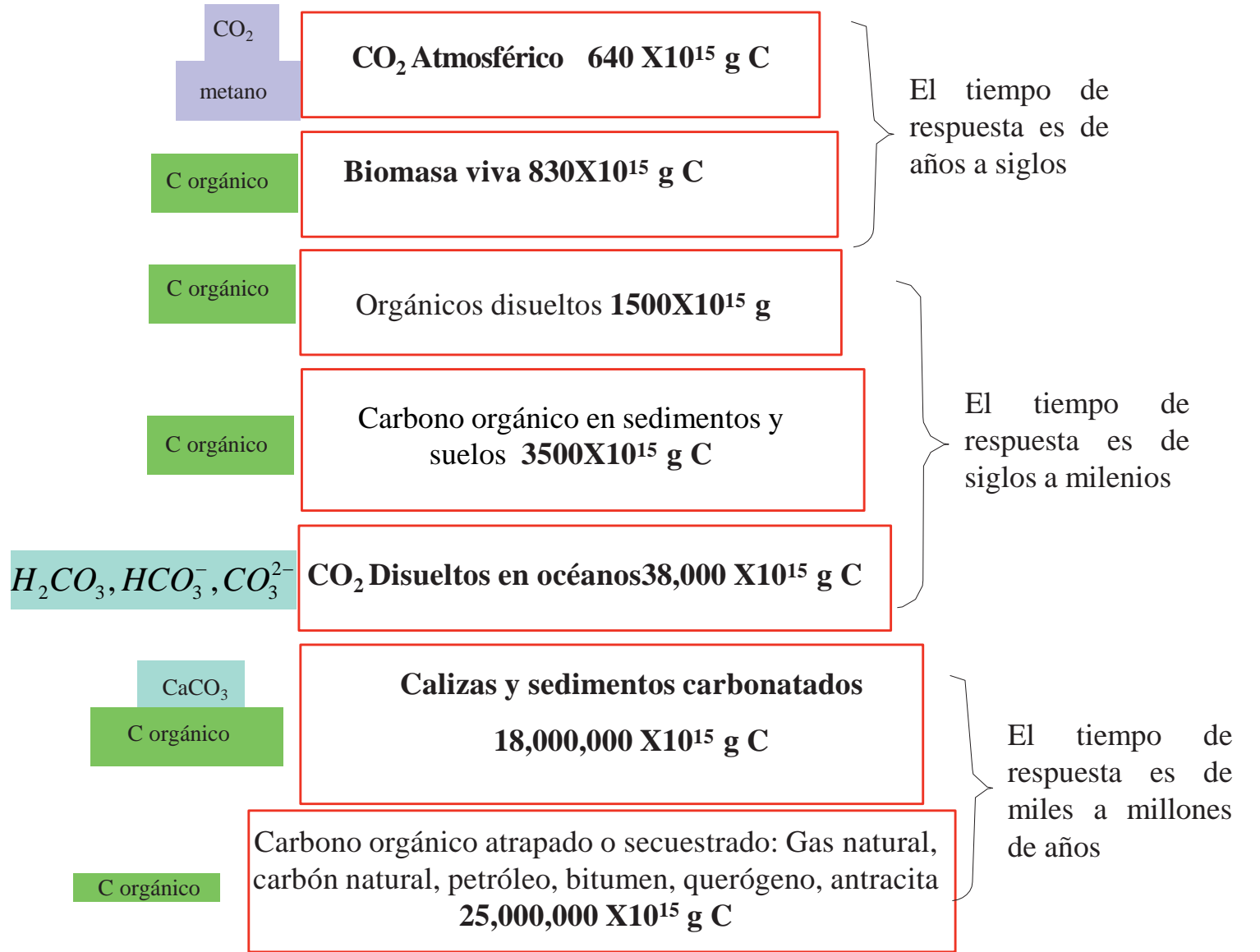
En su ciclo lento, el carbono se mueve mediante de una serie de reacciones químicas y actividad tectónica, que duran entre **100 y 200 millones de años** en moverse a través de roca, suelo, océano y atmósfera. En promedio, **de 10^{13} a 10^{14} gramos** (10 a 100 millones de toneladas métricas) de carbono se mueven cada año a través de su ciclo lento.

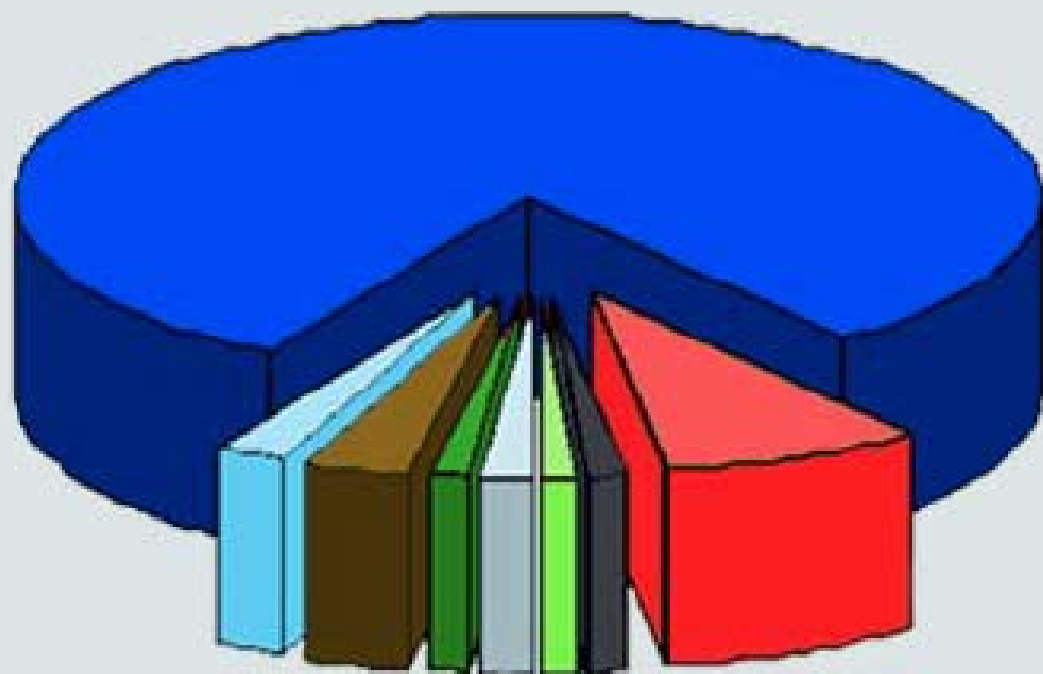


En comparación, el **ciclo rápido** del carbono mueve de **10^{16} a 10^{17} gramos de carbono por año**. El ciclo del carbono rápido es en gran parte el movimiento del carbono a través de la biosfera. El tiempo que tarda el ciclo del carbono rápido se mide en un ciclo de vida. Plantas y fitoplancton son los principales componentes del ciclo rápido del carbono.



Distribución del carbono
 10^{15} Gramos = 1 Petagramos Pg





■ **OCÉANO PROFUNDO**

■ **CARBÓN**

■ **PETRÓLEO**

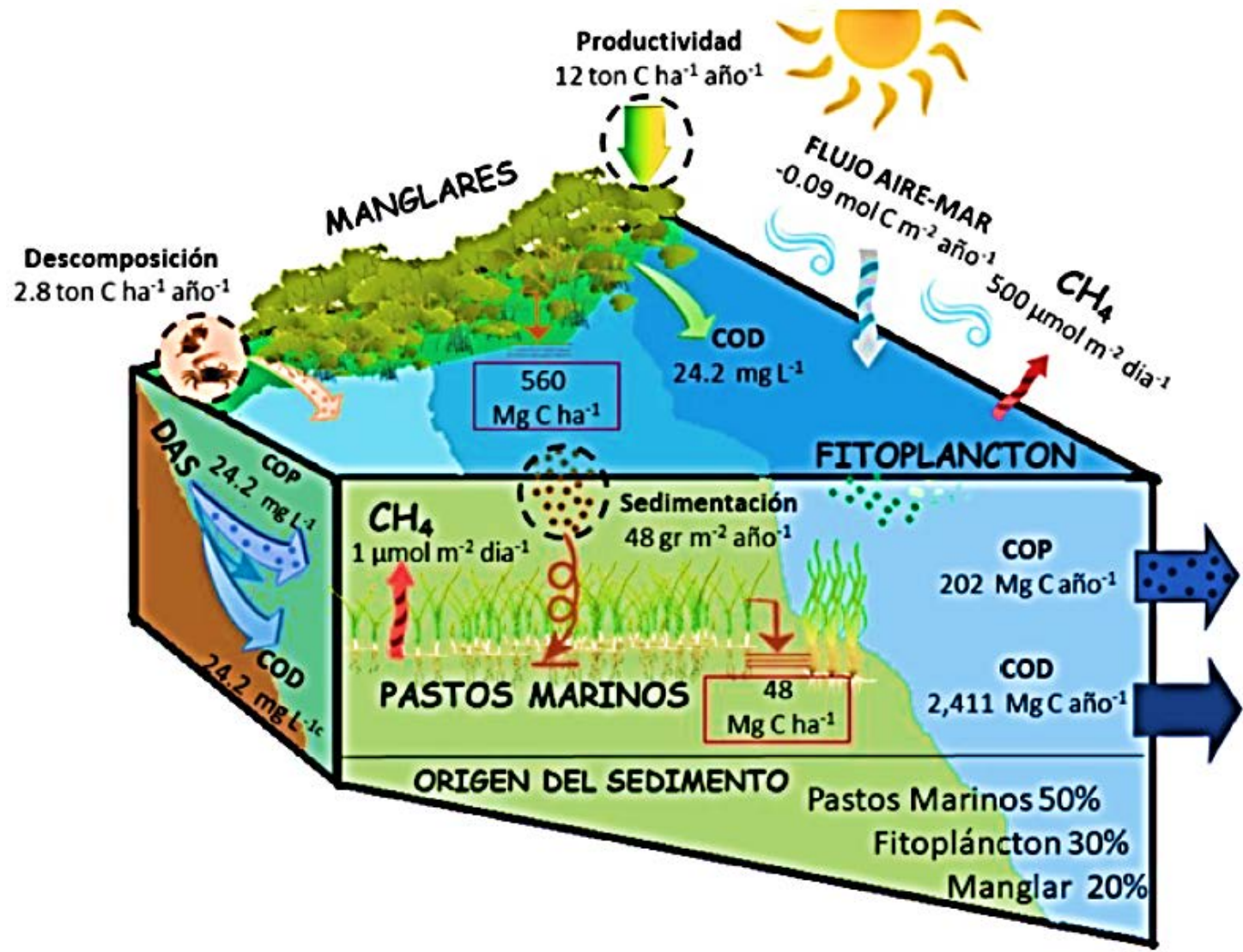
■ **GAS**

■ **ATMÓSFERA**

■ **BOSQUES**

■ **SUELOS**

■ **OCÉANO SUPERFICIAL**



Paz-Pellat, F., J. M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos y A. S. Velázquez-Rodríguez. (Editores). 2019. Estado del Ciclo del Carbono: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. Texcoco, Estado de México, México. ISBN: EN TRÁMITE. 716 p

El Ciclo Global de Carbono



El carbono toma diferentes formas en diferentes partes del Sistema de la Tierra así transferencias de una esfera a otra involucran cambio de forma química o cambio de fase del Carbono

	Gases/líquidos	Líquidos/iones disueltos	Sólidos/líquidos/iones/ Iones disueltos	Sólidos
	Atmosfera	Hidrosfera	Biosfera	Litosfera
Carbono C	CO ₂ , CH ₄ , Volátiles orgánicos	H ₂ CO ₃ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻ , DOC	C orgánico (~CH ₂ O)	CaCO ₃ C Orgánico, grafito

¿Porque es importante el C?

Constituyente de todas las moléculas orgánicas

Fuente de energía (alimentos)



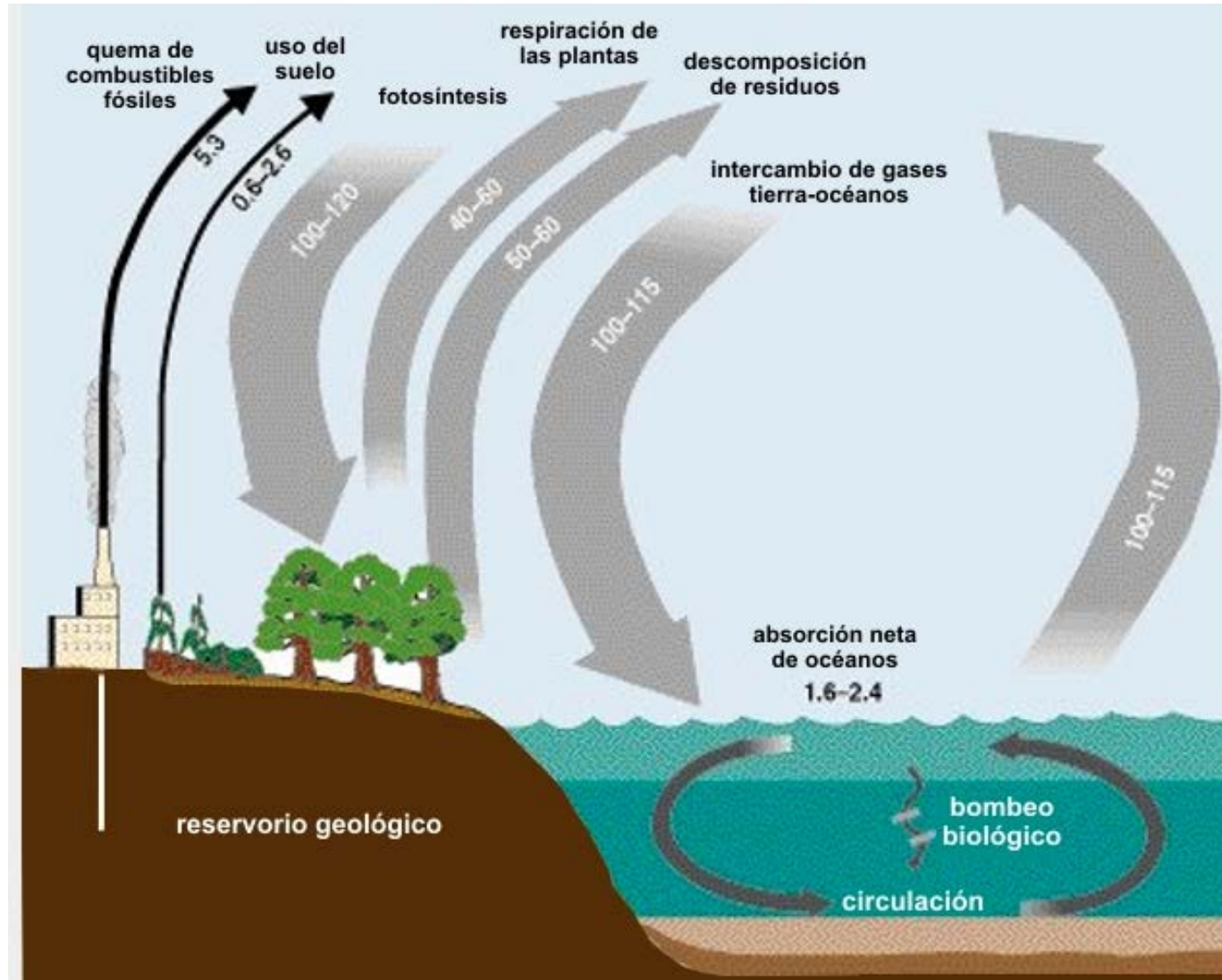
Fuente de energía combustión de combustibles fósiles

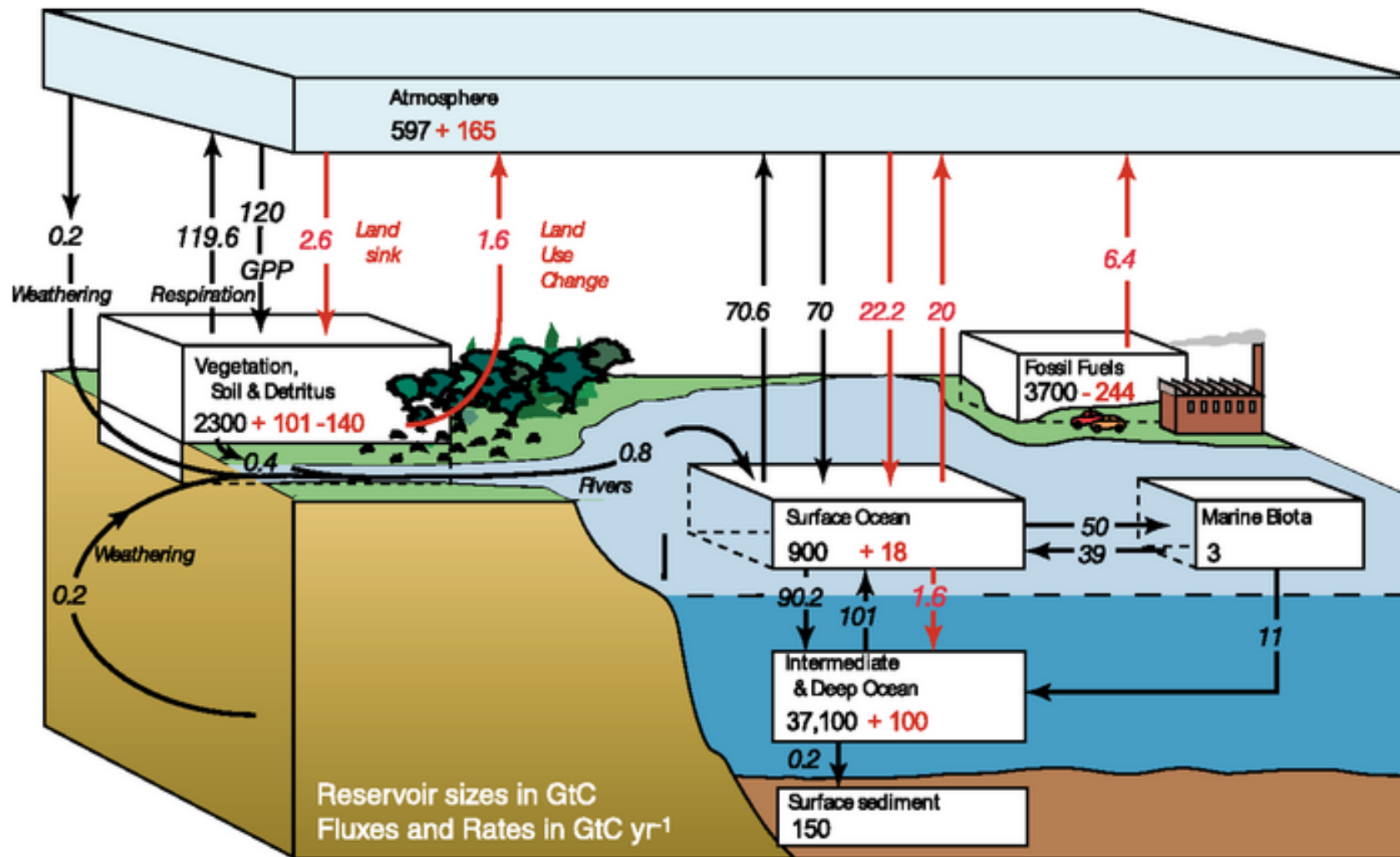


Fuente de otros recursos (Madera para construcción y combustible)

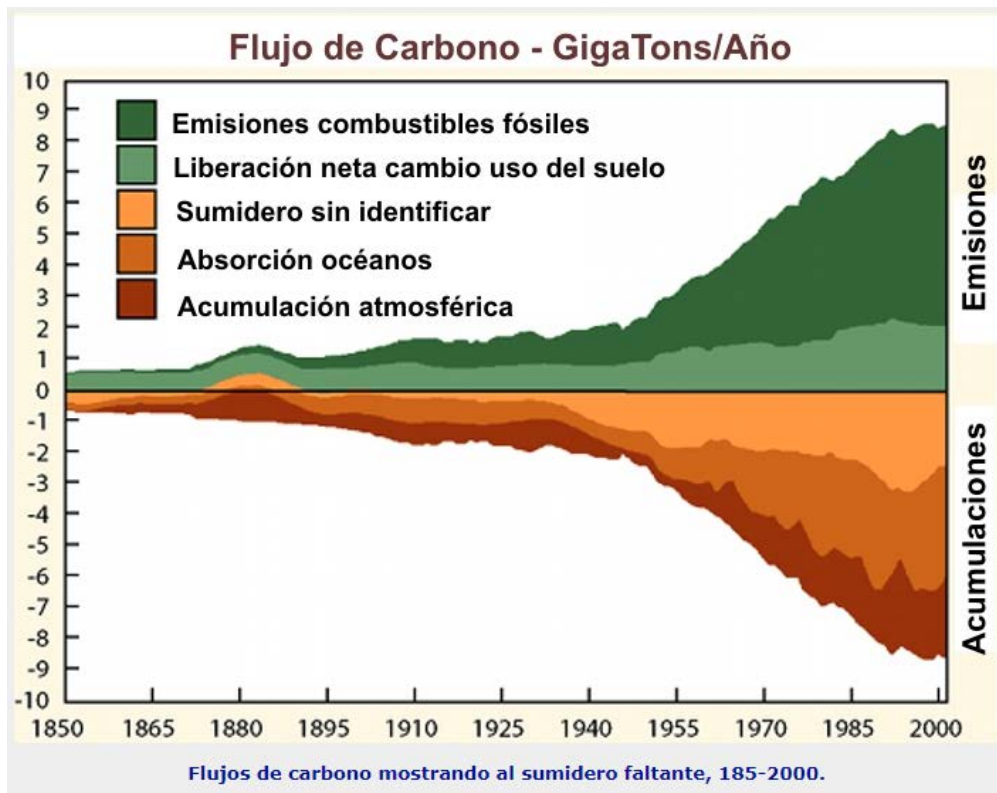


¿De donde viene y a donde se va el CO₂?





IPCC AR4 (2007) Fig 7.3. El ciclo global del carbón para los años 1990s, en el que se muestran los principales flujos anuales en GtC yr⁻¹: los flujos ‘naturales’ preindustriales se muestran en negro y los flujos ‘antropogénicos’ en rojo (modificados de Sarmiento y Gruber, 2002, con cambios en el tamaño de pool a partir de Sabine et al., 2004a). La pérdida neta terrestre de -39 GtC se infiere al sustraer las acumulaciones en la atmósfera y los océanos de la acumulación de emisiones de combustibles fósiles. La pérdida de -140 GtC de la componente ‘vegetation, soil and detritus’ representa emisión acumulada por el cambio de uso de suelo (Houghton, 2003), y requiere un sumidero de la biosfera de 101 GtC (en Sabine et al., dados como rangos entre -140 a -80 GtC y 61 a 141 GtC, respectivamente; otras incertidumbres se dan en la tabla 1). La columna 5 ‘AR4’ de la tabla 7.1 muestra los cambios antropológicos netos con la atmósfera. Los flujos brutos generalmente tienen una incertidumbre de más de $\pm 20\%$, pero se han manejado cantidades fragmentadas para lograr un balance al incluir estimaciones en fracciones de GtC yr⁻¹ por transporte en ríos, intemperización, enterramiento en océano profundo, etc. ‘GPP’ significa producción primaria anual bruta (terrestre). El contenido de carbono en la atmósfera y todos los flujos acumulativos desde 1750 son hasta finales de 1994.



Durante décadas biólogos, ecólogos, ambientalistas, geoquímicos, químicos, físicos, etc. que estudian al ciclo global del carbono les ha llamado la atención el aparente desequilibrio en el balance del ciclo del carbono. El desequilibrio viene de aplicar la siguiente ecuación:

Aumento del CO₂ atmosférico = Emisiones Humanas +
Uso de la Tierra – Absorción de los Océanos.

Incremento de CO₂ atmosférico = Emisiones antropogénicas + Uso de la tierra – absorción en océanos

Regiones o procesos que predominantemente producen CO₂ se denominan **fuentes de CO₂ atmosférico**, mientras que a los que absorben CO₂ se llaman “sumideros” precipitadores o secuestradores.

Aparentemente, al utilizar los datos durante los 90’s de las emisiones anuales=8.5 Gt, es mayor la suma de 6.3 Gt de los combustibles fósiles y 2.2 Gt del uso del suelo, que la suma del crecimiento anual de carbono en la atmósfera (3.2 Gt) y la absorción anual de los océanos (2.4 Gt)

$$8.5 = (6.3 + 2.2)$$

$$0 = (6.5 + 2.2) - (2.4 + 3.2 + X)$$

$$X = 2.9Gt$$

Se requiere de un secuestrador, depositador o “sumidero” adicional para balancear el total. Que equivaldría a un faltante de 115 Gt de 1850 a 2000

El promedio actual de **aumento del CO₂ atmosférico es de 1.8 ppmv/año**, que corresponde a 4.0 Pg C/año. Este aumento se debe principalmente a combustión de combustibles fósiles. Durante el consumo de combustible, casi todo el carbono en el combustible se oxida a CO₂ y se emite a la atmósfera. Se puede utilizar las estadísticas mundiales de uso de combustible para estimar la correspondiente emisión de CO₂, actualmente de 6.0 ± 0.5 Pg C/año. Otra fuente importante de CO₂ es la deforestación en los trópicos; basado en tasas de invasión agrícola documentadas por observaciones satelitales, se estima que esta fuente asciende a 1.6 ± 1.0 Pg C/año.

$$\frac{dm_{CO_2}}{dt} = \Sigma \text{fuentes} - \Sigma \text{precipitacion} =$$

$$\Sigma \text{precipitacion} = \Sigma \text{fuentes} - \frac{dm_{CO_2}}{dt} = 6.0 + 1.6 - 4 = 3.6 \text{Pg} / \text{año}$$

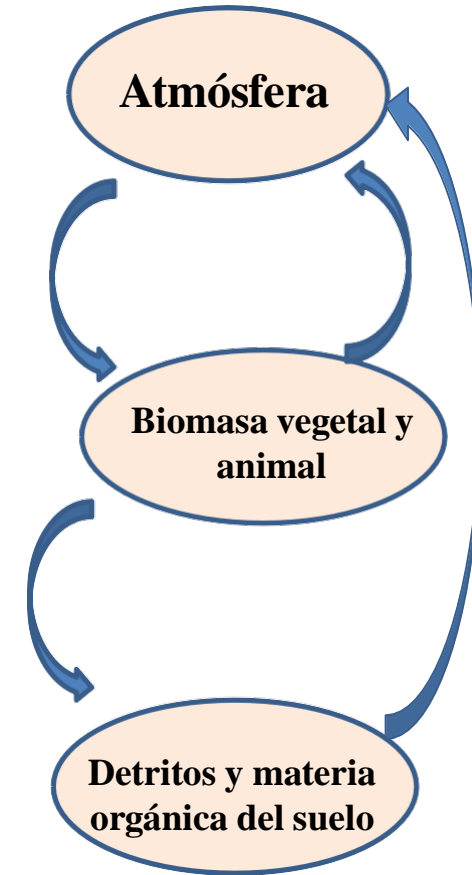
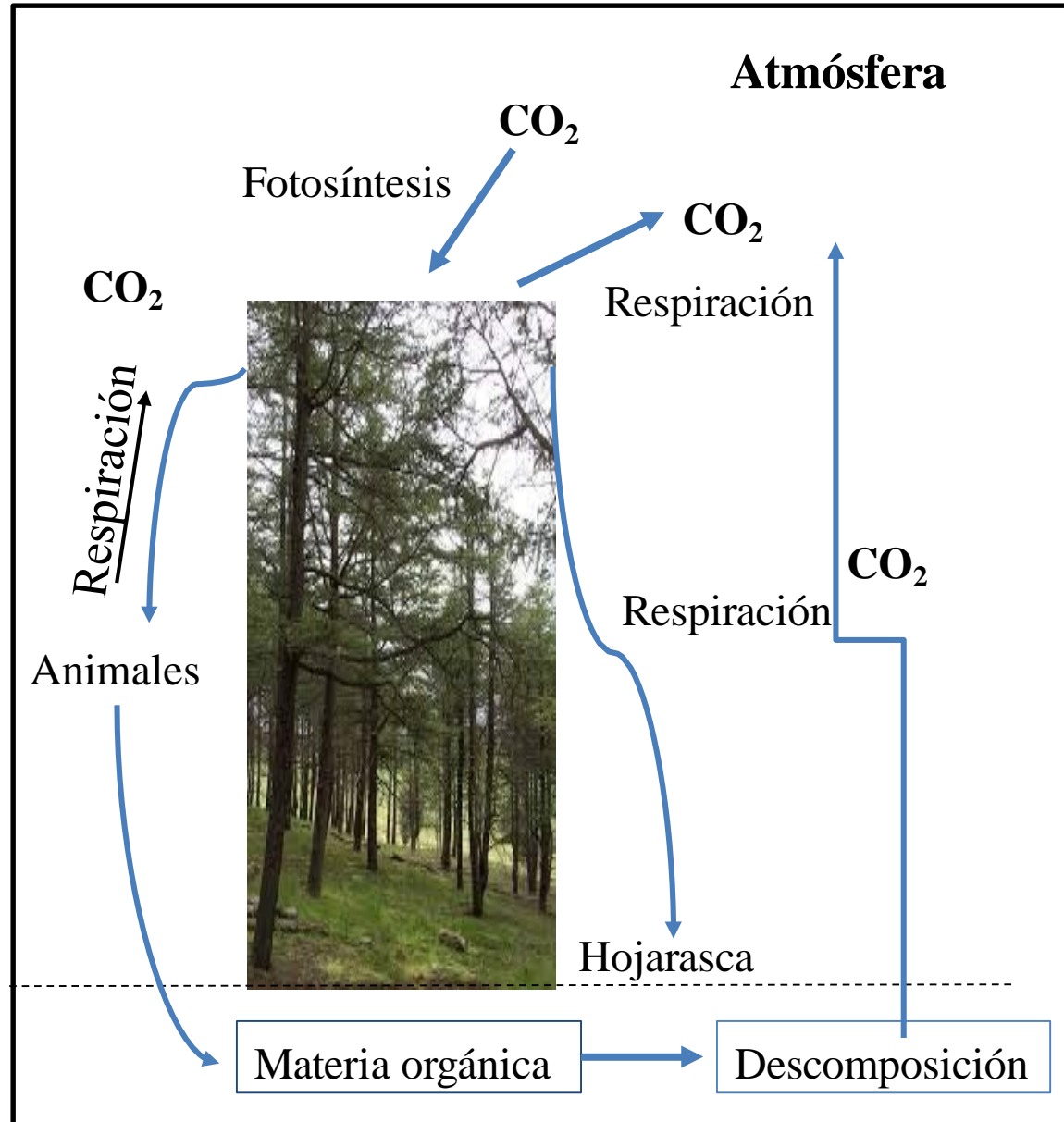
En realidad, solo la mitad del CO₂ liberado por combustión de combustibles fósiles y deforestación se acumula en la atmósfera. La otra mitad se transfiere a otros reservorios (océanos, atmósfera, suelos). Es necesario entender los factores de esta precipitación para futuros pronósticos de CO₂ y evaluar las implicaciones en el cambio climático. Un precipitador atmosférico significaría que el CO₂ de combustibles fósiles tiene un efecto de fertilizante, con consecuencias ecológicas muy importantes.

¿Por qué la biosfera terrestre absorbe CO₂ atmosférico?

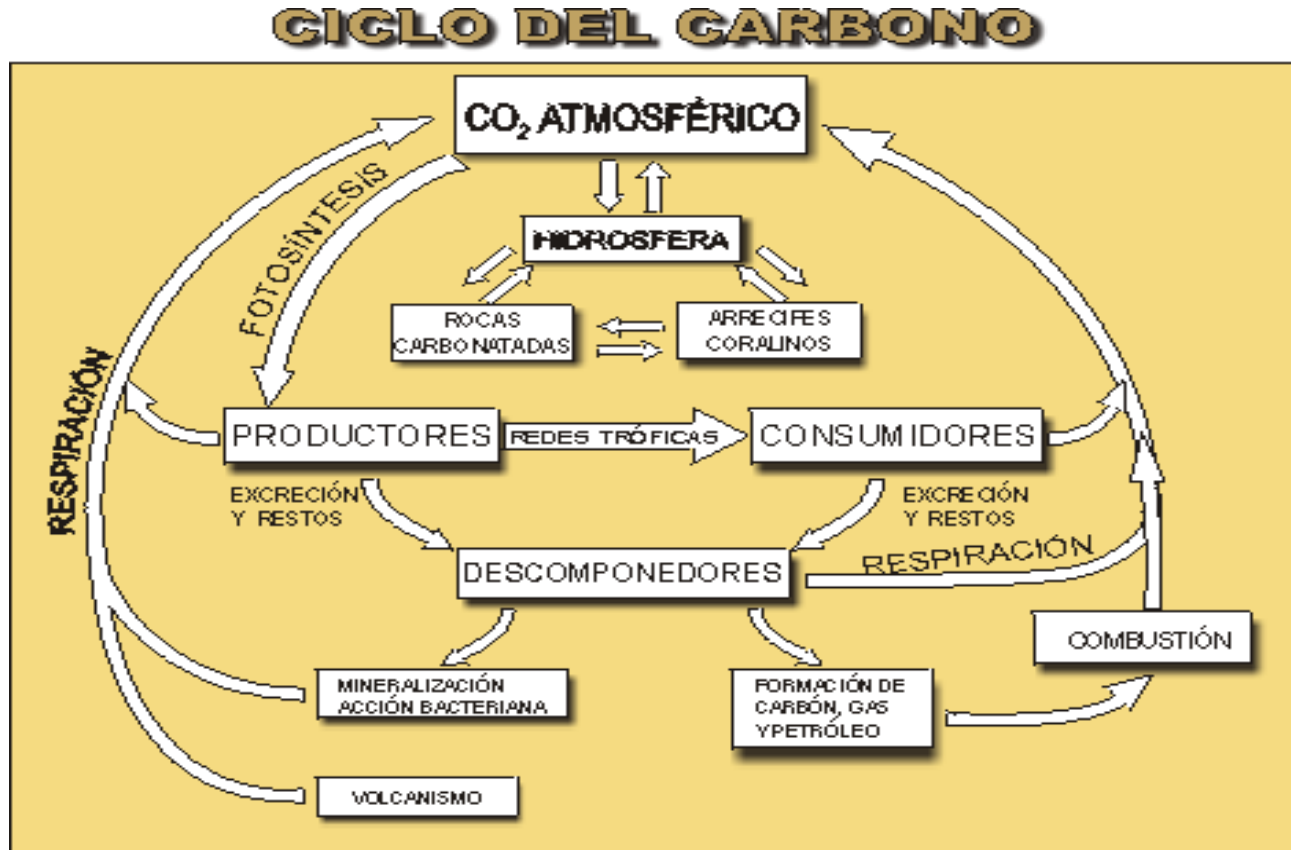
La toma neta de carbono por la biosfera terrestre se debe principalmente a la respuesta fisiológica o metabólica de las plantas al aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, o al calentamiento global. Las plantas son más eficientes en su crecimiento bajo estas nuevas circunstancias debido a:

- (1) El calentamiento puede estimular el crecimiento, lo que permite el crecimiento de árboles a mayores latitudes y alturas de lo que antes era posible.
- (2) En condiciones normales las plantas pierden agua por sus estomas cuando éstas se abren para tomar el CO₂ del aire. Cuando aumenta la concentración de CO₂, las plantas abren menos sus estomas, lo que les permite ahorrar agua.
- (3) La actividad humana también está cambiando sustancialmente el ciclo global del nitrógeno, al aumentar la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas. Lo más probable es que esto estimule un mayor crecimiento.
- (4) Pueden darse importantes sinergias entre el carbono, nitrógeno, y el calentamiento global en las plantas.

El carbono que entra en las cadenas tróficas se libera al ambiente como CO₂



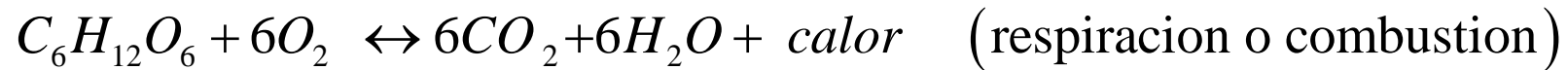
La atmósfera y la hidrosfera son la reserva fundamental de carbono, en moléculas de CO_2 que los seres vivos puedan asimilar.



Dinámica del ciclo del carbono.

¿De donde viene y a donde va el CO_2 de la atmósfera?

El carbono es una parte fundamental de la vida todos los organismos vivos contienen compuestos de carbono. Es componente importante de muchos procesos químicos de los seres vivos. Los procesos biológicos consumen compuestos de carbono que se oxidan a CO_2 , que a su vez es exhalado por animales y plantas. Las plantas asimilan CO_2 durante la fotosíntesis para generar (biomasa) nuevos compuestos de carbono. El ciclo del carbono entre los organismos y la atmósfera es consecuencia de dos procesos mutuos: fotosíntesis y respiración. La fórmula general de la fotosíntesis es:



Cuando las plantas fijan carbono a materia orgánica vía fotosíntesis esta reacción ocurre hacia la derecha y cuando los seres vivos respiran, o hay combustión de materia orgánica la reacción ocurre hacia la izquierda. Los combustibles fósiles son los remanentes de la materia orgánica muerta que vivió hace millones de años.

Las plantas absorben CO_2 y agua, y a través del proceso de fotosíntesis produce grandes cantidades de moléculas de carbono (azúcar, madera, plantas). Los animales se alimentan de plantas y utilizan la energía solar almacenada en ellas liberando calor a través del proceso de respiración.

Vida vegetal que se degrada (pudre) o se quema también libera dióxido de carbono, vapor de agua y energía. Esta es una parte natural e integral del sistema ambiental de la tierra.

¿cómo circula el carbono en los ecosistemas?

Tasas de producción primaria (involucra la captura de nutrientes) y la tasa de descomposición (involucra la liberación de nutrientes) están influenciados por las condiciones ambientales (temperatura, precipitaciones)



- ✓ En ecosistemas húmedos y cálidos, ambas tasas son altas y el carbono fluye rápidamente en el ecosistema.
- ✓ En ecosistemas fríos y secos, estos procesos son más lentos. Cuando las temperaturas son muy bajas, la descomposición es muy lenta y la materia orgánica se va acumulando.

La circulación del carbono presenta i) fluctuaciones diarias (temperatura y humedad): diarias: primeras horas de luz, con la fotosíntesis CO_2 , ↓ ↑ luego disminuye la FS durante la tarde, y a la noche ↓ ↑ CO_2 ; y ii) fluctuaciones estacionales (estaciones de crecimiento y letargo).



Estas fluctuaciones son mayores en ambientes terrestres (H. Norte) que en ambientes acuáticos.

La importancia global de la fotosíntesis

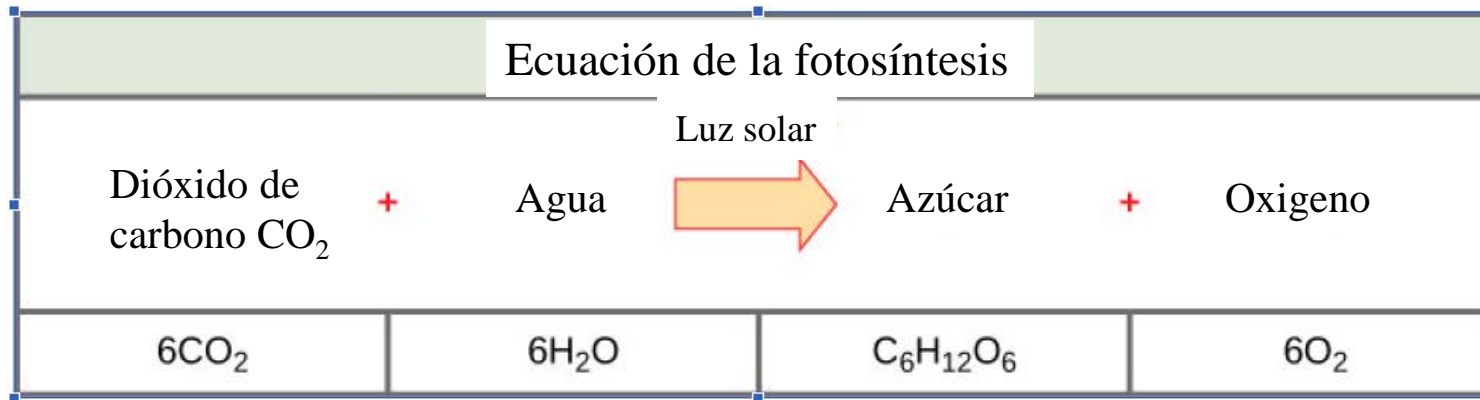
El proceso de fotosíntesis es de vital importancia para la biosfera por las siguientes razones:

1. **Crea O_2** , que es importante por dos razones. El oxígeno molecular en la atmósfera terrestre fue creado por organismos fotosintéticos; sin la fotosíntesis no habría O_2 para la respiración celular que necesita la vida multicelular compleja. Las bacterias fotosintéticas fueron probablemente los primeros organismos en realizar la fotosíntesis, que datan de hace 2-3 mil millones de años. Gracias a su actividad y a una diversidad de organismos fotosintetizadores actuales, la atmósfera de la Tierra tiene actualmente alrededor del 21% de O_2 . Además, este O_2 es vital para la creación de la capa de ozono, que protege la vida de la dañina radiación *uv* emitida por el sol. El ozono (O_3) se crea a partir de la descomposición y reensamblaje del O_2 .

2. **Proporciona energía a casi todos los ecosistemas de la biosfera.** Al transformar la energía de la luz en energía química, la fotosíntesis proporciona la energía utilizada por los organismos, plantas, animales y hongos. *Las únicas excepciones se encuentran en ecosistemas muy raros y aislados, como las fuentes hidrotermales cercanas a las profundidades marinas, donde los organismos obtienen energía que originalmente proviene de los minerales, no del sol.*

3. **Proporciona el carbono necesario para las moléculas orgánicas.** Los organismos están compuestos principalmente de dos componentes: agua y moléculas orgánicas, estas últimas a base de carbono. A través del proceso de fijación de carbono, la fotosíntesis toma el carbono del CO_2 y lo convierte en azúcares (que son orgánicos). El carbono en estos azúcares se puede reutilizar para crear otros tipos de moléculas orgánicas que los organismos necesitan, como lípidos, proteínas y ácidos nucleicos. Por ejemplo, el carbono utilizado para fabricar su ADN fue una vez CO_2 utilizado por organismos fotosintéticos.

La fotosíntesis requiere luz solar, CO₂ y agua como reactivos iniciales. Una vez completo el proceso, la fotosíntesis libera oxígeno y produce moléculas de carbohidratos, más comúnmente glucosa. Estas moléculas de azúcar contienen la energía que los seres vivos necesitan para sobrevivir. Las complejas reacciones de la fotosíntesis se pueden resumir mediante la ecuación química que se muestra a continuación.



Las dos partes de la fotosíntesis

Las **reacciones dependientes de la luz y el ciclo de Calvin**.

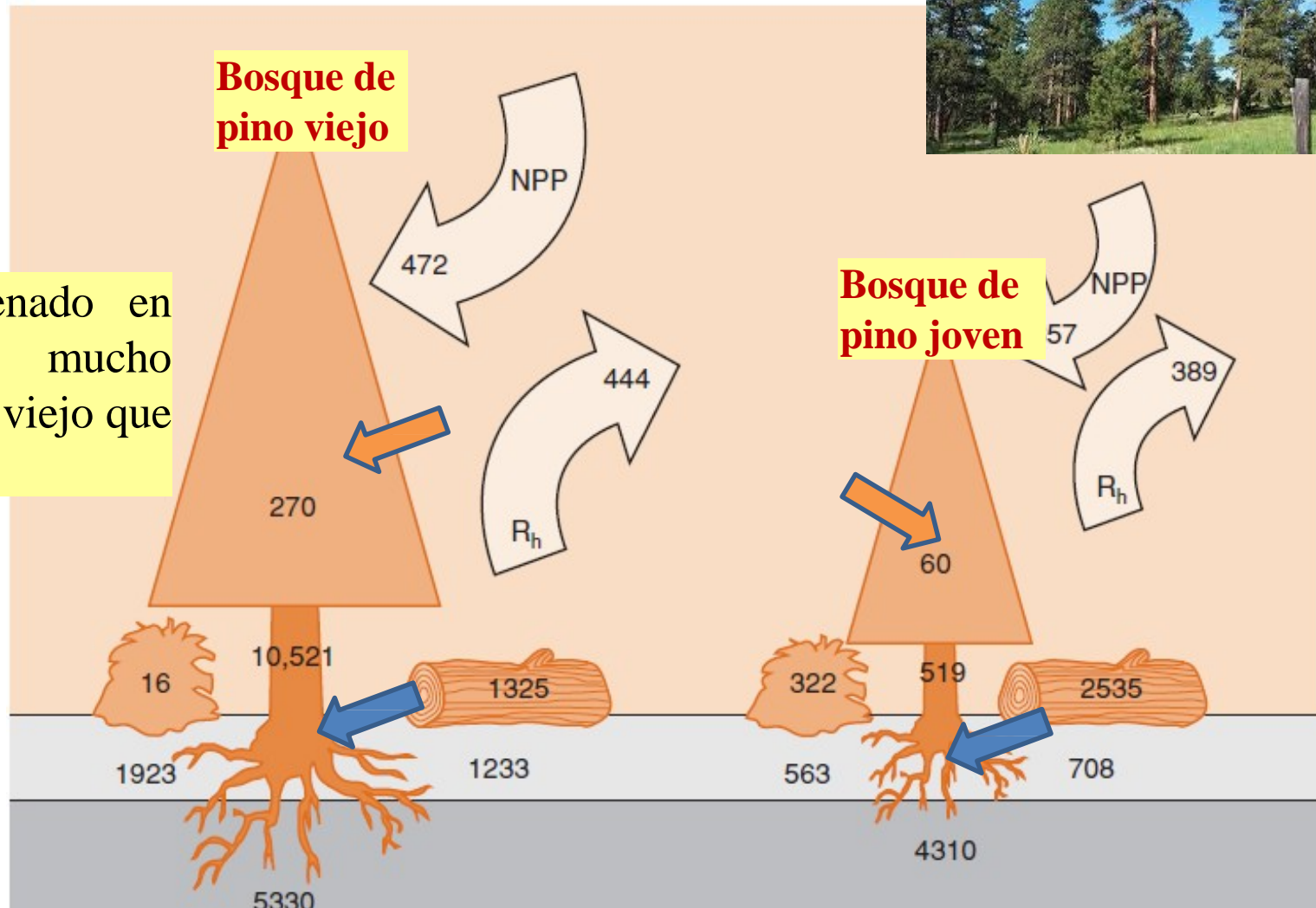
En las reacciones dependientes de la luz, la clorofila absorbe energía de la luz solar y después la convierte en energía química con la ayuda del agua. Las reacciones dependientes de la luz liberan oxígeno como subproducto de la división del agua.

En el ciclo de Calvin, la energía química derivada de las reacciones dependientes de la luz impulsa tanto la captura de carbono en las moléculas de dióxido de carbono como el posterior ensamblaje de las moléculas de azúcar.

El flujo de carbono en un bosque a distintas edades

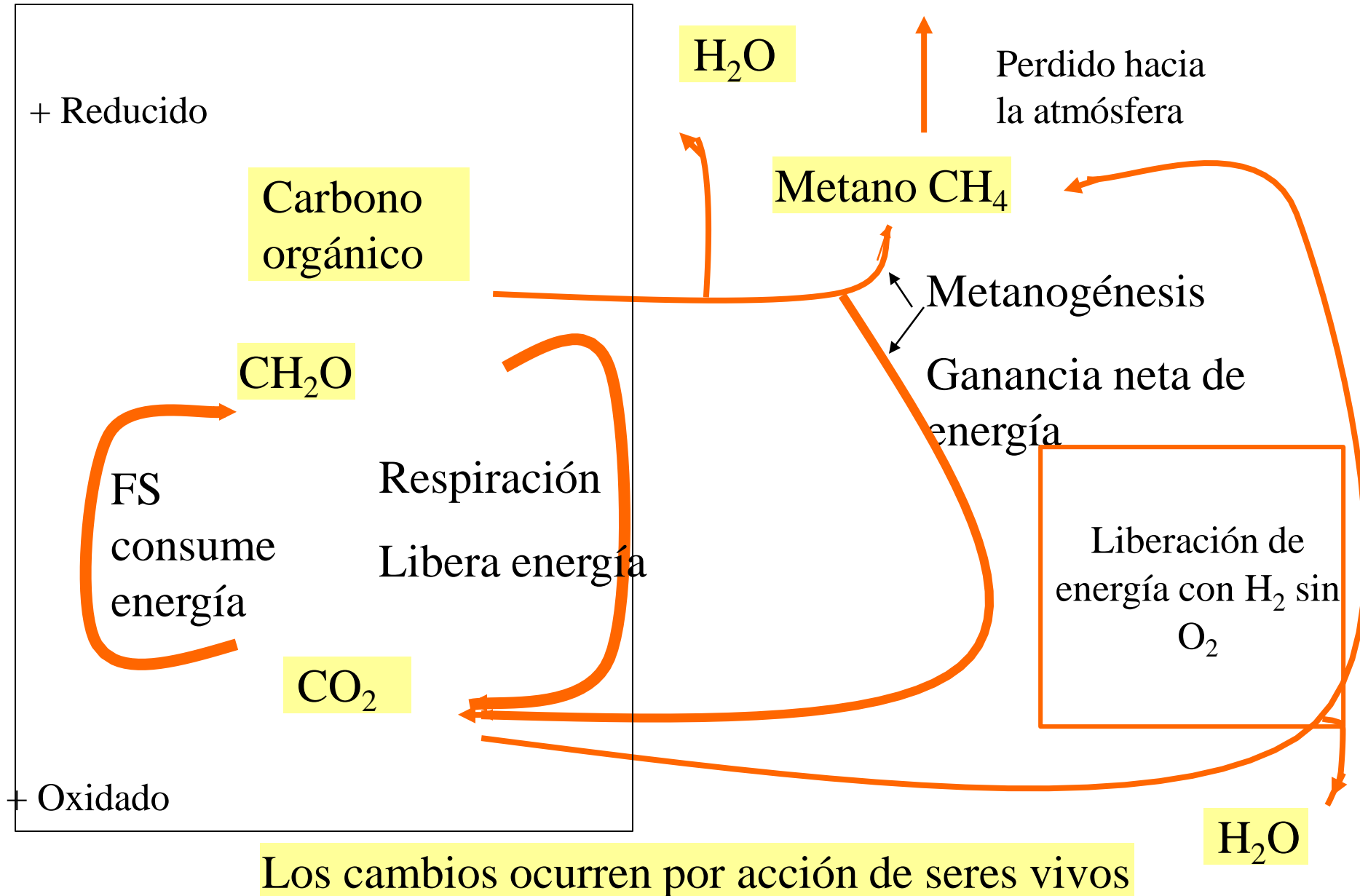


El carbono almacenado en biomasa viva es mucho mayor en un bosque viejo que en un bosque joven.



El contenido de carbono total medido como g Carbono/m² de un bosque viejo es el doble al de un bosque joven

Transformaciones del carbono a lo largo del ciclo

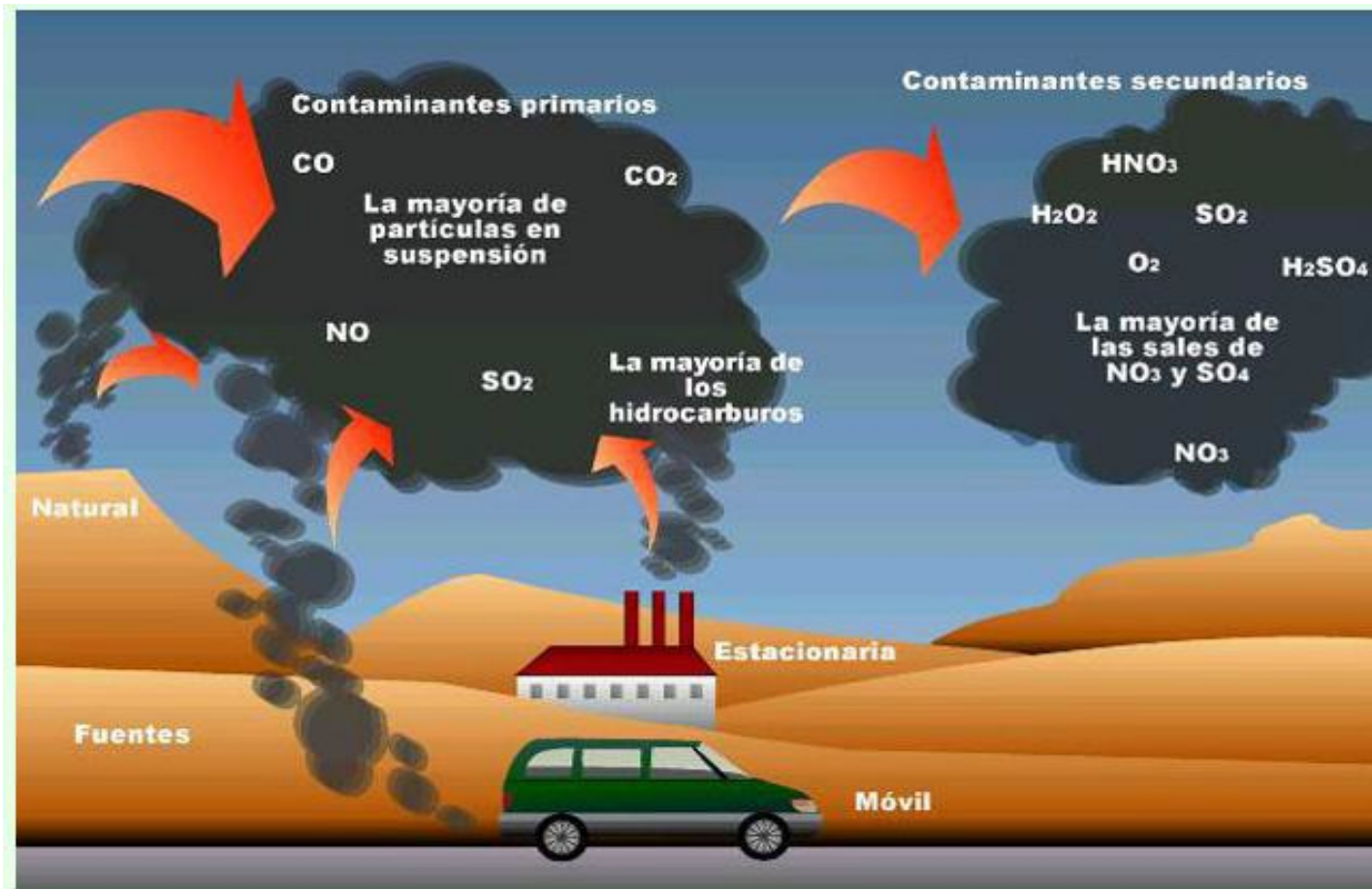


En la naturaleza los distintos compuestos orgánicos e inorgánicos deberían circular de forma natural, por la intervención de los factores bióticos y abióticos.

Sin embargo, producto de la acción humana se ha producido un desequilibrio en la naturaleza, que ha llevado a un constante y progresivo deterioro del medio ambiente.



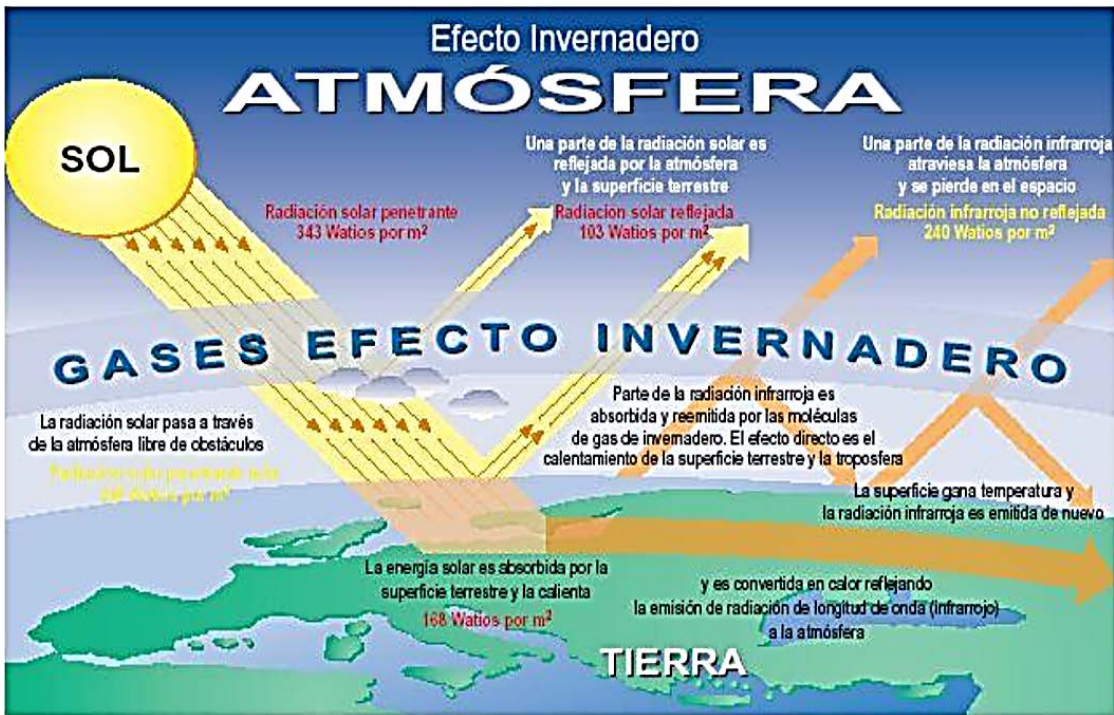
Los gases que contaminan la atmósfera son: dióxido de azufre, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, metano y ozono. Los efectos que pueden producir sobre la atmósfera son: El aumento del **efecto invernadero** por aumento de las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera y la destrucción de la **capa de ozono** por los CFCs (de los sprays y refrigeradores), los insecticidas y herbicidas.



El CO₂, agua, ozono y nitrógeno forman una capa que permite el paso de los rayos del sol a la corteza terrestre, pero impiden su salida cuando rebotan en la superficie de la tierra, produciendo un calentamiento de la atmósfera más cercana a la tierra.

Este efecto puede verse multiplicado por los gases contaminantes que pueden elevar de forma alarmante la temperatura media ambiental de determinados puntos de la corteza.

Esto conduciría a la desaparición de determinadas especies y a la destrucción de los polos. El hielo se fundiría y aumentaría la cantidad de agua, inundando las costas, los valles... Estos son los efectos del llamado **EFEECTO INVERNADERO**.



Fuente: UNEP -GRID-Arendal.

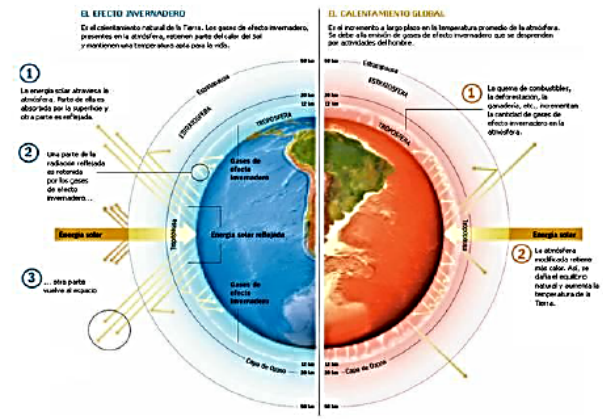
Efecto Invernadero y Calentamiento Global

Efecto invernadero:

- 1.- la energía solar atraviesa la atmósfera, parte de ella es absorbida por la superficie y otra parte es reflejada.
- 2.- una parte de la radiación reflejada es retenida por los gases del efecto invernadero.
- 3.- otra parte vuelve al espacio.

Calentamiento Global:

- 1.- la quema de combustible, la deforestación, la ganadería etc., incrementan la cantidad de gases de efecto invernadero en la atmósfera.
- 2.- la atmósfera modificada retiene el calor, así se daña el equilibrio natural y aumenta la temperatura de la tierra.



DESHIELO EN EL POLO NORTE en Verano

Diseño: alquimistas.evlnolo.com

El aumento de la temperatura derrite el hielo, el cual se recupera menos en invierno y comienza a fundirse antes en primavera.



Región del Ártico 1970

7,6 millones de km²

6,5% del deshielo por década

Escala 1:39,000,000

Región del Ártico 2005

5,3 millones de km²

8% del deshielo por década

Escala 1:39,000,000

Región del Ártico 2100

Casi inexistente

Escala 1:39,000,000

1000 veces la superficie de España

El aumento de la temperatura derrite el hielo, el cual se recupera menos en invierno y comienza a fundirse antes de la primavera

Causa deshielos en los Polos



Actividad humana

- Deforestación
- Combustibles óseos
- Transporte
- Actividades industriales

Incrementa

- Gases efecto invernadero
- Vapor de agua
- CO₂, CH₄, NO₂, O₃.
- Clorofluorocarburos

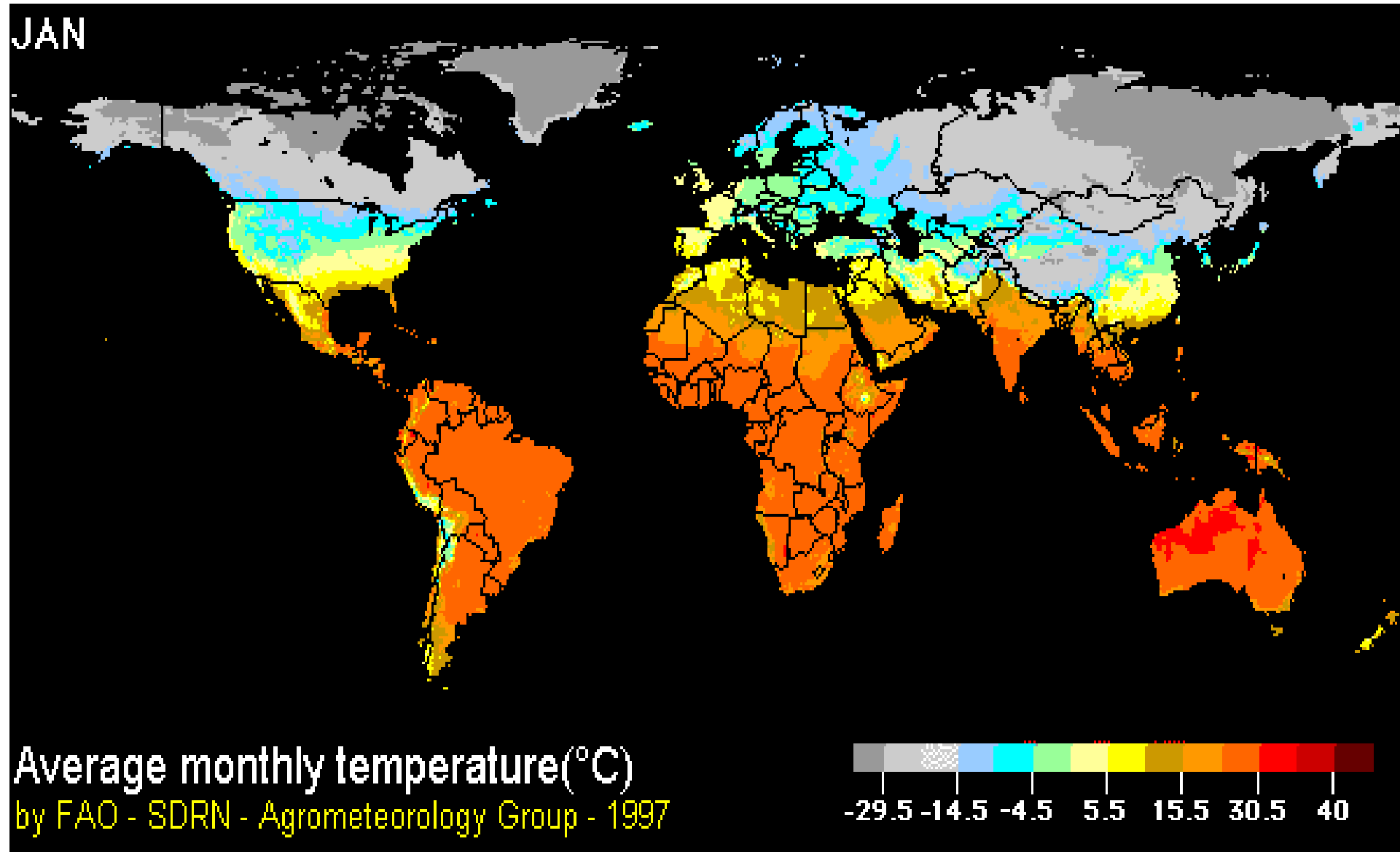
Aumenta la temperatura

Calentamiento global: incrementa (en el tiempo), de la temperatura media de la atmósfera terrestre y los océanos

Radiación ultravioleta

Desgaste de la capa de ozono

Zonas afectadas por calentamiento global



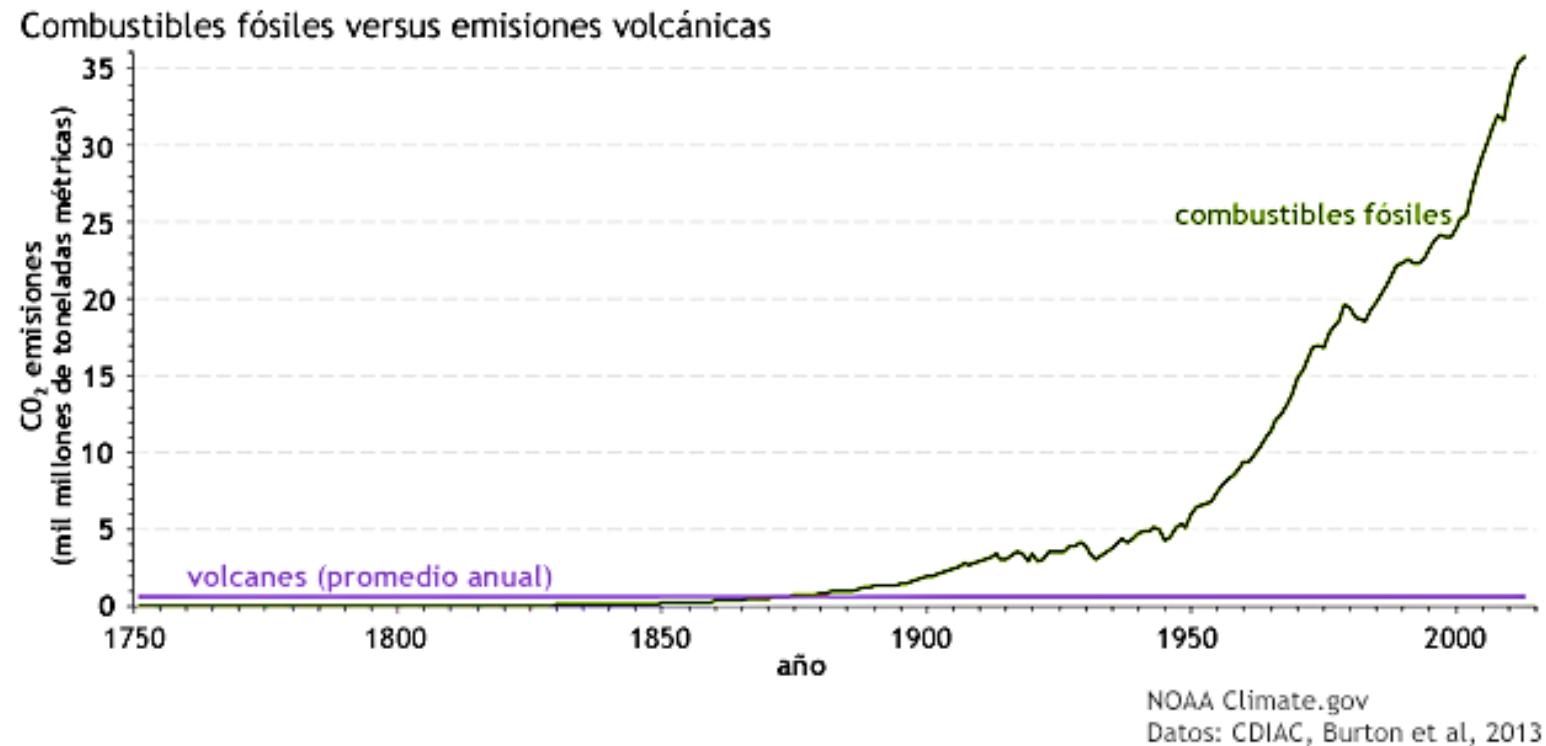
Principales Gases contaminantes

- El dióxido de carbono.
- Los clorofluorocarbonos.
- El metano.
- El óxido nitroso.



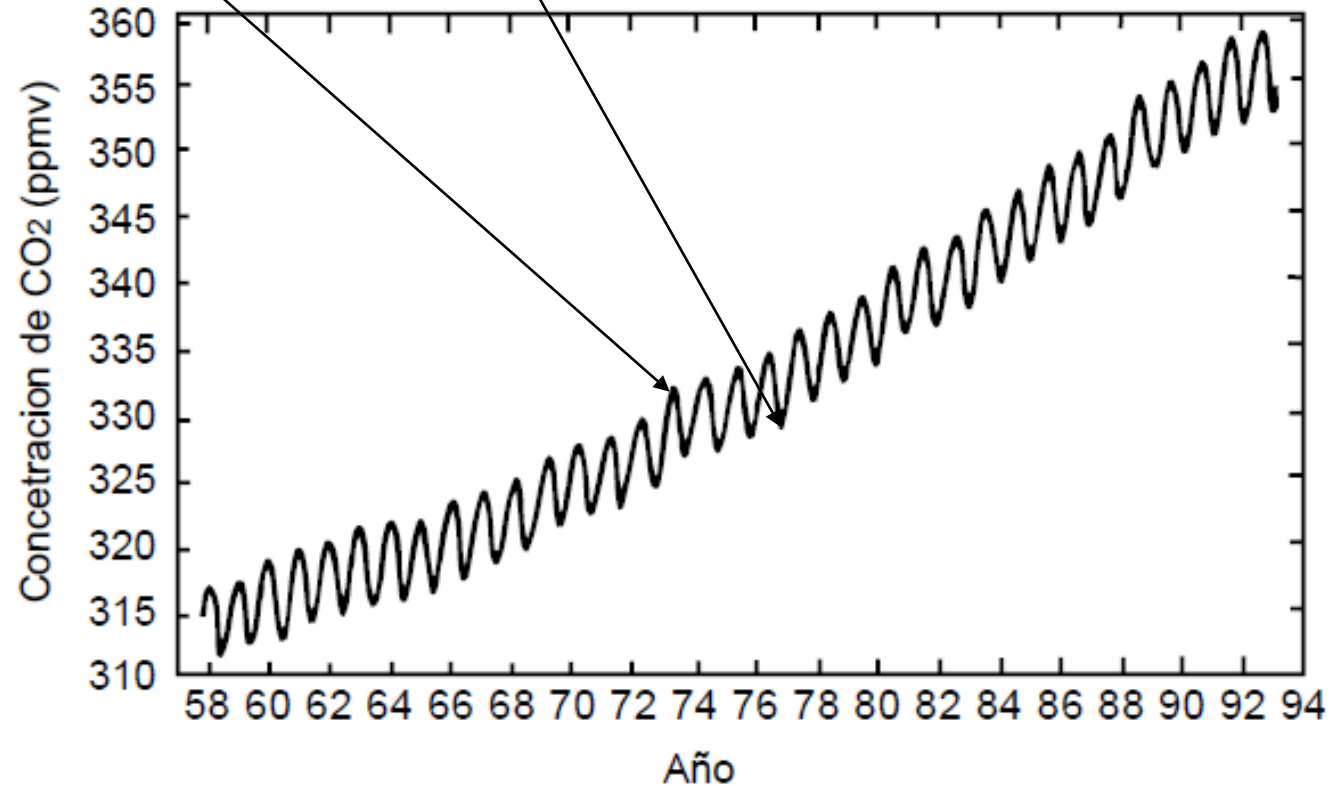
Ciclo del carbono:

Las actividades antropogénicas, emiten a la atmósfera alrededor de 10^{15} gramos de carbono por año. Actualmente la atmósfera contiene la mayor cantidad de carbono en al menos los últimos dos millones de años. El carbono está presente en la atmósfera principalmente como dióxido de carbono (CO_2), en parte producido por combustión de combustibles fósiles, que son productos derivados o conservados de fotosíntesis antigua. La atmósfera continuamente intercambia CO_2 con los océanos. El carbono también está presente en la atmósfera, como componente de otros gases menos abundantes pero climáticamente impactantes, como el metano (CH_4).



Balance de masa de CO₂ atmosférico

Las mediciones en núcleos de hielo muestran que las concentraciones atmosféricas de CO₂ han aumentado de 280 ppmv en la época preindustrial a 365 ppmv en la actualidad (Figura inferior). El patrón superpuesto sobre la tendencia secular es una oscilación estacional (*máximo de invierno, mínimo de verano*) que refleja la absorción de CO₂ por la vegetación durante el crecimiento de temporada, equilibrada por la liberación neta de CO₂ de la biosfera en caída debido a la descomposición microbiana.



Tendencia del CO₂ atmosférico medido desde 1958 en Mauna Loa Observatorio, Hawaii.



Lluvia ácida

Cuando la humedad del aire se combina con óxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, los cuales son provocados por las fabricas, centrales eléctricas y automotores que queman carbón y aceite se llega a formar la **Lluvia ácida**.

Estos gases al combinarse con el vapor de Agua se forma ácido sulfúrico y ácido Nítrico, que cuando caen a la tierra en Forma de precipitación, causan daño a la vida.

Causas y efectos de las lluvias acidas

CAUSAS:

Combustión de combustibles fósiles.

- Liberación del sulfuro en el ambiente por parte de las industrias.
- Las emisiones de los automóviles que producen la abundancia de óxido de nitrógeno en el aire.

EFFECTOS:

- Causa daños ambientales severos en los bosques y en los árboles.
- Daña los ecosistemas vitales.
- Algunos animales no pueden sobrevivir a este ácido y mueren.
- Daña la salud de los seres humanos

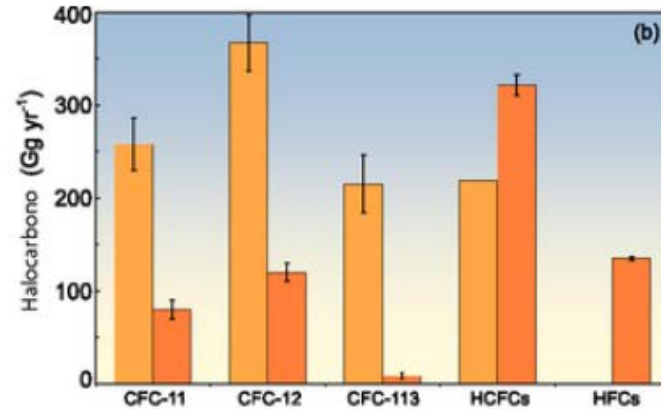
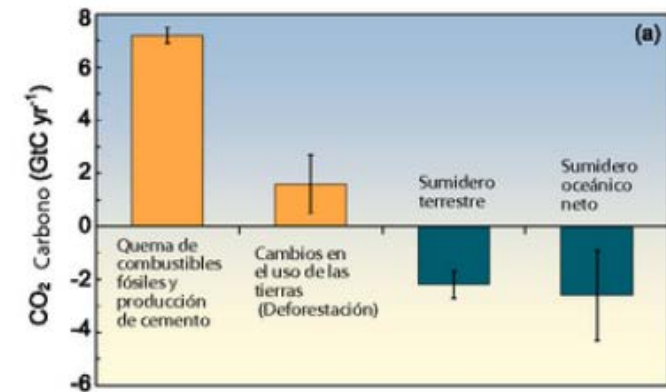
Efectos de la lluvia ácida



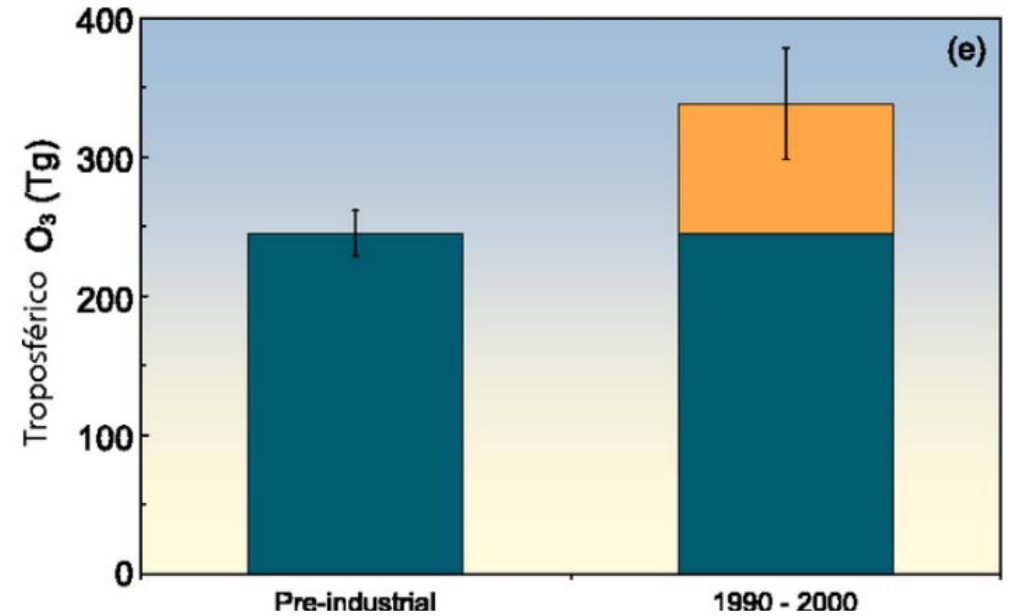
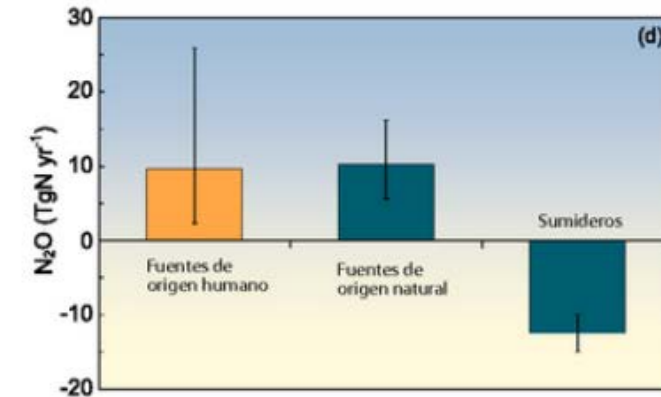
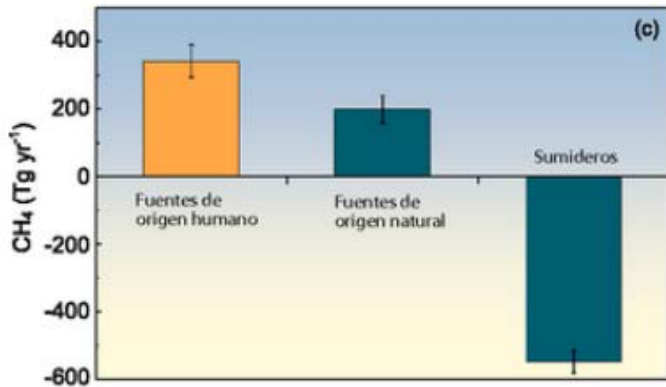
La quema de combustibles fósiles arroja CO₂ a la atmósfera. Otras fuentes menores incluyen: manufactura de cemento, quema de gas natural en industria petrolera y petroquímica. La mayor parte de las emisiones de CO₂ a la atmósfera proviene del consumo de combustibles fósiles en transporte humano, producción eléctrica, calefacción, enfriamiento de edificios y actividad industrial. El petróleo dejó de ser el combustible fósil de mayor uso, actualmente (2016), el carbón mineral es el combustible dominante (40% el carbón mineral y 34% el petróleo), mientras que el uso de gas natural ha ido aumentando (19% en el 2016).

En los años noventa, el uso de combustibles fósiles emitió 6.4 Petagramos de carbono (PgC) al año, y en el periodo entre 2007-2016, aumentó a 9.4 PgC/año. Entre los años 2000-2009, la emisión aumentó un 3.3% cada año, sustancialmente más rápido que el crecimiento del 1.0 % al año de los años noventa. Este cambio dramático se debe principalmente al aumento en el uso de combustibles fósiles por parte de países en desarrollo. La razón de crecimiento de las emisiones de carbono disminuyó sustancialmente entre el 2012 y 2016, aunque volvieron a crecer, reporte IPCC AR5 (RCP8.5).

Las evidencias indican que el rápido aumento en las emisiones por parte de países en desarrollo, como China, se debe al crecimiento en el comercio internacional, así como al cambio en los países desarrollados hacia una economía de servicios. La producción de exportaciones en los países desarrollados también contribuye al aumento de emisiones.



Regiones o procesos que predominantemente producen CO₂ se denominan fuentes de CO₂ atmosférico, mientras que a los que absorben CO₂ se llaman precipitadores o secuestradores.



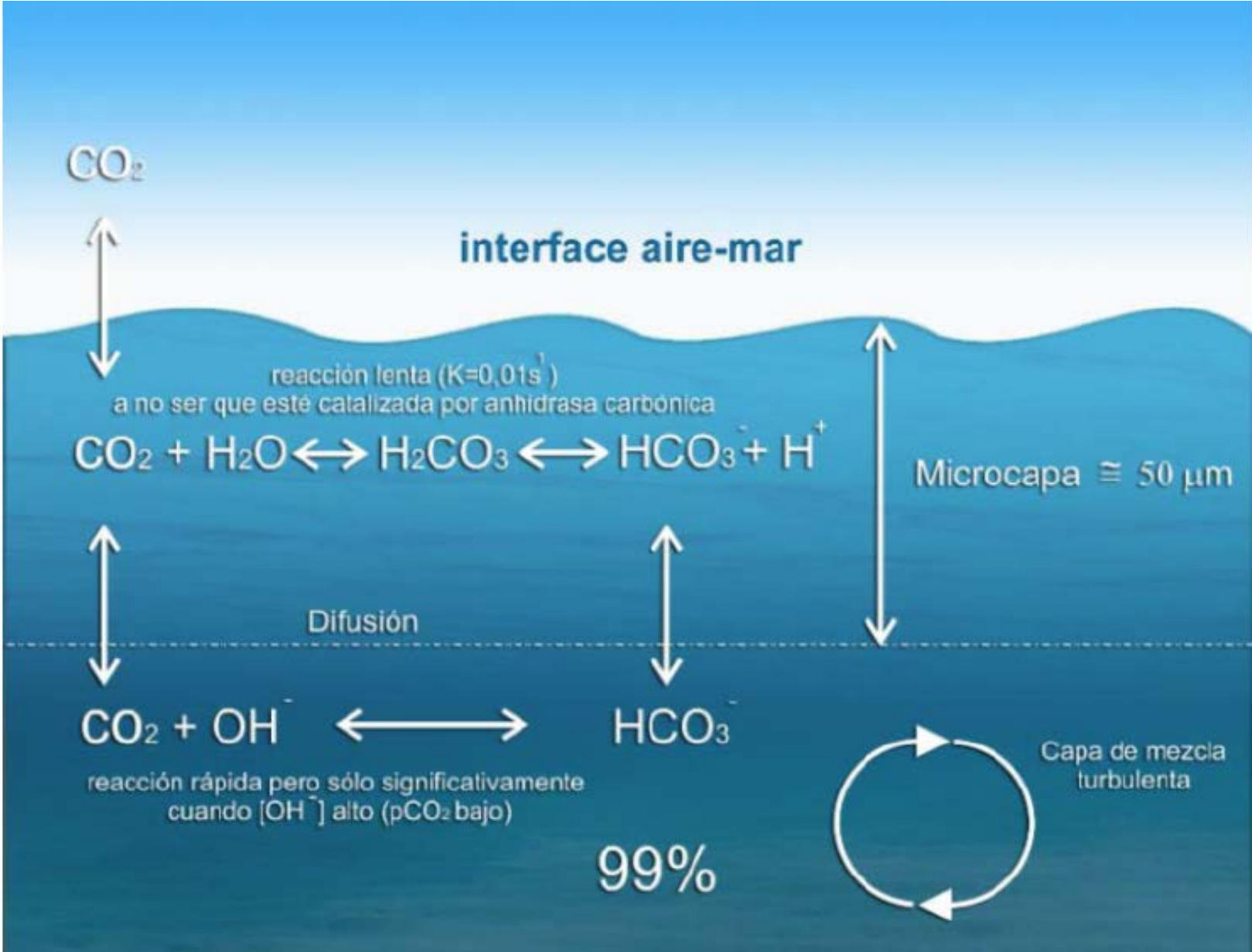
Desde (a) hasta (d), las fuentes antropogénicas se muestran en **naranja** mientras que las fuentes naturales y los sumideros se muestran en **verde**. En (e) el ozono troposférico antropogénico se muestra en **naranja** mientras que las cantidades de ozono natural están en **verde**. En (e), (a) Fuentes y sumideros de CO₂ (GtC).

Sólo la mitad del dióxido de carbono emitido cada año por la quema de combustibles fósiles permanece en la atmósfera. La otra mitad se disuelve en los océanos o es tomada por la biosfera terrestre. Se comenzando a entender la dinámica de estos dos grandes precipitadores o sumideros (secuestradores) naturales de CO₂, de cómo podría cambiar su comportamiento al aumentar la concentración de CO₂. El océano juega un gran papel secuestrando alrededor de 2 Petagramos (Pg = 10¹⁵ gC) de carbono antropogénico al año (Jorge L. Sarmiento & Nicolas Gruber, 2002)

El océano hospeda grandes comunidades de organismos que realizan en la superficie, fotosíntesis de energía solar y de nutrientes, transformando el CO₂ en biomasa. Una gran parte del CO₂ removido biológicamente del agua oceánica es reconvertido en CO₂ rápidamente por la cadena trófica, una proporción menor (< 1%) de material (animales muertos, vegetales y carbonatos), se sumerge a grandes profundidades enriqueciendo el fondo oceánico con carbono. Este proceso remueve carbono de la superficie hacia el fondo de los océanos y se almacena en la geosfera.

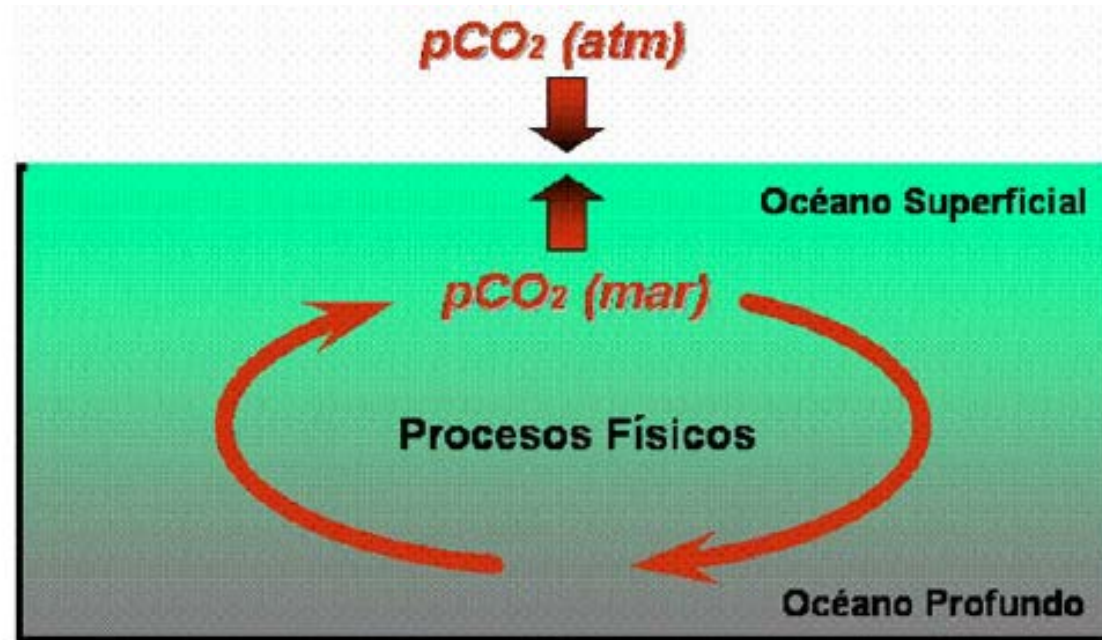
El flujo de carbono hacia el mar aumenta al incrementarse las actividades antropogénicas que aumentan la concentración de carbono en la atmósfera. De no ser por los océanos, la concentración atmosférica de CO₂ sería del orden de 80ppm más elevada que la concentración actual (155 PgC, Ciais et al. 2013, Khatiwala et al. 2009, 2013). Los océanos han absorbido el 41% de todo el CO₂ emitido a la atmósfera por la combustión de combustibles fósiles (375 PgC) (McKinley, et al. 2017). Debido a que los océanos tardan cerca 1000 años en remezclarse, gran cantidad del carbono absorbido por los océanos permanece cerca de la superficie, dentro del primer kilómetro del océano.

Se pronostica que seguirá aumentando hasta 2100 la absorción de CO₂ por los océanos, debido que el aumento de CO₂ en la atmósfera acelerará la disolución de CO₂ en los océanos. Sin embargo, los procesos químicos del carbono en el agua de mar tan especiales, el potencial de los océanos para absorber CO₂ disminuye al aumentar la concentración de CO₂. La actividad antropogénica puede disminuir y hasta llegar a frenar la circulación oceánica global, reduciendo la eficiencia de los océanos de secuestrar CO₂. Pronósticos derivados de modelos indican cambios significativos a escala regional en la substracción biológica de carbono hacia las profundidades oceánicas, aunque la magnitud en el secuestro de carbono a escala global será mínima.



Circulación Oceánica.

En el momento de la formación de las aguas profundas captan CO_2 por el efecto de la solubilidad. La dirección del intercambio está determinada por las diferencias entre las concentraciones de gas que existen entre la atmósfera y las aguas superficiales. Al tener la atmósfera una presión parcial de CO_2 más alta, el gas por difusión entra en la superficie del océano. El volumen de intercambio depende de la temperatura, la velocidad del viento y turbulencia. Durante la circulación de las aguas se van enriqueciendo de CO_2 por la descomposición de la materia orgánica.



$$\text{Flux} = k [p\text{CO}_2(\text{mar}) - p\text{CO}_2(\text{atm})] = k \Delta p\text{CO}_2$$

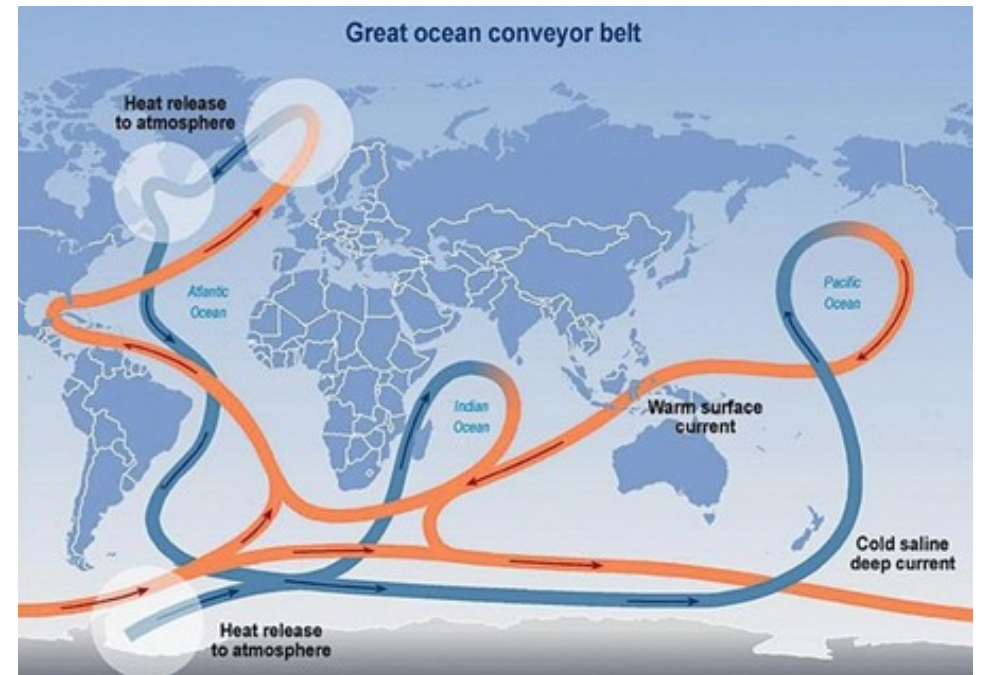
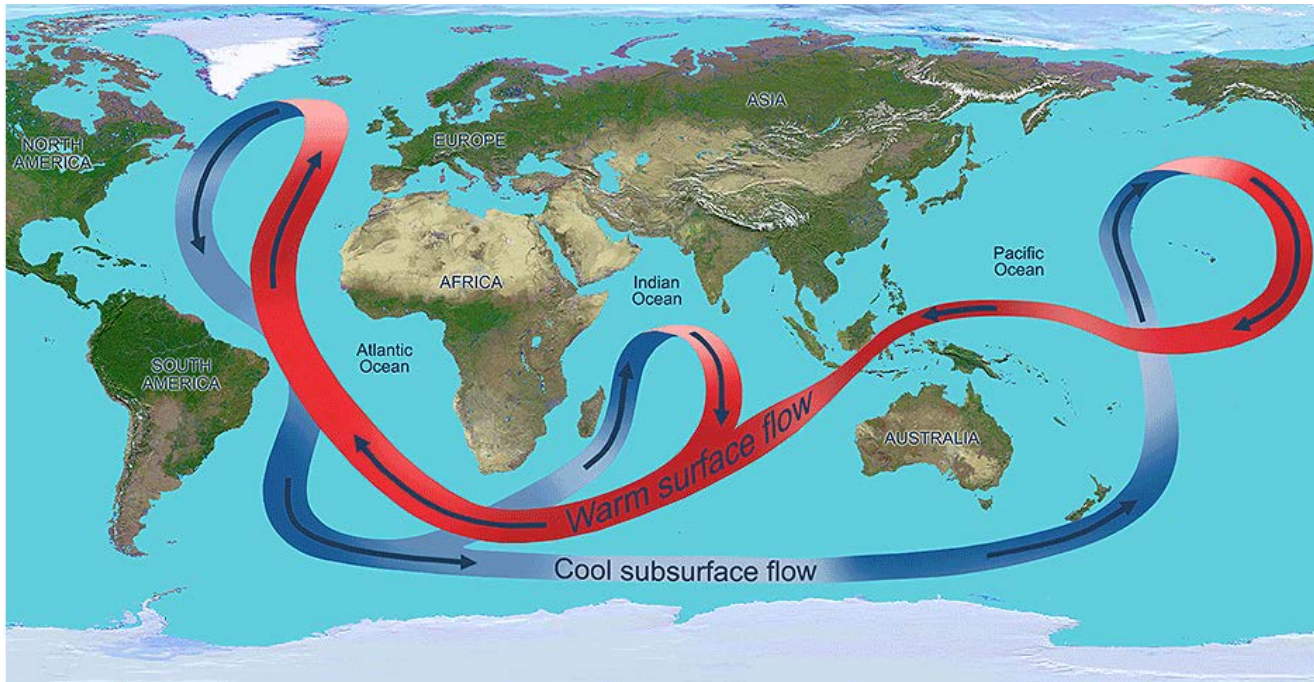
La solubilidad determina la cantidad de CO_2 intercambiado a lo largo de la interfase océano-atmósfera, debido a su relación inversa con la salinidad y la temperatura. La mayor solubilidad del CO_2 en agua de mar con respecto a otros gases es debido a la polaridad de dicha molécula.

Una vez el CO_2 penetra en el océano, entra en juego la circulación termohalina, controlada por la diferencia de densidad de las masas de agua oceánicas. Debido a la alta solubilidad en aguas superficiales frías, la concentración del CO_2 es mayor en altas latitudes, punto de partida de la formación de las aguas profundas. El transporte y hundimiento de las masas de agua ricas en carbono orgánico disuelto (**CID**) a zonas profundas (Gattuso y Hansson, 2011), permite que dichas masas vayan enriqueciéndose a su paso debido a los aportes superficiales y a procesos de descomposición de la materia orgánica en profundidad. Una vez llegados a las zonas ecuatoriales, el transporte de Ekman, **produce el afloramiento de las aguas profundas (Ekman, 1905) frías y ricas en CO_2 . El aumento de la temperatura del agua produce en estas zonas una disminución de la solubilidad de dicho gas, y por tanto una emisión de CO_2 a la atmósfera.** Dicha masa de agua, volverá a su punto de partida cerrando de esta forma un ciclo completo que tiene una duración aproximada de unos 1000 años (Wanninkhof, 1992).

Una vez que el CO_2 ha penetrado en la columna de agua, se desencadenan una serie de reacciones químicas, físicas y biológicas, algunas altamente complejas (Raven et al., 2005); resalta la importancia de la formación de carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-), componentes principales del carbono inorgánico oceánico total, constituyendo el 99% del **CID** (Wanninkhof y Feely, 1998).

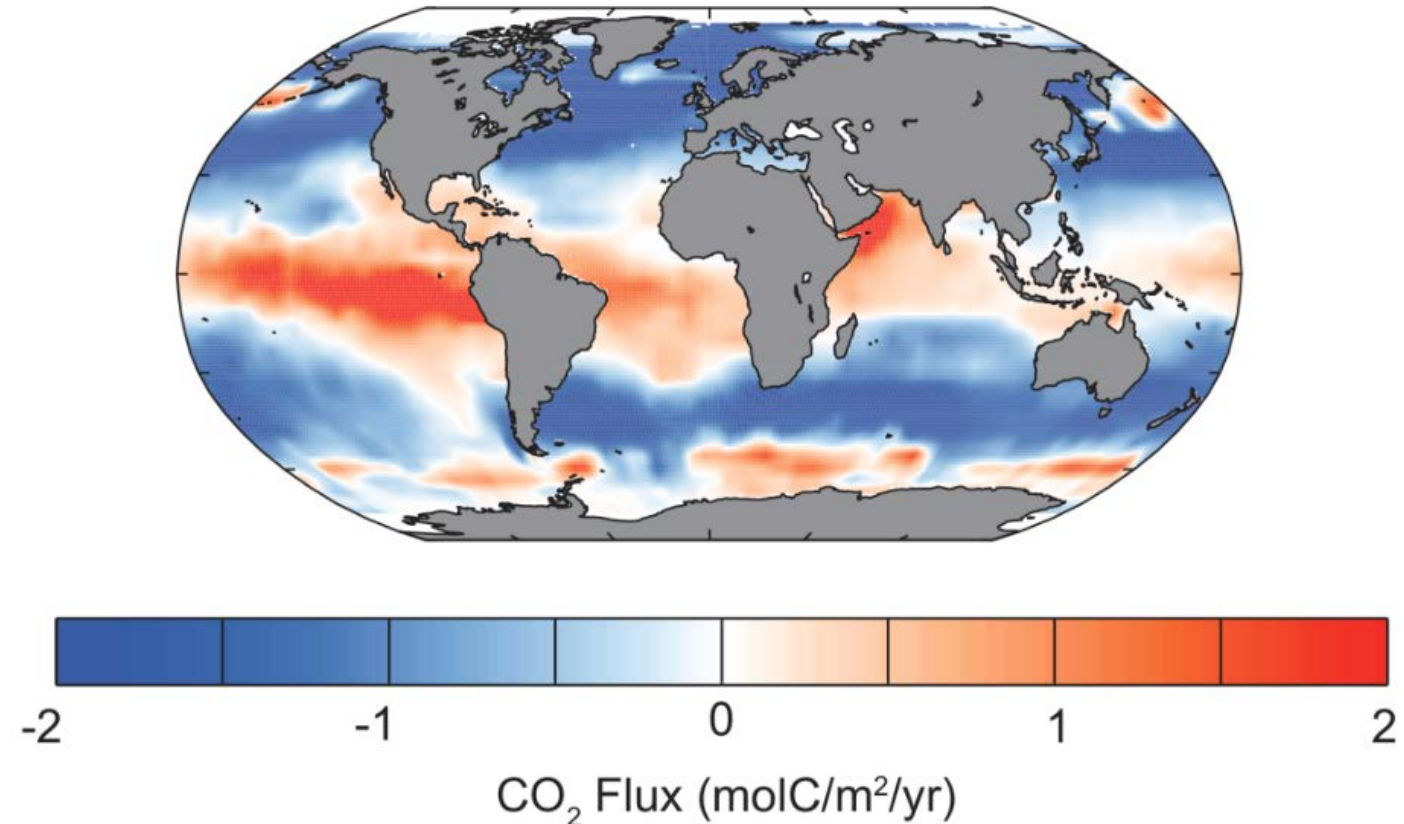
Circulación Oceánica.

La circulación termohalina oceánica conecta todos los océanos como una gran banda transportadora. Así, el patrón de circulación traslada aguas saladas y cálidas del hemisferio sur altas latitudes en el Atlántico Norte (Cerca del Polo Norte), en invierno se enfrían entre Groenlandia y Noruega y se hunden a grandes profundidades. Este proceso es conocido como formación de aguas profundas. Desde ahí comienza su recorrido hacia el sur donde se une a aguas frías profundas recién formadas en la Antártica. Entonces este flujo de agua profunda accede a los océanos Índico y Pacífico. Este movimiento transporta una cantidad tremenda de calor hacia el norte, y tiene un papel vital en mantener el clima actual.



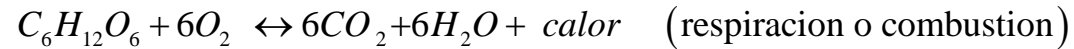
El CO_2 se disuelve en el océano y reacciona con el agua para formar iones (átomos o moléculas cargadas). La disociación permite al océano almacenar grandes cantidades de carbono (85%) del reservorio activo en la Tierra. El agua fría diluye mas CO_2 que el agua caliente. En la corriente oceánica global, al moverse la corriente hacia los polos tienden a tomar CO_2 atmosférico, mientras que las aguas al ascender a la superficie desde zonas profundas, junto con las que se calientan en zonas costeras y intertropicales, liberan CO_2 . Este es el patrón global de los flujos de CO_2 entre mar y atmósfera estimados por Takahashi et al. [2009]

Takahashi CO_2 Flux Climatology



Bomba Biológica

Las aguas oceánicas superficiales están normalmente supersaturadas respecto al oxígeno, en gran parte por la liberación de oxígeno durante la fotosíntesis.

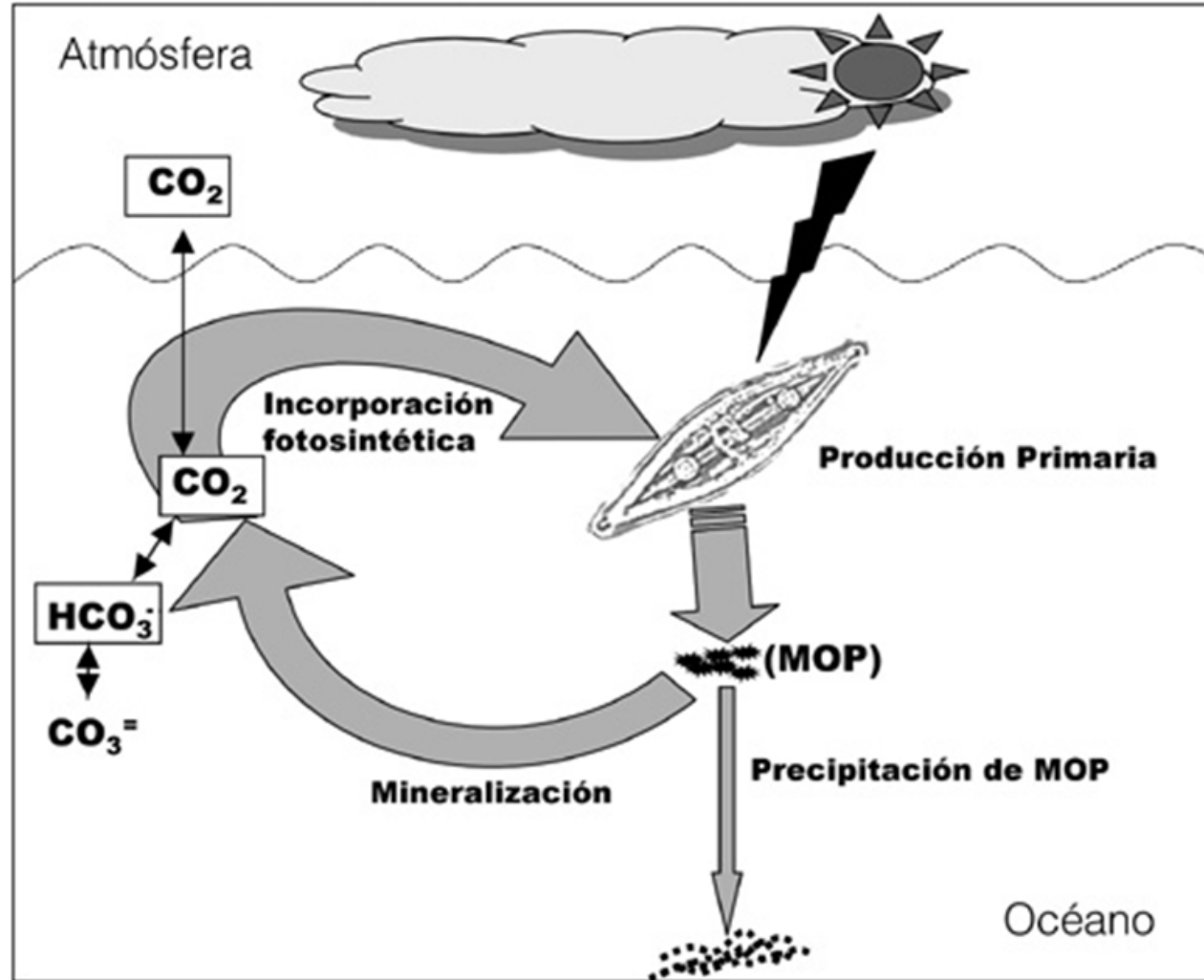


Cerca del fondo de la zona fótica hay un balance entre la cantidad de carbono que el fitoplancton fija por fotosíntesis y la cantidad disipada por respiración. Este balance ocurre en lo que se llama **profundidad de compensación**, en la que *el oxígeno producido por fotosíntesis del fitoplancton se equilibra con la consumida por respiración en un período de 24 horas*. La fotosíntesis continúa pero sin crecimiento de fitoplancton, debido a que *es mayor el oxígeno es consumido por la respiración de las plantas que el producido por fotosíntesis*. A mayor profundidad el oxígeno consumido por respiración de animales y plantas y degradación microbiana y no se reemplaza, teniendo concentraciones mínimas de O_2 y máximas de CO_2 entre 500 y 1000 de profundidad. A mayores profundidades el nivel de oxígeno aumenta, a causa de la entrada de aguas frías densas oxigenadas que se hunden en las regiones polares.

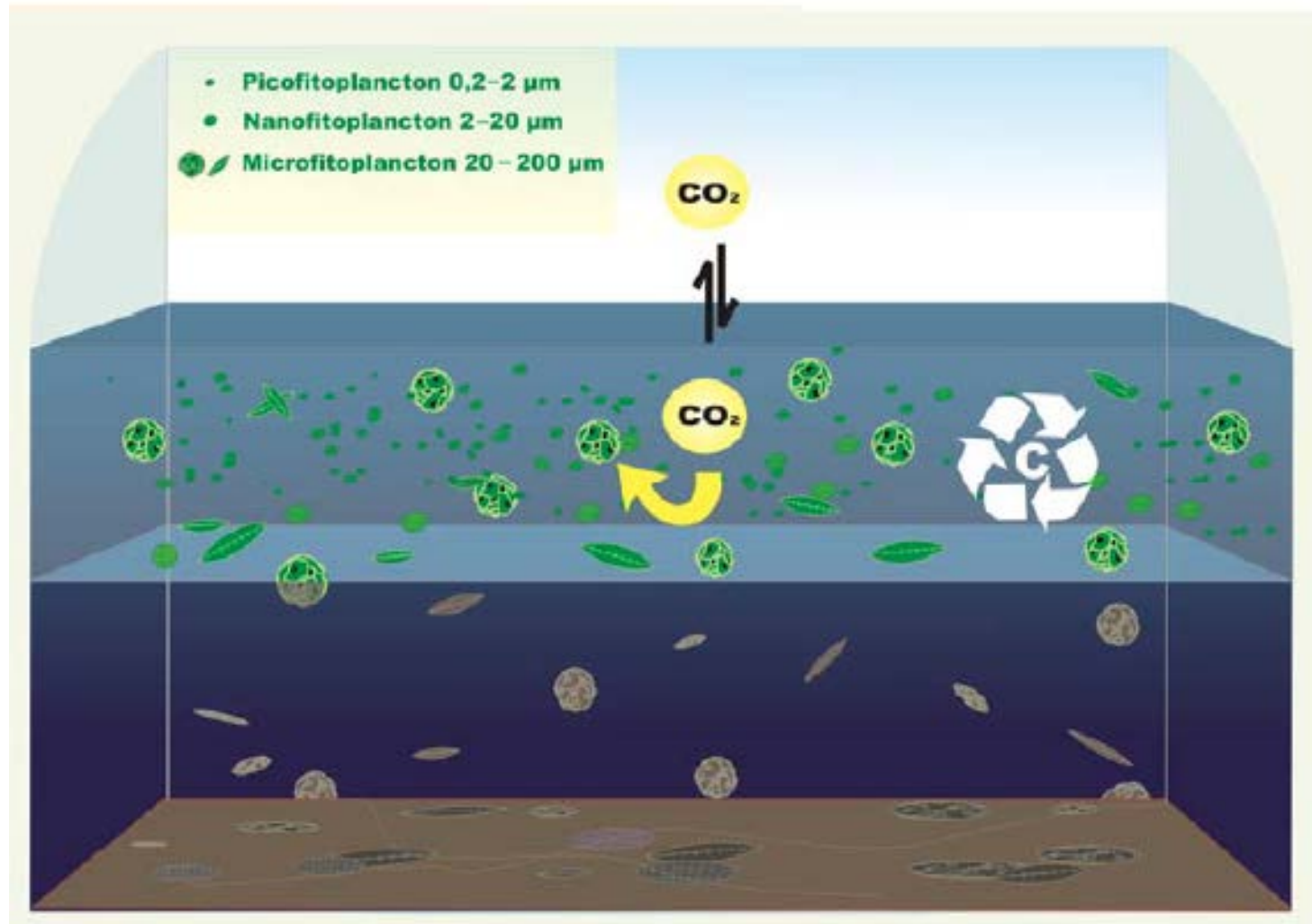
Por otra parte, el hundimiento del carbono en forma de **materia orgánica particulada (MOP)** y $CaCO_3$ de origen biogénico, conocida como la **bomba biológica**, contribuye a que se incremente la cantidad de CO_2 absorbido por los océanos. La **bomba biológica** provoca que las aguas de los fondos oceánicos estén sobresaturadas con CO_2 (cerca de un 30%). Este desequilibrio se mantiene gracias a la estratificación vertical de la densidad en la columna de agua. El CO_2 queda atrapado en las aguas oceánicas frías y profundas

“Bomba biológica de carbono”

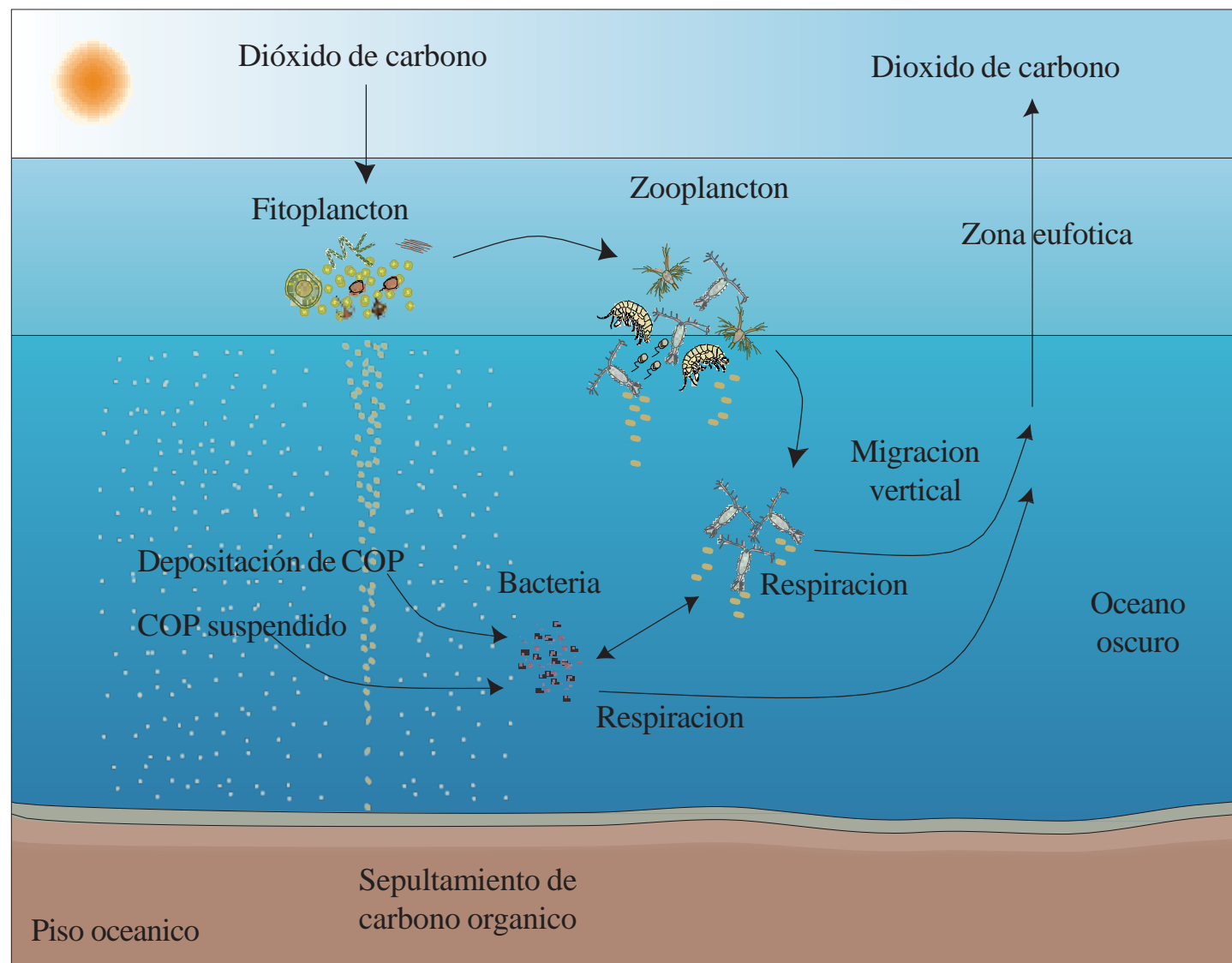
existe un transporte de carbono hacia el fondo del océano



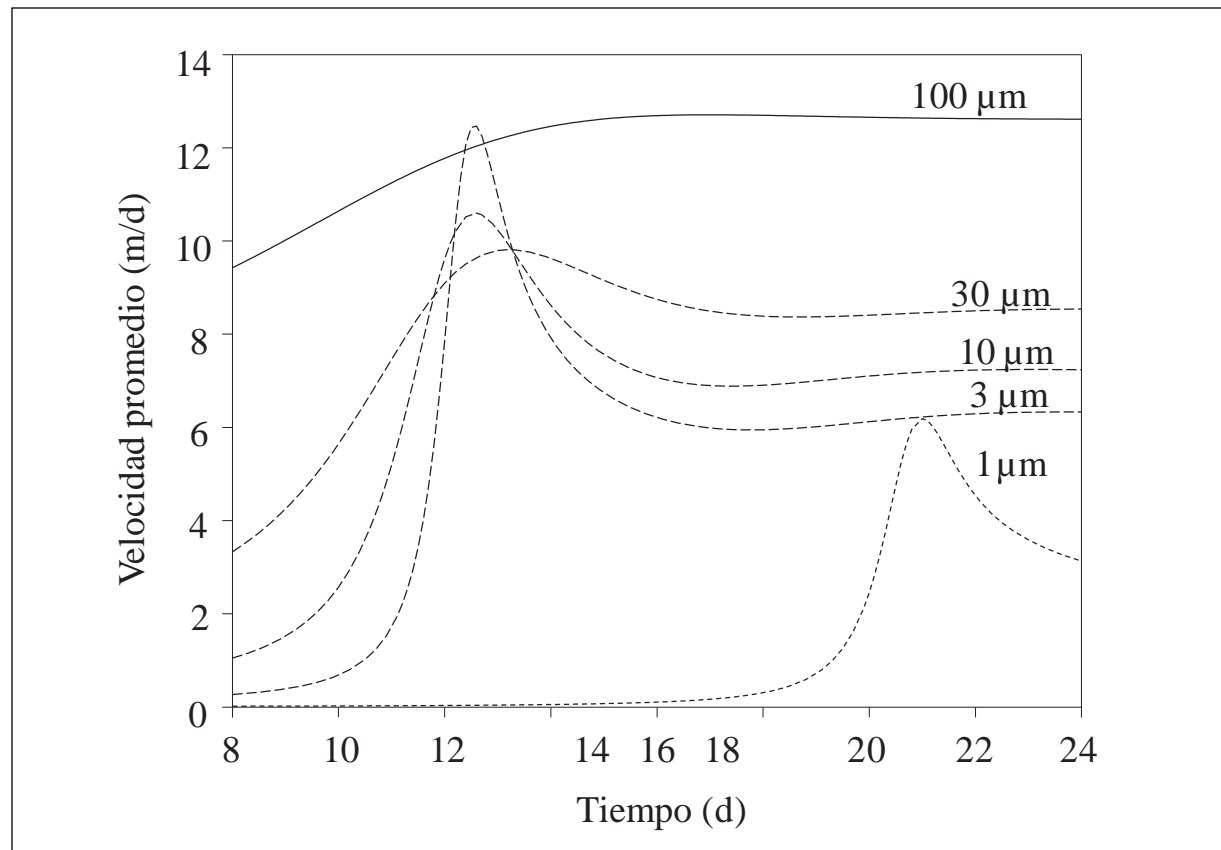
Las mayores reservas de carbono se encuentran en los océanos, al contener estos más de 60 veces el C que la atmósfera contiene.



Esquema de la Bomba Biológica Oceánica. Consiste de transporte de CO_2 desde la superficie del océano hacia el fondo mediante producción fitoplanctónica. El fitoplancton capta nutrientes y CO_2 a través e los procesos de fotosíntesis. Alguna especies de fitoplanctónicas entran en la cadena trófica y otras mueren. La materia orgánica en forma de desechos biogénicos es transportada por gravedad a las capas más profundas de los océanos. Una parte de la materia orgánica alcanza el lecho marino incorporándose a los sedimentos



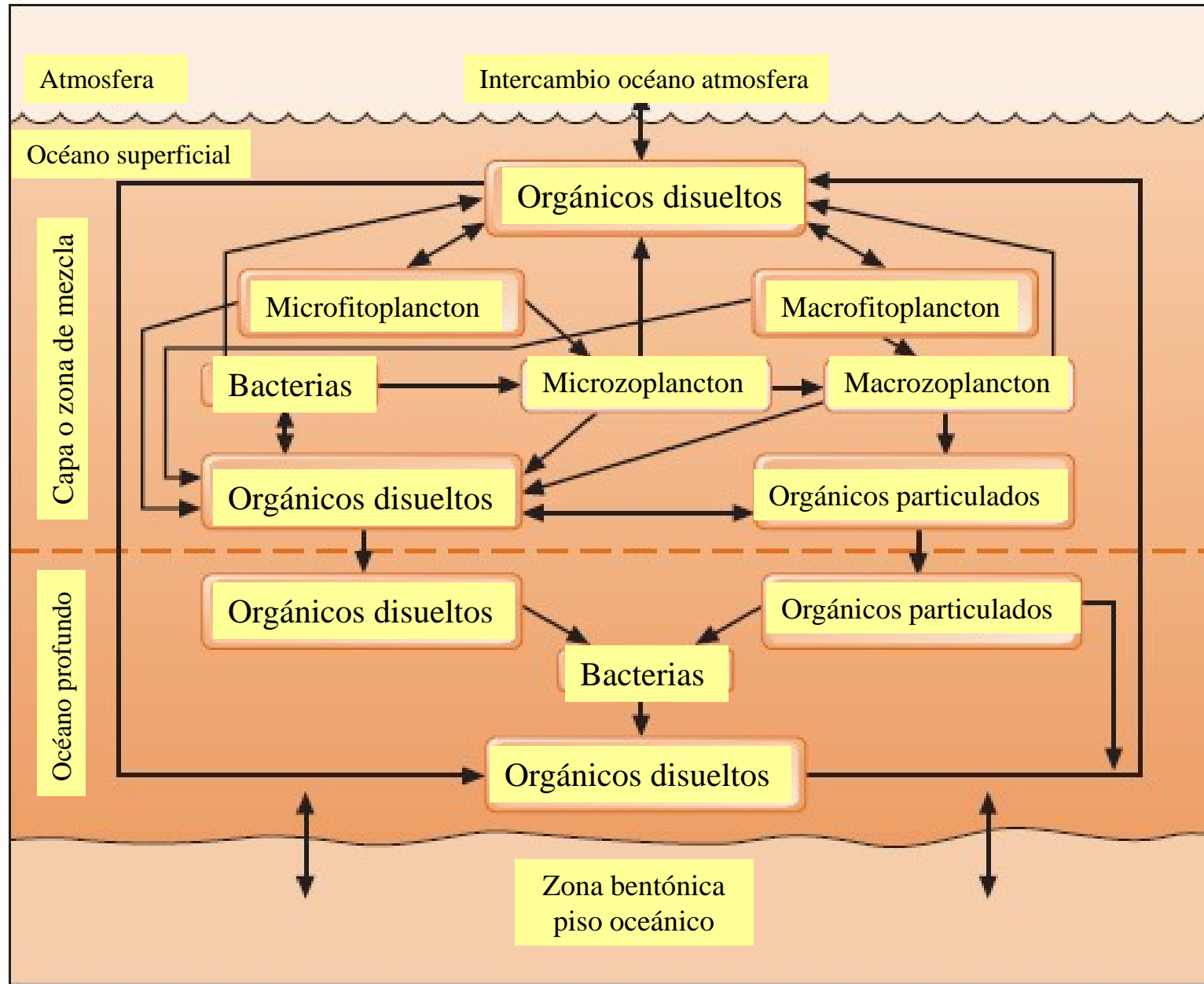
La bomba biológica. El fitoplancton en la zona eufótica fija el dióxido de carbono utilizando energía solar. El carbono orgánico particulado (COP) producido es alimento de un zooplancton herbívoro o consumido directa o indirectamente por microbios heterótrofos que se alimentan de restos solubilizados de fitoplancton. Entre el 1 y el 40% de la producción primaria se exporta fuera de la zona eufótica y disminuye exponencialmente hacia la base de la zona mesopelágica a unos 1000 m de profundidad. La re-mineralización de la materia orgánica en la columna de agua oceánica convierte el carbono orgánico de nuevo en CO_2 . Solo alrededor del 1% de la producción superficial llega al fondo del mar.

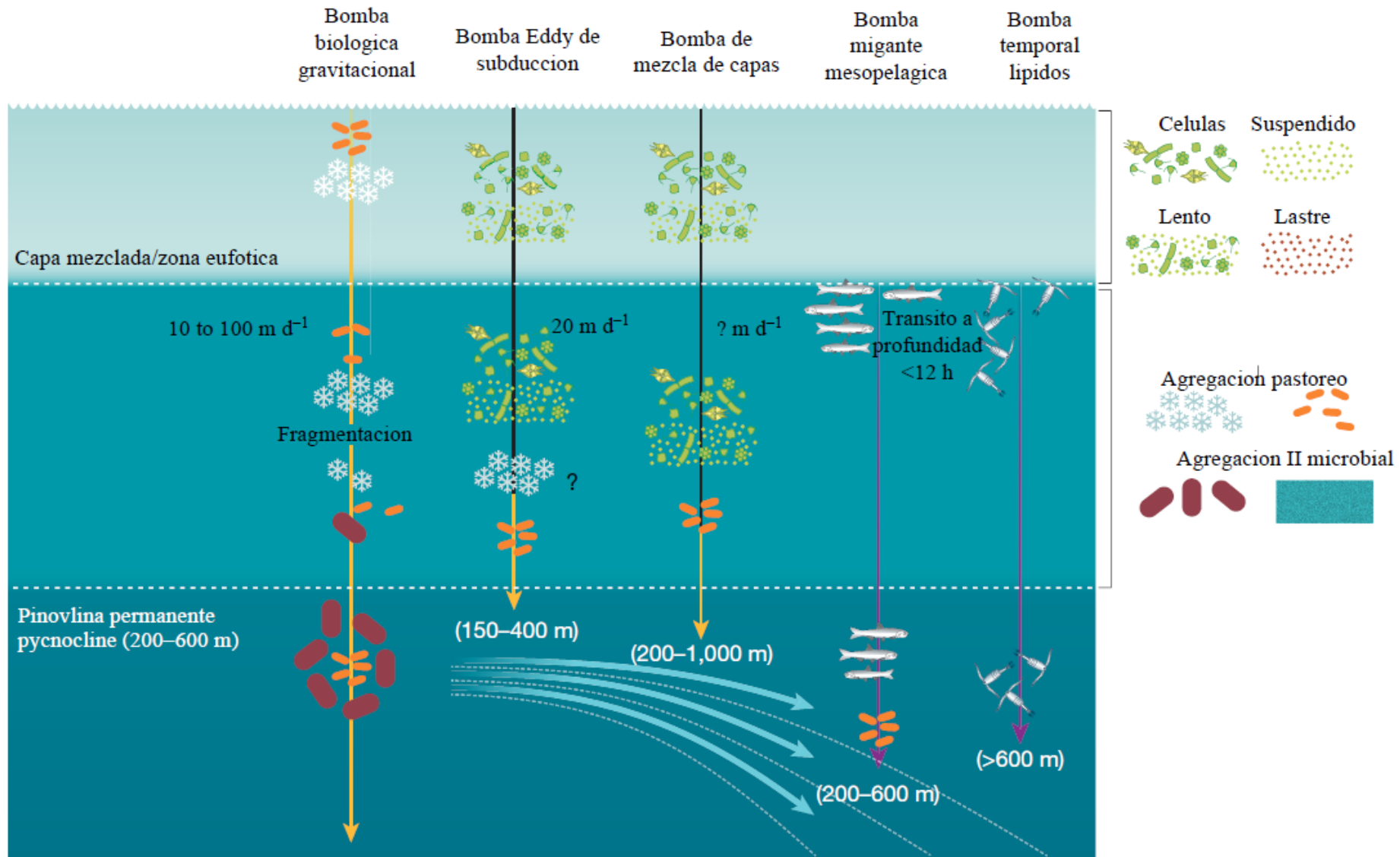


Velocidad de hundimiento de diferentes dimensiones de fitoplancton. Velocidad promedio de hundimiento versus tiempo (en días) para células de fitoplancton con diámetros iniciales de 1, 3, 10, 30 y 100 μm .

Se considera que las células de las algas chocan y forman agregados a velocidades que dependen de su abundancia y tamaño. Las células grandes se asientan más rápido que las pequeñas. Con el tiempo, las concentraciones de células aumentan, provocando un aumento en la fracción de material en los agregados. El aumento resultante en el tamaño de partícula promedio conduce a un aumento en la velocidad de sedimentación promedio con el tiempo. Los picos en la concentración celular total ocurren cuando aumentan las pérdidas debido a las ganancias de equilibrio de asentamiento debido a la división celular. La velocidad de sedimentación media máxima de las partículas formadas a partir de células de 1 μm no es sustancialmente diferente de la de las partículas formadas a partir de células de 30 μm . Reproducido con permiso de la ref. 16, © 2007 AAAS.

➤ El carbono circula desde la zona fótica hacia las profundidades





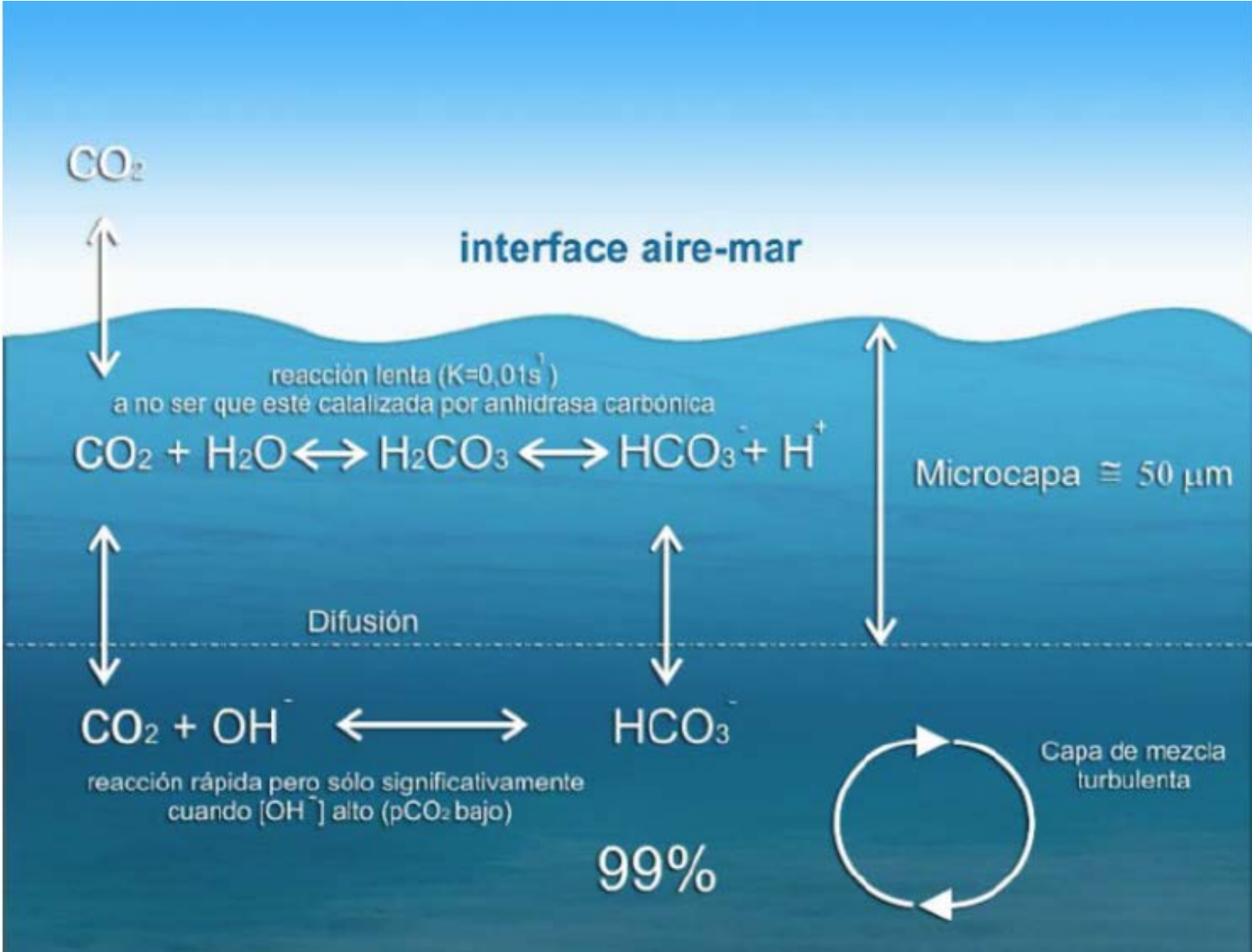
El océano tiene un gran potencial para absorber grandes cantidades de CO₂. Aproximadamente el 70% del CO₂ que permanece en la atmósfera después de su emisión (50% de las emisiones antropogénicas) ha sido absorbido por los océanos. El ciclo del carbono en los océanos en sus formas orgánicas e inorgánicas está controlado por procesos físicos y biológicos. Estos procesos son conocidos como bomba física (o de solubilidad) y bomba biológica, ambas aumentan las concentraciones de CO₂ dentro del océano.

La bomba física está conducida por el intercambio de CO₂ en la interfase atmósfera-océano y por el proceso físico que transporta CO₂ al océano profundo. El CO₂ atmosférico entra en el océano por intercambio gaseoso dependiendo de la velocidad del viento y de la diferencia de las presiones parciales entre la atmósfera y el océano.

La cantidad de CO₂ captado o secuestrado (*sumidero*) por el agua de mar esta en función de la temperatura a través del efecto de la solubilidad. La solubilidad de los gases disminuye al aumentar la temperatura y la salinidad, y aumenta al aumentar la presión. La solubilidad del CO₂ en agua de mar es varias veces mayor que la de otros gases como el N₂ y O₂. Esta diferencia es debida a la reacción con el carbonato:



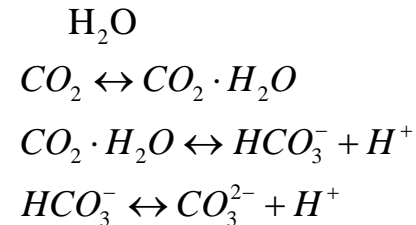
Esta reacción tiene una constante de equilibrio muy grande que hace que la mayoría de del CO₂ que entra al océano se convierta rápidamente en bicarbonato.



Acidificación del agua oceánica por el aumento en la concentración de CO₂

La captura oceánica de CO₂ antropogénico está alterando la química del agua de mar de los océanos a nivel mundial con consecuencias para el biota marino, ecosistemas, y biogeoquímica. Entender estos impactos requiere integrar distintas aproximaciones para entender las relaciones entre los componentes de los ecosistemas y su relación con el clima.

Al disolverse el CO₂ en el agua oceánica forma el débil ácido carbónico (H₂CO₃), haciendo al océano más ácido al aumentar la concentración de CO₂. El (H₂CO₃) a su vez se disocia en HCO₃⁻ (bicarbonato) y CO₃²⁻ carbonato, esto ocurre así:



Desde épocas previas a la revolución industrial hasta la actualidad, el pH oceánico ha disminuido en 0.1 de pH, de 8.21 a 8.10. Con pronósticos que disminuirá de 0.3 a 0.4 unidades de pH para el año 2100, asumiendo que la pCO₂ se aproxime a 800 ppmv. La acidificación atacará los arrecifes, y perjudicará a especies en la cadena trófica oceánica, específicamente en los mares del sur.

Descomposición

Tras la muerte de los organismos, los descomponedores descomponen la materia orgánica muerta restante y liberan el carbono sobrante a la atmósfera.

Combustión (quema)

Los combustibles fósiles, como el petróleo crudo, el carbón, el gas natural o los aceites pesados, al quemarse liberan dióxido de carbono y monóxido de carbono a la atmósfera.

La humanidad agrega CO₂ a la atmósfera, la naturaleza elimina cerca de la mitad (45%)

De 2007 a 2016, la humanidad agregó a la atmósfera en promedio 9.4×10^{15} gramos de carbono (**10¹⁵ gramos de carbono = 1 PgC**) cada año, principalmente por consumo de combustibles fósiles (9.4 PgC/año) y al cambio en el uso del suelo (1.3 PgC/año).

Los bosques producen una gran cantidad de combustible fósil. El combustible fósil es producto de la descomposición total o parcial de plantas y animales como resultado de la exposición al calor y la presión en la corteza terrestre durante millones de años.

Los bosques también actúan como depósitos de carbono, ya que el carbono fijado por ellos se cicla muy lentamente debido a su larga vida. Los bosques liberan CO₂ por los incendios forestales

Unidades de carbono en Petagramos: 10^{15} gramos de carbono = 1 PgC

Carbono orgánico

Plantas: ~600

Suelos: ~2000-3000

Atmosfera $\approx 800 \text{ CO}_2$

Carbono disuelto en océanos
35,000



Las tierras nuevas de cultivo se crean talando bosques, la posterior combustión de los árboles talados o abandonados a la descomposición liberan CO₂ a la atmósfera. La deforestación no controlada y liberación de CO₂ a la atmósfera actualmente ocurre en zonas tropicales. Aunque, en los últimos 200 años, la creación de zonas agrícolas por tala de bosques que ocurrió en el Hemisferio Norte liberó grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera. Desde mediados de los noventa, gran parte de las tierras inproductivas de Estados Unidos y Europa se han reconvertido en bosques, compensando en parte las emisiones al tomar el carbono de la atmósfera y acumularlo en la madera y el suelo, pero el daño ya está hecho.

El futuro del Uso de la Tierra

Los modelos de los reportes ([Reporte Especial de los Escenarios de Emisiones del IPCC, Chapter 6, Figure 6-6b](#)) indican que la deforestación llegará a su máximo en 2025 y declinará gradualmente. Esta tendencia será determinada por las tasas de crecimiento poblacional y las mejoras en la productividad agrícola. Diferentes escenarios muestran que, eventualmente, el uso de la Tierra, que actualmente es una fuente importante de CO₂ de la atmósfera, se transformará en un sumidero o precipitador debido al crecimiento de los bosques.

El futuro de la Absorción Terrestre del Carbono

En los modelos del IPCC la Absorción Terrestre del Carbono es muy grande. Esto se debe a que hasta ahora no se entienden bien los procesos de Absorción Terrestre del Carbono, por lo que las predicciones no son del todo precisas.

Tal parece que el “*efecto de fertilización con CO₂*”, en el que el aumento en la concentración de CO₂ produce aumento o incremento en crecimiento de plantas, efecto temporal que se satura después de unos años. Estos resultados se deben a ciertas suposiciones sobre este proceso. Se cuenta con menos información sobre la fertilización con nitrógeno y su posible rol en el futuro, y menos aún sobre las posibles sinergias entre los mecanismos.

Además, la superficie de los continentes puede convertirse en una fuente natural de carbono. Las persistentes sequías pueden ocasionar incendios forestales dramáticos y grandes pérdidas “naturales” de bosques tropicales. También hay gran cantidad de carbono orgánico almacenado en los suelos y permafrost (Capa del suelo que permanece bajo 0 °C todo el año) en las zonas de tundra. El calentamiento global puede acelerar la actividad microbiótica en el suelo, así como derretir el permafrost, generando la liberación de grandes volúmenes de CO₂ al descomponerse la materia orgánica.

