

POR QUÉ CONOCER MEJOR LOS RÍOS SUDAMERICANOS?

Juan Jose Neiff

Desde el comienzo, el hombre se instaló junto a las fuentes de agua. Las grandes ciudades, especialmente en Sudamérica, nacieron y se desarrollaron junto al río o al mar. Sin embargo, desde el comienzo hasta hoy, el hombre no ha llegado a entender científicamente a los ríos. La ocurrencia de grandes catástrofes de inundación, la contaminación de los cursos de agua, los efectos negativos de muchos embalses, son sólo algunos ejemplos del conflicto ambiental que aún perdura a pesar del avance de la tecnología. El crecimiento de la demanda de agua, las previsiones del cambio climático global, el avance de la agricultura y demás transformaciones llevan a re-pensar en los ríos como fuentes de agua *joven* y como sustento de la sociedad.

Introducción

Es probable que el consumo de agua para el mantenimiento de la vida sea el más importante de sus múltiples usos. En gran parte de la biosfera, el agua es muy escasa, o incluso es inalcanzable, y lo grave es que una cantidad cada vez menor de agua se puede usar para el consumo directo debido al aumento de la contaminación. Entonces, habrá un número creciente de personas que cuenta con menor cantidad de agua. Lo que se consideraba un “recurso natural permanente” hace cuatro décadas, hoy es un recurso estratégico.

Igualmente preocupante es la pérdida de la calidad del agua que también afecta a todas estas formas de vida en la biosfera y tendrá un efecto sobre la diversidad biológica de los ecosistemas, con un impacto sobre las poblaciones humanas, un hecho aún más difícil de prever. En los lagos las sustancias contaminantes quedan retenidas resultando un proceso acumulativo de deterioro ambiental.

Un sector importante de la población de Sudamérica se abastece de agua freática que luego es incorporada al balance hídrico superficial. Esquemáticamente, la disponibilidad de agua superficial depende del balance hídrico positivo y la fisiografía del paisaje para retener, acumular, o permitir su escurrimiento hacia el mar. Las diferencias en energía solar producirán la evaporación, que formará las nubes y luego las lluvias, que escurrirán por la superficie de los continentes y, por efecto de la fuerza de la gravedad, llegarán al mar para reiniciar el proceso. Una parte del agua quedará retenida en los cuerpos lénticos (lagos, lagunas, planicies de inundación, humedales etc.), cuyo volumen se mantiene y renueva lentamente por la circulación comentada.

Gran parte de América del Sur se encuentra en una situación de privilegio ya que tiene mayor flujo de aguas corrientes que garantiza las posibilidades de los países a disponer de agua “nueva” y limpia en el futuro, a condición que el uso adecuado de los paisajes que integran la cuenca para prevenir los procesos de erosión y contaminación. En tanto los lagos son *acumuladores* de contaminantes, los ríos son *limpiadores* de la superficie continental, que trasladan al mar los efectos del manejo de las cuencas.

Sudamérica tiene, en promedio, 22,8 habitantes/km², aunque la mayor parte de las personas viven en la cuenca de los grandes ríos. Así por ejemplo, de los 495 millones de personas que formarían la población de Sudamérica, 185 millones se encuentran localizados en la Cuenca del Plata

(60% viven en Brasil; menos del 4% en Paraguay; algo más del 2% en Bolivia; el 30% en Argentina y algo más del 4% en Uruguay). No es casual que casi el 30% de la población de Brasil, el 77% de la población de la Argentina, el 100% de la población del Paraguay, el 94% de la de Uruguay, y el 29% de la población de Bolivia están concentradas en la Cuenca del Plata. Las corrientes colonizadoras ingresaron por los ríos y allí se formaron las grandes metrópolis, lo que ha tenido un sello distintivo de nuestro subcontinente desde entonces.¹ Un caso representativo es el de la República Argentina donde más del 80% de la población está concentrada en menos de 20% de su territorio, especialmente a la vera de los cursos de agua.

El contexto geográfico de los ríos de Sudamérica

En comparación con otros continentes en Sudamérica escurre superficialmente mayor cantidad de agua respecto de la superficie continental² lo que deja un saldo neto para alimentar las llanuras de inundación. El mayor volumen de agua en un año corresponde a la descarga de los ríos y es *agua joven* que comenzó a escurrir pocos meses antes de llegar al océano. Un volumen menor de agua está acumulado en cuencas lacustres de Sudamérica, la mayor parte de las cuales se formó en el Pleistoceno y han recibido y acumulado disturbios ocurridos en la biósfera desde entonces.

La masa continental de Sudamérica se destaca del resto de la biosfera por varias características de gran importancia para la acumulación y circulación del agua superficial. Los macizos de los Andes, de Guayana y de Brasilia son los centros sobreelevados de mayor potencia, que rigen la circulación de las aguas. El resto de la superficie continental no tiene discontinuidades orográficas importantes.³

Los ríos que nacen en Los Andes son fuertemente vectoriales, con una diferencia de 3-5 mil metros entre las nacientes y la desembocadura, en tanto que los que provienen de los macizos de Guayana y de Brasilia tienen menos de 300m de desnivel a lo largo de su curso. Esto tiene consecuencias en la organización del paisaje de las cuencas y en la organización de las colectividades bióticas. Una de éstas es la escasez de endemismos.⁴

Como resultado de las características fisiográficas y climáticas, la mayor descarga de agua de los grandes ríos de Sudamérica es vertida al océano Atlántico.

Si bien el sentido y dirección más frecuente de los ríos es de oeste a este, dado por la energía potencial de la

¹ MORELLO, J. H. *Perfil Ecológico de Sudamérica*. ICI Barcelona: Instituto de Cooperación Iberoamericana, 1984. 93 p.

² NEIFF, J. J. Aspectos conceptuales para la evaluación ambiental de tierras húmedas continentales de América del Sur. *Anais do VIII Seminário Regional de Ecologia, Vol. VIII*, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, UFSCar, São Carlos, Brasil: 1-18, 1997.

³ MORELLO, J. H. *Op. cit.*

⁴ LÓPEZ, H. L. & MIQUELARENA, A. M. Biogeografía de los peces continentales de la Argentina. En: LLORENTE BOUSQUETS, J. & MORRONE, J. J. (Eds.). *Regionalización biogeográfica de Iberoamérica y tópicos afines: Primeras Jornadas Biogeográficas de la Red Biogeográfica Iberoamericana de Biogeografía y Entomología Sistemática*. México: CYTED, 2005. p. 509-550.

O'FARREL, I. Comparative analysis of the phytoplankton of fifteen lowland fluvial systems fo the River Plate Basin (Argentina). *Hydrobiologia*, 289:109-117, 1994.

JOSÉ DE PAGGI, S. & PAGGI, J. C. Zooplancton. En: IRIONDO, M. H.; PAGGI, J. C. & PARMA, M. J. (Eds.). *The Middle Paraná River: Limnology of a Subtropical Wetland*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. p. 229-249.

MALABARBA, L. R.; REIS, R. E.; VARI, R. P.; LUCENA, Z. M. & LUCENA, C. A. *Phylogeny and Classification of Neotropical Fishes*. Porto Alegre: EDIPUCRS, 1998.

- ⁵ NEIFF, J. J.; POI DE NEIFF, A. & CASCO, S. L. Importancia ecológica del corredor fluvial Paraguay-Paraná como contexto de manejo sostenible. En: PE-TEÁN, J. & CAPPATO, J. (Compiladores). *Humedales fluviales de América del Sur. Hacia un manejo sustentable*. Cap. 2. Enfoque ecosistémico, corredores y biodiversidad. Fundación Proteger. UICN. Proteger Ediciones, 2006.
- ⁶ TUNDISI, J. G. Tropical South America: present and perspectives. En: MARGALEF, R. (Ed.). *Limnology now: a paradigm of planetary problems*. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 353-424.
- TUNDISI J. G. & MATSUMURA TUNDISI, T. *Limnología*. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2008. 632 p.
- ⁷ NEIFF, J. J.; IRIONDO, M. H. & CARIGNAN, R. Large tropical south american wetlands: an overview. En: LINK, G. L. & NAIMAN, R. J. (Eds.). *The Ecology and Management of Aquatic-terrestrial Ecotones*. Washington: Proceedings Book, Univ. of Washington, 1994. p. 156-165.
- ⁸ ARENAS-IBARRA, J. A. *Variações espaciais e temporais da comunidade de invertebrados bentônicos na planície de inundação do alto rio Paraná: sistemas Paraná e Ivinheima e redescricao de três espécies de Pomacea (Mollusca: Gastropoda: Ampullariidae)*. Disertación de Maestría en Ciencias Ambientales. Universidade Estadual de Maringá, 2004. 77 p.
- ARENAS-IBARRA, J. A. *Aplicações fluviológicas na planície de inundação do alto rio Paraná*. Tesis de Doctorado en Ciencias Ambientales. Universidade Estadual de Maringá, 2008. 58 p.
- ⁹ ESTEVES, F. *Fundamentos de Limnología*. São Paulo: Interciencia, 1998. 602 p.
- TUNDISI J. G. & MATSUMURA TUNDISI, T. *Op. cit.*

cordillera de Los Andes, los ríos que integran la Cuenca del Plata descargan sus aguas con dirección N-S, atravesando una faja latitudinal de más de 20 grados. En ambos casos los ríos actúan como corredores biológicos entre distintos dominios biogeográficos generando importantes patrones en la distribución y abundancia de especies acuáticas y terrestres.⁵

Algunas características de los ríos

Los ríos son vectores de la desmineralización de los continentes. Las tres cuencas más grandes del continente (Amazonas, Orinoco y Paraná) vierten al océano el 13% del total de sólidos suspendidos que aportan todos los ríos del mundo a los océanos.⁶

Otra propiedad fundamental de los cursos de agua sudamericanos en particular, es la *elasticidad* que puede ser expresada por el cociente entre la superficie ocupada durante la fase de máxima inundación, y la que corresponde al momento de sequía extrema.⁷ También puede expresarse como la variación vertical de la lámina de agua en un período de tiempo.⁸ Este valor (o índice) es una componente de:

- las características geomorfológicas del macrosistema;
- la capacidad de almacenaje de agua en el suelo y subsuelo;
- la variabilidad meteorológica regional (lluvias/evapotranspiración + infiltración).

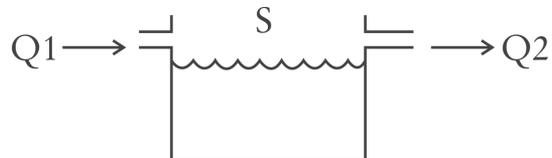
La elasticidad del sistema permite explicar en gran medida la distribución y abundancia de las poblaciones, el almacenamiento y movilidad de los nutrientes, las condiciones de oxido-reducción, la prevalencia de fenómenos de acumulación o de degradación de la materia orgánica y – en general – informa sobre los flujos biogeoquímicos que operan en los humedales.

Como se dijera, mientras los lagos son sistemas acumuladores, los ríos son sistemas de transferencia. El volumen de agua renovada anualmente en los lagos es muy bajo en comparación con el volumen que circula en las cuencas. La eficacia de la mezcla en lagos, depende esencialmente de los atributos físicos, especialmente de la temperatura. La difusión periódica de agua depende en gran medida de la cantidad de energía solar que la masa de agua recibe localmente, resultando un proceso complejo en los ambientes tropicales de Sudamérica.⁹ Los lagos pueden considerarse como sistemas con gran energía potencial y baja energía cinética.

Los grandes ríos de América del Sur, pueden comprender humedales y lagos de distinta extensión y morfología a lo largo de su cuenca, de características temporalmente lénticas, y que son alimentados por flujos horizontales en forma directa o indirecta desde el curso de agua del río. La tasa de renovación del agua en estos ambientes de varzea, es alta en comparación con el agua acumulada. La concentración o abundancia de elementos (nutrientes, microorganismos, sedimentos) tendría por esa razón, que expresarse en relación con los valores de descarga y no en unidades puntuales de volumen. El análisis de la distribución y abundancia de los organismos en estos ambientes debería partir del conocimiento de los flujos horizontales de *información* y de la *elasticidad* de la lámina de agua.

Podemos comparar esquemáticamente a lagos y ríos mediante un ejemplo simple, mediante una cuba (volumen del lago, relativamente constante) y dos tubos: uno es el ingreso de agua y el otro es la salida de agua superficial. El volumen (v), es la *información acumulada* (en general) en un determinado tiempo (t). Si el agua no se renueva (utopía) la organización interna dependerá de la cantidad y calidad de los elementos comprendidos en la cuba (especies, nutrientes etc.), de las fluctuaciones de energía de nuestra “cuba” (lago) y de las interacciones temporales de los elementos dentro del sistema.

En los lagos:



Tasa total de cambio (*turnover*): $TTRi = (P-E)S + Q_1 - Q_2$
 donde:

P = entrada de energía (precipitación, energía solar);

E = salida de energía (escorrentía, advección temperatura etc);

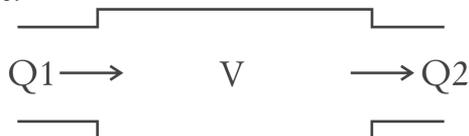
S = superficie;

Q_1 = caudal de entrada de información (agua, sedimentos, spp.);

Q_2 = caudal de salida de información (agua, sedimentos, spp.);

t = tiempo.

En los ríos:



Entonces:

tasa de renovación total (*turnover*) $TTR = (1 - Q_{t-2}/V) + TTR_i$
y, el tiempo total de recambio del agua se expresaría como:
 $Tt = 1/TTR$

Normalmente, en los lagos y ríos, el volumen es relativamente constante y el volumen de ingreso y salida del flujo varían de forma análoga.

La tasa de renovación (TTR) es el porcentaje del total de agua contenida en la cuba que entra o sale en un determinado período de tiempo. El tiempo de renovación es recíproco a la tasa de renovación e informa el tiempo necesario para una renovación completa de agua de la cuba.

Si la cuba tiene una capacidad de 1 litro e ingresan 100ml por día, la tasa de renovación es: 100/1.000, o sea: 0,1 por ciento o sea 10% por día.

Ambas tasas son de uso significativo para valorar el intercambio de información en distintos sectores de la cuenca hidrográfica. En la práctica, el tiempo de renovación es más utilizado. En los embalses se lo emplea en sentido inverso, como *tiempo de residencia del agua*. El TTR sería diferente para distintos tramos del río. La disponibilidad de nutrientes en los ríos, por ejemplo ofrecen una cantidad limitada de información, si no se presenta el caudal de entrada y de salida en la sección referida.

El tiempo de residencia del agua en el embalse de Yacyretá (situado en el curso de agua del Alto Paraná) por ejemplo, es de aproximadamente 3 semanas, aunque es muy distinta en función que el río esté en aguas altas o en aguas bajas. Esta misma evaluación, hecha para el lago Mascardi, en la Patagonia, próximo a Bariloche, tiene un valor aproximado de cinco años.¹⁰

La renovación del agua en los grandes ríos es alta comparada con el volumen de información (riqueza de especies, por ejemplo) contenido en el sistema en determinado momento. Por tal razón, la aplicación de *índices de estado* del sistema no pueden ser los mismos que los utilizados en lagos o en forestas de tierra firme.

El análisis de la distribución de los organismos vegetales y animales, la interpretación de afinidades y diferencias entre las colectividades de distintos sectores de la planicie de inundación requieren conocer la dinámica de los flujos de agua, especialmente cuando se analizan la distribución y abundancia de organismos fácilmente desplazados por el agua, como el plancton. Los valores de abundancia y la riqueza de especies están muy influenciados por la circulación del agua en la planicie.

¹⁰ NEIFF, J. J. Large rivers of South America: toward the new approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, Alemania, 26:167-180, 1996.

Una característica común a los ríos es que la velocidad del agua y sus modificaciones, relacionadas en mayor medida con las modificaciones del nivel del agua, tienen un fuerte efecto en la distribución y abundancia de los organismos.¹¹ La velocidad es función de la pendiente y de la rugosidad del terreno y se calcula con la ecuación de Manning:

$$V = \frac{Rh^{0.66} \cdot S^{0.5}}{n}$$

donde:

V = velocidad de la corriente (m/s)

Rh = radio hidráulico: es la relación entre la superficie de la sección mojada del lecho y su perímetro;

S = pendiente;

n = índice de rugosidad del lecho varía entre 0.01 en una superficie artificial hasta 0.1 en un lecho con macrófitos (plantas acuáticas).

Se ha demostrado que la planicie del bajo Paraguay ejerce una fuerte influencia sobre la translación de las ondas de crecientes, pudiendo amortiguar hasta 20% la intensidad de las mismas por efecto de la rugosidad que impone la vegetación.¹²

El régimen de pulsos

Los procesos ecológicos fluviales siguen un patrón sinusoidal causado por las diferencias temporales en la velocidad y duración del flujo de agua y de materiales transportados (organismos, sólidos disueltos y suspendidos). Cada una de las ondulaciones está compuesta de valores positivos y negativos respecto de un ordenada o nivel de conectividad. Durante la porción positiva, fase de inundación o *potamofase*, los cuerpos de agua de la planicie (lagunas, paleocauces y meandros abandonados) se interconectan con el flujo del río y reciben de éste materiales y a su vez aportan al agua materia orgánica y minerales del suelo. La porción negativa, fase de sequía o *limnofase*, conlleva el flujo de materiales desde la planicie hacia el río y el aislamiento paulatino de los cuerpos de agua de la planicie y aún su desaparición, hasta una nueva fase de inundación. El patrón de variabilidad de estas ondas en una secuencia temporal – en determinado punto y sección del río – conforman el *régimen pulsátil* o *régimen de pulsos*.

Neiff¹³ y Neiff *et al.*¹⁴ han propuesto la función *f* FITRAS que es el acrónimo de los atributos principales de los pulsos hidrosedimentológicos: frecuencia, intensidad, tensión, regularidad, amplitud y estacionalidad de un pulso (figura 1).

¹¹ ANGELIER, E. *Ecología de las Aguas Corrientes*. Zaragoza, España: Ed. Acribia, 2002. 217 p.

¹² NEIFF, J. J.; POI DE NEIFF, A. & CASCO, S. L. Importancia ecológica del corredor fluvial Paraguay-Paraná como contexto de manejo sostenible... *Op. cit.*

¹³ NEIFF, J. J. Aspects of primary productivity in the lower Paraná and Paraguay riverine system. *Acta Limnol. Bras.*, Vol. III, Tomo I: 77-113, 1990.

¹⁴ NEIFF, J. J.; IRIONDO, M. H. & CARIGNAN, R. Large tropical south american wetlands... *Op. cit.*

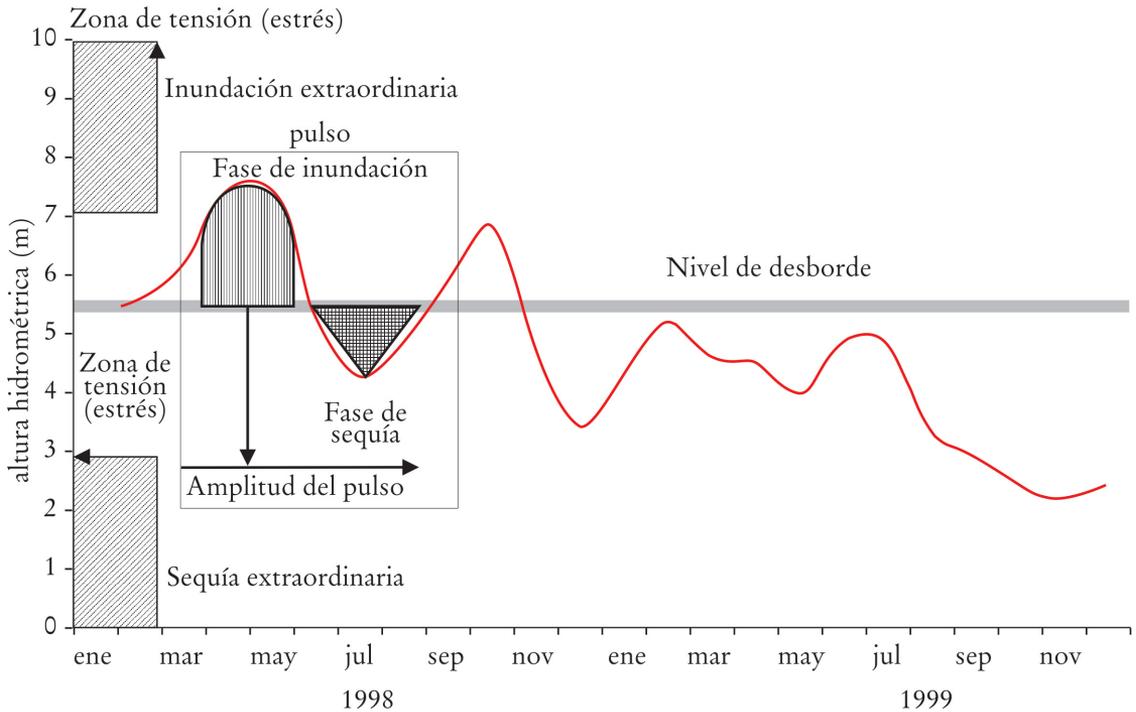


Figura 1: Representación esquemática de un pulso (tomada de Casco)¹⁵

¹⁵ CASCO, S. L. *Poblaciones vegetales centrales y su variabilidad espacio-temporal en una sección del Bajo Paraná, influenciada por el régimen de pulsos*. Tesis doctoral, Univ. Nac. del Nordeste, Argentina, 2003. 127 p.

En la abscisa se representa una serie de tiempo. En la ordenada el nivel del agua (o caudal, o cantidad de lluvia caída). La línea horizontal (5,5m en el ejemplo) representa la situación o estado del río en el que se produce el desborde sobre la planicie inundable. También puede significar el nivel a partir del cual el agua se mueve desde el curso del río a la planicie o viceversa, como ocurre en lagos que están permanentemente conectados al curso del río. Todos los valores del hidrómetro que se encuentren por encima de 5,5m (en nuestro ejemplo) corresponden a la fase de inundación (potamofase, área con líneas

La función FITRAS está definida por dos tipos de atributos:

- Espaciales: definen los efectos del pulso en la planicie (amplitud, intensidad y tensión)
- Temporales: están relacionados con el comportamiento histórico de los atributos espaciales (frecuencia, recurrencia y estacionalidad).

Frecuencia: número de veces que ocurre un fenómeno determinado dentro de una unidad de tiempo (por ejemplo inundaciones de 8m en el río Paraná, en el hidrómetro de Corrientes a lo largo de un siglo).

Intensidad: magnitud alcanzada por una fase de inundación o de sequía. Se mide generalmente por el valor alcanzado en el hidrómetro más próximo o en términos de altura o de caudal de agua.

Tensión: valor de la desviación típica desde las medias máximas o desde las medias mínimas en una curva de fluctuación hidrométrica del río. Se la define también como envolvente de fluctuación y permite establecer la variabilidad en la magnitud de los eventos de inundación y sequía. Se expresa generalmente en valores hidrométricos o en caudal.

verticales); los que no llegan a esa magnitud, definen la limnofase o período en que los cuerpos de agua permanecen aislados del flujo del río (area con cuadros en el dibujo). Cada pulso es la suma de las dos fases (potamofase+limnofase) y su duración se expresa en días. Ambas fases pueden tener diferente intensidad (valor de la ordenada) en una serie de tiempo. Cuando la curva hidrométrica alcanza valores extraordinarios (zona con rayas oblicuas en el ejemplo) se producen situaciones de estrés, que pueden modificar la estructura del sistema apartándolo de su entorno de estabilidad.

¹⁶ POI DE NEIFF, A. & BRUQUETAS, I. Y. Efecto de las crecidas sobre las poblaciones de invertebrados que habitan macrófitas emergentes en islas del río Paraná. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* (ORSTOM, París, Francia), 22(1):13-20, 1989.

¹⁷ DRAGO, E. C. The physical limnology of the river-lake systems of the Paraná River floodplain. En: *Sustaining the Ecological Integrity of Large Floodplain Rivers*. Internat. Conference, U. S. Dep. of Interior, Nat. Biol. Survey, Univ. of Wisconsin. La Crosse WI, July 12-15, 1994. ORFEO, O. Aumento de carga sedimentaria por erosión de taludes en ríos chaqueños. En: NEIFF, J (Ed.). *Contaminación en cursos de agua del Chaco oriental*. Convenio Gobierno de la Provincia del Chaco (COFEA)-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CECOAL), VII: 117-121, 1995.

¹⁸ POI DE NEIFF, A. & CASCO, S. L. Caída de hojas, descomposición y colonización por invertebrados en palmares de la planicie de inundación del río Paraná (Chaco, Argentina). *Inter-ciencia* (Venezuela), 26(11): 567-571, 2001.

Recurrencia: corresponde a la probabilidad estadística de un evento de inundación o sequía de magnitud determinada dentro de una centuria o de un milenio. Está dado por valores de frecuencia relativa.

Amplitud: también expresada como duración, es el segmento de tiempo que permanece el río en una fase de inundación o sequía de determinada magnitud.

Estacionalidad: se refiere a la frecuencia estacional en que ocurren las fases de sequías o inundaciones. Los organismos, excepto el hombre, tienen ajustes de sus ciclos de vida (fertilidad, reproducción, crecimiento) a la época en que ocurren los eventos hidrológicos.

Algunas estructuras están predominantemente condicionadas por la potamofase, otras por la limnofase (son los denominados estrategias de fase), en tanto que otros han sido favorecidos por su capacidad de adecuación a una amplia gama de condiciones del régimen pulsátil y se los conoce como *euritípicos*.

Algunas colectividades de organismos están más condicionados por la duración de una fase (por ejemplo inundación) que por la magnitud del fenómeno.¹⁶ Gran parte de los organismos han sincronizado sus ritmos de fertilidad (producción y dispersión de huevos y semillas, por ejemplo) con dependencia de la época en que ocurren las fases hidrológicas.

Los requerimientos de predictibilidad de los organismos están en relación con el tiempo de vida (décadas para los árboles; lustros para los peces; días para los plánctones). Los procesos que acontecen en los grandes ríos y sus humedales tienen relación positiva o negativa con la frecuencia, duración, magnitud y otras características de la secuencia de potamofase y limnofase. El transporte y deposición de sedimentos;¹⁷ la colonización, producción y descomposición de la vegetación herbácea y leñosa;¹⁸ el consumo y mineralización de la materia orgánica; la actividad migratoria de los organismos,¹⁹ la pesca,²⁰ las actividades de los pobladores del río, el turismo y otros flujos están ajustados al régimen pulsátil del río.

La descomposición de la materia orgánica

La tasa de descomposición de la materia orgánica expresada por el coeficiente "k" informa sobre la eficiencia de la desintegración de la materia orgánica en los diferentes ecosistemas de la cuenca de los ríos. La velocidad de descomposición depende de factores: la frecuencia de con-

- ¹⁹ NEIFF, J. J. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Interciencia*, 15(6): 424-441, 1990.
NEIFF, J. J.; IRIONDO, M. H. & CARIGNAN, R. Large tropical south american wetlands... *Op. cit.*
- ²⁰ QUIROS, R. The Paraná river basin development and the changes in the lower basin fisheries. *Interciencia*, 15(6):442-451, 1990.
- ²¹ POI DE NEIFF, A. & NEIFF, J. J. Decomposition of *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms in a pond of Paraná river valley and colonization by invertebrates. *Tropical Ecology* (International Society for Tropical Ecology, Varanasi, India), 29(2):79-85, 1988.
POI DE NEIFF, A. & NEIFF, J. J. Dry weight loss and colonization by invertebrates of *Eichhornia crassipes* litter under aerobic condition. *Tropical Ecology* (International Society for Tropical Ecology), 30(2):175-182, 1989.
HAMMERLY, J. A.; LEGUIZAMON, M.; MAINE, M. A.; SCHIVER, D. & PIZARRO, M. J. Decomposition rate of plant material in the Paraná medio (Argentina). *Hydrobiologia*, 89:53-59, 1989.
POI DE NEIFF, A. & BRUQUETAS DE ZOZAYA, I. Y. Colonización por invertebrados de macrófitos emergentes durante su descomposición en el río Paraná. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* (ORSTOM, Francia), 24(3): 209-216, 1991.
BRUQUETAS, I. Y. & NEIFF, J. J. Decomposition and colonization by invertebrates of *Typha latifolia* L. litter in Chaco cattail swamp (Argentina). *Aquatic Botany*, The Netherlands. 40:185-193, 1991.
NEIFF, J. J. & POI DE NEIFF, A. Litterfall, leaf decomposition and litter colonization of *Tessaria integrifolia* in the Paraná River floodplain. *Hydrobiologia*, 203(1-2):45-52, 1990.

xión con el flujo del río, la calidad de la materia orgánica (relación C/N, o mejor: lignina/nitrógeno), y la disponibilidad de oxígeno en el agua. La temperatura tiene poca influencia en los ríos tropicales y subtropicales de Sudamérica. La duración y la magnitud de la fase seca tiene consecuencias sobre el proceso, y la época del año puede ser importante en los ríos del sur de Sudamérica, en Patagonia, porque la estacionalidad climática es muy marcada.

La información disponible para la cuenca del Paraná²¹ permite resumir algunas tendencias para el Bajo Paraná.

El tiempo requerido para la descomposición de las hojas de hierbas y de árboles en la planicie inundable del Paraná es de 50 días a un año en condiciones aeróbicas. Plantas herbáceas como *E. crassipes* se descompone en un período tres veces más corto en aguas oxigenadas de los lagos conectados durante la mayor parte del año al curso del río que en condiciones anaeróbicas de los lagos esporádicamente conectados al río. En los ambientes anaeróbicos de la planicie del Paraná, esporádicamente conectados al río, la descomposición total de las hojas de la vegetación demanda entre uno y tres años. Cuando el nivel del agua disminuye abruptamente y el suelo permanece seco, el tiempo de descomposición de la necromasa de la misma planta se duplica.²²

Son los ríos, naturalmente “sistemas heterotróficos”?

Históricamente, los ríos han sido considerados “ecosistemas heterotróficos” debido a que la respiración sería mayor que la producción orgánica,²³ pero esta apreciación contiene dos errores: los ríos no son “ecosistemas”²⁴. Cuando Tansley formalizó la definición de “ecosistema” se refirió a sistemas de tendencia cerrada, dependiendo principalmente de la energía local incidente y con flujos casi cíclicos de nutrientes. Por definición, un lago como aquellos de la Patagonia, en el sur de Sudamérica, se ajusta a la definición, dado que predominan los flujos verticales, son relativamente cerrados. Por el contrario, los ríos constituyen sistemas muy abiertos, con flujos vectoriales, predominantemente horizontales, de energía y materiales (desde las montañas al mar, para esquematizar).

La calificación de “heterotrofia” surge del error de considerar como “río” sólo al curso de agua, cuando que los bosques fluviales y más aún la planicie de inundación del río son parte de un mismo sistema. Las extensas llanuras de inundación constituyen sistemas complejos que incluyen

POI DE NEIFF, A. Descomposición y colonización del detrito de distintas especies de plantas en ambientes inundables del río Paraná. *Biología Acuática* (Revista del Instituto de Limnología Dr. Raúl Ringuelet), 15(2):158-159, 1991.

BRUQUETAS, I. Y. & POI DE NEIFF, A. Descomposición de macrófitos en bañados de la planicie inundable del río Paraná. *Ambiente Subtropical*, 3:1-19, 1993.

POI DE NEIFF, A.; NEIFF, J. J. & CASCO, S. Leaf litter decomposition in three wetlands of the Paraná River floodplain. *Wetlands* (Journal of the Society of Wetland Scientist, USA), 26(2):558-566, 2006.

²² BRUQUETAS, I. Y. & NEIFF, J. J. Decomposition and colonization by invertebrates... *Op. cit.*

²³ VANNOTE, R. L., MINS-HALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R. & CUSHING, C. E. The river continuum concept. *Can. J. Fisheries and Aquat. Sci.*, 37:130-137, 1980.

²⁴ LEWIS, W. M.; WEIBEZHAN, F. H.; SAUNDERS III, J. L. & HAMILTON, S. The Orinoco river as an ecological system. *Interciencia*, 15(6):346-357, 1990.

NEIFF, J. J. Bosques fluviales de la cuenca del Paraná. Cap. 4. 2005. p. 1-26. *En*: ARTURI, M. F.; FRANGI, J. L. & GOYA, J. F. (Eds.). *Ecología y manejo de los bosques de Argentina*. La Plata, Argentina: Edición Multimedia, 1990.

²⁵ NEIFF, J. J. Bosques fluviales de la cuenca del Paraná. *Op. cit.*

²⁶ VANNOTE, R. L., MINS-HALL, G. W.; CUMMINS, K. W.; SEDELL, J. R. & CUSHING, C. E. *Op. cit.* CUSHING, C. E.; McINTIRE, C. D.; CUMMINS, K. W.; MINSHALL, G. W.; PETERSEN, R. C.; SEDELL, J. R. & VANNOTE, R. L. Relationships among chemi-

varios ecosistemas. Por este motivo, son *macrosistemas*, en los que quedan comprendidos ambientes acuáticos permanentes, temporarios y sectores de tierra firme, con mayor extensión y preponderancia funcional de los ambientes acuáticos temporarios.²⁵

El macrosistema constituye una unidad ecológica de funcionamiento, en razón de los flujos de materiales y energía que ocurren dentro de él, y de las transformaciones internas que surgen al comparar entradas y salidas de elementos (inorgánicos y orgánicos).

En los ríos con movimiento horizontal del agua, los cambios no ocurren en forma de ciclos (los "ciclos biogeoquímicos" no son ciclos dentro del sistema) y los flujos de energía y de materiales ocurren *como pulsos con fases de inundación y de sequía*.

Generalmente no se ha tenido en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la relación P/R (Producción/Respiración) que, además ha sido supuesta pensando sólo en los organismos planctónicos. Aún así, el cociente P/R puede ser mayor que uno en períodos de aguas bajas extremas en el curso principal y en ríos afluentes.

Poco se conoce sobre la transferencia de energía en las redes tróficas de los ríos. Ni aún es conocida la eficiencia del pasaje de la energía de un nivel trófico a otro. El consumo directo de las plantas es bajo, por la escasez de herbívoros y además porque muchas plantas tienen tejidos duros que resultan poco utilizables o digeribles por los animales.

Una gran parte de la energía que entra a través de la productividad de las plantas es capturada por consumidores de los detritos orgánicos en diferente grado de procesamiento. En los grandes ríos de América del Sur pareciera que las transformaciones de la materia orgánica descrita en los ríos del hemisferio norte²⁶ no ocurren a partir de los organismos herbívoros y de los partidores de hojas muertas.²⁷

Otra diferencia importante es que en los grandes ríos de América del Sur con llanuras de inundación, los restos orgánicos no provienen de los ecosistemas de la tierra firme, sino de la vegetación que crece en el eje de escurrimiento temporal del mismo río, en su planicie inundable y por lo tanto, es autóctona.

La materia orgánica producida es siempre alta, especialmente en los sistemas de flujo lento, debido principalmente a la contribución de la vegetación de los humedales comprendidos en la llanura de inundación. La respiración es baja, ya que el oxígeno en el agua se agota con rapidez,

- cal, physical and biological indices along river continuo based on multivariate analysis. *Arch. Hydrobiol.*, 98:317-326, 1983.
- POZO, J.; ELOSEGI, A.; DIEZ, J. & MOLINERO, J. Dinámica y relevancia de la materia orgánica. p. 141-167. En: ELOSEGI, A. & SABATER, S. (Eds.). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Fundación BBVA, 2009. 444 p.
- ²⁷ POI DE NEIFF, A.; NEIFF, J. J. & CASCO, S. Leaf litter decomposition in three wetlands of the Paraná River floodplain. *Wetlands* (Journal of the Society of Wetland Scientist, USA), 26(2):558-566, 2006.
- ²⁸ SIOLI, H. Tropical rivers as expressions of their terrestrial environment. En: GOLLEY, F. B. & MEDINA, E. (Eds.). *Tropical Ecosystems: Trends in terrestrial and aquatic research*. New York: Springer Verlag, 1975. p. 275-287.
- ²⁹ VIDAL, L.; MENDONÇA, R. F.; MARINHO, M. M. CESAR, D. & ROLAND, F. Caminhos do carbono em ecossistemas aquáticos continentais. 193-208. En: ROLAND, F.; CESAR, D. & MARINHO, M. (Eds.). *Lições de Limnologia*. 2006. 532 p.
- ³⁰ WETZEL, R. G. *Limnología*. España: Omega, 1981. 679 p.
- ³¹ VIDAL, L.; MENDONÇA, R. F.; MARINHO, M. M. CESAR, D. & ROLAND, F. *Op. cit.*
- ³² NEIFF, J. J. Aspects of primary productivity in the lower... *Op. cit.*
- POI DE NEIFF, A.; NEIFF, J. J. & CASCO, S. *Op. cit.*
- ³³ KEMPE, S. & DEPETRIS, P. J. Labile carbon in the Paraná river basin. *Mitt. Geol. Palaont. Ins. Univ. Hamburg*, 69:157-165, 1990.
- DEPETRIS, P. J. & KEMPE, S. Carbon dynamics and sources in the Paraná River. *Limnol. and Oceanogr.*, 38 (2):382-395, 1993.

dando lugar a la formación de compuestos orgánicos intermedios que caracterizan a las “aguas claras” y “aguas negras”.²⁸ En estos últimos una fracción orgánica permanece en el sistema como necromasa, integrada principalmente por compuestos orgánicos estables.²⁹

La proporción de las fracciones orgánicas de distinto tamaño es muy variable y responde principalmente a la geomorfología de la cuenca y a la fase hidrológica. Raramente puede encontrarse la relación 3:1 mencionada por Wetzel³⁰ entre materia orgánica disuelta/materia orgánica particulada para ríos.

Sería conveniente evitar el uso de términos originados en la limnología para los lagos ya que la relación P/R está condicionada por el movimiento horizontal y el tiempo de permanencia del agua en el sector bajo análisis. Este cociente es muy difícil de estimar en ríos, ya que los ingresos de nutrientes dependen en gran medida de la cuenca alta y de los flujos laterales en la llanura inundable (desde y hacia el curso de agua).

Para tener una idea rápida del metabolismo de la cuenca (o un sector de la misma), resulta muy útil conocer la cantidad y la calidad de la materia orgánica disuelta (MOD) y particulada (MOP)³¹, y el nivel de saturación de oxígeno en el agua. Ambos representan el “combustible” y el “comburente” de la captación y acumulación de la desintegración de materia orgánica.³² Ambas magnitudes alcanzan valores característicos para cada fase hidrológica de cuenca.

La concentración de carbono orgánico y sus fracciones COP (carbono orgánico particulado) y COD (carbono orgánico disuelto), permiten una idea sintética del metabolismo del río, si bien dependen de la fase hidrológica del pulso con los valores más altos durante las inundaciones extraordinarias.³³

Una comparación de los ríos Uruguay y Paraná, en la misma latitud, sugieren un papel más significativo de este último curso de agua en la biodegradación de las partículas orgánicas en aminoácidos y azúcares.³⁴ Según Richey *et al.*³⁵ el COD representa el 50% del carbono total transportado por el Amazonas y los compuestos húmicos disueltos representa el 60% de la COD.

El tamaño de las partículas orgánicas presentes en los grandes ríos de América del Sur es también de gran importancia como indicador sintético de los procesos que ocurren en la cuenca. Cuando se comparan ríos de pendiente y caudal líquido semejantes, las diferencias en el contenido de materia orgánica y el espesor de las partículas finas y disuel-

³⁴ MAÑOSA, W. & DEPETRIS, P. J. Preliminary results on carbon fluxes in the Uruguay river. *Mitt. Geol. Palaont. Ins. Univ. Hamburg*, 74:13-22, 1993.

³⁵ RICHEY, J. E.; EDGEN, J.; DEVOL, A. H.; KUAY, B. D.; VICTORIA, R. & MARTINELLI, L. Biogeochemistry of carbon in the Amazon river. *En: DEGENS, E. T.; TREMPER, S. & RICHEY, E. J. (Eds.). Biogeochemistry of the major world rivers*. New York: John Wiley & Sons, 1990. p. 252-371.

³⁶ BOWEN, S.; AHLGREN, M. O. & NEIFF, J. J. Diet selection by an exceptionally detritivorous fish, *Prochilodus platensis*, in the Río de la Plata system. *Annual Meeting of the American Fish. Soc. Toronto*, 1988.

³⁷ BONETTO, A. A. *Calidad de las aguas del río Paraná. Introducción a su estudio ecológico*. Buenos Aires: Dir. Nac. Constr. Port. y Vías Navegables/INCYTH-PNUD-ONU, 1976. 202 p. QUIROS, R. *Op. cit.*

³⁸ JOSÉ DE PAGGI, S. B. Rotifera (Monogononta) diversity in subtropical waters of Argentina. *Annales d'Limnologie*, 32:209-220, 1996.

JOSÉ DE PAGGI, S. & PAGGI, J. C. *Op. cit.*

FRUTOS, S. M.; POI DE NEIFF, A. & NEIFF, J. J. Zooplankton of the Paraguay River: A comparison between sections and hydrological phases *Annales de Limnologie. International Journal of Limnology* (Toulouse, France), 42(4):277-288, 2006.

³⁹ ACUÑA, V.; GUASH, H.; GIORGI, A. & IZAGUIRRE, O. Flujo de energía en el ecosistema. *Metabolismo fluvial. En: ELOSEGI, A. & SABATER, S. (Eds.). Conceptos y técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Fundación BBVA, 2009. p. 367-386.

⁴⁰ WELCOMME, R. H. *River fisheries*. Rome: FAO Fish. Tech. Paper 262, 1985. 330 p.

tas, dependen de la disponibilidad de oxígeno en el agua, y esto último depende en gran medida de las condiciones de flujo (volumen de flujo, tiempo de residencia del agua).

La selección natural en grandes ríos ha favorecido a los organismos que utilizan los detritos orgánicos, ya que es un recurso trófico siempre presente. Los peces detritívoros tienen adaptaciones morfológicas y funcionales para aprovechar eficientemente este recurso³⁶ que les permite proliferar con gran suceso en ríos como el Paraná donde el 60% de la productividad pesquera se sustenta en los peces detritívoros³⁷. Los peces del género *Prochilodus* son los detritívoros frecuentes de los grandes ríos sudamericanos. En el plancton de los ríos con extensas planicies predominan los rotíferos³⁸ que aprovechan la materia orgánica particulada fina.

A pesar que el metabolismo fluvial (entendido como conjunto de transformaciones a partir de los intercambios de nutrientes y los procesos de producción y mineralización de la materia orgánica) resulta de mucho interés para el manejo de los cursos de agua, su medición en grandes ríos resulta extremadamente compleja, a diferencia de lo manifestado para ríos de menores dimensiones como los estudiados por Acuña *et al.*³⁹.

Consecuencias del régimen de pulsos

Es conocido que los paisajes de las planicies inundables de los grandes ríos de Sudamérica son muy diferentes de aquellos propios de las tierras altas que atraviesa el río. También es claro que existen diferencias bióticas entre distintas secciones del curso principal del río y de la llanura de inundación.

En los ríos que tienen planicie de inundación situada lateralmente ("fringe-floodplain" *in sensu* Welcomme⁴⁰), es posible encontrar complejidad creciente de organización en las comunidades, desde el curso del río al borde externo de la planicie.

Marchese y Ezcurra de Drago⁴¹ describieron una zonación típica con incremento en la complejidad (cantidad de especies, diversidad específica, nichos tróficos) desde el curso principal del río a los canales secundarios de escurrimiento. Este incremento en la riqueza de especies en una sección transversal esquemática del Bajo Paraná fue relacionado con diferencias en los atributos físicos y químicos del ambiente (descarga, textura de sedimentos, sustancias orgánicas, oxígeno disuelto) y es más notorio para los invertebrados del Bentos que para otras colectividades.⁴²

- ⁴¹ MARCHESE, M. & EZCURRA DE DRAGO, I. Benthos of the lotic environments in the Middle Paraná River System: transverse zonation. *Hydrobiologia*, 237: 1-13, 1992.
- ⁴² MARCHESE, M., EZCURRA DE DRAGO, I. & DRAGO, E. Benthic macroinvertebrates and physical Habitat relationship in the Paraná flood-plain system. En: *IAHS. The Ecohydrology of South American Rivers and wetlands*. 2002. p. 111-132. (IAHS Special Publication n° 6).
- ⁴³ TRAIN, S. & RODRIGUES, L. C. Phytoplanktonic characterization and influence of the hydrosedimentological pulse of the upper paraná river floodplain. En: THOMAZ, S. M.; AGOSTINHO, A. A. & HAHN, N. S. (Eds.). *The Upper Paraná River and its floodplain: physical aspects, ecology and conservation*. Leiden: Backhuys Publishers, 2004. p. 50-78.
- ZALOCAR DE DOMITROVIC, Y. Efecto de las fluctuaciones del nivel hidrométrico sobre el fitoplancton en tres lagunas isleñas en el área de la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay. *Ecosur*, 16(27):1-23, 1990.
- ZALOCAR DE DOMITROVIC, Y. Fitoplancton de ambientes inundables del río Paraná (Argentina). *Revue d'Hydrobiologie Tropicale*, 25(3):175-186, 1992.
- ZALOCAR DE DOMITROVIC, Y. Fitoplancton de una laguna vegetada por *Eichhornia crassipes* en el valle de inundación del río Paraná (Argentina). *Ambiente Subtropical*, 3:39-67, 1993.
- ⁴⁴ RODRIGUES, L. & BICUDO, D. C. *Periphytic algae*. Cap. 6. 2003. p. 79-109.
- ⁴⁵ BONETTO, A. A. *Op. cit.*
- ⁴⁶ JUNK, W. J.; BAILEY, P. B. & SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. En: DODGE, D. P. (Ed.). *Proc. of the Internat. Large River. Symp.*

Para el fitoplancton⁴³ y para el perifiton⁴⁴ se han encontrado tendencias similares relacionadas con los flujos horizontales del agua que, como se dijera, se originan de las fluctuaciones verticales de la lámina de agua.

Según Bonetto⁴⁵ las inundaciones producen “procesos de rejuvenecimiento” de los ecosistemas que forman parte de los ríos de planicie. Años después Junk *et al.*⁴⁶ explicaron que los “pulsos de inundación” son responsables en gran medida de la organización biótica en ríos con planicies de inundación, encontrando que los eventos periódicos de inundación producen situaciones de estrés biótico que se reflejan en el “resetting” (reseteo) del sistema.

Efectivamente, las biocenosis de los grandes ríos están reguladas por la hidrodinámica de pulsos. Pero las fases de aguas bajas son tan importantes como las inundaciones.⁴⁷ Esto no es un “problema semántico” respecto del “concepto de pulso de inundación” formulado por Junk *et al.*⁴⁸. Durante esta fase seca, las plantas sufren estrés que produce el cese del crecimiento y la abscisión de las hojas.⁴⁹

Los vertebrados ven limitada, en extensión y en calidad, la oferta de habitat en las planicies inundables durante la fase seca. En este período los espejos de agua y bañados remanentes soportan una densidad de animales varias veces mayor y pueden ocurrir desbalances por sobrecarga poblacional. En otro sentido, los animales son más vulnerables a sus predadores. En el caso especial de las aves, Beltzer y Neiff⁵⁰ encontraron que existe un fuerte condicionamiento de la complejidad biótica al régimen pulsátil. Si bien algunos gremios (como el de las caminadoras) resultan afectados durante la fase de inundación, la mayor parte de las aves pueden migrar. Las sequías extraordinarias resultan igualmente condicionantes.⁵¹ La mayoría de las poblaciones de peces no pueden sobrevivir, o sufren importantes pérdidas durante las sequías prolongadas.⁵²

Existen ciertos hechos a considerar, sobre si las inundaciones representan el mayor factor modelador de la biota de los ríos de planicie. Algunos árboles viven con el suelo cubierto por agua durante nueve meses sin alteraciones importantes en el crecimiento, en inundaciones que duran más de un año y matan a muchos árboles del bosque fluvial.⁵³ De hecho muchos árboles y plantas herbáceas poseen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten realizar la fotosíntesis en condiciones de inmersión prolongada.⁵⁴ Asimismo, la fenología de algunas especies de árboles de las planicies inundables del Amazonas no sería afectada por las inundaciones.⁵⁵

- Can. Spec. Pbl. Fish. Aquat. Sci., 1989. p. 110-127.
- ⁴⁷ NEIFF, J. J. Ideas para la interpretación ecológica del Paraná. *Op. cit.*
NEIFF, J. J. Large rivers of South America: toward the new approach. *Op. cit.*
NEIFF, J. J.; IRIONDO, M. H. & CARIGNAN, R. Large tropical south... *Op. cit.*
- ⁴⁸ JUNK, W. J.; BAILEY, P. B. & SPARKS, R. E. *Op. cit.*
- ⁴⁹ NEIFF, J. J. & POI DE NEIFF, A. Litterfall, leaf decomposition... *Op. cit.*
- ⁵⁰ BELTZER, A. & NEIFF, J. J. Distribución de las aves en el valle del río Paraná. Relación con el régimen pulsátil y la vegetación. *Ambiente Subtropical*, 2:77-102, 1992.
- ⁵¹ BELTZER, A. & NEIFF, J. J. *Op. cit.*
- ⁵² MERRON, G.; BRUTON, M. & LA HAUSSE DE LA LOUVIERE, P. Changes in fish communities of the Phongolo floodplain, Zululand (S. Africa) before, during and after a severe drought. *Regulated Rivers*, 8:335-344, 1993.
- ⁵³ NEIFF, J. J.; REBORATTI, H. J.; GORLERI, M. C. & BASUALDO, M. Impacto de las crecientes extraordinarias sobre los bosques fluviales del Bajo Paraguay. *Bol. Com. Espec. Río Bermejo. Cámara de Diputados de la Nación* (Buenos Aires), 4:13-30, 1985.
- ⁵⁴ JOLY, C. A. & CRAWFORD, R. M. M. Variation in the tolerance and metabolic response to flooding in some tropical trees. *J. Exp. Bot.*, 33:799-809, 1982.
FERNANDES CORREA, A. F. & FURCH, B. Investigations on the tolerance of several trees to submergence in blackwater (Igapó) and whitewater (Varzea) inundation forests near Manaus, Central Amazonia. *Amazoniana*, XII (1):71-84, 1992.

Las poblaciones vegetales y animales ven condicionadas su distribución y abundancia tanto por el stress de inundación extrema como por el de sequía.⁵⁶ La vegetación arraigada de hojas flotantes que crece en los humedales fluviales tiene ecofenos propios de las fases de inundación y de suelo seco.⁵⁷ Durante el período crítico de inundación las plantas aceleran el crecimiento y se adaptan. Pero las plantas desaparecen si la sequía es prolongada. En ese sentido, es preciso enfatizar que la fase seca de los pulsos constituye un poderoso factor de selección que condiciona la distribución y abundancia de animales y plantas.

La percepción humana de estos eventos tiene connotaciones y alcances muy distintos. Esencialmente, las inundaciones y en menor grado las sequías, son problemas eminentemente humanos, ya que la estructura de los ecosistemas inundables y la biota están ajustados mediante mecanismos de selección adaptativa que han operado en forma continua durante períodos muy prolongados. La inundación es la malla de procesos biológicos, sociales, económicos, políticos y culturales que parten del desborde anormal de las aguas sobre un territorio. Esta situación puede resultar detrimental por su magnitud, por su amplitud, por lo inesperado de su ocurrencia, pero también por la incoherencia del funcionamiento de la sociedad humana antes, durante y después de su manifestación.

Los ríos como sistemas estables

Con frecuencia se ha mencionado a los ríos como sistemas inestables quizás, queriendo referirse a la gran variabilidad espacial y temporal de los ríos.

Cuando se los analiza globalmente (cuenca + curso del río + planicie) en series largas de tiempo (siglos) se advierte que son sistemas muy estables, con características propias: o sea, únicos. La comparación de imágenes satelitales de distintas épocas y aún el registro geológico y paleontológico permiten apreciar que la variabilidad del medio físico y químico es grande, las características geomorfológicas y bióticas se mantienen dentro de un entorno de variación.

La aseveración anterior es importante ya que contraria a estas características numerosos trabajos ecológicos han considerado a las planicies fluviales como ecotonos o "sistemas de transición tierra/agua".⁵⁸

Consideramos que, al menos en el sentido de Clements⁵⁹, la definición de "ecotono tierra-agua" está mal em-

- NEIFF, J. J. Fluctuaciones de la vegetación acuática en ambientes del valle de inundación del Paraná Medio. *Physis (B)*, 38:41-53, 1978.
- NEIFF, J. J. & REBORATTI, H. J. Estructura y dinámica de bosques de *Tessaria integrifolia*. II. Análisis de crecimiento y productividad. *Bol. Soc. Arg. Bot.*, 26(1-2): 39-43, 1989.
- TUNDISI, J. G. *Op. cit.*
- ⁵⁵ OLIVEIRA, C. Phenological studies of *Salix humboldtiana* in flooded forest (varzea) in Central Amazonia. Book of Abstracts XXVI Congr. of Silv. São Paulo (Brasil), 23-29. Jul. 1995. 279 p.
- ⁵⁶ CASCO, S. L.; NEIFF, J. J. & POI DE NEIFF, A. S. G. Ecological responses of two pioneer species to a hydrological connectivity gradient in riparian forests of the lower Paraná River. *Plant Ecol.*, 209:167-177, 2010.
- ⁵⁷ NEIFF, J. J. Fluctuaciones de la vegetación acuática en ambientes del valle... *Op. cit.*
- ⁵⁸ HOLLAND, M. M. (Compilador). SCOPE/MAB technical consultations on landscape boundaries: report of a SCOPE/MAB workshop on ecotones. *Biology International. Special Issue*, 17:47-106, 1988.
- NAIMAN, R. J.; DECAMPS, H. & FOURNIER, F. (Eds.). *Role of land/inland water ecotones in landscape management and restoration: a proposal for a collaborative research*. MAB Digest 4, Paris: UNESCO, 1989. 1-93.
- JUNK, W. J.; BAILEY, P. B. & SPARKS, R. E. *Op. cit.*
- KOLASA, J. & ZALEWSKI, M. Notes on ecotone attributes and functions. *Hydrobiología*, 303:1-7, 1995.
- WARD, J. V.; TOCKNER, K. & SCHIEMER, F. Biodiversity of floodplain river ecosystems: ecotones and connectivity. *Regulated Rivers*, 15:125-139, 1999.
- ⁵⁹ CLEMENTS, F. E. *Research Methods in Ecology*. Nebras-

pleada para las planicies inundables. Para que las mismas lo fueran, el medio físico-químico debería tener un régimen de fluctuación (climático, hidrosedimentológico) poco previsible. Además, deberían predominar poblaciones de nichos estrechos (estenotípicos) como componentes del ecotono. Ambas condiciones no son las más frecuentes en los ríos. Las series largas de tiempo en los valores hidrométricos muestra fenómenos recurrentes (limnofases y potamofases) cuyas características se mueven alrededor de una amplitud que es propia de cada río, sección y sector de la planicie inundable. Por otra parte, las especies que viven en estas planicies han tenido una selección adaptativa a lo largo de la evolución que las llevó a poseer gran plasticidad (“euritípicas”) que pueden vivir en una gama amplia de condiciones a lo largo del tiempo. Muchas de ellas, además, están adaptadas para migrar.

Es posible el manejo sostenible en los ríos?

El conocimiento de los sistemas ecológicos, provee la base para su manejo. A su vez, el manejo implica la posibilidad de reconocer los estados posibles del universo que se analiza y establecer en qué medida los mismos pueden ser alterados sin producir una modificación indeseable en la estabilidad del sistema. La percepción de los procesos fluviales, individualmente, resulta clara, no así a escala del sistema como un todo, desde que tenemos limitaciones para captar la información contenida en un sistema natural y, más aún, de su evolución, en forma directa.⁶⁰

El manejo de la naturaleza generalmente se apoya en el conocimiento de relaciones poco cambiantes, de tipo causal en el espacio y en el tiempo entre los elementos o hechos, que se denominan *constricciones*. Contrariamente, cuando un estado del sistema puede asociarse a cualquier otro, se le llama *caos*. En términos generales los ecosistemas, individual y colectivamente, son restrictivos, si bien algunos procesos se vuelven temporalmente caóticos. Por ejemplo, la fluctuación hidrométrica de un río en una serie secular afecta una función de tipo recurrente, que se mueve en un entorno relativamente predecible. También existen peridiogramas, como aquellos que caracterizan a las grandes inundaciones, que pueden tener comportamiento caótico, son mucho menos previsibles, en razón que sólo disponemos de información de apenas cien años (lo que es un “flash” en la historia de un río).

Si un sistema adaptativo, por su organización interna, adquiere la posibilidad de discriminar y modificar la varie-

ka: Univ. Publishing Co., 1905. 512 p.

⁶⁰ ELOSEGI, A. & SABATER, S. (Eds.). *Conceptos y Técnicas en ecología fluvial*. Bilbao: Fundación BBVA, 2009. p. 1-444.

dad ambiental y sus constricciones y, a la vez, responder a ellos, se dice que el sistema ha asimilado a su organización parte de la variedad y las constricciones ambientales. Cualquiera sea la naturaleza, un sistema adaptativo de las características antes señaladas tendrá:

- cierto nivel de plasticidad o tensión respecto de su medio;
- mecanismos que aporten variedad, como fuente potencial de variabilidad adaptativa;
- posibilidad de operar selectivamente para discriminar aquellas variaciones más eficientes en términos ambientales;
- disposición a propagar o reproducir los *estados más exitosos* del sistema.

Estas propiedades caracterizan, por ejemplo, a las plantas y animales que viven en un sistema fluvial. Están allí porque los procesos de selección y de adaptación, operados a través de miles de años han determinado su persistencia.⁶¹ Muy pocas evaluaciones de riesgos ambientales en los ríos han resultado exitosas debido a que están basadas en las concepciones tradicionales de relaciones causales como vínculos simples y hoy se conoce que existen otros tipos de interacciones en la dinámica del desarrollo, el mantenimiento o el cambio de los sistemas. La clase de relación que aparece con frecuencia creciente es la denominada *función escalonada*, la cual implica que una variable no tiene efecto apreciable sobre los estados del sistema mientras su valor no aumente o disminuya en determinado valor mínimo. Es posible entonces, que los resultados no muestren relaciones significativas, aunque las mismas existan.

Otra situación que ha sido poco tenida en cuenta es que, en oportunidades se producen *efectos de amortiguación* que retardan los efectos de las variables hasta alcanzar cierta fecha posterior en el proceso. Ambas funciones generan muchos problemas en la interpretación de las relaciones entre causas y estados de un sistema y, hasta pueden inducir a interpretaciones – estadísticamente válidas –, pero que no representan al funcionamiento del sistema en una serie de tiempo. De hecho, coincidencia no implica causalidad.

En la interpretación de los sistemas, si bien se admite la existencia de múltiples variables, es posible jerarquizar las variables clave o “*factores clave*” en el sentido de Odum⁶², variables forzantes, como también se las denomina.

Las relaciones entre variables, se pueden conceptualizar según la idea de Buckley⁶³:

⁶¹ MACHADO-ALLISON, C. E.; MACHADO ALLISON, A.; RODRIGUEZ, D. & RNAGEL, Y. *Principios de Evolución*. Caracas, Venezuela: Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, 2009. p. 1-231.

⁶² ODUM, E. *Ecología*. México: Ed. Interamericana, 1972.

⁶³ BUCKLEY, W. *La sociología y la teoría moderna*. Buenos Aires: Amorrortu Eds., 1982. 149 p.

- *Relaciones causales tradicionales*, en las que un fenómeno dado, está relacionado con fenómenos anteriores o causas, mediante nexos de una sola vía.
- *Teleología o causa final*, cuando un hecho se analiza por su relación con hechos o consecuencias futuras.
- *Relaciones recíprocas o mutuas* cuando no hay una causa y un efecto en el sentido tradicional, sino que ambas son, alternativamente causa o efecto, debido a que cada uno condiciona al otro. Este tipo de relaciones constituye la sustancia del análisis exhaustivo de los sistemas naturales.
- *Cadenas causales circulares* (pseudoretroalimentación), cuando el efecto de una variable, o hecho, influye directamente sobre el hecho original mediante una o varias consecuencias, hechos o variables de carácter intermedio. Estas cadenas son frecuentes en el funcionamiento de los sistemas autorregulados.
- *Circuitos de retroalimentación*, en los que se hallan parámetros internos que operan en concordancia con señales o símbolos representativos de ciertos estados relacionados con la meta final.

La explicación al problema de la causalidad, que es uno de los sustentos del manejo ambiental, puede encontrarse en los conceptos desarrollados por la teoría general de sistemas.

La simplificación absoluta de “*todo lo que ocurre tiene una causa*” o “*a igualdad de causas, igualdad de efectos...*”, o “*las diferencias en los efectos responden a diferencias en las causas*” puede modificarse a partir de los conceptos de *equifinalidad* y de *multifuncionalidad*, mediante las cuales, condiciones iniciales diferentes producen efectos finales similares o, en condiciones iniciales similares, pueden producirse efectos finales diferentes.

El análisis tradicionalista de la causalidad como función biyectiva, ha sido poco eficaz para el tratamiento de fenómenos tales como la emergencia, el propósito, la autorregulación y la adaptación. En gran medida a conducido a los fracasos de las evaluaciones ambientales.

La crisis del agua. Antes que los ríos mueran...

No resulta fácil imaginar las relaciones entre la disponibilidad de agua de los ríos y las demandas de la sociedad, debido a los cambios climáticos, a la aparición de nuevas necesidades y también de nuevas tecnologías.

Algunos modelos dan cuenta que la demanda mundial de agua dulce se triplicó entre 1950 y 1990 y que podría duplicarse en 2025.

Hoy, el 40% del agua utilizada, se usa para riego de unas 250 millones de hectáreas de cultivos para producción de alimentos y fibras. Al ritmo actual de crecimiento de la población mundial, en el año 2100 será necesario tener en producción unos 350 millones de hectáreas bajo riego. Esto representa la necesidad de una fuerte inversión económica, próxima a U\$S 1.250 billones.

Esta cantidad no es demasiado grande, si se tiene en cuenta que la guerra entre Estados Unidos de Norteamérica e Irak habría tenido un costo directo de U\$S 1.556,8 billones. Ha de tenerse en cuenta que el subsidio tecnológico a la agricultura implica un aumento muy grande de la energía utilizada y los consiguientes costos de contaminación en las aguas superficiales (agroquímicos, desechos sólidos y gaseosos de los combustibles), que determinarían impactos importantes sobre la calidad del agua accesible.

Si la situación actual no se modificara, habría una deficiencia marcada en la cantidad de agua dulce accesible para consumo, especialmente en los países subdesarrollados que son los que sufren y sufrirán los mayores impactos. La falta de sistemas de tratamiento de residuos domiciliarios y la cantidad creciente de agroquímicos y de metales pesados que van a las aguas superficiales, serán una amenaza creciente, al que debería adicionarse el aumento creciente de residuos de medicamentos (diclofenax, esteroides etc.) que son poco degradables.

La utilización de los ríos para generación eléctrica y para riego, significa quitarles quita energía, que los cursos de agua utilizan para moldear el paisaje y para mantener la productividad. Mientras la termodinámica diga que *“la energía no se crea ni se pierde”* esta utilización del aguas producirá impactos que deben ser cuidadosamente previstos y manejados. La determinación de lo que habitualmente denominan “caudal ecológico” es mucho más que establecer la cantidad mínima de agua que debe escurrir por una sección determinada. Implica el uso de herramientas de gestión que compatibilizan las demandas de la sociedad y las características del régimen de pulsos.⁶⁴

Estos disturbios tienen un fuerte impacto sobre los ecosistemas. Algunos ríos como el Rhin han sido declarados “ríos muertos”, pudiéndose encontrar una situación semejante en el Riachuelo o algunos tramos del Reconquis-

⁶⁴ CABRAL CRUZ, R. *Prescrição de vazão ecológica: Aspectos conceituais e técnicos para bacias com carência de dados*. Tesis doctoral. Univ. Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. Partes I, II y III. Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.

ta (Buenos Aires) y en otros ríos del tramo bajo del Paraná, donde se registra una fuerte reducción de las capturas de peces de interés comercial.

Este proceso de deterioro tiene implicancias geopolíticas en los ríos transfronterizos, debido a que los disturbios que se producen en la cuenca alta son recibidos por las poblaciones que se encuentran aguas abajo. En la cuenca alta del río Pilcomayo, en Bolivia, se realiza una intensa actividad minera a cielo abierto que tiene 546 años de antigüedad y que ha dejado sus huellas en el tramo medio del río, compartido por Paraguay y Argentina.

Perspectiva actual y acciones necesarias

En los años sesenta, la humanidad creía sucumbir ante las dificultades para generar alimentos para una población que crecía en escala geométrica. Esta percepción Malthusiana perdió vigencia al conocer mejor la relación entre la producción de recursos en la naturaleza y la demanda del aumento poblacional. Como señala Margalef, la producción primaria neta del globo se estima en algo más de 60 mil millones de toneladas de carbono orgánico/año (aproximadamente $100 \times 10^{12} \text{W}$), con diferencias espaciales importantes (entre 50 y 1.400g C/m^2 en distintas geografías). Las necesidades básicas de una población de 9.000 millones de personas se aproximan a 1,08 TW que es mucho menos que la producción global de la biosfera y representa menos del 10% de la producción de los ecosistemas utilizados por el hombre.⁶⁵ Estos números no representan las demandas exosomáticas de recursos naturales que, en algunas ciudades desarrolladas, superan en 30-40 veces el gasto energético del metabolismo básico.

En los años 70 y 80, la atención se desvió hacia resolver el problema de los diseños sólidos, líquidos y gaseosos, cuya producción tiene una relación directa con el aumento del gasto de la energía exosomática. Es decir, aquellas ciudades con mayor confort son claramente las mayores productoras de contaminación.

En los años 90 y hasta hoy, ganó importancia la preocupación por los efectos negativos del cambio climático de origen antrópico. Es curioso que se haya dirigido la atención sobre los efectos directos (cambios en la asignatura climática de distintos lugares de la biosfera, especialmente temperaturas y lluvias) sin que se hayan realizado suficientes estudios referidos a estos impactos en las cuencas hidrográficas.

⁶⁵ MARGALEF, R. Ecología como marco conceptual de reflexión sobre el hombre. En: DOU, A. (Ed.). *Ecología y Culturas*. Madrid: UPCM, 1988. p. 15-31.

La cantidad total de energía que circula en los ríos del mundo, es una cantidad mucho mayor que la energía capturada por los cultivos y por los ecosistemas naturales como producción primaria neta, ya mencionada. El caudal líquido de los ríos es un buen indicador de tendencias a nivel continental, ya que es enteramente dependiente del balance de temperaturas y del balance hídrico. Parafraseando a Sioli *los ríos son las arterias del paisaje*. Cambios climáticos representarán modificaciones en la disponibilidad de agua de los ríos, lo que determinará modificaciones en los procesos de erosión-transporte-sedimentación. Esto tendrá consecuencias sobre la navegación, pero también sobre la distribución y abundancia de las poblaciones animales y vegetales, sobre la disponibilidad de agua para abastecimiento de las ciudades de la cuenca, del agua para riego (necesaria para la agricultura, ganadería y minería), y también tendrá un efecto muy importante sobre la carga de lavado de sustancias contaminantes producidas en las cuencas.

Es por eso necesario repensar la función y destino de los ríos en un universo con asimetrías poblacionales, desigualdad en la distribución de los recursos, aumento de la contaminación, fragmentación de los cursos de agua por obras de aprovechamiento hídrico, y cambios en la disponibilidad de agua como consecuencia de cambios climáticos naturales e inducidos por el hombre.

Los ríos y sus humedales son mucho más que “agua limpia”. Son escenarios de vida tanto para plantas y animales como para el hombre, según lo demuestra la historia. La percepción humana de estos ecosistemas ha cambiado favorablemente. Las investigaciones en este campo son aún incipientes y pocas veces permiten responder de forma eficaz en períodos de crisis (inundaciones, sequías u otras causas de estrés). Es necesario

- mejorar el conocimiento de su variabilidad y de los factores que regulan su estabilidad;
- rescatar “la cultura del agua”, mediante la cual el hombre convivía con eventos extremos de inundación y sequía unos 5.000 años antes del presente;
- avanzar en investigaciones para conocer el uso sostenible de los humedales y sus recursos, dentro de programas de ordenamiento territorial de las cuencas;
- detectar y calificar aquellas acciones y procesos que constituyan amenazas actuales y potenciales;
- analizar los efectos del cambio climático global en los humedales, a nivel regional y suprarregional;

Juan José Neiff es magister en Ecología Acuática Continental, doctor en Biología y profesor de Educación Ambiental en la Universidad Nacional del Nordeste. Es investigador principal del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y director del Centro de Ecología Aplicada (CECOAL), Corrientes, Argentina.
jj@neiff.com.ar

- acrecentar las acciones de monitoreo permanente a nivel de indicadores de cambio de estado del medio natural;
- gestionar programas destinados a la recuperación de la salud de los ecosistemas y al desarrollo de alternativas de uso sostenible.

Estas investigaciones no debieran ser un compromiso exclusivo de los científicos, debería involucrar a los distintos estamentos de la sociedad. La conservación de los ríos no depende solamente del conocimiento que se pueda lograr sobre ellos, también requiere de buenos hábitos de respeto al ambiente y de su uso responsable.