



La agricultura, la minería o el desarrollo de sistemas de transporte dependientes de combustibles fósiles han alterado de manera global los ciclos biogeoquímicos del planeta como el ciclo del carbono, el del nitrógeno o el ciclo del fósforo. Los efectos de estas alteraciones se traducen en cambios en las propiedades físico-químicas y biológicas de los ecosistemas

Ciclos biogeoquímicos y cambios globales

Alex Enrich-Prast, Aurora Gaxiola, Ana Lúcia, Jorge Durán, Alexandra Rodríguez & Humberto Marotta

RESUMEN

Los ciclos biogeoquímicos están estrechamente relacionados con los procesos geológicos, hidrológicos y biológicos que ocurren en los diferentes compartimentos de la corteza terrestre (atmósfera, litosfera y la biosfera). Estos ciclos están mediados por organismos vivos los que contienen importantes cantidades de carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), sin los cuales no podrían vivir. El C, el N y el P están acoplados biológicamente a través de las reacciones bioquímicas que controlan la **producción primaria** y la **descomposición** de la materia orgánica. Desde la revolución industrial y debido al crecimiento exponencial del uso de los combustibles fósiles y fertilizantes asociados a la agricultura intensiva, se ha producido un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos de casi todos los elementos y en especial en el aumento en la concentración atmosférica de CO₂ (desde 285 ppm en 1850 a 400 ppm en 2017), con importantes consecuencias sobre el funcionamiento de los ecosistemas. En este capítulo resumimos el efecto de las actividades humanas en el balance general de los ciclos del C, N y P, y discutimos posibles alternativas para mitigar estas alteraciones desde una perspectiva global.

Existen alrededor de 40 elementos químicos esenciales para la vida en la Tierra. Las reacciones mediadas por seres vivos convierten estos elementos químicos en compuestos orgánicos (biomasa), los cuales participan en una serie de reacciones fundamentales para las actividades de los seres vivos (metabolismo). El conjunto de procesos de transformación de los elementos químicos, así como su transferencia entre los distintos compartimentos bióticos y abióticos del planeta es lo que se denomina “ciclos biogeoquímicos”. El término “ciclo” indica que estas transformaciones de elementos químicos inorgánicos procedentes de minerales de rocas, agua o gases en compuestos orgánicos como proteínas, grasas o azúcares primariamente producidos por seres vivos pueden transformarse, a su vez, en componentes inorgánicos susceptibles de ser incorporados nuevamente por la **biota**. Así, procesos cíclicos basados en la transformación de elementos inorgánicos a orgánicos, y viceversa, mediados por la actividad biológica de síntesis y degradación de materia orgánica, son la base de los procesos biogeoquímicos y de la vida en el planeta.

Los ciclos biogeoquímicos están estrechamente relacionados con los procesos geológicos, hidrológicos y biológicos que ocurren en los diferentes compartimentos de la corteza terrestre. Dichos compartimentos son la atmósfera (compartimento gaseoso por encima de los suelos), la hidrosfera (aguas continentales y marinas), la litosfera (rocas y suelos) y la biosfera (seres vivos y sus relaciones). Excluyendo eventos azarosos como la caída de meteoritos, que puedan incorporar nuevos elementos, nuestro planeta



Los ciclos biogeoquímicos se desarrollan de distinta manera en función de las condiciones climáticas en los distintos tipos de ecosistemas. Por ejemplo, las temperaturas cálidas favorecen la actividad de las comunidades bacterianas y por tanto los procesos de respiración (emisión de CO₂ a la atmósfera). Este hecho tiene efectos en la dinámica del ciclo de carbono. (Izquierda- Lago Antártica (Foto H. Marotta). Derecha- Lago Cabíunas, Brasil. (Foto L. Pinho)



es un sistema químico prácticamente cerrado, en el que las reacciones que sustentan la biosfera son alimentadas por la energía solar y, en menor parte, por la energía de los procesos geológicos internos (vulcanismo, tectónica superficial y profunda, convección del manto, etc). Nuestro planeta posee una amplia variedad de ecosistemas terrestres y acuáticos (continentales y marinos) desde las bajas latitudes cálidas hasta las altas latitudes frías, donde los procesos biogeoquímicos son muy diversos por las características geológicas y biogeográficas.

De entre todos los elementos químicos, los más abundantes en los seres vivos son el carbono (C), el nitrógeno (N) y el fósforo (P). El C es un elemento integral de todos los componentes orgánicos, lo que hace que sea fundamental para todas las formas de vida conocidas. El N es componente clave de compuestos orgánicos estructurales, como las proteínas que componen la biomasa, o de moléculas que contienen la información genética (ácidos nucleicos). Por su parte, el P es indispensable para la actividad metabólica, como parte de las moléculas involucradas en el almacenamiento y transporte de energía en los organismos o de compuestos que posibilitan las reacciones. Así, tanto el N como el P son considerados

nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y los microorganismos, y su disponibilidad es uno de los principales reguladores del funcionamiento de los ecosistemas y del mantenimiento de la biodiversidad.

El C, el N y el P están acoplados biológicamente a través de las reacciones bioquímicas que controlan la **producción primaria** y la **descomposición** de la materia orgánica. Todos los organismos necesitan que estos elementos estén presentes en ciertas proporciones específicas para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, desequilibrios en los ciclos del C, del N y del P provocados por eventos naturales catastróficos (impactos meteoríticos, vulcanismo) o por las actividades humanas podrían tener importantes consecuencias en las dinámicas y en el funcionamiento de los ecosistemas.

De hecho, desde la revolución industrial y debido al crecimiento exponencial del uso de los combustibles fósiles y la agricultura intensiva, se ha producido un desequilibrio en los ciclos biogeoquímicos de casi todos los elementos. El resultado de este desequilibrio se manifiesta a través de fenómenos como el aumento en la concentración atmosférica de CO₂ (desde 285 ppm en 1850 a 400 ppm en 2017), el principal responsable del efecto invernadero



Amanecer en el Lago Jurubatiba. Foto H. Marotta

y del calentamiento global) o como los incrementos en la **deposición de N** y en los aportes de P en varios ecosistemas del mundo que han afectado su productividad y biodiversidad. Por ello, los estudios sobre los efectos de cambio global en la biogeoquímica del planeta se han convertido en cruciales para cualquier planeamiento de uso de los recursos de los ecosistemas.

En este capítulo resumimos el efecto de las actividades humanas en el balance general de los ciclos del C, N y P, y discutimos posibles alternativas para mitigarlos desde una perspectiva global.

1. Ciclo del carbono (C)

En la biosfera, el C se puede encontrar formando parte de la materia inorgánica (en forma de carbonatos o bicarbonatos) o como componente de compuestos producidos por el metabolismo de los organismos (materia orgánica). De hecho, el C es el constituyente esencial de la biomasa de todos los organismos vivos conocidos, ya sea en forma de compuestos estructurales o como sustratos de almacenamiento de energía, ya que los organismos

obtienen su energía vital rompiendo los enlaces químicos de los compuestos orgánicos. La circulación de estas diferentes formas de C entre los distintos compartimentos de la Tierra es lo que se conoce como Ciclo del Carbono.

Desde un punto de vista metabólico, hay dos tipos de organismos: los que producen su propia biomasa para formar su estructura corpórea y fabricar reservas energéticas (productores primarios o seres autotróficos) y los que obtienen biomasa a partir de otros organismos (seres heterotróficos).

Las vías metabólicas más importantes del planeta son la producción y **descomposición** de materia orgánica por la fotosíntesis y la respiración respectivamente. La fotosíntesis es la vía que captura dióxido de carbono (CO₂) y libera oxígeno libre (O₂), produciendo la biomasa de los organismos verdes (los que presentan clorofila, como algas, musgos y plantas) a partir del consumo de energía solar. La respiración es, a su vez, la vía de degradación de la biomasa, y produce CO₂ a partir del consumo de O₂

Además de la fotosíntesis, sostenida gracias a la energía solar, existen otras vías de **producción primaria** más

comunes en zonas sin luz (como el fondo de los océanos), denominadas vías de quimiosíntesis, realizadas por organismos que producen biomasa a partir de la energía proveniente de reacciones químicas y no de la radiación solar¹. Así mismo, también existen vías metabólicas de degradación orgánica que no necesitan de O₂ (anaeróbicas) y que pueden producir no solamente CO₂ sino también metano (CH₄). Estas vías adquieren gran relevancia en zonas sin O₂ como en los fondos de los ecosistemas acuáticos (océano y lagos)². En cualquier caso, la producción de CO₂ por la degradación orgánica puede ocurrir tanto por vías aeróbicas (más eficientes), en presencia de O₂ (respiración), como por vías anaeróbicas, que no necesitan de O₂, mientras que la producción de CH₄ es estrictamente anaeróbica.

La materia orgánica se acumula no sólo en los organismos vivos, sino también en los ecosistemas, formando grandes reservas de C, por ejemplo en los suelos y en los sedimentos en cuencas lacustres y oceánicas. Otra importante reserva de C de la biosfera no se encuentra en biomasa, sino en compuestos carbonatados en las aguas alcalinas de los mares y océanos³. El CO₂ es una molécula altamente reactiva que tiende a reaccionar con el agua y producir ácido carbónico (H₂CO₃), que a su vez puede ser convertido físico-químicamente (sin mediación biológica) en bicarbonato (HCO₃⁻) y carbonato (CO₃⁻²), formas que no volatilizan directamente en la interface aire-agua (más detalles en Capítulo 7). Estos compuestos de C inorgánico disueltos en las aguas pueden formar minerales carbonatados sin la mediación de la actividad biológica (e.g. precipitación de calcita y acumulación en el fondo marino o de los lagos), pero también formar grandes estructuras calcáreas como los arrecifes coralinos formados por la actividad de diferentes macro y microorganismos. Cuanto más alcalina sea el agua, más reservas de C inorgánico en bases carbonatadas habrá en los océanos. El aporte de ácidos orgánicos terrestres transportados por las aguas continentales (ej. capa freática o ríos) y el aumento en la atmósfera del CO₂, procedente de la actividad metabólica y volcanes, y que se puede convertirse en ácido al reaccionar con el agua de la lluvia o del mar, contribuyen al proceso natural de acidificación de los océanos. Este proceso disminuye el pH e incrementa las

concentraciones de H₂CO₃ (la forma ácida de C inorgánico) en el agua, que puede convertirse en CO₂ en la interface agua-aire y alcanzar la atmósfera. Este proceso no ocurre con las reservas de C inorgánico en forma de bases disueltas en el medio acuático (HCO₃⁻ y CO₃⁻²). Así, el CO₂ es la principal moneda de cambio de la biogeoquímica global del C, moviéndose entre su forma libre y aquellas que forman las reservas de C orgánico e inorgánico.

Debido a su capacidad de absorber calor algunos gases de C presentes en la atmósfera, especialmente CO₂ y CH₄, producidos en los ecosistemas terrestres y acuáticos a partir de diferentes vías metabólicas, contribuyen al efecto invernadero que es un proceso fundamental para mantener las temperaturas apropiadas para el desarrollo de la vida del planeta.

El C es un elemento químico clave para los organismos, no sólo por formar su estructura orgánica y sustentarlos energéticamente, sino también por regular condiciones climáticas esenciales para la vida

1.1 La antropización del ciclo del C: amplificación del cambio global

El desarrollo de la agricultura y la ganadería desde el Neolítico contribuyó al aumento de las emisiones de CO₂ y CH₄ a la atmósfera, pero desde la revolución industrial este flujo ha sido peligrosamente intensificado llegando a ser un factor determinante del cambio climático¹⁰. El uso de las reservas orgánicas de C por la combustión de C fósil (principalmente petróleo y sus derivados, carbón y gas natural) para la generación de energía es el factor de cambio global de mayor relevancia en el ciclo del C. Este tipo de combustión emite a la atmósfera enormes cantidades de C en forma de CO₂, que puede ser posteriormente fijado en biomasa por la **producción primaria** de los ecosistemas. Además, la deforestación antrópica (por tala o quema) afecta directamente a las reservas globales de C y contribuye al cambio climático no solo a través de la liberación de gases de efecto

invernadero y de aerosoles a la atmósfera, sino también a través de la disminución de la disponibilidad de agua (humedad), lo que disminuye la productividad y, por tanto, la capacidad de los ecosistemas de fijar carbono ⁴. La deforestación también reduce la protección de los suelos frente a la erosión, intensificando la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada, alcanzando ríos y océanos. Por ejemplo, el aporte de C a las aguas continentales ha aumentado aproximadamente 1 pico gramo al año desde la era preindustrial debido al incremento de la erosión del suelo⁵.

Otro proceso antropogénico de gran relevancia es la adición de nutrientes a los ecosistemas (**eutrofización**) debida a la intensificación de los efluentes procedentes de la agricultura (fertilizantes orgánicos o desechos agrícolas) o de los residuos urbanos (aguas residuales domésticas o industriales sin tratamiento), y que constituye un importante motor de cambio con una gran capacidad de influencia en el equilibrio del ciclo del carbono. A baja intensidad, la **eutrofización** de los ecosistemas acuáticos puede incluso aumentar la incorporación neta de C allí donde hay suficiente radiación solar para los productores primarios. Sin embargo, a altos niveles de **eutrofización** o en zonas más profundas y oscuras (ej. fondos de lagos y océanos), lo más frecuente es la estimulación de la **descomposición** neta, lo que disminuye no sólo la cantidad de biomasa acumulada sino también la biodiversidad ⁶. De forma similar, en los ecosistemas terrestres, un enriquecimiento de nutrientes también puede estimular la **producción primaria** neta (PPN), pero a altos niveles conlleva una disminución de las reservas de materia orgánica viva (en la vegetación) y muerta (en los suelos ⁷).

Por otro lado, diversos factores de cambio global también pueden disminuir las reservas de C inorgánico a través de la estimulación de pérdidas en forma de CO₂. Por ejemplo, el propio CO₂ de origen antropogénico reacciona con el agua marina, causando su acidificación debido a la subsecuente formación del H₂CO₃, un ácido que puede convertirse en CO₂ en la interface agua-aire. Estudios recientes apuntan claramente a que la pérdida de reservas de C en forma de carbonatos debida a la acidificación está directamente relacionada con la reducción de la

biodiversidad, al perjudicar a ciertos organismos, como los corales, que son responsables de la formación de estructuras de carbonato que sirven de recurso o refugio a otras especies marinas ⁸.

Las actividades humanas están aumentando las emisiones de gases de C a la atmósfera al consumir reservas fósiles y reducir las reservas orgánicas e inorgánicas de los ecosistemas

Por último, la aceleración de los efectos del cambio global en el ciclo del C no solo se debe a la intensa conexión entre los diferentes compartimentos de la corteza terrestre (biosfera, litosfera, hidrosfera y atmósfera), que ayuda a propagar sus consecuencias, sino también a la amplificación de sus efectos en sí mismos. Es decir, al hecho de que un determinado factor de cambio global maximice su propio efecto, fenómeno denominado retroalimentación positiva. Un ejemplo de retroalimentación positiva es el anteriormente explicado de la deforestación por quema, que causa una disminución de la humedad, lo que a su vez reduce la cobertura vegetal por el aumento de la sequía ⁴. La acidificación de los océanos por las emisiones antropogénicas de gases de C es otro ejemplo de retroalimentación positiva, ya que la liberación de CO₂ desde las aguas oceánicas, debida al aumento de la formación de compuestos ácidos (H₂CO₃), es acentuada todavía más por la propia bajada de pH ⁸. Asimismo, cuando la presencia de varios factores juntos provoca mayores efectos que la simple suma del efecto de cada factor aislado estamos hablando de efectos sinérgicos. Un caso paradigmático de sinergismo por cambio global es el que se produce entre el enriquecimiento de nutrientes en los mares costeros y el de CO₂ en la atmósfera, ya que evidencias experimentales indican que estos dos factores juntos pueden presentar mayores efectos sobre la productividad de algas que la simple suma de sus efectos aislados. Reacciones fisiológicas suelen estar detrás de estos efectos sinérgicos, como en el caso del efecto de la bajada de O₂ (hipoxia) y del calentamiento global sobre la mortandad de organismos marinos, consecuencia de la



Los incendios son una fuente de emisiones de carbono y nitrógeno en forma de gases a la atmósfera a consecuencia de la quema de la biomasa forestal. Foto de H. Marotta

intensificación de la actividad metabólica que incrementa la demanda de O_2 y, por tanto, su escasez, más de lo que se esperaría por el aumento aislado de la temperatura. En el Capítulo 8 se detallan más estudios de casos de retroalimentación positiva y sinergismo en los procesos biogeoquímicos.

1.2 ¿Qué hacer?

Las evidencias científicas indican que para reducir significativamente las emisiones de C a la atmósfera es imprescindible sustituir el uso de combustibles fósiles por fuentes de energía alternativas (e. g. solar, eólica, biogás o hidrógeno). La pérdida de cobertura vegetal, incluso si está motivada por la generación de energía hidroeléctrica o por la creación de plantaciones para biocombustibles, debe ser analizada con mucha atención debido a las consecuencias potencialmente negativas de los procesos de deforestación. Además de todos los valores materiales e inmateriales de la biodiversidad, las tasas de **producción primaria** de la vegetación son fundamentales para regular el ciclo del C y el clima de nuestro planeta. Por tanto, la regulación climática mediada por el ciclo del C está directamente conectada con el mantenimiento de la biodiversidad, un tema que debe

estar presente en cualquier planeamiento sobre el uso de los recursos naturales a medio y largo plazo.

2. Ciclo del nitrógeno (N)

El N es un elemento imprescindible para la vida en nuestro planeta, ya que forma parte de las moléculas que constituyen las proteínas (los aminoácidos) y el código genético (los ácidos nucleicos), y es un componente esencial de las enzimas, proteínas que posibilitan la mayoría de las reacciones metabólicas de síntesis y degradación de la materia orgánica. La forma molecular del N (N_2) constituye el 78.1% de la atmósfera terrestre y es la forma de N más abundante de la Tierra. Sin embargo, se trata de una molécula prácticamente inerte y no disponible para la mayoría de los organismos vivos. Estas características hacen que el N sea uno de los nutrientes más limitantes para la PPN en los ecosistemas terrestres. Tal es así que su disponibilidad probablemente haya controlado el tamaño y la actividad de la biosfera desde la aparición de los primeros organismos en el planeta⁷.

Debido a que el N está ausente en la mayoría de los sustratos primarios (rocas de la corteza terrestre), inicialmente todo el

N disponible para la **biota** deriva del proceso conocido como **fijación del N**, que básicamente es la transformación de N_2 atmosférico en **N reactivo (Nr)**, que es el utilizable por los seres vivos. Este proceso es llevado a cabo de forma natural principalmente por unas pocas especies de microorganismos, tanto de vida libre (en lagos, suelos y sedimentos) como asociadas simbióticamente a las raíces de las plantas, y en menor medida por relámpagos. De acabar aquí las rutas biogeoquímicas del N, el N_2 de la atmósfera se iría agotando paulatinamente, pero algunos microorganismos son capaces de realizar el proceso denominado desnitrificación. En este proceso se utilizan formas reactivas de N en rutas metabólicas que, en última instancia, producen como subproducto N_2 que vuelve a la atmósfera cerrando así el ciclo biogeoquímico global del nitrógeno. Además, los incendios forestales también pueden producir una importante salida de N a la atmósfera, ya que alrededor del 30% del todo el N contenido en la biomasa afectada se volatiliza en forma de N_2 a través de un proceso denominado piro desnitrificación. En cualquier caso, la **fijación natural del N_2 atmosférico** sólo pone a disposición de los organismos una pequeña cantidad de todo el N involucrado en la PPN del planeta, por lo que satisfacer los requerimientos de N de todos los productores primarios precisa de un eficiente reciclado interno a través de procesos como la **descomposición** de la materia orgánica y la **mineralización del nitrógeno**⁷.

2.1 La antropización del ciclo del N: superando los límites planetarios

Los seres humanos han aumentado radicalmente la tasa natural de **fijación del N_2** y las entradas de **Nr** a los ecosistemas debido al cultivo extensivo de plantas fijadoras de N (e. g. soja, garbanzo, maní) y a la producción industrial de fertilizantes nitrogenados (proceso de Haber-Bosch). Más de cien mil toneladas de N son añadidas al suelo anualmente en forma de fertilizantes para mejorar la producción agrícola⁹, pero tan solo un 20 o 30% del N total contenido en estos fertilizantes es finalmente consumido por los humanos en forma de alimento. Del resto del N contenido en los fertilizantes, una parte se pierde por **escorrentía** y/o **lixiviación**, causando muchas veces la **eutrofización** de acuíferos y ecosistemas acuáticos. El

exceso de Nr en acuíferos supone una pérdida de calidad del agua y un problema de salud pública, mientras que en los ecosistemas acuáticos (ríos, lagos, océanos) puede conllevar pérdidas de biodiversidad por acidificación y/o **eutrofización** (ver apartado sobre el ciclo del fósforo para más información). Otra parte del N contenido en los fertilizantes es devuelta a la atmósfera en forma de amoniaco (NH_3) o de alguno de los productos de la desnitrificación, como el óxido nitroso (N_2O) o el N_2 . La quema de combustibles fósiles ha aumentado también la emisión de grandes cantidades de **Nr** a la atmósfera, principalmente en forma de óxidos de N (NO_x , principales causantes de la lluvia ácida) y de NH_3 . La mayor parte de todo este **Nr** emitido a la atmósfera acaba depositándose en la tierra por precipitación, donde entra de nuevo en el ciclo biogeoquímico global del nitrógeno.

De las más de cien mil toneladas de N añadidas al suelo anualmente en forma de fertilizantes, tan solo el 20-30% son finalmente consumidas por los humanos en forma de alimentos

Por otro lado, el aumento de la disponibilidad de N en los ecosistemas terrestres debido a todas estas actividades antropogénicas aumenta las tasas de **nitrificación** y desnitrificación, lo que a su vez provoca un aumento de las emisiones de óxido nitroso (N_2O) a la atmósfera. El N_2O tiene un potencial de efecto invernadero unas 300 veces mayor que el del CO_2 y hoy en día es ya uno de los principales causantes del calentamiento global¹⁰. Además, las emisiones de este gas son la mayor amenaza para la capa de **ozono** del siglo XXI, pese a lo cual todavía no existe una regulación internacional para reducir el efecto nocivo del N_2O en la capa de **ozono**¹¹.

Es cierto que el desequilibrio del ciclo del N por efecto de las actividades humanas ha permitido la obtención de alimento para una creciente población y ha estimulado el secuestro global de CO_2 atmosférico tanto en ecosistemas marinos como terrestres. Sin embargo, este hecho se ha alcanzado a costa de cambios en el ciclo

del N que han superado en mucho un límite planetario aceptable, empujando el sistema de la Tierra fuera del estado medioambiental del Holoceno, con consecuencias perjudiciales o incluso catastróficas para numerosas zonas del planeta¹². Los impactos ambientales de este desequilibrio no tienen sólo consecuencias ecológicas negativas, como las descritas en los párrafos anteriores (e. g. **eutrofización**, aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, etc), sino también económicas. En este sentido, estudios recientes han cuantificado los efectos negativos de la **fijación antropogénica de N** para Europa en 70–320 mil millones anuales, y es probable que los costes globales sean de un orden de magnitud mayor¹³.

La alteración del ciclo del N en este siglo va a depender fundamentalmente de las demandas de alimento y de la actividad y técnicas industriales de una población humana en aumento y cada vez más consumista, pero también de los cambios esperados en el clima del planeta. Un estudio publicado recientemente predice que los cambios en el clima y en el uso del suelo durante el siglo XXI aumentarán tanto la **fijación biológica de N** (de 120 a 166 Tg N año⁻¹ en los océanos y de 128 a 170 Tg N año⁻¹ en los ecosistemas terrestres) como antropogénica, hasta un total de 600 Tg N año⁻¹ en el 2100¹⁴. Las emisiones terrestres de NH₃ antropogénico aumentarán debido a una subida en la temperatura global del planeta y al efecto del incremento en Nr fijado antropogénicamente (motivado por la creciente demanda de alimentos y por cambios en la dieta). Las emisiones de NO_x y N₂O a partir de ecosistemas terrestres aumentarán hasta en un orden de magnitud en el caso del N₂O debido a la estimulación de las tasas de **nitrificación** y desnitrificación por efecto del cambio climático. Además, una mayor entrada de Nr al mar por **deposición atmosférica** y procedente de los ríos también provocará un aumento de las emisiones de N₂O desde los ecosistemas marinos. Debido al potente efecto invernadero del N₂O, el aumento en las emisiones de este gas tendrá a su vez un impacto significativo sobre la temperatura del planeta. Este último efecto lleva a un caso paradigmático de retroalimentación positiva entre diferentes factores de cambio global ¹⁴, en el que cambios antropogénicos en el clima provocarán cambios en el ciclo del N, lo que a su vez afectará de nuevo al clima del planeta.

Por otro lado, algunos flujos de N podrían reducirse en las próximas décadas. Por ejemplo, se espera una reducción en las emisiones de NO_x, producto de la combustión de combustibles fósiles debido al uso extendido de tecnologías de control, tanto en vehículos como en plantas industriales. Además, las emisiones de NH₃ desde los océanos también podrían disminuir debido a que la acidificación de los océanos, causada por el aumento de CO₂ atmosférico, compensaría el efecto que podrían tener en las emisiones de NH₃ el aumento de la temperatura del agua. No obstante, se estima que los dos grandes flujos de Nr, el terrestre y el oceánico, aumenten sustancialmente durante el siglo XXI, con un incremento global de las emisiones de las diferentes formas de Nr y su posterior **deposición** en los ecosistemas. Además, se espera que esta **deposición de N** sea muy variable espacialmente, con incrementos particularmente grandes en países en vías de desarrollo de Latinoamérica, África y Asia.

Los cambios en el ciclo del N han superado en mucho un límite planetario aceptable, con consecuencias perjudiciales o incluso catastróficas en muchas zonas del planeta

2.2 ¿Qué hacer?

Aunque en las últimas décadas ha habido iniciativas políticas que han conseguido reducir las entradas de Nr a los ecosistemas, estos intentos se han llevado a cabo gran parte de las veces a nivel regional o nacional, y siempre en países desarrollados, hasta hoy principales emisores de N a la atmósfera y productores de fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, a tenor de las potenciales consecuencias de las alteraciones del ciclo del N sobre el funcionamiento de los ecosistemas, es crucial la aplicación de medidas efectivas de carácter internacional para limitar la producción y las emisiones de Nr¹⁴. La sustitución de combustibles fósiles por fuentes alternativas de energía, las mejoras en la eficiencia del uso del N en los sistemas agrícolas, una distribución más equitativa de la producción mundial de Nr, así como la optimización del transporte y cambios en



Los cambios en el uso del suelo generados por la expansión de la agricultura intensiva es uno de los motores de desequilibrio del ciclo biogeoquímico del nitrógeno. Plantación de soja en Rio Grande do Sul en Brasil. Foto de Tiago Fioreze. CC-BY-SA-3.0

los patrones de consumo de alimentos serían algunas de las medidas que podrían reducir la producción y uso de N reactivo. Estas medidas también ayudarían a reducir las entradas de Nr a la atmósfera y su posterior **deposición**. Si se consideran las implicaciones económicas de la **deposición de N** antes mencionadas, parece claro que estos cambios ofrecerían beneficios no sólo medioambientales sino también económicos.

3. Ciclo del fósforo (P)

El fósforo (P) es uno de los elementos más comunes de la Tierra y es esencial para todos los seres vivos ya que forma parte de estructuras químicas indispensables para la vida, como las involucradas en la obtención

de energía celular (**Adenosin trifosfato; ATP**), en la genética (ácidos nucleicos; ADN), o en la estructura de membranas celulares, huesos y dientes, siendo imprescindible para muchos procesos de la vida (e. g. crecimiento, reproducción). El P no tiene una molécula gaseosa y no está presente en la atmósfera como el N y el carbono. Por el contrario, este elemento lo encontramos en moléculas de fosfato formando parte de minerales de la corteza terrestre como la apatito o la fosforita, los cuales se han formado durante millones de años. De este modo, el ciclo biogeoquímico del P cuenta con procesos que ocurren a escala geológica, como la formación del mineral apatito y el afloramiento de rocas por procesos de tectónica de placas⁷, que hacen que el P no sea renovable y su disponibilidad en la tierra sea finita, al menos en tiempos de escala humana.

Esta cualidad del P hace que el reciclaje de su contenido en la materia orgánica sea indispensable para el mantenimiento de la diversidad y, por lo tanto, de las funciones ecosistémicas. En los sistemas naturales existe un alto reciclaje interno de fósforo. Casi todo el P que es absorbido por las plantas e incorporado en tejidos vegetales y animales regresa a los ecosistemas a través de las transformaciones químicas que ocurren durante la **descomposición**. Es decir, las plantas absorben P del suelo -principalmente en forma de fosfatos- y los animales lo obtienen de las plantas u otros animales. Cuando estos organismos mueren, el P se recicla durante la **descomposición** de los residuos orgánicos y se reincorpora al ecosistema. Por lo tanto, los residuos orgánicos son un aporte fundamental que, a través de la **descomposición**, mantiene el P disponible para los organismos vivos por cientos y miles de años en los ecosistemas¹⁵. Por el contrario, la disminución de la disponibilidad de P y de las tasas de reciclaje de la materia orgánica reducen drásticamente la productividad primaria de los ecosistemas y los pueden llevar a estados de **retrogresión**. En los estados de **retrogresión**, tanto la biodiversidad como las funciones ecosistémicas disminuyen, y se requieren perturbaciones catastróficas (e. g. terremotos, vulcanismo) para reactivar a los ecosistemas. Sin embargo, existen ecosistemas con alta diversidad biológica que se han desarrollado en suelos muy viejos, suelos que con el tiempo han perdido casi todos los minerales de P que tenían originalmente. Por ejemplo, los ecosistemas mediterráneos de Australia y Sudáfrica, en donde coexisten especies con alta capacidad para usar eficientemente el fósforo.

3.1 La antropización del ciclo del P: Del mineral, el tenedor, y el ciclo roto del fósforo

El ciclo biogeoquímico del P ha sido transformado principalmente por la extracción industrializada de minerales de P, el uso masivo de fertilizantes en la agricultura intensiva y la falta de reciclaje de residuos orgánicos (ver Capítulo 3). Al año se extraen aproximadamente 14 megatoneladas de P mineral, que se

aplican en forma de fertilizantes y de las cuáles el 75% se almacena en los suelos agrícolas o se pierde, ya sea por lixiviación o **escorrentía**. Los animales excretamos gran parte del P que consumimos ya que, en promedio, un humano requiere entre 0,6 y 0,7 gramos de P al día para mantener sus funciones vitales, pero ingiere alrededor de tres gramos en los alimentos que consume, es decir, mucha más cantidad de P de la que puede asimilar. Si relacionamos nuestra ingesta de P con lo que se requiere para producir nuestros alimentos, tenemos que anualmente en nuestros alimentos consumimos únicamente tres de las 14 megatoneladas de P que se extraen de los reservorios minerales del mundo^{16,17}, de las cuáles, además, únicamente asimilamos una pequeña parte.

Las pérdidas de P de los sistemas agrícolas se deben fundamentalmente a la alta reactividad de este elemento y su facilidad para ser transportado a través de procesos de **lixiviación** y/o **escorrentía** a las aguas subterráneas y ecosistemas dulceacuícolas. Las pérdidas en forma de fosfato a través de ríos o sistemas acuáticos, tienen importantes consecuencias ecológicas negativas en ecosistemas en donde el P se encuentra de manera natural en niveles muy bajos (ej. ecosistemas dulceacuícolas, lagos). En estos sistemas, el incremento en la disponibilidad de P, tal y como también ocurre con el N (ver sección anterior), favorece la proliferación acelerada de algas que consumen el oxígeno del sistema dando lugar a procesos de **eutrofización**. Estas algas al morir generan un gran aporte de detritos a los ecosistemas y aceleran los procesos de **descomposición** microbiana que agotan el oxígeno disuelto, resultando en condiciones de anoxia. A consecuencia de estos eventos de anoxia se produce la muerte por asfixia de poblaciones enteras de peces, así como el desequilibrio químico de lagos y ríos. La combinación de procesos de **eutrofización** y anoxia da lugar a lo que se conoce como zonas muertas (i.e. *dead zones* en inglés). Actualmente existen más de 400 zonas muertas costeras en las desembocaduras de los ríos y se calcula que estas se están expandiendo a una tasa de 1% por año 18. El incremento de P en suelos de diversas partes del mundo por el uso de fertilizantes en la agricultura intensiva ha alterado también la dinámica de ecosistemas naturales al afectar al crecimiento de especies

vegetales y a la actividad microbiana¹⁵. Por lo que el uso de grandes cantidades de fertilizantes representa una amenaza para la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres y dulceacuícolas, ya que la **eutrofización** y contaminación de aguas subterráneas conlleva la pérdida de hábitat, un aumento en la frecuencia y severidad de los afloramientos de algas nocivas, la hipoxia, la pérdida de agua potable y potencialmente la pérdida de biodiversidad.

Como hemos mencionado, la industria agrícola moderna, que es el mayor usuario de P, utiliza al año entre 14 y 15 megatoneladas de P mineral que se formó hace más de 10 o 15 millones de años¹⁷, y la gran mayoría de este P no es reciclado in situ. Esto ha “roto” el ciclo biogeoquímico natural del P, no solamente porque hemos incrementado exponencialmente los flujos de salida (i.e. extracción mineral industrializada) y eliminado los flujos de entrada (e. g. los desechos orgánicos van a rellenos sanitarios o se pierden en los sistemas de drenaje), sino también porque ahora movemos el P a grandes distancias. Por ejemplo, India, el principal importador de fertilizantes de P del mundo, le compra fertilizantes a China, y ese P viaja -ya sea por barco o por avión- al menos 2.500 kilómetros. Asimismo, alrededor del 60% del P que se utiliza en los fertilizantes se pierde a través de ríos y sistemas fluviales. De lo anterior podemos deducir que una gran parte del P que proviene de yacimientos minerales que se formaron en China hace millones de años termina, en periodo de meses, en los ríos y sistemas acuáticos de la India y océanos circundantes. Por otro lado, hoy en día más de la mitad de la población humana vive en centros urbanos, lo que está transformando a las ciudades en “puntos calientes” de P, es decir, sitios con altas concentraciones de P que no es utilizado por plantas u otros organismos. Según cálculos recientes, los humanos excretamos alrededor de tres megatoneladas de P al año¹⁶, es decir, medio kilogramo por persona y año, por lo que en las ciudades se vierten anualmente miles de toneladas de P en la orina y otros desechos humanos que, al no reciclarse, contaminan los ecosistemas acuáticos (**eutrofización**). De este modo, el uso elevado de P mineral (e. g. fosfatos) en la agricultura intensiva y la instalación de sistemas de drenaje para eliminar desechos humanos en las ciudades ha roto el ciclo del P.

3.2 ¿Qué hacer?

Es indispensable que se adopten mejores métodos de uso y aplicación de fertilizantes (se pierden ocho megatoneladas de fertilizantes al año¹⁷), así como de reciclaje de residuos orgánicos (se pueden recuperar tres megatoneladas que se pierden en los desagües y 1,2 megatoneladas en campos agrícolas¹⁶). Esto promovería la conservación de formas minerales de P en los agrosistemas, y reduciría la contaminación de las cuencas y ecosistemas dulceacuícolas. Asimismo, es importante recordar que el P es altamente reciclable, por lo que se podría extraer y re-utilizar a partir de desechos agrícolas, humanos y animales.

4. Consideraciones finales

La relevancia de los ciclos del C, N y P está en el gran volumen de materia y energía implicada en sus procesos de ciclado y el papel clave de estos elementos en la formación y mantenimiento de la biosfera. Las actividades humanas y el cambio global han modificado los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo y, por tanto, el funcionamiento de los ecosistemas.

La movilización de C y N desde la corteza terrestre a la atmósfera actualmente ha aumentado entre 13 y 37 veces si se compara con las fuentes naturales geológicas en el período pre-industrial⁷. En este escenario, Rockstrom y colaboradores¹² identificaron umbrales críticos para procesos clave del cambio global del sistema Tierra que, de ser superados, darían lugar a cambios ambientales insostenibles. Las estimaciones de los autores muestran que estamos cerca del umbral crítico para la interferencia humana en el ciclo global del fósforo y más allá de los límites de seguridad para la interferencia en el ciclo de nitrógeno.

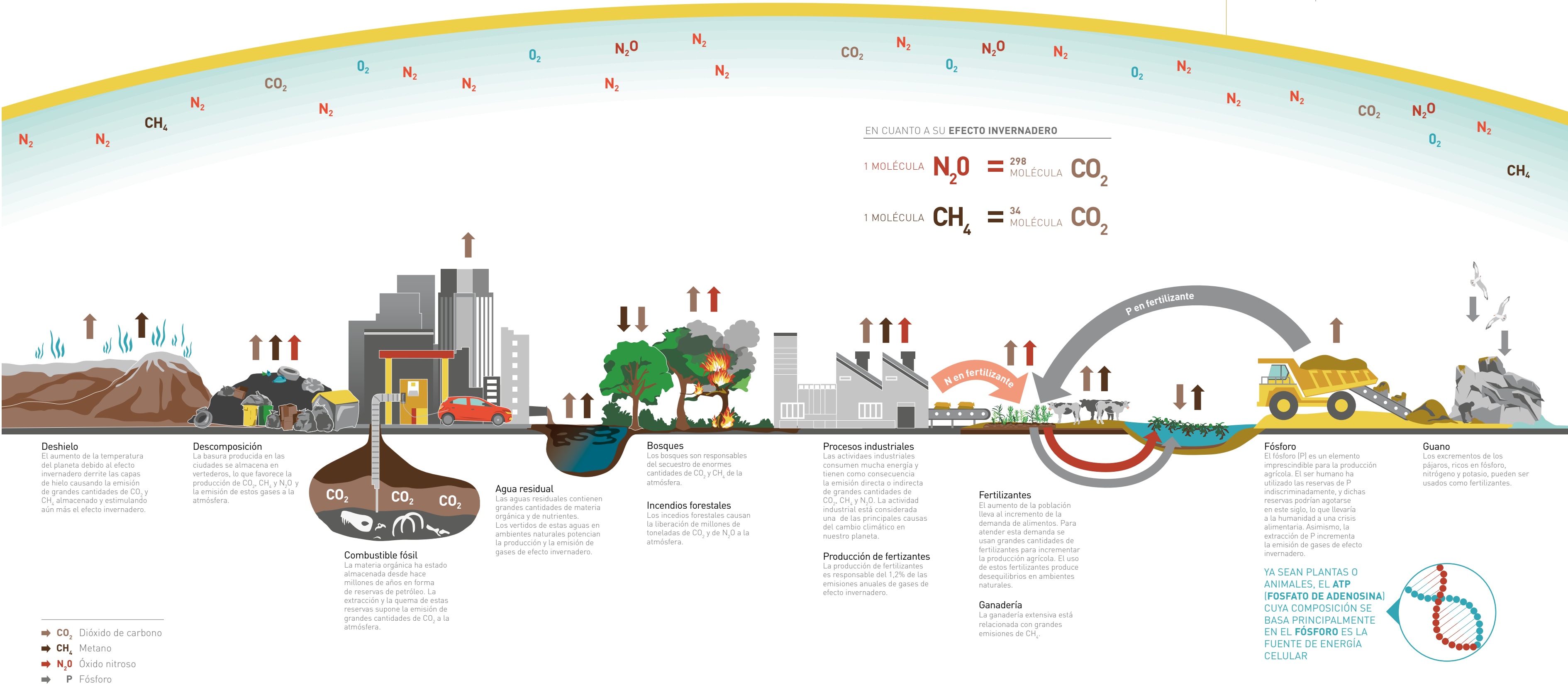
Asimismo, se observa que las consecuencias de la inestabilidad de los ciclos afectan a su vez a las causas y se generan procesos de retroalimentación positiva. Por ejemplo, las emisiones de CO₂ que desequilibran el ciclo de C, causan el cambio climático y este afecta a su vez sobre los almacenes de C del Planeta. Ejemplos similares se encuentran también

EL SER HUMANO Y LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Los gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) han contribuido a la retención de calor en nuestra atmósfera desde hace millones de años. Desde la revolución industrial, ciertas actividades humanas han alterado el balance de nutrientes en los ecosistemas naturales, estimulando la producción y la emisión de estos tres gases, aumentando así la retención de calor en la atmósfera y dando lugar al conocido “efecto invernadero”.

EFFECTO INVERNADERO

Diversas moléculas y partículas retienen radiación térmica, regulando la temperatura de la atmósfera. Sin este proceso, la temperatura en la superficie del planeta sería mucho menor de lo que es hoy en día, afectando directamente a las formas de vida del planeta.



para los ciclos de N y fósforo. Es llamativo, que la mayoría de los cambios globales afecten especialmente a los ciclos biogeoquímicos de los que más depende la especie humana, comprometiendo así su propia supervivencia.

El acuerdo de París, tratado que ha sido firmado por una gran mayoría de naciones del planeta en 2016, es un gran paso en la búsqueda de la reducción de las emisiones de gases de **efecto invernadero** y, su cumplimiento, ciertamente, traerá múltiples beneficios en lo que respecta al consumo de energía y disminución de la utilización de combustibles fósiles. Sin embargo, es imperativo que nuestra sociedad tome decisiones similares para establecer límites para el consumo de N y P y de regular el aporte de estos nutrientes a los ecosistemas. De los diferentes sectores de la sociedad, dos de ellos llaman más la atención y demandan un esfuerzo extra para controlar los flujos y las pérdidas de N y P: la agricultura y el tratamiento de residuos.

Los actuales 7.000 millones de seres humanos en nuestro planeta afectan, y continuarán afectando, a los ciclos de N y P. Sin embargo, los impactos sobre el planeta pueden ser ampliamente reducidos si los métodos de uso y aplicación de fertilizantes son mejorados, buscando una mayor eficiencia en su utilización. También se debe resaltar que un tratamiento eficaz de los residuos orgánicos producidos por la sociedad puede generar energí En este capítulo se ha puesto de manifiesto el evidente efecto que las a (por ejemplo, biogás) y biofertilizantes que, al ser utilizados en la agricultura, disminuyen la demanda de **fijación de N** atmosférico y minimizan el flujo global de P. Las tecnologías para minimizar los impactos causados por el exceso de N y P ya existen. Lo que falta es la decisión política de nuestros gobernantes para ponerlas en práctica.

REFERENCIAS CITADAS

- Enrich-Prast, A. Bastviken, D., & Crill, P. . Chemosynthesis. Pp. 211-225. En: Likens, G. E. (ed) Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford (2009).
- Bastviken, D. Methane. Pp. 783-805. En: Likens, G. E. (ed) Encyclopedia of inland waters. Elsevier, Oxford (2009).

- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. . The impact of climate change on the world’s marine ecosystems. Science 328, 1523-1528 (2010).
- Bonan, G. B. . Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. Science, 320: 1444-1449.(2008)
- Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nature Geoscience 6, 597-607 (2013).
- Díaz, R. J., & Rosenberg, R. . Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. Science 321, 926-929 (2008).
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S.. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd Edition. Academic Press, 672 pp. (2013).
- Hoegh-Guldberg, O. *et al.* Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. Science 318(5857), 1737-1742 (2007).
- FAO. Current world fertilizer trends and outlook to 2016. Rome. 43pp. (2012).
- Pachauri, R. et al. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 151pp. (2014).
- Ravishankara, A. R., Daniel, J. S., & Portmann, R. W. . Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. Science 326(5949), 123-125 (2009).
- Rockström, J. *et al.* Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and society 14(2) (2009).
- Sutton, M. *et al.* Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. NERC/Centre for Ecology & Hydrology, 114 pp. (2013).
- Fowler D. *et al.* Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. Atmospheric Chemistry and Physics 15(24),13849-13893 (2015).
- Vitousek, P. *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. Ecological Applications 20, 5-15 (2010).
- Cordell, D., Drangert, J. O., & White, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. Global Environmental Change 19, 292–305 (2009).
- Smil, V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. Annual Review of Energy and the Environment 25, 53–88 (2000).
- Rabalís, N. *et al.* Global change and eutrophication of coastal waters. ICES Journal of Marine Science 66, 1528-1537 (2009).

REFERENCIAS COMENTADAS

Fowler, D. et al. Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. Atmospheric Chemistry and Physics 15, 13849-13893 (2015).
En este artículo, Fowler et al. realizan un excelente trabajo de revisión de trabajos científicos publicados con información relevante acerca de los efectos del cambio global sobre el ciclo del nitrógeno (N). Este trabajo representa el mayor esfuerzo realizado hasta la fecha para estimar la magnitud de los cambios que las actividades antropogénicas han producido hasta la actualidad en flujos y procesos clave del ciclo global del N (ej. fijación, deposición, transporte, emisiones, etc.). Además, presenta estimaciones sobre estos efectos

para lo que resta de siglo XXI. De especial relevancia es el análisis que los autores hacen de la efectividad de las medidas de control - generalmente de carácter regional - puestas en marcha hasta la fecha, así como la justificación de la necesidad de implementar una estrategia global para la regulación de los impactos de las actividades humanas sobre el ciclo del N.

Regnier, P. et al. Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. Nature Geoscience 6, 597-607 (2013).
Este artículo de revisión revela la magnitud actual de los flujos de carbono laterales entre la tierra y el océano, así como el grado en el que las actividades humanas han alterado dichos flujos. Los autores sugieren que es necesario incluir los flujos de carbono a lo largo del continuo tierra-océano en las estimas globales de dióxido de carbono. Además, muestran que la perturbación antropogénica podría haber aumentado el flujo de carbono a aguas continentales hasta 1.0 Pg C año⁻¹ desde la época pre-industrial, principalmente debido a un aumento de la exportación de carbono del suelo.

Rockström, J. et al. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. Ecology and Society 14(2), (2009).
Rockstrom et al. presentan un nuevo concepto, los límites planetarios, para estimar un espacio operativo seguro para la humanidad con respecto al funcionamiento de nuestro planeta, proponiendo un nuevo enfoque para la sostenibilidad global y cambiando el enfoque de gobierno y gestión. Además, los autores identificaron procesos clave del Sistema Tierra e intentan cuantificar para cada proceso el nivel límite que no debería sobrepasarse si queremos evitar un cambio ambiental global inaceptable. Entre estos procesos están la concentración de CO₂ en la atmósfera, la acidificación de los océanos y los ciclos biogeoquímicos del nitrógeno y el fósforo.

Schlesinger, W. H. & Bernhardt, E. S. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change, 3rd Edition. Academic Press 672 pp. (2013).
Este es un libro de texto sobre la química de la superficie de la Tierra.La vida en el planetahoy en día se ve cada vez más afectado por las actividades humanas. El libro habla de cómo funciona la Tierra como un sistema químico de forma natural, de los eventos que han causado cambios en la química de la superficie de la Tierra en el pasado y de lo que está causando que nuestro planeta cambie rápidamente en la actualidad. El libro combina una amplia gama de disciplinas, desde la astrofísica hasta la biología molecular, así como de escalas temporales, desde el origen de la Tierra hasta las próximas décadas.

Sutton, M. A. et al. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution. NERC/Centre for Ecology & Hydrology 114 pp. (2013).
La Alianza Global para la Gestión de Nutrientes y la Iniciativa Internacional del Nitrógeno escribieron este libro que pretende proporcionar una descripción global de la gestión de nutrientes. El libro aborda la complejidad científica de cómo la humanidad puede responder a los desafíos ambientales y maximizar las oportunidades de una gestión mejorada de los nutrientes, mostrando la construcción de una red de instituciones y actores para una mejor comprensión científica que apoye la toma de decisiones futuras en este campo. El mensaje del libro es que todo el mundo puede beneficiarse de los nutrientes y contribuir a promover la producción y el uso sostenible de los mismos. Tanto si vivimos en una parte del mundo con demasiados o muy pocos nutrientes, nuestras decisiones diarias pueden marcar la diferencia.

GLOSARIO

Biota. conjunto de todos los seres vivos del planeta.

N reactivo (Nr). Todas aquellas moléculas y/o compuestos de N involucradas directa o indirectamente en el metabolismo.

Deposición atmosférica del N. Entrada de N desde la atmósfera a los ecosistemas, bien en forma de polvo (deposición seca) o disuelto en agua de lluvia y nieve (deposición húmeda).

Escorrentía. Corriente de agua que circula sobre una superficie al rebasar su depósito o cauce naturales o artificiales.

Fijación del N₂. Proceso por el cual el N atmosférico (N₂) se transforma en formas reactivas o disponibles para la biota.

Adenosin trifosfato (ATP). Es una molécula orgánica que se utiliza en la obtención de energía celular. Está formada, entre otras cosas por una base nitrogenada (adenina; de ahí su nombre) y tres grupos fosfato. Es la principal fuente de energía para la mayoría de las funciones celulares, y está presente en todos los seres vivos.

Descomposición. Es el proceso de ruptura metabólica de materiales en componentes simples por organismos vivos.

Eutrofización. Es un proceso de contaminación de sistemas pobres en nutrientes (ej. sistemas acuáticos como lagos, embalses, e inclusive el océano), ocurre al haber un incremento de sustancias nutritivas (ej. Fósforo) que promueve el crecimiento acelerado de organismos que consumen el oxígeno y bloquean el paso de luz más allá de la superficie de los cuerpos de agua.

Lixiviación. Es el fenómeno por el cual las aguas de lluvia o del riego arrastran los nutrientes minerales del suelo fuera del alcance del sistema radicular de las plantas. Lo anterior genera pérdida de fertilidad y acidificación de los suelos.

Retrogresión. Es un concepto utilizado en ecología de ecosistemas que sugiere la vuelta a un estado menos complejo, con menor diversidad, productividad, ciclado de nutrientes, etc.

Producción primaria. Es la síntesis de compuestos orgánicos a partir de compuestos inorgánicos, principalmente CO₂ (atmosférico o disuelto en agua). La mayor parte de la producción primaria se produce por medio de la fotosíntesis, que usa luz como fuente de energía, pero también por medio de la quimiosíntesis, que usa la oxidación o reducción de compuestos químicos como fuente de energía.

Mineralización del N. La mineralización del nitrógeno es la descomposición u oxidación de formas orgánicas que contienen nitrógeno en formas inorgánicas que son utilizables por plantas y microorganismos en su metabolismo.

Nitrificación del N. La nitrificación es la oxidación, primero, de amoníaco o amonio a nitrito, y después, de nitrito a nitrato. Se trata de un proceso aeróbico llevado a cabo por ciertos grupos de bacterias y arqueas.