

Series temporales de niveles de agua en estaciones virtuales de la Cuenca Amazónica a partir de altimetría radar por satélite

Time series for water levels in virtual gauge stations in the Amazon basin using satellite radar altimetry

Juan Gabriel León Hernández¹, Jorge Rubiano Mejía² y Viviana Vargas³

RESUMEN

La utilización de la altimetría radar por satélite para el monitoreo de las variaciones de los niveles de agua en dominio continental es un avance relativamente reciente. Varios estudios han demostrado el interés de la aplicación de esta tecnología como apoyo al monitoreo del comportamiento hidrológico de grandes cuencas hidrográficas. Este estudio presenta las series temporales representando la variación de los niveles superficiales de cuerpos de agua a partir de la definición de estaciones virtuales deducidas para los cauces principales del río Negro en la Amazonía brasilera y el río Caquetá en la Amazonía colombiana, cauces que difieren considerablemente en sus características físicas y topográficas. Si bien las diferencias físicas entre ambas zonas de estudio ponen en evidencia los límites de la altimetría radar por satélite sobre aguas continentales (precisiones de ± 20 cm y ± 40 cm para el río Negro y el río Caquetá, respectivamente), su aplicación en el dominio de la hidrología sigue siendo muy prometedora, especialmente si se tienen en cuenta las futuras misiones que actualmente están siendo concebidas para el estudio de aguas continentales y que serán puestas en órbita a finales de 2008.

Palabras clave: altimetría radar, estaciones virtuales, series temporales altimétricas, modelación hidrológica, Cuenca Amazónica.

ABSTRACT

Using satellite altimeter radar technology for monitoring changes in water levels at continental scale is a relatively recent advance. Several studies have demonstrated the interest being shown in applying this technology to monitoring the hydrographic patterns of large-scale basins worldwide. The current study presents the inference of time series representing changes in water level for bodies of water by defining virtual gauge stations deduced for two very different rivers in terms of their biophysical and topographic characteristics; the two rivers were the Rio Negro in the Brazilian Amazon Basin and the Caqueta River on the Colombian side. The differences between the two rivers revealed the limits of satellite radar altimeter when applied to continental waters (± 20 cm and ± 40 cm precision for Río Negro and Río Caquetá, respectively). However, applying this technology seems very promising, since new missions have been scheduled to be put into orbit by the end of 2008.

Keywords: radar altimetry, virtual gauge station, altimetry time series, hydrological modeling, Amazon Basin.

Recibido: mayo 28 de 2008

Aceptado: marzo 2 de 2009

Introducción

De manera clásica, el monitoreo de las variaciones temporales de los niveles de agua de un río es realizado a través de registros tomados *in situ* en las estaciones hidrométricas. Dichos valores de los niveles del agua son generalmente utilizados en la hidrología para la estimación de caudales medios diarios usando una relación calibrada entre las alturas del nivel del agua y sus caudales correspondientes, medidos ellos a través de una práctica que se conoce como aforo (OMM, 1994). Sin embargo, la instalación y mantenimiento de dichas estaciones hidrométricas están comprometidas. En el contexto de los países del sur, los costos ligados a la instalación y mantenimiento de dichas estaciones, así como la publicación de los datos registrados, son particularmente sensibles. Por otro lado, el tiempo de acceso a estas informaciones son casi siempre incompatibles con los sistemas de prevención que lógicamente

se alimentan de estos datos. En consecuencia, resulta necesario intentar optimizar y perennizar los sistemas de medidas, así como reducir sus costos de mantenimiento y el tiempo de acceso a la información.

Desde hace algunos años, la altimetría radar por satélite se ha convertido en una interesante alternativa para la medición de las variaciones de los niveles de agua en medio continental, llegando inclusive a registrar información sobre lugares físicamente inaccesibles. La capacidad de los radares altimétricos contenidos en un satélite para el monitoreo de aguas superficiales, en especial para el análisis de las variaciones de las alturas de los niveles de agua, ha sido ampliamente demostrada en medio continental (Morris y Gill, 1994a; Morris y Gill, 1994b; Birkett, 1995; Mercier *et al.*, 2002; Frappart *et al.*, 2006; León *et al.*, 2006; Kouraev *et al.*, 2004). Sin embargo, debido al tamaño de la huella de barrido del satélite (Frappart *et al.*, 2006), esta tecnología encuentra por el momento

¹ Ingeniero agrícola, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc., Ciencias del Agua en Medio Ambiente Continental, Universidad de Montpellier II, Francia. Ph.D., Ciencias de la Tierra, del Medio Ambiente y del Espacio, Universidad de Toulouse III, Francia. Profesor asistente, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. jgleonh@unal.edu.co

² Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia. M.Sc., Geografía, King's College of London, Reino Unido. Ph.D., Geografía, University Of Nottingham, Reino Unido. Consultor, King's College of London, Universidad de Londres, Reino Unido. jerubiano@gmail.com

³ Matemática y M.Sc., Ingeniería de Sistemas, Universidad del Valle, Colombia. Profesor asociado, Facultad de Ingeniería y Administración, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. vivi5964@gmail.com

sus mayores aplicaciones sobre grandes cuerpos de agua tales como lagos, zonas de inundación y ríos con anchos de sección superiores a 400 m. León *et ál.*, (2008), proponen una revisión bibliográfica muy completa sobre los principios de la altimetría radar por satélite, las principales misiones altimétricas, así como los usos más recientes de esta tecnología sobre cuerpos de agua continentales.

El objetivo de este estudio es presentar en principio las estaciones virtuales encontradas sobre los cursos principales de los ríos Negro y Vaupés en la Amazonía brasilera, y río Caquetá en la Amazonía colombiana, empleando datos provenientes de las misiones T/P y Envisat. En el marco de la hidrología espacial, que corresponde en general al estudio de aguas superficiales continentales utilizando datos provenientes de sensores remotos, se le conoce como estación virtual a toda intersección que existe entre el barrido de un satélite y un plano de agua continental a partir de la cual sea posible deducir una serie que represente las altitudes de los niveles de agua en el tiempo sobre una referencia conocida, generalmente el geode continental. Adicionalmente se deducen algunas series temporales que representan la variación de los niveles de agua para algunas de estas estaciones virtuales.

Materiales y métodos

Zona de estudio

Dentro de la Gran Cuenca Amazónica se han seleccionado dos subcuencas hidrográficas para la definición de estaciones virtuales: la cuenca alta del río Negro (Brasil) y la cuenca del Caquetá (Colombia) (Figura 1). Estas dos cuencas poseen características físicas y topográficas muy diferentes (León *et ál.*, 2006; León, 2006). El río Negro, por ejemplo, presenta una topografía plana con anchos de sección del cauce principal que pueden variar entre 300 y 3.000 m. Presentando una topografía un poco más abrupta, la cuenca del Caquetá es más bien alargada, con importantes rupturas de pendiente sobre el cauce principal y anchos de sección inferiores a 900 m. Las descripciones físicas, climáticas e hidrológicas de ambas cuencas son presentadas en detalle por Frappart *et ál.*, (2006) y León (2006).

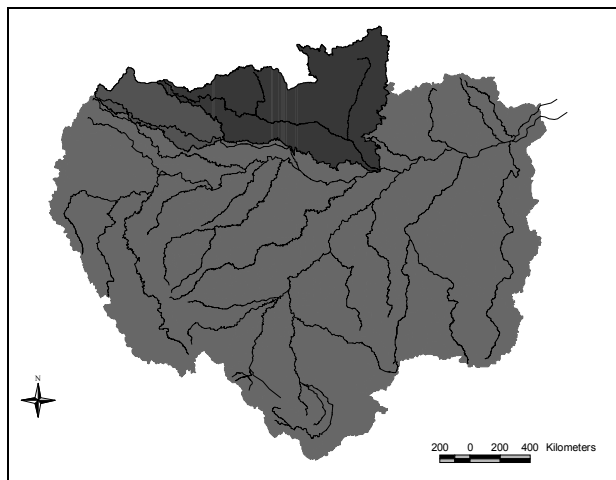


Figura 1. Cuencas del río Negro (parte superior derecha) y río Caquetá (parte superior izquierda) dentro de la Cuenca Amazónica

La cuenca del río Negro

Se ha seleccionado la parte alta de la cuenca para este estudio en razón a que de las 41 estaciones hidrométricas distribuidas sobre toda la superficie, sólo 10 han sido aforadas regularmente y regis-

tran series completas de niveles de agua y caudal. En esta parte de la cuenca el río Negro recorre aproximadamente 500 km desde la estación de Cucui hasta la de Serrinha. Sobre esta misma zona, el principal afluente del río Negro es el río Vaupés con más de 700 km de recorrido desde su inicio en el departamento del Vaupés, en Colombia, hasta su confluencia con el negro. Los caudales medidos en la estación de Serrinha varían entre 3.000 y 33.000 m³/s dependiendo la época del año, de los cuales un 13% en promedio son aportados por el Vaupés (León *et ál.*, 2006).

La cuenca del río Caquetá

Treinta y dos estaciones hidrométricas pertenecientes al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios del Medio Ambiente en Colombia (Ideam), están localizadas sobre el cauce principal del Caquetá. Sin embargo, sólo seis de estas estaciones se encuentran actualmente en funcionamiento, las otras fueron abandonadas después de 1980 por razones económicas y sociales. Para el caso particular del Caquetá, el estudio consideró la zona del cauce principal comprendida entre las estaciones de Guaquirá y Villa Betancourt (aproximadamente 750 km de longitud).

Información altimétrica

Para este estudio se han considerado dos fuentes de datos: aquellos provenientes por las misiones T/P y Envisat (Figura 2). La descripción técnica de ambas misiones son ampliamente descritas por Frappart *et ál.* (2006) y Mercier (2001), entre otros.

Datos de la Misión T/P

Concebida y puesta en órbita por la NASA y el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES), T/P fue lanzado en agosto de 1992 con una órbita inclinada a 66° sobre el Ecuador y una altitud de 1.336 km. Dichas características hacen que T/P presente una repetitividad de 10 días y genere espacios intertrazas de 315 km sobre las regiones ecuatoriales. Los datos utilizados en este estudio fueron extraídos de la base de datos (GDR-Ms) disponible en los archivos del sistema Aviso (*Archiving Validation and Interpretation of Satellite Data in Oceanography*) del CNES (Aviso, 1996). La colección de medidas altimétricas disponibles en esta base de datos consiste en registros tomados a 1/10s. Este intervalo corresponde, sobre la superficie terrestre, a una distancia de 596 m entre eco y eco.

Datos de la Misión Envisat

Puesto en órbita en marzo de 2002, Envisat presenta características de orbitografía muy diferentes a T/P. Inclinado a 82,4° sobre el Ecuador y a 800 km de altitud, esta misión toma datos sobre una misma zona con repetitividad de 35 días, pero con espacios intertrazas de tan solo 85 km de distancia (Figura 2).

Los datos de Envisat utilizados fueron descargados del sitio ftp de la ESA (acceso por intranet). Los datos consisten en ecos radar tomados a 1/20 s, lo que corresponde a una distancia de 370 m entre eco y eco. De la misma forma, los datos están referenciados sobre el elipsoide WGS84.

Definición de estaciones virtuales

En este estudio la selección de estaciones virtuales reposa sobre la metodología descrita por León (2006). Dicha metodología propone inicialmente una selección geográfica de los datos altimétricos, representados en un SIG, y utilizando como base de referencia imágenes satelitales debidamente georreferenciadas. Normalmente las imágenes satelitales permiten seleccionar con buena precisión los datos que se encuentran exclusivamente sobre los planos de a-

gua a estudiar. Este procedimiento ayuda a minimizar considerablemente las señales altimétricas provenientes de las superficies aledañas a dichos planos que, en caso de ser consideradas como parte del conjunto de datos que conforman la estación virtual, producirían ruido sobre la serie altimétrica final. En este caso se ha utilizado un mosaico de imágenes JERS de los periodos comprendidos entre septiembre y diciembre de 1995, y de marzo a abril de 1996.

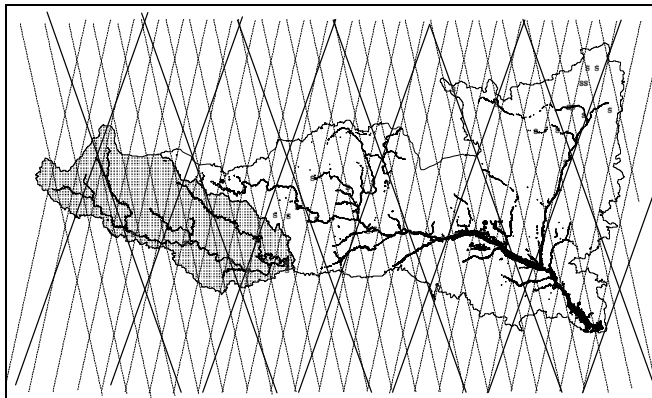


Figura 2. Órbitas sobre la superficie terrestre de las misiones T/P (líneas continuas) y ENVISAT (líneas tenuas) en la zona de estudio. Los puntos corresponden a hidrométricas de la ANA (río Negro) y el IDEAM (Caquetá)

Obtención de series altimétricas

Una vez las estaciones virtuales han sido definidas, se toma de cada una de ellas el conjunto de datos altimétricos que la conforman. La totalidad de los datos utilizados han sido previamente sometidos a una serie de correcciones de propagación y correcciones geofísicas mencionadas anteriormente y descritas en detalle por (Mercier, 2001; Frappart, 2006).

La tarea consiste entonces en obtener para el conjunto de datos de cada estación virtual el promedio diario de las medidas altimétricas. Para los periodos considerados en este estudio, una estación virtual Envisat puede contener alrededor de nueve datos diarios, mientras que para T/P no es posible encontrar más de tres datos por día. Esta diferencia es el resultado de las características de órbita y de barrido de cada satélite descritas anteriormente. Una vez se obtienen datos diarios de los niveles de agua, es posible definir las series temporales para cada estación virtual.

Validación de las series altimétricas

Una de las metodologías propuestas por León *et ál.* (2006) para evaluar la calidad de las series temporales obtenidas en estaciones virtuales consiste en comparar las series altimétricas con series temporales de los niveles medios diarios del nivel del agua registrados *insitu*. El caso ideal para este tipo de comparación sucede cuando la estación virtual y la estación hidrométrica se encuentran sobre la misma posición geográfica, caso para el cual la validación es inmediata al superponer los dos conjuntos de datos. Sin embargo, teniendo en cuenta la resolución espacial de las misiones satelitales, difícilmente una estación virtual y una estación hidrométrica coincidirán sobre un mismo punto geográfico. Este hecho limita considerablemente el proceso de validación para la gran mayoría de las series altimétricas obtenidas en estaciones virtuales. El proceso de validación aquí propuesto se concentra entonces sobre aquellas estaciones virtuales que crucen justo sobre una estación hidrométrica de la ANA o del Ideam, o en su defecto, que se encuentren lo suficientemente cercanas a estas de tal forma que la validación no se vea afectada por cambios bruscos de ciertas varia-

bles tales como variaciones de pendiente, cambios en la sección transversal, afluentes que convergen o zonas de inundación.

Para el caso del río Negro, los datos utilizados para este proceso de validación corresponden a las medidas de los niveles de agua registradas en las estaciones *insitu* de ANA entre los años 1982 y 2004. Estos datos, junto con registros periódicos de área de la sección transversal, ancho de la sección, velocidad del flujo y profundidad del cauce, están disponibles en el sitio web de la ANA (Hidroweb, 2006).

Por otra parte, para las estaciones consideradas sobre la cuenca del Caquetá, se han considerado los registros diarios de niveles del agua desde 1995 a diciembre de 2000. Para los años anteriores y posteriores a este periodo las series son muy incompletas. Una excepción es la estación de Villa Betancourt, situada a la salida de la cuenca, para la cual se tienen registros completos desde 1980 hasta 2004. De la misma manera, el Ideam ha realizado los levantamientos periódicos de área de la sección transversal, velocidad del flujo y profundidad del cauce usando el moliente. Esta información está disponible únicamente en las bases de datos físicas del Ideam en la Ciudad de Bogotá (Colombia).

Resultados y discusión

Las estaciones virtuales

Las Figuras 3 y 4 muestran las estaciones virtuales que se han podido definir sobre las cuencas de los ríos Negro y Caquetá, respectivamente, siguiendo la metodología propuesta por León *et ál.* (2008). Para el primer caso se han encontrado 20 estaciones: 3 T/P y 18 Envisat. Por el contrario, para el cauce principal del Caquetá se han podido definir sólo 12 estaciones, de las cuales apenas 1 proviene de datos registrados por T/P. El hecho de encontrar más estaciones virtuales Envisat que de T/P radica en la resolución espacial que posee cada una de las misiones (Figura 2).

Series altimétricas de los niveles superficiales del agua

Teniendo en cuenta la definición de estación virtual dada al inicio de este documento, para cada una de las secciones mostradas en las Figuras 3 y 4, se han deducido las series que representan la variación de la altitud de la superficie libre del agua en el tiempo. La Figura 5 presenta varios ejemplos de las series temporales altimétricas encontradas para algunas estaciones virtuales sobre el cauce principal del río negro.

La primera diferencia que resulta evidente sobre las series obtenidas, es el número de ciclos hidrológicos posibles de deducir a partir de datos provenientes de T/P, frente a aquellos representados a partir de datos Envisat. En efecto, esta diferencia es el resultado tanto de la duración de cada una de las misiones (10 años para T/P y sólo 2 ó 3 años para Envisat), como de la resolución temporal de cada una de ellas (10 días para T/P y 35 para Envisat).

Para todas las estaciones encontradas sobre cada uno de los cauces estudiados ha sido posible definir características como: el nombre de la estación, la posición geográfica, el nombre de la corriente sobre la que se encuentran, la misión que ha adquirido los datos, el ancho de la sección que cada estación presenta en periodos de invierno y sequía, la estación *insitu* más cercana y la distancia que las separa.

Validación de las series

El proceso de validación ha sido realizado para aquellas series altimétricas cuya estación virtual se encuentra ocupando la misma

posición geográfica que una estación hidrométrica de la ANA o del IDEAM según sea el caso para el río Negro o el Caquetá, respectivamente. Adicional a ello, se ha considerado una validación para series altimétricas donde la estación virtual que representen se encuentra relativamente cerca (<15 km) de una estación *in-situ*, teniendo en cuenta que sobre esta distancia no existan cambios bruscos de sección o de pendientes, aportes de afluentes, zonas de inundación, o en general, alguna característica que pueda incidir directamente sobre los niveles del agua.

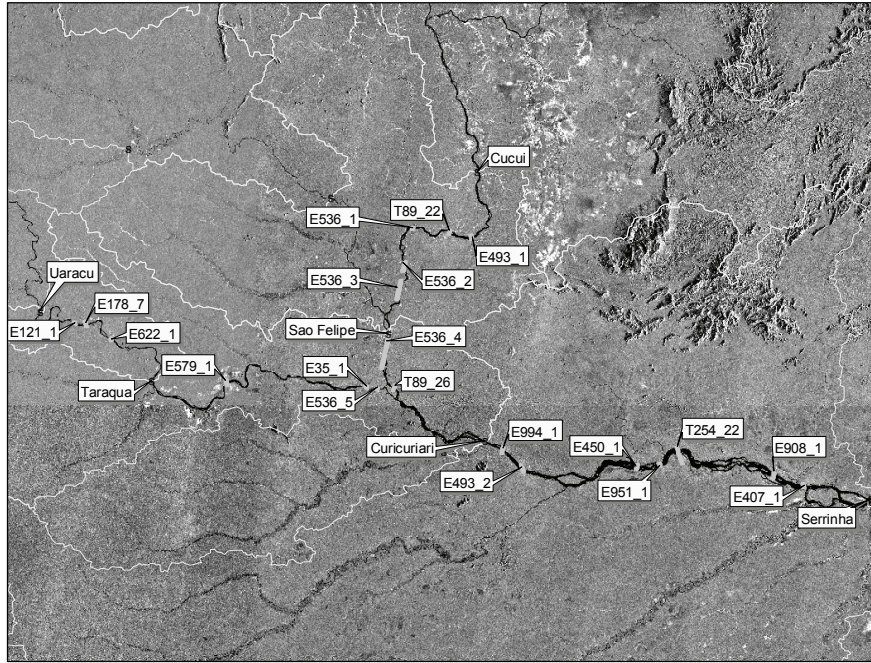


Figura 3. Estaciones virtuales sobre el cauce principal del río Negro y del Vaupés

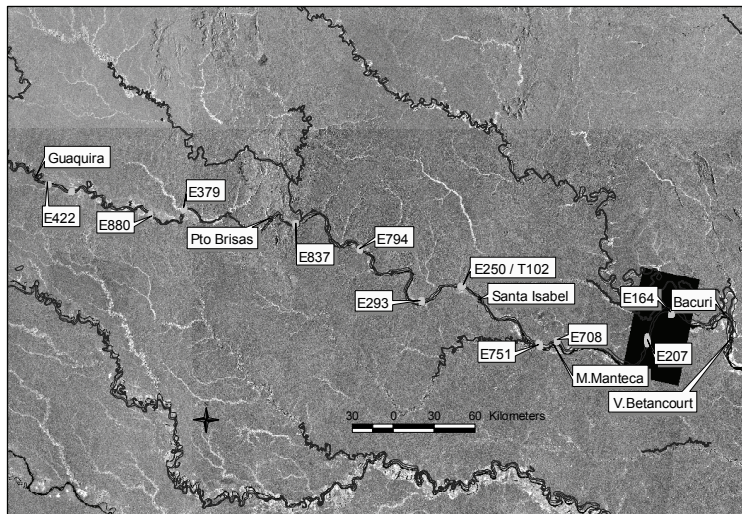


Figura 4. Estaciones virtuales sobre el cauce principal del río Caquetá

En este sentido, sólo las estaciones referenciadas en la Tabla 1 han sido consideradas en este proceso de validación, esperando que estos resultados obtenidos sean representativos para el resto de las estaciones sobre las cuales no fue posible aplicar el método de validación propuesto. La misma tabla sintetiza las estimaciones de los errores entre ambas series (virtual e *in-situ*) expresados a través de la raíz cuadrada de los errores medios cuadráticos (rmse). La Figura 6 pone en evidencia las diferencias de precisión existentes entre

las series altimétricas y las de alturas de nivel del agua registradas en estaciones de la ANA y el Ideam sobre los ríos Negro y Caquetá, respectivamente. Estas diferencias están ligadas principalmente al contraste de las características físicas y topográficas que presenta cada una de las zonas estudiadas. En efecto, varios autores (Birkett et al., 1999; Birkett, 2000; Cazenave et al., 1997; Cudlip et al., 1992; De Oliveira et al., 2001; Kosuth y Cazenave, 2001) sugieren que, en medio continental, las misiones radar son afectadas por la topografía, la vegetación, las zonas cubiertas de hielo y el ancho de la sección transversal misma, la cual no debería ser inferior a 1 km.

Para las series validadas sobre el río Negro se encontraron precisiones medias de $\pm 22,5$ cm sobre los niveles superficiales del agua. Para el caso del río Caquetá, por las razones presentadas anteriormente, las precisiones sobre las series altimétricas son mucho más bajas, resultando variaciones medias de $\pm 40,5$ cm entre dichas series y los registros *in-situ*.

Conclusiones

Si bien las principales misiones de altimetría radar por satélite tienen como objetivo fundamental el monitoreo de los océanos, la explotación de los datos provenientes de tales misiones comienzan a tener gran interés en dominio continental, en especial, para la densificación de las redes de monitoreo hidrológicas nacionales gracias a la introducción de estaciones virtuales. Dichas estaciones virtuales presentan un aporte mayor en el dominio de la hidrología al procurar información que representa la variación temporal de los niveles de cuerpos de agua continentales. Es muy probable que la aplicación de esta tecnología para la estimación confiable de variables hidrológicas durante los procesos de modelación encuentre sus mayores dificultades en la precisión obtenida a partir de las series altimétricas. Sin embargo, a pesar de todas sus limitaciones, es necesario resaltar que precisiones de ± 22 cm para cauces cuyo ancho de sección es superior a 600 m y ± 40 cm para anchos entre 200 m y 500 m, sobre las series altimétricas, al menos de Envisat, pueden resultar bastante interesantes si se tiene en cuenta que el origen de la información proviene del espacio y sufre múltiples manipulaciones tanto a bordo del satélite mismo como en tierra, antes de ser utilizados como datos explotables en hidrología.

En este sentido los datos altimétricos registrados por radares a bordo de satélites presentan actualmente aplicaciones muy interesantes en el campo de la hidrología, tal como lo es la comprensión global de los comportamientos de los regímenes hidrológicos de una cuenca, aportando, entre otras cosas, información sobre lugares que son físicamente inaccesibles o donde, por uno u otro motivo, las estaciones *in-situ* han sido abandonadas. Este artículo se ha concentrado en presentar uno de los aportes fundamentales de la altimetría radar por satélite, la definición de estaciones virtuales sobre los cauces principales del río Negro y el río Caquetá; y cuyas series temporales representan la variación de los niveles superficiales de estos cuerpos de agua, en especial, sobre lugares donde no existen estaciones hidrométricas.

Tabla 1. Resultados de la validación de series altimétricas

Estación virtual	Estación hidrométrica	Corriente	Distancia entre estaciones (km)	Periodo de comparación	Rmse (cm)
E536_4	Sao Felipe	Río Negro	0	10/02-06/04	31
E994_1	Curicurari	Río Negro	12,4	11/02-07/04	14
E708	María Manteca	Caquetá	2,4	10/02-02/04	80
E751	María Manteca	Caquetá	11,1	10/02-04/04	1,1

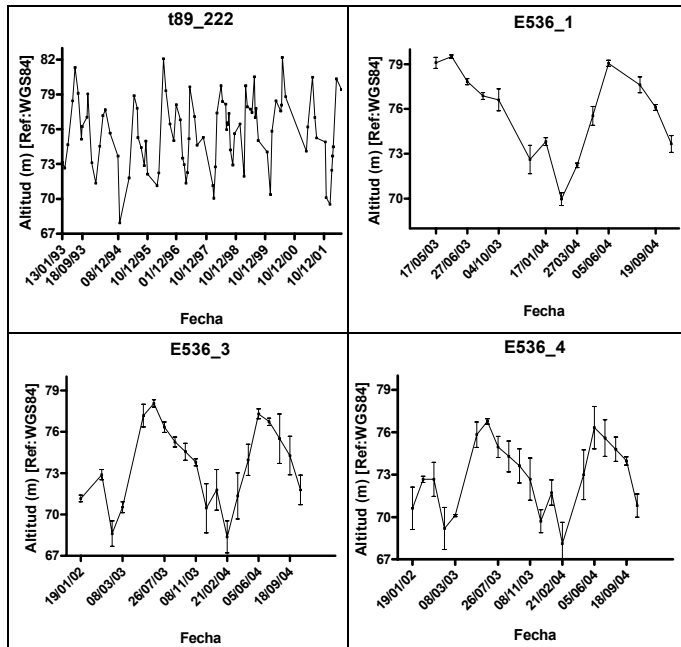


Figura 5. Series temporales altimétricas de algunas estaciones virtuales sobre el río Negro

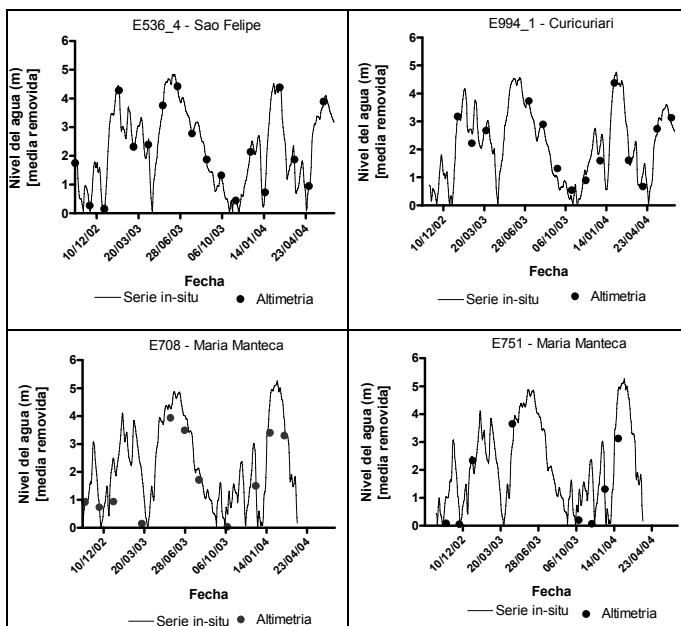


Figura 6. Series de datos altimétricos superpuestos a series temporales de registros in-situ para el proceso de validación

Bibliografía

AVISO User Handbook., Merged TOPEX/Poseidon Products (GDR-Ms)., 3a Edición, AVI-NT-02-101-CN, Toulouse, 1996.

Birkett, C. M., The contribution of Topex/Poseidon to the global monitoring of climatically sensitive lakes., *J. Geophys. Res.*, 100 (C12), 199, pp. 525179-25204.

Birkett, C. M., Murtugudde, R., Allan, T., Indian Ocean climate event brings floods to east Africa's lakes and the Sudd Marsh., *Geophys. Res. Lett.*, 26, 1999, pp. 1031-1034.

Birkett, C. M., Synergistic remote sensing of Lake Chad: Variability of basin inundation., *Remote Sensing of Environment*, 72, 2000, pp. 218-236.

Cazenave, A., Bonnefond, P., DoMinh, K., Caspian sea level from Topex/Poseidon altimetry: level now falling., *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1997, pp. 881-884.

Cudlip, W., Ridley, J. K., Rapley, C. G., The use of satellite radar altimetry for monitoring wetlands., In: *Remote Sensing and Global Change (Proc. 16th Annual Conf. Remote Sensing Society, London, UK)*. 1992, pp. 207-216.

De Oliveira Campos, I., Mercier, F., Maheu, C., Cochonneau, G., Kosuth, P., Blitzkow, D., Cazenave, A., Temporal variations of river basin waters from Topex/Poseidon satellite altimetry. Application to the Amazon basin., *C.R. Acad. Sci. Paris*, 333, 2001, pp. 633-643.

Frappart, F., Calmant, S., Cauhope, M., Seyler, F., Cazenave, A., Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon Basin., *Remote Sens. Environ*, 100 (2), 2006, pp. 252-264.

Hidroweb ANA., <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Consultada: 01/08/2006.

Kosuth, P., Cazenave A., Développement de l'altimétrie satellitaire radar pour le suivi hydrologique des plans d'eau continentaux: application au réseau hydrographique de l'Amazonie., *Reporte, Projet PNTS 00 / 0031/ INSU Reporte de actividades 2000-2001*, 39pp.

Kouraev, A. V., Zakharovab, E., Samainc, O., Mognarda, N., Cazenave, A., Ob' river discharge from TOPEX/Poseidon satellite altimetry (1992-2002)., *Remote Sensing of Environment*, 93, 2004, pp. 238- 245

Leon, J. G., Utilisation conjointe de l'altimétrie spatiale et de la mesure in-situ pour la régionalisation du débit dans le Bassin Versant du Rio Negro., *Tesis Doctoral*. Universidad de Toulouse III, 2006, 165pp.

Leon, J. G., Calmant, S., Seyler, F., Bonnet, M.P., Cauhope, M., Frappart, F., Filizola, N., Rating curves and estimation of average water depth at the Upper Negro River based on satellite altimeter data and modelled discharges., *J. of Hydrology*, 328, 2006, pp. 481-496.

Leon, J. G., Duque, J., Dominguez, E., Avances más Recientes Sobre la Aplicación de la Altimetría Radar por Satélite en Hidrología. Caso Particular de la Cuenca Amazónica Colombiana y Brasileira., *Revista Ing. Investig.*, in press, 2008.

Mercier, F., Altimétrie spatiale sur les eaux continentales: apport des missions Topex/Poseidon et ERS1&2 à l'étude des lacs, mers

- intérieures et bassins fluviaux., Tesis doctoral de la Univ. Toulouse III-Paul Sabatier, 9/11/2001, 190pp.
- Mercier, F., Cazenave, A., Maheu C., Interannual lake level fluctuations (1993-1999) in Africa from Topex/Poseidon: connections with ocean-atmosphere interactions over the Indian ocean., *Global and Planetary Changes*, 32, 2002, pp. 141-163.
- Morris, C. S., Gill, S.K., Variation of great lakes waters from Geosat altimetry., *Water Resour. Res.*, 30, 1994a, pp. 1009-1017.
- Morris, C. S. Gill, S. K., Evaluation of the Topex/Poseidon altimeter system over the great Lakes., *J. Geophys. Res.*, 99 (C12), 1994b., pp. 24527-24539.
- Organización Meteorológica Mundial., Guía de prácticas hidrológicas., Quinta edición, OMM No 168, 1994, pp. 147-173.