

CAPÍTULO
IV

Hidrología y dinámica fluvial del Río Mamoré

LUC BOURREL & MARC POUILLY

INTRODUCCIÓN

Desde su llegada a la Provincia del Beni en 1668, los misioneros Jesuitas han registrado los eventos de inundación del Río Mamoré. Así se sabe que muchas inundaciones han producido desastres que han marcado la memoria de las poblaciones. Denevan (1980), citando obras de historia local, recapitula las fechas de las inundaciones con mayores implicaciones para la población: 1799, 1801, 1853, 1886, 1895, 1928, 1929, 1930, 1947 y 1950. Después del año 1950, los eventos más notables por su extensión espacial y duración fueron registrados en 1956, en los años 1980 y ultimamente en 1992 y 1993. Estas fechas demuestran el aspecto frecuente e irregular de estos eventos extremos, la mayoría de los cuales afectó a Trinidad y a su población. Por ejemplo, las inundaciones de 1799 y 1801 determinaron el traslado de la ciudad desde la cercanías del Río Mamoré a su ubicación actual (Denevan, 1980). Durante las inundaciones de febrero de 1947, las aguas alcanzaron un nivel tan alto que centenares de trinitarios fueron evacuados. Además de esos desastres extremos, las inundaciones afectan más frecuentemente a pueblos y comunidades, provocando pérdidas de millares de cabezas de ganado en el Departamento del Beni, donde se produce el 47% de la carne bovina de Bolivia.

Sin embargo, debemos notar que la importancia de las inundaciones pasadas es subjetiva, porque está ligada a los efectos que significaron para las poblaciones. Para lograr una visión objetiva se tiene que contar con datos confiables y cuantitativos, como por ejemplos el número de días de desborde anual (Loubens *et al.* 1992; Cap. III).

Los eventos registrados en las últimas décadas se limitan a observaciones puntuales, basadas en ciudades afectadas y en algunos desbordes de ríos; siendo desconocida la extensión de las inundaciones, así como la magnitud geográfica de los daños. Sin embargo, cada desastre recalca que es necesario desarrollar estudios para entender el funcionamiento de las inundaciones, elaborar mapas de inundación y por último prever su impacto local. Basados en estos datos, se podrían desarrollar planes para proteger a poblaciones y actividades humanas. También estos conocimientos son imprescindibles para entender el funcionamiento ecológico del sistema Río Mamoré y su llanura de inundación. Es evidente que la diversidad y la productividad biológica están en gran parte ligadas a la alternancia de las épocas de inundación y de aguas bajas (Junk *et al.*, 1989).

En Sudamérica, la mayoría de los estudios hidrológicos fueron desarrollados en la Amazonía central y en sus principales afluentes. La hidrología clásica (evaluación de los caudales y descripción de los regímenes de flujo en el tiempo), sedimentología (evaluación de la cantidad y de la calidad de los sedimentos drenados, descripción de las áreas de deposición y de erosión) y calidad físico-química de las aguas son aspectos esenciales para caracterizar a los ríos (Sioli, 1984). Las primeras clasificaciones de los ríos amazónicos fueron elaboradas en base a un conjunto de datos geográficos, hidro-climáticos y físico-químicos e identificaron tres tipos de aguas: aguas negras, blancas y claras (Sioli, 1984; Cap. V). Esa información fue integrada en el análisis de las relaciones entre el funcionamiento hidrológico

gico y ecológico en los sistemas de aguas blancas (Salo *et al.*, 1986; Junk *et al.*, 1989), claras (Goulding, 1980) y negras (Goulding *et al.*, 1988). Las aguas blancas de la Amazonía central - cargadas de sedimentos arrastrados de las zonas andinas - son más ricas en nutrientes y tienen un ciclo hidrológico contrastado y previsible que genera llanuras de inundación favorables para la productividad biológica (Junk *et al.*, 1989; Junk, 1997). Por el contrario, los ríos de aguas claras y negras, procedentes del drenaje de las llanuras de inundación o de los macizos cristalinos, presentan también un régimen estacional, pero parecen ser pobres en nutrientes y poseen una menor productividad biológica (Lowe Mc Connell, 1987).

La dinámica de las inundaciones en la Amazonía boliviana es aún poco entendida. La investigación sobre elementos que permiten entender el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación del Río Mamoré es una gran preocupación en el marco de la gestión de este sistema. ¿Cuál es la cronología, superficie y direcciones preferenciales de la inundación anual en relación al ciclo hidrológico? es la pregunta que merece una atención inmediata. Para responder a esta pregunta es necesario realizar estudios con un enfoque conjunto de la hidrología y de la detección remota (teledetección). Así se puede llevar adelante un seguimiento sobre la dinámica de las inundaciones a diferentes niveles de crecida y cartografiar la variabilidad espacial y temporal de las zonas inundadas a diferentes escalas (a nivel de la crecida anual e interanual).

En este capítulo, en base a los datos de hidrología clásica adquiridos en la Cuenca Amazónica Boliviana, se describen los dos principales procesos que explican el fenómeno de inundación en el Río Mamoré central y la variabilidad de situaciones que implica. Por

otro lado, se presentan también los resultados de la dinámica de inundación obtenidos entre 1997 y 1998 en el área de influencia de la ciudad de Trinidad mediante imágenes satelitales LANDSAT, ERS y RADARSAT, tomadas durante las épocas seca y de lluvias. Además se analizaron datos de terreno y de sobrevuelo, adquiridos al mismo tiempo que las imágenes radar y datos hidro-meteorológicos como precipitaciones, temperaturas y niveles diarios de agua (en los ríos y en la llanura), obtenidos en estaciones ubicadas en la parte alta (piedemonte) y en la parte baja (llanura) de la cuenca del Río Mamoré.

HIDROLOGÍA EN LA CUENCA AMAZÓNICA BOLIVIANA

En Bolivia, las investigaciones hidrológicas en la Cuenca Amazónica Boliviana fueron iniciadas durante los años ochenta, en base al desarrollo de dos ejes principales de investigación del funcionamiento hidrológico del Río Mamoré. Las investigaciones han buscado destacar por un lado las relaciones entre los funcionamientos hidrológico y sedimentario (Guyot, 1993; Guyot *et al.*, 1993, 1999) y por otro, las interrelaciones entre el funcionamiento ecológico, la dinámica hidrológica y las características físico-químicas de las aguas (Beck, 1984; Roche *et al.*, 1986; Corbin *et al.*, 1988; Guyot *et al.*, 1991; Hanagarth, 1993). La mayoría de los datos fue adquirida por instituciones bolivianas como el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), IE-UMSA (Instituto de Ecología - Universidad Mayor de San Andrés, La Paz) y SEMENA (Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica), en el marco de varios convenios de cooperación con el IRD (Instituto de Investigación para el Desarrollo, ex-ORSTOM):

proyecto PHICAB (Programa Climatológico e Hidrológico de la Cuenca Amazónica de Bolivia, 1983-1991), HIBAM (Hidrología da Bacia Amazônica, enfocando en Bolivia a los ríos Mamoré y Beni, 1992-2001) y BIOCAB (Biodiversidad de la Cuenca Amazónica Boliviana, 1997-2000). Se ha realizado la descripción del clima (Ronchail, 1985), se han identificado los regímenes de los principales ríos de la Amazonía boliviana (Abasto *et al.*, 1985; Bourges & Hoorelbecke, 1995), se ha evaluado la geo-química de aguas, de sedimentos, de flujos de materia en suspensión y de iones mayores (Bourges *et al.*, 1990; Roche *et al.*, 1993; Guyot, 1993; Guyot *et al.*, 1993) y se ha realizado un balance hídrico de la Cuenca Amazónica Boliviana (Roche *et al.*, 1986; Roche & Fernandez, 1988; Aliaga, 1993). Estos datos han sido fundamentales para iniciar el proceso de descripción de la dinámica de las inundaciones en la llanura (Bourges & Hoorelbecke, 1995; Bourrel *et al.*, 1999). Estos resultados son esenciales para el conocimiento del funcionamiento hidrológico y geo-químico de la Cuenca Amazónica Boliviana y fueron adquiridos mediante una red de estaciones hidrológicas y de las características físico-químicas de los principales ríos bolivianos.

Como consecuencia de un régimen pluviométrico de origen atlántico, los regímenes hidrológicos observados en los ríos de la Cuenca Amazónica Boliviana son de tipo pluvial tropical, caracterizados por una alternancia marcada entre aguas bajas en invierno y aguas altas en verano. En los Andes, los hidrogramas aparecen irregulares con múltiples crecidas. Río abajo y después de la convergencia de los ríos andinos, el hidrograma del Río Mamoré es alisado y presenta una gran inundación anual (Fig. IV.1). En la llanura, el ciclo hidrológico depende a la vez de las lluvias locales, abundantes entre los meses de octubre y abril, así

como del aporte de los ríos andinos. En la zona de Trinidad - centro de la llanura de inundación - el Río Mamoré es indudablemente un río de aguas blancas, aunque aguas abajo se mezclan con las aguas de planicie, poco turbias y más ácidas, drenadas por sus tributarios. La mezcla de las aguas blancas del eje central, que constituyen el Río Mamoré y de los aportes laterales de los ríos secundarios, genera situaciones complejas y diversas en la dinámica hidrológica, particularmente en la llanura de inundación.

DINÁMICA HIDROLÓGICA DE LAS INUNDACIONES EN EL RÍO MAMORÉ

Métodos

Los métodos utilizados para describir el funcionamiento hidrológico de la llanura de inundación del Río Mamoré corresponden a una combinación de datos de hidrología e hidro-meteorología clásica como lluvia, niveles de aguas y caudales y datos de tele-detección, a partir de los cuales se realizaron las siguientes tareas:

- Cartografiar las grandes unidades permanentes o temporales (lagunas, ríos, sabana, bosque, entre otros) e identificar las zonas que contribuyen al drenaje de las aguas.
- Analizar el efecto de los eventos hidrológicos y climáticos (lluvia intensa y desborde de aguas) en las diferentes unidades identificadas, para destacar su papel en la redistribución, el almacenamiento y el vaciado de la llanura.

- Relacionar estos efectos, mediante los parámetros clásicos de integración de la actividad hidrológica (expresada en hidrogramas).

◆ Teledetección

La teledetección es una técnica de adquisición de información a distancia sobre los recursos de la superficie del planeta, basada en el análisis de imágenes obtenidas en varios rangos de longitud de onda a partir de aeronaves o de satélites. La teledetección permite cartografiar especialmente los diferentes elementos (como agua, tierra y vegetación) o tipos de cobertura (sabana, bosque y pastizales) mediante el análisis de las radiaciones electromagnéticas que absorben y reflejan. Existen varios tipos de

imágenes según la longitud de onda que se utiliza, siendo más conocidas y utilizadas las imágenes ópticas. En comparación con las imágenes ópticas, las imágenes radar tienen varias ventajas para el estudio del funcionamiento hidrológico de las zonas húmedas, ya que utilizan frecuencias de ondas cortas que permiten visualizar las masas de agua en casi todas las situaciones climáticas restrictivas para las imágenes ópticas (como ausencia de luz y cobertura de nubes), lo que garantiza una adquisición de datos regular y previsible. También las imágenes radar garantizan información de calidad sobre la hidrológica, por lo que permiten determinar el grado de humedad en el suelo (Ulaby, 1974; Engman, 1990).

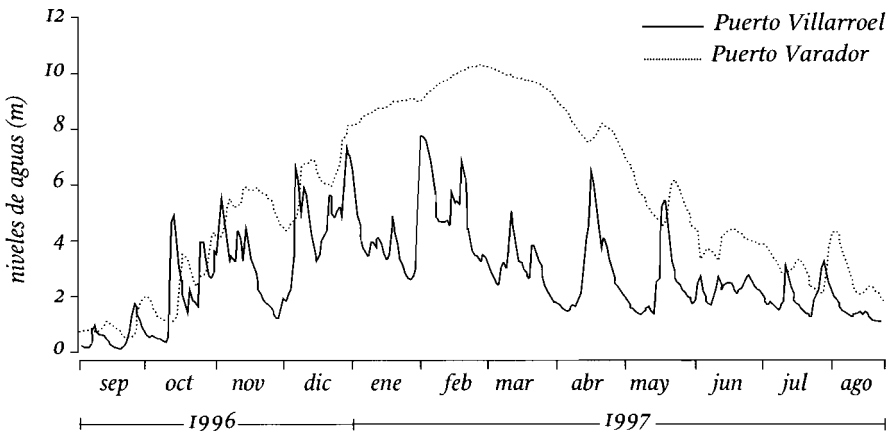


Figura IV.1 Limnograma del Río Ichilo (tributario andino del Río Mamoré, en la estación de Puerto Villarroel) y del Río Mamoré central (llanura de inundación cerca de Trinidad, en la estación de Puerto Varador) para el año hidrológico de septiembre de 1996 a agosto de 1997. En la salida de los Andes (p.e. Río Ichilo), el ciclo hidrológico es muy variable e imprevisible, mientras que en la llanura de inundación, el conjunto de las aguas de todos los tributarios contribuye a generar un limnograma alisado y previsible, con una gran inundación entre enero y marzo.

En los últimos años, los datos obtenidos por imágenes radar fueron utilizados para cartografiar los sistemas acuáticos con el fin de identificar las zonas de mayor riesgos natural, permitiendo por ejemplo la detección y el seguimiento de las inundaciones (Lowry *et al.*, 1979 en Canadá; Krohn *et al.*, 1983 en los EEUU de Norteamérica; Pichugin, 1989 en Rusia; Blyth *et al.*, 1994, Bonansea, 1995, Calabresi, 1995 y Noyelle *et al.*, 1995 en Europa). Las imágenes radar también fueron utilizadas para apoyar estudios ecológicos (Kasischke *et al.*, 1997) e integradas con éxito en modelos hidrológicos predictivos (Abednego, 1989; Puech, 1993).

En la Amazonía, la interpretación espacial de las inundaciones fue realizada a partir de los datos de radar pasivos (captador SMMR del satélite Nimbus 7), obtenidos entre 1979 y 1987 en todas las grandes llanuras de inundación de Sudamérica: Pantanal, Río Amazonas, Río Solimoes, Río Orinoco y Río Mamoré (Sippel *et al.*, 1998; Hamilton *et al.*, 1999). Además, estudios de detección de las inundaciones en el bosque fueron realizados en el área de Manaus a partir de datos de un radar experimental SIR-C/X-SAR, embarcado en la nave espacial norteamericana (Hess *et al.*, 1990, 1995; Wang *et al.*, 1994). Esos estudios han validado las posibilidades de identificación de las zonas inundadas en los bosques tropicales densos. Sin embargo, se necesitan datos polarimétricos de radar multi frecuencial que todavía no existen en los satélites.

En época de lluvias, existe en la región central del Río Mamoré una persistente cobertura nubosa y vastas zonas de difícil acceso. Por esta razón, la distribución espacio-temporal de las inundaciones fue

estudiada mediante la percepción remota radar. Sin embargo, para optimizar la cartografía de las inundaciones fueron utilizadas imágenes ópticas para identificar las principales unidades de vegetación natural, permanentes o temporales del paisaje. Dos tipos de imágenes fueron utilizadas (Fig. IV.2):

- Imágenes ópticas LANDSAT TM (185 x 185 km) en época seca, para identificar las grandes unidades naturales permanentes o temporales del paisaje (aguas, bosques de galería, sabanas, pantanos, entre otros).
- Imágenes radar SAR en banda C y de polarizaciones HH y VV, como ERS y RADARSAT (100 x 100 km) y RADARSAT (500 x 500 km), utilizadas para identificar las áreas afectadas por las inundaciones en todo tiempo (con la posibilidad de distinguir el agua de la vegetación, en caso de la capa vegetal baja). Para cartografiar la extensión de las inundaciones y clasificar los tipos de vegetación, se utilizaron métodos de colores compuestos de imágenes Landsat TM o de imágenes RADARSAT y LANDSAT-TM para destacar las diferencias entre las épocas seca, húmeda e inundada.

Para interpretar y calibrar las imágenes, simultáneamente a la toma de la imagen por el satélite, se realizaron observaciones de campo en diferentes puntos (georeferenciados por GPS) para destacar los límites de inundación y los tipos de vegetación para situarlos y reconocerlos posteriormente en las imágenes.

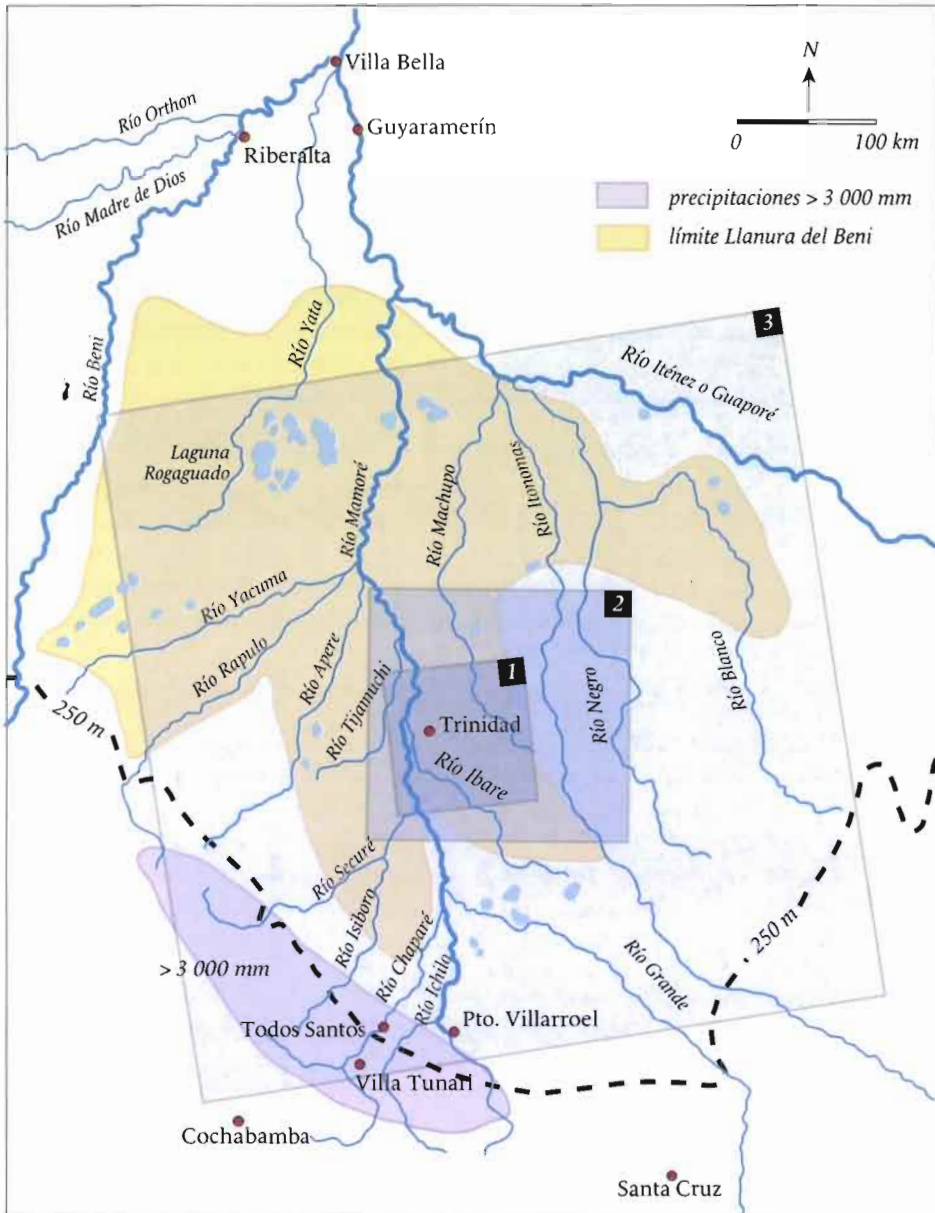


Figura IV.2 Mapa de la llanura del Beni. Los recuadros indican la cobertura de las imágenes satelitales utilizadas en el estudio de teledetección. 1. Imagen ERS y RADARSAT (100 x 100 km); 2. Imagen óptica LANDSAT TM (185 x 185 km); 3. Imagen RADARSAT (500 x 500 km).

◆ Hidrología clásica

La comprensión de los fenómenos propios de la dinámica de las inundaciones necesita un seguimiento de parámetros hidrológicos e hidro meteorológicos en varios puntos de la Cuenca del Río Mamoré. Los niveles de agua en los ríos fueron relevados en dos puntos de la cuenca alta (“entrada” del sistema): Río Grande (estación SENAMHI en Carmen) y Río Ichilo (estación SEMENA en Puerto Villarroel); en dos puntos en el Río Mamoré central: Río Mamoré (estación SEMENA en Puerto Varador), Río Ibare, cerca de Trinidad (estación SEMENA en Puerto Almacén); y en un punto de la cuenca baja (“salida” del sistema): Río Mamoré (estación SEMENA en Guayaramerín).

Además, los niveles de agua en la llanura de inundación fueron registrados desde fines de 1997 en una red de 12 reglas limnométricas, repartidas en toda la zona (red IRD-SEMENA). Los datos pluviométricos y meteorológicos fueron obtenidos mediante la red de estaciones meteorológicas AASANA y SENAMHI, distribuida en toda la cuenca amazónica boliviana.

La identificación de la superficie afectada por el agua y la distinción entre las áreas de almacenamiento y las de drenaje fue realizada a partir de un enfoque conjunto de las imágenes satelitales (teledetección radar) y de los niveles de agua, registrados en el área de la llanura de inundación.

Los datos satelitales (ópticos y de radar), meteorológicos (pluviometría, temperatura y evaporación) en la llanura y en el piedemonte andino, los niveles de agua y de los caudales entrando y saliendo de la llanura

por el Río Mamoré y los niveles de agua en varios puntos de la llanura forman un conjunto que permite entender el funcionamiento hidrológico de la llanura central del Río Mamoré.

RESULTADOS

Los diferentes tipos de inundaciones

El funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación depende del ciclo hidrometeorológico anual, afectando a la cuenca alta y baja del Río Mamoré. En la llanura del Río Mamoré central, diferentes tipos de inundación pueden ser distinguidos en base a su intensidad, su duración y en base a la conjugación de dos procesos principales (Fig. IV.3):

- Un proceso exógeno con la llegada de la onda de crecida del Río Mamoré (Q_c) y de sus afluentes río arriba (generada por las lluvias sobre la cordillera y el piedemonte de los Andes; P_a). Este proceso tiende a difuminar las aguas blancas en el sistema de lagunas y en los afluentes del Río Mamoré.
- Un proceso endógeno con el desborde de la capa freática de la llanura (alimentado por las precipitaciones locales; P_l). Este proceso se intensifica cuando el drenaje de las aguas negras hacia el lecho principal, a través de una red de drenaje secundaria es bloqueado por los niveles altos de las aguas en el Río Mamoré.

El análisis del hidrograma del Río Mamoré (nivel de agua registrado en Puerto Varador)

permite destacar los eventos de inundación exógenos, provenientes de una crecida de los niveles en el río (Fig. IV.4). Durante las inundaciones de 1992 y 1993, el Río Mamoré ha desbordado durante 40 días en 1992 (entre el 10 de marzo y el 18 de abril) con un máximo de 10.72 m el 17 de marzo (0.69 m por encima del nivel teórico del terreno natural, que es de 10.03 m) y durante 43 días en 1993 (entre el 18 de enero y el 1 de marzo) con un máximo el 26

de enero de 10.61 m (0.58 m por encima del nivel del terreno natural). Durante la inundación de 1997, el Río Mamoré ha desbordado durante 22 días (entre el 19 de febrero y el 12 de marzo) con un máximo el 1 de marzo de 10.29 m (0.26 m por encima del nivel del terreno natural), lo que corresponde a la mitad del tiempo de inundación de 1992 y de 1993 y en niveles de aguas, respectivamente 0.43 m y 0.32 m menos que los máximos de

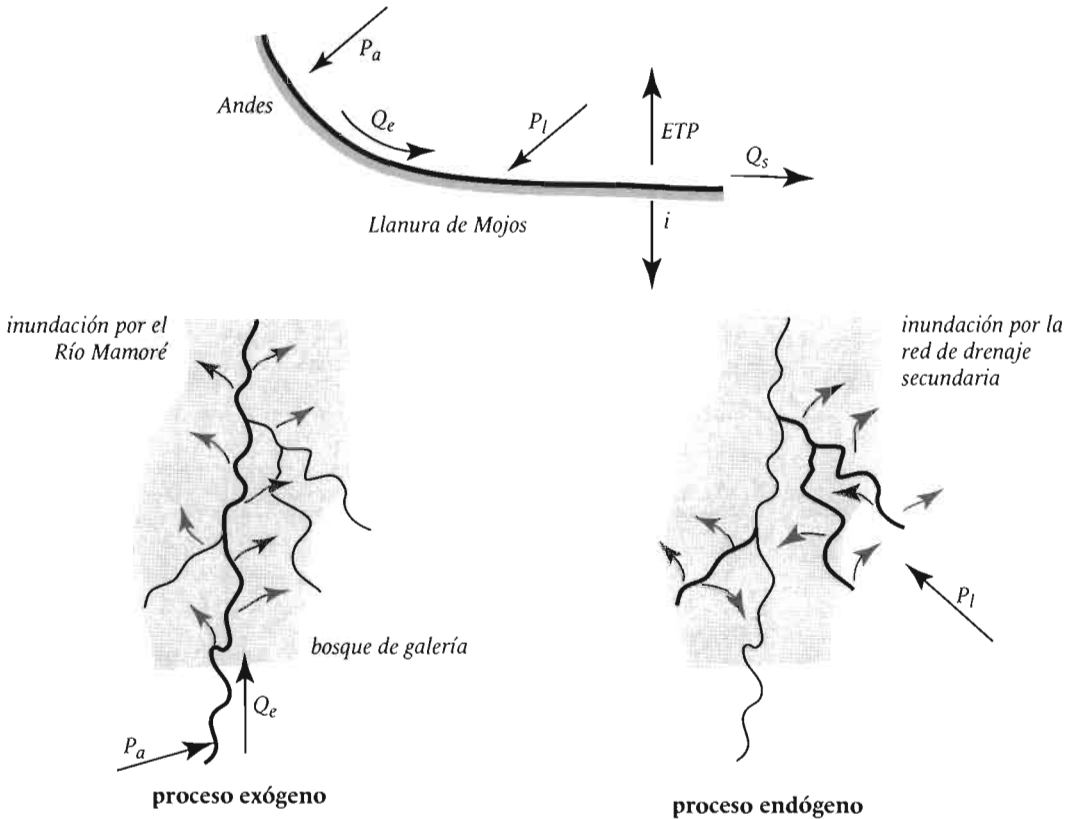


Figura IV.3 Esquema del funcionamiento hidrológico de la llanura central del Río Mamoré. P_a = precipitaciones andinas, Q_e = caudal que ingresa en la llanura, P_l = precipitaciones en la planicie, i = infiltraciones, ETP = evapo-transpiración y Q_s = caudal derivado de la llanura. El proceso exógeno corresponde al desborde de las aguas blancas procedentes de los Andes, drenadas por el Río Mamoré. El proceso endógeno corresponde al desborde de la capa freática y de los ríos secundarios, que drenan las aguas procedentes de la llanura.

1992 y 1993. Finalmente, vemos que en los años 1996, 1998 y 1999 no ocurrió ninguna inundación en Trinidad, proveniente del Río Mamoré. La ocurrencia de las inundaciones del Río Mamoré originadas por el aporte de las lluvias de los Andes parece variable.

El análisis del hidrograma del Río Ibare (nivel de agua registrado en Puerto Almacén) permite destacar los eventos de inundación endógenos, provenientes de una crecida del nivel de agua en la llanura (Fig. IV.5). En 1997, éste ha desbordado durante 39 días (entre el 17 de febrero y el 26 de marzo) con un máximo de 10.97 m el 2 de marzo (es decir, 0.23 m por encima del nivel del terreno natural, que es de

10.74 m). En 1998, se desbordó durante 21 días (entre el 18 de marzo y el 7 de abril) en un máximo de 10.89 m el 20 de marzo (0.15 m por encima del nivel del terreno natural). En 1996 y 1999 no ocurrió ninguna inundación del Puerto Almacén causado por el Río Ibare. Según los años, las inundaciones originadas en los ríos endógenos hacia la llanura de inundación (considerando su origen en las lluvias locales) parecen también ser variables.

En relación a estos procesos y dependiendo de la intensidad y localización de las lluvias, las inundaciones de esos últimos años pueden ser clasificadas en cuatro tipos:

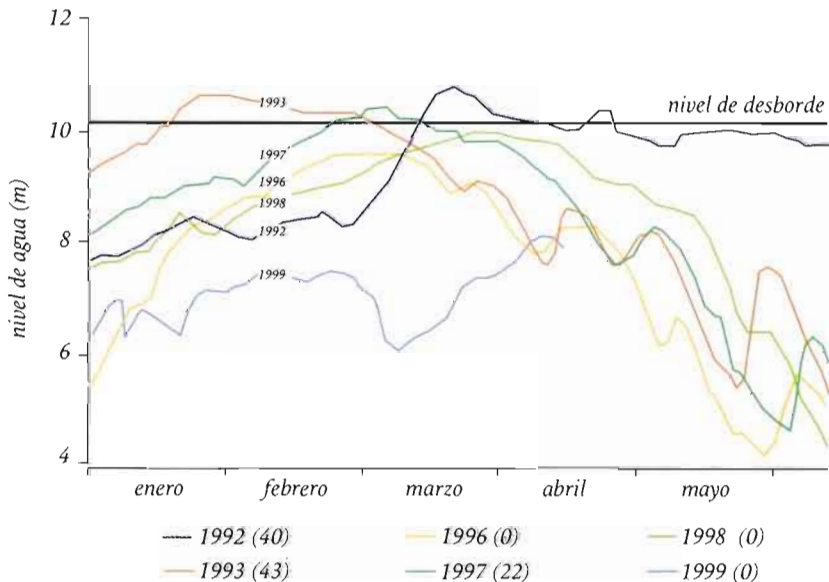


Figura IV.4 Limnogramas de las épocas de aguas altas (enero - mayo) y estadísticas de los desbordamientos del Río Mamoré en Puerto Varador (Trinidad) en 1992-1993 y de 1996-1999. Los números entre paréntesis indican días de desborde.

- Ausencia de inundación (1996 y 1999). Ningún desborde fue registrado y la llanura central no ha tenido la influencia de procesos exógenos ni endógenos.
- Inundación endógena (1998). La inundación fue alimentada principalmente por aguas drenadas en la llanura (proceso endógeno). La figura IV.6 presenta ejemplos de evolución del nivel de agua en dos estaciones situadas en la llanura de inundación. Cada estación está bajo la influencia de un río endógeno hacia la llanura: el Río Tijamuchi y el Río Ibare. El comportamiento observado es similar en ambas estaciones: una primera subida de los niveles después de precipitaciones locales y una segunda, debido a la llegada de las aguas negras, procedentes del desborde de ríos cercanos. Los máximos registrados en el año 1998 fueron de 84 cm en la escala cerca del Río Tijamuchi (registrando un máximo de 1.40 m en el año 1997) y de 80 cm cerca del Río Ibare (registrando un máximo de 1.50 m en el año 1992).
- Inundación exógena (1997). La inundación es causada por ambos procesos juntos, pero con una mayor influencia de las aguas procedentes del Río Mamoré. Presenta un poder - en amplitud y duración - de la mitad de cada una de las grandes inundaciones de 1992 y 1993.
- Inundación completa (1992 y 1993). El conjunto de un excedente sincronizado de lluvia en los Andes y en la llanura genera un desarrollo importante de ambos procesos.

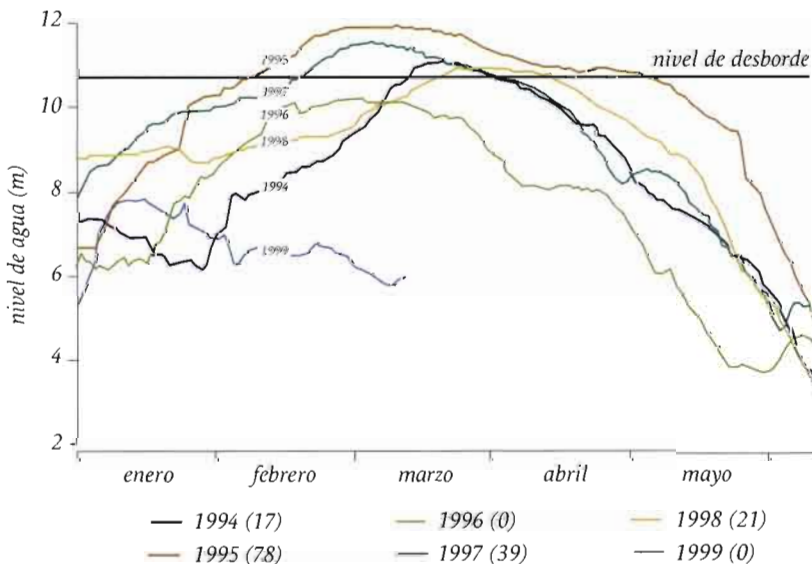


Figura IV.5 Limnogramas de las épocas de aguas altas (enero-mayo) y estadística de los desbordes del Río Ibare en Puerto Almacén (Trinidad) en 1992-1993 y de 1996 a 1999. Los números entre paréntesis indican días de desborde.

La inundación exógena bloquea al drenaje de las aguas de la inundación endógena y provoca una inundación de gran amplitud. Generalmente, el tiempo de evacuación de las aguas también aumenta, por lo tanto esas inundaciones tienen una duración más importante.

Cartografía de las grandes unidades de paisaje

La llanura de inundación se sitúa aproximadamente entre $12^{\circ}00'-17^{\circ}00'S$ / $62^{\circ}50'-67^{\circ}00'W$, incluyendo las cuencas de drenaje de los ríos Itenez, Mamoré y Beni. La región

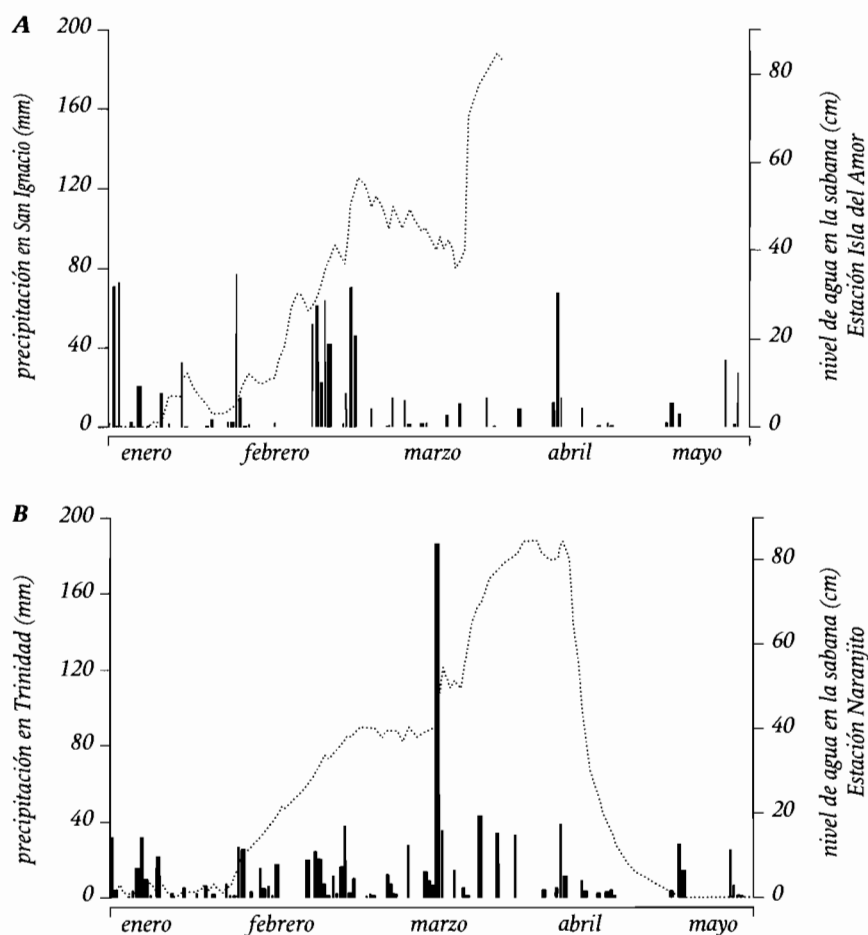


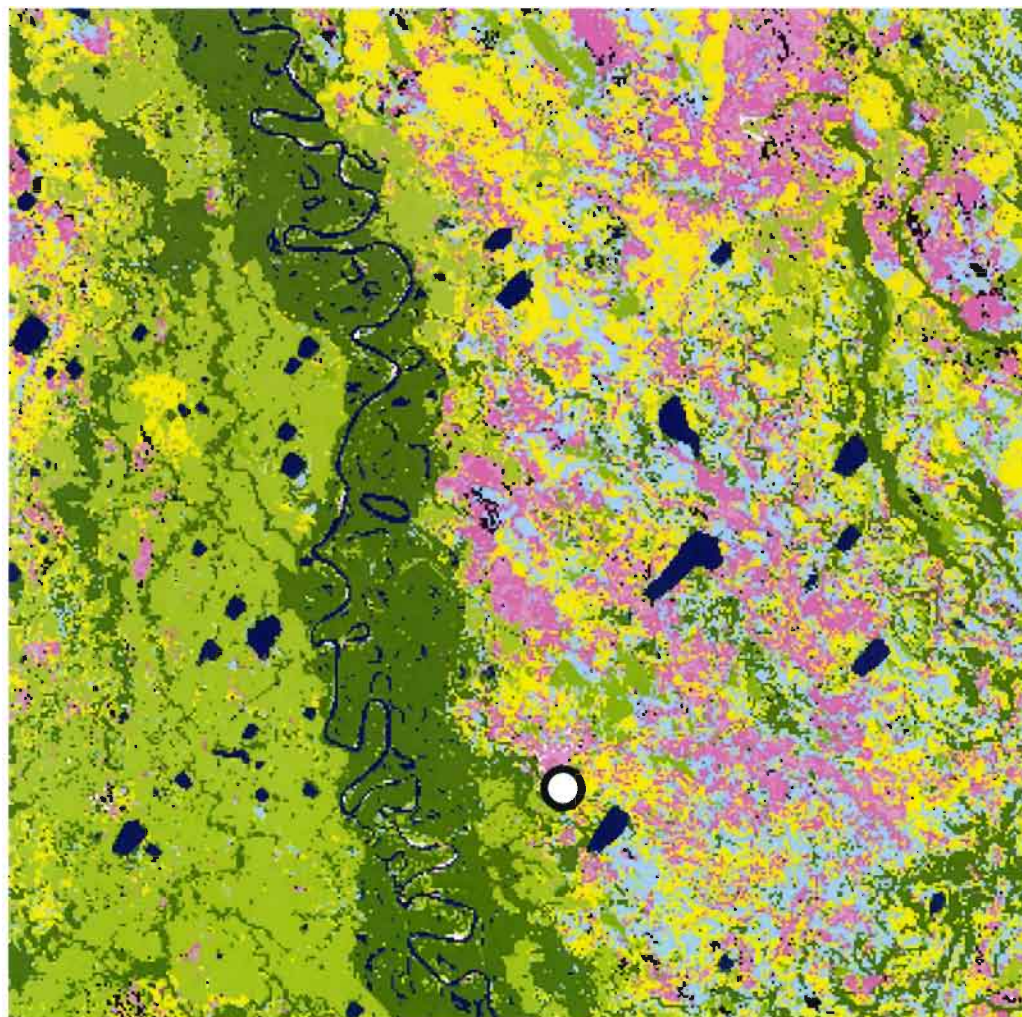
Figura IV.6 Evolución de las precipitaciones locales (barras negras) y de los niveles de agua de inundación en dos estaciones de la llanura del Beni (trazado punteado) durante la época de aguas altas de 1998. **A=** sabana bajo la influencia del Río Tijamuchi (estación Isla del Amor), **B=** sabana bajo la influencia del Río Ibare (estación Naranjito).

afectada por las inundaciones corresponde mayormente a un paisaje de sabana, limitado por bosques tropicales e incluyendo bosque de galería a lo largo de la mayoría de los ríos, así como islas de bosque en campos de terreno elevados en relación al resto de la sabana (Denevan, 1980). Siete principales formaciones vegetales son reconocidas (Denevan, 1980; Beck, 1984; Hanagarth, 1993) y pueden estar ligadas a la hidrología y a la geomorfología (Cap. VI): sabana drenada con inundación estacional, sabana inundada permanentemente (bajíos, pantanos o curiches), bosque de galería, bosque de llanura con inundación estacional, isla de bosque aluvial permanentemente inundado, isla de bosque con inundación estacional y campo de vegetación secundaria o antrópica.

La figura IV.7 presenta una composición de colores de la imagen Landsat TM del área de estudio (bandas TM 5, TM 4 y TM 7 respectivamente asociadas a los canales rojo, verde y azul), donde las siete principales unidades de vegetación pueden ser identificadas. En negro aparecen los cuerpos de agua como los ríos, las lagunas naturales o artificiales. El verde oscuro indica el bosque tropical, rodeando a las sabanas y el bosque de galería bordeando los ríos. Los tonos de verde claro y rosado representan a las sabanas (zonas húmedas), mientras que el verde claro identifica a los bajíos con plantas acuáticas altas (como los yomomos). El verde más oscuro representa a las sabanas arbustivas. Finalmente, en rosado claro aparecen las formaciones de sabanas con plantas más bajas (hacia los pastos) y con menos agua, cambiando al rosado más acentuado, cuando se mezclan en condiciones de semi-altura con algunas palmeras o árboles aislados (islas de bosque más denso en morado).

Dinámica de la inundación

Presentamos tres ejemplos de resultados, usando datos radar (radar con una sola fecha, con tres fechas y radar asociado con datos ópticos) que ilustran la capacidad de identificación de las extensiones de las áreas afectadas por las inundaciones (Badji & Dautrebande, 1995; Kux *et al.*, 1995). También abordamos con el enfoque multi-temporal (Lointier *et al.*, 1993; Desnos *et al.*, 1996) el aspecto de la dinámica de la inundación. La imagen radar ScanSAR Wide 2 del satélite RADARSAT del 19 de marzo de 1997 (500 x 500 km, con una resolución de 50 x 50 m) da una amplia vista de las extensiones de inundación al nivel regional (Fig. IV.8). En los 500 km² incluidos en esta imagen se puede ver toda la llanura del Beni con el Río Mamoré en el centro de la imagen, limitada en el sudoeste por los Andes (región de Cochabamba), en el NE por el Río Beni y en el NO por el Río Iténez. Los datos hidrológicos registrados en Puerto Varador indican que el día de la toma de la imagen (19 de marzo de 1997) corresponde a la extensión más amplia de la inundación en la región de Trinidad. Ese mismo día, los ríos Mamoré e Ibare presentaron un nivel de agua de 10.95 m y 9.81 m, respectivamente. La inundación afectó a una superficie de aproximadamente 35 000 km² entre Camiaco (arriba de Trinidad) y Puerto Siles, en una distancia de 250 km a lo largo del eje del Río Mamoré, incluyendo además las áreas de influencia de los ríos secundarios Ibare, Tijamuchi, Apere, Rapulo y Yacuma (Fig. IV.8). Se puede notar también que la mayor parte de la inundación se ubica en el lado izquierdo del Río Mamoré y corresponde a la zona de subducción en el pie de los Andes, donde se encuentran tierras bajas y una red fluvial desarrollada. Por el contrario, la ribera derecha corresponde a una zona sobrelevada, debido a la proximidad con



■ Indefinido	1.9	■ Sabana con arbustiva y arbórea	12.8
■ Mineral	0.3	■ Sabanas con palmeras	8.4
■ Agua	4.9	■ Sabana herbácea	5.0
■ Bosque	27.0	■ Pastos/pradera	22.2
■ Bosque secundario	4.0	■ Vegetación acuática	13.4

Figura IV.7 Distribución y cobertura (%) de siete formaciones vegetales principales en la llanura del Beni cerca de Trinidad (punto bordeado con negro) junto a unidades indefinidas, mineral y acuática, dibujada en base a una imagen Landsat TM (185 x 185 km), del 15 de agosto del 1997. Los porcentajes de superficie son presentados en la leyenda.

el Escudo Brasileño, donde ninguna inundación que haya sido originada del Río Iténez fue registrada en esa fecha.

Las relaciones entre las principales unidades de vegetación y el nivel de inundación en el área de estudio aparecen cuando se superpone la información de rugosidad y de humedad (en base a la imagen radar) con los datos de vegetación (procedentes de la imagen Landsat TM). Por ejemplo, el 5 de abril de 1997 (tres semanas después del desborde en Puerto

Varador) aparecían todavía húmedas las sabanas en el área afectada por las aguas del Río Mamoré y por los ríos endógenos Tijamuchi y Ibare (Fig. IV.9).

Un análisis multi-temporal realizado por la superposición de imágenes radar de diferentes fechas, permite poner en evidencia los cambios temporales entre unidades de vegetación de las sabanas y de aguas (Fig. IV.10). Cada fecha está asociada a un color, así los elementos que no cambian aparecen en blanco (por la

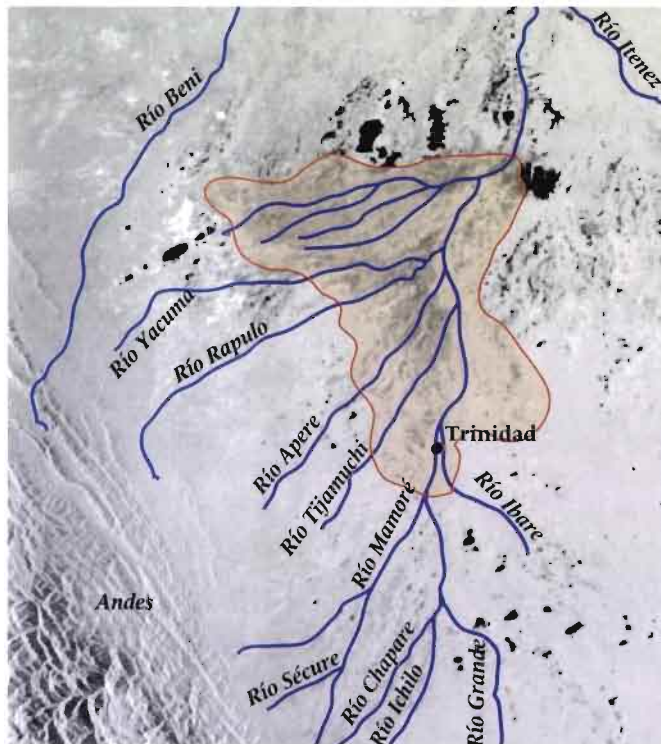


Figura IV.8 Imagen radar ScanSAR Wide 2 del satélite RADARSAT (500 x 500 km con una resolución de 50 x 50 m) del 19 de marzo de 1997, día de extensión máxima de inundación en ese año. Los 500 km² cubiertos por esta imagen corresponden al total de la llanura del Río Beni y dan una amplia cobertura de las extensiones de inundación a nivel regional (delineada en rojo) (Bourrel *et al.*, 1999).

superposición de los tres colores verde, rojo y azul), como es el caso de la ciudad de Trinidad. En negro aparecen los cuerpos de agua, como los ríos y las lagunas naturales o artificiales. Los tonos de gris indican los elementos que han cambiado poco en el tiempo, como el

bosque tropical, rodeando a las sabanas y el bosque de galería bordeando a los ríos. Los bosques de galería deberían aparecer en azul, pero se quedan en gris porque no se puede ver el agua por debajo de los árboles con el radar banda C. Los tonos que cambian de rojo a azul

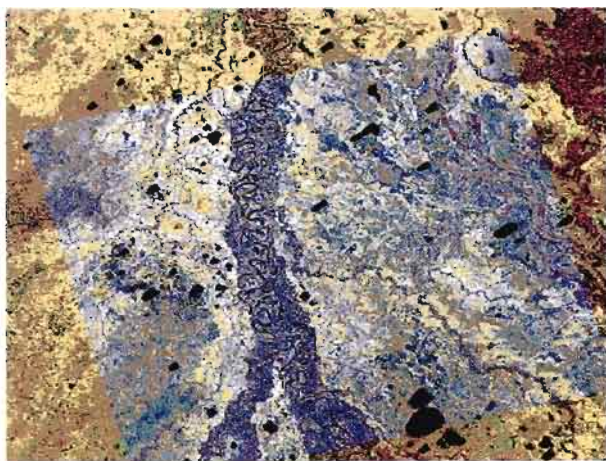


Figura IV.9 Superposición de una imagen LANDSAT TM y de una imagen RADARSAT del 5 de abril de 1997.

- cuerpos de agua (ríos y lagunas)
- sabanas
- bosque
- sabanas húmedas

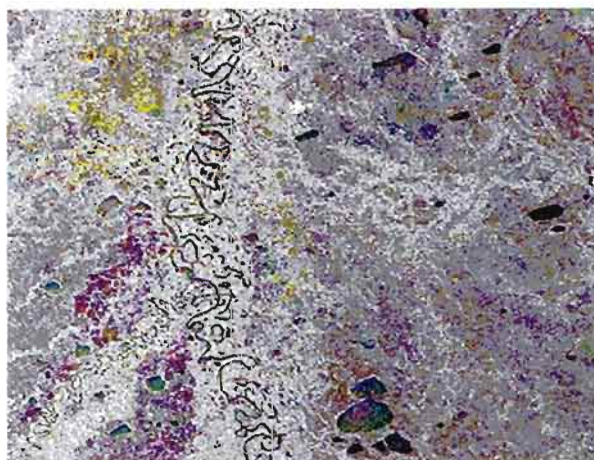


Figura IV.10 Superposición multi-temporal producida con datos radar del satélite ERS. La imagen del 10 de febrero de 1996 (época húmeda) fue asociada al canal verde. La imagen del 17 de noviembre de 1996 (fin de época seca) fue asociada al canal rojo y la del 6 de abril de 1997 (época de inundación) al canal azul.

- elementos que no han cambiado en las tres fechas
- cuerpos de agua (ríos y lagunas)
- elementos que han cambiado poco en las tres fechas (bosque)
- sabanas húmedas al final de época seca (noviembre)
- sabanas afectadas por la inundación el 5 de abril de 1997
- otras zonas húmedas afectadas por esta inundación

y morado, indican respectivamente a sabanas con aguas (zonas húmedas) a fines de la época seca (noviembre), a sabanas afectadas sólo por la inundación del 5 de abril de 1997 y a las zonas húmedas, afectadas por esta inundación.

Los resultados de identificación de los tipos de vegetación (imagen Landsat TM), de extensión de las aguas y generalmente del grado de humedad en épocas seca y de lluvias (imagen radar), así como del nivel de las aguas fueron asociados para destacar un perfil sintético y esquemático que permite visualizar el proceso de inundación en el Río Mamoré central y para relacionarlo con la geomorfología y topografía del terreno, como con las principales unidades de vegetación (Fig. IV.11).

CONCLUSIÓN

Los datos hidrológicos presentados sostienen la hipótesis que interpreta al fenómeno de inundación del Río Mamoré central como resultado de dos procesos: un proceso endógeno y otro exógeno. El proceso endógeno corresponde al desborde de las capas freáticas alimentadas por las precipitaciones locales. Cuando el nivel de las aguas blancas del Río Mamoré es alto, el drenaje de esas aguas locales es bloqueado, las capas freáticas suben y llenan la sabana de aguas de planicie con un nivel que puede alcanzar los dos metros. Por otro lado, el proceso exógeno es la crecida del nivel de agua en el Río Mamoré y en sus afluentes andinos. En este caso, las aguas

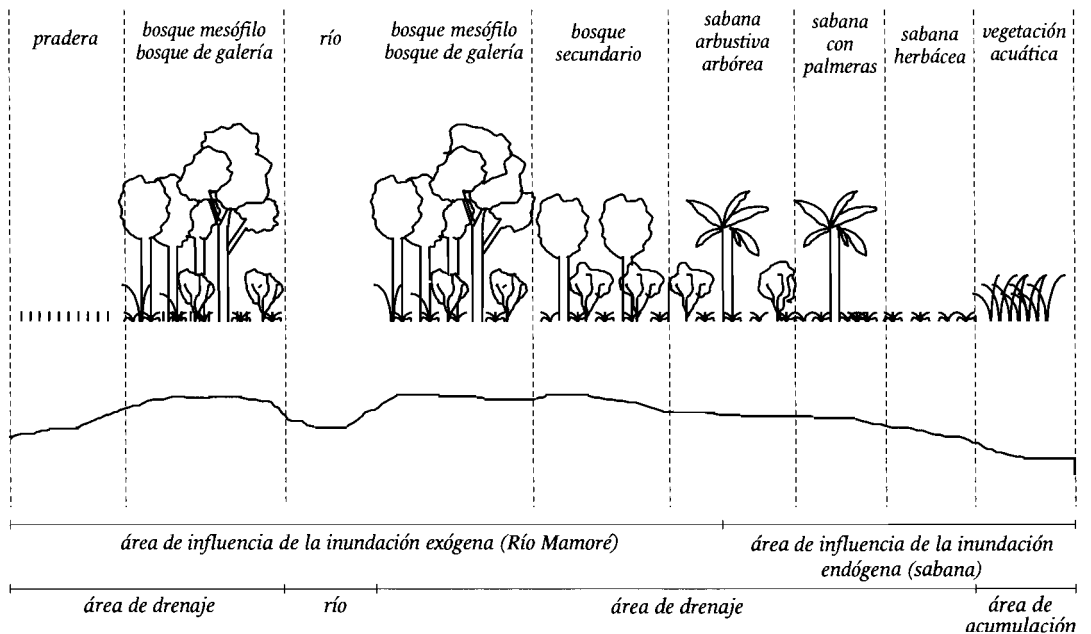


Figura IV.11 Perfil topográfico esquemático de la llanura de inundación del Río Mamoré central (región de Trinidad), representando a las relaciones entre la vegetación, hidrología y topografía.

proviene de los Andes y están cargadas de sedimentos arrastrados por la erosión en las montañas. Estos sedimentos se difunden y son captados en la llanura de inundación, provocando un complemento nutricional favorable para la productividad biológica (Junk *et al.*, 1989). Sin embargo, según el ciclo hidrometeorológico anual que afecta a la cuenca alta y baja del Río Mamoré y en particular según la intensidad relativa de las lluvias en los Andes y en la llanura, ambos procesos pueden desarrollarse de manera independiente o conjunta, generando una gran variabilidad en el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación.

El enfoque por teledetección y especialmente la combinación de imágenes ópticas y de radar ha permitido iniciar el proceso de la identificación y cartografía de las zonas húmedas e inundadas de la Amazonía Boliviana, incluyendo a la vez información de vegetación y de humedad relativa en una visión de la dinámica temporal. El desarrollo y la continuación de estudios de esta naturaleza es imprescindible para describir el funcionamiento hidrológico. Es a partir de estos conocimientos que se logrará establecer de manera pertinente la cartografía de riesgos y modelos de previsión sobre la extensión de las inundaciones, para la protección de las actividades humanas, así como para la gestión de los recursos biológicos.

El estudio presentado fue realizado durante tres años relativamente secos, presentando eventos hidrológicos moderados, por lo cual las conclusiones pueden ser limitadas. Datos disponibles desde los años 1980 (Loubens *et al.*, 1992; este capítulo) muestran una diferencia significativa del número promedio de días de desborde que fue de 141 entre 1981 y 1987 (Loubens *et al.*, 1992) y de 18 entre 1992 y 1999. Estos resultados recalcan la importan-

cia y el interés por desarrollar estudios futuros que permitan explicar estas diferencias y detectar si son fenómenos cíclicos, influenciados por ejemplo por eventos climáticos globales (como Niño-Niña) o si por el contrario la temporada "seca" que se desarrolla desde los años 1990 pueda ser una consecuencia del calentamiento del planeta. Es necesario realizar un similar estudio al presentado aquí, pero considerando un tiempo mayor de observaciones, incluyendo la interpretación de 10 - 20 inundaciones con un amplio rango de intensidad y de duración, para establecer de manera confiable y pertinente las relaciones entre niveles de aguas en los ríos, niveles de aguas en la llanura y extensión de la inundación y para caracterizar las frecuencias de retorno de los eventos extremos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abasto Lara, N., R. Hoorelbecke, M.A. Roche & L. Rubin de Celis.** 1985. Alturas de agua y caudales, limnigramas e hidrogramas de la red hidrométrica PHICAB en la Cuenca Amazónica de Bolivia. Informe PHICAB, ORSTOM, La Paz, Bolivia. 70 p.
- Abednego, B.S.** 1989. Apports de la télédétection à la conception de modèles de simulation en hydrologie. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, thèse n° 806, 220 p.
- Aliaga, A.** 1993. Balance hídrico de Bolivia. *En:* Roche, M.A., J. Bourges, E. Salas y C. Diaz (eds). Seminario sobre el PHICAB. ORSTOM La Paz, Bolivia. 107-116.
- Badji, M. & S. Dautrebande.** 1995. Characterization of flood inundated areas and delineation of poor internal drainage soil using ERS 1 SAR imaging. Proceedings of the First ERS

- thematic working group on Flood Monitoring, June 1995, ESA/ESRIN, Frascati, Italia. (No numerado).
- Beck, S.G. 1984.** Comunidades vegetales de las sabanas inundadizas en el Noreste de Bolivia. *Phytocoenologia* 12: 321-350.
- Blyth, K., D.S. Biggin & R. Ragab. 1994.** ERS-1 SAR for monitoring soil moisture and river flooding. Proceedings Second ERS-1 Symposium - Space at the service of our environment. Hamburg, Germany, October 1993: 839-844.
- Bonanse, E. 1995.** Mapping of 1994 flood in piemonte region: an exemple of remote sensing and GIS application. Proceedings of the First ERS thematic working group on Flood Monitoring, June 1995, ESA/ ESRIN, Frascati, Italia. (No numerado).
- Bourges, J., J.L. Guyot, L.M. Carrasco, M.C. Barragan & J. Cortes. 1990.** Evolution spatio-temporelle des débits et des matières particulaires sur un bassin des Andes boliviennes: le rio Béni. *En: Hydrology in Mountainous Regions*. IAHS Publication, Lausanne, Suisse 193: 351-356.
- Bourges, J. & R. Hoorelbecke. 1995.** Variation du régime des écoulements dans le système Ando-Amazonien de Bolivie. *En: Le Barbe, L. & E. Servat (eds.). Régionalisation en hydrologie*. ORSTOM, Paris, France: 417-487.
- Bourrel, L., S. Moreau & L. Phillips. 1999.** Dinámica de las inundaciones en la Cuenca Amazónica Boliviana. *Revista Boliviana de Ecología y Conservación Ambiental* 6: 5-17.
- Calabresi, G. 1995.** Flood monitoring workshop report. Proceedings of the First ERS thematic Working Group on Flood Monitoring, June 1995, ESA/ ESRIN, Frascati, Italia. (No numerado).
- Corbin, D., J.-L. Guyot, H. Calle, & J. Quintilla. 1988.** Datos físico-químicos de los medios acuáticos de la zona del Mamoré central, región de Trinidad, Amazonía boliviana. IRD (Ex-ORSTOM), La Paz, Bolivia. 57 p.
- Denevan, W.M. 1980.** La geografía cultural aborigen de los Llanos de Mojos, Bolivia. Ed. Juventud, La Paz, Bolivia. 272 p.
- Desnos, Y.L., Th. Mayer & A.M. Sardar. 1996.** Multitemporal ERS-1 SAR images of the Brahmaputra flood plains in Northern Bangladesh. *Earth Observation Quarterly*, ESA 51: 6-10.
- Engman, E.T. 1990.** Progress in microwave remote sensing of soil moisture. *Canadian Journal of Remote Sensing* 16 (3): 6-14.
- Goulding, M. 1980.** The fishes and the forest. Explorations in Amazonian natural history. University of California Press, USA. 280 p.
- Goulding, M., M.L. Carvalho & E.G. Ferreira. 1988.** Rio Negro. Rich life in poor water. SPB Academic Publishing, The Hague, Holanda. 200 p.
- Guyot, J.L. 1993.** Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne. IRD, Collection Etudes et Thèses, Paris, France. 261 p.
- Guyot, J.L., D. Corbin, J. Quintilla & H. Calle. 1991.** Hydrochimie des lacs dans la région de Trinidad (Amazonie bolivienne), influence d'un fleuve andin: le Rio Mamoré. *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 24(1): 3-12.
- Guyot, J.L., J.M. Jouanneau, J. Quintanilla & J.G. Wasson. 1993.** Les flux de matières dissoutes et particulaires exportées des Andes par le Rio Beni (Amazonie bolivienne). *Geodinamica Acta* 6(4): 233-241.

- Guyot, J.L., J.M. Jouanneau & J.G. Wasson. 1999.** Characterisation of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivian Amazonia), en période de crue. *Journal of South American Earth Sciences* 12: 401-410.
- Hamilton, S.K., S.J. Sippel & J.M. Melack. 1999.** Determination of inundation patterns in the major floodplains of South America from passive microwave remote sensing. *Proceeding Hydrological and Geochemical Processes in Large-Scale Basins, Manaus, Brasil*, November 1999. (No numerado).
- Hanagarth, W. 1993.** Acerca de la geoecología de las sabanas del Béni en el Noreste de Bolivia. Instituto de Ecología, La Paz, Bolivia. 186 p.
- Hess, L.L., J.M. Melack, S. Filoso & Y. Wang. 1995.** Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* 33(4): 896-903.
- Hess, L.L., J.M. Melack & D.S. Simonett. 1990.** Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing* 11(7): 1313-1325.
- Junk, W.J. 1997.** The Central Amazon floodplains. Ecology of pulsing system. *Ecological Studies* 126, Springer, Berlin, Germany. 493 p.
- Junk, W.J., P.B. Bayley & R.E. Sparks. 1989.** The flood pulse concept in river floodplain systems. *En: Dodge, D.P. (ed.) International Large River Symposium*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106: 110-127.
- Kasischke, E.S., J.M. Melack & M.C. Dobson. 1997.** The use of imaging radars for ecological applications: a review. *Remote Sensing of Environment* 59: 141-156.
- Krohn, M.D., N.M. Milton & D.B. Segal. 1983.** Seasat synthetic aperture radar (SAR) response to lowland vegetation types in eastern Maryland and Virginia. *Journal of Geophysical Research* 88 (C3): 1937-1952.
- Kux, H.J.H., E.J. Ahern & R.W. Pietsch. 1995.** Evaluation of radar remote sensing for natural resource management in the tropical rainforests of Acre State, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing* 21(4): 430-440.
- Lointier, M., J.P. Rudant, D. Sabatier & M.T. Prost. 1993.** Contribution of ERS-1 SAR data to hydrologic approach in tropical area: example in French Guiana. *Proceedings Second ERS-1 Symposium, Hamburg, Germany*. Oct. 1993.
- Loubens G., L. Lauzanne & B. Le Guennec. 1992.** Les milieux aquatiques de la région de Trinidad (Beni, Amazonie bolivienne). *Revue d'Hydrobiologie Tropicale* 25: 3-21.
- Low Mc Connell, R.H. 1987.** Ecological studies in tropical fish communities. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 382 p.
- Lowry, R.T., Y.N. Mudry & E.J. Langham. 1979.** A preliminary analysis of SAR mapping of the Manitoba Flood, Satellite hydrology. *Proceedings of the fifth Annual William T. Pecora Memorial Symposium on Remote Sensing*, May 1979, Sioux Falls, South Dakota, USA. (No numerado).
- Noyelle, J., S. Delmeire & L. Marinelli. 1995.** Identification of flooded areas in the Rhône and Var river, France, using ERS-1 data. *Proceedings of the First ERS thematic Working Group on Flood Monitoring*, June 1995, ESA/ESRIN, Frascati, Italia. (No numerado).
- Pichugin, A.P. 1989.** Radar observation of river floods from the KOSMOS-1500 satellite. *Soviet Journal of Remote Sensing* 5(5): 890-901.

- Puech, C., 1993.** Détermination des états de surface par télédétection pour caractériser les écoulements des petits bassins versants. Thèse Université Joseph Fourier, Grenoble, France. 214 p.
- Roche, M.A., J. Bourges, E. Salas & C. Diaz. 1993.** Actes du séminaire sur le programme PHICAB. CONAPHI-IRD-IHH-SENAMHI, La Paz, Bolivia, novembre 1992.
- Roche, M.A., C. Fernandez, A. Apoteker, N. Abasto, H. Calle, M. Toleda, J.P. Cordier & C. Pointillart. 1986.** Reconnaissance hydrochimique et première évaluation des exportations hydriques et salines des fleuves de l'Amazonie bolivienne. Informe PHICAB, IRD (Ex-ORSTOM), La Paz, Bolivia. 257 p.
- Roche, M.A. & C.F. Fernandez. 1988.** Water resources, salinity and salt yields of rivers in the Bolivian Amazon. *Journal of Hydrology* 101: 305-331.
- Ronchail, J. 1985.** Situations météorologiques et variations climatologiques en Bolivie (situations météorologiques, analyse des séries climatiques, inventaires de saisons exceptionnelles). Informe PHICAB, IRD (Ex-ORSTOM), La Paz, Bolivia. 64 p.
- Salo, J., R. Kalliola, I. Häkkinen, Y. Mäkinen P., Niemalä, M. Puhakka & P.D. Coley. 1986.** River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. *Nature* 322: 254-258.
- Sioli, H. 1984.** The Amazon and its main affluents: Hydrography, morphology of the river courses and river types. *En: Sioli, H. (ed). The Amazon.* Dr. Junk, W. Dordrecht, Germany: 127-165.
- Sippel, S.J., S.K. Hamilton, J.M. Melack & E.M.M. Novo. 1998.** Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon river floodplain. *International Journal of Remote Sensing* 19(16): 3055-3074.
- Ulaby, F.T. 1974.** Radar measurement of soil moisture content. *IEEE Transactions Antennas Propagation* 22(2): 257-265.
- Wang, Y., L.L. Hess, S. Filoso & J.M. Melack. 1994.** Canopy penetration studies: modeled radar backscatter from Amazon floodplain forests at C-, L-, and P-band. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*: 1060-1062.

Diversidad biológica en la llanura de inundación del

Río Mamoré

Marc Pouilly | Stephan G. Beck | Mónica Moraes R. y Carla Ibañez (Editores)



*Importancia
ecológica de la
dinámica fluvial*

Diversidad biológica en la llanura de inundación del

Río Mamoré

Importancia ecológica de la dinámica fluvial

Marc Pouilly | Stephan G. Beck | Mónica Moraes R. y Carla Ibañez (Editores)



FUNDACIÓN SIMÓN I. PATIÑO

Título original	Diversidad biológica en la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial.
Editores científicos	Marc Pouilly, Stephan G. Beck, Mónica Moraes R. y Carla Ibañez
Cita bibliográfica	Pouilly M., S.G. Beck, M. Moraes R. y C. Ibañez 2004. Diversidad biológica en la llanura de inundación del Río Mamoré. Importancia ecológica de la dinámica fluvial. Centro de Ecología Simón I. Patiño, Santa Cruz, Bolivia. 383 p.
Primera edición en español	No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión en ninguna forma ya sea electrónica, mecánica, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares de derechos de autor.
Derechos reservados	2004 Centro de Ecología Simón I. Patiño <i>Departamento de Difusión</i>
ISBN	99905-0-564-0
Depósito Legal	8-1-962-04
Editorial	Centro de Ecología Simón I. Patiño- <i>Departamento de Difusión</i>
Coordinación y revisión	Carmiña Montoya Köster y Christian Bomblat
Diagramación	María Gracia Sarabia Alanis
Fotografía cubierta	Meandro abandonado cerca del Río Mamoré <i>Marc Pouilly</i>
Impresión	Imprenta Sirena, Santa Cruz - Bolivia