

En español

Estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat sobre el cauce principal del río Orinoco

Juan León¹, Frederique Seyler², Astrid Puerta³

RESUMEN

La estimación de curvas de gasto (relación altura-caudal) para las estaciones hidrométricas que representan las secciones transversales de un río es una de las tareas fundamentales de la hidrometría, ya que estas permiten, entre otras cosas, la deducción de los caudales medios diarios del río sobre esas secciones. Dicha información es fundamental para cualquier tentativa de modelación hidrológica; sin embargo, la disminución de estaciones de control para el monitoreo hidrológico sobre grandes cuencas es patente a nivel mundial. Desde hace cinco años diferentes estudios en hidrología espacial han demostrado que la altimetría radar por satélite permite densificar la información disponible sobre las redes de monitoreo hidrológico gracias a la introducción de las llamadas estaciones virtuales y que la utilización conjunta de esta información, junto con registros de caudales medidos *in situ* implican la estimación de curvas de gasto en las nombradas estaciones.

Este estudio presenta las curvas de gasto deducidas para cuatro estaciones virtuales Envisat sobre el cauce principal del río Orinoco. Los caudales en las estaciones virtuales fueron estimados aplicando el modelo 1D de Muskingum-Cunge. Los errores entre caudales medidos y estimados son inferiores al 1%. Se ha aplicado una metodología que permite deducir la profundidad media del flujo cero, la cual en este caso nos ha llevado a encontrar profundidades que varían entre once y veinte metros a lo largo de los 130 km del río Orinoco representados por las estaciones virtuales consideradas.

Palabras clave: altimetría radar, monitoreo hidrológico, estaciones virtuales, curvas de gasto, cuenca del Orinoco.

Recibido: marzo 5 de 2010

Aceptado: noviembre 24 de 2010

Introducción

Las curvas de calibración, o de gasto, son herramientas hidrológicas que ponen en evidencia la relación que existe entre una cota del nivel del agua y el caudal correspondiente a dicha cota para una sección dada de un río. Expresadas de forma general como una ley potencial, las curvas de gasto son utilizadas para deducir caudales medios diarios a partir de registros *in situ* de niveles

In English

Rating curve estimation using Envisat virtual stations on the main Orinoco river

Juan León¹, Frederique Seyler², Astrid Puerta³

ABSTRACT

Rating curve estimation (height-stream relation) made by hydrometric stations representing cross-sections of a river is one of hydrometrics' fundamental tasks due to the fact that it leads to deducing a river's average daily flow on that particular section. This information is fundamental in any attempt at hydrological modelling. However, the number of hydrological control stations monitoring large hydrological basins has been reduced worldwide. Space hydrology studies during the last five years have shown that satellite radar altimetry means that hydrological monitoring networks' available information can be densified due to the introduction of so-called virtual stations and the joint use of such information along with *in-situ* measured flow records for estimating expenditure curves at these stations.

This study presents the rating curves for 4 Envisat virtual stations located on the main stream of the Orinoco River. Virtual stations' flows were estimated by using the Muskingum-Cunge 1D model. There was less than 1% error between measured and estimated flows. The methodology led to reducing average zero flow depth; in this case, it led to depths ranging from 11 to 20 meters being found along the 130 km of the Orinoco River represented by the virtual stations being considered.

Keywords: biogas, oxygen enrichment, greenhouse gas, combustion property.

Received: March 5th 2010

Accepted: November 24th 2010

Introduction

Calibration or rating curves are hydrological tools which highlight the existing relationship between water level and the flow rate corresponding to that height for a given section of a river. Rating curves which are usually expressed as a power law are used to reduce average daily flows from daily water levels' on-site records taken from each station's gauges. The calibrated relation-

¹ Doctor, Universidad de Toulouse. Profesor, Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. jgleonh@gmail.com

² Doctor, Universidad de París. Institute de Recherche pour le Développement - IRD., Francia. frederique.seyler@ird.fr

³ Ingeniera Ambiental, Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia. astridpuertam@gmail.com

⁴ Ph.D., Universidad de Toulouse. Professor, Universidad Nacional de Colombia - Palmira. jgleonh@gmail.com

⁵ Ph.D., Universidad de París. Institute de Recherche pour le Développement - IRD., France. frederique.seyler@ird.fr

⁶ Environmental Engineering, Master Student in Environmental Engineering, Universidad Nacional de Colombia—Palmira. astridpuertam@gmail.com

En español

diarios del agua tomados sobre las escalas limnimétricas de cada estación. La relación calibrada entre ambas variables es deducida a partir de pares de datos altura-caudal obtenidos mediante una práctica que se conoce como aforo (OMM, 1994). La precisión de la estimación de los caudales diarios es función de la calidad de esta relación obtenida para la sección, que a su vez depende, en consecuencia, del número de aforos realizados. Sin embargo, la disminución de estaciones hidrométricas que permiten monitorear el comportamiento hidrológico de una cuenca es mundial (Vörösmarty *et al.*, 1999; Espinoza, 2009). Este problema se evidencia aún más en los países en vías de desarrollo, donde la falta de presupuesto en las agencias administradoras de las redes hidrométricas dificulta, no solo la instalación de nuevas estaciones, sino que afecta también el mantenimiento y gestión de las estaciones en funcionamiento. Esta problemática sugiere entonces la necesidad de recurrir a nuevas herramientas y tecnologías que permitan apoyar los actuales sistemas de monitoreo de aguas superficiales continentales brindando complemento y continuación a las medidas registradas *in situ*, además de procurar una densificación de las redes de control mismas.

Varios estudios (Brooks, 1982; Morris y Gill, 1994; Mercier *et al.*, 2002; Frappart *et al.*, 2006; Cretaux y Birkett, 2006; León *et al.*, 2009a, entre muchos otros) han demostrado las ventajas que presenta la altimetría radar por satélite para medir las variaciones de los niveles del agua en medio continental. Tales estudios, además de presentar una revisión bibliográfica detallada sobre esta tecnología muestran cómo sus aplicaciones, no solo tienen que ver con la precisión ligada a los datos registrados, sino además con su capacidad de medir los niveles instantáneos de cuerpos de agua con resoluciones espaciales y temporales bastante aceptables. Dichas mediciones permiten definir lo que se conoce como estaciones virtuales. Se le denomina estación virtual a toda intersección que existe entre el barrido de un satélite y un plano de agua continental, sobre la cual los datos registrados permiten deducir una serie temporal que representa la variación de los niveles superficiales del agua (León *et al.*, 2008). Particularmente para Colombia se ha desarrollado ALTICO (Altimetría para COlombia) (León *et al.*, 2009b), una base de datos que contiene 548 estaciones virtuales Envisat sobre toda la red hidrológica de Colombia, incluyendo ríos principales y secundarios, lagos, represas y zonas de inundación.

Hace cerca de tres años León *et al.* (2006) desarrollaron y validaron una metodología que permite la estimación de curvas de gasto en estaciones virtuales Envisat y Topex/Poseidon. Dicha metodología permite relacionar series temporales de niveles del agua registrados por el satélite y caudales medidos o estimados en las estaciones virtuales, lo que en otras palabras significa la estimación de curvas de gasto en esas estaciones virtuales.

El objetivo de este estudio es aplicar la metodología presentada por León *et al.* (2006) con el fin de obtener curvas de gasto para algunas estaciones virtuales Envisat reportadas por León *et al.* (en revisión) en la cuenca del Orinoco colombiano.

Materiales y métodos

Zona de estudio

La cuenca del Orinoco tiene una superficie aproximada de 1.015.000 km², de los cuales unos 640.000 km² corresponden al territorio venezolano, representando aproximadamente el 65%

In English

ship between both variables is deducted from pairs of stage-discharge data obtained by gauging (WMO, 1994). The accuracy of the estimated daily flows is related to the quality of this ratio obtained for a particular section, in turn, depending on the number of gaugings made. However, the number of hydrometrical stations monitoring a basin's hydrological behaviour worldwide has become reduced (Vörösmarty *et al.*, 1999; Espinoza, 2009).

This problem is even more evident in developing countries where hydrometric networks' management agencies' lack of budget hampers the installation of new stations and affects operating station maintenance and management. This then suggests the need for new tools and technologies to support continental surface waters' ongoing monitoring systems by providing support and continuation for measurements recorded *in-situ*, in addition to seeking densification of such control networks.

Several studies (Brooks, 1982; Morris and Gill, 1994; Mercier *et al.*, 2002; Frappart *et al.*, 2006; Créaux and Birkett, 2006; Leon *et al.*, 2009a) have shown the advantages of satellite radar altimetry in measuring changes in continental water levels. Such studies, besides presenting a detailed literature review regarding this technology, have shown how its application not only has to do with precision linked to records but also with its ability to measure instantaneous levels of water bodies, having quite acceptable spatial and time resolutions. These measurements lead to defining what are known as virtual stations, this being any intersection between satellite scanning and a continental water plan on which the recorded data infer a time series representing surface water level variations (León *et al.*, 2008).

Altimetry for Colombia (ALTICO) has been particularly developed for this country (León *et al.*, 2009b). It is a database containing 548 ENVISAT virtual stations concerning Colombia's entire hydrological network, including major and minor rivers, lakes, dams and flood areas.

About three years ago, Leon *et al.*, (2006) developed and validated a methodology for estimating Envisat and Topex/Poseidon virtual stations' expenditure curves. Such methodology allows relating time series of water levels recorded by a satellite and measured or estimated flows in the virtual stations, in other words meaning estimating rating curves at these virtual stations.

This study was aimed at applying Leon *et al.*'s 2006 methodology for obtaining cost curves regarding some Envisat virtual stations reported by Leon *et al.*, (In revision) in the Colombian Orinoco basin.

Material and method

Study area

The Orinoco basin has an area of around 1,015,000 km², of which about 640,000 km² belong to Venezuela (63% of the lower Orinoco basin). Surface runoff drains from the Andes, the

En español

In English

de la cuenca baja del Orinoco. Drenando escorrentías superficiales desde los Andes, las cuencas alta y media se ubican en territorio colombiano (figura 1). Con una extensión aproximada de 1.783 km el Orinoco es el segundo río más caudaloso de Suramérica, después del Amazonas, y tercero en el mundo (el Congo es el segundo). El río Orinoco y sus afluentes son el mayor sistema de drenaje natural superficial del este colombiano, en la zona conocida como Llanos Orientales. Los afluentes más importantes sobre dicha zona son los ríos Meta, Guaviare, Inirida y Vichada, cuya contribución ha sido estimada en aproximadamente 15.000 m³/s, representando casi el 50% del caudal total del Orinoco al océano Atlántico.

upper and middle Orinoco basins in Colombia (Figure 1). The Orinoco River's 1,783 km length makes it the second largest river in South-America after the Amazon and the third longest in the world after the Congo. The Orinoco River and its tributaries represent the largest natural surface drainage system in eastern Colombia, in an area known as the Eastern Plains. The most important tributaries of the area are the Meta, Guaviare, Inirida and Vichada Rivers. Their overall contribution has been estimated at around 15,000 m³/s, accounting for nearly 50% of the Orinoco River's total flow to the Atlantic Ocean.



Figura 1. Cuenca alta y media del Orinoco, territorio colombiano.

Figure 1. The Orinoco River's upper and middle basins in Colombian

Descripción de la información altimétrica e in situ

Las estaciones virtuales que serán utilizadas en este estudio han sido extraídas de ALTICO, una base de datos desarrollada por la Universidad Nacional de Colombia (Sede Palmira) que contiene cerca de 550 estaciones virtuales Envista ubicadas sobre los principales cauces, lagos, represas y zonas de inundación de Colombia (León *et al.*, 2009b). Dichas estaciones virtuales presentan, entonces, series temporales respecto a la variación de los niveles en la superficie libre del agua durante un período comprendido entre el 2002 (fecha de inicio de la misión) y el 2008 (fecha para la cual se tienen registros actualizados de la misión que funciona actualmente), con registro de una medida cada 35 días (León *et al.*, 2008).

Desarrollada completamente en Microsoft Access®, ALTICO ha sido diseñada con una única estructura tabular que organiza la totalidad de las estaciones virtuales disponibles para Colombia, presentando para cada una de ellas: número de la estación, cuerpo de agua al que pertenece (río, lago, zona inundada, ciénaga), número de la traza satelital, nombre de la estación, coordenadas geográficas, vínculos para la visualización rápida de la estación, vínculo para acceder a los datos que forman la serie temporal y vínculo para visualización de la estación en Google Earth®.

Sobre la cuenca del Orinoco ALTICO presenta 120 estaciones virtuales, de las cuales 78 se encuentran en los principales cauces de la cuenca: 18 en el Guaviare, 17 en el Meta, 15 en el Inirida, 9 en el Orinoco, 8 en el Vichada, 6 en el Arauca y 5 en el río Casanare (León *et al.*, en revisión), estaciones que se pre-

In-situ and altimetric information

The virtual stations used in this study were drawn from ALTICO, a database developed by the Universidad Nacional de Colombia in Palmira, containing about 550 Envisat virtual stations located on major Colombian waterways, lakes, dams and flood areas (Leon *et al.*, 2009b). These virtual stations show time series regarding the variation in free surface water levels for a period between 2002 (mission start date) and 2008 (the date for which records were updated for the currently operating mission), measurement records being taken every 35 days (Leon *et al.*, 2008).

ALTICO, developed entirely in Microsoft Access, has been designed to have a single tabular structure organising all the available virtual stations in Colombia, giving the following data for each one: station number, body of water to which it belongs to (river, lake, flood area, swamp ..), satellite trace number, station name, geographical coordinates, links for quick viewing of the station, link to access the data forming the time series and link to visualising the station on Google Earth.

ALTICO stores data for 120 virtual stations in the Orinoco basin, 78 of which are located on the river basin's main channels, 18 on the Guaviare River, 17 on the Meta River, 15 on the Inirida River, 9 on the Orinoco River, 8 on the Vichada River, 6 on the Arauca River and 5 on the Casanare River (Leon *et al.*, in re-

sentan como identificadores blancos en la figura 1. Con el fin de evaluar el nivel de precisión de las series alimétricas se aplicó la metodología propuesta por León *et al.* (2006) que sugiere estimar la raíz media cuadrática (RMS) entre las series virtuales y la serie *in situ* más cercana. Lógicamente este proceso solo es válido cuando la estación virtual se encuentra sobre una estación *in situ* o, en su defecto, a poca distancia y cuya sección no se encuentre afectada por cambios hidráulicos bruscos (León *et al.*, 2008). Aplicando este método se lograron validar cerca de 20 estaciones virtuales sobre la cuenca del Orinoco con valores de RMS cercanos a 45 ± 14 cm (León *et al.*, en revisión).

Por su parte, la información *in situ* fue proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). La figura 1 muestra las 64 estaciones de control hidrométrico disponibles para la zona de estudio (puntos en gris oscuro). Sin embargo, de estas 64 estaciones, únicamente 34 se encuentran registrando niveles diarios de agua sobre los cauces principales de la cuenca y solo 22 de ellas tienen registros de caudales medios diarios entre el 2002 y el 2003. Ninguna estación tiene registros completos de caudales entre el 2002 y el 2008, período para el cual se tiene disponibilidad de registros actualizados de Envisat. La tabla 1 sintetiza la disponibilidad de la información sobre los cauces principales de la cuenca del Orinoco.

view). These stations are presented as white identifiers in Figure 1. The methodology proposed by León *et al.*, (2006) was applied to assess altimetry series' level of precision which involved estimating the root mean square (RMS) between the virtual series and nearest *in-situ* series. Logically, this process is only valid when the virtual station is on an *in-situ* station or, alternatively, at a short distance within a section which is not affected by abrupt hydraulic changes (León *et al.*, 2008). This method led to validating 20 virtual stations on the Orinoco basin, having RMS values close to 45 ± 14 cm (León *et al.*, in review)

Meanwhile, *in-situ* information was provided by the Institute of Hydrology and Environmental Meteorology and Environmental Studies in Colombia (IDEAM). Figure 1 shows the 64 hydrometric monitoring stations available for the study area (dark gray points). However, only 34 of the 64 stations are recording daily water levels regarding the basin's main channels. Only 22 of them have average daily flow records for 2002 and 2003. No stations have complete records of flows between 2002 and 2008, the period for which updated records are available at Envisat. Table 1 summarises the availability of information regarding the Orinoco Basin's main channels.

Río	Total de estaciones in situ (con niveles)	Total de estaciones in situ (con caudales)	Período disponible para niveles	Período disponible para caudales	Estaciones virtuales sobre el río	Número de estaciones visuales entre dos in situ*
Arauca	5	4	2002-2005	2002-2005	6	2
Meta	14	7	2002-2003	2002-2003	17	12
Orinoco	5	2	2002-2003	2003	9	4
Guaviare	8	7	2003	2003	18	17
Vichada	1	1	2003	2003	8	0
Inírida	1	1	2002-2003	2002-2003	13	0

Tabla 1. Características de la información in situ.

*Únicamente estas estaciones pueden ser consideradas para obtener curvas de gasto mediante la aplicación del modelo que permita la propagación de los caudales de las estaciones *in situ* a las estaciones virtuales.

River	Total in-situ stations (with levels)	Total in-situ stations (with flows)	Available term for levels	Available term for flows	Virtual stations on the river	Number of visual stations between two in-situ stations*
Arauca	5	4	2002-2005	2002-2005	6	2
Meta	14	7	2002-2003	2002-2003	17	12
Orinoco	5	2	2002-2003	2003	9	4
Guaviare	8	7	2003	2003	18	17
Vichada	1	1	2003	2003	8	0
Inírida	1	1	2002-2003	2002-2003	13	0

Table 1. In-situ information characteristics

*These stations can only be considered for obtaining rating curves by applying the model that allows the spread of the flows from the *in-situ* station to the virtual stations.

Este estudio se concentra entonces en las cuatro de las nueve estaciones presentes sobre el río Orinoco: 493Orinoco04, 493Orinoco01, 622Orinoco04 y 622Orinoco03. La razón de la selección de estas estaciones obedece a que ellas se encuentran ubicadas entre dos estaciones hidrométricas *in situ* que tienen registros completos de niveles y caudales entre el 2002 y el 2003 indispensables para la aplicación del modelo hidrológico y la consecuente estimación de curvas de gasto sobre las secciones que ellas representan. La sección total considerada corresponde a aproximadamente 130 km del cauce principal del Orinoco. La tabla 2 sintetiza las características de la distribución espacial de las estaciones *in situ* y virtuales sobre la sección considerada.

Estimación de caudales

Los caudales en las estaciones virtuales se estimaron mediante la aplicación del modelo de tránsito de Mskingum-Cunge (M-C), basado en una aproximación cuasi dinámica de la propagación de la onda (Ponce *et al.*, 1996). El modelo de M-C (Cunge,

This study then focused on 4 of the 9 stations present on the Orinoco River: 493Orinoco04, 493Orinoco01, 622Orinoco04 and 622Orinoco03. The reason for selecting these stations was because they are located between two *in-situ* hydrometric stations which have complete records of levels and flows between 2002 and 2003, this being which they represent. The total section considered was about 130 km of the Orinoco's main channel. Table 2 summarises the characteristics regarding space distribution of the virtual and *in-situ* stations on the section being considered.

Flow estimation

The flows in the virtual stations were estimated by applying the Mskingum-Cunge (MC) traffic model, this being an approach based on a quasi-dynamic approximation of wave propagation (Ponce *et al.*, 1996). The MC model (Cunge, 1969) is in fact a

1969) es de hecho una versión más ajustada del modelo clásico de Muskingum, donde los bien conocidos parámetros X y K son derivados de las características hidráulicas de una sección considerada: pendiente de la sección, ancho del canal, velocidad de la onda y longitud de la sección (Ponce *et al.*, 1996).

version that fits the Muskingum classic model, where the well-known parameters X and K are derived from the hydraulic characteristics of a section being considered: slope in a particular section, channel width, wave speed and section length (Ponce *et al.*, 1996).

Estaciones		Distancia (km)	Río	Lat./Long.	Fuente del dato	Período disponible
Est. in-situ	Puerto Nariño (Aguas arriba)	130	Orinoco	4,93/-67,55	Ideam	2000 -2003
	Roncador (Aguas abajo)		Orinoco	5,883/-67,56	Ideam	2000 -2003
Estaciones virtuales	493Orinoco04	13*	Orinoco	5,069/-67,801	Envisat	2002-2008
	493Orinoco01	43*	Orinoco	5,277/-67,847	Envisat	2002-2008
	622Orinoco04	80*	Orinoco	5,494/-67,62	Envisat	2002-2008
	622Orinoco03	87*	Orinoco	5,555/-67,607	Envisat	2002-2008
Station		Distance (km)	River	Lat./Long.	Data source	Available period
In-situ stations	Puerto Nariño (upstream)	130	Orinoco	4,93/-67,55	IDEAM	2000 -2003
	Roncador (downstream)		Orinoco	5,883/-67,56	IDEAM	2000 -2003
Virtual station	493Orinoco04	13*	Orinoco	5,069/-67,801	ENVISAT	2002-2008
	493Orinoco01	43*	Orinoco	5,277/-67,847	ENVISAT	2002-2008
	622Orinoco04	80*	Orinoco	5,494/-67,62	ENVISAT	2002-2008
	622Orinoco03	87*	Orinoco	5,555/-67,607	ENVISAT	2002-2008

Tabla 2. Características de la distribución de estaciones virtuales entre las estaciones *in situ* consideradas en el estudio.

* Distancia medida desde la estación Puerto Nariño, ubicada aguas arriba.

Table 2. Characteristics of virtual station distribution between the *in-situ* stations considered in this study

* Distance measured from the Puerto Nariño station located upstream

Básicamente, la aplicación del modelo consiste en la propagación de los caudales medios diarios conocidos para una estación aguas arriba hacia una estación aguas abajo asumiendo que la propagación de dinámica de la onda se basa en las características hidráulicas de la sección. Esta propagación se puede hacer sobre una o varias secciones aguas abajo para las cuales las características hidráulicas ya mencionadas son conocidas. A los efectos de validación es necesario contar con una estación de caudales medios diarios conocidos aguas abajo con el fin de comparar los caudales estimados durante la propagación y los caudales medidos *in situ*. León *et al.* (2006) hacen una revisión completa del modelo de M-C y presentan de forma detallada su aplicación sobre grandes cauces para la estimación de caudales en estaciones virtuales Envisat sobre la cuenca amazónica.

La estimación del error entre el caudal estimado y el caudal medido se hace aplicando la relación de la ecuación 1; esta relación considera el error medio absoluto basado en el caudal medido de la estación *in situ* aguas abajo.

$$E_1 = \frac{|C_{cal} - C_{medido}|}{C_{medido}} \quad (1)$$

donde C_{cal} corresponde al caudal estimado mediante el modelo de M-C y C_{medido} al caudal medido diario conocido en la estación *in situ*. Para este estudio el modelo de M-C fue aplicado desde la estación de Puerto Nariño (aguas arriba) hasta la estación de Roncador (aguas abajo) propagando los caudales sobre las estaciones virtuales intermedias mencionadas en la tabla 2.

Estimación de curvas de gasto

Debido al corto período de información de caudales disponibles *in situ* (2002-2003) y a que las medidas altimétricas son tomadas cada 35 días, resulta necesario llevar a cabo un proceso de interpolación temporal que permita derivar niveles de agua medios diarios sobre las series altimétricas con el fin de obtener pares de datos altura/caudal que permitan derivar una curva de gasto más

Basically, applying the model consisted of propagating daily middle flows known for an upstream station towards a downstream station, by assuming that the propagation of wave dynamics was based on that section's hydraulic characteristics. This propagation could be done on one or more downstream sections for which the aforementioned hydraulic characteristics would already be known. For validation purposes, it was necessary to count on an average daily flow downstream to calculate estimated flow during propagation and flows measured *in-situ*. León *et al.* (2006) have made a complete revision of the MC model and presented its detailed application to large channels for the flow estimation by virtual Envisat stations in the Amazon Basin.

Estimating the error between estimated flow rate and measured flow was done by applying the ratio shown in Equation 1. This ratio considers mean absolute error based on the flow measured *in-situ* downstream of the station.

$$E_1 = \frac{|C_{cal} - C_{medido}|}{C_{medido}} \quad (1)$$

C_{cal} was estimated flow using the MC model, $C_{measured}$ was daily flow rate known at the *in-situ* station. The MC model for the station in Puerto Nariño (upstream station) to the Roncador station (station downstream) was applied for this study, spreading flows over the virtual intermediate stations listed in Table 2.

Estimated rating curves

Due to the short period regarding available *in-situ* flow data (2002-2003) and that altimetry measurements were taken every 35 days, it was necessary to make a temporal interpolation for deriving daily mean water levels regarding the altimetric series to obtain pairs of height/flow data for deriving a more accurate rating curve for each virtual station. An interpolation of temporal series methodology proposed by Roux *et al.*, (2008) was thus

En español

acertada para cada estación virtual. Con tal fin se aplicó la metodología de interpolación de series temporales propuesta por Roux *et al.* (2008).

Con series de niveles de agua diarios provenientes del espacio y caudales estimados en las estaciones virtuales es posible deducir las curvas de gasto para estas secciones (León *et al.*, 2006). En efecto, expresada como una ley potencial una curva de gasto puede ser representada por la ecuación 2 (Rantz *et al.*, 1982).

$$Q_t = a (H-z)^b \quad (2)$$

donde Q es el caudal a un momento t y $(H-z)$ corresponde a la profundidad del flujo cero del cauce de la sección de control en el tiempo t . H es la altura de la superficie libre del agua medida por el satélite y referenciada sobre el geoide continental GRACE; y z corresponde a la altitud del flujo tomado sobre la misma referencia. Los coeficientes a y b son específicos para cada sección y representan características hidráulicas de ellas (Rantz *et al.*, 1982).

Para determinar la profundidad del flujo cero ($H-z$) se aplicó la metodología propuesta por León *et al.* (2006). Este método consiste en la minimización del error de la raíz media cuadrática (RMSE) entre el caudal estimado mediante el modelo hidrológico y un caudal estimado por medio de la ecuación 2: para un valor dado de z , los coeficientes a y b son estimados con una regresión lineal de la forma $(\ln(Q), \ln(H-z))$. Explorando un rango de posibilidades posibles de z se llega a construir una función del tipo $RMSE(z) = f(z)$. Todo el posible rango de valores que pueda tener z fue explorado con incrementos de 0,01 m. El valor de z que mejor representa la altitud del flujo cero efectivo puede ser expresado como lo indica la ecuación 3.

$$\frac{\partial f(z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Resultados y discusión

Series temporales de niveles de agua sobre estaciones virtuales

Las series altimétricas de las estaciones virtuales presentadas en la tabla 2 fueron sometidas a un proceso de interpolación entre el 2002 y el 2003 siguiendo la metodología propuesta por Roux *et al.* (2008) para la obtención de series diarias de niveles de agua. La figura 2a muestra una serie temporal de niveles de agua de una estación virtual obtenida de ALTICO. Este ejemplo corresponde a la serie de la estación 622Orinoco03 en el período 2002-2008. La figura 2b es un ejemplo del resultado del proceso de interpolación llevado a cabo para la obtención de niveles de agua medios diarios entre el 2002 y el 2003.

Estimación de caudales en las estaciones virtuales

El modelo de M-C fue aplicado en la estimación de caudales medios diarios en las estaciones virtuales. La tabla 3 sintetiza los resultados de la aplicación del modelo entre las estaciones de Puerto Nariño y Roncador para la derivación de caudales en las cuatro estaciones virtuales consideradas en el estudio.

In English

applied.

Series of daily water levels regarding space and flows estimated at virtual stations led to deducing these sections' rating curves (Leon *et al.* 2006). In effect, expressed as a power law, a rating curve can be represented by equation 2 (Rantz *et al.*, 1982).

$$Q_t = a (H-z)^b \quad (2)$$

where Q was flow at time t and $(H-z)$ was the depth of zero flow channel control section at time t . H was the height of the free surface of water measured by the satellite and continental referenced GRACE geoids and z was the height of the flow taken over the same reference. Coefficients a and b were specific to each section and represented their hydraulic characteristics (Rantz *et al.*, 1982).

The methodology proposed by Leon *et al.*, (2006) was used for determining the depth of zero flow ($H-z$). This method consists of minimising root mean square error (RMSE) between the flow estimated by the hydrological model and a flow rate estimated by Equation 2: for a given value of z , coefficients a and b were estimated by linear regression $(\ln(Q), \ln(H-z))$. By exploring a range of possibilities of z it was possible to construct $RMSE(z) = f(z)$. All the possible range of values which might have had z was explored in 0.01 m increments. The value of z that best represented the altitude of zero effective flow could be expressed as shown in Equation 3.

$$\frac{\partial f(z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Results and Discussion

Virtual stations' water level time series

The altimetric series for virtual stations presented in Table 2 were subjected to interpolation between 2002 and 2003, following the methodology proposed by Roux *et al.*, (2008) to obtain a daily series of water levels. Figure 2a shows water levels time series at a virtual station obtained from ALTICO. This example refers to the 622Orinoco03 series from 2002 to 2008. Figure 2b is a sample of the result of the interpolation carried out to obtain mean daily water levels between 2002 and 2003.

Virtual stations' flow estimation

The MC model was used for estimating virtual stations' average daily flows. Table 3 summarises the results of applying the model between the Puerto Nariño and Roncador stations for deriving flows in the four virtual stations included in the study.

En español

In English

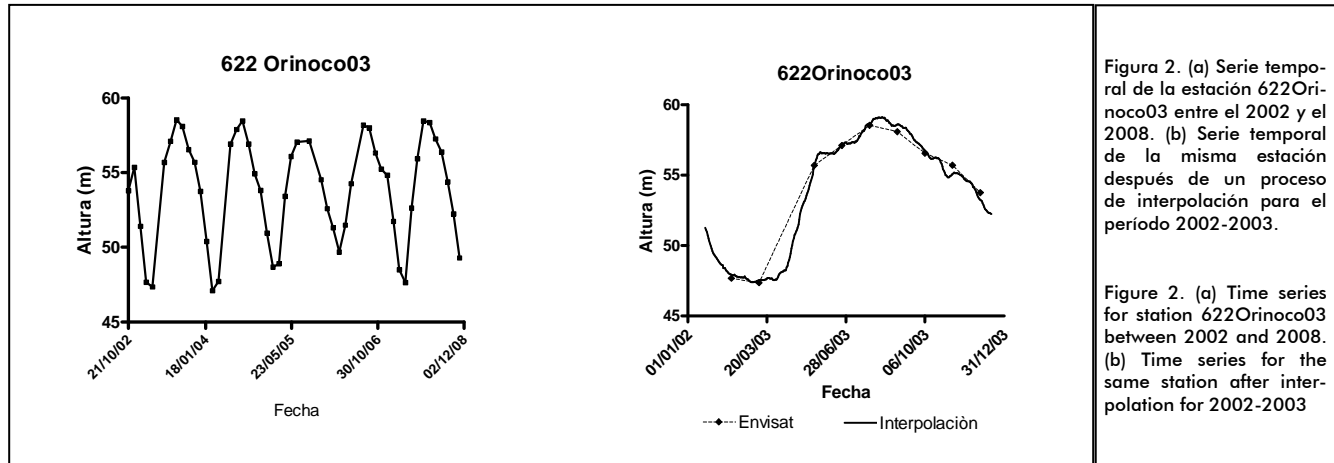


Figura 2. (a) Serie temporal de la estación 622Orinoco03 entre el 2002 y el 2008. (b) Serie temporal de la misma estación después de un proceso de interpolación para el periodo 2002-2003.

Figure 2. (a) Time series for station 622Orinoco03 between 2002 and 2008. (b) Time series for the same station after interpolation for 2002-2003

De la tabla 3 es posible observar que en los 130 km del Orinoco considerados en este estudio no existe una influencia de importantes subcuencas con desembocadura en este tramo del río, hecho que facilita la aplicación del modelo y permite disminuir considerablemente los errores medios sobre la estimación de los caudales en las estaciones virtuales. Al final del tránsito se encuentran RMSE entre los caudales medidos y los caudales estimados inferiores al 1%. Este resultado permite concluir sobre la calidad de las series de caudales estimadas sobre las estaciones virtuales.

Table 3 shows that in the 130 km of the Orinoco River considered in this study there was no significant river sub-section influence regarding other rivers flowing into this piece of river, thereby facilitating the application of the model and significantly decreasing average errors regarding estimating flows in virtual stations. At the end of transit, RMSE below 1% were found between virtual flow rate and *in situ* measured flow rate. This result led to concluding that the virtual stations' quality regarding estimated flow series was good.

Estación	Caudal medio medido (m ³ /s)	Caudal medio estimado (m ³ /s)	Caudal medio máximo (m ³ /s)	Caudal medio mínimo (m ³ /s)	Error estimado después de M-C (%)
Puerto Nariño (aguas arriba)	14.571	-	34.002	3.940	-
493Orinoco04	-	14.567	33.990	3.905	-
493Orinoco01	-	15.125	34.201	3.274	-
622Orinoco04	-	15.813	36.589	3.402	-
622Orinoco03	-	15.811	36.557	3.402	-
Roncador (aguas abajo)	15.781	-	36.352	3.403	0,018

Tabla 3. Resultados de la aplicación del modelo de M-C en la sección considerada.

Station	Measured average flow (m ³ /s)	Estimated average flow (m ³ /s)	Maximum average flow (m ³ /s)	Minimum average flow (m ³ /s)	Estimated error after M-C(%)
Puerto Nariño (upstream)	14,571	-	34,002	3,940	-
493Orinoco04	-	14,567	33,990	3,905	-
493Orinoco01	-	15,125	34,201	3,274	-
622Orinoco04	-	15,813	36,589	3,402	-
622Orinoco03	-	15,811	36,557	3,402	-
Roncador (downstream)	15.781	-	36.352	3.403	0.018

Table 3. Results of using the M-C model in the section being considered

Curvas de calibración de estaciones virtuales y profundidad del flujo cero

Con series diarias de niveles de agua registradas a partir del espacio y los caudales obtenidos a partir de un modelo hidrodinámico fue posible deducir las curvas de gasto y las profundidades equivalentes del flujo mediante la aplicación de la metodología propuesta. La figura 3 muestra las curvas de gasto obtenidas para las cuatro estaciones virtuales consideradas en el estudio, junto con las ecuaciones que rigen dichas secciones y la profundidad media del flujo cero para cada una de ellas.

A partir de estas relaciones es posible reconstruir los caudales medios diarios de las estaciones virtuales del 2002 al 2008 y, de ahí en adelante, en las fechas en las que haya disponibilidad de datos altimétricos de la misión Envisat o su sucesor. Los coeficientes de correlación permiten concluir sobre la calidad de las funciones deducidas. Básicamente estas relaciones permitirán

Calibration curves of virtual stations and depth of zero flow.

With a daily series of water levels recorded from space and flow obtained from a hydrodynamic model it was possible to deduce the equivalent rating curves and flow depths by applying the proposed methodology. Figure 3 shows the rating curves obtained for the 4 virtual stations considered in this study, along with the equations governing these sections and the average depth of zero flow for each of them.

It was possible to reconstruct the average daily flows for virtual stations from 2002 to 2008 from these ratios and thereafter the dates on which altimetric data was available from the Envisat mission or its successor. Basically, these relationships will allow estimating flows for such sections from daily water level records from space.

estimar caudales para dichas secciones a partir de registros de niveles agua diarios provenientes del espacio.

Con relación a las profundidades del flujo cero encontradas resulta indispensable la puesta en marcha de un trabajo de campo que permita validar esta información. Sin embargo, los valores encontrados se ajustan ampliamente a la realidad si tomamos como base los aforos realizados sobre las estaciones de Puerto Nariño y Roncador, donde, en promedio, se han encontrado profundidades del cauce que varían entre 12 ± 4 m y 17 ± 4 m, respectivamente.

Regarding the zero flow depths found, field work is fundamental as it leads to validating such information. However, the values found were closely adjusted to reality in relation to the appraisals made at the Puerto Nariño and Roncador stations where, on average, channel depths ranged from 12 ± 4 m and 17 ± 4 m, respectively.

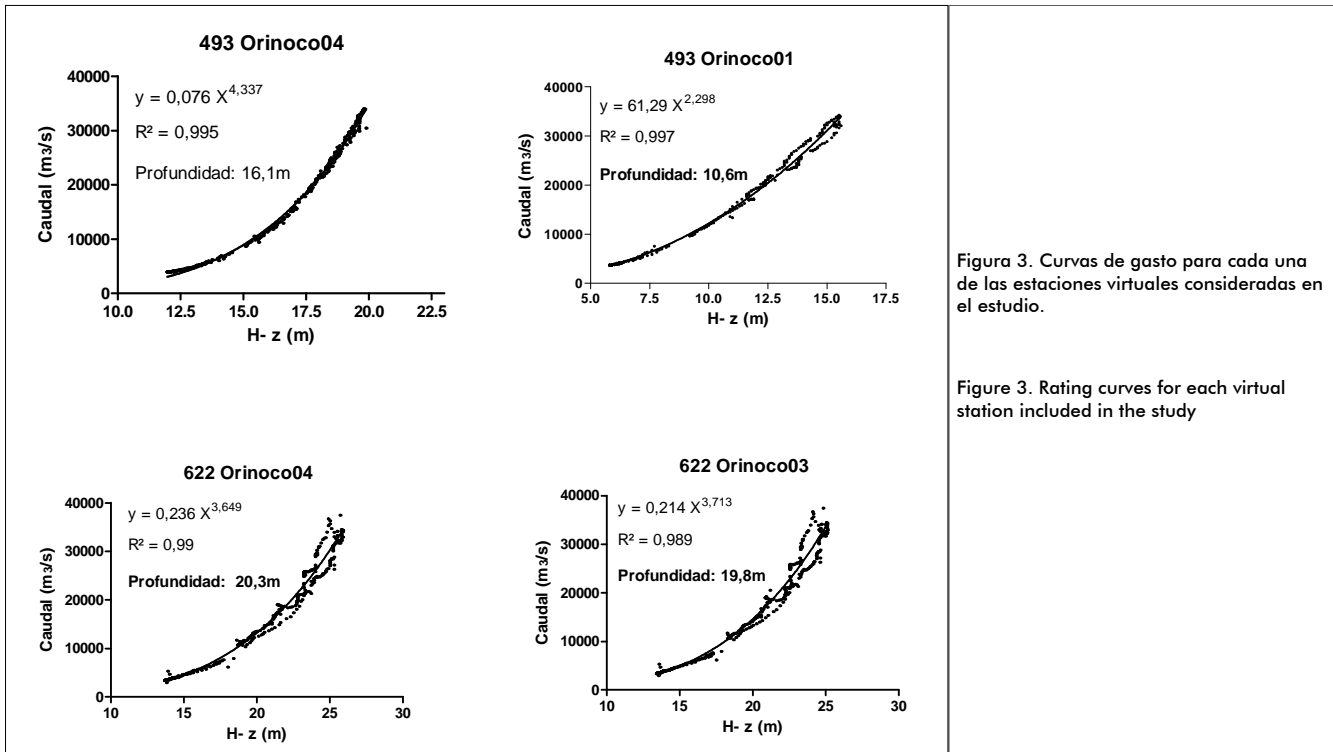


Figura 3. Curvas de gasto para cada una de las estaciones virtuales consideradas en el estudio.

Figure 3. Rating curves for each virtual station included in the study

Conclusiones

Este estudio corrobora las ventajas y el uso de la altimetría radar sobre aguas continentales. La información de caudales medios diarios *in situ* provenientes del Ideam y aquella proveniente de la misión Envisat en relación con niveles de agua sobre estaciones virtuales ha permitido la caracterización hidráulica de dichas secciones de la misma forma en que se hace tradicionalmente, esto es, mediante la definición de curvas de gasto que permitan la estimación de caudales diarios a partir de niveles de agua y donde los coeficientes que rigen las relaciones matemáticas contienen información sobre las características hidráulicas de la sección que representan.

Se han estimado estas curvas de gasto para cuatro estaciones virtuales Envisat ubicadas entre las estaciones hidrométricas de Puerto Nariño y Roncador, representando 130 km del cauce principal del río Orinoco. El método de minimización del RMSE propuesto por León *et al.* (2006) permitió deducir la profundidad del flujo cero de estas cuatro secciones, que en promedio varía en $16,7 \pm 4,3$ m, lo que resulta consistente con los aforos realizados en las estaciones *in situ* mencionadas.

Esta metodología seguirá siendo aplicada en el contexto de la

Conclusions

This study confirmed radar altimetry's advantages and its use regarding inland waters. The information regarding IDEAM's *in-situ* average daily flows and those from the Envisat mission concerning virtual stations' water levels led to the hydraulic characterisation of the sections in the same way as it is traditionally done, i.e. by defining rating curves for estimating daily flows from water levels and where the coefficients governing mathematical relationships contain information about the hydraulic characteristics of the section that they represent.

Four rating curves for ENVISAT virtual stations have been estimated, located between the Puerto Nariño and Roncador hydro-metric stations, representing 130 km of the Orinoco River's main stream. The RMSE minimisation method proposed by León *et al.*, (2006) led to deducing the zero flow depth of four sections varying 16.7 ± 4.3 m on average, which was consistent with the appraisals made at the aforementioned *in-situ* stations.

This methodology will continue being applied for studies in the

cuenca del Orinoco y otras cuencas del territorio colombiano definidas desde ALTICO, donde sea posible la aplicación de un modelo de tránsito que permita la estimación de caudales en las estaciones virtuales. Particularmente respecto del Orinoco será posible considerar estimación de curvas de gasto sobre los ríos Meta, Arauca y Guaviare. Esta información comenzará a ser usada por instituciones como el IDEAM con dos fines básicos: densificación de las redes de monitoreo hidrológico y complemento de registros de estaciones hidrométricas. Estudios futuros darán cuenta de estas aplicaciones adicionales.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración científica y técnica aportada por los investigadores del Programa HYBAM del IRD por medio de sus laboratorios Legos y LMTG.

Referencias / References

- Brooks, R.L., Lake elevation from satellite radar altimetry from a validation area in Canada., *Reporte, Geosci. Res.* 1982.
- Crétau, J.F., Birkett C., Lake studies from satellite radar altimetry *Altimétrie satellitaire sur les lacs., Comptes Rendus Geosciences.* Volume 338, 2006, Issues 14-15,
- Cunge, J.A., On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)., *Hydraul. Res.* 7 (2), 1969, 205-230.
- Espinoza, J.C., Guyot, J-L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N., Fraizy, P., Labat, D., De Oliveira, E., Ordoñez, J.J., Vauchel, P., Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974-2004)., *Journal of Hydrology*, 2009, 375, 3-4. 297-311.
- Frappart, F., Hydrologie spatiale :Développement d'applications pour l'utilisation de la télédétection sur les grands bassins fluviaux., Tesis doctoral de la Univ. Toulouse III-Paul Sabatier, 30/11/2006, 283p.
- Leon J.G., Calmant S, Seyler F., Bonnet M.P., Cauhopé M., Rating curves and average water depth estimation at the upper Rio Negro from altimetric spatial data and calculated remote discharges., *Journal of Hydrology*, 2006, 328, 481-496.
- Leon, J.G., Rubiano, J., Vargas, V., Series temporales de niveles de agua en estaciones virtuales de la Cuenca Amazónica a partir de altimetría radar por satélite., *Ingeniería e Investigación.* Vol 29, No. 1. 2009a., pp 109-114p.
- Leon. J.G., Navarro, C., Seyler, F. Monitoreo de la hidrografía colombiana mediante la implementación de estaciones virtuales ENVISAT. Agua 2009. CINARA. Universidad del Valle. Colombia – Cali. Octubre de 2009.
- Leon, J.G., Domínguez, E., Duque, G., Avances más Recientes Sobre la Aplicación de la Altimetría Radar por Satélite en Hidrología. *Ingeniería e Investigación.* Vol. 28 No. 3, 2008,

Orinoco Basin and other Colombian basins defined from ALTICO, where a traffic model can be set up for estimating flows in virtual stations. Rating curves will be made for the Meta, Arauca and Guaviare rivers. This information will begin to be used by institutions such as the IDEAM with two basic goals: hydrological monitoring network densification and complementing hydrometric stations' records. Future studies will document such additional applications.

Acknowledgements

The authors would like to thank researchers from the IRD's HYBAM programme for the scientific and technical collaboration provided by their LEGOS AND LMTG laboratories.

pp 126 – 131.

- León, J.G., Rubiano, J., Navarro, C.E., Estaciones hidrométricas virtuales ENVISAT en la cuenca alta y media del río Orinoco. *Ingeniería e Investigación, Universidad Nacional de Colombia*, 2010 (Under review)
- Mercier, F., Cazenave, A., y 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*, 2002, 32, pp 141-163.
- Morris, C.S., Gill, S.K., Variation of great lakes waters from Geosat altimetry., *Water Resour.* 1994, Res., 30:1009-1017.
- Organización Meteorológica Mundial., Guía de prácticas hidrológicas. Quinta edición, OMM No 168., 1994, pp. 147-173.
- Ponce, V.M., Lohani, A., Scheyhing, C., Analytical verification of Muskingum-Cunge routing., *J. Hydrol.* 174, 1996, pp 235-241.
- Rantz, S.E., Measurement and computation of streamflow., *Measurement of Stage and Discharge, US Geological Survey Water Supply Paper*, vol. 1, 1982, p. 284.
- Roux, E., Cauhope, M., Bonnet, M.-P., Calmant, S., Vauchel, P., Seyler, F., Daily water stage estimated from satellite altimetric data for large river basin monitoring. *Hydrol. Sci. J.* 53(1), 2008. pp 81-99.
- Vörösmarty, C., Birkett, C., Dingman, L., Lettenmaier, D.P., Kim, Y., Rodríguez, E., Emmitt, G., HYDRA-SAT, HYDRlogical Altimetry SATellite, NASA Post-2002 Land Surface Hydrology Mission Component for Surface Water Monitoring, report from the NASA Post-2002. Land Surface Hydrology Planning Workshop, Irvine, CA, April 12-14th, 1999.