

## NOVEDADES CIENTÍFICAS EN 2016

## EN CIENCIAS AMBIENTALES

## AUMENTO DE LAS EMISIONES DE DIÓXIDO DE CARBONO POR EL DERRETIMIENTO DEL PERMAFROST

El permafrost es la capa de suelo que permanece congelada permanentemente y que puede alcanzar centenares de metros de espesor. Se desarrolla en lugares donde la temperatura del suelo permanece por debajo de los 0°C durante años. Esto ocurre principalmente en las regiones de latitudes altas de ambos hemisferios, llegando a comprender hasta el 24% de la superficie del hemisferio norte (Figura 1). El permafrost almacena una inmensa cantidad de carbono, aproximadamente el doble del carbono contenido en la atmósfera.

El rápido incremento de temperaturas en estas regiones debido al calentamiento global está provocando el derretimiento del permafrost. Al descongelarse la materia orgánica del suelo ésta se vuelve más vulnerable a la descomposición microbiana con la consiguiente liberación del carbono acumulado, aumentando así la concentración de gases invernadero en la atmósfera. Esta descongelación provoca también cambios en la hidrología local que afectan indirectamente al ciclo de carbono. El deshielo de permafrost rico en hielo y la fusión del hielo subterráneo causan el colapso de la superficie del terreno formando desniveles con pequeñas elevaciones y de-



Figura 1. Capa de permafrost en la región Ártica.

presiones, que se conoce como *termokarst*. El derretimiento del permafrost también puede producir un aumento de grosor de la capa activa (capa situada sobre el permafrost que se descongela estacionalmente), fragmentando el paisaje en zonas con suelos pobremente drenados y más húmedos (en zonas más bajas) y otras con suelos en condiciones más secas (en zonas más elevadas). Así, debido al derretimiento y el colapso del permafrost, algunos suelos quedan anegados donde prevalecen condiciones anaerobias y el carbono es liberado en forma de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, y otros suelos de menor humedad mantienen condiciones aerobias con la liberación de carbono únicamente como CO<sub>2</sub>.

A pesar de la importancia que tiene la temperatura y la humedad del suelo en la liberación de carbono del permafrost ante futuros cambios ambientales, aún no se ha estudiado de forma generalizada el efecto de estos factores en las emisiones de gases invernadero. Por ello, un grupo de investigadores de varios países y liderado por la Universidad del Norte de Arizona (EEUU) ha publicado un trabajo en el que han cuantificado el efecto del aumento de temperatura y del cambio entre condiciones aerobias y anaerobias en las emisiones de carbono por el permafrost (*Nature Climate Change*, 6, 950-953, 2016).

El trabajo consistió en un metaanálisis combinando los resultados recopilados de 25 estudios de incubación diferentes, en los que se incluyeron muestras de suelos de toda la zona de permafrost de la región circumpolar del hemisferio norte. Las muestras de suelo se recogieron tanto de la capa de permafrost como de la capa activa y se clasificaron en función del tipo de ecosistema: bosque boreal, turbera o tundra. En estas muestras se calculó la emisión acumulada de carbono (en forma de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>) durante el periodo de incubación bajo condiciones diferentes de temperatura (de 5°C a 15°C) y de humedad (condiciones aerobias y anaerobias). Se cuantificó también la capacidad de calentamiento del carbono liberado en los diferentes tratamientos teniendo en cuenta la cantidad producida de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y que este último tiene un potencial de calentamiento global 34 veces mayor que el CO<sub>2</sub> durante un periodo de 100 años.

En esta investigación se observó que el incremento de la temperatura en 10°C (de 5°C a 15°C) duplicaba la cantidad de carbono liberado por el suelo a la atmósfera (Figura 2). Este aumento con un factor de 2 ocurrió de la misma manera en todas las muestras, independientemente del tipo de ecosistema (bosque boreal, turbera o tundra), de si el suelo era orgánico (> 20% de carbono orgánico) o mineral (< 20% de carbono orgánico) o de si la muestra se recogió de la capa activa o de la capa de permafrost. Tampoco afectó a este comportamiento la duración del proceso de incubación de las muestras de suelo, ni la cantidad de oxígeno disponible.

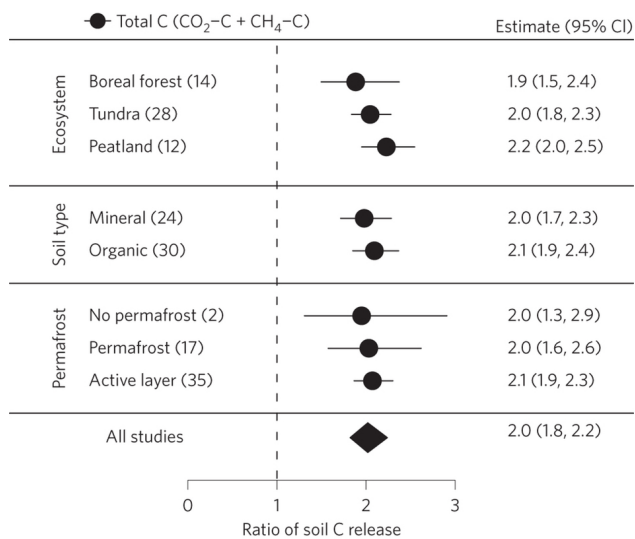


Figura 2. Ratio de liberación de carbono total (de CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub>) de muestras de suelo con un incremento de temperatura de 10°C (de 5 a 15°C) durante la incubación.

Por otro lado, la cantidad de carbono liberado aumentó en 3,4 veces en condiciones aerobias con respecto a las muestras incubadas en condiciones anaerobias (Figura 3). Este aumento tampoco se vio afectado de forma significativa por el tipo de ecosistema, tipo de suelo (orgánico o mineral), capa donde fue recogida la muestra, ni por la duración o temperatura de incubación. En condiciones anaerobias se produce además de CO<sub>2</sub> también CH<sub>4</sub> (debido a que el proceso de metanogénesis tiene lugar únicamente en ausencia de oxígeno), gas invernadero con un poder de calentamiento global mucho mayor que el CO<sub>2</sub>. A pesar de ello, en condiciones aerobias también se alcanzó un mayor potencial de calentamiento global (expresado como carbono de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> convertido a equivalentes de CO<sub>2</sub>), de 2,3 veces mayor que en condiciones anaerobias.

La contribución del carbono procedente del CH<sub>4</sub> al total de carbono liberado en las muestras de suelo incubadas en condiciones anaerobias fue muy baja, aunque

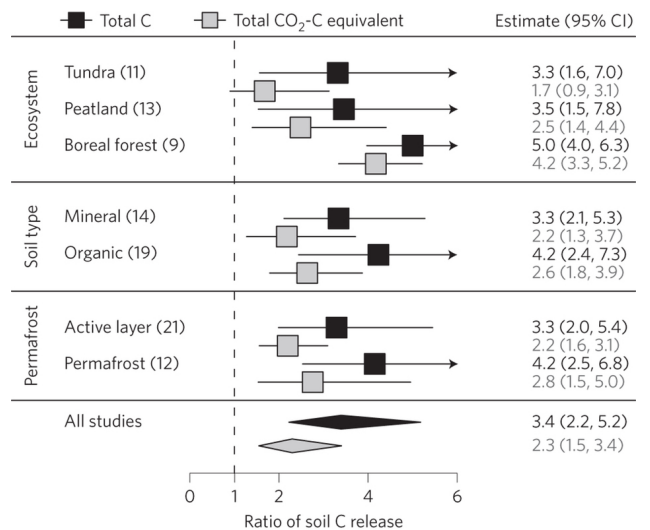


Figura 3. Ratio de liberación de carbono (carbono total de CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> y equivalente de CO<sub>2</sub>) de muestras de suelo incubadas en condiciones aerobias respecto a las incubadas en condiciones anaerobias.

aumentó al incrementarse la temperatura de incubación (Figura 4). También se observó que esta contribución del CH<sub>4</sub> fue menor en las muestras recogidas en bosques boreales que en las de tundra y turberas, donde suele haber un mayor predominio de condiciones anaerobias y, por tanto, una mayor abundancia de comunidades de bacterias metanógenas. En todo caso, esto indica en general una baja contribución del CH<sub>4</sub> en comparación con el CO<sub>2</sub> en la emisión de gases invernadero al derretirse el permafrost.

Los resultados de este trabajo demuestran que la participación del permafrost en el flujo de carbono y su contribución al cambio climático debido al aumento de la temperatura puede ser considerablemente mayor

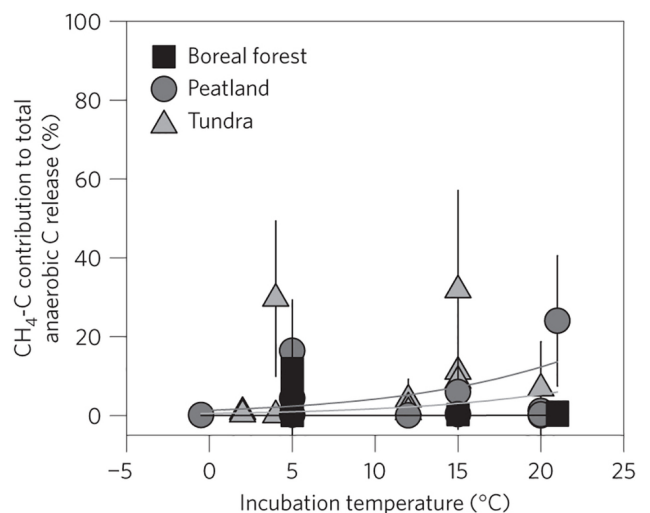


Figura 4. Contribución del carbono procedente del CH<sub>4</sub> al total de carbono liberado en muestras incubadas en condiciones anaerobias y a diferentes temperaturas.

cuando se derrite en entornos secos y con alta concentración de oxígeno que cuando se encuentra encharcado y con limitación de oxígeno. Por tanto, es muy importante considerar y monitorizar no solo el incremento de temperatura, sino también y más especialmente la humedad del suelo y los cambios en la hidrología de estas zonas de permafrost, como la del Ártico, para poder predecir futuros escenarios climáticos.

## EXTINCIÓN SELECTIVA DE ESPECIES EN LOS OCÉANOS

Desde que se estableció el Convenio de Diversidad Biológica en la Cumbre de la Tierra de Río en el año 1992 se asumió el compromiso para su conservación, sin embargo la biodiversidad terrestre y oceánica está disminuyendo a gran velocidad. Si se mantiene la actual tasa de pérdida de especies esta “sexta extinción masiva” podría ser incluso de mayor magnitud que las cinco extinciones anteriores ocurridas en los últimos 550 millones de años. Para poder pronosticar los efectos de la pérdida masiva de biodiversidad, es necesario estudiar los eventos ocurridos en las antiguas extinciones. El rico registro fósil de animales marinos proporciona una oportunidad excelente para comparar las actuales trayectorias de cambio con las pautas del pasado.

Hasta ahora, los intentos de estudiar las amenazas presentes y predecir el futuro de la biosfera a partir de las extinciones pasadas se han centrado principalmente en el cálculo de la intensidad y magnitud de la pérdida de especies. Sin embargo, estos estudios previos no han analizado cuáles son los grupos funcionales de especies o los rasgos ecológicos que más se ven afectados por las extinciones, como por ejemplo si son depredadores o presas, el tamaño corporal de los organismos o el tipo de hábitat, lo que puede tener una gran influencia en el funcionamiento de los ecosistemas durante el periodo posterior a la extinción.

Por ello, un grupo de investigadores liderados por la Universidad de Stanford (EEUU) ha realizado un estudio (*Science*, 353, 1284-1286, 2016) en el que se compara la asociación entre la amenaza de extinción y los rasgos ecológicos de animales marinos modernos con la asociación observada durante las extinciones pasadas.

Para la realización del estudio se utilizó una base de datos de 2.497 géneros de vertebrados y moluscos marinos extintos y modernos a partir del registro fósil, comparando la intensidad y selectividad de futuras extincio-

nes con las de pasadas extinciones masivas y con los intervalos “de fondo” entre dichas extinciones. Se clasificó el grado de amenaza de las especies modernas de acuerdo a las evaluaciones realizadas por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). La intensidad de extinción se calculó como el porcentaje de géneros que no sobrevivieron de un intervalo al siguiente. La selectividad ecológica de las extinciones se evaluó mediante regresión logística múltiple utilizando cuatro rasgos ecológicos: tamaño corporal (longitud máxima), hábitat (pelágico o bentónico), motilidad (motil o no motil) y tipo de alimentación (depredador o no depredador).

Se plantearon en el estudio dos escenarios posibles: el escenario optimista, en el que todos los géneros sin especies evaluadas por la UICN se consideran como no amenazados; y el escenario pesimista, en el que sólo se incluyen las especies evaluadas por la UICN y todos los géneros con especies vulnerables se consideran perdidos. En ambos escenarios se predice una pérdida de entre 20 y 40% del total de géneros de animales existentes actualmente, siendo el valor más elevado equiparable a la última gran extinción del final del Cretácico (hace 65 millones de años) y el valor más bajo el doble que la tasa de extinción en el periodo “de fondo” (periodo que ha tenido lugar desde hace 65 millones de años hasta el presente) (Figura 5).

Los resultados de este estudio muestran que la amenaza de extinción en los océanos modernos está fuertemente asociada al tamaño corporal de los animales (Figura 6). Así, los animales marinos con un tamaño más grande son mucho más propensos a extinguirse en los próximos tiempos. La motilidad de los animales (habili-

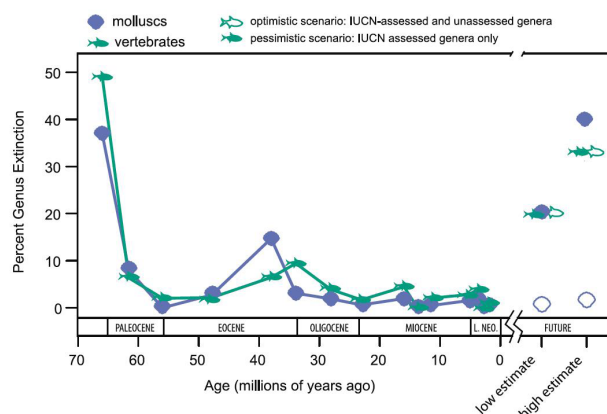


Figura 5. Intensidad de extinción de géneros de vertebrados y moluscos. Registro histórico de los últimos 65 millones de años y predicción para especies modernas.

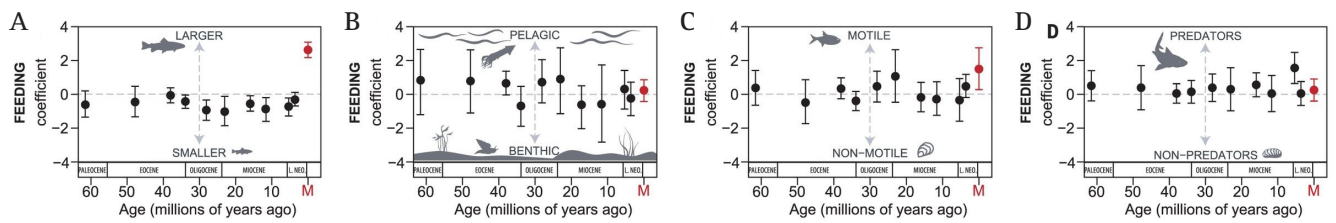


Figura 6. Selectividad de la amenaza de extinción en los océanos modernos en función de los rasgos ecológicos: tamaño corporal (A), hábitat (B), motilidad (C) y tipo de alimentación (D). Predicción para especies modernas en rojo, registro de los últimos 65 millones en negro.

dad para moverse espontánea e independientemente) también está positivamente relacionada con la amenaza de extinción, aunque en menor grado que el tamaño corporal, estando los animales motiles más afectados que los inmotiles. Por el contrario, no se ha observado ningún tipo de correlación entre la forma de alimentación o el hábitat donde viven con el grado de amenaza en esta “sexta extinción”.

Esta tendencia que sigue la extinción de especies en la actualidad no tiene comparación con lo sucedido en ninguna de las grandes extinciones del pasado conocidas a través del registro fósil (Figura 7). En las extinciones masivas previas la probabilidad de desaparición de las especies no se asociaba a un tamaño más grande de los organismos (incluso la amenaza era mayor en los animales pequeños), sino que estaba más fuertemente afectada por una baja motilidad (en el caso de la extinción del final del Cretácico) o por el hábitat marino, siendo los animales pelágicos (aquellos que viven en la masa de agua) los que sufrieron más pérdidas que los bentónicos (aquellos que viven en el fondo marino) en las cinco extinciones anteriores.

Este fuerte sesgo por la extinción de animales de mayor tamaño en la época actual es consistente con la preferencia de las actividades pesqueras por explotar las especies de niveles tróficos superiores, las cuales suelen ser de mayor tamaño que las que se encuentran por debajo en la cadena trófica, así como de capturar los individuos más grandes dentro de cada especie. De acuerdo

a otros estudios, esta tendencia se refleja de igual forma en los ecosistemas terrestres.

Todos estos resultados apuntan a que por el momento el cambio climático o la acidificación de los océanos no parece ser la causa dominante de la extinción de las especies marinas modernas, sino que son las actividades humanas, como la caza y la pesca, las principales responsables de la crisis de biodiversidad.

La pérdida selectiva de especies marinas de elevado tamaño supone un peligro mayor para los ecosistemas que el que supondría la pérdida del mismo número de especies de menor tamaño. Los animales grandes resultan críticos para el funcionamiento del ecosistema dada su posición en la cima de la pirámide trófica, su capacidad para regular las poblaciones de otras especies por depredación, y su importancia en el ciclo de los nutrientes (véase [100cias@uned](mailto:100cias@uned), N° 8 nueva época, 83-90, 2015).

Esta tendencia sin precedentes en la historia de la vida en la Tierra perturbaría la ecología de los océanos en los próximos millones de años, incluso aunque ocurriera con tasas de extinción más bajas que las de los eventos catastróficos del pasado. Este análisis sugiere la urgente necesidad de cambiar drásticamente las actuales políticas de gestión de los recursos marinos si no quiere alcanzarse una situación equivalente a las grandes extinciones de los últimos 541 millones de años (Fanerozoico), lo que supondría el paso a una nueva era geológica (Antropozoico).

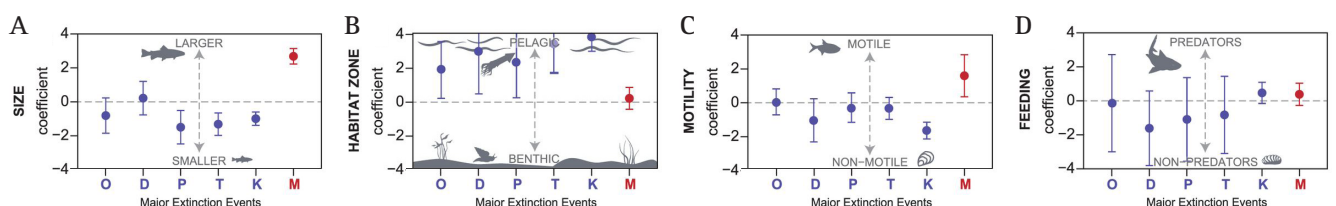


Figura 7. Selectividad de la amenaza de extinción en las extinciones masivas del pasado en función de los rasgos ecológicos: tamaño corporal (A), hábitat (B), motilidad (C) y tipo de alimentación (D). Predicción para especies modernas en rojo, registro de las cinco grandes extinciones en azul. O: final del Ordovícico (439 millones de años), D: final del Devónico (367 m.a.), P: final del Pérmico (251 m.a.), T: final del Triásico (210 m.a.), K: final del Cretácico (65 m.a.).

## IMPORTANCIA DE LA DIVERSIDAD MICROBIANA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS

Es de vital importancia para el bienestar de la sociedad mantener la salud de los ecosistemas, ya que de entre las diversas funciones y servicios que brindan se encuentra su capacidad para producir alimentos y su participación en el ciclo de los nutrientes. Los cambios en la diversidad pueden afectar severamente al suministro de servicios ecosistémicos. Numerosas investigaciones realizadas hasta el momento han demostrado el efecto positivo que tiene una elevada diversidad de especies vegetales en el funcionamiento de los ecosistemas. Es bien conocido que las comunidades de microorganismos del suelo juegan también un papel clave en el mantenimiento simultáneo de múltiples funciones y servicios del ecosistema (lo que se denomina como multifuncionalidad), tales como el reciclado de nutrientes, la producción primaria, la descomposición y mineralización de la materia orgánica y la regulación del clima. Sin embargo, aún no se ha evaluado de forma explícita la relación que existe entre la diversidad microbiana y la multifuncionalidad de los ecosistemas terrestres a escala global.

Resulta, por tanto, crítico para la preservación y gestión de los ecosistemas entender cómo afectaría la pérdida de diversidad microbiana como consecuencia de cambios ambientales, como el uso del suelo, enriquecimiento del suelo en nitrógeno o el calentamiento global. Por esta razón, un equipo internacional en el que participan investigadores de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid ha publicado un estudio (*Nature Communications*, 7, 10541, 2016) en el que han cuantificado el efecto de la diversidad de microorganismos (bacterias y hongos) sobre la multifuncionalidad de los ecosistemas terrestres y lo han comparado con otros factores como el pH del suelo, clima y situación geográfica.

Para ello han estudiado un total de 78 ecosistemas típicos de zonas áridas, procedentes de 12 países de todos los continentes excepto la Antártida. Estos ecosistemas se caracterizan por presentar un índice de aridez (precipitación/evapotranspiración potencial) entre 0,05 y 0,65. También evaluaron de forma independiente otros 179 ecosistemas representativos de regiones templadas, situados todos ellos en Escocia. Ambos estudios incluyeron muestras de diversos tipos de ecosistemas y usos del suelo (tanto naturales como alterados por el ser huma-

no): pastizales, bosques, páramos, pantanos, tierras de cultivo, etc.

En las localizaciones seleccionadas se recogieron los datos referentes a la temperatura media anual, precipitación media anual, distancia al ecuador (latitud absoluta) y altitud, y se midió el pH de muestras tomadas del suelo. También se llevó a cabo la extracción de ADN de las muestras de suelo, el cual fue secuenciado para determinar las diferentes especies de bacterias y hongos presentes en dichos suelos y la abundancia de cada una de ellas. Se llegó a identificar en los suelos muestreados de zonas áridas hasta 166.244 unidades taxonómicas diferentes de bacterias y 24.249 de hongos, y en los de zonas templadas de Escocia hasta 49.102 de bacterias. Con estos datos se calculó el índice de Shannon para cuantificar la diversidad de las comunidades microbianas. Todas estas variables se utilizaron como factores capaces de influir en la multifuncionalidad del ecosistema.

También se determinaron otras variables utilizadas para evaluar la multifuncionalidad de los ecosistemas: tasa neta de mineralización de nitrógeno, concentración de nitrato y de amonio en el suelo, concentración de ADN, cantidad de fósforo disponible en el suelo y productividad primaria del ecosistema. Estas variables constituyen buenos indicadores del funcionamiento de los ciclos de nutrientes y de la productividad del ecosistema. La importancia en la determinación del contenido en N como amonio y nitrato y del P inorgánico disponible reside en que son las formas químicas en las que las plantas y los microorganismos pueden asimilar estos nutrientes, siendo además estos dos nutrientes los más limitantes para la producción primaria de los ecosistemas. La concentración de ADN se determina como indicador de la biomasa microbiana del suelo, mientras que la productividad primaria proporciona una medida de la biomasa vegetal y la actividad fotosintética, lo cual es clave para la capacidad del ecosistema para producir alimentos. A partir de estas variables se calculó un índice de multifuncionalidad, el cual integra todas ellas, para poder medir fácilmente la capacidad de las comunidades microbianas para mantener simultáneamente múltiples funciones del ecosistema. Los datos obtenidos se analizaron aplicando modelos de "Selvas Aleatorias" (Random Forest) y de ecuaciones estructurales (SEM) para identificar cuáles son los factores más influyentes en la multifuncionalidad de los ecosistemas y para verificar si

la diversidad microbiana es causante de dicha multifuncionalidad.

Los resultados del estudio mostraron claramente una relación positiva entre la diversidad microbiana y la multifuncionalidad de los ecosistemas, observado tanto en los datos de zonas áridas como en los de las zonas templadas de Escocia (Figura 8). Incluso también se observó una relación positiva entre la diversidad y cada una de las funciones del ecosistema por separado.

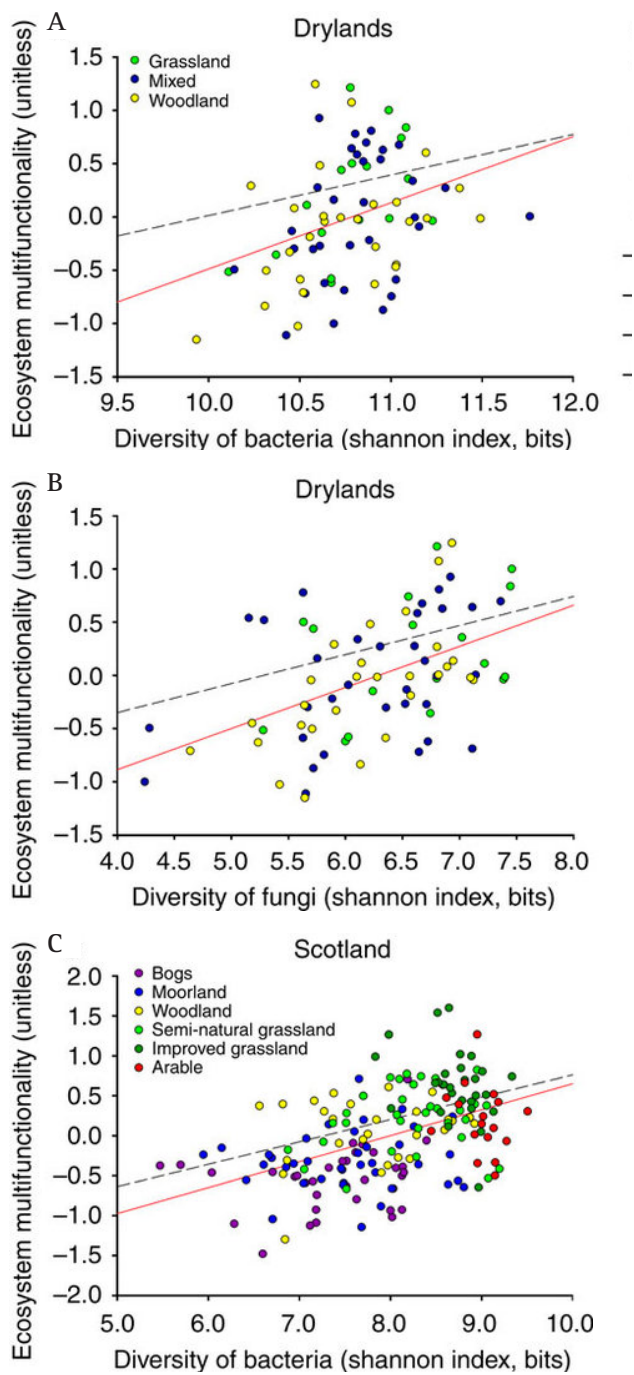


Figura 8. Relación entre la diversidad de bacterias y hongos y la multifuncionalidad de los ecosistemas de zonas áridas (A y B) y en las de zonas templadas de Escocia (C).

A pesar de la importancia ya conocida que tienen la latitud y altitud, el factor climático y el pH del suelo en el funcionamiento de los ecosistemas, el análisis de los datos de este estudio demostró también que la diversidad microbiana es tan importante o más que otros factores. Así, la diversidad tuvo mayor influencia en la multifuncionalidad del ecosistema que la temperatura y que la altitud en todas las zonas estudiadas, y que la precipitación media en el caso de los suelos de Escocia (Figura 9). Por ello, la medida de la diversidad de microorganismos del suelo puede utilizarse como indicador principal de la capacidad de los ecosistemas para ofrecer funciones y servicios.

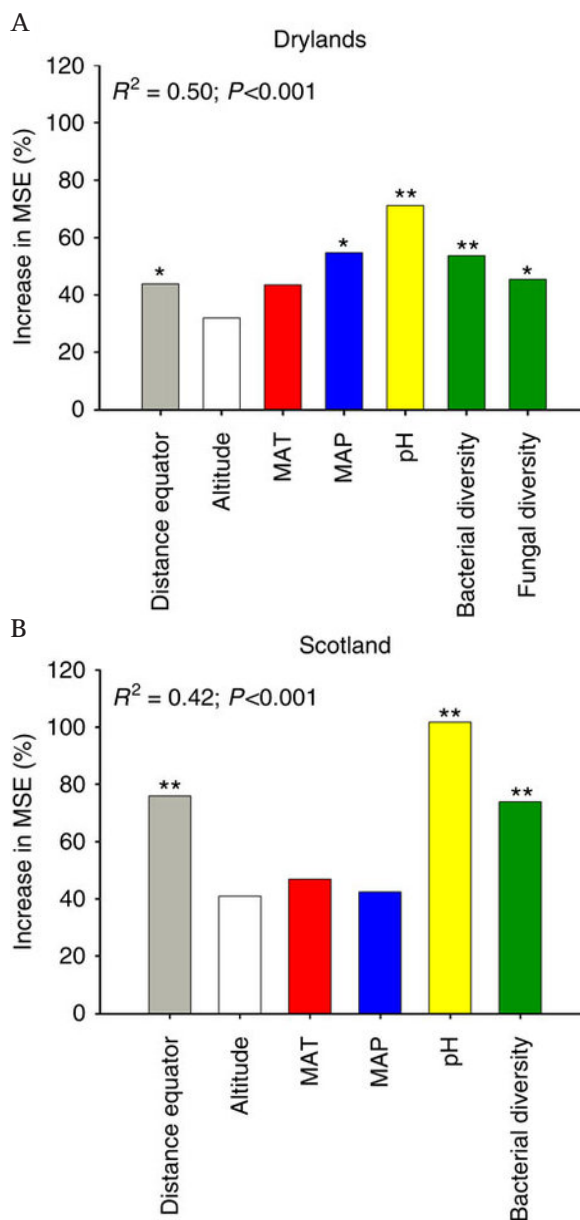


Figura 9. Principales factores predictores de la multifuncionalidad del ecosistema en zonas áridas (A) y zonas templadas en Escocia (B). MAT: temperatura media anual; MAP: precipitación media anual.

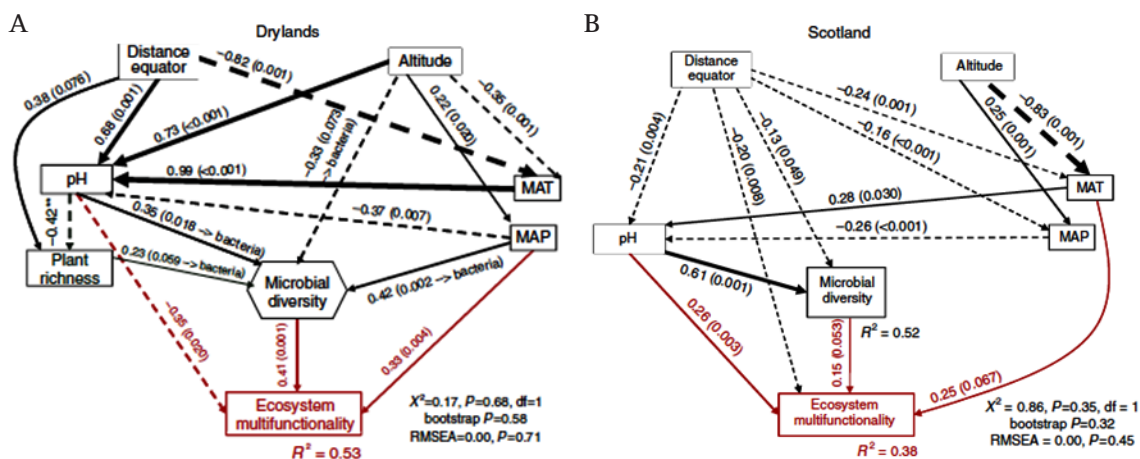


Figura 10. Efectos directos e indirectos de los diferentes factores sobre la multifuncionalidad del ecosistema en zonas áridas (A) y en zonas templadas en Escocia (B). Las flechas continuas muestran relaciones positivas y las discontinuas relaciones negativas. Los números adyacentes a las flechas indican el tamaño del efecto de la relación. MAT: temperatura media anual; MAP: precipitación media anual.

Además, en todas las zonas estudiadas la relación entre la diversidad microbiana y la multifuncionalidad del ecosistema fue siempre positiva y directa, es decir, que es causa directa de la mejora de multifuncionalidad sin mediar ninguno de los otros factores, tal y como muestra la Figura 10. Los efectos de los otros factores difirieron en función de los dos tipos de ecosistema evaluados. Así, en las zonas áridas, donde la actividad y productividad biológica está más limitada por la lluvia, la precipitación media anual estuvo directa y positivamente relacionada con la multifuncionalidad, mientras que la temperatura tuvo una relación indirecta y negativa. Por el contrario, fue la temperatura, y no la precipitación, la que tuvo la relación directa y positiva en las zonas templadas de Escocia, donde las menores temperaturas pueden limitar el funcionamiento del ecosistema. Asimismo, el pH estuvo negativamente relacionado en las zonas áridas, dado que sus suelos suelen ser básicos (frecuentemente por acumulación de carbonatos), mientras que estuvo positivamente relacionado en las muestras de Escocia, ya que en las zonas templadas y húmedas abundan los suelos ácidos (posiblemente por la acumulación de materia orgánica).

El estudio también demuestra que el efecto positivo en el funcionamiento de los ecosistemas por una mayor diversidad de especies vegetales, como se ha comentado anteriormente, no es directo, sino que dicho efecto por la riqueza de plantas actúa sobre la diversidad microbiana, y es esta última la que finalmente mejora la multifuncionalidad (Figura 10A). Las comunidades vegetales con elevada diversidad proporcionan a los microorganismos una gran variedad de restos vegetales que les

servirán de sustrato, mejorando así la diversidad microbiana. A su vez, una elevada diversidad de microorganismos permite una rápida y eficiente descomposición de estos restos vegetales elevando el contenido en el suelo de materia orgánica, lo cual aumenta la actividad microbiana y liberando una gran cantidad de nutrientes inorgánicos para ponerlos a disposición de las plantas. Este proceso de interacción plantas-microorganismos del suelo mejora sustancialmente la productividad del ecosistema y, por tanto, su capacidad para ofrecer importantes servicios como el de producir alimentos y otros cultivos útiles para el ser humano.

Estos resultados corroboran la hipótesis de que la diversidad microbiana, al igual que lo que ya se había visto con la diversidad de plantas y animales, resulta crítica para mantener el funcionamiento de los ecosistemas, y que una pérdida de dicha diversidad reduciría la capacidad de los ecosistemas para suministrar servicios clave, tales como la producción de alimentos, la fertilidad del suelo y la regulación del clima. Estos datos tienen importantes implicaciones para la comprensión del funcionamiento de ecosistemas terrestres e indican la necesidad de desarrollar estrategias y políticas adecuadas de protección de la diversidad microbiana ante los cambios ambientales, como el cambio climático y las actividades humanas, para preservar la multifuncionalidad de los ecosistemas para las futuras generaciones.

Consuelo Escolástico León  
 Javier Pérez Esteban

Dpto. de Química Orgánica y Bio-Orgánica