

## Estudio de la dinámica de las inundaciones en la cuenca Amazónica Boliviana con un enfoque conjunto de la hidrología y de la percepción remota.

L. Bourrel <sup>(1)</sup>, L. Phillips <sup>(2)</sup>, S. Moreau <sup>(3)</sup>

(1) IRD: Institut de Recherche pour le Développement, CP 9214, La Paz, Bolivia

(2) SEMENA: Servicio de Mejoramiento de la Navegación Amazónica, CP 156, Trinidad, Bolivia

(3) ABTEMA: Asociación Boliviana de Teledetección para el Medio Ambiente, CP 14248, La Paz, Bolivia

**Abstract.** In 1997, a study has been undertaken by IRD (1) to analyse the dynamics of floods in the Bolivian Amazon which generally affect from 100 000 to 150 000 km<sup>2</sup> during about four months of the year. This region presents vast isolated areas with difficult access and is continuously covered by clouds in the wet season: for these reasons, this hydrological study is based on the use of remote sensing, and mainly on radar data, for flood monitoring and identification of risks areas. This paper presents preliminary results obtained in the Trinidad area, around the Mamoré river, using LANDSAT, ERS and RADARSAT radar data from dry, wet and flood seasons (between 1996 and 1998), water levels and hydrometeorological data of the upper and lower part of the Mamoré basin. After a characterization of the hydrometeorological cycle of the studied annual floods, are presented one TM colour composite (to map the vegetation) and radar colour composites (multitemporal) used to evaluate the contributions of microwave data (RADARSAT and ERS) for mapping flood extensions at a regional (all the inundation plain) and a local scale (around the city of Trinidad).

**Resumen.** La Amazonia Boliviana se caracteriza por una gran llanura central regularmente inundada mas de 4 meses al año. En época de lluvias, esta región presenta una persistente cobertura nubosa y zonas vastas de difícil acceso: por esta razón, este estudio hidrológico se basa primero sobre la utilización de la percepción remota radar que permite de prender la distribución espacio-temporal de las inundaciones. Este artículo presenta los primeros resultados obtenidos, en la llanura de inundación, con la utilización de imágenes LANDSAT, ERS y RADARSAT correspondientes a las épocas seca y inundada (de 1996 a 1998), y también de datos hidrometeorológicos y niveles diarios de agua (en los ríos y en la llanura) obtenidos en estaciones ubicadas en la parte alta y en la parte baja de la cuenca del río Mamoré. Después de la caracterización del ciclo hidrometeorológico anual de las inundaciones estudiadas, están presentadas una compuesta coloreada de una imagen LANDSAT TM (mapeo de vegetación) y luego algunas compuestas coloreadas radar (multitemporal) están utilizadas para valuar las respectivas contribuciones de los datos radar en el mapeo de la extensión de las inundaciones al nivel regional (de toda la llanura de inundación) y local (alrededor de la ciudad de Trinidad).

### INTRODUCCIÓN

La Amazonia Boliviana se caracteriza por una gran llanura central regularmente inundada más de 4 meses al año. La superficie afectada puede abarcar 100 000 a 150 000 km<sup>2</sup> según la variabilidad hidrometeorológica anual en la llanura y en las subcuencas andinas. En el año 1997, el IRD (1) ha iniciado un gran programa de investigaciones (BIOCAB: Biodiversidad acuática en la Cuenca Amazónica Boliviana) para desarrollar un conocimiento del

Fonds Documentaire IRD

Cote: BX 25630 Ex: 1

Fonds Documentaire IRD



010025630

LPZ B 126TELAPP04 BOU1  
1581



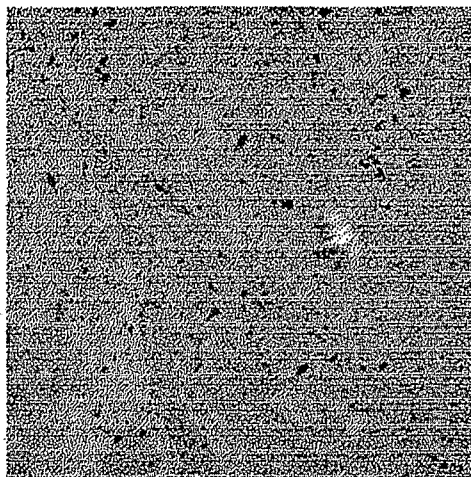


Figura 2 : *Compuesta coloreada (R5-V4-A7) de la imagen LANDSAT TM del 15 de Agosto de 1997.*

## **METODOLOGÍA GENERAL**

La dinámica de las inundaciones en la Amazonía Boliviana es poco conocida por lo que los objetivos específicos de esta fase sobre la «Dinámica de las zonas húmedas de la Amazonía Boliviana» son el seguimiento de la dinámica de las inundaciones a nivel de crecida y el estudio de la variabilidad espacio-temporal de las zonas inundadas en diferentes escalas (a nivel de la crecida anual y a nivel interanual). En época de lluvias, esta región presenta una persistente cobertura nubosa y zonas vastas de difícil acceso : por esta razón, este estudio hidrológico se basa primero en la utilización de la percepción remota radar que permite llegar a la distribución espacio-temporal de las inundaciones : las imágenes radar se utilizan por sus observaciones en todo tiempo y la posibilidad de distinguir el agua en la vegetación (en caso de capa vegetal baja). Con el apoyo de las imágenes satelitarias clásicas (tipo LANDSAT TM), que se utilizan en época seca para identificar las grandes unidades naturales permanentes o temporales del paisaje (aguas, bosques de galería, sabanas, pantanos...), se puede identificar las extensiones de las áreas afectadas por las inundaciones y abordar, con un enfoque multitemporal, la dinámica de la inundación. La conjugación de estos dos tipos de datos satelitales (clásicas y radar) y de los niveles de agua en los ríos (en la llanura y en el piedemonte andino) y en varios puntos de la llanura misma, deben permitir llegar al entendimiento del funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación del río Mamoré.

## **PRIMEROS RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En este capítulo, presentamos los primeros resultados obtenidos, entre 1996 y 1997, al nivel regional (de toda la llanura de inundación) y local (alrededor de la ciudad de Trinidad).

## **HIDROLOGÍA**

Como hipótesis sobre el funcionamiento hidrológico de la llanura del río Mamoré, hemos puesto que la inundación se realiza con la conjugación de dos procesos (cf Fig.3) : un proceso centrífugo, con la llegada de la onda de crecida del río Mamoré ( $Q_E$ ) y de sus afluentes arriba (generada por las lluvias  $P_A$  sobre la Cordillera de los Andes y su Piedemonte) y su difusión (aguas blancas) en el sistema de meandros muertos y de defluentes del Mamoré, un proceso

centrípeto, con el desbordamiento de las capas freáticas de la llanura (alimentadas por las precipitaciones locales  $P_L$ ), y del cual el drenaje (a través de una red de drenaje secundaria de estas aguas negras) hacia el sistema del Mamoré es bloqueado por los niveles altos de las aguas en este río.

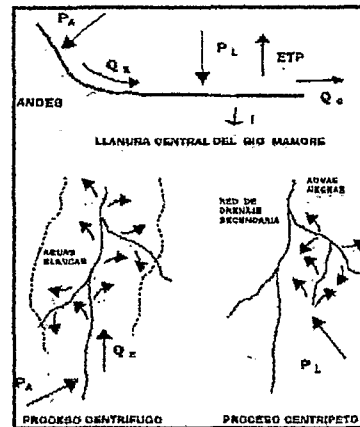


Figura 3 : Esquema del funcionamiento hidrológico de la llanura central del río Mamoré.

Las figuras 4, 5 y 6 ilustran la conjugación de los dos procesos que generan las inundaciones.

La figura 4 ilustra el proceso centrífugo: se muestran los limnigramas en Puerto Varador (sobre el río Mamoré, cerca de Trinidad) en 1992-1993 (las últimas grandes inundaciones que han afectado toda la llanura) y entre 1996 y 1999 (los últimos cuatro años de los cuales tenemos conjuntamente datos de hidrología y datos satelitales dentro del proyecto). Se puede ver que, por las grandes inundaciones de 1992 y 1993, las aguas del río Mamoré han desbordado respectivamente durante 40 y 43 días. Por la inundación de 1997, el río Mamoré ha desbordado durante 22 días: es decir, una inundación presentando un poder (en amplitud y duración) equivalente a la mitad de cada una de las grandes inundaciones de 1992 y de 1993. Por fin, vemos que, en los años 1996, 1998 y 1999, no ocurrió ninguna inundación causada por el río Mamoré en Trinidad. La figura 5 ilustra el proceso centrípeto: se muestran los limnigramas en Puerto Almacén (sobre el río Ibaré, cerca de Trinidad) entre 1994 y 1999. Para los últimos cuatro años, se puede ver que, en 1997, el río Ibaré ha desbordado durante 39 días, y en 1998, durante 21 días y vemos también que, en los años 1996 y 1999, ninguna inundación fue causada por el río Ibaré. Como hemos visto, en 1998, tenía sólo el proceso centrípeto: la figura 6 presenta un ejemplo de evolución conjunta de los niveles de aguas de inundación dentro de la llanura y de las precipitaciones asociadas, en un lugar bajo la influencia de un río endógeno (el río Ibaré). Así, podemos ver primero, una repuesta de estos niveles subiendo a causa de las precipitaciones locales y segundo la llegada de las aguas (negras) provenientes del desbordamiento del río Ibaré (máxima de 80 cm el 4 de Abril, lo cual era de 1,50 m en 1992). Al final, podemos decir que, según el ciclo hidrometeorológico anual afectando la cuenca alta y baja del río Mamoré, el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación presenta una gran variabilidad temporal: así, como lo hemos visto con estos ejemplos entre 1992 y 1999, se puede encontrar el proceso centrípeto sólo (como en 1998), el proceso centrífugo predominante (como en 1997) y una conjugación de ambos (como en 1997) que genera las más grandes inundaciones (el mismo que ha generado las dos últimas grandes inundaciones en 1992 y 1993) o ninguno de los dos procesos como en 1996 y 1999.

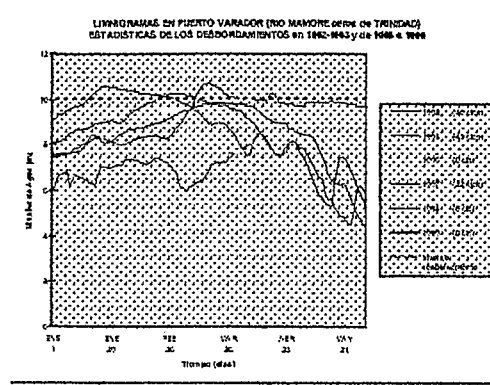


Figura 4 : Limnigramas y estadísticas de los desbordamientos del río Mamoré en Puerto Varador (Trinidad) en 1992-1993 y de 1996 a 1999.

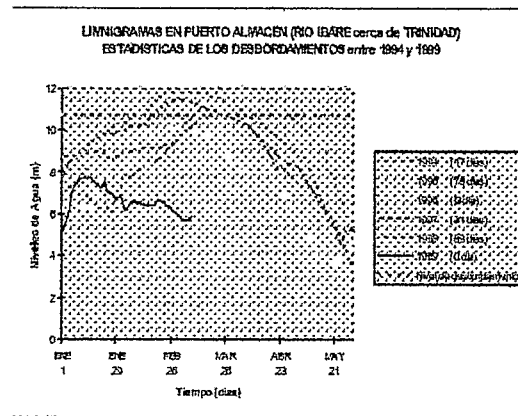


Figura 5 : Limnigramas y estadísticas de los desbordamientos del río Ibaré en Puerto Almacen (Trinidad) de 1994 a 1999.

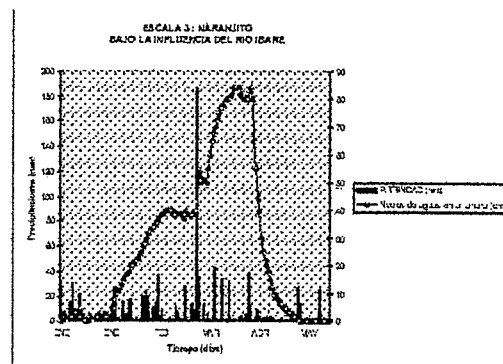


Figura 6 : Evolución de los niveles de inundación en 1998 adentro de la llanura del Beni.

## PERCEPCIÓN REMOTA

El objetivo principal de las investigaciones sobre este enfoque es evaluar las potencialidades de los datos radar (microondas) en banda C con polarizaciones HH (ERS) y VV (RADARSAT) para la identificación de las zonas húmedas e inundadas de la Amazonia Boliviana. Para tratar e interpretar estas imágenes, es necesario obtener datos hidrológicos, realizar campañas de campo y sobrevuelos para hacer medidas (como ser niveles de agua de la llanura, posicionamiento con GPS de los límites de inundación dentro de los diferentes tipos de vegetación...) al mismo tiempo de la toma de la imagen satelital. Para mapear la extensión de las inundaciones, se utilizan métodos como compuestas coloreadas y clasificaciones de imágenes satelitarias LANDSAT TM y algunas compuestas coloreadas radar (multitemporal) de las épocas seca, húmeda e inundada. En este sentido, presentamos algunos resultados que fueron obtenidos sobre la base de una imagen LANDSAT TM, de dos imágenes RADARSAT y de tres imágenes ERS cubriendo los años 1996 a 1998 : imagen clásica LANDSAT TM del 15 de Agosto de 1997 en época seca (185x185 km con una resolución de 30 x 30 m, 3 bandas, TM 4 (PIR : Próximo Infra Rojo), TM 5 y TM 7 (Infra Rojo Medio)) para distinguir la vegetación y la humedad de los suelos; imágenes radar ScanSAR Wide B del satélite RADARSAT (500 x 500 km con una resolución de 50 x 50 m) del 19 de Marzo de 1997 (época de inundación) y del 5 de Agosto de 1998 (época seca), para tener una vista de las extensiones de las inundaciones al nivel regional; imágenes radar ascendientes SAR-PRI del satélite ERS 2 (100 x 100 km con una resolución de 12,5 x 12,5 m; Asc. 19.5-26.5°) del 10 de Febrero de 1996 (época húmeda), del 17 de Noviembre de 1996 (fin de época seca) y del 6 de Abril de 1997 (época de inundación), para tener imágenes más precisas de las inundaciones alrededor de Trinidad. Como lo hemos dicho antes en la metodología general, el radar da la posibilidad de distinguir el agua en la vegetación (en caso de una capa vegetal baja como sabanas): esto es debido al hecho que la retrodifusión de la señal radar está influenciada por los dos parámetros principales que son la rugosidad y la humedad (Engman, 1990) del blanco observado (cuerpos de agua, vegetación, suelo...). En este sentido, presentamos dos ejemplos de los resultados obtenidos utilizando datos radar ilustrando esta capacidad de identificación de las extensiones de las áreas afectadas por las inundaciones (Badji & Dautrebande, 1995; Kux et al., 1995) y abordamos también, con el enfoque multitemporal (Desnos et al., 1996), el aspecto de la dinámica de la inundación. Primero, presentamos (cf Fig. 7) un resultado asociando (compuesta coloreada multitemporal de tipo Krosscolor) las dos imágenes radar ScanSAR Wide B del satélite RADARSAT (500 x 500 km) del 19 de Marzo de 1997 y del 5 de Agosto de 1998, para tener una vista de las extensiones de las inundaciones a nivel de toda la llanura. Sobre los 500 x 500 km cubiertos por esta imagen, se puede ver toda la llanura del Béné con el río Mamoré (en el centro de la imagen) como eje fluvial central, limitada en el rincón Sudoeste por una parte de la cordillera (región de Cohabamba), en el rincón Nordeste por el río Béné y en el rincón Noroeste por el río Itenez. Así, podemos ver las extensiones de la inundación a esta fecha (en color rojo), representando una superficie total afectada de aproximadamente 35 000 km<sup>2</sup> entre Camiaco y Puerto Siles (es decir sobre una distancia de 250 km a lo largo del eje del río Mamoré) incluyendo las áreas de influencia de los ríos principales que son, de Este a Oeste, el Ibaré (aguas negras), el Mamoré (aguas blancas), el Tijamuchi (aguas blancas), el Aperé, el Rapulo y el Yacuma. Se puede notar también que la mayor parte de la inundación se ubica del lado izquierdo del río Mamoré donde se encuentran más tierras bajas y una red fluvial más importante que por el lado derecho. Secundo, después de esta vista al nivel regional de la inundación de 1997, y a fin de obtener una especialización, más detallada cerca de Trinidad, de las extensiones de esta inundación, presentamos un resultado (cf Fig. 8) asociando (compuesta coloreada multitemporal de tipo RGB) las tres imágenes radar ERS ya citadas. Esta figura nos permite poner en evidencia los cambios (en término de relaciones de las sabanas con las aguas) ocurridos según las épocas : la imagen del 10 de Febrero de 1996 (época húmeda) fue asociada al canal Verde, la del 17 de Noviembre de 1996 (final de época seca) al canal Rojo y la del 6 de Abril de 1997 (época de

inundación, dos semanas después de la imagen de la inundación global del 19 de Marzo) al canal Azul. Así, se puede ver en blanco, la ciudad de Trinidad (sin ningún cambio entre las tres fechas); en negro, los cuerpos de agua como los ríos, las lagunas naturales o artificiales; en tonos de gris (que significan pocos cambios en el tiempo), la selva tropical rodeando las sabanas y el bosque de galería bordeando los ríos (en este medio, hubo inundación y debería parecer en Azul pero se queda en gris porque no se puede ver el agua debajo de los árboles con el radar banda C); y por fin, en tonos yendo de rojo a azul hacia morado, respectivamente las sabanas con aguas (zonas húmedas) en fin de época seca (Noviembre), las sabanas afectadas solo por la inundación a la fecha del 6 de Abril de 1997 y las zonas húmedas afectadas además por esta inundación.

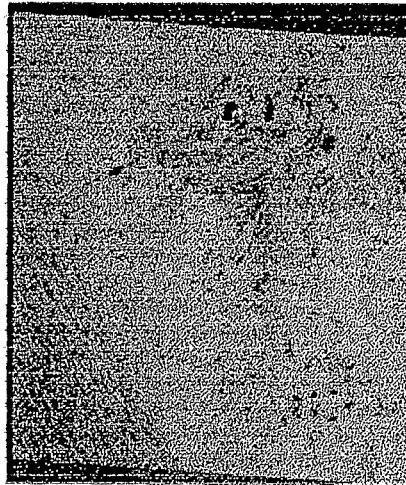


Figura 7 : Espacialización de la inundación de 1997 al nivel regional (imagen multitemporal asociando las imágenes radar RADARSAT SCW del 19 de Marzo de 1997 y del 5 de Agosto de 1998).

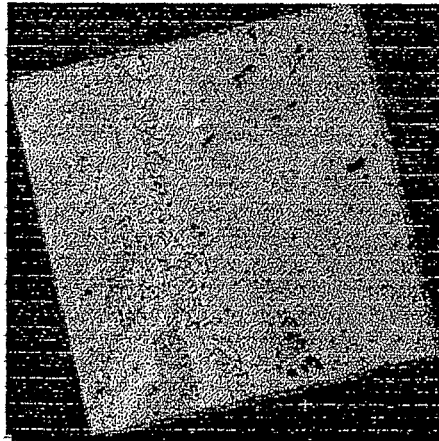


Figura 8: Espacialización de la inundación de 1997 al nivel local (imagen multitemporal asociando las imágenes radar ERS del 10 de Febrero, del 17 de Noviembre de 1996 y del 6 de Abril de 1997).

## CONCLUSIONES

Hemos puesto como hipótesis que el establecimiento de la inundación en la Amazonía Boliviana se hace con la conjugación de dos procesos: un proceso centrífugo (con la llegada de la onda de crecida del río Mamoré generada por las lluvias sobre la Cordillera de los Andes y su Piedemonte) y un proceso centripeto (con el desbordamiento de las capas freáticas de la llanura alimentadas por las precipitaciones locales). Estudiar esta problemática necesita el enfoque conjunto de la hidrología y de la percepción remota radar. Los resultados del enfoque hidrológico averiguan estas hipótesis y muestran que, según el ciclo hidrometeorológico anual que afecta la cuenca alta y baja del río Mamoré, el funcionamiento hidrológico de la llanura central de inundación presenta una gran variabilidad: así, como lo hemos ilustrado con ejemplos tomados entre 1992 y 1999, se puede encontrar el proceso centripeto solo (como en 1998), el proceso centrífugo predominante (como en 1997) y una conjugación de ambos (como en 1997) que genera las más grandes inundaciones del Béné (como lo han sido las dos últimas en 1992 y 1993) o ninguno de los dos procesos como en 1996 y 1999. Los resultados del enfoque por percepción remota (obtenidos con imágenes LANDSAT, ERS y RADARSAT entre 1996 y 1998), han permitido averiguar las potencialidades de los datos radar, en banda C con polarizaciones HH (ERS) y VV (RADARSAT) por la identificación de las zonas húmedas e inundadas de la Amazonía Boliviana al nivel regional (de toda la llanura de inundación) y local (alrededor de la ciudad de Trinidad).

## REFERENCIAS

- Badji, M. & Dautrebande, S. (1995) Characterization of flood inundated areas and delineation of poor internal drainage soil using ERS 1 SAR imaging, Proc. of the First ERS thematic working group on Flood Monitoring, 26-27 June 1995, ESA/ESRIN, Frascati, Italy.
- Desnos, Y.L., Mayer, Th. & Sardar, A.M. (1996) Multitemporal ERS-1 SAR images of the Brahmaputra flood plains in Northern Bangladesh, Earth Observation Quarterly, ESA, N°51, March 1996, 6-10.
- Engman, E.T. (1990) Progress in microwave remote sensing of soil moisture, Canadian J. of Remote Sensing, Vol. 16 (3), 6-14.
- Guyot, J.L. (1993) Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie Bolivienne. (ed. by ORSTOM, Paris), France, 261p.
- Hanagarth, W. (1993) Acerca de la geoecología de las sabanas del Béné en el Noreste de Bolivia. (ed. by Instituto de Ecología, La Paz), Bolivia, 186p
- Kux, H.J.H., Ahern, F.J. & Pietsch, R.W. (1995) Evaluation of radar remote sensing for natural resource management in the tropical rainforests of Acre State, Brazil. Canadian J. of Remote Sensing, Vol. 21, N°4, dec. 1995, 430-440.