

Establecimiento de una red limnimétrica en las hidrovías de la Amazonia peruana

Jigena, B. (1); Lévano, F. (2,3); Muñoz, J. J. (1); Quispe, C. (3); Rey, W. (4); Romero, J. (1); Berrocoso, M. (1)

- (1) Universidad de Cádiz, Puerto Real (Cádiz), España; bismarck.jigena@gm.uca.es.
 (2) Hidráulica y Oceanografía Ingenieros Consultores S.A., La Molina, Lima, Perú.
 (3) Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
 (4) Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Sisal, Yucatán, 97356, México.

Resumen: La determinación del nivel de referencia vertical y la pendiente hidráulica en las hidrovías de la Amazonía peruana es un problema que afecta la seguridad de la navegación y a los proyectos de ingeniería y de investigación. Actualmente en las hidrovías de la Amazonía peruana, no se cuenta con un nivel de referencia vertical relacionado al nivel medio del mar, ni al datum altimétrico vertical del Perú. A este problema tenemos que añadir la falta de una red geodésica densificada a lo largo de estos ríos y de una red limnimétrica asociada, tanto horizontal como en la vertical. El entorno geográfico, la morfología y el régimen fluvial de estos ríos, tampoco ofrecen condiciones favorables para su establecimiento. Presentamos los trabajos preliminares para el establecimiento de una Red Limnigráfica en la Amazonía Peruana, en los ríos Maraón, Ucayali y Amazonas, con la instalación 13 limnímetros. La red ha sido vinculada a la Red Geodésica Peruana de Monitoreo Continuo (REGPMOC) y además se han realizado nivelaciones geométricas para la determinación del nivel de referencia vertical. Con estos trabajos lo que buscamos es definir una metodología para la determinación local del nivel de referencia vertical y mejorar la precisión el cálculo de la pendiente hidráulica, que sea aplicable a la identificación y ubicación precisa de los “malos pasos” y a los diferentes trabajos de ingeniería que requieran contar con un nivel de referencia vertical preciso y fiable.

Palabras clave: altimetría, amazonia, geodesia, hidráulica fluvial, hidrografía, hidrología, limnómetro.

1. INTRODUCCIÓN

La Amazonía peruana representa aproximadamente dos tercios del territorio. Los ríos amazónicos tienen al menos 10000 kilómetros de vías navegables naturales y unen las ciudades más importantes de esta región. En la Amazonia, la construcción y el mantenimiento de carreteras es muy costoso y en algunos casos totalmente inviable, siendo las hidrovías la mejor alternativa, pues necesitan de muy poca inversión, para su mejoramiento y mantenimiento.

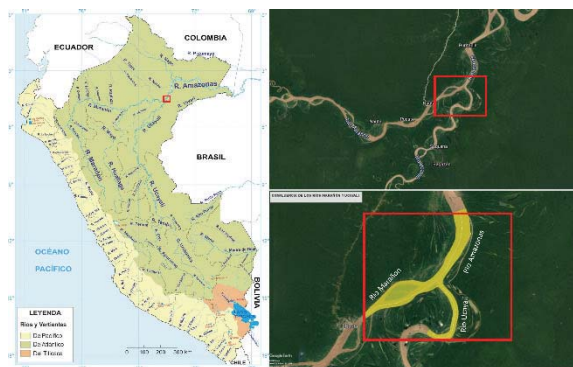


Fig. 1. Área de estudio. Confluencia de los ríos Maraón y Ucayali.

Para este estudio hemos trabajado en la hidrovía compuesta por tramos de los ríos Maraón, Ucayali

y Amazonas. A lo largo de esta hidrovía hay lugares denominados malos pasos, que se caracterizan por ser pasos difíciles para navegar y por lo tanto con poca seguridad en la navegación.

Los trabajos y estudios hidrográficos se referencian verticalmente a un datum vertical al que debe estar vinculado el nivel local del agua (Rice & Riley, 2011). Para la determinación del nivel de referencia vertical y de la pendiente hidráulica, es necesario realizar trabajos previos de geodesia e hidrometría en el área de estudio (MTC 2005, 2008).

2. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en el Departamento de Loreto (equivalente a un Estado o Provincia en otros países), en la República del Perú, a unos 100 kilómetros aguas arriba de la ciudad de Iquitos. El área de trabajo comprende la confluencia de los ríos Maraón, Ucayali y Amazonas, a 10 km aguas arriba y abajo de la confluencia de estos tres ríos. El área de trabajo se muestra en la Figura 1.

3. METODOLOGIA

Para la determinación del nivel de referencia vertical y de la pendiente hidráulica, es necesaria la aplicación de una metodología muy rigurosa y la realización de diferentes trabajos de campo, que son los siguientes:

3.1. Establecimiento de una red geodésica

Para el establecimiento de la red geodésica en el área de trabajo, se utilizó como referencia la estación LR03 (Nauta) perteneciente a la REGPMOC, que es la Red Geodésica Oficial del Perú, vinculada al Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), en el Marco Internacional de Referencia Terrestre 2000 (ITRF2000). En la tabla 1 se muestran las coordenadas obtenidas para los Puntos de Control del Limnimetro (TSGBM, en inglés: Tide Staff Gauge Benchmark).

REGLA	CUTM NORTE	CUTM ESTE	UBICACIÓN
REGLA 1	9504356.97	661170.08	Río Marañón
REGLA 2	9508534.29	670241.12	Río Marañón
REGLA 3	9510808.63	672535.64	Río Amazonas
REGLA 4	9518581.29	674333.46	Río Amazonas
REGLA 5	9506752.58	672954.33	Río Ucayali
REGLA 6	950801.43	671228.45	Río Ucayali
NAUTA	9501931.11	656964.78	Río Marañón

Tabla 1. Coordenadas UTM (Zona 18 Sur) de las estaciones hidrométricas.

A partir de estas estaciones se establecieron las estaciones de control, vinculados a las estaciones hidrométricas. Los TSGBM fueron ubicados en sitios seguros y cercanos a la regla limnimétrica y fueron enlazados a la red geodésica REGPMOC utilizando como referencia la estación de rastreo permanente de Nauta (LR03), ubicada a unos 15 kilómetros de la zona de proyecto.

La metodología de observación GNSS-GPS fue el posicionamiento geodésico relativo con postproceso, observando datos cada segundo y con un tiempo mínimo de observación y adquisición de datos brutos de 5 horas, llegando en algunas estaciones hasta las 12 horas y 32 minutos. La observación de datos se realizó el 12 y 13 de noviembre del 2019.

Para el postproceso de datos GNSS-GPS se utilizó el programa Topcon Tools v. 8.2.3. El utilizó el formato RINEX para el intercambio de datos GNSS-GPS y toda la red fue ajustada. Las coordenadas de ubicación de las estaciones GNSS-GPS se muestra en la Tabla 1, en coordenadas UTM, Zona 18 Sur.

3.2. Establecimiento de las estaciones limnimétricas.

Una vez obtenidas las coordenadas de los puntos geodésicos se procede a la instalación de las reglas limnimétricas en las riberas de los ríos, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Regla limnimétrica instalada.

Con la regla limnimétrica instalada, se procede con la determinación de la cota cero de cada regla, para esto se realiza una nivelación geométrica diferencial desde el punto geodésico (TSGBM) hasta el espejo de agua, anotando en ese mismo instante la lectura del nivel de agua de la regla, de tal manera de que se pueda relacionar la lectura del nivel de agua tomado en la regla con la cota altimétrica del TSGBM y a su vez dar una cota al nivel del espejo de agua medido en la regla. Con esta cota del nivel del espejo de agua medido en la regla y restando la profundidad desde el espejo al fondo, obtiene la cota cero de la regla. La referenciación altimétrica de la regla se realiza como se muestra en la figura 3.

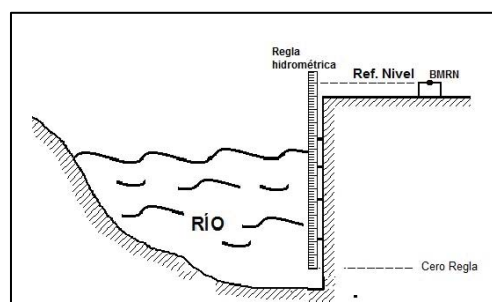


Figura 3. Referenciación altimétrica de la regla limnimétrica.

Las reglas limnimétricas fueron ubicadas en tramos rectos del río, que es donde se tiene un cauce y niveles del río más estables, ya que en un tramo curvo o meandro del río, debido a la propia dinámica del fluido, se genera una sobreelevación del nivel del agua en el exterior de la curva y una subelevación en el interior, que induce a error en las mediciones de nivel. En base a estudios previos experimentales se ha determinado que para garantizar la representatividad de la pendiente hidráulica en un río amazónico, las reglas limnimétricas deberían estar separadas al menos 10 km (MTC 2005, 2008; Galvan et al. 2017). También se sugiere la instalación de un mínimo de dos reglas limnimétricas por río. Por estos motivos se decidió la colocación de seis reglas limnimétricas en las localizaciones mostradas en la Tabla 1 y ubicadas en pares en cada uno de los ríos que son parte de este estudio. Para estos trabajos se siguieron las especificaciones OEA (2010), Jigena et al. (2014, 2016, 2018)

3.3. Registro de niveles del río y su transformación a cota Ortométrica.

Posterior a la instalación de las reglas limnimétricas se realizó el registro de los niveles de río mediante observación directa y su conversión a cota utilizando la cota cero de las reglas. Las observaciones de los niveles en las diferentes estaciones se realizaron de forma simultánea, tomando datos cada media hora y durante al menos 10 horas en cada estación. A continuación, se muestran los registros de los niveles de río durante los días de trabajo. En la tabla 2 se muestran las observaciones realizadas en las diferentes reglas, con los niveles calculados,

transformados a alturas sobre el nivel del mar utilizando el geoido EGM2008.

REGLAS	R1 (M)	R2 (M)	R3 (A)	R4 (A)	R5 (U)	R6 (U)
12/11/2019	Nivel (msnm)	Nivel (msnm)	Nivel (msnm)	Nivel (msnm)	Nivel (msnm)	Nivel (msnm)
6:30	89.58					
7:00	89.60					
7:30	89.59	88.84	88.73			
8:00	89.59	88.85	88.73	88.57		
8:30	89.60	88.85	88.73	88.58		
9:00	89.60	88.85	88.73	88.58	88.84	
9:30	89.61	88.85	88.73	88.58		
10:00	89.61	88.85	88.74	88.58		
10:30	89.61	88.86	88.75	88.58	88.85	89.02
11:00	89.62	88.86	88.75	88.59	88.85	89.02
11:30	89.63	88.86	88.75	88.58	88.85	89.03
12:00	89.63	88.87	88.76	88.59	88.85	89.03
12:30	89.63		88.76	88.60	88.86	89.03
13:00	89.63	88.87	88.76	88.61	88.86	89.04
13:30	89.63		88.76	88.60	88.87	89.04
14:00	89.63	88.88	88.76	88.61	88.86	89.04
14:30	89.63	88.88	88.76	88.60	88.87	89.04
15:00	89.63	88.88	88.76	88.61	88.87	89.04
15:30	89.64	88.88	88.76	88.61	88.88	89.05
16:00	89.64	88.89	88.76	88.61	88.88	89.05
16:30	89.65	88.89	88.77	88.62	88.88	89.06
17:00	89.65	88.89	88.77	88.62	88.88	89.06
17:30	89.65	88.90	88.77	88.62		
18:00	89.648	88.896	88.772	88.62		
CERO REGLA	88.688	87.838	87.892	87.715	87.623	88.022

Tabla 2. Lecturas en las reglas limnimétricas instaladas.

Para la instalación y referenciación de los limnimetros y determinación de la altura ortometrica referida al geoido EGM2008, se tomaron en cuenta las recomendaciones de Galvan et al (2017) y Jigena etal. (2014, 2015, 2016)

4. RESULTADOS.

A partir de los registros de niveles se han calculado las pendientes hidráulicas para los ríos Marañón, Amazonas y Ucayali. Las pendientes fueron calculadas de forma indirecta, realizando un ajuste lineal de los niveles del agua.

Para nuestro estudio y obtención de la altura ortometrica se han analizado varios modelos de geoides globales en la zona, entre ellos el EGM1996 (Lemoine et al. 1998) y EGM2008 (Pavlis et al. 2012), con los que se obtuvieron mejores resultados al tener una data más completa. Tambien se analizaron los modelos GRACE2014 y el EIGEN-6C4 que son más precisos, pero no teníamos data para nuestra área.

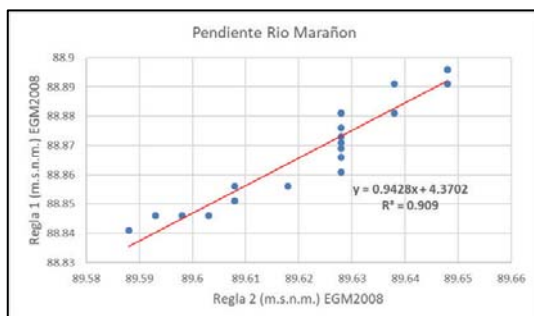


Figura 4. Cálculo de la pendiente en el río Marañón.

En la figura 4 mostramos el resultado obtenido al calcular la pendiente promedio en el río Marañón, la pendiente en el tramo entre la RL 1 (Regla Limnimétrica 1) y la RL2, donde se ha obtenido una pendiente de 0,9428 m en tramo de 10,6 km de distancia con lo que obtenemos una pendiente de 0,0001 mm/km.

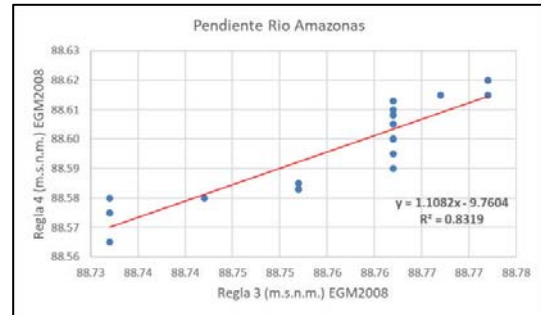


Figura 5. Cálculo de la pendiente en el río Amazonas

En la figura 5 se muestra el resultado del cálculo de la pendiente promedio obtenida para el río Amazonas, en un tramo después de la confluencia, entre las reglas RL3 y la RL4, donde se ha obtenido una pendiente de 1,1082 m en tramo de 9,1 km de distancia con lo que obtenemos una pendiente de 0,0001 mm/km.

En la figura 6 se muestra el resultado del cálculo de la pendiente promedio obtenida para el río Ucayali, en un tramo antes de la confluencia, entre las reglas RL5 y RL6, donde se ha obtenido una pendiente de 0,9908 m en tramo de 10,7 km de distancia, teniendo como resultado una pendiente de 0,0001 mm/km.

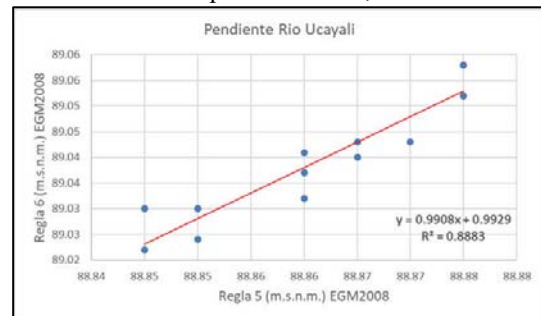


Figura 6. Cálculo de la pendiente en el río Ucayali

5. CONCLUSIONES

En el área de estudio y en general la Amazonía se tienen muy pocos datos de trabajos de altimetría de precisión, redes GNSS-GPS permanentes y puntos de gravedad, y los existentes, ya escasos, no tienen una data completa.

En la Amazonía Peruana no se tienen trabajos sobre determinación del geoido en la zona, por esta razón hemos utilizado como referencia trabajos realizados por los trabajos realizados por Jigena et al. (2014, 2016) en la Antártida y por Galván et al. (2017) en Argentina. Los resultados en altimetría de los trabajos de Galván et al. (2017) se obtuvieron utilizando los geoides globales EGM96 y EGM2008, cuyas diferencias respecto a la nivelación geodésica

fueron de ± 6 m y ± 2 m con una desviación estándar de ± 1.8 m y ± 0.9 m, respectivamente.

En general en los ríos amazónicos tenemos pendientes hidráulicas muy pequeñas y en muchos casos imperceptibles por lo que convendría contar con trabajos técnicos, informes o publicaciones con trabajos previos, donde se hayan obtenido pendientes hidráulicas por nivelaciones geodésicas que son más precisas y que hayan sido contrastadas con observaciones GNSS-GPS.

Los cálculos de pendiente hidráulica realizados en el presente trabajo son una primera aproximación y no son concluyentes, debido a la falta de datos precisos; sin embargo, y dado que no es viable obtener estos datos a la brevedad, se acepta el cálculo como un cálculo preliminar válido.

Para los cálculos partimos del hecho de que las distancias entre las reglas son menores a los 12 Km, y en estas distancias la diferencia entre el arco y la cuerda, Tierra Esférica y plana, es menor a los 3 cm; por lo tanto, podemos considerar que el geoide y el elipsoide en la zona, son figuras paralelas y las diferencias de nivel entre geoide y elipsoide son constantes. Por este hecho, podemos utilizar la altura elipsoidal, obtenida con GNSS-GPS, para determinar la diferencia de nivel entre los puntos de control (TSGBM). Si somos capaces de reducir la distancia entre puntos ($d < 2$ km) podríamos realizar nivelaciones utilizando solo la altura elipsoidal (h) y en consecuencia obtener pendientes con mayor precisión.

Para trabajos futuros, para mejorar la data geodésica y la precisión de las pendientes hidráulicas, es conveniente realizar trabajos de nivelaciones geométricas y/o trigonométricas de precisión. Además, los puntos principales de nivelación deben ser observados con receptores GNSS-GPS y ser dotados con coordenadas absolutas latitud, longitud y altura elipsoidal, además de la diferencia de nivel (nivelación geométrica/trigonométrica). También sería deseable que en estos puntos principales de nivelación poder contar con datos de gravedad relativa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa Hidráulica y Oceanografía (H&O Ingenieros) Perú, por facilitar los datos e informes para la publicación del artículo.

REFERENCIAS

- Galván L., Infante C., Duro J., Orieta J., Llanos M. (2017). Integración de información altimétrica local y modelos geopotenciales en STRM DEM para Santiago del Estero. Simposio SIRGAS 2017, Mendoza Argentina.
- Jigena B., Vidal J. and Berrocoso M. (2014). Determination of the Mean Sea Level at Deception and Livingston Islands. *Antarctic Science* 27(01), pp 101-102.
- Jigena, Bismarck; Berrocoso, Manuel; Torrecillas, Cristina; Vidal, Juan; Barbero, Ignacio and Fernandez-Ros, Alberto. (2016). Determination of an experimental geoid at Deception Island, South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, Vol 28(4), pp 277–292.
- Jigena B., Mamani R., Muñoz-Perez J.J., Garvi D., Walliser M., Calderay F. & Berrocoso M. (2018). Methodology for hydrological information management in waterways: Application to Bolivia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, Vol. 9, núm. 4 (2018), pp 237-256.
- Lemoine F. G., Kenyon S. C. , Factor J. K. , Trimmer R.G. , Pavlis N. K., Chinn D. S. , Cox C. M. , Klosko S. M. , Luthcke S. B. , Torrence M. H., Wang Y. M. , Williamson R. G. , Pavlis E. C. , Rapp R. H. & Olson T. R. 1998. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. NASA/TP-1998-206861, July 1998. Recuperado de: <https://cdis.nasa.gov/926/egm96/egm96.html>.
- MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Peru. (2005). Estudio de la navegabilidad del río Ucayali en el tramo comprendido entre Pucallpa y la confluencia con el río Marañón. Volumen VIII estudio de Hidraulica Fluvial. Informe Final elaborado por el Consorcio H&O-ECSA. Recuperado de: <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/acuatico/documentos/estudios/Estudio%20de%20la%20Hidr%C3%A1ulica%20Fluvial%20del%20r%C3%ADo%20Ucayali%20-%20Informe%20Final.pdf>.
- MTC, Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Peru. (2008). Estudio de navegabilidad de los ríos marañón y Amazonas Ucayali. Tramo Saramiriza-Santa Rosa. Volumen III Estudio de Hidraulica, Hidrología y Navegación Fluvial. Informe Final elaborado por el Consorcio Hidrovía Amazonas. Recuperado de: <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/acuatico/documentos/estudios/Hidraulica%20final.pdf>.
- OEA, Organización de Estados Americanos. (2010). Programa Centroamericano para la alerta temprana ante inundaciones en pequeñas cuencas (SPV) y reducción de la vulnerabilidad: Desarrollo de una Plataforma Nacional (edición especial). En: Manual para el Diseño, Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante Inundaciones (81 pp). Washington, DC, USA: Organización de Estados Americanos.
- Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C. & Factor J.K. (2012). The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, First published: 19 April 2012 <https://doi.org/10.1029/2011JB008916>.
- Rice, G., & Riley, J. (2011). Measuring the Water Level Datum Relative to the Ellipsoid During Hydrographic Survey. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/72054311.pdf>.