

Exportación de nutrientes en las cuencas hidrográficas de Latinoamérica: una recopilación

Miguel Álvarez-Cobelas^{1*} y David G. Angeler²

¹Instituto de Recursos Naturales (CSIC), Serrano 115 dpdo., E-28006 Madrid, España

²Instituto de Ciencias Ambientales, Universidad de Castilla-La Mancha, Av. Carlos III s/n., E-45071 Toledo, España

Recibido 9 Febrero 2007, revisado 27 Febrero 2007, aceptado 28 Febrero 2007

Nutrient export by Latin-American catchments: a compilation

Abstract

The available information on organic carbon-, nitrogen- and phosphorus export by Latin-American catchments is compiled, also including data on wet atmospheric deposition. TOC export ranges 21.00-126 kg C/ha/year, whereas DOC export amounts to 14.92-764.67 kg C/ha/year. TN flux and nitrate export were 0.50 - 46.67 kg N/ha/year and 0.001-16.57 kg N/ha/year, respectively. Wet deposition of nitrate ranges 1.50-14.21 kg N/ha/year. TP flux varies between 0.04 and 4.50 kg P/ha/year, whereas that of SRP ranges 0.002-3.17 kg P/ha/year. Control variables of nutrient export in Latin-American catchments are mostly of climatic nature (rainfall, runoff) and explain a high fraction of overall variability (31-86%), but also inhabitant density and the pastureland percentage of catchment area are important for nitrogen variability. No relationship between environmental variates and phosphorus export has been found, perhaps because only little degraded watersheds have been studied so far. Nitrogen and phosphorus export variability appears to be wider in catchments of Canada and USA which also suffer from a wider range of anthropogenic stress. Generally, nutrient export research in Latin-American catchments has been carried out in more or less pristine watersheds and by non local scientists. Future local research agendas should engage in comparative studies of pristine and degraded catchments to better understand the biogeochemical role of fluvial ecosystems in Latin America.

Keywords: organic carbon, nitrogen, phosphorus, fluxes, Latin America.

Resumen

Recopilamos aquí la información disponible sobre la exportación de carbono orgánico, nitrógeno y fósforo en las cuencas de Latinoamérica, incluyendo también los escasos datos existentes sobre la deposición húmeda de nitrógeno atmosférico. La exportación de carbono orgánico total oscila entre 21.00 y 126.00 kg C/ha/año, mientras que la de carbono orgánico disuelto lo hace entre 14.92 y 764.67 kg C/ha/año. La exportación de nitrógeno total se encuentra entre 0.50 y 46.67 kg N/ha/año. El flujo anual de nitrato varía 0.001 y 16.57 kg N/ha/año. La deposición atmosférica de nitrato asociada a la precipitación muestra un rango de 1.50-14.21 kg N/ha/año. La exportación de fósforo oscila entre 0.04 y 4.50 kg P/ha/año, mientras que el flujo de ortofosfato varía entre 0.002 y 3.17 kg P/ha/año. En general, las variables de control de estos nutrientes son de índole climática (precipitación, escorrentía) y explican bastante varianza (31-86%), aunque pueda haber también covariación con el número de habitantes o el porcentaje de pastos en las cuencas en el caso del nitrógeno. Para el fósforo, sin embargo, no hemos encontrado correlación alguna con ninguna de las variables ambientales medidas. Comparando esta información con la registrada en las cuencas de Canadá y EEUU, se observa que la variabilidad de la exportación de nitrógeno y fósforo en estas últimas cuencas suele ser mayor, cosa que no sucede con la de carbono, y que las variables de control tienden a ser más diversas que en las cuencas latinoamericanas, aunque la importancia de los efectos antrópicos aumente en ellas. En general, puede afirmarse que estos flujos de nutrientes en Latinoamérica han sido estudiados en cuencas poco afectadas por la acción humana y lo han sido por investigadores no latinoamericanos en su mayoría. Los estudios futuros debieran comparar cuencas prístinas y cuencas degradadas, con objeto de aumentar la comprensión del papel biogeoquímico de los ecosistemas fluviales de Latinoamérica.

Palabras clave: carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, flujos, Latinoamérica.

* Autor para correspondencia

E-mail: malvarez@ccma.csic.es; fax: +34915640800

Introducción

El gran desarrollo de la biogeoquímica en las últimas décadas se ha visto impulsado por los problemas ambientales incluidos dentro de lo que se ha denominado “Cambio Global”. Un tema favorito de estudio ha sido el de la exportación de elementos químicos por las cuencas hidrográficas, pues se asume que los cauces fluviales pueden funcionar como “aparato excretor” de los elementos químicos presentes en los organismos, la atmósfera, el agua y los suelos de las cuencas hidrográficas. La presencia de dichos elementos en el agua fluvial sería, por tanto, un indicador de cómo los factores ambientales que actúan sobre la cuenca hidrográfica, incluyendo los antrópicos, inciden sobre la retención o la exportación de los elementos. Esta idea, sugerida por el ingeniero forestal neoyorquino Frank Bormann en 1960 (Bormann, 1996), se comienza a plasmar en los estudios de Bormann y Likens (1967), quienes sugieren las primeras cifras de exportación de elementos químicos por distintas cuencas hidrográficas del bosque de Hubbard Brook (en el estado de New Hampshire, USA), alteradas experimentalmente con objeto de apreciar qué elementos se retienen y cuáles se exportan bajo determinados tipos de gestión ambiental. La importancia ambiental de la cuenca hidrográfica como unidad de estudio es recalada en la lección magistral que Noel Hynes presenta en el XIX Congreso Internacional de Limnología, celebrado en Canadá (Hynes, 1975). La exportación de elementos químicos por las cuencas hidrográficas queda definitivamente consagrada como uno de los principales temas de estudio biogeoquímico en el texto fundacional de Schlesinger (2000).

Entre los elementos químicos estudiados en las cuencas hidrográficas, gozan de trato preferente los nutrientes y no es extraño el porqué. Los nutrientes son esenciales para el crecimiento vegetal y, si son exportados, pueden favorecer dicho crecimiento en lugares más o menos alejados de la cuenca en cuestión. Dicha exportación, a menudo, se ve favorecida por una serie de actividades humanas, como la fertilización agrícola, la deforestación o la contaminación de origen urbano, agrícola o ganadero (Likens et al., 1977; Galloway et al., 2004).

Dado que el agua de las cuencas hidrográficas puede usarse en zonas alejadas de las mismas para abastecimiento a las poblaciones, una exportación excesiva de nutrientes puede empeorar la calidad de la misma debido a los efectos indirectos de los nutrientes (eutrofización en el medio continental o en el marino, contaminación de acuíferos, etc.; Vollenweider, 1968; Burt et al., 1993; Sarmiento y Gruber, 2006). Desde el punto de vista sanitario, la exportación de nutrientes puede afectar al Ser Humano a través del agua potable. Según Bartlett (1996), se producen más de 3.5 millones de muertos al año por enfermedades asociadas al agua, parte de las cuales están inducidas por el exceso de nutrientes que transporta, procedentes de la exportación desde cuencas situadas aguas arriba de la captación de la misma. Además del interés estrictamente científico de aumento del conocimiento sobre los mecanismos ambientales de la exportación de nutrientes por las cuencas (Fisher et al. 2004; Likens 2004), ese aspecto sanitario ha incentivado el desarrollo de estudios de esa índole, el número de los cuales aumenta sin cesar de día en día. Los principales nutrientes estudiados han sido el carbono en su vertiente orgánica, el nitrógeno y el fósforo.

Dada la importancia de la agricultura en la mayor parte del mundo, no sorprende que el mayor número de estudios de exportación se haya dedicado al nitrógeno, seguido del fósforo, originado mayoritariamente por el metabolismo humano, y finalmente del carbono orgánico. En este último caso, a pesar de que también el metabolismo es una causa principal de excreción, se ha desarrollado más el aspecto de carbono orgánico disuelto, quizá por la extraordinaria importancia que éste tiene para el metabolismo bacteriano en el ambiente acuático (Fenchel et al., 2000).

El número de estudios sobre exportación de nutrientes no deja de aumentar (Caraco et al., 2003; Smith et al., 2005). Obviamente, las escalas temporales de trabajo son de lo más variado, desde la escala de días (Harris y Heathwaite, 2005), útil para apreciar los efectos de las crecidas súbitas de caudal, hasta la escala anual (Cairns y Lajtha, 2005) y, en algunos casos, interanual (Schilling y Zhang, 2004). Quizá la unidad temporal preferida sea la anual porque integra la variabilidad estacio-

Tabla 1. Exportación anual (kg C/ha/año) de carbono orgánico total (COT), carbono orgánico particulado (COP) y carbono orgánico disuelto (COD) por las cuencas latinoamericanas.

| Referencia bibliográfica | Año de análisis | Nombre de la Cuenca | País | Flujo COT | Flujo COP | Flujo COD |
|---------------------------|--------------------------------|----------------------|---|--------------------|--------------------------------|-----------|
| Brinson (1976) | 1971 | Polochic | Guatemala | 48.00 | | |
| | | San Marcos | Guatemala | 21.00 | | |
| | | Sauce | Guatemala | 32.00 | | |
| DePetris y Paolini (1991) | | Paraná | Brasil-Bolivia-Paraguay-Uruguay-Argentina | 28.00 | 5.00 | 23.00 |
| Johnson et al. (2006) | 2004 | Juruena-(cuenca OW) | Brasil | | | 154.79 |
| | | Juruena-(cuenca UW) | Brasil | | | 444.05 |
| Krusche et al. (2002) | 1996 | Atibaia-1 | Brasil | | | 51.46 |
| | | Atibaia-2 | Brasil | | | 197.01 |
| | | Atibaia-3 | Brasil | | | 764.67 |
| | | Jaguari-1 | Brasil | | | 52.60 |
| | | Jaguari-2 | Brasil | | | 115.36 |
| | | Piracicaba-1 | Brasil | | | 156.29 |
| | | Piracicaba-2 | Brasil | | | 231.51 |
| Lewis y Saunders (1989) | 1982-1985 | Orinoco | Colombia-Venezuela | | | 14.92 |
| Lewis et al. (1987) | 1982-1984 | Caura | Venezuela | 123.00 | 27.24 | 96.80 |
| McDowell y Asbury (1994) | 1984 | Icados | Puerto Rico | 103.30 | 20.00 | 83.30 |
| | | Soñadora | Puerto Rico | 75.40 | 6.40 | 69.00 |
| | | Toronja | Puerto Rico | 30.23 | 4.13 | 26.10 |
| Newbold et al. (1995) | 1993 | Quebrada El Jobo | Costa Rica | | | 26.00 |
| | | Quebrada Kathia | Costa Rica | | | 19.00 |
| | | Quebrada Marilyn | Costa Rica | | | 24.00 |
| | | Quebrada Zompopa | Costa Rica | | | 43.00 |
| | | Tempisquito | Costa Rica | | | 37.00 |
| | | Tempisquito Sur | Costa Rica | | | 27.00 |
| | | Richey et al. (1990) | 1982-1984 | Amazonas en Obidos | Perú-Colombia-Venezuela-Brasil | 85.00 |
| Amazonas en Vargem Grande | Perú-Colombia-Venezuela-Brasil | | | 111.00 | 63.00 | 48.00 |
| Icá | Colombia-Perú-Brasil | | | 77.00 | 21.00 | 56.00 |
| Japurá | Colombia-Brasil | | | 75.00 | 24.00 | 51.00 |
| Juruá | Perú-Brasil | | | 42.00 | 10.00 | 32.00 |
| Jutai | Brasil | | | 101.00 | 14.00 | 87.00 |
| Madeira | Bolivia-Brasil | | | 36.00 | 17.00 | 19.00 |
| Negro | Colombia-Venezuela-Brasil | | | 126.00 | 6.00 | 120.00 |
| Purús | Perú-Bolivia-Brasil | | | 59.00 | 11.00 | 48.00 |
| Saunders y Lewis (1988) | 1982-1985 | Apure | Venezuela | | | 35.40 |

nal de pluviosidad, caudal, fenología de los organismos y actividades humanas. Y esa escala temporal será la elegida por nosotros con objeto de favorecer la comparación entre los distintos estudios.

En cuanto a la distribución geográfica de la información, varía bastante. Mayoritariamente, se ha compilado en América del Norte y Europa, siendo más escasa la información disponible para Latinoamérica. El propósito de este artículo es describir qué datos hay publicados sobre la exportación de nutrientes por las cuencas hidrográficas latinoamericanas y, señalando las omisiones, contribuir a incentivar más estudios de esa índole.

Material y Métodos

El periodo de tiempo que abarca esta revisión abarca desde 1975 a 2006. Se ha realizado una búsqueda bibliográfica en revistas nacionales e internacionales que pudieran publicar datos sobre exportación de nutrientes en América Latina; también se ha obtenido información de la base de datos LOICZ, dedicada a la eutrofización costera y difundida por Internet (<http://data.ecology.su.se/MNODE/>). No se han considerado aquellos estudios dedicados a evaluar la exportación de nutrientes por las granjas de camarones, debido a que este estudio pretende describir la exportación total de nutrientes por las cuencas y no la debida a una única actividad humana. Las Tablas 1 y 2 indican las referencias encontradas, así como los datos principales repartidos por países. El modo de dar la información es como flujo de nutriente por unidad de superficie de cuenca y en el plazo de un año, cuyas unidades serían kg (C, N ó P)/ha/año. Dicha información se ha extraído de las figuras y tablas de datos presentes en los artículos, monografías y páginas electrónicas consultadas. En ocasiones, ha sido preciso integrar al lapso temporal de un año la información de tipo estacional, pero en esos casos sólo se han empleado aquellos estudios cuya periodicidad de muestreos fuera, al menos, mensual, ya que una frecuencia menor introduce mucha incertidumbre en los cálculos.

Los nutrientes estudiados han sido el carbono orgánico, el nitrógeno y el fósforo. Cuando ha sido

posible, se ha recopilado información sobre los flujos fluviales de las formas particulada, disuelta y total del carbono orgánico. En cuanto al nitrógeno, hemos buscado información sobre los flujos de exportación fluvial de nitrato, amonio, nitrógeno orgánico disuelto y particulado y nitrógeno total; también se han recopilado los de la deposición atmosférica inducida por la lluvia sobre las cuencas. Por último, para el fósforo se ha considerado el flujo de exportación del ortofosfato y del fósforo total por las cuencas hidrográficas.

Además de los flujos, de las publicaciones se extrajo información sobre los posibles factores ambientales de control de aquéllos, tales como la pluviosidad anual, la escorrentía anual, el caudal anual, la superficie de la cuenca, su número de habitantes, la densidad de éstos y el porcentaje de cada cuenca dedicado a distintos usos (agrícola, forestal, pastos). El objetivo perseguido fue relacionar esos factores con la exportación de nutrientes, pero -como se verá más abajo- la cantidad de datos disponibles fue muy escasa en la mayor parte de las ocasiones para conseguir suficientes grados de libertad que permitieran ejecutar pruebas estadísticas con cierta fiabilidad.

Resultados

La exportación de carbono orgánico total se ha estimado hasta la fecha en 34 cuencas latinoamericanas (Tabla 1) y oscila entre 21.00 (río San Marcos) y 126.00 kg C/ha/año (río Negro), mientras que la de carbono orgánico disuelto lo hace entre 14.92 (río Orinoco) y 764.67 kg C/ha/año (una cuenca del río Atibaia, Brasil). La aparente discrepancia entre las cifras máximas de una y otra variable se debe a que no se midieron en la misma cuenca, ya que es frecuente que sólo se mida el carbono disuelto, pero no simultáneamente el total.

El flujo de carbono orgánico total se relaciona estadísticamente con el de carbono orgánico disuelto ($R^2 = 0.79$, $p < 0.05$), con la precipitación ($R^2 = 0.86$, $p < 0.05$; Fig. 1 panel superior) y con la escorrentía ($R^2 = 0.86$, $p < 0.05$), en todos los casos de manera positiva, es decir, el flujo anual de carbono total aumenta con la pluviosidad y con la escorrentía anuales. La exportación de carbono

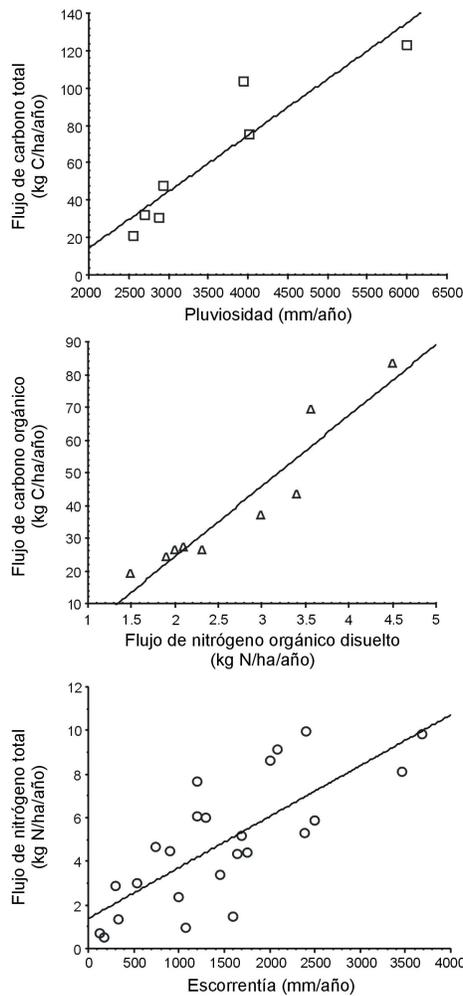


Fig. 1. *Panel superior.* Relación entre la pluviosidad anual (PL) y la exportación anual de carbono orgánico total (COT) en las cuencas latinoamericanas. La ecuación de regresión es $COT = 0.03 \cdot PL - 45.73$. *Panel intermedio.* Relación entre los flujos de exportación del nitrógeno orgánico disuelto (NOD) y del carbono orgánico disuelto (COD) en las cuencas latinoamericanas. La ecuación de regresión es $COD = 21.60 \cdot NOD - 18.91$. *Panel inferior.* Relación entre la escurrentía anual (E) y la exportación anual de nitrógeno total (NT) en las cuencas latinoamericanas. La ecuación de regresión es $NT = 0.002 \cdot E + 1.381$.

orgánico disuelto covaría de manera directa con la de nitrato ($R^2 = 0.81$, $p < 0.05$), con la de nitrógeno orgánico disuelto ($R^2 = 0.90$, $p < 0.05$; Fig. 1, panel intermedio) y con la escurrentía ($R^2 = 0.59$, $p < 0.05$), pero la de carbono orgánico particulado no se relaciona estadísticamente con ninguna otra de

las variables medidas ($p > 0.05$).

La exportación de nitrógeno total se ha cuantificado en 36 cuencas latinoamericanas (Tabla 2) y se encuentra entre 0.50 (río Paraná) y 46.67 kg N/ha/año (cuenca n° 2 del río Piricicaba, Brasil). El flujo anual de nitrato se ha medido en un mayor

Tabla 2. Flujos de exportación anual de nitrógeno total (NT), nitrato, amonio, nitrógeno orgánico disuelto (NOD), nitrógeno orgánico particulado (NOP), fósforo total (PT) y ortofosfato por las cuencas latinoamericanas.

| Referencia bibliográfica | Año de análisis | Nombre de la Cuenca | País | NT | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | NOD | NOP | PT | PO ₄ ³⁻ |
|---------------------------|------------------------------|---------------------|---|--------------------------|------------------------------|------------------------------|------|------|-------|-------------------------------|
| | | | | ------(kg N/ha/año)----- | | | | | | -----(kg P/ha/año)---- |
| Caraco y Cole (1999) | | Magdalena | Colombia | 2.35 | | | | | | |
| | | Orinoco | Colombia-Venezuela | 0.96 | | | | | | |
| | | Paraná | Brasil-Bolivia-Paraguay-Uruguay-Argentina | 0.5 | | | | | | |
| | | Uruguay | Brasil-Paraguay-Uruguay-Argentina | 1.35 | | | | | | |
| DePetris y Paolini (1991) | | Paraná | Brasil-Bolivia-Paraguay-Uruguay-Argentina | | | | | | 2.5 | |
| Filoso et al. (2003) | 1995-1996 | Piracicaba-1 | Brasil | 7.25 | | | | | | |
| | | Piracicaba-2 | Brasil | 18.34 | | | | | | |
| | | Piracicaba-3 | Brasil | 23.91 | | | | | | |
| | | Piracicaba-4 | Brasil | 6.44 | | | | | | |
| | | Piracicaba-5 | Brasil | 15.02 | | | | | | |
| | | Piracicaba-6 | Brasil | 7.98 | | | | | | |
| | | Piracicaba-7 | Brasil | 1.99 | | | | | | |
| | | Piracicaba-8 | Brasil | 46.67 | | | | | | |
| | | Piracicaba-9 | Brasil | 26.88 | | | | | | |
| | | Piracicaba-10 | Brasil | 31.59 | | | | | | |
| Lesack (1993) | 1984-1985 | Lago Calado | Brasil | 22 | 13.643 | 0.929 | | | 0.087 | 0.02 |
| Lewis et al. (1987) | 1982-1984 | Caura | Venezuela | | | | | | 0.47 | 0.063 |
| Lewis et al. (1999) | | Amazonas en Obidos | Perú-Colombia-Venezuela-Brasil | 6.06 | 1.683 | 0.24 | 1.94 | 2.42 | | |
| | | Apure | Venezuela | 2.87 | 0.411 | 0.13 | 0.8 | 1.54 | 0.68 | |
| | | Braço do Mota | Brasil | 4.31 | 0.604 | 0.14 | 2.87 | 0.7 | | |
| | | Caroní | Venezuela | 5.17 | | 0.61 | 2.35 | 0.75 | | |
| | | Caura | Venezuela | 9.98 | | 0.89 | 4 | 3.64 | | |
| | | Guaviare | Colombia | | 0.942 | 0.31 | | | | |
| | | Icacos | Puerto Rico | 9.8 | 2.545 | 0.68 | 4.79 | 1.8 | | |
| | | Japurá | Colombia-Brasil | 8.6 | 2.044 | | 1.84 | 2.44 | | |
| | | Juruá | Perú-Brasil | 4.45 | 1.824 | | 1.21 | 1.44 | | |
| | | Madeira | Bolivia-Brasil | 4.63 | 1.303 | | 1.3 | 2.03 | | |
| | | Meta | Colombia-Venezuela | | 1.783 | 0.37 | | | | |
| | | Negro | Brasil-Colombia-Venezuela | 1.47 | 0.671 | | 2.48 | 0.02 | | |
| | | Orinoco | Colombia-Venezuela | 5.98 | 1.042 | 0.33 | 2.08 | 2.41 | | |
| | | Paraguay | Brasil-Bolivia-Argentina-Paraguay | 0.73 | | | | 0.16 | | |
| Solimões | Colombia-Perú-Bolivia-Brasil | 7.66 | 2.405 | | 1.36 | 3.9 | | | | |

Tabla 2. Continuación.

| Referencia bibliográfica | Año de análisis | Nombre de la Cuenca País | | NT | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | NOD | NOP | PT | PO ₄ ³⁻ |
|--|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------------|------|------|------|-------------------------------|
| | | | | ------(kg N/ha/año)----- | | | | | | -----(kg P/ha/año)---- |
| Lewis et al. (1999) | | Soñadora | Puerto Rico | 5.9 | 1.403 | 0.3 | 3.74 | 0.47 | | |
| | | Toronja | Puerto Rico | 4.4 | 0.902 | 0.26 | 2.8 | 0.48 | | |
| | | Trombetas | Brasil | 3.01 | | | | | | |
| Likens et al. (1977) | 1975 | Negro | Brasil-Colombia-Venezuela | 4.7 | | | | | 0.1 | |
| McDowell y Asbury (1994) | 1984 | Icacos | Puerto Rico | 8.08 | 2.38 | | | | 4.5 | |
| | | Soñadora | Puerto Rico | 5.28 | 1.3 | | | | 3.57 | |
| | | Toronja | Puerto Rico | 3.39 | 0.75 | | | | 2.32 | |
| McDowell et al. (1995) | 1984 | Buccament | Isla de San Vicente | | 4.81 | 2.54 | | | | 0.13 |
| | | Layou | Isla de Dominica | | 2.69 | 0.64 | | | | 0.43 |
| | | Troumassee | Isla de Santa Lucía | | 1.84 | 0.41 | | | | 0.08 |
| Newbold et al. (1995) | 1993 | Quebrada El Jobo | Costa Rica | | 0.22 | | 2 | | | |
| | | Quebrada Kathia | Costa Rica | | 0.29 | | 1.5 | | | |
| | | Quebrada Marilín | Costa Rica | | 0.2 | | 1.9 | | | |
| | | Quebrada Zompopa | Costa Rica | | 0.31 | | 3.4 | | | |
| | | Tempisquito | Costa Rica | | 0.31 | | 3 | | | |
| | | Tempisquito Sur | Costa Rica | | 0.25 | | 2.1 | | | |
| Oyarzún (1998) | et al. 1995 | Monumento Natural Alerce Costero | Chile | | 0.692 | | | 1.04 | 0.04 | |
| Oyarzún (2004) | et al. 1999 | Valle Antillanca | Chile | | 0.6 | 0.3 | 5.2 | | | |
| Restrepo (2006) | et al. | Atrato | Colombia | | 16.57 | | | | | 0.69 |
| | | Magdalena | Colombia | | 7.44 | | | | | 1.88 |
| Smith et al. (2003): http://data.ecology.su.se/MNODE/ | | Amazonas | Perú-Colombia-Venezuela-Brasil | | 0.384 | | | | | 0.233 |
| | | Bahía de Altata-Ensenada del Pabellón | México | | 0.292 | | | | | 0.434 |
| | | Bahía Nueva | Argentina | | 0.311 | | | | | 0.138 |
| | | Carretas-Pereyra | México | | 0.099 | | | | | 0.623 |
| | | Chantuto-Panzacola | México | | 0.393 | | | | | 1.859 |
| | | Ciénaga Grande de Santa Marta | Colombia | | 0.159 | | | | | 0.445 |
| | | Estero de Punta Banda | México | | 0.083 | | | | | 0.176 |
| | | Golfo de Arauco | Chile | | 0.36 | | | | | 0.011 |
| | | Guayas | Ecuador | | 0.375 | | | | | 0.358 |
| | | Lagoa Conceição | Brasil | | 0.079 | | | | | 0.084 |
| | | Laguna de Mecocan | México | | 0.101 | | | | | 0.638 |

Tabla 2. Continuación.

| Referencia bibliográfica | Año de análisis | Nombre de la Cuenca | | País | NT | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | NOD | NOP | PT | PO ₄ ³⁻ |
|---|-----------------|---------------------|-----------|-----------------------|--------|------------------------------|------------------------------|-----|-----|------------------------|-------------------------------|
| | | | | | | ------(kg N/ha/año)----- | | | | -----(kg P/ha/año)---- | |
| Smith et al. (2003): http://data.ecology.su.se/MNODE/ | | Laguna de | Términos | México | | 0.618 | | | | | 0.072 |
| | | Lagunas | Carmen y | México | | 0.096 | | | | | 0.73 |
| | | Manguaba | | Brasil | | 0.119 | | | | | 0.149 |
| | | Maricá- | Guarapina | Brasil | | 0.352 | | | | | 3.169 |
| | | Paranaguá | | Brasil | | 1.038 | | | | | 0.789 |
| | | Piauí | | Brasil | | 0.009 | | | | | 0.009 |
| | | Piratininga- | Itaipú | Brasil | | 0.001 | | | | | 0.002 |
| | | Río de la Plata | | Argentina- Uruguay | | 0.277 | | | | | 0.107 |
| | | Sergipe | | Brasil | | 0.493 | | | | | 0.337 |
| | | Teacapan-Agua | Brava- | Marismas | México | | 0.093 | | | | 0.319 |
| | Nacionales | | | | | | | | | | |
| Williams y Melack (1997) | 1990 | Braço do Mota | | Brasil | 9.14 | 0.824 | | | | 0.48 | 0.08 |

número de cuencas, en 52 concretamente (Tabla 2), estando su variabilidad entre 0.001 (cuenca costera de Piratininga-Itaipu, en Brasil) y 16.57 kg N/ha/año (cuenca del río Atrato, Colombia). El resto de las formas de nitrógeno se han medido en muchas menos ocasiones. Así, la exportación de amonio sólo lo ha sido en 15 ocasiones, oscilando entre 0.13 (cuenca del río Apure, Venezuela) y 2.54 kg N/ha/año (cuenca del río Buccament, en la isla caribeña de San Vicente). La exportación de nitrógeno orgánico disuelto se ha medido en 20 cuencas hidrográficas, con un rango de variabilidad entre los 0.80 del río Apure (Venezuela) y los 4.79 kg N/ha/año del río Icacos (Puerto Rico). Finalmente, la exportación de nitrógeno orgánico particulado se ha cuantificado en 16 cuencas y varía entre 0.02 (río Negro) y 3.90 kg N/ha/año (río Solimões).

La deposición atmosférica de nitrato debida a la lluvia se ha medido en algunas cuencas latinoamericanas (Tabla 3), variando entre 1.50 (cuenca del río Orinoco) y 14.21 kg N/ha/año (una cuenca del brasileño río Piracicaba).

La relación entre exportación de nitrógeno total y exportación de nitrato es muy elevada en las cuencas latinoamericanas ($R^2 = 0.85$, $p < 0.05$) y también se correlaciona positivamente con la escorrentía ($R^2 = 0.58$, $p < 0.05$; Fig. 1, panel inferior), el número de habitantes en la cuenca ($R^2 = 0.43$, $p < 0.05$) y la fertilización nitrogenada de la misma ($R^2 = 0.40$, $p < 0.05$), mientras que lo hace negativamente con el porcentaje de bosque ($R^2 = 0.32$, $p < 0.05$) y de pastizales en la cuenca hidrográfica ($R^2 = 0.38$, $p < 0.05$). El flujo de nitrato, aparte de con el de carbono orgánico disuelto referida más arriba, no se relaciona con ninguna otra variable ($p > 0.05$). El de amonio lo hace positivamente con la escorrentía ($R^2 = 0.42$, $p < 0.05$) y el número de habitantes ($R^2 = 0.58$, $p < 0.05$), mientras que el nitrógeno orgánico disuelto covaría con la precipitación, pero débilmente ($R^2 = 0.31$, $p < 0.05$) y el flujo de nitrógeno orgánico particulado no presenta correlación alguna ($p > 0.05$) con las variables ambientales de las que se tienen datos en cuencas latinoamericanas.

Finalmente, la exportación de fósforo total se ha

Tabla 3. Deposición atmosférica de nitrato con la lluvia (kg N/ha/año) en algunas cuencas latinoamericanas. Se trata sólo, por tanto, de la deposición húmeda.

| Referencia bibliográfica | Año de análisis | Cuenca | Deposición atmosférica |
|--------------------------|-----------------|---|------------------------|
| Caraco y Cole (1999) | | Magdalena | 2.00 |
| | | Orinoco | 1.50 |
| | | Paraná | 2.00 |
| | | Uruguay | 2.00 |
| Filoso et al. (2003) | 1995-1996 | Piracicaba-1 | 13.46 |
| | | Piracicaba-2 | 14.21 |
| | | Piracicaba-3 | 11.09 |
| | | Piracicaba-4 | 13.46 |
| | | Piracicaba-5 | 11.00 |
| | | Piracicaba-6 | 13.22 |
| | | Piracicaba-7 | 10.40 |
| | | Piracicaba-8 | 8.43 |
| | | Piracicaba-9 | 8.80 |
| | | Piracicaba-10 | 11.25 |
| Likens et al. (1977) | 1975 | Negro | 5.60 |
| Oyarzún et al. (1998) | 1995 | Cuenca del Monumento Natural Alerce Costero | 1.71 |
| Oyarzún et al. (2004) | 1999 | Valle Antillanca | 0.6 |

medido únicamente en 9 cuencas y oscila entre 0.04 (cuenca del Monumento Natural Alerce Costero, Chile) y 4.50 kg P/ ha/año (río Icacos, Puerto Rico), mientras que el flujo de ortofosfato varía entre 0.002 (cuenca costera de Piratininga-Itaipú, Brasil) y 3.17 kg P/ha/año (cuenca costera de Maricá-Guarapina, Brasil), habiendo sido medido en 30 cuencas hidrográficas. Ninguna de las dos formas de fósforo muestra correlaciones estadísticamente significativas con otras variables ambientales medidas simultáneamente ($p > 0.05$) y ni siquiera entre sí.

Discusión

La información recopilada aquí pone de manifiesto que aún son pocos los estudios de exportación de nutrientes por las cuencas hidrográficas en Latinoamérica. Los datos disponibles son escasos y, a menudo, les falta la información complementaria necesaria para que puedan relacionarse con determinadas variables ambientales –tan sencillas

como la densidad de habitantes en las cuencas o el caudal anual–, de modo que podamos entender su funcionamiento a partir de las principales variables de control externo. Estos estudios no son sólo interesantes “per se”, sino porque resultan imprescindibles para ilustrar los flujos biogeoquímicos regionales y supra-regionales en el contexto del cambio global (Schlesinger, 2000).

En cuanto al carbono orgánico, hay más variabilidad y valores máximos superiores en Latinoamérica que en Canadá y Estados Unidos (Tabla 4), reflejo de que la exportación de carbono es mayor en las cuencas no alteradas por el hombre, pero más ricas en compuestos húmicos y fúlvicos, de América del Sur (Lewis y Saunders, 1989; Richey et al., 1990). En general, puede decirse que los flujos de nitrógeno presentan menor variabilidad en Latinoamérica que en Estados Unidos y Canadá (Tabla 4), a excepción del caso del nitrógeno orgánico disuelto. Los valores máximos se han observado casi siempre por encima del río Grande, como –por ejemplo– en las cuencas

Tabla 4. Comparación de los rangos de exportación de nutrientes entre las cuencas de Canadá y EEUU y las de Latinoamérica. Todos los datos en kg (C, N o P)/ha/año. La información de Canadá y USA es inédita (Álvarez Cobelas, datos no publicados); la de Latinoamérica procede de las Tablas 1 y 2. COT: carbono orgánico total, COP: carbono orgánico particulado, NT: nitrógeno total, NOD: nitrógeno orgánico disuelto, NOP: nitrógeno orgánico particulado, PT: fósforo total. Las posibles discrepancias entre las exportaciones de formas particuladas y disueltas de un mismo elemento derivan de que no siempre se han medido ambos tipos en las mismas cuencas.

| | Canadá y EEUU | Latinoamérica |
|--|---------------|---------------|
| Exportación de COT | 7.42-123.5 | 21.00-126.00 |
| Exportación de COP | 1.45-5.79 | 4.13-63.00 |
| Exportación de COD | 0.07-216.11 | 14.62-764.67 |
| Exportación de NT | 0.005-111.47 | 0.50-46.67 |
| Exportación de NO ₃ ⁻ | 0.01-106.65 | 0.001-22.24 |
| Exportación de NH ₄ ⁺ | 0.01-9.11 | 0.13-2.54 |
| Exportación de NOD | 0.10-3.49 | 0.80-4.79 |
| Exportación de NOP | 0.02-7.36 | 0.02-3.90 |
| Exportación de PT | 0.001-6.774 | 0.04-4.50 |
| Exportación de PO ₄ ³⁻ | 0.001-51 | 0.002-3.17 |

agrícolas de Ohio e Indiana (Vanni et al., 2001). Algo análogo sucede con el fósforo, que resulta más variable y alcanza máximos de exportación superiores en las cuencas de Canadá y Estados Unidos que en las de Latinoamérica (Tabla 4), fruto de una mayor contaminación urbana en las primeras.

De todos modos, estas comparaciones deben tomarse con precaución debido a que la mayor parte de las investigaciones se han realizado en cuencas poco o nada alteradas, siendo raros los trabajos en cuencas degradadas, muy influidas por el hombre, como son las de grandes conurbaciones o las de agricultura intensiva.

En cuanto a las causas de la exportación de nutrientes, los análisis estadísticos realizados con los datos latinoamericanos apenas permiten adscribir los flujos a causas bien definidas. Así, por ejemplo, los estudios de Caraco y Cole (1999) asocian la exportación de nitrato con la densidad de habitantes en las cuencas, mientras que Smith et al. (2005) encuentran relaciones estadísticamente significativas entre la exportación de nitrato u ortofosfato y el efecto combinado de la escorrentía

y de la densidad poblacional. Nada de esto se ha apreciado aquí, debido a que las cuencas estudiadas en Latinoamérica lo han sido en lugares relativamente poco poblados y, por tanto, escasamente alterados, con abundantes zonas de bosque tropical en buen estado de conservación ambiental aún. Si se ha encontrado una relación estadísticamente significativa entre la escorrentía y la exportación de carbono y nitrógeno totales (Fig. 1, paneles superior e inferior), como también observaron Lewis et al. (1999) para cuencas de todo el continente americano en el caso del nitrógeno o se aprecia para el carbono y la escorrentía en Canadá y Estados Unidos, aunque en este último caso la varianza explicada sea menor ($R^2 = 0.25$, $p < 0.05$; Álvarez Cobelas, datos inéditos).

Otra relación que se había sugerido anteriormente para las cuencas estadounidenses, es la existente entre la concentración de nitrato y la del carbono orgánico disuelto, que covarían según una pauta exponencial negativa (Goodale et al., 2003), mostrando la influencia de la asociación entre las formas carbonadas y nitrógenadas de la materia orgánica. Nosotros, sin embargo, hemos comproba-

do una covariación positiva entre los datos latinoamericanos de exportación de nitrato y COD, lo cual podría explicarse porque el nitrato derivaría primordialmente de la nitrificación del amonio presente en el nitrógeno orgánico disuelto, al relacionarse positivamente con el carbono orgánico (Fig. 1, panel intermedio).

Respecto a la asociación entre exportación de carbono orgánico total y pluviosidad (Fig. 1, panel superior), ya había sido referida por Schlesinger y Melack (1981) para cuencas forestales de la zona templada del mundo y probablemente sea producto del intenso arrastre de la materia orgánica edáfica en las muy lluviosas cuencas tropicales y subtropicales. También hemos comprobado una relación estadísticamente significativa entre carbono orgánico disuelto y escorrentía, vinculada al proceso anterior, aunque la varianza explicada resulte menor.

En las cuencas latinoamericanas, no hemos apreciado relaciones estadísticamente significativas entre la exportación de fósforo u ortofosfato y la de algún factor ambiental de los medidos habitualmente (precipitación, escorrentía, caudal, densidad de habitantes, porcentaje de suelo dedicado a la agricultura, a bosques o a suelo urbano, etc.). En las cuencas de Canadá y Estados Unidos, sin embargo, sí hay unas débiles –aunque significativas– correlaciones con el porcentaje de territorio dedicado a suelo urbano en las cuencas (en el caso de la exportación de fósforo total: $R^2 = 0.12$, $p < 0.05$) y con la densidad de habitantes en cada cuenca (en el caso del ortofosfato: $R^2 = 0.20$, $p < 0.05$; Álvarez-Cobelas, datos inéditos).

Los escasos análisis posibles realizados sobre las variables de control de la exportación de nutrientes por las cuencas de Latinoamérica indican, pues, que los factores climáticos y no los antrópicos, los cuales tienen más importancia en otras zonas del mundo (Caraco et al., 2003; Smith et al., 2005), incluyendo Canadá y USA, son los que determinan el comportamiento biogeoquímico de las mismas. Esto no significa que Latinoamérica carezca de cuencas alteradas o que no presente efectos correlativos de deterioro ambiental, sino que los investigadores han dirigido su atención más a las cuencas prístinas, por ser reductos de ciertos atributos

biogeoquímicos y naturales en el mundo.

En resumen, la información disponible sobre la exportación de nutrientes en las cuencas de Latinoamérica es aún escasa y la mayor parte de ella ha sido obtenida por investigadores extranjeros, los cuales han trabajado mayoritariamente en cuencas poco alteradas. Con objeto de completar el cuadro, sería muy deseable que los científicos y autoridades latinoamericanas destinaran más esfuerzos al estudio de sus cuencas hidrográficas, particularmente a aquéllas más alteradas por la acción humana, de modo que puedan estimarse los efectos regionales e incluso globales de su degradación ambiental y para las cuales deben buscarse remedios ambientales que restauren lo más posible su funcionalidad ecológica y biogeoquímica original. El objeto de estos estudios, además del hecho de contribuir al conocimiento científico sobre unos ambientes todavía insuficientemente explorados, sería paliar los impactos antrópicos de dicha alteración, en especial, los que inciden sobre la salud humana y la de los ecosistemas afectados por la contaminación fluvial debida a la exportación de nutrientes.

Agradecimientos

El Dr. Salvador Sánchez Carrillo (ITSON, Sonora, México) nos ha proporcionado bibliografía para esta revisión. Este trabajo se ha beneficiado de los fondos del Proyecto de Investigación 81/2005, de la Red de Parques Nacionales del Ministerio de Medio Ambiente de España. Dos revisores desconocidos han evaluado críticamente y con sumo detalle el manuscrito, sugiriendo nuevas fuentes de datos que se han añadido a la primera versión del mismo.

Bibliografía

- Bartlett, C.L.R., 1996. An overview of emerging foodborne and waterborne diseases. *Eastern Mediterranean Health Journal*, 2: 51-60.
- Bormann, F.H. 1996. Ecology: a personal history. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21: 1-29.
- Bormann, F.H. y Likens, G.E., 1967. Nutrient cycling. *Science*, 155: 424-429.

- Brinson, M.M., 1976. Organic matter losses from four watersheds in the humid tropics. *Limnology and Oceanography*, 21: 572-582.
- Burt, T.P., Heathwaite, A.L. y Trudgill, S.T., (Eds) 1993. Nitrate: Processes, Patterns and Management. John Wiley and sons, New York.
- Cairns, M.A. y Lajtha, K., 2005. Effects of succession on nitrogen export in the West-Central Cascades, Oregon. *Ecosystems*, 8:583-601.
- Caraco, N.F. y Cole, J.J., 1999. Human impact on nitrate export: an analysis using major world rivers. *Ambio*, 28: 167-170.
- Caraco, N.F., Cole, J.J., Likens, G.E., Lovett, G.M. y Weathers, K.C., 2003. Variation in NO₃ export from flowing waters of vastly different sizes: does one model fit all? *Ecosystems*, 6: 344-352.
- De Petris, P.J. y Paolini, J.E., 1991. Biogeochemical aspects of South American rivers: The Paraná and the Orinoco. En: E.T. Degens, S. Kempe y J.E. Richey (Eds), *Biogeochemistry of Major World Rivers*. John Wiley and sons, New York, pp. 105-125.
- Fenchel, T., King, G.M. y Blackburn, T.H., 2000. *Bacterial Biogeochemistry*. 2nd edition. Academic Press. San Diego.
- Filoso, S., Martinelli, L.A., Williams, M.R., Lara, L.B., Krusche, A., Ballester, M.V., Victoria, R. y De Camargo, P.B., 2003. Land use and nitrogen export in the Piracicaba River basin, Southeast Brazil. *Biogeochemistry*, 65: 275-294.
- Fisher, S.G., Sponseller, R.A. y Heffernan, J.B., 2004. Horizons in stream biogeochemistry: flowpaths to progress. *Ecology*, 85: 2369-2379.
- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R. y Vörosmary, C.J., 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70: 153-226.
- Goodale, C.L., Aber, J.D., Vitousek, P.M. y McDowell, W.H., 2005. Long-term decreases in stream nitrate: successional causes unlikely; possible links to DOC? *Ecosystems*, 8: 334-337.
- Harris, G. y Heathwaite, A.L., 2005. Inadmissible evidence: knowledge and prediction in land and riverscapes. *Journal of Hydrology*, 304: 3-19.
- Hynes, H.B.N., 1975. The river and its valley. *Verhandlungen der Internationale Vereinigung für Limnologie*, 19: 1-15.
- Johnson, M.S., Lehmann, J., Selva, E.C., Abdo, M., Riha, S. y Guimarães, E., 2006. Organic carbon fluxes within and streamwater exports from headwater catchments in the southern Amazon. *Hydrological Processes*, 20: 2599-2614.
- Krusche, A.V., Martinelli, L.V., Victoria, R.L., Bernardes, M., de Camargo, P.B., Ballester, M.V. y Trumbore, S.B., 2002. Composition of particulate and dissolved organic matter in a disturbed watershed of southeast Brazil (Piracicaba River basin). *Water Research*, 36: 2743-2752.
- Lesack, L.F.W., 1993. Export of nutrients and major ionic solutes from a rain forest catchment in the Central Amazon basin. *Water Resources Research*, 29: 743-758.
- Lewis jr., W.M. y Saunders III, J.F., 1989. Concentration and transport of dissolved and suspended substances in the Orinoco River. *Biogeochemistry*, 7: 203-240.
- Lewis jr., W.M., Hamilton, S.K., Jones, S.L. y Runnels, D.D., 1987. Major element chemistry, weathering and element yields for the Caura River drainage, Venezuela. *Biogeochemistry*, 4: 159-181.
- Lewis jr., W.M., Melack, J.M., McDowell, W.H., McClain, M. y Richey, J.E., 1999. Nitrogen yields from undisturbed watersheds in the Americas. *Biogeochemistry*, 46: 149-162.
- Likens, G.E., 2004. Some perspectives on long-term biogeochemical research from the Hubbard Brook ecosystem study. *Ecology*, 85: 2355-2362.
- Likens, G.E., Bormann, F.H., Pierce, R.S., Eaton, J.S. y Johnson, N.M., 1977. *Biogeochemistry of a forested ecosystem*. Springer Verlag, New York.
- McDowell, W.H. y Asbury, C.E., 1994. Export of carbon, nitrogen, and major ions from three tropical montane watersheds. *Limnology and Oceanography*, 39: 111-125.
- McDowell, W.H., Lugo, A.E. y James, A., 1995. Export of nutrients and major ions from Caribbean catchments. *Journal of the North American Benthological Society*, 14: 12-20.
- Newbold, J.D., Sweeney, B.W., Jackson, J.K. y Kaplan, L.A., 1995. Concentrations and export of solutes from six mountain streams in Northwestern Costa Rica. *Journal of the North American Benthological Society*, 14: 21-37.
- Oyarzún, C.E., Godoy, R. y Sepulveda, A., 1998. Water and nutrient fluxes in a cool temperate rainforest at the Cordillera de la Costa in southern Chile. *Hydrological Processes*, 12:1067-1077.
- Oyarzún, C.E., Godoy, R., de Schrijver, A., Staelens, J. y Lust, N., 2004. Water chemistry and nutrient budgets in an undisturbed evergreen rainforest of Southern Chile. *Biogeochemistry*, 71: 107-123.
- Restrepo, J.D., Zapata, P., Díaz, J.M., Garzón-Ferreira, J. y García, C.B., 2006. Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50: 33-49.
- Richey, J.E., Hedges, J.I., Devol, A.H., Quay, P.D., Victoria, R., Martinelli, L. y Forsberg, B.R., 1990. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. *Limnology and Oceanography*, 35: 352-371.
- Sarmiento, J.L. y Gruber, N., 2006. *Ocean Biogeochemical Dynamics*. Princeton University Press. Princeton.
- Saunders III, J.F. y Lewis jr., W.M., 1988. Transport of phosphorus, nitrogen, and carbon by the Apure River, Venezuela. *Biogeochemistry*, 5: 323-342.
- Schlesinger, W.M., 2000. *Biogeoquímica: un Análisis del Cambio Global*. Editorial Ariel. Barcelona.
- Schlesinger, W.M. y Melack, J.M. 1981. Transport of organic carbon in world's rivers. *Tellus*, 31: 172-187.
- Schilling, K. y Zhang, Y.-K., 2004. Baseflow contribution to nitrate-nitrogen export from a large agricultural watershed, USA. *Journal of Hydrology*, 295: 305-316.
- Smith, S.V., Swaney, D.P., TalaueMcManus, L., Bartley, J.D., Sandhei, P.T., McLaughlin, C.J., Dupra, V.C., Crossland, C.J., Buddemeier, R.W. y Maxwell, B.A., 2003. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean. *Bioscience*, 53: 235-245.
- Smith, S.V., Swaney, D.P., Buddemeier, R.W., Scarsbrook, M.R., Weatherhead, M.A., Humborg, C., Eriksson, H. y Hannerz, F., 2005. River nutrient loads and catchment size. *Biogeochemistry*, 75: 83-107.
- Vanni, M.J., Renwick, W.H., Headworth, J.L., Auch, J.D. y

- Schaus, M.H., 2001. Dissolved and particulate nutrient flux from three adjacent agricultural watersheds: A five-year study. *Biogeochemistry*, 54: 85-114.
- Vollenweider, R.A., 1968. *Scientific Fundamentals on the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters*, with particular reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication. OECD Report, Paris.
- Williams, M.R. y Melack, J.M., 1997. Solute export from forested and partially deforested catchments in the central Amazon. *Biogeochemistry*, 38: 67-102.