

REGIONALIZACIÓN DE LA CUENCA AMAZÓNICA BOLIVIANA: LAS HIDRO-ECOREGIONES DE LA ZONA ANDINA.

REGIONALIZATION OF THE BOLIVIAN AMAZONIAN DRAINAGE BASIN: HYDRO-ECOREGIONS OF THE ANDEAN ZONE



Jean-Gabriel Wasson¹ y Bénédicte Barrere²

RESUMEN

Orientar las políticas de desarrollo en relación a los problemas del agua necesita una visión global de los hidrosistemas, pero la influencia de la heterogeneidad geográfica regional sobre el funcionamiento ecológico de los ríos es todavía poco investigada. Se propone una regionalización dedicada a los ríos de la parte andina de la cuenca amazónica boliviana. La aproximación científica se funda en los conceptos de control jerárquico de los hidrosistemas, reconociendo como determinantes primarios la estructura física de las cuencas (geología y geomorfología) y el clima. Estos factores determinan a la escala local la hidrología, la morfo-dinámica y la química de los ríos, los cuales controlan el funcionamiento ecológico. En base a estos conceptos se han definido hidro-ecoregiones (HER), utilizando varios mapas o imágenes satelitarias existentes procesados mediante un SIG (geología, geomorfología, modelo digital de altura, clima, vegetación natural y áreas forestales, índice NDVI). El mapa de las HER está presentado, con ejemplos de la variación de sus características naturales. Las HER constituyen una regionalización a priori, con la hipótesis que en cada región los ríos presentarían rasgos físicos y biológicos diferentes.

Palabras clave: Regionalización, ríos, Andes, Bolivia, Sudamérica, SIG.

Fonds Documentaire IRD

Cote : B * 26666 Ex : univ

ABSTRACT

A global view of the hydrosystems is necessary to define development policies in relation to water problems, but the influence of regional geographic heterogeneity on river ecosystems functioning is still poorly known. We propose here a regionalization of the Andean part of the Bolivian Amazonian drainage basin focusing on running waters systems. The top-down scientific approach is based on the hierarchical control concepts of hydrosystems, which recognise as primary control factors the geophysical structure of the basin (geology and geomorphology), and the climate. These factors determine at the reach scale river hydrology, morpho-dynamics and hydro-chemical characteristics, and the hydrosystem ecological functioning. With this conceptual background, we defined "Hydro-ecoregions" (HER), using various maps and satellite data processed with a GIS (geology, geomorphology, digital elevation model, climate, natural vegetation and forested areas, NOAA-NDVI). The HER map is presented, with some examples of the natural features in different regions. HER make up an a priori regional frame, with the hypothesis that in each region rivers will present different physical and biological characteristics.

Key words: Regionalization, stream, river, Andes, Bolivia, South America, GIS.

INTRODUCCIÓN

La cuenca amazónica boliviana representa el futuro de Bolivia. Pero el desarrollo de esta inmensa zona, aún muy poco poblada, se enfrenta con problemas ligados a la conservación de la biodiversidad acuática frente al aprovechamiento de los recursos hídricos y biológicos de los ríos. Para definir políticas de manejo adecuadas, se requiere una visión global de los ecosistemas acuáticos, de sus poten-

cialidades y sensibilidades a los impactos antrópicos. En este sentido, una regionalización de los tipos ecológicos de ríos constituiría una herramienta muy útil para los actores del desarrollo.

A nivel científico, los objetivos de una regionalización son diferentes de aquellos de una tipología, que consiste en agrupar objetos cuyas características son conocidas, sin tomar en cuenta su localización. Aquí se requiere definir espacios geográficos en los cuales los hidrosistemas deberían pre-

¹ IRD (Institut de Recherche pour le Développement), convenio Instituto de Ecología - UMSA, Casilla 9214, La Paz, Bolivia. E-mail: jg.wasson@mail.megalink.com
² ABTEMA (Asociación Boliviana de Teledetección para el Medio Ambiente) Casilla 14248, La Paz, Bolivia.

sentar *a priori* características semejantes en términos de funcionamiento ecológico y de biodiversidad. De ahí la necesidad de apoyarse en un marco conceptual sólido que permita relacionar el funcionamiento ecológico de los ríos a las características geográficas de sus cuencas.

Para los ecosistemas terrestres, la aproximación por ecoregiones iniciada en los Estados Unidos por BAILEY (1983) es ahora difundida a nivel mundial. Un mapa de ecoregiones de los EE.UU, orientado principalmente hacia la regionalización de los sistemas acuáticos, fue propuesto por OMERNICK (1987), con el propósito de definir objetivos regionales realistas para la calidad del agua y la gestión de los ríos (HUGUES *et al.* 1986, HUGUES y LARSEN 1988). Se ha demostrado una buena concordancia entre estas ecoregiones y la química del agua, las poblaciones de peces, y hasta un cierto nivel con los invertebrados acuáticos (ROHM *et al.* 1987, WHITTIER *et al.* 1988). Esta aproximación tiene un interés evidente para la gestión (HUGUES *et al.* 1990, OMERNICK y GRIFFITH 1991, WARRY y HANAU 1993), pero carece a veces de una explicación funcional de los patrones regionales observados o esperados en los hidrosistemas.

El marco conceptual para la regionalización se enriqueció con las teorías de control jerárquico de los hidrosistemas, y particularmente el escalamiento de las escalas físicas, desde la cuenca hasta el micro-hábitat, propuesto por FRISSELL *et al.* (1986) y NAIMAN *et al.* (1992). Entonces, el hábitat de los organismos acuáticos, depende a escalas mayores de las características geomorfológicas e hidrológicas de los valles, las cuales son condicionadas por la estructura geofísica y climática de la cuenca. Estos conceptos justifican una regionalización *a priori* de los hidrosistemas a partir de las características geológicas, geomorfológicas y climáticas, que permiten definir "Hidro-ecoregiones" (WASSON *et al.* 1993). La hipótesis subyacente es que al interior de una misma región, los ríos presentarán rasgos físicos y biológicos semejantes con un mismo patrón, de evolución longitudinal, y que las regiones se diferenciarán a nivel de los ríos en el rango de variación de por lo menos un parámetro abiótico o biótico importante. Este método fue aplicado en la cuenca de la Loire en Francia (WASSON 1996).

El propósito del presente trabajo es proponer hidro-ecoregiones (HER) para la parte andina de la cuenca amazónica boliviana, con el objetivo de proporcionar un marco explicativo de la distribución de los tipos de ecosistemas acuáticos. Este marco regional permitirá luego orientar investigaciones de campo para definir las características abióticas y biológicas de referencia de los ríos en las diferentes regiones, constituyendo así una base científica para el manejo.

APROXIMACIÓN CIENTÍFICA

Marco teórico

Numerosos trabajos se han dedicado al estudio de los factores que determinan la zonación longitudinal de las comu-

nidades acuáticas a la escala de una red hidrográfica. Se han puesto sucesivamente en evidencia el papel de las condiciones físico-químicas, equivalentes a un "hidro-clima", del hábitat físico de los recursos tróficos (WASSON 1989). Estos factores-claves del medio acuático constituyen el marco al interior del cual se organizan las interacciones bióticas (SOUTHWOOD 1977, 1988). Pero la influencia de las condiciones morfodinámicas sobre parámetros esenciales como el oxígeno disuelto o la disponibilidad de los recursos tróficos, llega a asignar un papel central al hábitat físico, por lo menos en los hidrosistemas lineares relativamente sencillos.

Posteriormente, se desarrollaron conceptos enfocando en la importancia para la estructuración de la biodiversidad, de la variabilidad física resultante de la dinámica hidrológica y de la heterogeneidad morfológica (Intermediate Disturbance Hypothesis, WARD y STANFORD 1983, RESH *et al.* 1988 ; Patch Dynamics Concept, TOWNSEND 1989, TOWNSEND y HILDREW, 1994). La integración de estas teorías llegó a definir los hidrosistemas como una estructura morfodinámica a cuatro dimensiones (espaciales y temporal), controlada por la hidrología y la morfología (AMOROS *et al.* 1987, AMOROS y PETTS 1993).

En el mismo tiempo, se reconoció la realidad de un control jerárquico de los ecosistemas, particularmente evidente en las aguas corrientes : el río es controlado por su cuenca (HYNES 1975, LOTSPEICH 1980). FRISSELL *et al.* (1986) demostraron el interés de apoyar una clasificación de los ríos en la organización jerárquica del hábitat físico, desde la cuenca hasta el micro-hábitat, un concepto generalizado por NAIMAN *et al.* (1992). Estos trabajos no han llegado realmente a un método de regionalización, pero todos estos autores reconocen como determinantes primarios del funcionamiento ecológico de los ríos, a la escala de la cuenca, la geología, el relieve y el clima.

Entonces, una síntesis del conocimiento actual sobre los factores que determinan el funcionamiento ecológico de los ríos podría resumirse de la siguiente manera (Fig. 1). A la escala local, en el medio acuático, la biodiversidad y la productividad de las comunidades acuáticas responden a los "factores-claves" que son el hábitat físico (condiciones hidráulicas, substrato), el clima acuático (luz, temperatura, gases disueltos, hidro-química), y los recursos tróficos (producción primaria endógena y aportes de materia orgánica). A la escala del tramo, la distribución espacial y la variabilidad temporal de estos factores-claves dependen del régimen hidrológico y de la geomorfología del valle. Estos "factores de control" determinan la morfo-dinámica fluvial, la estructura de la vegetación ribereña, y la conectividad del río, o sea las interacciones con la zona de inundación. Finalmente, a una escala regional, estos factores dependen de "determinantes primarios" que son la geología (naturaleza de las rocas), el relieve (geomorfología) y el clima (precipitaciones y temperatura). Estos determinantes primarios constituyen el nivel más alto en la jerarquía de los factores que controlan el funcionamiento físico y ecológico de los ríos.

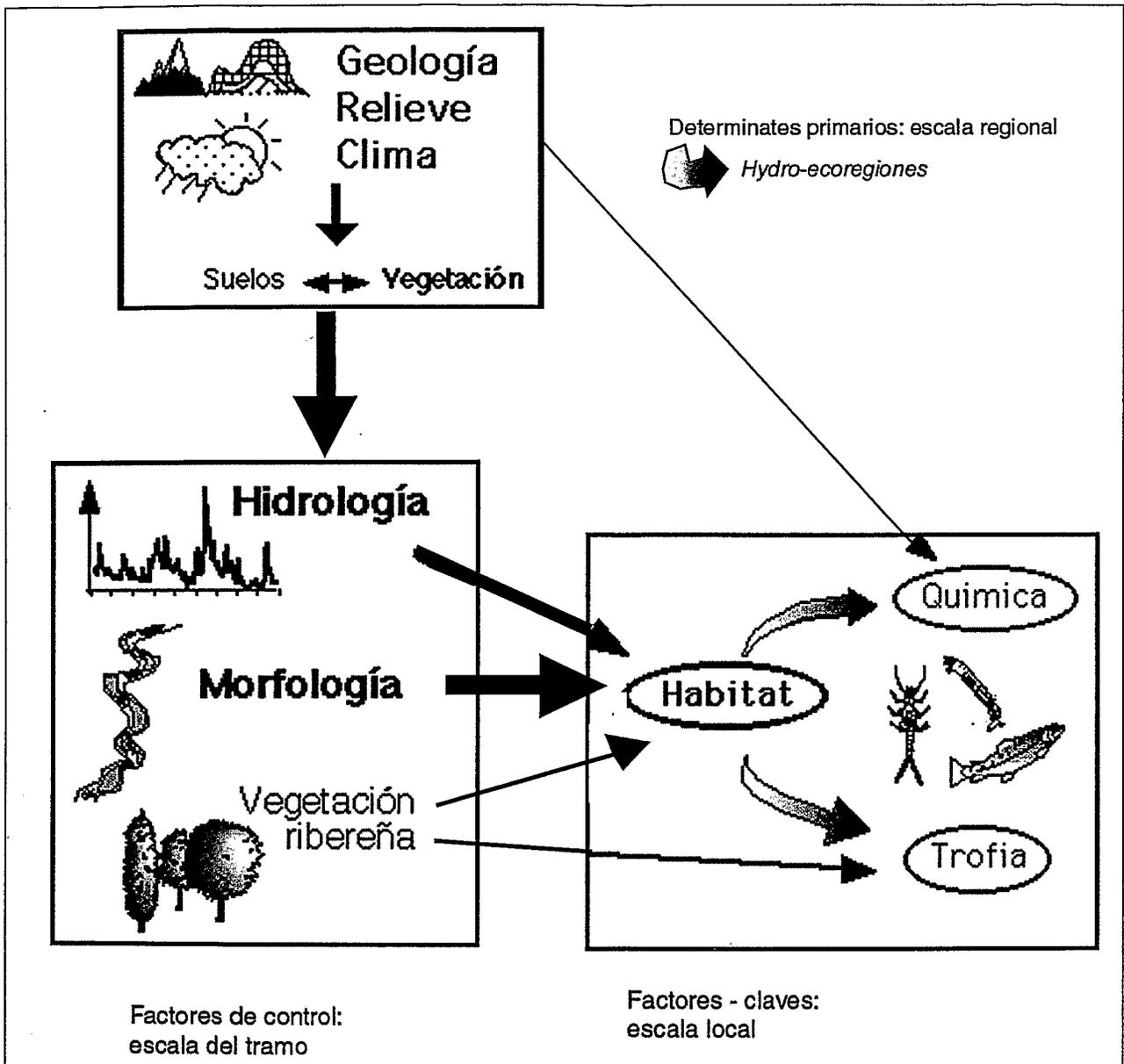


Figura 1. Marco conceptual para la regionalización.

A la escala local, las comunidades acuáticas responden a los "factores-claves": hábitat físico (hidráulica, substrato), clima acuático (luz, temperatura, hidroquímica), recursos tróficos (producción primaria y materia orgánica). A la escala del tramo, estos parámetros dependen de "factores de control"; régimen hidrológico, morfología y vegetación ribereña. A la escala regional, estos factores dependen de "determinantes primarios": geología (naturaleza de las rocas), relieve (geomorfología) y clima (precipitaciones y temperaturas). Los suelos y la vegetación intervienen el balance hídrico y sedimentológico, pero ambos dependen de los determinantes primarios. Las hidro-ecoregiones son definidas a partir del nivel más alto de los factores que controlan el funcionamiento físico y ecológico de los ríos.

Al nivel de las cuencas, los suelos y la vegetación intervienen evidentemente en el balance (cualitativo y cuantitativo) de los flujos de agua y sedimentos que generan los ríos. Pero ambos parámetros se encuentran últimamente determinados por las características geofísicas y climáticas mencionadas.

Fundamentos de la regionalización.

Cabe aclarar en primer lugar que el término de regionalización puede referirse a dos aproximaciones opuestas:

ascendente (bottom-up) o descendiente (top-down). La primera consiste en agrupar geográficamente objetos con características semejantes, para luego delimitar regiones homogéneas. Eso necesita tener numerosos objetos distribuidos de manera equitativa en todo el espacio estudiado. En el caso de los ecosistemas acuáticos, este método se enfrenta inmediatamente con el problema de la colección de datos bastante complejos. El trabajo necesario sobrepasa las posibilidades de los hidrobiólogos en casi todos los países, peor en Bolivia con el problema del acceso a los sitios.

La aproximación escogida aquí es claramente descendiente (top-down), no solamente por esta razón sino porque "mejor vale clasificar las causas que los efectos" (LOTSPEICH 1980). Esta aproximación permitirá proponer un marco explicativo de los patrones observados al nivel local. Entonces, la definición de las hidro-ecoregiones (HER) se basa esencialmente en los determinantes primarios: geología, relieve y geomorfología, clima. Pero hay que destacar aquí el papel de la vegetación que integra a los factores climáticos, edáficos y topográficos. Además, la cobertura vegetal regula el balance hídrico mediante la evapotranspiración y controla la erosión. Entonces, la vegetación natural que constituye a la vez un indicador de las condiciones climáticas y un factor de control de los ríos se coloca como un parámetro básico para la delimitación de las HER.

A este nivel, el problema sería definir regiones homogéneas en cuanto a estos parámetros. Básicamente, la homogeneidad depende de la escala de observación, y debe ser evaluada por referencia a la heterogeneidad global del espacio analizado. En este sentido, la parte andina de la cuenca amazónica boliviana es muy heterogénea, tanto al nivel geológico (del primario al cuaternario) como del relieve (desde más de 6000 metros hasta 250 m) o del clima (de 5000 hasta 500 mm/año de precipitaciones). Eso significa que la HER conservarían una heterogeneidad interna bastante elevada en algunos parámetros. La idea central es que la heterogeneidad intra-regional debe ser inferior a la variación inter-regional.

El mayor problema para definir regiones es el de fijar límites geográficos. Existen en el espacio analizado fronteras bastante nítidas, como entre el dominio húmedo y el dominio seco, o entre las zonas de montañas andinas y de serranías subandinas. En este caso los límites son evidentes. Pero también nos enfrentamos con gradientes altitudinales o climáticos, y con una heterogeneidad local bastante fuerte en algunas zonas, debida por ejemplo al efecto de "sombra de lluvias" en los valles andinos.

Cabe aclarar aquí que la problemática de una regionalización exclusivamente dedicada a los ríos es bastante diferente de la definición de ecoregiones terrestres. Por oposición a un paisaje vegetal que puede ser fragmentado en el espacio, los ríos son básicamente sistemas lineales, orientados río-arriba hacia río-abajo, que integran a medida que bajan los aportes de su cuenca. Así, un río de segundo o tercer orden (*sensu* STRAHLER 1957) habrá ya integrado la heterogeneidad que su cuenca podría presentar a una escala kilométrica. Esta característica fundamental de los hidrosistemas justifica la definición de regiones bastante amplias, cuya heterogeneidad será integrada como una característica de la regional evaluada estadísticamente. Un buen ejemplo es dado por los "derrumbes" (landslide), que existen en todas las cuencas andinas, pero con una frecuencia muy variable según las regiones. Efectos micro-climáticos muy locales (orientación de la vertiente, sombra de lluvia) pueden ser considerados de la misma manera. Solamente en dos casos, se han diferenciado como pequeñas regiones, valles secos al interior de la zona Yungeña húmeda, por el hecho que estos valles tienen una

extensión suficiente para influenciar las características de los ríos.

Más problemático es el caso de los gradientes, porque hay siempre algo arbitrario en fijar un límite al medio de un cambio gradual. Hemos considerado aquí de manera diferente los gradientes altitudinales y climáticos.

Todos los ríos bajan según el eje de pendiente máxima de su cuenca, y entonces integran muy rápidamente los cambios asociados. Estos cambios, muy bien conocidos como un efecto de "zonación longitudinal", afectan a los parámetros morfológicos y climáticos del río, y a la vegetación de la cuenca. Los primeros - disminución de la pendiente y de la granulometría del lecho, aumento del caudal y de la temperatura - son efectos graduales, que pueden ser relacionados con la altura según modelos estadísticos muy sencillos. Estos modelos tendrán un valor de predicción bastante elevado al interior de regiones homogéneas en cuanto a la geomorfología y al clima, donde la variación de altura es el principal parámetro que determina la zonación longitudinal. Por ejemplo, entre 4500 y 1000 m en los Yungas del norte de La Paz, la temperatura promedio de los ríos aumenta de 4°C por 1000 m de bajada ($r^2 = 0.83$), o sea mucho menos que la temperatura del aire (WASSON *et al.* 1989). Similarmente, se ha calculado estadísticamente, en base a mapas topográficos, el valor promedio de la pendiente de los ríos por orden de STRAHLER en las varias HER. Se llega así a definir un perfil longitudinal típico de los ríos en cada región, con el rango correspondiente de variación (GOURDIN 1997). Esta información es básica para interpretar la distribución de los organismos acuáticos. Se nota también generalmente un aumento de la conductividad río abajo, pero el rango de variación longitudinal de este parámetro es despreciable por comparación a la variación inter-regional.

El único parámetro que no varía de manera gradual con la altura es la vegetación de la cuenca. En toda la zona húmeda de los Yungas peri-amazónicos (cf. abajo), las nubes se concentran a una altura intermedia (2800-3400 m) determinando la formación de un bosque nublado conocido como "Ceja de monte", el cual se transforma más abajo en un bosque montañoso húmedo (RIVERA *et al.* 1996). El mismo fenómeno ocurre en los Yungas peri-chaqueños, aunque a una altura inferior. Más arriba, se encuentran formaciones vegetales ralas conocidas como páramo (húmedo) o pajonal (seco). Esta frontera vegetal genera cambios importantes en los factores tróficos, climáticos y químicos de los ríos. Los árboles ribereños aportan materia orgánica (hojas) y generan un micro-clima que limita las variaciones diarias de temperatura, efecto fuertemente acentuado por la nebulosidad permanente en la zona (WASSON *et al.* 1989). Estas formaciones vegetales (bosque nublado y montañoso húmedo) generan también suelos ácidos (RIVERA *et al.* 1996) que influyen en la composición química de los ríos.

Por todas estas razones, se ha privilegiado una regionalización por macizos geomorfológicos al interior de los cuales los gradientes altitudinales generan cambios graduales pre-visibility al nivel de los ríos. Pero el cambio de vegetación (rala

- bosque) fue considerado como un límite importante para delimitar las regiones de altura.

Ocurren también cambios climáticos graduales que no son debidos al relieve, por ejemplo en la zona del Chapare donde las precipitaciones varían de 5000 a 1200 mm/año según un gradiente oeste - este, tal variación es demasiado fuerte para ser incluida en una sola región. En este caso, un cambio fisiográfico logró delimitar dos HER, pero este límite conserva un aspecto arbitrario.

MÉTODOS

Datos utilizados

La regionalización se hizo en base a varios mapas o fuentes de datos existentes (Cuadro 1). De manera óptima, las fuentes de datos deberían ser pertinentes, fiables, homogéneas, y geográficamente exactas. La pertinencia se refiere a la información relativa a los determinantes geofísicos y climáticos.

Cuadro 1. Datos utilizados para la eliminación de las hidro-ecoregiones-ecoregiones. Estos mapas son incluidos en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

S.I.G. Cuenca Amazónica Boliviana

Geología :

- Mapa Geológico (1/1.000.000) - SERGEOMIN 1998.

Relieve :

- Modelo Digital de Elevación (30") GTOPO30 - USGS.
- Mapa Fisiográfico (1/1.000.000) - GEOBOL 1996.
- Regiones geomorfológicas de la zona andina en base a imágenes ERTS (1/500.000) - GOURDIN 1997.

Clima :

- Mapas de temperaturas y precipitaciones (1/5.000.000) - Atlas PHICAB 1990.

Vegetación (y uso del suelo) :

- Mapa de Vegetación (1/1.500.000) - RIVERA *et al.* 1996.
- Mapa Forestal + agricultura (1/1.000.000) - CUMAT 1996.
- Imagen NOAA - Índice NDVI del 23/05/98 - ABTEMA.

Hidrografía

- Mapa Hidrográfico (1/1.500.000) - IGM 1986.

Todos los datos utilizados, menos el Modelo Digital de Elevación (MDE), contienen una información homogénea sobre el espacio estudiado (Cuadro 1).

El mapa geológico es poco informativo en su forma original basada en la edad de las formaciones. Este mapa fue interpretado en términos de dureza y de características químicas de las rocas, en base a su leyenda que da informaciones cualitativas sobre la litología.

Para analizar el relieve, tres fuentes independientes fueron utilizadas. El MDE, con un pixel aproximadamente kilométrico (30"), es generalmente exacto en las zonas secas donde fue desarrollado a partir de imágenes satelitarias, pero bastante falso en las zonas húmedas donde fue computarizado a partir de mapas ortográficos a 1/1 000 000. Este defecto impidió calcular las pendientes. El mapa fisiográfico presenta una tipología a veces imprecisa, y tiene una distorsión bastante fuerte (cerca de 15 km. en la zona andina). Su validez fue evaluada a partir de un análisis de imágenes satelitarias ERTS (GOURDIN 1997), lo que permitió comprobar la información y precisar la zonación geomorfológica.

Los mapas climáticos son muy poco precisos, debido al pequeño número de estaciones existentes. Aquí tenemos el caso más evidente de una información pertinente, pero inútil para delimitar regiones debido a su imprecisión geográfica. Por esta razón, se utilizaron los mapas de vegetación como indicadores geográficamente exactos del clima, los mapas climáticos aportaron solamente una información cualitativa que permite caracterizar globalmente las HER.

Se ha destacado la importancia de la vegetación natural como indicador del clima y factor de control de los ríos. Para analizar la cobertura vegetal, se han utilizados tres fuentes independientes. El mapa de vegetación se funda en una tipología fitosociológica bastante detallada, pero se encuentra geográficamente muy impreciso y a veces falso. Por lo contrario, el mapa forestal realizado en base a imágenes LANDSAT presenta una tipología más sencilla, pero se revela muy preciso y válido al nivel geográfico, y tiene la ventaja de delimitar las zonas de agricultura. Se ha comprobado la información llevada por este mapa por comparación con una imagen NOAA del inicio de la época seca (23/05/98), procesada con el Índice NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) que refleja la cobertura vegetal. La concordancia es muy buena,

lo que justificó utilizar el mapa forestal como una base fiable para la delimitación de las HER.

Finalmente, el mapa hidrográfico del IGM, que tiene la mejor validez geográfica (comprobada con mapas topográficos al 1/50 000 y levantamientos por GPS), fue utilizado como base de referencia. Este mapa fue utilizado para delimitar las cuencas y analizar la red hidrográfica, pero tiene la desventaja de inventariar una proporción mucho menor de los pequeños ríos en la zona húmeda que en la zona seca.

Delimitación de las Hidro-ecoregiones

Todos los datos fueron recuperados en forma digital a partir de varias fuentes, georeferenciados e integrados en un sistema de información geográfico (SIG) desarrollado con el software ArcView®, menos el MDE procesado con IDRISI®. Los varios mapas e imágenes fueron impresos a una misma escala (1:2 000 000) para dibujar las HER. A pesar de este trabajo, sigue existiendo una cierta distorsión geográfica entre las varias fuentes de datos.

Para delimitar las HER, se utilizaron en primer lugar las fronteras geofísicas y climáticas más nítidas, pero sin jerarquizarlas. Estas fronteras permiten definir HER de primer nivel. Luego, al interior de las regiones más heterogéneas, se buscaron cambios visibles en estos parámetros para delimitar HER de segundo nivel. Se utilizó toda la información disponible,

pero los mapas más útiles para definir los límites fueron el mapa fisiográfico y el mapa forestal, utilizando la base hidrográfica para intentar de corregir las distorsiones. Asumiendo todas las fuentes de errores, la precisión de los límites del mapa obtenido podría ser evaluada aproximadamente a unos tres hasta cinco kilómetros.

Comparación con otras aproximaciones

El método de regionalización es básicamente el mismo que fue utilizado en la cuenca del río Loire (117 000 km²) en Francia (WASSON 1996), pero se utilizaron más datos en Bolivia para compensar la imprecisión de algunas fuentes. Esta aproximación tiene mucha similitud con el trabajo de OMERNICK (1987) tanto en los objetivos como en el método, pero se diferencia también de esta en dos puntos importantes:

- Un marco teórico más elaborado que permite enfocar claramente en la regionalización de los factores de control del funcionamiento físico y ecológico de los ríos, con un objetivo exclusivo de regionalización de los hidrosistemas. Este enfoque, completado por un análisis de los factores hidrológicos y morfológicos que caracterizan las regiones, permitirá proponer un marco explicativo de los patrones observados al nivel de los ríos.
- Una definición de las HER basada exclusivamente en los determinantes naturales, siendo los factores antrópicos analizados de manera independiente, mientras

Cuadro 2. Hidro-ecoregiones de primer y segundo nivel definidas en la parte andina de la cuenca amazónica boliviana (Ver fig.2).

Hidro-ecoregión nivel 1	Cod. HER 1	Hidro-ecoregión nivel 2	Cod. HER2
Cordilleras glaciares	Cg	Cordilleras glaciares	Cg
Montañas húmedas	Mh	Montañas húmedas	Mh
Yungas peri-amazónicas	Ya	Ya- altos	Yaa
	Ya	Ya - bajos	Yab
	Ya	Ya- sub-húmedos	Yas
	Ya	Ya- valles secos	Yav
	Ya	Ya - "Chapare Oeste"	Yaco
	Ya	Ya - "Chapare Este"	Yace
Valles secos	Vs	Valles secos	Vs
intra-andinos		intra-andinos	
Montañas secas	Ms	Ms - altas	Msa
	Ms	Ms - medianas	Msm
Valles internos	Vi	Vi - depresión	Vid
	Vi	Vi - encajonados	Vie
Valles semi-áridos	Va	Valles semi-áridos	Va
Yungas peri-chaqueños	Yc	Yungas peri-chaqueños	Yc
Subandino peri-amazónico	Sa	Sa - húmedo alto	Saa
	Sa	Sa - húmedo bajo	Sab
	Sa	Sa - hiper-húmedo	Sah
	Sa	Sa - sub-húmedo	Sas
Subandino peri-chaqueño	Sc	Sc - semi-seco	Scs
	Sc	Sc - seco	Scs

Hidro-ecoregiones de la zona andina

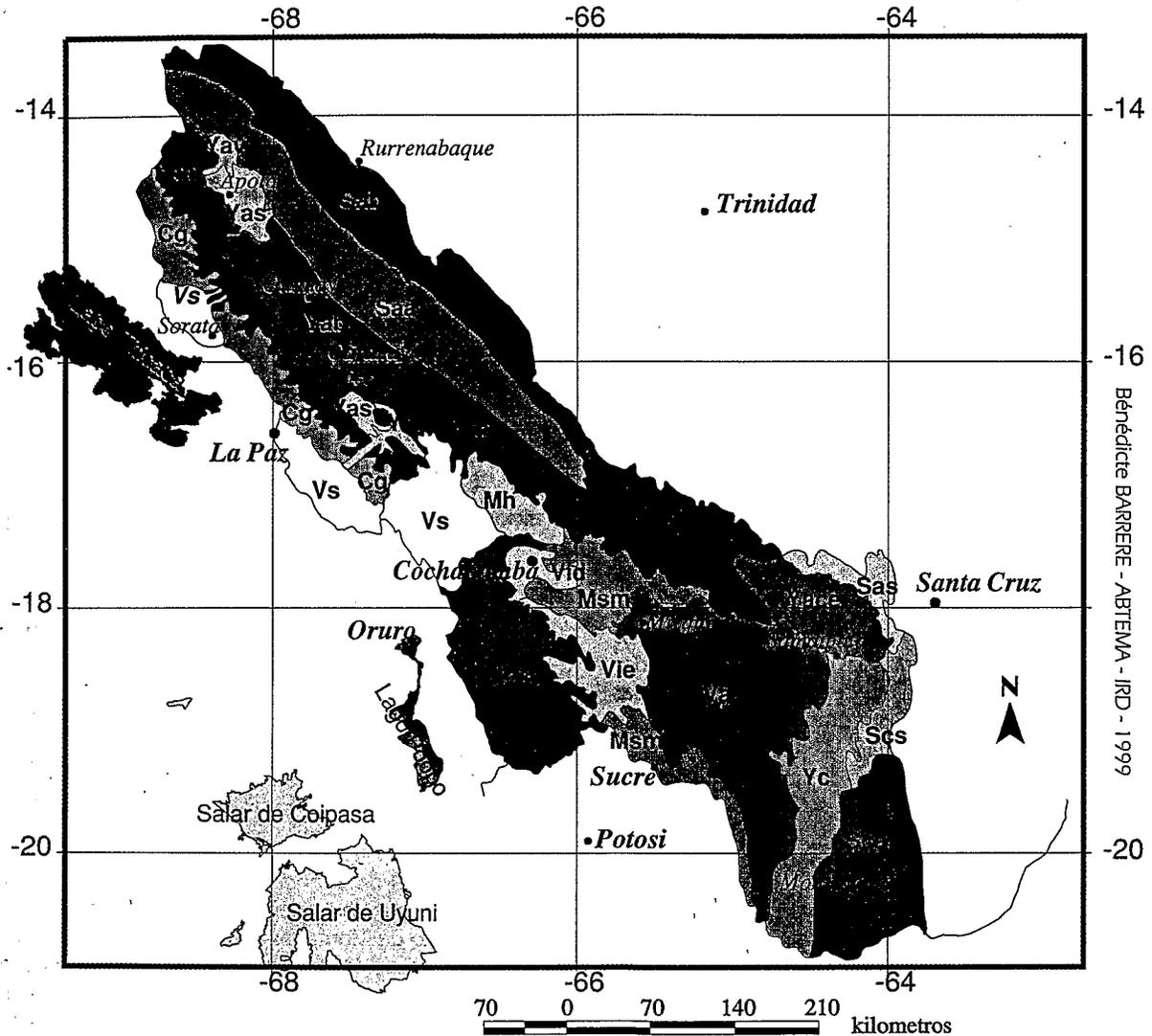


Figura 2. Mapa de las hidro-ecoregiones de la zona andina en la cuenca amazónica boliviana. Ver cuadro 2 para la leyenda de los códigos.

OMERNICK utilizó el uso del suelo como parámetro principal para su regionalización. Eso permitirá definir un marco de referencia del funcionamiento natural para analizar separadamente las fuentes de impactos. Esta aproximación llega a la definición de "regiones de gestión" con sus problemas específicos (WASSON 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la parte andina de la cuenca amazónica boliviana, 34 regiones unitarias (o sea polígonos en el SIG) fueron definidas, correspondiendo a 21 hidro-ecoregiones de segundo nivel (HER2) y 10 hidro-ecoregiones de primer nivel (HER1) (Fig. 2 y Cuadro 2).

Estructura general de la zona andina

La vertiente oriental de los Andes bolivianos se divide en dos grandes zonas climáticas. Al norte, se encuentra un dominio húmedo peri-amazónico, limitado por el eje cordillerano que pasa al norte de una línea Sorata, La Paz, Cochabamba, Samaipata (Fig. 2). El clima de esta zona es influenciado por los movimientos de las masas de aire tropical provenientes de la Amazonía central, que desviadas por la cordillera toman una orientación general norte-sur. Al sur de esta línea, abrigado de la influencia amazónica, se encuentra un dominio seco que llamaremos "peri-chaqueño" porque se encuentra más influenciado por las masas de aire provenientes del Chaco al este, y de Argentina al sudeste durante el invierno.

Al nivel geofísico, el cambio mayor corresponde a una división, paralela al eje de la cordillera, entre la zona de montañas internas y de serranías subandinas. La zona de montañas se caracteriza por alturas generalmente arriba de los 2000 metros, rocas de edad primaria (ordovícico, silúrico, devónico, carbónico) mas o menos metamorfozadas, sin calcáreo. La red hidrográfica es muy densa, y los ríos bajan perpendicularmente a las cordilleras en valles disectados a veces muy angostos. La zona subandina, bastante amplia al norte y al sur de la zona estudiada, casi desaparece al nivel del llamado "codo de los Andes", a la altura de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Se caracteriza por serranías paralelas a la cordillera donde aparecen rocas secundarias calcáreas, de altura moderada (2000 m.), limitando valles abiertos o amplias depresiones llenadas de sedimentos terciarios.

Descripción de las Hidro-ecoregiones

El dominio húmedo, que abarca la mayor parte de las cuencas altas de los ríos Beni e Ichilo, se divide entre Cordilleras glaciares, Montañas húmedas, Yungas y Subandino peri-amazónicos. La HER de las Cordilleras glaciares (Cg), encima de los 3400 m, se caracteriza por macizos superando los 5000 m, lo que determina la presencia de nieves permanentes, un factor fundamental de regulación del régimen hidrológico de los ríos. Los granitos intrusivos cuaternarios son rodeados de rocas metamorfozadas muy duras, marcadas por la erosión glacial. Una región de Montañas húmedas (Mh) mas bajas (3400 - 5000 m), sin granitos ni glaciares, se encuentra al norte de Cochabamba.

Debajo del límite de la vegetación rala, se extiende la amplia región de los Yungas peri-amazónicos (Ya), caracterizada globalmente por un paisaje de bosque montañoso húmedo. Por ser la mas compleja de toda la zona, esta región se divide entre 6 HER de segundo nivel. La zona alta (Yaa), mas extensa, corresponde a valles perpendiculares al eje cordillerano, muy angostos y con una fuerte declividad. Esta HER rodea una región mas baja (Yab) y caliente, limitada al noreste por la primera serranía que delimita la zona subandina. El relieve es menos acentuado, y los valles mas abiertos toman progresivamente un rumbo paralelo a la cordillera. Al norte y al sur de esta región se encuentran dos zonas abrigadas sub-húmedas (Yas), caracterizadas por una vegetación de sabanas bastante antropizada: son las zonas de cultivo tradicional de la coca. Contiguos a estas regiones sub-húmedas, dos valles afectados por un extenso efecto de sombra de lluvia se individualizan como "valles secos" (Yav) en la región Yungeña. Los Yungas peri-amazónicos se continúan hacia el este en la parte alta de la zona del Chapare, al norte de la línea Cochabamba-Samaipata. La parte oeste de alto Chapare (Yaco) tiene mucha similitud con la HER Yungas altos (Yaa), de la cual se distingue por su extrema pluviosidad (> 5000 mm/año). Las precipitaciones disminuyen rápidamente hacia el este del alto Chapare (Yace), que se individualiza además por un relieve menos acentuado y rocas mas erodibles (areniscas), lo que le confiere una cierta similitud con los Yungas bajos (Yab).

La región subandina peri-amazónica (Sa) corresponde a un paisaje muy contrastado entre serranías y depresiones cubier-

tas por un bosque pluvial. La red hidrográfica es generalmente poco densa, y las rocas donde predominan areniscas y arcillas son muy erodibles. La región alta (Saa) es constituida por un amplio sindinal cuyas laderas tienen pendientes moderadas, limitando largos valles abiertos. La región baja (Sab), es constituida por amplias depresiones ocupadas por colinas terciarias, enmarcadas por serranías bajas con laderas abruptas. Un macizo mas alto, donde nacen los principales ríos de la zona, hace parte de esta HER. La región Subandina peri-amazónica se continua en la parte baja del Chapare, estrechándose paulatinamente. Aquí la región no está limitada como la precedente por una serranía del lado amazónico. La red hidrográfica es muy densa, y los ríos perpendiculares a la cordillera desembocan directamente en la llanura. Como la parte alta del Chapare, la parte baja se divide entre una región oeste, hiper-húmeda (Sah) y una parte este sub-húmeda (Sas). La parte oeste incluye dos zonas muy estrechas: las ultimas serranías y a la zona correspondiente de piedemonte, que no se han separado porque todos los ríos cruzan perpendicularmente ambas zonas y presentan un perfil similar. La parte este (Sas) constituye una transición entre el subandino peri-amazónico y el perichaqueño que veremos a continuación.

El dominio seco corresponde principalmente a la cuenca del río Grande, pero incluye también tres subcuencas del río Alto Beni. Estas cuencas, abrigadas por el eje de las Cordilleras glaciares y Montañas húmedas, conforman una HER de Valles secos (Vs) caracterizadas por un relieve sumamente disectado dentro de un conjunto sedimentario poco consolidado. Las pendientes de las laderas, las rocas muy erodibles y la vegetación xérica hacen que estos valles presenten tasas de erosión sumamente elevadas (GUYOT 1993).

La cuenca alta del río Grande tiene una estructura concéntrica con un eje principal orientado oeste este. Está rodeada por un conjunto de Montañas secas (Ms), caracterizadas por rocas localmente calcáreas bastante heterogéneas en cuanto a la dureza, y una vegetación de tipo pajonal. Al segundo nivel se separan una HER constituida por un macizo mas alto (4500 m.), frío y húmedo al oeste (Msa) que incluye mesetas volcánicas, y dos zonas de altura intermedia (3500 m.) al norte y al sur (Msm). Este arco montañoso rodea una HER de Valles internos (Vi), mesotérmicos y secos, que se separa al segundo nivel entre la depresión plana de Cochabamba (Vic) y los valles encajonados del río Caine y de sus afluentes (Vid).

Hacia el este se encuentra una amplia región de Valle áridos (Va), caracterizada por valles profundos, disectados dentro de un conjunto de rocas mas erodibles y orientadas según un rumbo general norte sur de ambos lados del eje principal del río Grande. El gradiente altitudinal es fuerte y la vegetación de tipo pajonal en las alturas cambia a un matorral espinoso en las laderas, determinando una fuerte erosión en los valles.

Este conjunto de regiones secas se encuentra limitado al este por la HER de los Yungas peri-chaqueños (Yc), en las primeras laderas montañosas que interceptan casi toda la humedad proveniente del sudeste. Continuación de los Yungas peri-amazónicos, esta región se caracteriza también por alturas intermedias, pendientes fuertes, valles angostos, pero por la

menor pluviosidad, la vegetación corresponde a un bosque sub-húmedo, a veces estacional.

Como en la zona peri-amazónica, la región Yungeña está bordeada por la faja Subandina peri-chaqueña (Sc). La transición entre las dos regiones se vuelve más clara hacia el sur, donde se desarrollan amplias serranías paralelas, con laderas abruptas, limitando depresiones sedimentarias. Se individualizan entonces al segundo nivel, una estrecha HER sub-seca (Scs) al norte (prolongación de la región sub-húmeda contigua), y al sur una HER más amplia y seca (Sca) donde se desarrolla el bosque de caducifolios característico del Chaco serrano.

Perspectivas

El mapa de las HER presentado aquí constituye, en nuestro sentido, el mejor esquema de regionalización posible para los objetivos enunciados y con los datos existentes. Cabe subrayar que la información disponible en algunas zonas de difícil acceso es muy pobre, y basada casi exclusivamente en imágenes satelitarias.

En base a este mapa, se puede comprobar la hipótesis de que las HER se caracterizaran por tipos físicos y ecológicos diferentes de ríos, identificables en el rango de variación de por lo menos un parámetro abiótico o biótico importante. Los parámetros por los cuales existen datos suficientes para verificar la validez de la hipótesis de regionalización, tocan a la geomorfología de los valles (GOURDIN 1997), al régimen hidrológico (por lo menos para las principales HER de primer nivel), a la físico-química del agua (GUYOT 1993), a la distribución de los invertebrados (ROCABADO y WASSON, 1999) y de los peces (tesis en curso).

Evidentemente, se esperan diferencias menores entre las HER de segundo nivel, pero deberían ser identificables. En caso contrario, se podría revisar el mapa agrupando las regiones que no se diferencian en ningún parámetro. La jerarquización entre regiones de primer y segundo nivel, será también aclarada mediante un análisis de las características regionales a partir de los datos incluidos en el SIG. Se propone también realizar rápidamente la regionalización del resto de la cuenca amazónica boliviana, habiendo ya efectuado el análisis geomorfológico (BINET 1998).

CONCLUSIÓN

Las hidro-ecoregiones definidas para la parte andina de la cuenca amazónica boliviana describen ya el marco geográfico general de los hidrosistemas. Las diez HER de primer nivel reflejan la estructuras principales de esta zona muy heterogénea, mientras las HER de segundo nivel precisan la heterogeneidad. El enfoque puesto en la búsqueda de las características regionales que regulan los factores hidrológicos y morfológicos de los ríos hace *a priori* de las HER un marco explicativo de los parámetros abióticos al nivel de los ríos. Se espera que la distribución cualitativa y cuantitativa de los organismos acuáticos responda a este marco. Esto abre un

camino para desarrollar modelos regionales de distribución de la biodiversidad acuática o de tipología de los ríos, mediante un cambio de escala física, relacionando a las regiones las características locales del hábitat, y a aquellas las respuestas biológicas.

Este marco de referencia proporcionaría la visión global de los ecosistemas acuáticos necesaria para orientar políticas de manejo a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- AMOROS, C., A.L. ROUX, J.L. REYGROBELLET, J.P. BRAVARD y G. PAUTOU. 1987. A method for applied ecological studies of fluvial hydrosystems. *Regulated Rivers : Research & Management* 1:17-36.
- BAILEY, R.G. 1983. Delineation of ecosystem regions. *Environmental Management* 7(4):365-373.
- BINET, D. 1998. Régionalisation et caractérisation géomorphologiques des cours d'eau dans le bassin amazonien de Bolivie. Rapport de stage de fin d'études, ENGEES Strasbourg et ORSTOM La Paz 89 p. + annexes.
- FRISSELL, C.A., W.J. LISS, C.E. WARREN y M.D. HURLEY. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification : viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10:199-214.
- GOURDIN, F. 1997. Regionalisation des déterminants géomorphologiques des hydrosystèmes dans le bassin amazonien bolivien : cas de la zone andine. Rapport de stage de fin d'études, ENGEES Strasbourg et ORSTOM La Paz 78p. + annexes.
- HUGHES, R.M., D.P. LARSEN y J.M. OMERNIK. 1986. Regional reference sites : a method for assessing stream potentials. *Environmental Management* 10(5):629-635.
- HUGHES, R.M. y D.P. LARSEN. 1988. Ecoregions : an approach to surface water protection. *Journal of Water Pollution Control Federation* 60(4):486-493.
- HUGHES, R.M., WHITTIER T.R., ROHM C.M. y LARSEN D.P. 1990. A regional framework for establishing recovery criteria. *Environmental Management* 14:673-683.
- HYNES, H.B.N. 1975. The stream and its valley. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 19:1-15.
- LOTSPEICH, F.B. 1980. Watersheds as the basic ecosystem : this conceptual framework provides a basis for a natural classification system. *Water Resources Bulletin* 16(4):581-586.

- NAIMAN, R.J., D.G. LONZARICH, T.J. BEECHIE y S.C. RALPH. 1992. General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers, p. 93-123. *In* P. Boon, P. Calow and G. Petts (eds.), *Rivers Conservation and Management*, Wiley & Sons, Chichester, UK.
- OMERNICK, J.M. y G.E. GRIFFITH. 1991. Ecological regions versus hydrologic units: Frameworks for managing water quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 46(5):334-340.
- OMERNIK, J.M. 1987. Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers* 77(1):118-125.
- RESH, V.H., A.V. BROWN, A.P. COVICH, M.E. GURTZ, H.W. LI, G.W. MINSHALL, S.R. REICE, A.L. SHELDON, J.B. WALLACE y R.C. WISSMAR. 1988. The role of disturbance in stream ecology. *Journal of North American Benthological Society* 7:433-455.
- RIVERA, M.O., M. LIBERMANN, S. BECK y M. MORAES. 1996. Vegetación de Bolivia, p. 169-222 *In* K. B. MIHOTEK (ed.), *Comunidades, territorios indígenas y biodiversidad en Bolivia*, Univ. Gabriel R. Moreno - CIMAR, Santa Cruz.
- ROCABADO, G. y J.G. WASSON. 1999. Regionalización de la fauna bentónica en la cuenca andina del río Beni (Bolivia). *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental Memorias del Congreso Boliviano de Limnología y Recursos Acuáticos* (en prensa).
- ROHM, C., J.W. GIESE y C.C. BENNETT. 1987. Evaluation of an aquatic ecoregion classification of streams in Arkansas. *Journal of Freshwater Ecology* 4(1):127-140.
- SOUTHWOOD, T.R.E. 1977. Habitat, the templet for ecological strategies?. *Journal of Animal Ecology* 46:337-367.
- SOUTHWOOD, T.R.E. 1988. Tactics, strategies and templets. *Oikos* 52:3-18.
- STRAHLER, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union* 38:913-920.
- TOWNSEND, C.R. 1989. The patch dynamics concept of stream community ecology. *Journal of North American Benthological Society* 8(1):36-50.
- TOWNSEND, C.R. y A.G. HILDREW. 1994. Species traits in relation to a habitat templet for river systems. *Freshwater Biology* 31:265-275.
- WARD, J.V. y J.A. STANFORD. 1983. The intermediate-disturbance hypothesis: an explanation for biotic diversity patterns in lotic ecosystems p. 347-356 *In* T. D. FONTAINE and S. M. BARTELL (eds.), *Dynamics of lotic ecosystems*, Ann Arbor Science, Ann Arbor, Michigan.
- WARRY, N.D. y M. HANAU. 1993. The use of terrestrial ecoregions as a regional-scale screen for selecting representative reference sites for water quality monitoring. *Environmental Management* 17(2):267-276.
- WASSON, J.G. 1989. Eléments pour une typologie fonctionnelle des eaux courantes : 1. Revue critique de quelques approches existantes. *Bulletin d'Ecologie* 20(2):109-127.
- WASSON, J.G., J.L. GUYOT, C. DEJOUX y M.A. ROCHE. 1989. *Regimen térmico de los ríos de Bolivia*. Publ. PHICAB, ORSTOM La Paz, 35 p.
- WASSON, J.G., J. BETHEMONT, J.N. DEGORCE, B. DUPUIS y T. JOLIVEAU. 1993. Approche écosystémique du bassin de la Loire : éléments pour l'élaboration des orientations fondamentales de gestion. Phase I : Etat initial - Problématique. Rapport final, CEMAGREF Lyon BEA/LHQ et Univ. St Etienne CRENAM 102 p. + Atlas, 70 pl. et Annexes.
- WASSON, J.G. 1996. Structures régionales du bassin de la Loire. *La Houille Blanche* 338(6/7):25-31.
- WHITTIER, T.R., R.M. HUGHES y D.P. LARSEN. 1988. Correspondance between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45:1264-1278.
- WASSON, J.G. 1996. Structures régionales du bassin de la Loire. *La Houille Blanche* 338(6/7):25-31.
- WHITTIER, T.R., R.M. HUGHES y D.P. LARSEN. 1988. Correspondance between ecoregions and spatial patterns in stream ecosystems in Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45:1264-1278.