

MORFOLOGÍA FLUVIAL Y EROSIÓN EN CURVAS ABRUPTAS DEL RÍO UCAYALI, PERÚ

César Adolfo Alvarado Ancieta¹ (Perú) y Bernd Ettmer² (Alemania)

¹ Ingeniero Civil, M.Sc., Jefe de Proyecto, Fichtner GmbH & Co. KG, Sarweystraße 3, 70191 Stuttgart, Alemania
Web: <http://www.fichtner.de>; e-mail: alvaradoc@fichtner.de; Web: <http://www.freewebs.com/alvarado-ancieta>

² Dr.-Ing., Jefe del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Leichtweiß de Obras Hidráulicas
Universidad Técnica de Braunschweig, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig, Alemania.
e-mail: b.ettmer@tu-bs.de; Web: <http://www.lwi.tu-bs.de/waba/w-deutsch/mitarbeiter/ettmer.htm>

RESUMEN

El río Ucayali nace en las cuencas sureñas alto-andinas del Perú y drena en las cercanías de los famosos sitios incaicos de Machu Picchu y Cusco. El río Ucayali, ver Figura 1, se caracteriza por presentar un progresivo cambio en sus formas de cauce en planta, mostrando desde un complejo cauce anastomósico y meándriforme, y con abundantes islas sin y con vegetación. En su cuenca intermedia, estas islas se presentan en el trayecto de manera abundante, y la característica meandriforme es la predominante, formando curvas abruptas descritas con largas barras de sedimentación en la curva interna y profundas fosas de erosión en la curva externa. Cambios en las formas en planta y en la sección transversal del río Ucayali y modificaciones en la morfología del río debido a los fenómenos de erosión y sedimentación causan profundas fosas de erosión a lo largo de las curvas cóncavas del río. Puesto que no existe presencia de muchos ríos tributarios mayores que descarguen en el río Ucayali, la modificación en la forma del cauce del río en estudio resulta hacia aguas abajo en un decremento de la pendiente longitudinal del río, así como también en el tamaño del sedimento.

Teniendo como base una investigación previamente desarrollada y presentada sobre “topografía del cauce y erosión en curvas abruptas de ríos, e influencia de las obras de protección de margen”, relacionado a las características meandriformes de los ríos amazónicos, y disponiendo información útil detallada del río Ucayali en un tramo de longitud de estudio de 1000 km desde la ciudad de Pucallpa hasta su confluencia con el río Marañón de aproximadamente 50 curvas catalogadas como abruptas, se presenta aquí una aplicación a un caso real con respecto a una fórmula propuesta para la predicción de la profundidad máxima de erosión en curvas abruptas sin protección de margen, en conjunto con la correspondiente medida de mitigación a través de una fórmula estimativa para la predicción de la profundidad máxima de erosión en curvas abruptas con protección de margen flexible a base de enrocado de protección.

ABSTRACT

The Ucayali River originated in the high Andean Mountains drains the folded and faulted Andean Foreland in the vicinity of the famous Inca sites of Machu Picchu and Cusco. The Ucayali River, see Figure 1, displays a progressive change in channel pattern, it has a complex of anastomosing channels, meanders, abundant nonvegetated islands, and elongate vegetated islands. More downstream islands become far less abundant, and meandering dominates forming sharp bends described by long point bars in the innerside and scour holes in the outerside. Changes of the river planform and of the cross-sectional shape of the Ucayali River and changes in the river morphology due to sedimentation and erosion cause deep scour holes along the outer bend of the river. Since no major tributaries enter to the river, the change in channel pattern for the Ucayali results from downstream decreases in channel slope and sediment size.

Based on a research on “detailed bed topography and scour in sharp river bends, and influence of bank protection works”, related to meandering conditions of Amazon Rivers and taking into account recently detailed information available of the Ucayali River in a length of 1000 km from the city of Pucallpa up to its confluence by the left bank with the Marañón River of around 50 catalogued sharp bends, an application is presented to a real case is presented regarding proposed formulae for prediction of maximum scour depth in sharp bends without bank protection, together with the correspondence countermeasure by an estimation formulae for prediction of maximum scour depth in sharp bends with flexible bank protection based on rockfill revetment.

1. INTRODUCCIÓN

En anterior artículo “Topografía del Cauce y Erosión en Curvas Abruptas de Ríos, e Influencia de las Obras de Protección de Margen - Aplicación a Ríos Amazónicos” [1], se

evaluó la topografía del fondo en una curva abrupta mediante un modelo experimental físico, habiéndose efectuado una descripción detallada de la topografía, así como también propuesto una fórmula de predicción desde el punto de vista cualitativo para la estimación de la profundidad máxima de erosión aplicativa a los ríos amazónicos, en donde las principales características para la aplicación de una ley de semejanza son la baja pendiente del río y el tamaño característico, D_{50} , de la partícula del material de fondo.



Figura 1.- Izquierda, vista aérea y en planta del río Ucayali (2005), en el tramo comprendido entre Pucallpa y la confluencia con el río Marañón, Perú. Derecha, vista satelital en planta del río Ucayali (Fuente: Google Earth 2007).

En el marco de dicha investigación (2004 a la fecha) se estuvo efectuando en el Perú los estudios de factibilidad para el mejoramiento de la navegabilidad de los ríos Ucayali y Huallaga (2004-2005), estudios de los cuales los autores obtuvieron importante información a través de fuentes confiables (Dirección General de Transporte Acuático del Ministerio de

Transportes y Comunicaciones del Perú, y mediante convenio de cooperación suscrito entre el Leichtweiss Institut für Wasserbau (LWI) de la Universidad Técnica de Braunschweig en Alemania y la empresa de consultoría de ingeniería Hidráulica y Oceanografía (H&O) del Perú). Por parte de los autores ⁽¹⁾ se tuvo su presencia en el Perú en febrero-marzo/2005, diciembre/2005 - enero/2006 y diciembre/2006 - enero/2007 para la obtención de información motivo de esta investigación.

La información suministrada con especial interés con respecto al río Ucayali [5] ha sido evaluada y los resultados que se presentan aquí son producto de la investigación sobre la morfología del río Ucayali en el tramo comprendido entre la ciudad de Pucallpa y su confluencia con el río Marañón, de sus malos pasos que no permiten una navegabilidad adecuada en el río, así como también la evaluación de algunas de sus curvas abruptas con respecto al estudio de la profundidad máxima de erosión. Este artículo es una aproximación que se logra en el marco del objetivo de investigación efectuada por los autores. El artículo y los resultados que aquí se presentan han sido íntegramente elaborados por los autores. El suministro de mayor información permitirá extender los resultados de esta investigación.

2. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL RÍO UCAYALI

El río Ucayali, ver Figura 2, cuyo perfil longitudinal del thalweg medido el año 2005 se presenta en la Figura 3 tiene una longitud estimada de 1035 km, que comprende su área de cuenca baja, ubicada en la región denominada Selva Baja, y que ha sido evaluada entre los 130 y 55 m snm, comprendida entre la ciudad de Pucallpa y la confluencia con el río Marañón, en donde dan lugar al río Amazonas.



Figura 2.- Vistas del río Ucayali, en Pucallpa, Perú (2004).

Los autores en base a la información topográfica [5] disponible deciden distinguir al río Ucayali en un río que tiene tres tramos bien definidos, ver Tabla 1, ambos de características meandriformes, con predominancia de un cauce sinuoso y un índice superior a 1.5, y donde la pendiente promedio del thalweg del río es de 0.05 ‰. Una característica importante de la sinuosidad del río lo representa la presencia de aproximadamente 50 curvas abruptas, que se caracterizan por tener una relación radio de curvatura, R, y ancho del cauce, B, de R/B inferior a 3 y en muchos casos con un ángulo de curva superior a los 180°.

Tabla 1. Los tres tramos del río Ucayali en su cuenca baja.

| Tramo | Progresiva [km] | Pendiente [‰] | Descripción |
|-------|--------------------|------------------|---|
| 1 | 0+000 - 570+000 | 0.054 | Pucallpa - Inicio bifurcación |
| 2 | 570+000 - 840+000 | 0.055 | Bifurcación |
| 3 | 840+000 - 1035+000 | 0.028 | Fin Bifurcación - Confluencia con río Marañón |

El primer tramo se localiza entre la ciudad de Pucallpa (km 0+000) y el punto en el que el río Ucayali se bifurca en dos cauces (km 570+000), creando lo que se ha denominado Canal Madre y Canal Puinahua. La pendiente promedio de este tramo es de 0.054 ‰.

El segundo tramo se sitúa entre el inicio y fin de la bifurcación del río Ucayali en dos cauces denominados Canal Madre y Canal Puinahua. Este segundo tramo se encuentra comprendido entre las progresivas km 570+000 y km 840+000. La pendiente promedio de este tramo y en ambos cauces es de 0.055 ‰. El cauce del Canal Madre tiene una longitud de 270 km y es catalogado como el cauce principal del río. El cauce del Canal Puinahua se extiende en una longitud de 210 km.

El tercer y último tramo se ubica entre el fin de la bifurcación del río Ucayali (km 840+000) y la confluencia del mismo con el río Marañón (km 1035+000), que dan lugar al nacimiento del río Amazonas. La pendiente promedio de este tramo es de 0.028 ‰.

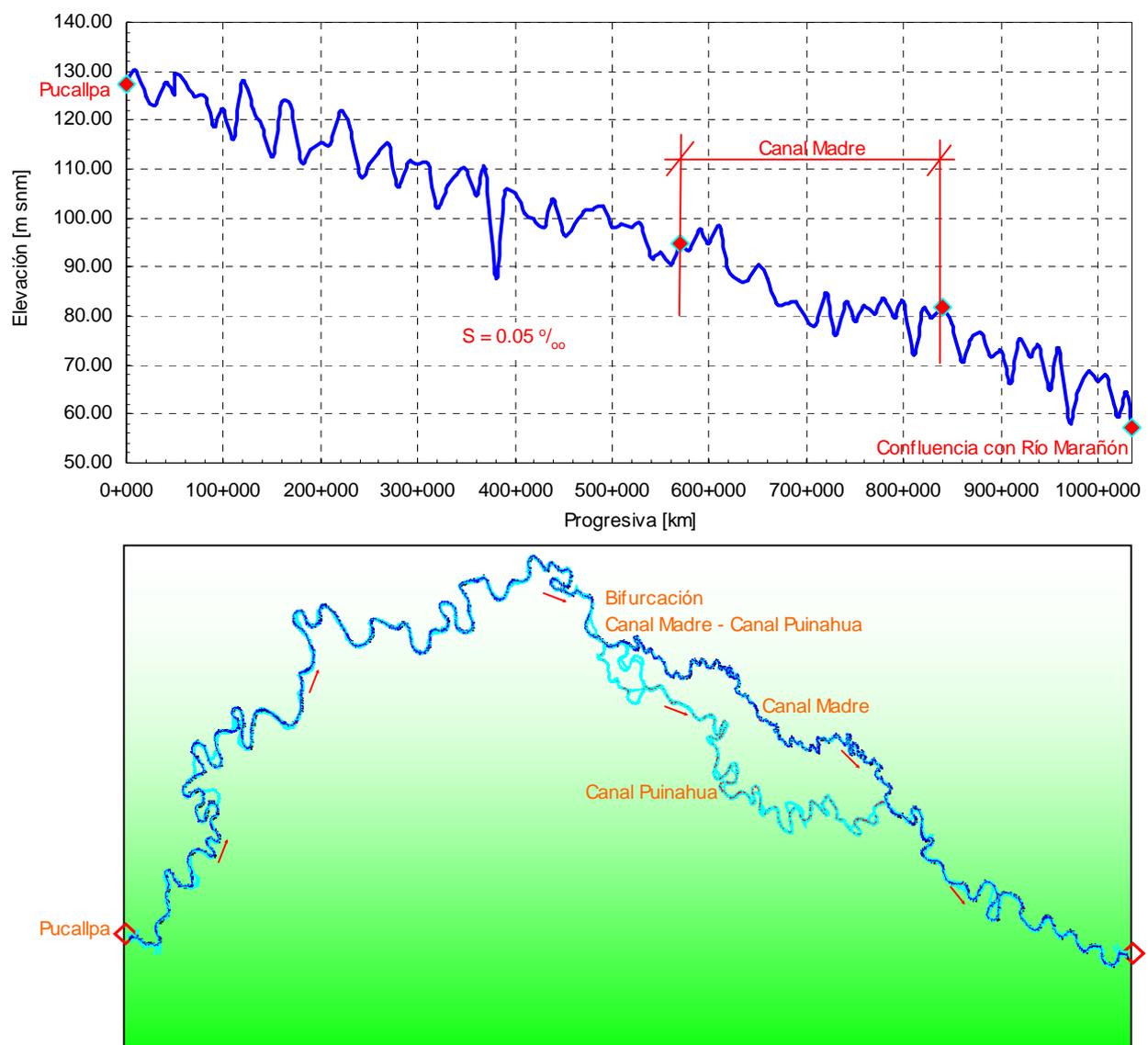


Figura 3.- Perfil longitudinal y vista en planta medido del thalweg del río Ucayali comprendido entre la ciudad de Pucallpa y la confluencia con el río Marañón. (Fuente: Alvarado - Ettmer, 2005, elaborado por los autores con la información proporcionada).

El ancho promedio del cauce del río en los tres tramos es de 600 m, sin embargo se tienen

sectores en los que el río alcanza un ancho de cauce inferior a los 400 m y mayor a 1500 m. El calado promedio es de 15 m. La relación ancho del cauce y profundidad (B/h) en época de crecidas es de 40. La velocidad promedio del río medido con ADCP es de 1.5 m/s [14].

3. ANÁLISIS DEL MATERIAL DE FONDO

En base a una campaña de muestreo, efectuada el año 2004, analizando el material de fondo del cauce del río Ucayali en el trayecto comprendido entre la ciudad de Pucallpa y la confluencia con el río Marañón, se presenta en la Figura 4 la clasificación del tamaño de las partículas de sedimentos para las dimensiones características D_{10} , D_{50} y D_{90} , que sirvieron de base para el análisis de degradación (erosión) del río, y determinación del tipo de material predominante en el fondo, así como también determinar la función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} .

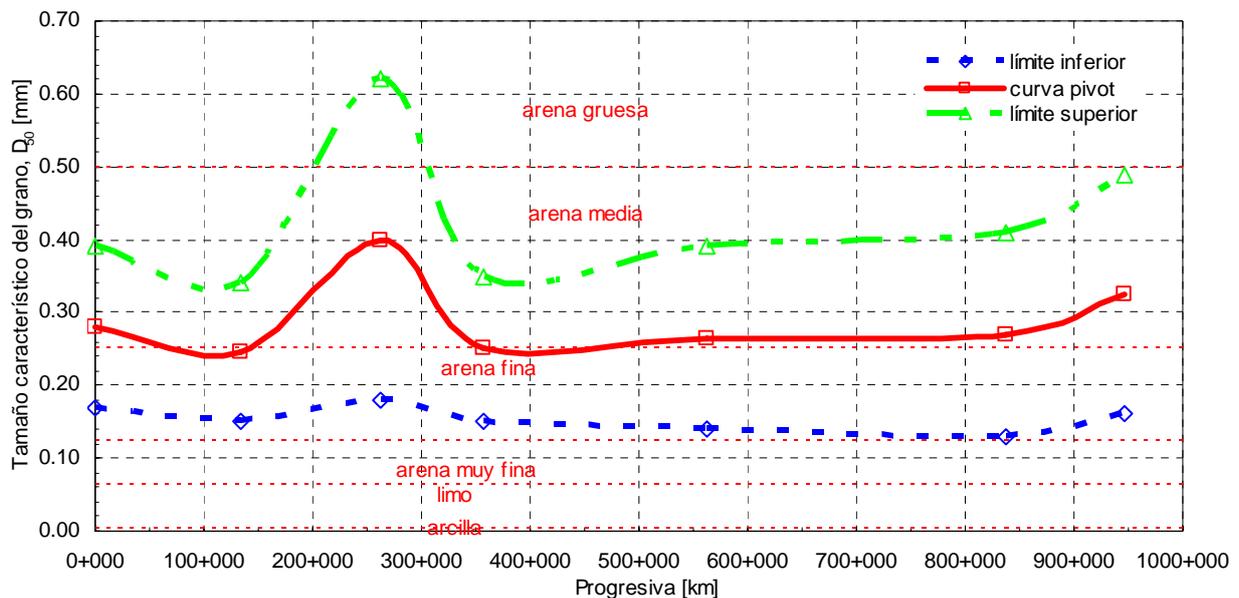


Figura 4.- Tipo predominante del material del fondo del río Ucayali en el tramo Pucallpa hasta confluencia con el río Marañón. Función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} .

La curva pivot de la Figura 4 muestra que el diámetro característica del sedimento es de 0.25 mm, el cual es un tamaño muy pequeño. Sólo una muestra del sedimento del material del fondo tomada en la progresiva km 250+000 muestra un diámetro característico de la partícula equivalente a 0.40 mm, debido a que aquí se ubica la afluencia del río Amacayacu. Las curvas límite inferior y superior que describen el tamaño característico del grano, D_{50} , muestran, que el diámetro determinante del material de fondo es una arena, con características de arena fina a arena gruesa, conforme la clasificación de la American Geophysical Union [15]. Siendo el material del río en características generales muy uniforme, el material de fondo en el tramo evaluado es calificado como un material arenoso fino.

El movimiento de los materiales del fondo para el mismo diámetro determinante comienza con velocidades promedio de entre 0.15 m/s y 0.50 m/s, Hjulström (1935) [13], ver Figura 5.

De la Figura 5 se concluye que por el diámetro de la muestra del sedimento, para una velocidad pequeña, la partícula de sedimento ya empieza a moverse. Además, una aproximación con la fórmula de Kresser (1964) [19] demuestra que este material ($D_{50} \approx 0.25$ mm) se encuentra en suspensión para velocidades sobre 0.94 m/s, ver ecuación (1).

$$D_{\text{limite}} = u_m^2 / 360 g \quad (1)$$

Donde:

D_{limite} [m] : Diámetro del grano con el sedimento en estado de suspensión
 u_m [m/s] : Velocidad promedio
 g [m/s²] : Aceleración de la gravedad

Así mismo, los cálculos efectuados con el programa HEC-RAS (un programa hidráulico-numérico en 1-dimensión del U.S. Army Corps of Engineers) muestran que ya para caudales mínimos (cerca de 2000 m³/s), las partículas de sedimentos ya se encuentran en estado de suspensión.

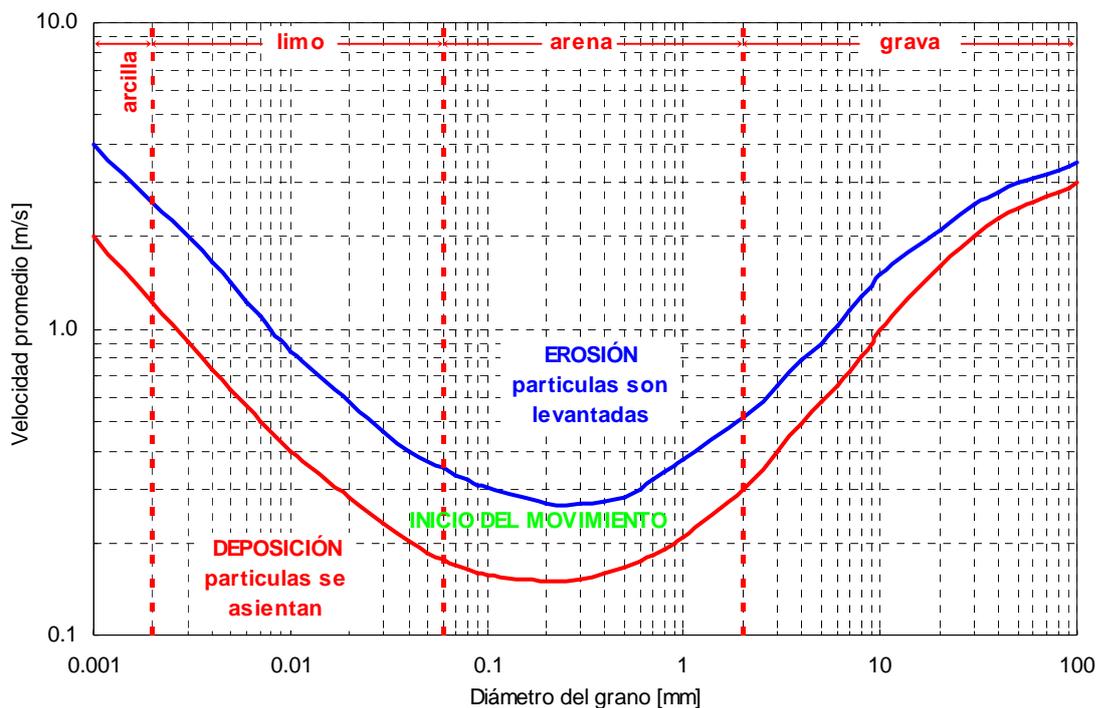


Figura 5.- Diagrama de Hjulström, velocidad crítica promedio del material de sedimento.

4. CAUDAL HISTÓRICO

Se ha evaluado la información histórica de caudales registrados en el río Ucayali para la estación hidrométrica de Pucallpa. En base a la capacidad hidráulica de las aproximadamente 2070 secciones tomadas a lo largo del río Ucayali en el área de evaluación se ha determinado que el caudal dominante del río Ucayali es de aproximadamente 4000 m³/s. Los valores históricos registrados y estimados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caudal histórico del Río Ucayali

| Descripción | Caudal [m ³ /s] | Fecha - Observación |
|---|----------------------------|--|
| Caudal Mínimo, $Q_{\text{mín}}$ | 2200 | 19.08.1985 |
| Caudal Mínimo Promedio, $Q_{\text{mín}p}$ | 2830 | Promedio mínima de la serie disponible |
| Caudal Dominante, Q_d | ~ 4000 | Capacidad hidráulica de la sección |
| Caudal Máximo Promedio, $Q_{\text{máx}p}$ | 16370 | Promedio máximo de la serie disponible |
| Caudal Máximo, $Q_{\text{máx}}$ | 20440 | 05.03.1984 |

5. DESCARGA DE SEDIMENTOS

En base a mediciones de sedimentos en suspensión registrados en Setiembre y Octubre del 2004 [5], se estimaron las correspondientes tasas para dichos eventos, ploteándose la data obtenida en la Figura 6, la cual permite una aproximación de la tasa de sedimentos en suspensión. Si bien se dispone de 7 escasos puntos registrados, esta figura pretende ser una aproximación para la estimación de los volúmenes de sólidos transportados durante diversos eventos de avenidas, pues los puntos muestran una buena correlación. Es importante aquí destacar que el caudal se encuentra limitado a una descarga un poco superior a los 20000 m³/s con referencia al caudal histórico máximo registrado y presentado en la Tabla 2. Como se muestra en la Figura 6, el transporte de sedimentos se ha escrito con la función empírica (2).

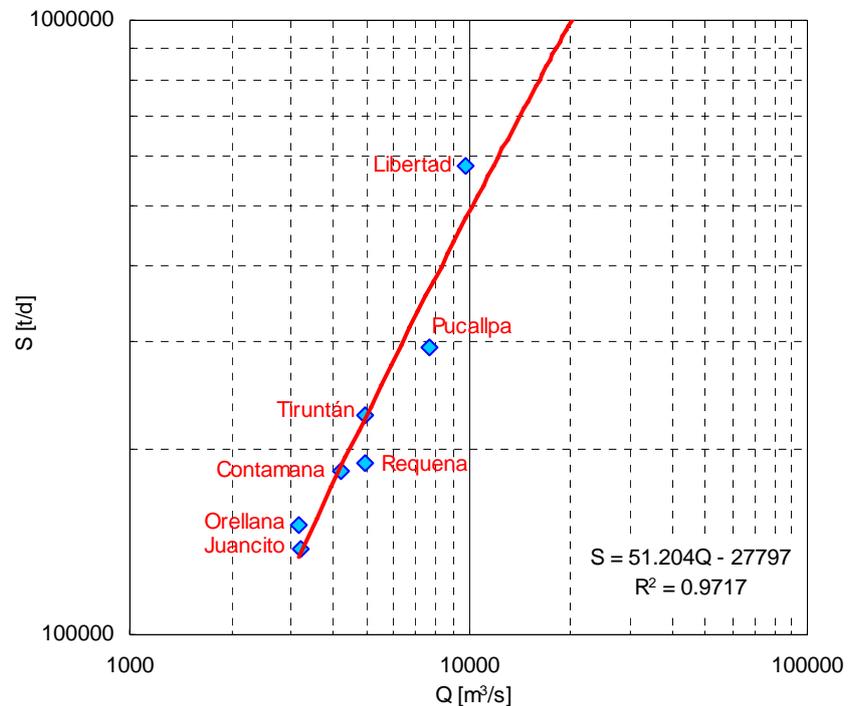


Figura 6.- Ploteo de la estimación tasa de sedimentos en suspensión y aforo de caudales en el río Ucayali (Agosto-Setiembre 2004).

$$S = 51.204Q - 27797 \quad (2), \text{ donde:}$$

S [t/d] : transporte de sedimentos
 Q [m³/s] : caudal

Así por ejemplo, para la medición efectuada en Contamana se tiene un caudal de 4200 m³/s y un transporte de sedimentos en suspensión equivalente a 187000 t/d. Para el caudal dominante de 4000 m³/s, se tiene un transporte de sedimentos en suspensión equivalente a 177000 t/d. La función empírica descrita arriba es limitante para el máximo caudal de aproximadamente 20500 m³/s. De esta manera mediante la línea de regresión descrita en la ecuación (2), se puede calcular un transporte de sedimentos máximo de aproximadamente 1000000 t/d. De esta manera es posible mediante la aplicación del caudal dominante, el cual tiene un valor de aproximadamente 4000 m³/s, efectuar un cálculo de la masa anual de agua y de la tasa anual de transporte de sedimentos en el río Ucayali, que ha sido estimada respectivamente en:

$$V_{\text{anual}} = Q_d (\sim 4000 \text{ m}^3/\text{s}) * 86400 \text{ s/d} * 365.25 \text{ d} = 12600 \text{ Millones m}^3$$

$$S_{\text{anual}} = \{51.204 * Q_d (\sim 4000) - 27797\} \text{ t/d} * 365.25 \text{ d} = 65 \text{ Millones t}$$

Los valores aquí estimados se encuentran aceptables en una comparación práctica con los valores citados por Gibbs (1967) y Guyot (2007) [12] para el río Amazonas medido en Óbidos, de donde se concluye que el río Ucayali tiene una contribución de aproximadamente

el 15 % de la tasa anual de sedimentos en suspensión. En consecuencia las aproximaciones descritas arriba demuestran, que el fondo del río Ucayali se mueve sobre un muy grande espectro de descargas típicas. Esto demuestra especialmente que también en las curvas abruptas o en los malos pasos la situación hidráulica en la mayoría de los casos analizados que se presentan adelante es de muy alta erosión, y que por lo tanto la erosión y el movimiento de las curvas abruptas son continuos. Para una aproximación mayor se han identificado diferentes curvas y se ha efectuado un cálculo de la fuerza tractiva. Estos se presentan en el capítulo 7.

6. PARÁMETROS DE LAS CURVAS ABRUPTAS SELECCIONADAS Y APROXIMACIÓN DE LA FÓRMULA PARA ESTIMACIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE SOCAVACIÓN

Se tomaron parámetros característicos de las curvas abruptas del río Ucayali, en el tramo comprendido entre la ciudad de Pucallpa y la confluencia con el río Marañón. Se determinó la existencia de 50 curvas abruptas, y de estas se seleccionaron 7 curvas, cuyos parámetros, B, R y D_{50} se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3.- Parámetros B, R, R/B y D_{50} para 7 curvas abruptas (o límite de curvas abruptas, cuando el radio y longitud de curva no son muy grandes, de un total de 50) seleccionadas, con ángulo de curva, $\alpha > 180^\circ$, a lo largo del cauce del río Ucayali, entre Pucallpa y la confluencia con el río Marañón. Base de datos año 2005.

| Ubicación de la curva abrupta a lo largo del río | Progresiva [km] | B [m] | R [m] | R/B [-] | D_{50} [mm] | Clasificación |
|--|-----------------|--------|---------|---------|---------------|------------------|
| Pucallpa - 40 km aguas abajo | 40+000 | 720.00 | 1300.00 | 1.80 | 0.28 | arena media/fina |
| Tiruntán | 134+000 | 700.00 | 1600.00 | 2.29 | 0.25 | arena fina |
| Contamáná - 30 km aguas abajo | 292+800 | 700.00 | 2200.00 | 3.14 | 0.40 | arena media |
| Orellana - 50 km aguas abajo | 406+700 | 550.00 | 2000.00 | 3.64 | 0.25 | arena fina |
| Juancito - 7 km aguas abajo | 570+100 | 650.00 | 2000.00 | 3.08 | 0.27 | arena media/fina |
| Requena - 14 km aguas abajo | 850+900 | 600.00 | 2000.00 | 3.33 | 0.27 | arena media/fina |
| Libertad - 25 km aguas arriba | 971+900 | 740.00 | 2000.00 | 2.70 | 0.33 | arena media |

La información de la topografía del cauce en curvas de ríos es escasa, por esta razón se han llevado a cabo experimentos en laboratorio bajo condiciones controladas para estudiar de forma cualitativa las condiciones en curvas. Experimentos relevantes se han efectuado en canales curvos y meándricos como los desarrollados previamente por Yen (1967 y 1970), Hooke (1970 y 1974), Suttmuller (1980), Odgaard (1982), Struiksmá (1983), Olesen (1985), Talmon (1992), Blanckaert y Graf (1999) y Blanckaert (2002). Los principales parámetros de los canales experimentales utilizados a la fecha han sido tales como radio, R; ancho del canal, B; ángulo de la curva, α ; tamaño medio de la partícula de sedimento, D_{50} ; R/B ratio.

Los experimentos fueron ejecutados en canales curvos o meandriiformes con un ángulo de curva, α , variando entre 55° y 180° . Solamente unos cuantos experimentos se efectuaron con una relación $R/B \leq 2.5$ o 3 y con un radio de curvatura en todos los casos mayor de 1.5 m, lo que significó una curva no abrupta. El tamaño medio característico utilizado en dichos experimentos varió entre 0.088 mm y 2.10 mm. En la Figura 7 se presentan las características relativas al tamaño del material de fondo, D_{50} , versus la relación R/B utilizados en experimentos previos, Alvarado (2004) [1], con punto rojo y las características actuales de las 7 curvas seleccionadas del río Ucayali.

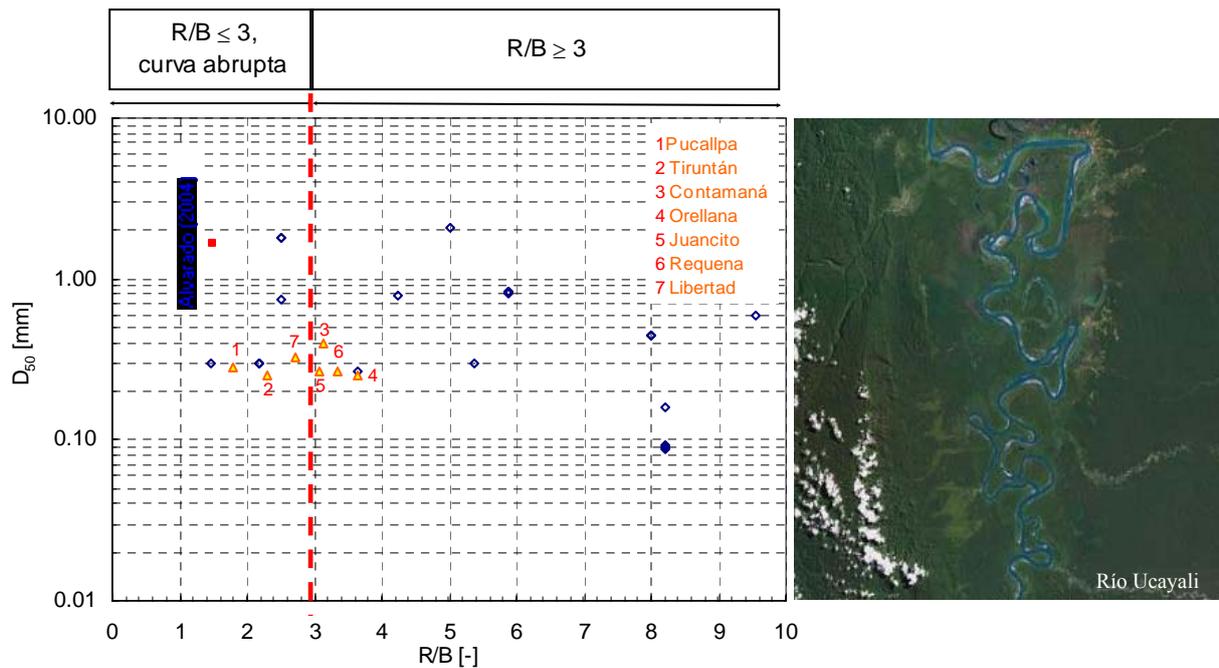


Figura 7.- Tamaño característico del material de fondo, D_{50} , vs relación R/B , para experimentos previos, Alvarado (2004) con punto rojo y muestras cercanas a curvas abruptas en el río Ucayali, tramo Pucallpa hasta confluencia con el río Marañón. Derecha, curvas abruptas en el río Ucayali, vista satelital. (Fuente: © Google Earth 2007).

En la Figura 8 se muestra la importancia del transporte de fondo y en suspensión distribuido sobre el calado dependiendo de la relación entre la velocidad de tensión de corte (en el fondo) y la velocidad de caída de la partícula de sedimento, u_*/w_s , y el tamaño del diámetro característico, D_{50} , de la arena.

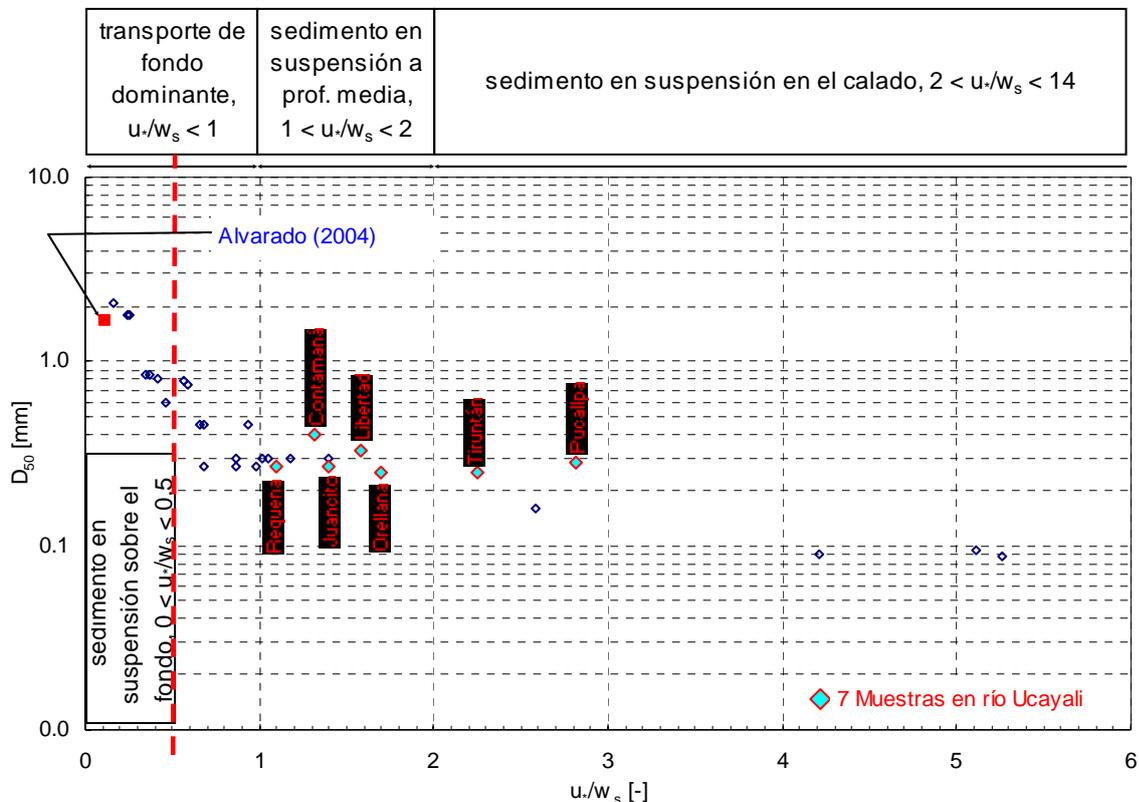


Figura 8.- Rango de la carga de transporte de fondo y en suspensión dependiendo de la relación u_*/w_s , y del tamaño característico de la partícula, D_{50} , de la arena para experimentos previos, Alvarado (2004) con punto rojo, y muestras cercanas a curvas abruptas en el río Ucayali, tramo Pucallpa hasta confluencia con el río Marañón.

Para la presente investigación al comparar las muestras del río Ucayali, data disponible en Tabla 3, con las de experimentos previos se concluye que en el río Ucayali el transporte de sólidos en suspensión es el dominante, lo mismo que se confirma en Capítulo 7 y 8.

Otro aspecto importante a mencionar aquí es sobre las características que se presentan en la Tabla 4, en donde se compara los principales parámetros de las curvas abruptas seleccionadas en la Tabla 3 con el modelo experimental [1]. Aquí la característica resaltante es la relativa al diámetro de la partícula de sedimento, puesto que en el experimento éste es y tuvo que ser por motivos prácticos 6.6 veces más grande que la partícula de sedimento del río Ucayali.

Tabla 4.- Parámetros B, R, R/B y D_{50} para 7 curvas abruptas (o límite de curvas abruptas, cuando el radio y longitud de

| Parámetros | Alvarado (2004) | Río Ucayali |
|------------------------|-----------------|-------------|
| Ancho del cauce, B [m] | 1 | 600 |
| Radio del canal, R [m] | 1.5 | 1300 a 2200 |
| R/B [-] | 1.5 | 2 a 4 |
| D_{50} [mm] | 1.65 | 0.25 |
| u^*/w_s | < 1 | 1 a 3 |

Para la evaluación preliminar de la profundidad máxima de socavación en época de crecida en el río Ucayali, se utilizaron las secciones medidas en dicha época en el río Ucayali. Dichas secciones corresponden a las curvas de los malos pasos que se presentan en la Tabla 6, del Capítulo 7, y de las cuales se estudiaron seis, que son las que se presentan en la Tabla 5. Las secciones medidas de las curvas descritas en la Tabla 3 no pueden ser aplicadas, pues corresponden a secciones ploteadas con mediciones efectuadas en época de vaciante.

Tabla 5.- Aplicación de semejanza cualitativa de la fórmula de Alvarado (2004) para las curvas abruptas que se presentan en el río Ucayali.

| Curva Abrupta Nombre | Progres. [km] | Q [m³/s] | NA Apr. [m snm] | NF Apr. [m snm] | h_r [m] | NA C. Abp. [m snm] | NF C. Abp. [m snm] | h_{max} [m] | B [m] | R [m] | D_{50} [mm] | h_r / h_{max} [-] | h_{max} / h_r [-] | f [-] | R/B [-] | B/R [-] | $1 + f (B/R)$ [-] | B/ h_{max} [-] |
|---------------------------|------------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|------------------|----------|----------|------------------|------------------------|------------------------|----------|------------|------------|----------------------|---------------------|
| Monte Blanco | 235+000 | 4000 | 128.50 | 117.62 | 10.88 | 128.00 | 104.00 | 24.00 | 600 | 1500 | 0.35 | 0.45 | 2.21 | 3.0 | 2.5 | 0.4 | 2.20 | 25 |
| Catalina | 433+000 | 3000 | 115.20 | 102.71 | 12.49 | 114.80 | 94.34 | 20.46 | 490 | 2200 | 0.25 | 0.61 | 1.64 | 2.9 | 4.5 | 0.2 | 1.65 | 24 |
| Monte Bello | 530+000 | 4000 | 128.00 | 100.50 | 27.50 | 127.00 | 89.59 | 37.41 | 470 | 1400 | 0.26 | 0.74 | 1.36 | 1.1 | 3.0 | 0.3 | 1.37 | 13 |
| Painaco | 591+000 | 3000 | 104.84 | 97.67 | 7.17 | 104.60 | 85.50 | 19.10 | 540 | 2800 | 0.26 | 0.38 | 2.66 | 8.6 | 5.2 | 0.2 | 2.66 | 28 |
| Entrada canal Puinahua | 603+000 | 3000 | 106.58 | 98.00 | 8.58 | 106.00 | 93.00 | 13.00 | 550 | 3600 | 0.26 | 0.66 | 1.52 | 3.4 | 6.5 | 0.2 | 1.52 | 42 |

Los resultados de la Tabla 3 muestran que la fórmula propuesta: $\frac{h_{max}}{h} = 1 + 3\left(\frac{B}{R}\right)$, con un factor $f = 3$ denota mayor aceptación para curvas abruptas con una relación B/h_{max} de 20 a 25 y con una relación R/B de 2 a 4, donde se debe considerar que el ancho de cauce se debería aproximar a uno de 500 m a 700 m y el radio de curvatura debería estar en el rango de 1300 m a 2500 m.

Como se observa, la fórmula propuesta no implica el uso del diámetro característico de la partícula de sedimento, D_{50} , el cual será tomado en cuenta en futuras investigaciones, sin embargo la fórmula sirve para una estimación cualitativa de la profundidad máxima de erosión in situ y para ello se requiere trasladar con mucho cuidado las mediciones experimentales para su aplicación en campo.

7. FUERZA TRACTIVA Y OTROS PARÁMETROS HIDRÁULICOS RELEVANTES EN LAS CURVAS ABRUPTAS DE LOS MALOS PASOS

Para una primera aproximación del presente artículo se ha calculado la fuerza tractiva y otros parámetros hidráulicos tales como pendiente de energía y radio hidráulico, los cuales son relevantes en todos los Malos Pasos que se enumeran en la Tabla 6.

El parámetro más importante es el referente al cálculo de la fuerza tractiva, el cual se ha efectuado preliminarmente mediante el modelo uni-dimensional HEC-RAS con la ecuación (3).

El cálculo se basa en la capacidad promedio hidráulica de las secciones en el río Ucayali, el cual es llamado caudal dominante y es el caudal típico a lo largo del río según la forma del área fluvial. De esta manera los cálculos se han basado en la aplicación del caudal dominante de 4000 m³/s.

$$\tau = \rho * g * R * I_E \quad (3)$$

con

| | | | |
|--------|----------------------|---|----------------------------|
| τ | [N/m ²] | : | fuerza tractiva al fondo |
| ρ | [kg/m ³] | : | densidad del agua |
| g | [m/s ²] | : | aceleración de la gravedad |
| R | [m] | : | radio hidráulico |
| I | [-] | : | pendiente de energía |

Se recalca una vez más que estos cálculos son un aproximación preliminar de la fuerza tractiva en las curvas de los Malos Pasos, las cuales han sido tomadas como sitios característicos en el río Ucayali.

A continuación se presenta la descripción de las curvas en dos malos pasos:

- el mal paso Monte Blanco ubicado en el km 235+000, que representa un tramo ya casi en equilibrio, y
- el mal paso Yahuarango en el km 476+000, con secciones transversales típicas de una curva.

Mal paso No. 2, Monte Blanco, km 235+000. Tiene una longitud de cercana a los 3100 m, con un tramo en línea recta de aproximadamente 2000 m, y se encuentra ubicado al inicio de una curva abrupta que tiene un ángulo mayor a 180° y un radio de aproximadamente 1500 m. El ancho de sección promedio es de 600 m, ver Figura 9.

Los valores de fuerza tractiva, la pendiente de energía y el radio hidráulico se presenta en la Figura 10, donde se muestra que la fuerza tractiva para el caudal dominante de 4000 m³/s se sitúa por arriba de los valores de la fuerza tractiva crítica, la cual se representa mediante las dos líneas que indican los límites superior e inferior de la fuerza tractiva para el diámetro característico del sedimento, D₅₀ = 0.25 mm, que son de 3 N/m² y 0.5 N/m², acorde a Lange / Lecher (1991).

Tabla 6.- Malos Pasos en el Río Ucayali, tramo ciudad de Pucallpa y confluencia con el río Marañón.

| No. | Nombre del Mal Paso | Progresiva [km] |
|-----|----------------------------|-----------------|
| 1 | Espinal* | 121+000 |
| 2 | Monte Blanco | 235+000 |
| 3 | Portugal | 268+000 |
| 4 | Catalina | 433+000 |
| 5 | Yahuarango | 476+000 |
| 6 | Monte Bello | 530+000 |
| 7 | Painaco | 591+000 |
| 8 | Entrada Canal Puinahua | 603+000 |
| 9 | Pacaya (en Canal Puinahua) | 775+000 |
| 10 | Salida Canal Puinahua | 854+000 |
| 11 | Yanashpa | 928+000 |
| 12 | Tibe Playa | 1002+000 |

* La data no estuvo disponible para su evaluación.

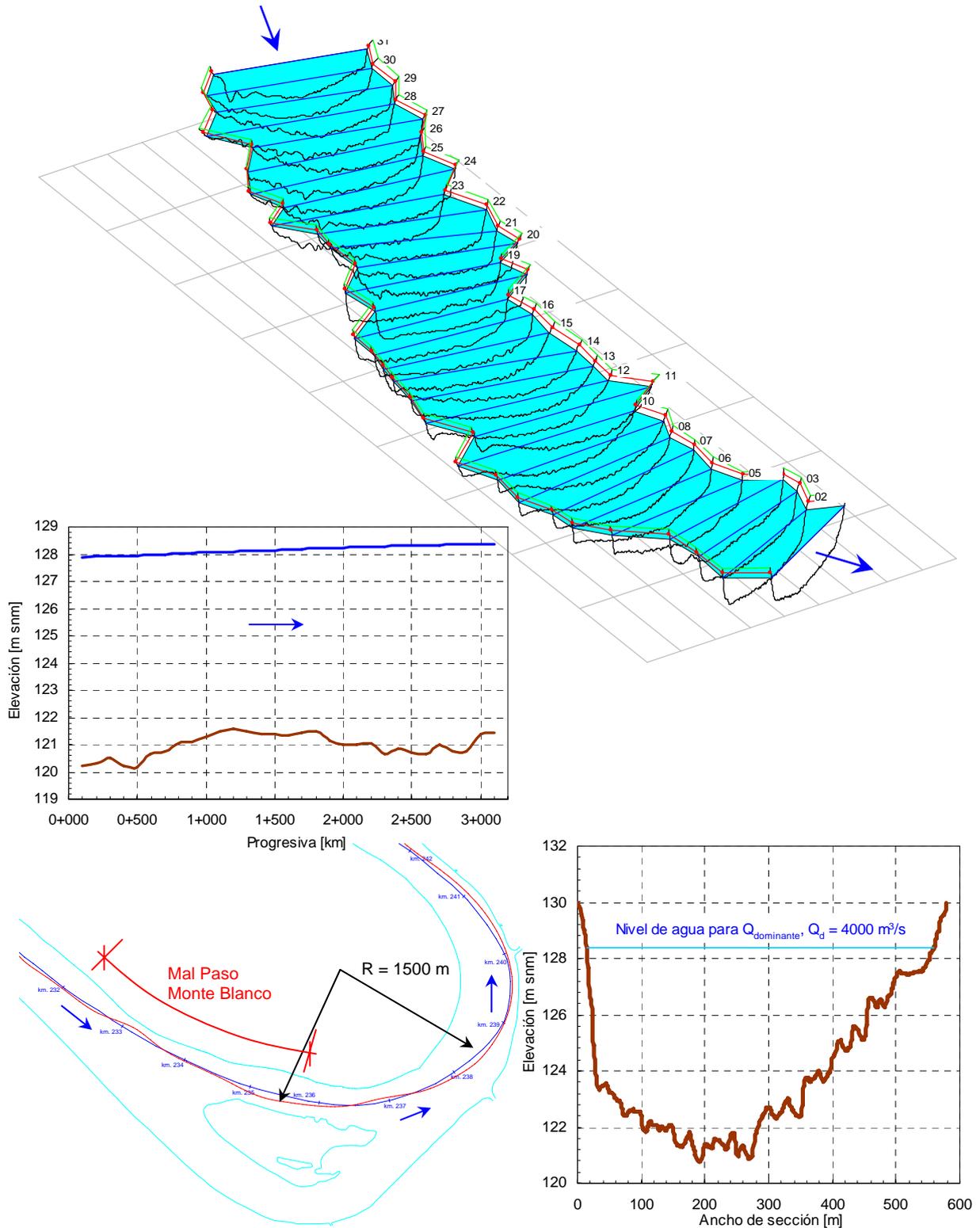


Figura 9.- Arriba e izquierda, vista en perspectiva tridimensional, perfil longitudinal y en planta del mal paso No. 2, Monte Blanco, km 235+000. Abajo derecha, sección típica para el caudal dominante, $Q_d = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$. La relación promedio de ancho de sección y calado es de aproximadamente $B/h = 60$.

La fuerza tractiva en el tramo analizado tiene una variación promedio de 8 N/m^2 a 10 N/m^2 , y sólo al inicio del mal paso alcanza valores de 12 N/m^2 . Se resume que el mal paso muestra una situación equilibrada en la cual no se presentan muchas diferencias en los valores

promedio de fuerza tractiva, pendiente de energía y radio hidráulico. Se concluye que el mal paso Monte Blanco se encuentra en un estado permanente de erosión.

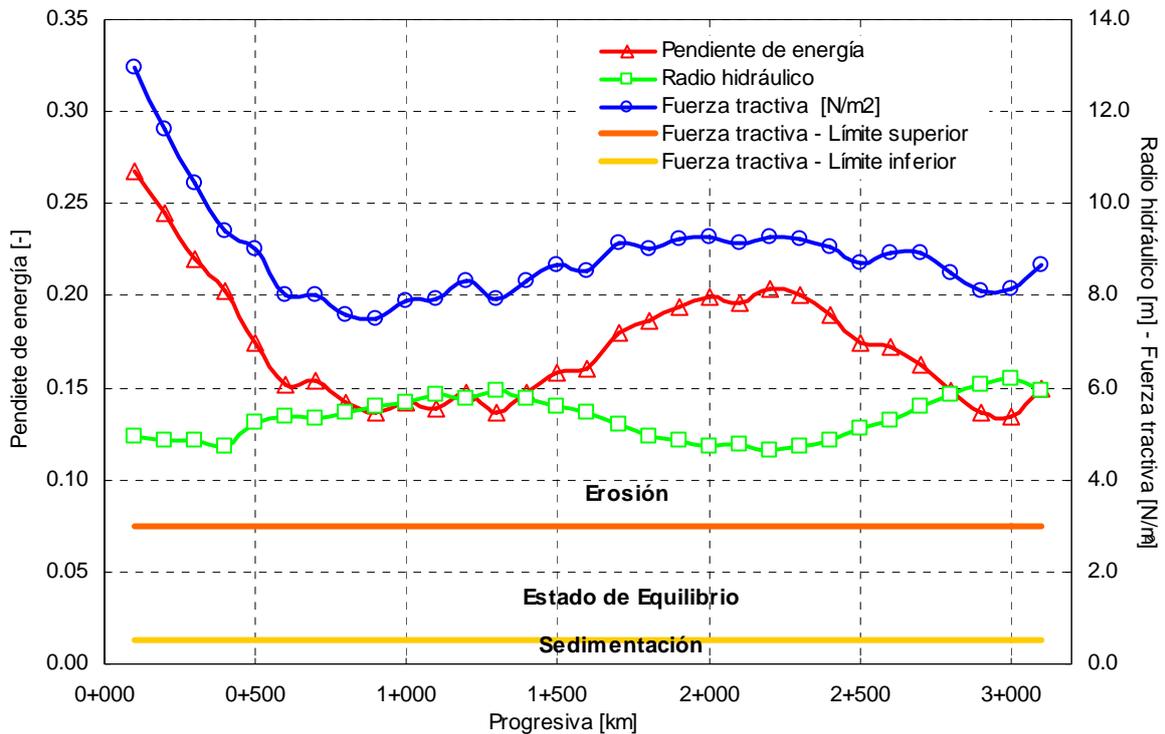


Figura 10.- Río Ucayali, km 235, mal paso Nr. 2, Monte Blanco. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

Mal Paso No. 5, Yahuarango, km 476+000. Para éste mal paso, la perspectiva tridimensional, perfil longitudinal, vista en planta y sección transversal promedio que se muestran en la Figura 11 muestran que aquí se tiene una situación diferente a la del caso anterior. La curva es un poco más pequeña, con un radio de 1200 m y una vista a la sección transversal muestra una típica estructura de la orilla para las curvas externa e interna.

La fuerza tractiva tiene en un primer tramo más o menos un valor de 12 N/m^2 , muy similar a la situación del mal paso Monte Blanco, porque se ubicaba al inicio de la curva abrupta. Sin embargo, en éste caso la información registrada del mal paso Yahuarango se registra en gran parte de toda una curva abrupta, y por ende aquí la fuerza tractiva se incrementa a valores extremos sobre los 30 N/m^2 , con un valor máximo de 90 N/m^2 .

La Figura 12 muestra así que en el tramo entre las progresivas km 2+000 hasta km 3+000 se presenta una muy grande capacidad de erosión y se espera que en éste tramo la dinámica de la curva sea más rápida. Se espera una profunda erosión en el calado, así como también sobre la orilla externa.

Es importante indicar que una aproximación a los valores de fuerza tractiva por las márgenes es posible con: $\tau_{\text{márgenes}} = 0,75 * \tau$ (Ven te Chow, 1973) [28].

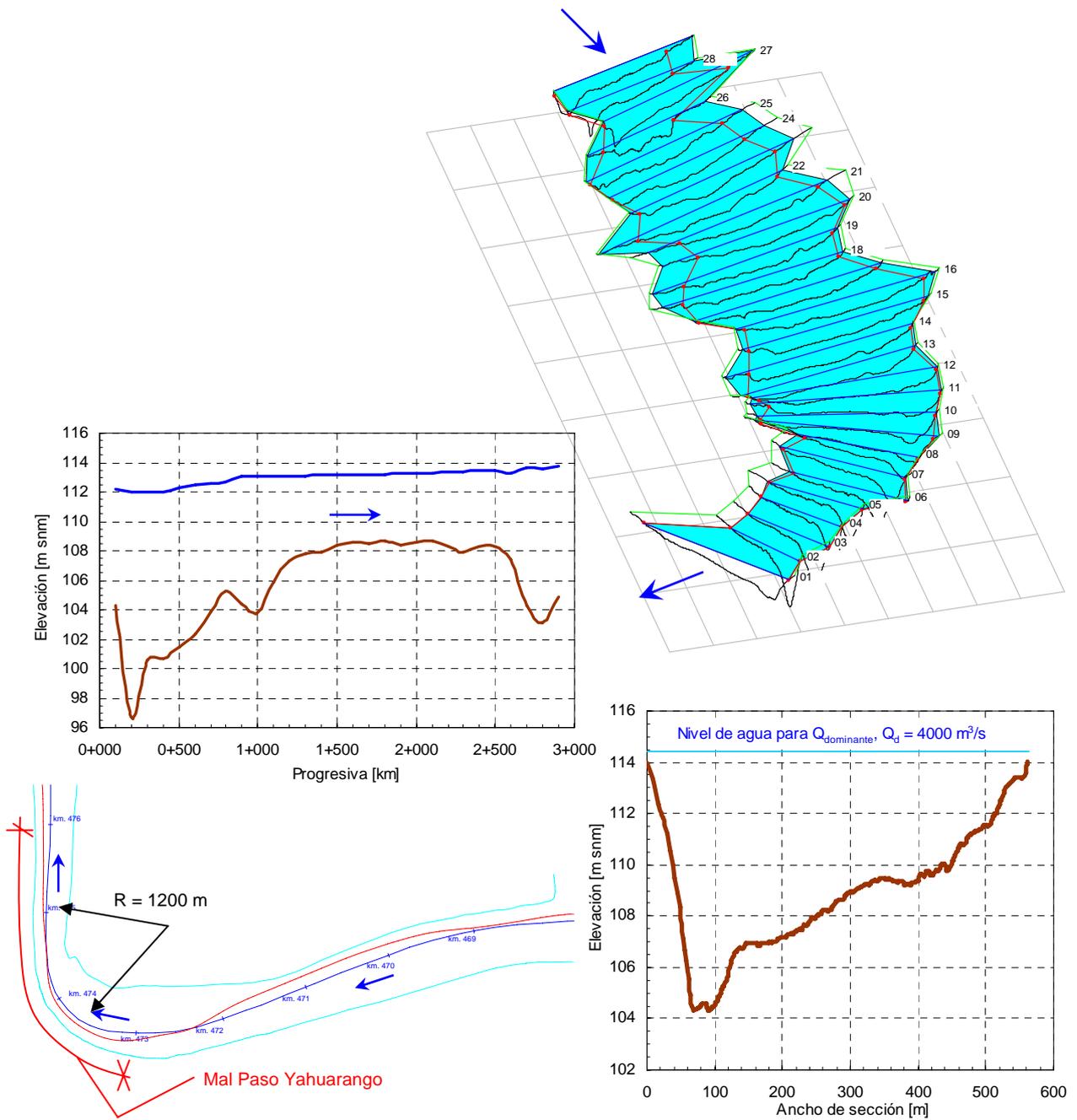


Figura 11.- Arriba e izquierda, vista en perspectiva tridimensional, perfil longitudinal y en planta del mal paso No. 5, Yahuarango, km 476+000. Abajo derecha, sección típica para el caudal dominante, $Q_d = 4000$ m³/s. La relación promedio de ancho de sección y calado es de aproximadamente $B/h = 60$.

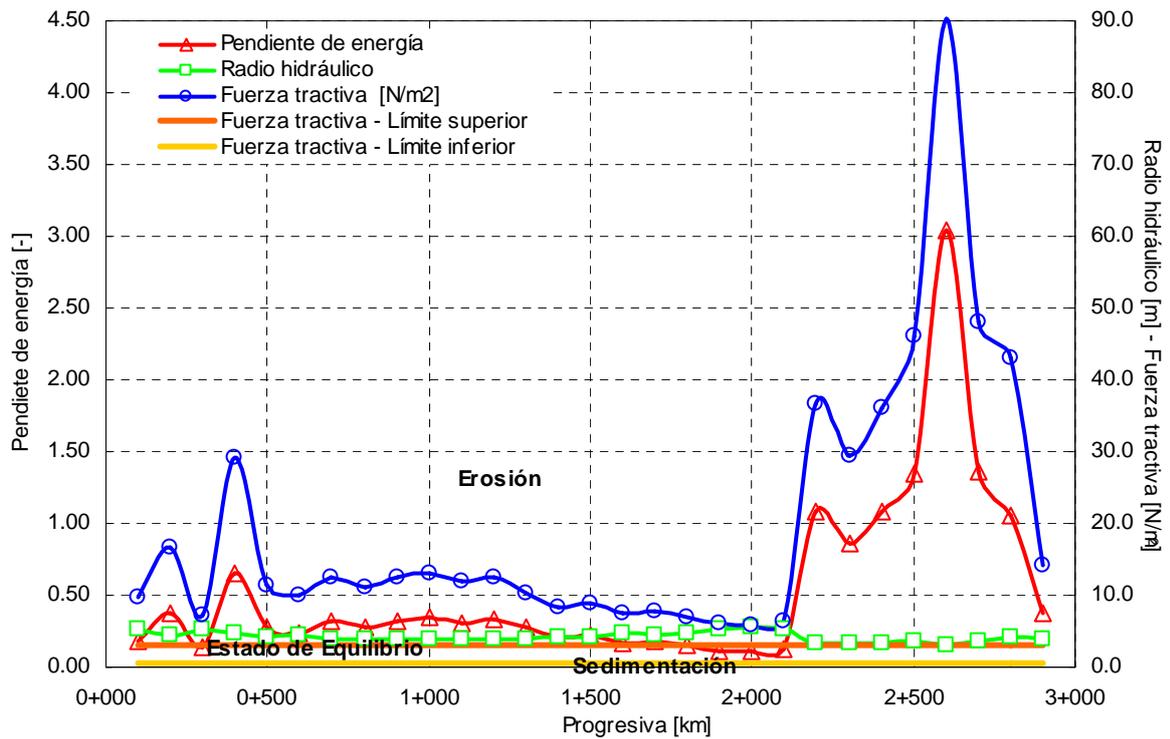


Figura 12.- Río Ucayali, km 476, mal paso Nr. 5, Yahuarango. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

En las Figuras 13 a 21 se muestra la fuerza tractiva para el caudal dominante de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, así como los otros parámetros relevantes como pendiente de energía y radio hidráulico.

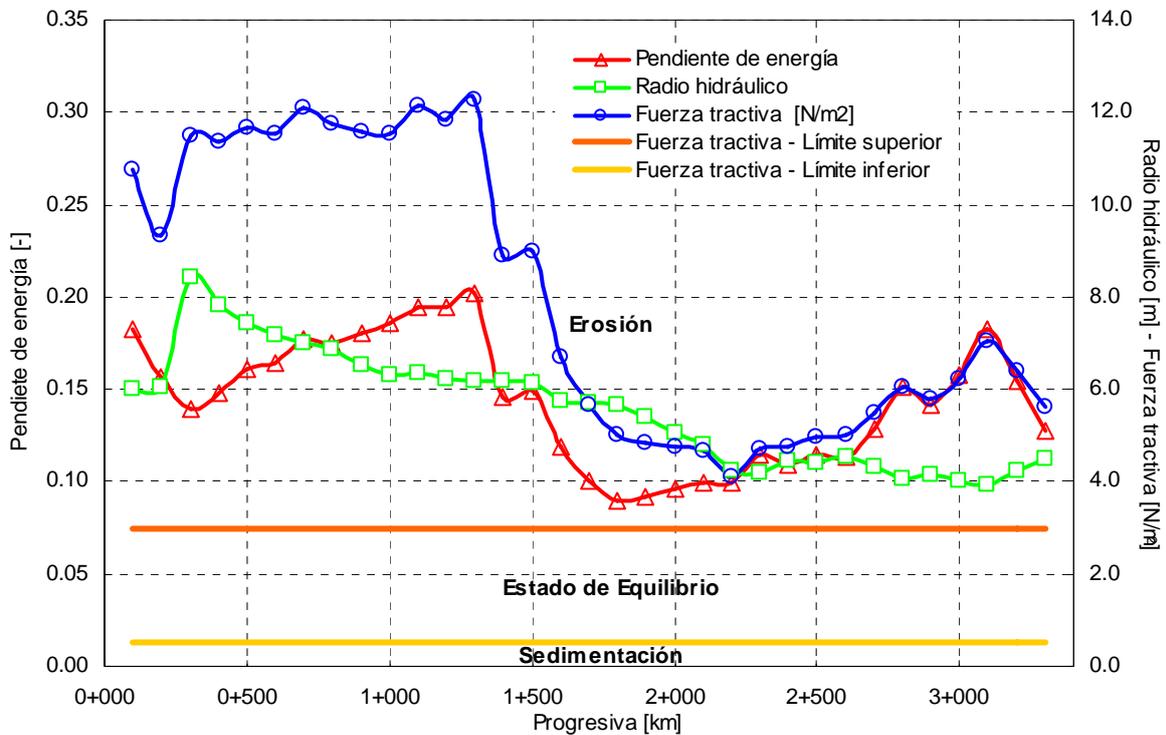


Figura 13.- Río Ucayali, km 268, mal paso Nr. 3, Portugal. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de

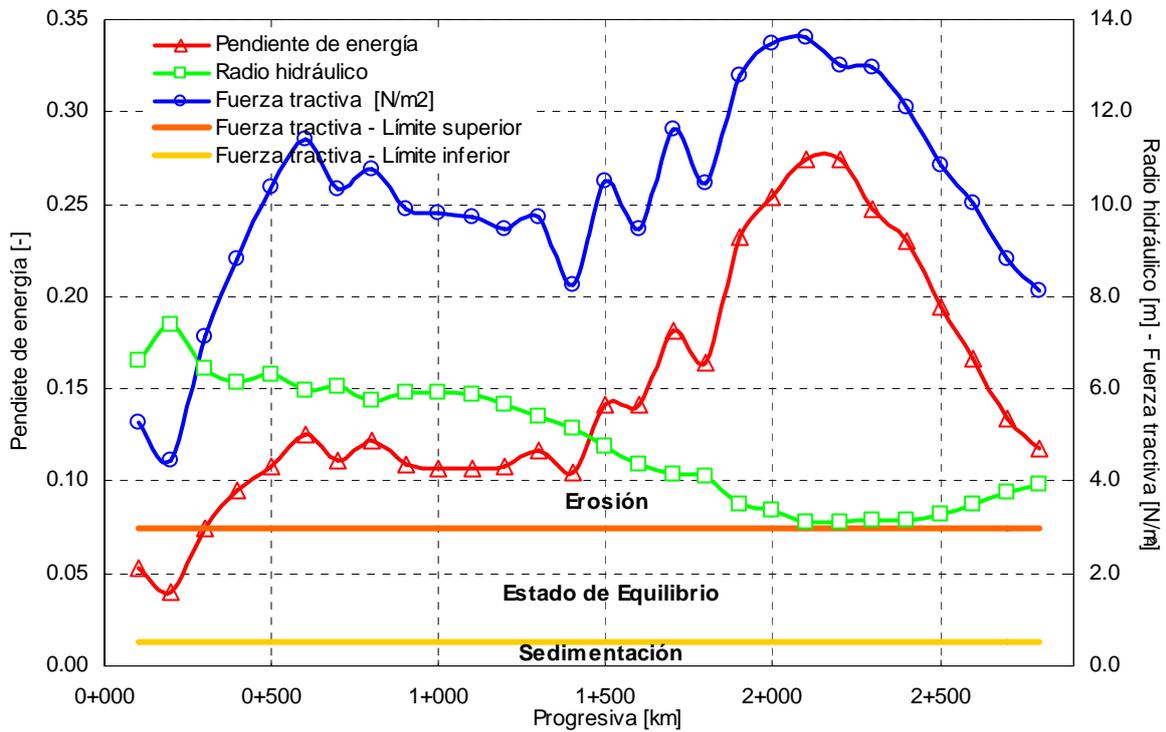


Figura 14.- Río Ucayali, km 433, mal paso Nr. 4, Catalina. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de

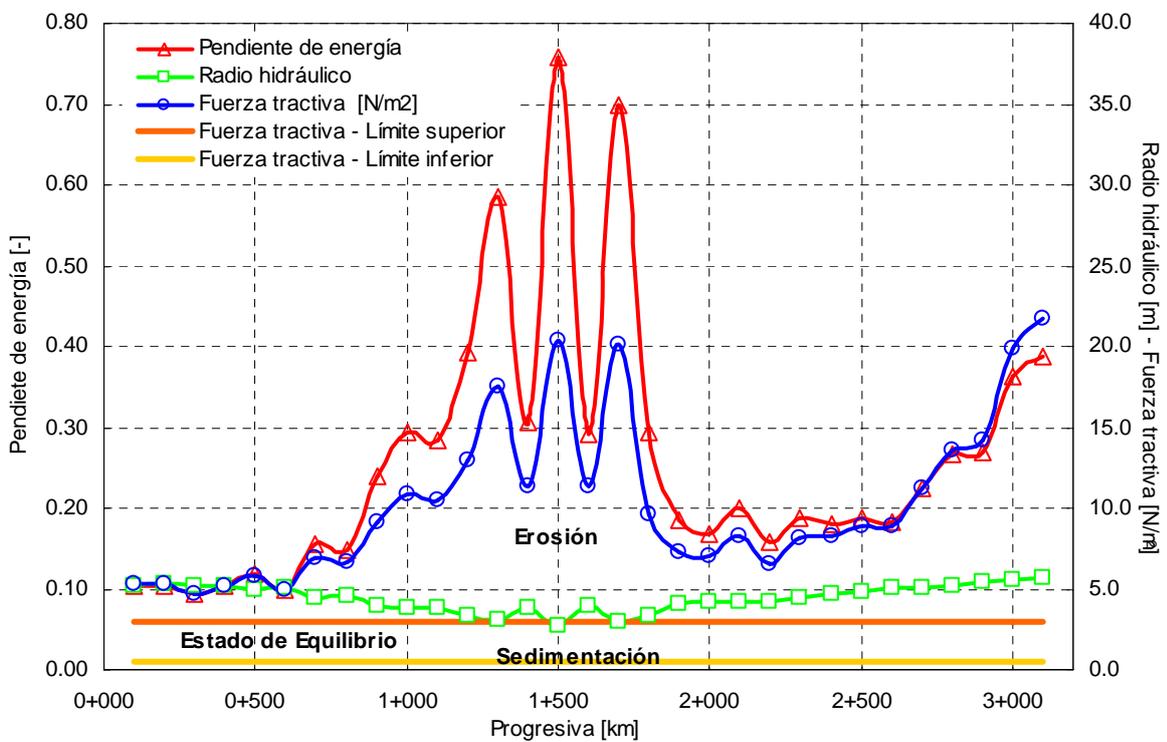


Figura 15.- Río Ucayali, km 530, mal paso Nr. 6, Monte Bello. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

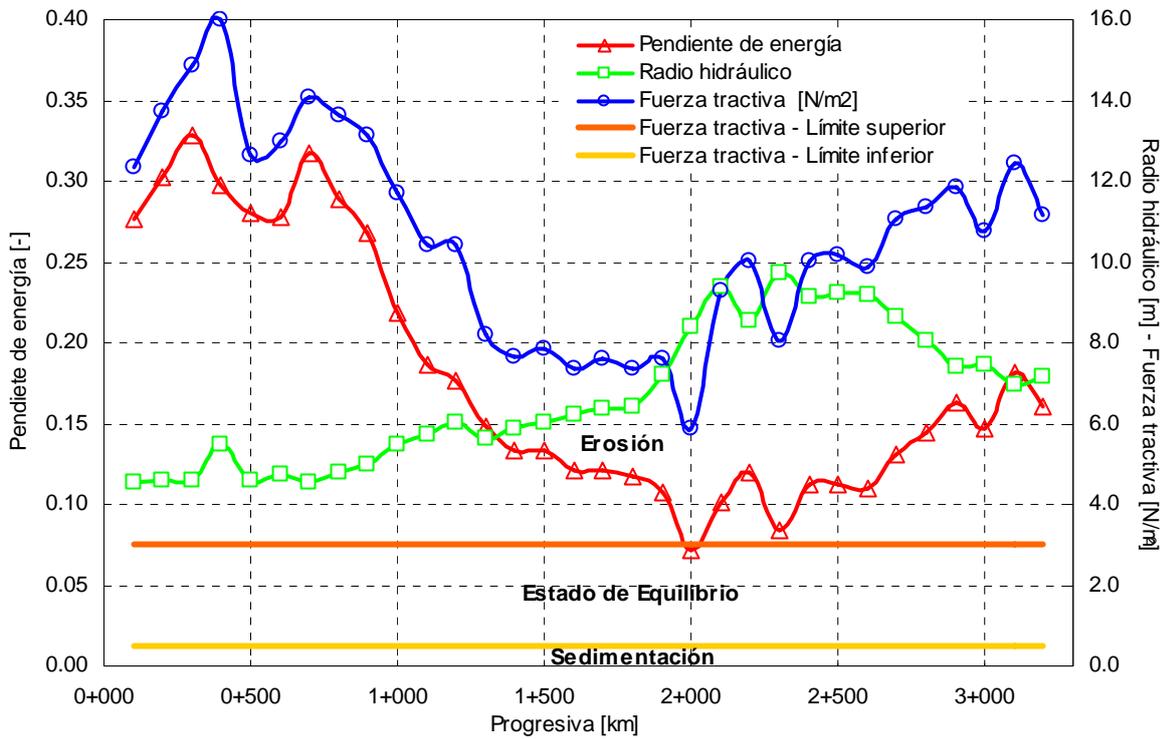


Figura 16.- Río Ucayali, km 591, mal paso Nr. 7, Painaco. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

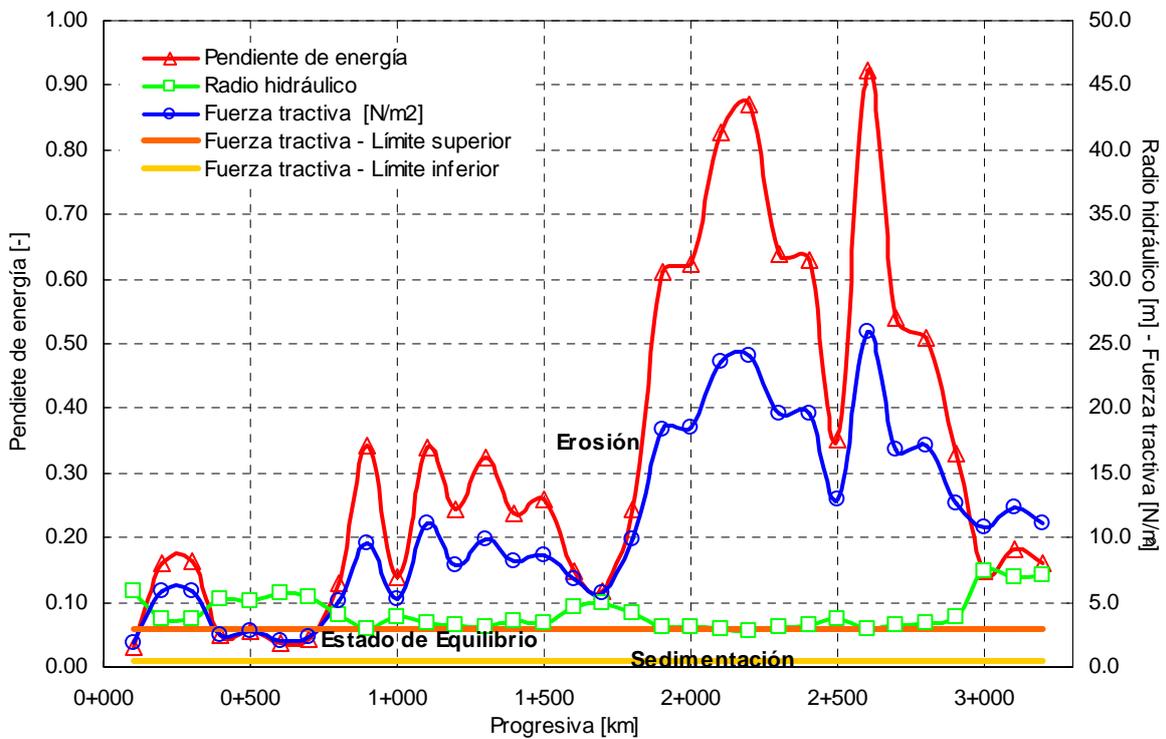


Figura 17.- Río Ucayali, km 603, mal paso Nr. 8, Puinahua. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

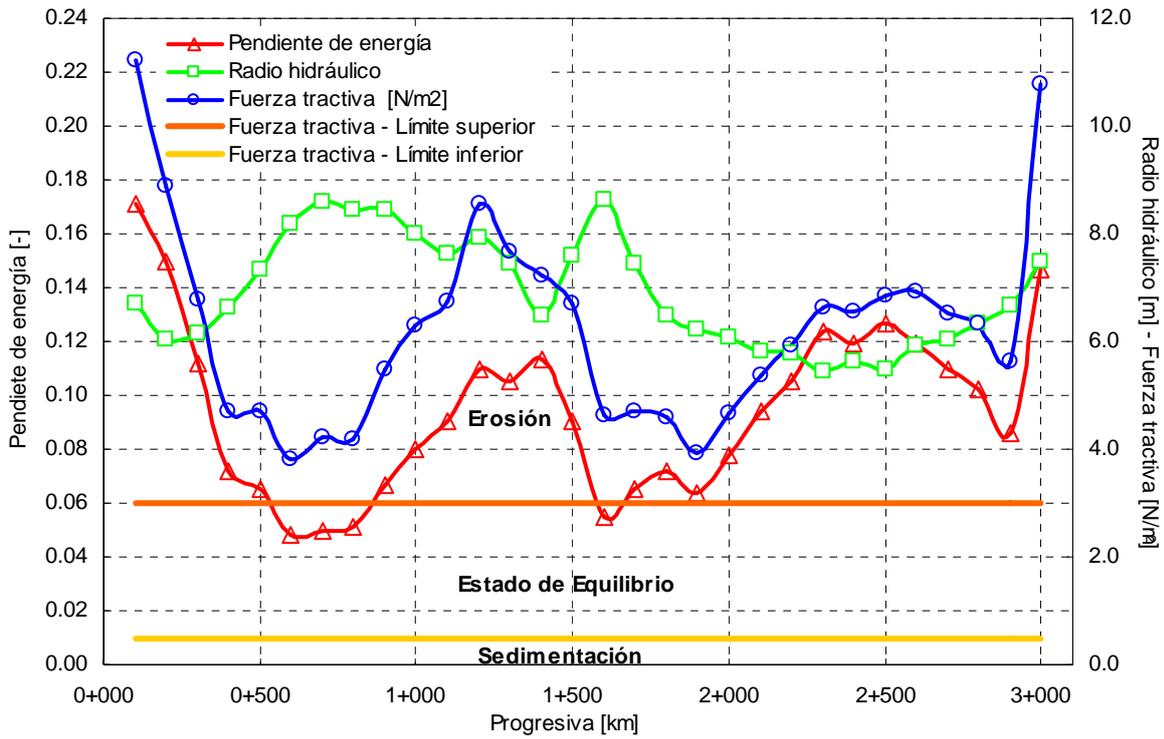


Figura 18.- Río Ucayali, km 775, mal paso Nr. 9, Pacaya. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

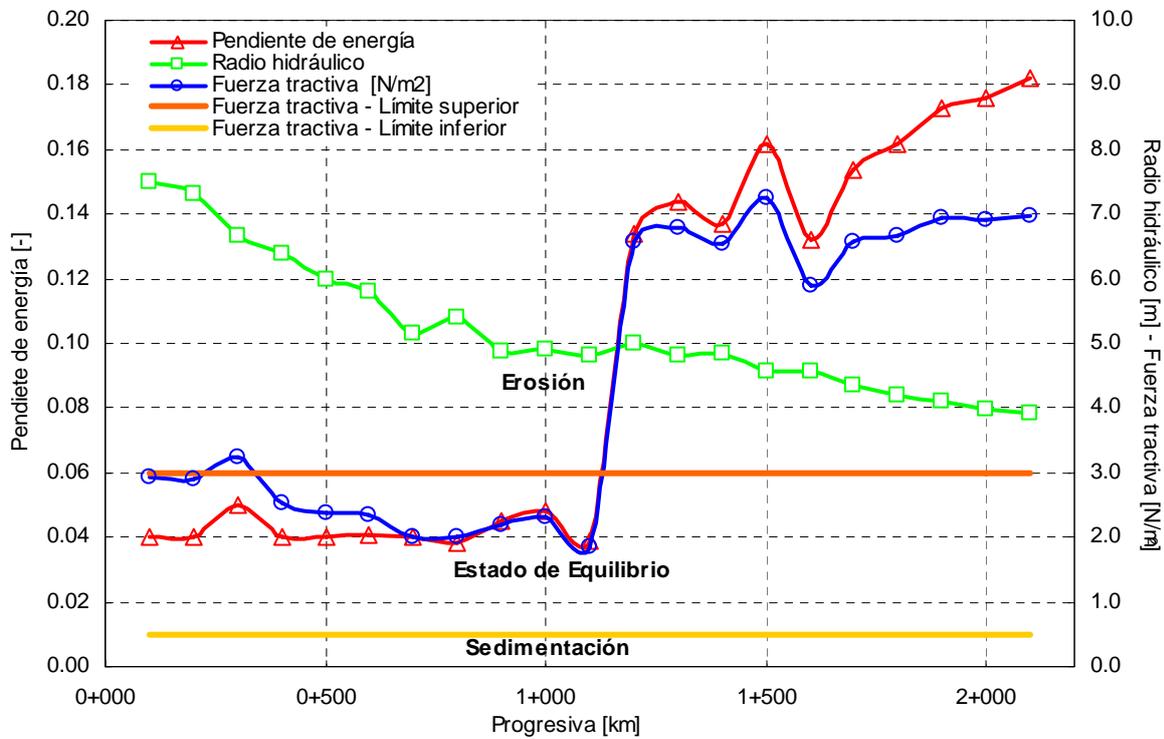


Figura 19.- Río Ucayali, km 854, mal paso Nr. 10, Salida Canal Puinahua. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

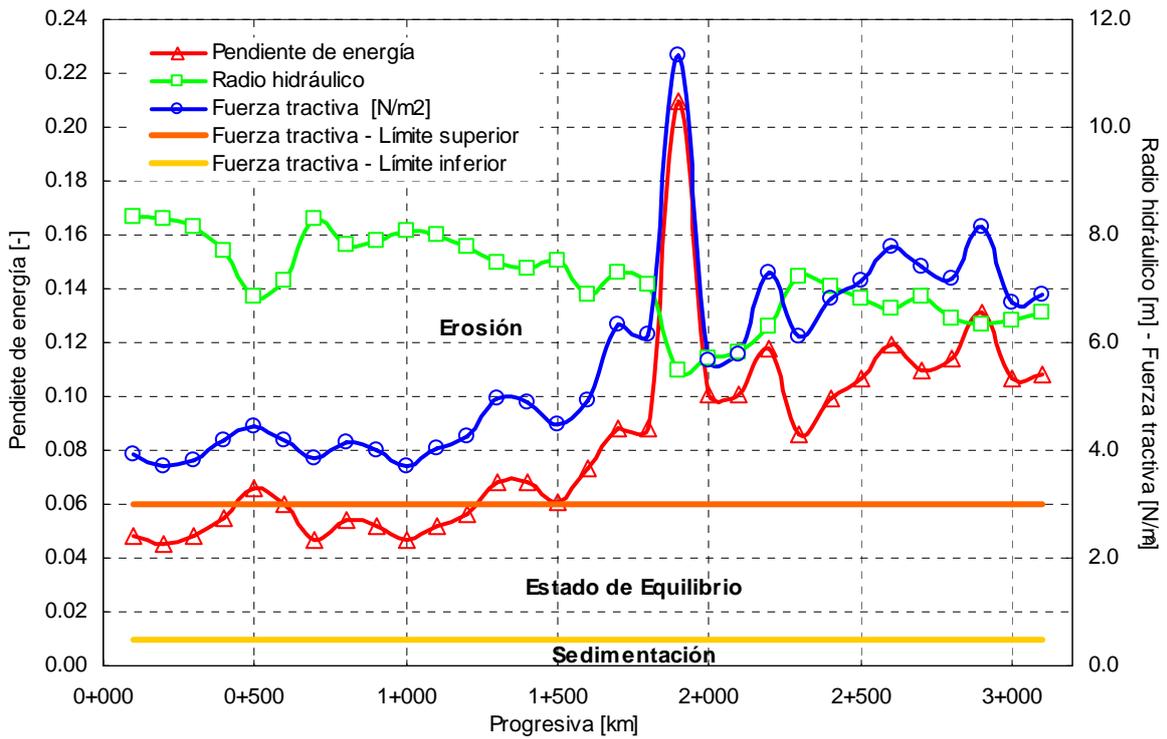


Figura 20.- Río Ucayali, km 928, mal paso Nr. 11, Yanashpa. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

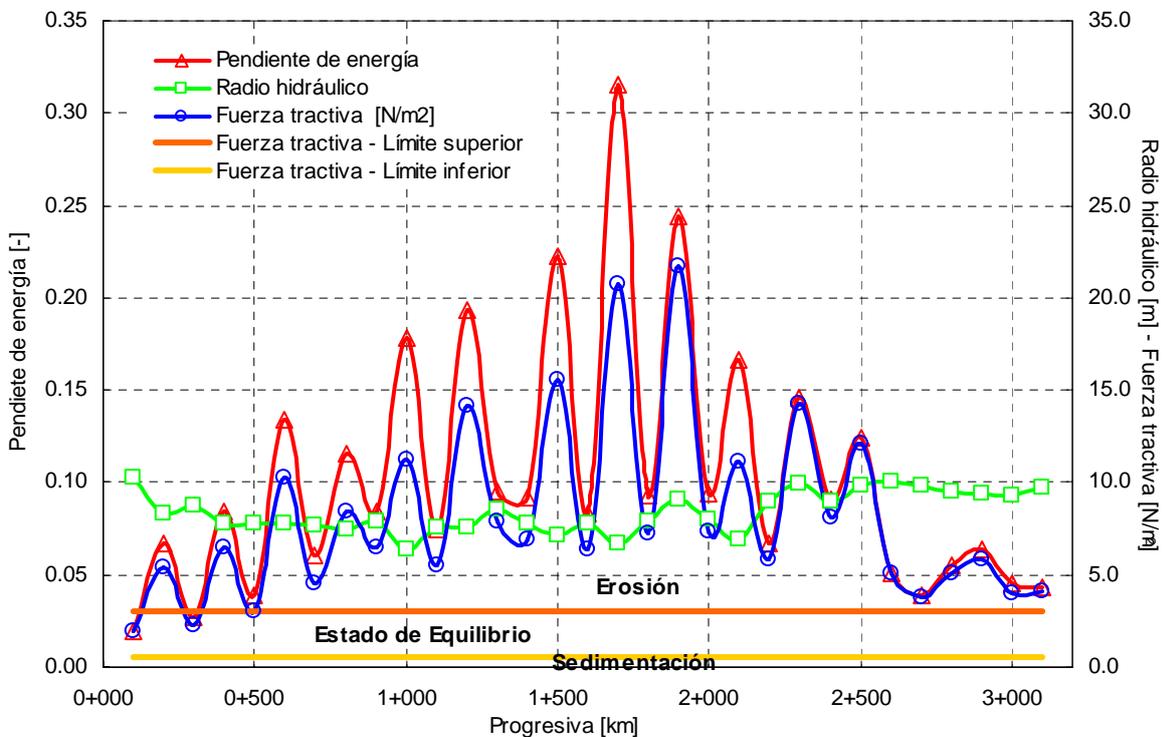


Figura 21.- Río Ucayali, km 1002, mal paso Nr. 12, Tibe Playa. Fuerza tractiva, radio hidráulico y pendiente de energía.

8. CONCLUSIONES

La conclusión principal de esta investigación se aprecia en la Figura 22, en una muy interesante vista del Diagrama de Shields [24]. Todos los resultados de los 12 Mal Pasos han sido implementados en el diagrama y se observa que todos los datos ploteados se ubican significativamente sobre la curva de Shields, que establece el inicio del movimiento, porque el diámetro del sedimento es aproximadamente el mismo sobre todo el tramo analizado del río Ucayali, $D_{50} = 0.25$ mm, ver Figura 4.

Los resultados del número de Froude de la partícula, Fr^* , y del número crítico de Reynolds, Re^* de los 12 Mal Pasos se sitúan todos en una línea del diagrama logarítmico de Shields.

Exactamente tenemos sólo una representación de $u_{*o}^2 = f(u_{*o})$, porque los otros parámetros permanecen constantes ($\rho = 1.65$, $g = 9.81$ m/s², $D_{50} = 0.25$ mm, $\nu = 1.1 \cdot 10^{-6}$ m²/s). El diagrama de Shields demuestra que en cada Mal Paso se tiene una situación de muy grande erosión y que se tiene una situación muy dinámica.

Las Figuras 13 a 21 que se han presentado en el Capítulo 7 muestran la situación localizada y posibilitan una ubicación de las máximas fuerzas tractivas y por ende ubicar la región donde el río Ucayali dispone de un cauce muy dinámico.

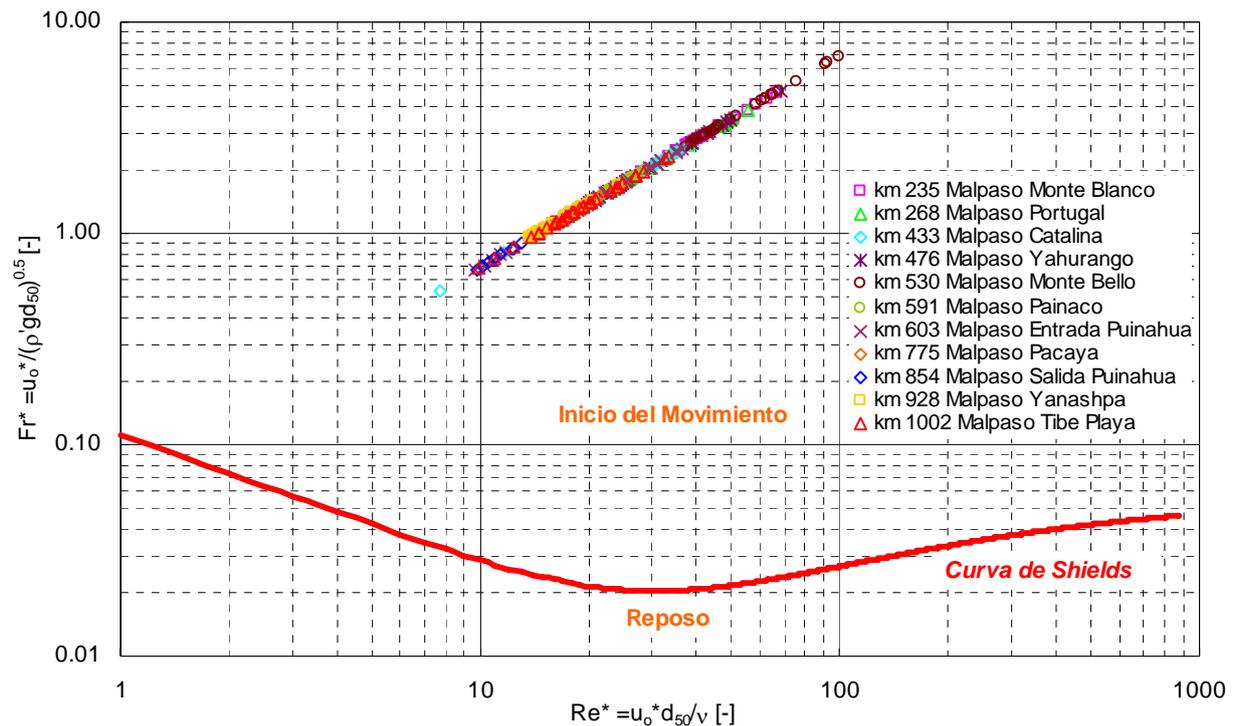


Figura 22.- Diagrama de Shields. Relación número crítico de Reynolds y número de Froude de la partícula de sedimento calculado en los tramos de malos pasos. Aproximación a medidas de Shields (1936, [22]) de Brownlie (1981, [3]).

En cuanto a la estimación de la profundidad máxima de erosión, la fórmula propuesta, $\frac{h_{\max}}{h} = 1 + 3\left(\frac{B}{R}\right)$, que no implica el uso del diámetro característico de la partícula de sedimento, D_{50} , será tomado en cuenta en futuras investigaciones, sin embargo la fórmula sirve para una estimación cualitativa de la profundidad máxima de erosión in situ y para ello

se requiere trasladar con mucho cuidado las mediciones experimentales para su aplicación en campo.

Agradecimientos: Los autores agradecen al docente Ing. César Gonzales Linares y Asistente Ing. Rubén Mogrovejo del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Ricardo Palma, en Lima, por su colaboración en la recopilación de información importante motivo de la presente investigación. Un agradecimiento especial es para el Dr. Jean Loup Guyot, director del proyecto HiBAm en el Perú por el IRD, por su colaboración en proporcionar a los autores muy importante información recopilada en ríos amazónicos. Cabe destacar que la presente investigación se enmarca en el acuerdo de cooperación suscrito entre los autores en representación del Leichtweiß Institut für Wasserbau de la Universidad Técnica de Braunschweig (Alemania) e Hidráulica y Oceanografía - H&O (Perú).

APÉNDICE I. REFERENCIAS

- [1] ALVARADO ANCIETA, C.A. (2004). *Bed Topography and Scour in Sharp River Bends, and Influence of Bank Protection Works*. M.Sc. Dissertation - Thesis HE 179, Vol. 1 & 2. International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering - IHE-Delft, The Netherlands.
- [2] BREUSERS, H. N. C. - RAUDKIVI, A. J. (1991). *Scouring*. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, The Netherlands.
- [3] BROWNLIE, W.R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels*. Report No. KH-R-43A, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California, USA 232 p.
- [4] CLASS - SALZGITTER (2001). *Estudio Definitivo para la Reconstrucción y Rehabilitación del Sistema de Defensas contra Inundaciones en el Bajo Piura y Modelo Matemático para Prognosis de Avenidas en Tiempo Real en la Cuenca del Río Piura*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [5] CONSORCIO H&O - ECSA (2005). *Estudio de Navegabilidad del Río Ucayali en el tramo comprendido entre Pucallpa y la confluencia con el río Marañón*. Dirección General de Transporte Acuático del Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.
- [6] DE VRIES, M. (1973). *River bed variations - aggradation and degradation*. Proc., Int. Seminars of Hydraulics of Alluvial Streams, Int. Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands, 1-10.
- [7] DE VRIES, M. (1985). *Engineering Potamology - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
- [8] GARCÍA, M. H. - LAURSEN, E. M. - MICHEL, C. - BUFFINGTON, J. M. (2000). *The legend of A. F. Shields*. J. Hydr. Engng., ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 718-723.
- [9] GAWEESH, M.T.K. - RAMADAN K.A.H. - KLAASSEN, G.J. (2001). *Sediment Transport in Rivers - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
- [10] GUYOT, J.L. - FILIZOLA, N. - QUINTANILLA, J. - CORTEZ, J. (1996). *Dissolved solids and suspended sediment yields in the Rio Madeira basin, from the Bolivian Andes to the Amazon*. Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives (proceedings of the Exeter Symposium), IAHS Publ. No 236, pp 55-63.
- [11] GUYOT, J.L. - JOUANNEAU, J.M. - WASSON, J.G. (1999). *Characterization of river bed and suspended sediments in the Rio Madeira drainage basin (Bolivia Amazonia)*. Journal of Southamerican Earth Sciences, pp 401-410.
- [12] GUYOT, J.L. - FILIZOLA, N. (2007). *Suspended sediment Yield in the Amazon basin. An assessment using the Brazilian national data set*. Hydrological Processes.
- [13] HJULSTRÖM, F. (1935). *Studies of the morphological activity of rivers as illustrated*

- by the river Fyris*. Bulletin of the Geological Institute of the University of Upsala, 1935.
- [14] HiBAm - INSTITUT DE RECHERCHE POUR LA DEVELOPPEMENT - SENAHMI (2001 a la fecha). GUYOT, J.L. Hidrogeodinámica de la Cuenca Amazónica - Comisión de aforos, muestreo de agua y sedimentos en los ríos Amazónicos.
- [15] JANSEN, P.Ph. (1979). *Principles of River Engineering - The Non-tidal Alluvial River*. Delftse Uitgevers Maatsschappij, Delft University of Technology - The Netherlands. ISBN 90-6562-146-6.
- [16] JULIEN, P. Y. (2002). *River mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, ISBN 0 521 56284 8
- [17] KLAASSEN, G.J. (1995). *Lane's Balance Revisited*. Proc. 6th Intern. Symp. on River Sedimentation, New Delhi - India, pp. 671-686.
- [18] KLAASSEN, G.J. (2001). *Advanced River Dynamics - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
- [19] KRESSER, W. (1964). *Gedanken zur Geschiebe- und Schwebstoffführung der Gewässer*. Österreichische Wasserwirtschaft, 16. Jahrgang, Heft 1/2, 6-11.
- [20] LEICHTWEIß INSTITUT FÜR WASSERBAU (2005). *Auswertung sedimentologischer Daten an der Oder - Machbarkeitsstudie - Bericht 911*. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe - Technische Universität Braunschweig. Germany.
- [21] LEICHTWEIß INSTITUT FÜR WASSERBAU (2006). *Auswertung sedimentologischer Daten an der Oder - Bericht 930*. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe - Technische Universität Braunschweig. Germany.
- [22] NEDECO (1973). *Río Magdalena and Canal del Dique Survey Project*. Netherlands Engineering Consultants, The Hague, The Netherlands.
- [23] ODGAARD, A.J. (1984). *Flow and bed topography in alluvial channel bend*. J. Hydr. Engng., ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 521-536.
- [24] SHIELDS, A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung - Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Heft 26, Eigenverlag der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin NW87, 1936*.
- [25] SCHRÖDER, W. (1994). *Regularización y Control de Ríos*. Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria. Universidad de Piura - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONCYTEC, Perú.
- [26] U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1993). *River hydraulics*. EM N° 1110-2-1416.
- [27] VAN RIJN, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
- [28] VEN TE CHOW (1973). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, 1973.
- [29] YALIN, M. S. - DA SILVA, A. M. (2001). *Fluvial processes*. International Association of Hydraulic Engineering and Research. Monograph. Queen's University, Kingston, Canada.
- [30] ZANKE, U. (1982). *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Berlin, Germany.
- [31] ZOLEZZI, G. - SEMINARA, G. (2001). *Downstream and upstream influence in river meandering. Part I. General theory and application to overdeepening*. J. Fluid Mech., Vol. 438, pp. 183-211.

APÉNDICE II: SÍMBOLOS

Los símbolos siguientes se han utilizado en ésta publicación:

| | | |
|-------------------|--|---------------------|
| B | Ancho del cauce | [m] |
| D ₅₀ | diámetro medio de la arena | [mm] |
| h | calado o tirante | [m] |
| h _{max} | calado máximo en la curva | [m] |
| h _r | calado promedio de las secciones transversales en el tramo recto de aguas arriba | [m] |
| i | pendiente longitudinal en el cauce | [-] |
| Q | caudal, descarga | [m ³ /s] |
| R | radio de la curva | [m] |
| R _{e*} | número crítico de Reynolds | [-] |
| S _s | sedimento en suspensión | [m ³ /s] |
| u | velocidad del caudal | [m/s] |
| u* | velocidad de tensión de corte (en el fondo) | [m/s] |
| w _s | velocidad de caída de la partícula de sedimento | [m/s] |
| u*/w _s | relación de distribución del sedimento en suspensión sobre el calado | [-] |
| α | ángulo de la curva | [°] |
| ρ' | (ρ _o - ρ _{agua}) / ρ _{agua} | [-] |
| v | viscosidad | m ² /s |