

Investigación

Ecosistemas de alta montaña, las atalayas de la troposfera

La troposfera es el fluido en el que vivimos los organismos terrestres. La dinámica de este fluido hace posible el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos continentales tal como los conocemos.

Factores locales como las precipitaciones atmosféricas (secas y húmedas) o la calidad de la radiación solar que llega al suelo, muy afectada por el contenido de aerosoles en la troposfera, dependen de fenómenos que pueden ocurrir a miles de kilómetros. Los ecosistemas de alta montaña, como la Sierra Nevada del sur ibérico, son los sensores más finos que poseemos para el estudio de los efectos de esos factores y para detectar pronto sus tendencias y cambios.

Rafael Morales Baquero, Carmen Pérez Martínez e Isabel Reche

Instituto del Agua, Universidad de Granada

“...*Más importante, la dependencia de procesos biológicos en Hawaii de condiciones en, y de mecanismos de transporte desde, Asia central demuestra que las dinámicas a largo plazo del desarrollo de los suelos y ecosistemas no pueden evaluarse como un fenómeno local aislado: ningún lugar sobre la Tierra está tan aislado.*”. Con esta frase terminan Chadwick et al. (1999) un revelador artículo en el que demuestran que los aportes de elementos limitantes al bosque tropical en Hawaii, especialmente de fósforo, han estado dominados durante más de un millón de años por la precipitación atmosférica de polvo procedente de las zonas áridas de Asia central, a 6.000 Km de distancia. Trabajos como este nos descubren las conexiones que tienen los ecosistemas aparentemente aislados y nos enseñan la escala, de dimensiones casi planetarias, que es preciso considerar cuando queremos encontrar una explicación profunda para el funcionamiento de los ecosistemas en general. Igualmente, llaman la atención sobre los mecanismos de transporte y los procesos que ocurren en ellos, subrayando la importancia del estudio de la porción más baja de la atmósfera (troposfera) cuya dinámica permite dicho transporte.

Las montañas, especialmente las más altas, son los lugares de la Tierra que más posibilidades ofrecen para el estudio de los ecosistemas en relación con la troposfera. No sólo porque permiten la colocación permanente de instrumentos de medida a diferentes altitudes, sino porque los propios ecosistemas que se desarrollan en ellas reflejan directamente las condiciones de selección que soportan. Sin embargo, el desarrollo de ecosistemas de altitud está limitado. Por un lado, en relación con la superficie del globo terrestre, el número de sistemas montañosos elevados no es muy grande, aunque existen algunos que se acercan al límite de la troposfera. Por otro lado, dependiendo de su latitud y situación geográfica, las partes más altas pueden estar permanente cubiertas de hielo. Como se observa en la **Figura 1**, la cota de nieve permanente en las montañas sube conforme nos movemos desde los polos hacia las latitudes medias, y vuelve a bajar ligeramente en los trópicos por efecto de la mayor

precipitación en estas regiones. De hecho, la posibilidad de encontrar áreas por encima de 3000 m s.n.m. libres de hielo, al menos una parte del año, está limitada a latitudes inferiores a los 40°, aproximadamente. Por lo tanto, no son muchas las oportunidades que ofrece nuestro planeta para estudiar, directamente, efectos como los de las radiaciones ultravioletas de mayor intensidad, o los de la circulación de materiales en altitudes medias de la troposfera, sobre ecosistemas terrestres y acuáticos. Sierra Nevada, con alturas superiores a 3000 m y, aproximadamente, 37° de latitud Norte es uno de los pocos lugares de la Tierra que permite estos estudios. Además, su localización geográfica le da un especial interés en el estudio del transporte troposférico.

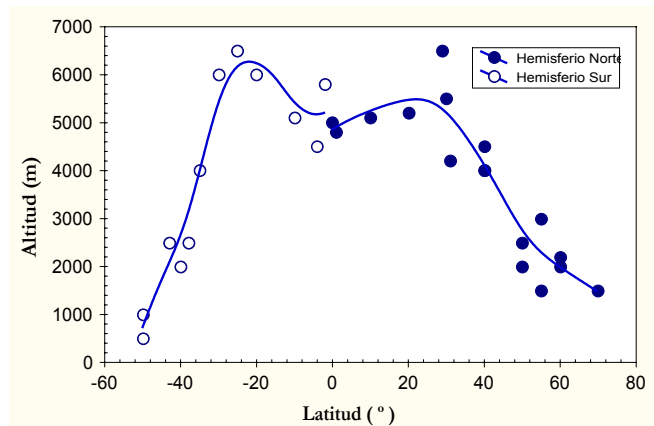


Figura 1: Cota de nieve permanente en función de la latitud de las montañas de la Tierra (elaborada a partir de datos tomados de Löffler 1969).

Los aerosoles en la región mediterránea

Estamos aún lejos de comprender la magnitud del transporte troposférico de partículas en suspensión (aerosoles) y su significado para los ecosistemas terrestres y acuáticos. Desde una perspectiva global, se admite que el aporte principal de aerosoles inorgánicos lo produce la erosión eólica y que son las áreas desérticas las principales suministradoras, superando con mucho a otras fuentes tales como fuegos, erupciones volcánicas o emisiones relacionadas con actividades antropogénicas (Schlesinger 1997). Por sus dimensiones, el Sahara es una de las principales áreas de la Tierra que aporta aerosoles a la atmósfera, contribuyendo con hasta $670 \cdot 10^6$ t año⁻¹ (D'Almeida 1986). La movilización del polvo sahariano suele ocurrir a impulsos, con entradas masivas, puntuales, en la troposfera. Estas entradas son transportadas durante miles de kilómetros en forma de "plumas" en alturas comprendidas, en su mayor parte, entre 1500 y 4000 m s.n.m. (Talbot et al. 1986). Estos aerosoles son movilizados principalmente hacia el Atlántico, que lo cruzan en 5-7 días, notándose sus efectos en el Caribe (Carlson & Prospero 1972) o en la cuenca del Amazonas (Swap et al. 1992), y hacia el Mediterráneo, estimándose entre 80 y $120 \cdot 10^6$ t año⁻¹ la cantidad de polvo sahariano transportado hacia Europa. De hecho, la deposición anual del polvo sahariano sobre el Mediterráneo occidental supone una sedimentación de partículas en su lecho equivalente a los sedimentos descargados por el río Ródano en el mismo plazo de tiempo (Löye-Pilot et al. 1986).

Si admitimos que el ritmo de deposición hacia el norte es similar al que se produce hacia el Atlántico, donde se ha estimado que el 70% del polvo sahariano sedimenta en los primeros 2000 Km desde el punto de origen (Jaenicke and Schütz, 1978), la Península Ibérica, cuyo borde sur está a menos de 2000 Km del centro del Sahara, debe estar afectada en gran medida por esta deposición. Investigaciones recientes en el noreste de la Península Ibérica (Montseny) documentan la importancia de la deposición

anual de polvo atmosférico, con origen fundamentalmente africano, estimándola en $5,3 \text{ g m}^{-2}$ (Ávila et al. 1997). Similarmente, Sierra Nevada debe recibir cantidades especialmente elevadas de polvo sahariano. Sin embargo, la magnitud de los aportes atmosféricos y sus efectos sobre los ecosistemas apenas son conocidos en esta zona.

Efectos de los aerosoles: el caso de los lagos de alta montaña de Sierra Nevada

La precipitación de polvo sahariano contiene cantidades elevadas de materia particulada y de iones solubles que suministran elementos importantes para los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas (Löye-Pilot et al. 1986). De especial significado es el alto contenido en calcio, que proporciona una importante capacidad de amortiguación ácida a las aguas. Estos aportes suponen hasta el 45 % de las necesidades de calcio de las encinas del Montseny (Ávila et al. 1998). Muy importantes son también los contenidos en nutrientes como compuestos inorgánicos de nitrógeno y de fósforo solubles. De hecho, Talbot et al. (1986) han encontrado concentraciones de $0.79 \mu\text{g (m}^3 \text{ STP)}^{-1}$ de NO_3^- y $0.26 \mu\text{g (m}^3 \text{ STP)}^{-1}$ de $\text{PO}_4^{3(-)}$ en el interior de una masa de aire sahariano a 2500 m s.n.m. Dado que en el noroeste de África se sitúan las dos terceras partes de las reservas de rocas fosfatadas del mundo, en gran parte en yacimientos superficiales, es de esperar que el polvo sahariano transporte cantidades importantes de fósforo.

En los sistemas acuáticos oligotróficos la importancia de los aportes de nutrientes atmosféricos ha sido demostrada desde hace tiempo. Los aportes de fósforo pueden hacer que algunos lagos de cuencas de captación pequeñas pierdan el carácter de oligotróficos como ocurre en el norte de Irlanda (Gibson et al., 1995). Los aportes atmosféricos también pueden contribuir significativamente al ciclo del carbono en los sistemas acuáticos. Sin embargo, su utilización por los organismos y la cantidad relativa frente a otras fuentes de carbono orgánico alóctono es una cuestión poco explorada (Cifuentes & Eldridge 1998). Las entradas atmosféricas deben jugar un papel importante en los lagos de alta montaña, con cuencas de captación pequeñas, y que, por su localización remota, no están sometidos a actividades antrópicas importantes.

Sierra Nevada es el primer macizo montañoso importante en el continente europeo que recibe el flujo de aerosoles procedentes del sur. Las glaciaciones sólo dejaron su huella en la parte más elevada y, por eso, encontramos una serie de pequeñas lagunas glaciares situadas entre los 2800 y los 3100 m s.n.m. Las investigaciones realizadas en estas lagunas apoyan la idea de que son afectadas de forma importante por el flujo de aerosoles. Existen lagunas en Sierra Nevada con fuerte limitación por fósforo junto con otras en las que hay fósforo en exceso. La explicación de este hecho plantea un problema porque la naturaleza de la roca, esencialmente silíceo, de las cuencas de captación de las lagunas no es tan distinta como para suponer diferencias importantes en los nutrientes que reciben por escorrentía. En un trabajo reciente (Morales-Baquero et al. 1999) hemos puesto de manifiesto que la proporción de nitrógeno inorgánico disuelto respecto de la de fósforo reactivo soluble (relación DIN:SRP) es muy baja en las lagunas con menores cuencas de captación, pero que esta proporción aumenta progresivamente en las lagunas según se incrementa el tamaño de sus cuencas. Esto sugiere que las entradas directas de nutrientes a las lagunas por precipitación atmosférica, más importante en las lagunas con cuencas de captación más pequeñas,

aportan proporcionalmente más fósforo que las entradas por escorrentía, que incrementan su importancia relativa al aumentar el tamaño de las cuencas de captación. De confirmarse la importancia de las entradas atmosféricas se resolvería el problema planteado y se avanzaría en la comprensión de otros hechos asociados como la variación en la estructura de las comunidades planctónicas de estas lagunas (Morales-Baquero & Conde-Porcuna, en prensa). Finalmente, se podría establecer la aportación atmosférica de nutrientes para una amplia área del sur de la Península Ibérica y calibrar su flujo hacia el Norte.

Recapitulación

A pesar de la escasez de los sistemas de alta montaña, España posee dos enclaves cruciales para el estudio y seguimiento de los aerosoles producidos por el Sahara, la región árida más grande del Planeta: el Teide, que permite estudiar el flujo de aerosoles hacia el Atlántico, y Sierra Nevada, que lo permite en su camino hacia Europa. Estos flujos están determinados por la circulación atmosférica a gran escala, cuyo patrón general cambia asociado a ciertos índices como el descrito para la oscilación Nor-Atlántica (Moulin et al. 1997) y, por lo tanto, resultan sensibles al cambio climático. Sin duda, la relevancia de estos emplazamientos se verá acrecentada en un futuro próximo.

La conservación de la naturaleza está más que justificada por sí misma, pero para el público de mentalidad pragmática querríamos hacer hincapié en que el estudio de los ecosistemas de alta montaña, poco alterados, encierra las claves de multitud de procesos. Si desciframos estas claves abriremos infinitud de posibilidades en el manejo, control y predicción de los cambios en muchos otros ecosistemas cuyo funcionamiento está alterado por la actividad humana. Por ello hacemos un llamamiento a las políticas de conservación y apoyo a la investigación de estos ecosistemas, verdaderas atalayas de la troposfera.

Referencias

- Avila, A., Queralt, I. y Alarcón, M. 1997. Mineralogical composition of African dust delivered by red rains over northeastern Spain. *Journal of Geophysical Research* 102:21977-21996.
- Avila, A., Alarcón, M. y Queralt, I. 1998. The chemical composition of dust transported in red rains: its contribution to the biogeochemical cycle of a holm oak forest in Catalonia (Spain). *Atmospheric Environment*. 32:179-191.
- Carlson, T. N. y Prospero, J.M. 1972. The large-scale movement of Saharan air outbreaks over the northern equatorial Atlantic. *Journal of Applied Meteorology* 11:283-297.
- Chadwick, O. A., Derry, L. A., Vitousek, P. M., Huebert, B. J. y Hedin, L. O., 1999. Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* 397:491-497.
- Cifuentes, L. A. y Eldridge, P. M. 1998. A mass -and isotope- balance

model of DOC mixing in estuaries. *Limnology and Oceanography* 43: 1872-1882.

D'Almeida, G. A. 1986. A model for Saharan dust transport. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 25:903-916.

Gibson, C. E., Wu, Y. y Pinkerton, D. 1995. Substance budget of an upland catchment: the significance of atmospheric phosphorus inputs. *Freshwater Biology* 33:385-392.

Jaenicke, R. y Schütz, L. 1978. Comprehensive study of physical and chemical properties of the surface aerosols in the Cape Verde Islands region. *Journal of Geophysical Research* 83:3585-3589.

Löffler, H. 1969. High altitude lakes in Mt. Everest region. *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Limnologie* 17:373-385.

Löye-Pilot, M. D., Martin J. M. y Morelli, J. 1986. Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature* 321:427-428.

Morales-Baquero, R., Carrillo, P., Reche, I. y Sánchez-Castillo, P. 1999. The nitrogen:phosphorus relationship in high mountain lakes: effects of the size of catchment basins. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 56:1809-1817.

Morales-Baquero, R. y Conde-Porcuna, J. M. (2000). Effect of the catchment areas on the abundance of zooplankton in high mountain lakes of Sierra Nevada (Spain). *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Limnologie* 27: (in press).

Moulin, C., Lambert, C. E., Dulac, F. y Dayan, U. 1997. Control of atmospheric export of dust from North Africa by the North Atlantic Oscillation. *Nature* 387:691-694.

Schlesinger, W.H. 1997. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. Academic Press, Nueva York.

Swap, R., Garstang, M., Greco, S., Talbot, R. y Källberg, P. 1992. Saharan dust in the Amazon Basin. *Tellus* 44B: 133-149.

Talbot, R. W., Harriss, R. C., Browell, E. V., Gregory, G. L., Sebacher, D. I. y Beck, S. M. 1986. Distribution and Geochemistry of Aerosols in the Tropical North Atlantic Troposphere: Relationship to Saharan Dust. *Journal of Geophysical Research* 91:5173-5182.

Velinsky, D. J., Wade, T. L. y Wong, G. T. F. 1986. Atmospheric deposition of organic carbon to Chesapeake Bay. *Atmospheric Environment* 20:941-947.