



MANEJO MORFOLÓGICO DE LOS RÍOS ICHILO Y SAJTA A LA ALTURA DE PUERTO VILLARROEL-BOLIVIA (1995-1998).

M.Sc. Ing. CLAUDE LE NOIR

DEPARTAMENTO ACADÉMICO
DE INGENIERÍA CIVIL

COCHABAMBA-BOLIVIA
2024



AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD PRIVADA DEL VALLE

M.Sc. Gonzalo Vicente Ruiz Ostría
Rector Nacional

Diego Alonso Villegas Zamora, Ph.D.
Vicerrector Académico Nacional

M.Sc. Sandra Marcela Ruiz Ostría
Vicerrectora Interacción Social y Difusión Cultural

Lic. Daniela Zambrana Grandy
Secretaria General

M.Sc. Ana Cárdenas Angulo
Vicerrector Sede Académica Santa Cruz

M.B.A. Carlos Torricos Mérida
Vicerrector Sede Académica Sucre

M.Sc. Franklin Nestor Rada
Vicerrector Sede Académica La Paz

Lic. Miguel Ángel Añez Sameshima
Vicerrector Sede Académica Trinidad

M.Sc. Jorge Carlos Ruiz De la Quintana,
Director Nacional de Investigación

AUTOR

M.Sc. Claude Le Noir

COMITÉ EDITORIAL

M.Sc. María Elena Sahonero Saravia
M.Sc. Joaquin Humberto Aquino Rocha
Pablo Arce Maldonado, Ph.D

EDICIÓN DIAGRAMACIÓN:

Lic. Giubell Mercado Franco
Lic. Luis Marco Fernández Sandoval
Dr. Rommer Alex Ortega Martínez
Lic. María Fernanda Torrico Rojas

Manejo morfológico de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel-Bolivia (1995-1998).

<https://doi.org/10.52428/edit.univalle.4>

Derechos de autor 2024 Claude Le Noir, Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



Versión digital en Bolivia, 2024

Depósito Legal: 2-1-2115-2025

Código de Registro ISBN: 978-9917-620-09-9



Universidad Privada del Valle
Telf: (591) 4-4318800 / Fax: (591) 4-4318886.
Campus Universitario Tiquipaya.
Calle Guillermina Martínez, s/n, Tiquipaya.
Casilla Postal 4742.
Cochabamba – Bolivia.



DEDICATORIA

A mi familia: mi amada esposa, Ana Maria y mis queridas hijas, Valerie y Nathalie, quienes me apoyaron durante el tiempo dedicado a la escritura del presente libro.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Cooperación Belga por la contratación de su persona como experto belga sobre el Proyecto Obras de Defensa Puerto Villarroel de 10/1996 a 10/1998 y el apoyo recibido para conseguir el financiamiento para las obras.

El suscrito también agradece al Prof. J.J. Peters (+2012) por la enseñanza técnica recibida respecto a la potamología, la problemática de la (in)estabilidad fluviomorfológica de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel y respecto al diseño, ejecución y monitoreo de Obras de Defensa de tipo medidas recurrentes para recuperar (temporalmente para un tiempo considerable) la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel.

El autor agradece al SEMENA por el apoyo técnico recibido con el monitoreo hidrográfico hidrológico potamológico de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel constante previo, durante y posterior a la ejecución de las Obras de Defensa de 1991 a 1998.

El suscrito agradece a las Autoridades de la Universidad Privada del Valle, a la Dirección Nacional de Investigación, al Departamento Académico de Ingeniería Civil Sede Cochabamba, al Comité Editorial y al Grupo Responsable de la Edición y Diagramación por el apoyo recibido con la revisión, edición, publicación y divulgación del presente libro.

PRÓLOGO

Los ríos amazónicos son ríos muy salvajes en cuanto a su equilibrio morfológico. Tienen cursos muy divagantes, que pueden resultar problemáticos para instalaciones portuarias fijas.

Es así, que Puerto Villarroel ubicado sobre el río Ichilo sufrió problemas de inestabilidad fluviomorfológica en los años 90 a 96. Un corte conflictivo estaba amenazando frontalmente a Puerto Villarroel con el riesgo que la infraestructura portuaria y gran parte de la urbanización desaparezcán igual como sucedió en los años 60 con el Puerto de Todos Santos sobre el río Chapare.

El Prof. Jean Jacky Peters (+2012), M. Sc. Claude Le Noir conjuntamente el Servicio de Mejoramiento a la Navegación Amazónica (SEMENA) estudiaron soluciones a la problemática de la inestabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel, que fueron ejecutadas con la ayuda financiera de la Cooperación Técnica Belga mediante un convenio general vigente al momento de 1995 a 1996 y mediante un convenio específico de 1996 a 1998.

Se realizaron obras de tipo medidas recurrentes para retrasar el corte conflictivo y ganar tiempo para lograr el financiamiento específico para las obras definitivas para la desactivación del corte conflictivo que consistieren en dos cortes artificiales con canal piloto grande (un corte del río Ichilo al río Ichilo y otro corte del río Sajta al río Ichilo) y en varias obras de corrección de margen para alinear los cortes. A la fecha, las obras construidas de 1996 a 1998, siguen garantizando la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel.

Para el manejo morfológico de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel, estas obras fueron únicas en Bolivia. Los expertos también definieron la necesidad del establecimiento de una Unidad de Monitoreo y Procesamiento de Datos Fluviomorfológicos. Esta Unidad tenía también el objetivo de proponer y ejecutar nuevas obras de tipo medidas recurrentes, cuando hubieran nuevos problemas de inestabilidad fluviomorfológica.

El Prof. Jean Jacky Peters realizó varias publicaciones a nivel internacional de las Obras de Defensa ejecutadas de 1995 a 1998. En Bolivia, a la fecha no hubo publicaciones técnicas de estas obras. Incluso, en algunos estudios de estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel las obras y sus consecuencias no fueron tomadas en cuenta. Ante esta situación es que M. Sc. Claude Le Noir tomó la iniciativa de escribir el presente libro para que los interesados puedan disponer de un texto referencial sobre las Obras de Defensa de Puerto Villarroel de 1995 a 1998 y que estas sean consideradas en futuros estudios.

El libro incluye de cada una de las obras de defensa objetivos, diseño, ejecución y resultados obtenidos.

La metodología desarrollada con las Obras de Defensa de Puerto Villarroel, se puede aplicar también a otros sitios con problemas de inestabilidad fluviomorfológica.

M. Sc. Claude LE NOIR

Autor del libro

PRÓLOGO	4
1. INTRODUCCIÓN	9
2. MÉTODOS Y MATERIALES	11
2.1. Ubicación del área de estudio y macro análisis fluviomorfológico.....	11
2.2. Lecho móvil en material aluvial no cohesivo.....	14
2.3. La tensión cortante.....	15
2.4. Iniciación de movimiento – criterio de Shields.....	15
2.5. Iniciación de movimiento, criterio de Hjülstrom.....	16
2.6. Transporte de sedimentos en un lecho aluvial arenoso en tramos rectos y curvas.....	17
2.7. Un patrón de meandros en planta se mueve en dirección aguas abajo y transversal.....	19
2.8. Formas en planta de un río meándrico.....	19
2.9. Leyes de Fargue – relaciones empíricas entre las dimensiones de un meandro.....	20
2.10. Formación de un lago de herradura (o lago oxbow) y de puntos duros.....	21
2.11. Perfil del lecho de un río con un corte de meandro.....	22
2.12. La relajación / autoadaptación de un corte de meandro y monitoreo y obras medidas recurrentes.....	22
2.13. Irregularidad de un patrón de meandros por no homogeneidad en los suelos y en las condiciones hidrológicas/hidráulicas.....	23
2.14. En una confluencia los dos ríos se deben unir bajo un ángulo suave.....	23
2.15. Estudio fluviomorfológico de Puerto Villarroel de 1958 a 1993.....	25
2.16. Estudios fluviomorfológicos – diseño, ejecución y seguimiento a Obras de Defensa–1994-1998.....	28
2.17. Obras de Defensa tipo Medidas Recurrentes, Monitoreo y Análisis de Datos Fluviomorfológicos.....	28
3. RESULTADOS – OBRAS DISEÑADAS Y EJECUTADAS 1995 A 1998	29
3.1. Año 1994.....	29
3.1.1. Un corte T artificial no fue la solución al problema.....	29

3.1.2. La protección de los bancos no fue considerada una buena opción.....	30
3.1.3. La mejor alternativa fue la ejecución de dos cortes S-I e I-I.....	30
3.1.4. Trabajos de emergencia de alta prioridad.....	31
3.2. Año 1995.....	33
3.2.1. Ejecución de obras B ₁ , B ₂ y C de abril a julio 1995.....	33
3.2.2. Desbroce preventivo en los lugares de corte S-I e I-I de enero a abril 1995.....	35
3.3. Periodo 1996 – 01/1997.....	35
3.3.1. Ejecución excavación cortes S-I e I-I de octubre 1996 a enero 1997.....	35
3.4. Día 30 de enero 1997.....	39
3.4.1. Fase de autoadaptación de los canales pilotos S-I e I-I desde el 30 de enero 1997.....	39
3.5. Periodo 02/1997 - 1998.....	42
3.5.1. Obras de corrección de margen I-I/a, I-I/e, S-I/c, S-I/d y obra A pared guía 1997-1998.....	42
3.6. Periodo 11/1998 – adelante.....	46
3.6.1. Obras de regulación en el tramo entre la nueva confluencia con el río Sajta y el puerto de Puerto Villarroel.....	46
4. CONCLUSIONES.....	48
5. REFERENCIAS.....	53

**TÍTULO: MANEJO MORFOLÓGICO DE LOS RÍOS
 ICHILO Y SAJTA A LA ALTURA DE PUERTO VILLARROEL-BOLIVIA
 (1995-1998).**

*Título en inglés: Morphological Management of the Rivers Ichilo and Sajta
 near Puerto Villarroel-Bolivia (1995-1998).*

M.Sc. Ing. CLAUDE LE NOIR

Experto belga obras de defensa Puerto Villarroel, Convenio Cooperación Técnica
 Belga - SEMENA, 1996-1998, Puerto Villarroel, Cochabamba, Bolivia.

Ex docente de las materias de Hidráulica I, II e Hidrología, Departamento de
 Ingeniería Civil de 2017 a 2022, Universidad Privada del Valle, Cochabamba,
 Bolivia.

lencloirclaude10@gmail.com

RESUMEN

Los ríos grandes de la Región Amazónica de Bolivia son navegables y permiten un transporte fluvial / intermodal entre las zonas sur y norte de Bolivia incluso permitiendo salida internacional. La mayoría de los ríos amazónicos tienen un carácter fluviomorfológico dinámico inestable, con problemas en los accesos a los puertos que cuentan con infraestructura fija, así es también el caso del río Ichilo a la altura de Puerto Villarroel. Puerto Villarroel fue fundado en 1952 en la margen izquierda del río Ichilo en un “punto” relativamente firme. En 1991 se constató que la fluviomorfología del río Ichilo había avanzado a una situación de bastante riesgo para Puerto Villarroel con amenaza de desaparecer del mapa. Por un lado, se estaba desarrollando un posible corte de meandro conflictivo en frente del punto firme de Puerto Villarroel. Por otro lado, se estaba produciendo anualmente una gran erosión de la margen izquierda aguas arriba de Puerto Villarroel. Entre 1994 y 1998 se diseñaron y ejecutaron varias obras de defensa para corregir la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel: Tres espigones longitudinales bajos con material local bambú (obras B₁ y B₂, obra C), un corte artificial del río Sajta al río Ichilo (corte S-I), un corte artificial del río Ichilo al río Ichilo (corte I-I), una obra pared guía (Obra A) y varias obras de

corrección de margen. Estas obras están logrando revertir la amenaza por un periodo de 28 años hasta la fecha.

Estas obras de defensa fueron estudiados y ejecutados dentro del marco de Convenios de Cooperación Bolivia – Bélgica. El Servicio de Mejoramiento a la Navegación Amazónica, SEMENA, fue la contra parte boliviana directa en estos Convenios. Estos Convenios se concluyeron en octubre 1998.

En el presente trabajo se describe de forma técnica estas obras de defensa para que los actuales y futuros profesionales se informen acerca de estas obras, el diseño y el funcionamiento. Estudios morfológicos de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel deben tomar en cuenta la intervención antrópica que hubo con las obras de defensa construidas de 1995 a 1998.

Palabras clave: Puerto Villarroel – Bolivia, Estabilidad Fluviomorfológica, Meandros, Obras de Defensa, Corte de Meandro

ABSTRACT

The large rivers of the Bolivian Amazon Region are navigable and permit fluvial / intermodal transport between the southern and northern zones of Bolivia inclusively with international exits. Most Amazonian rivers have an unstable dynamic fluviomorphological behavior, causing problems to the accesses to ports with fixed infrastructure, this is also the case of the Ichilo River at Puerto Villarroel. Puerto Villarroel was founded in 1952 on the left bank of the Ichilo River on a relatively “hard point.” In 1991 the fluviomorphology of the Ichilo River had advanced to a dangerous situation of great risk for Puerto Villarroel with the threat of disappearance from the map. On the one hand, a possible conflictive meander cutoff was developing in front of the hard point of Puerto Villarroel. On the other hand, a great erosion of the left bank upstream of Puerto Villarroel occurred annually.

Between 1994 and 1998, several river defense works were designed and executed to correct the fluviomorphological stability of Puerto Villarroel: three low longitudinal groynes with screens of local bamboo material (works B₁ and B₂, work C), two artificial river cutoffs, one from the Sajta River to the Ichilo River (cutoff S-I), and one from the Ichilo River to the Ichilo River (cutoff I-I), a guide wall work (work A) and several margin correction works. These works have succeeded to reverse the threat for a period of 28 years up to date.

These defense works were studied and executed within the framework of Bolivia – Belgium

Cooperation Agreements. The Amazon Navigation Improvement Service, SEMENA, was the direct Bolivian counterpart in these Agreements. These Agreements were concluded in October 1998.

The defense works are described in a technical way, so that actual and future professionals can learn about these works, their design and their functioning. Morphological studies of the Ichilo and Sajta rivers near Puerto Villarroel must consider the anthropic intervention that occurred with these defense works built from 1995 to 1998.

Keywords: Puerto Villarroel – Bolivia, Fluvial Morphological Stability, Meanders, Defense Works, Meander Cutoff.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, Puerto Villarroel, es el mayor puerto comercial del Departamento de Cochabamba, ubicado sobre el río Ichilo, único río navegable importante de la región de Cochabamba. En el año 2021 el Estado Plurinacional de Bolivia (re)inauguró la Hidrovía Ichilo-Mamoré, que permite la conexión fluvial de los Departamentos de Cochabamba, Beni y Santa Cruz, que permite conectar de forma intermodal: vía carretera desde Guajará-Mirim Brasil con Porto Velho en Rondonia Brasil, por el río Madera (modo fluvial) y el río Amazonas (modo fluvio-marítimo) a los puertos de ultramar. Esta Hidrovía permite fomentar la salida de los productos nacionales a mercados exteriores, la distribución de los productos nacionales a las poblaciones ribereñas y el desarrollo del turismo a lo largo de los ríos Ichilo y Mamoré (Porco, 2021; Dialogue Earth, 2021 y La Razón, 2021).

Bolivia optó en los años 1950-1960 para desarrollar Puerto Villarroel sobre el río Ichilo en lugar de continuar con Puerto Todos Santos sobre el río Chapare. Puerto Todos Santos sufría de una importante y constante erosión de margen, de tal magnitud, que en 1962 desapareció por completo del mapa de Bolivia (Torrez, 2017 y Henrich, 2021).

El río Ichilo igual que el río Chapare es un río de lecho móvil. En los años 1991 – 1996, Puerto Villarroel tuvo graves problemas con la estabilidad fluvio-morfológica del río Ichilo. Anualmente se produjo erosión grande en la margen izquierda de la curva aguas arriba de Puerto Villarroel extendiéndose hasta la urbanización sur de Puerto Villarroel mismo. Además, se estaba activando un corte conflictivo, denominado “T” en los estudios, que estaba amenazando Puerto Villarroel [el Astillero de TRANSSNAVAL, el Complejo Portuario de SEMENA, el Puerto de Combustibles de YPFB y parte de la urbanización] de forma perpendicular. Sin intervención con Obras de Defensa, en 1996-1998 el corte “T” hubiese roto de forma natural, causando estragos, hasta probablemente hubiese hecho desaparecer también a Puerto Villarroel del mapa de Bolivia (Le Noir, 1993).

Afortunadamente, gracias a Convenios de Cooperación de Bolivia con el Reino de Bélgica, el Servicio de Mejoramiento a la Navegación Amazónica - Bolivia pudo intervenir artificialmente de 1995 a 1998 con Obras de Defensa: Espigones B₁, B₂ y C, Cortes de Río S-I e I-I, Correcciones de Márgenes I-I/_a, I-I/_c, S-I/_c y S-I/_d y Obra Longitudinal A. Los espigones B₁ y B₂ lograron frenar el conflictivo corte “T” y han permitido diseñar los cortes artificiales S-I e I-I y conseguir el financiamiento para las Obras de Defensa. El financiamiento recién se liberó en septiembre 1996 y los cortes S-I e I-I se empezaron a excavar en octubre 1996. In extremis, principios 1997, se logró desactivar el conflictivo corte “T” con los dos cortes S-I e I-I. Posterior a las épocas de lluvias 1997 y 1998 se realizaron varias obras de corrección de margen afín de suavizar los trazados en planta de los cortes a que generarían futuros meandros no conflictivos para Puerto Villarroel y que la nueva confluencia Ichilo Sajta entraría fluidamente en el tramo del río Ichilo aguas arriba de Puerto Villarroel. El Convenio de Cooperación Específico para las Obras de Defensa de Puerto Villarroel se concluyó en octubre 1998 (Peters, 1998).

El manejo morfológico de los ríos Ichilo y Sajta, con estas Obras de Defensa, sin duda ha salvado a Puerto Villarroel de la misma tragedia de Puerto Todos Santos. Lamentablemente, parece que actualmente muchos ingenieros no tienen conocimiento de las Obras de Defensa ejecutadas en Puerto Villarroel durante los años 90, lo que lleva a que éstas no sean consideradas en sus análisis de la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel.

Problemas por inestabilidad fluviomorfológica no solamente existen sobre el río Ichilo en Puerto Villarroel, se presentan también sobre el mismo río Ichilo aguas arriba del Puente Ichilo, donde la migración de los meandros afecta la estabilidad de la plataforma de la carretera nacional RVF-4, (Angus, 2019; El Diario Nacional, 2016; Acciona Ingeniería & Essing Srl, 2016). Hay también problemas de orden fluviomorfológico sobre el río Mamoré a la altura de Trinidad donde el actual cruce de la línea de alta tensión Caranavi Trinidad, donde el futuro Puente Trinidad en la carretera La Paz – Trinidad y donde los posibles sitios portuarios de Trinidad (Balcázar Rodal, 2019). Hubo problemas con un corte de meandro sobre el río Acre en Cobija (Soria Martins, 2015). Igual la confluencia del río Madre de Díos con el río Beni a la altura de Riberalta tiene problemas de inestabilidad fluviomorfológica. Ídem los puertos de Yurimaguas, Pucallpa e Iquitos en la Región Amazónica de Perú sufren por una dinámica fluviomorfológica salvaje de los ríos Huallaga, Ucayali y Amazonas (Zavala y Vilchet, 2005; Ivarado y Ettmer, 2008; García Sánchez y Bernex de Falen, 1994; Peters J.J., 1993)

El presente artículo tiene la finalidad de informar a los profesionales, estudiantes e interesados porque se ejecutaron Obras de Defensa de 1995 a 1998 en Puerto Villarroel sobre los ríos Sajta e Ichilo, como fueron diseñadas, construidas y que resultados inmediatos y posteriores obtuvieron.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. Ubicación del área de estudio y macro análisis fluviomorfológico.

En la **Figura 1** se muestra el área de estudio. Puerto Villarroel (coordenadas UTM zona 20S, 308.859 m Este, 8.137.403 m Sur) se ubica al sur de la Región Amazónica Boliviana sobre el río Ichilo, 1.3 km (distancia fluvial) aguas abajo de la actual confluencia del río Ichilo con el río Sajta. Aguas abajo de Puerto Villarroel a 13 y a 26 km de distancia fluvial el río Ichilo recibe a los afluentes río Ivirgarzama y río Chimoré. En distancia recta los tres ríos se encuentran a 1.3, 7.2 y 12.3 km de Puerto Villarroel (situación principios 2024). Estas distancias por la actividad fluviomorfológica de los ríos indicados cambian con el tiempo.

El río Ichilo a la altura de Puerto Villarroel tiene un carácter fluviomorfológico fuertemente salvaje debido a varios factores:

Figura 1: Área de estudio



Fuente: Elaboración propia en base Goolge Earth Pro, HydroSheds, HydroBasins, ArcGis 10.5 y GMet 2016.

- (1) Por la relación de áreas de cuenca de aporte que cambia bruscamente a la altura de las confluencias con los ríos Sajta, Ivirgarzama y Chimoré. En una distancia recta de 13.6 km la cuenca de aporte del río Ichilo de 5354 km² aumenta en la confluencia con el río Sajta con 2368 km² (44.22%), con 823 km² (15.37%) en la confluencia con el río Ivirgarzama y con 2668 km² (49.83%) en la confluencia con el río Chimoré. En una distancia de 13.6 km el área de la cuenca aumenta con 110% (5859 km²) a 210% (11213 km²). Antes de la confluencia con el río Sajta el aumento de la cuenca del río Ichilo es de 23.28 km² por km de río, entre la confluencia con el río Sajta y la confluencia con el río Chimoré el aumento de la cuenca del río Ichilo es de 410.73 km² por km de río.

- (2) En sus últimos 50 km antes de que confluyan con el río Ichilo, los ríos Sajta, Ivirgarzama y Chimoré tienen una pendiente promedio de 0.00053, 0.000026 y 0.00037 m/m. La pendiente promedio del río Ichilo aguas arriba de la confluencia con el río Sajta es de 0.00031 m/m.
- (3) El río Ichilo tiene un recorrido de 230 km y viene desde alturas de 2638 m.s.n.m. cuando llega a la confluencia con el río Sajta, el río Sajta tiene un recorrido de 172 km y viene de alturas de 4144 m.s.n.m. El río Ivirgarzama tiene un recorrido de 76 km y viene de alturas de 1535 m.s.n.m. El río Chimoré tiene un recorrido de 189 km y viene de alturas de 4087 m.s.n.m.
- (4) La precipitación promedio anual sobre la cuenca del río Ichilo aguas arriba de la confluencia con el río Sajta es 1666 mm/año, sobre la cuenca del río Sajta 1735 mm/año, sobre la cuenca del río Ivirgarzama 3301 mm/año y sobre la cuenca del río Chimoré es 2656 mm/año. Los valores altos se deben a que la zona de estudio se encuentra cerca del núcleo de precipitación alta de Villa Tunari – Chipiriri.

Los datos morfométricos de las cuencas han sido determinados mediante procesamiento en ArcGis 10.5 de datos disponibles respecto a cuencas y redes de ríos en las plataformas HydroSheds e HydroRivers (Lehner y Grill 2013) y modelo digital de elevación SRTM V.4 con píxel 90 m x 90 m. La precipitación promedio anual sobre las cuencas se ha determinado mediante procesamiento en ArcGis 10.5 de la información básica del Nuevo Balance Hídrico de Bolivia 2016.

Tabla 1: Posibles regímenes hidráulicos sobre el río Ichilo entre las confluencias con ríos Sajta y Chimoré

Regimen Hidráulico	Ríos en crecida (C) o no en crecida (NC)			
	Ichilo	Sajta	Ivirgarzama	Chimoré
1	C	NC	NC / C	NC
2	C	C	NC / C	NC
3	C	NC	NC / C	C
4	NC	C	NC / C	C
5	NC	NC	NC / C	C
6	NC	C	NC / C	NC
7	C	C	NC / C	C

Fuente: Elaboración propia.

Los 4 factores analizados demuestran que los ríos Ichilo, Sajta y Chimoré son de carácter hidráulico muy fuerte (grandes caudales líquidos con grandes tirantes de agua, con importantes altas tensiones de arrastre y con intenso movimiento de material de lecho). Por ende, el tramo del río Ichilo de 13.6 km entre las confluencias de los ríos Sajta y Chimoré y la zona directa alrededor están sujetos a fuertes tensiones fluviomorfológicas cambiantes, porque se pueden instalar allí siete diferentes regímenes de flujo hidráulico, según el número de ríos que simultáneamente están en crecida Tabla

1. Esto implica que con un mismo nivel en la regla limnimétrica de Puerto Villarroel se puede tener diferentes caudales y por ende no se puede aplicar las teorías de régimen (de equilibrio dinámico) (Leopold et al, 1964; Leopold and Wolman, 1960; Dury, 1964; Schumm, 1960; 1977; Eaton y Church, 2011) para estudiar la (macro) estabilidad fluviomorfológica de los ríos Ichilo, Sajta, Ivirgarzama y Chimoré a la altura de Puerto Villarroel.

Para comprender la estabilidad e inestabilidad fluviomorfológica de la zona de estudio y el diseño de las obras de defensa es preciso conocer algunos conceptos básicos de la hidráulica fluvial. A continuación, se mencionan estos temas sin entrar a la demostración de estos mismos.

2.2. Lecho móvil en material aluvial no cohesivo

Casi todos los ríos en las planicies de la Región Amazónica de Bolivia son de característica de lecho móvil en material aluvial arenoso. El cauce de estos ríos es erosionable y permite desarrollar transporte de sedimentos como carga de fondo y en suspensión.

Tabla 2: Análisis granulométrico de 33 muestras de sedimentos de los ríos del proyecto

Zona	No. Muestra y ubicación	Prof. m.	Porcentaje que pasa a malas No.y aberturas mm.								Composición % peso			Tamaños		Clasificación suelo del lecho según USDA
			10	16	20	30	40	50	200	Hidr.	Arena	Limo	Arcilla	Prom. d ₅₀	Diam. Efectivo d ₁₀	
			2	1.19	0.841	0.595	0.42	0.297	0.075	0.002	+0.075	0.075 a 0.002	-0.002	mm.	mm.	
Río Sajta aguas arriba confluencia marzo 1994	S1-a	4.50				100.00	99.48	88.03	0.67	0.14	99.33	0.53	0.14	0.163	0.087	Arena fina limpia
	S1-b	1.50				100.00	98.67	1.00	0.21	99.00	0.79	0.21	0.150	0.085	Arena fina limpia	
	S1-c	3.50			100	99.66	96.30	35.79	0.77	0.16	99.23	0.61	0.16	0.322	0.108	Arena fina limpia
	S2-a	3.00	100.00	99.81	98.81	95.03	62.08	6.29	1.32	93.71	4.97	1.32	0.220	0.082	Arena fina limpia	
	S2-b	2.50		100.00	99.94	99.44	82.53	2.83	0.60	97.17	2.23	0.60	0.169	0.084	Arena fina limpia	
	S2-c	1.50				100.00	99.71	13.90	2.93	86.10	10.97	2.93	0.134	0.021	Arena fina limpia	
	S3-a	6.00					100.00	49.23	10.37	50.77	38.86	10.37	0.081	0.002	Arena fina limosa	
	S3-b	4.50					100.00	99.86	3.59	0.76	96.41	2.83	0.76	0.146	0.082	Arena fina limpia
	S3-c	2.00					100.00	99.33	18.40	3.88	81.60	14.52	3.88	0.128	0.009	Arena fina limpia
Río Ichilo aguas arriba confluencia marzo 1994	M1-a	6.50			100.00	99.88	98.01	47.28	3.64	0.78	96.36	2.86	0.78	0.303	0.092	Arena fina limpia
	M1-b	4.50	100.00	99.48	96.77	86.29	46.47	1.26	0.27	98.74	0.99	0.27	0.306	0.098	Arena fina limpia	
	M1-c	3.00			100.00	99.54	76.15	6.21	1.34	93.79	4.87	1.34	0.177	0.081	Arena fina limpia	
	M2-a	6.30	99.72	99.31	98.13	74.37	32.59	3.63	0.22	0.05	99.78	0.17	0.05	0.486	0.388	Arena gruesa limpia
	M2-b	4.50			100.00	99.35	82.35	22.15	0.28	0.06	99.72	0.22	0.06	0.349	0.138	Arena fina limpia
	M2-c	2.50			100.00	99.82	93.44	33.02	0.54	0.12	99.46	0.42	0.12	0.260	0.112	Arena fina limpia
	M3-a	7.00	100.00	99.40	97.95	89.86	57.66	11.62	0.63	0.14	99.37	0.49	0.14	0.396	0.242	Arena fina limpia
	M3-b	4.50				100.00	99.03	36.09	0.40	0.09	99.60	0.31	0.09	0.321	0.109	Arena fina limpia
	M4-a	5.00					100.00	99.82	9.13	1.97	90.87	7.16	1.97	0.139	0.076	Arena fina limpia
	M4-b	4.30					100.00	92.11	1.18	0.25	98.82	0.93	0.25	0.157	0.086	Arena fina limpia
	M4-c	2.00					93.01	29.46	0.33	0.07	99.67	0.26	0.07	0.332	0.118	Arena fina limpia
	M5-a	6.00						100.00	12.95	2.79	87.05	10.16	2.79	0.135	0.026	Arena fina limosa
	M6-a	7.00	100.00	98.47	88.18	57.69	19.93	2.45	0.53	97.55	1.92	0.53	0.391	0.136	Arena fina limpia	
	M6-b	4.00				100.00	98.51	74.39	0.74	0.16	99.26	0.58	0.16	0.188	0.089	Arena fina limpia
M6-C	2.00				100.00	99.08	85.27	1.84	0.40	98.16	1.44	0.40	0.166	0.086	Arena fina limpia	
Río Ichilo aguas abajo atracadero marzo 1994	I1-a	6.00	100.00	99.79	99.15	74.94	18.87	0.74	0.25	99.26	0.49	0.25	0.360	0.151	Arena fina limpia	
	I1-b	4.00				100.00	99.93	84.97	0.73	0.25	99.27	0.48	0.25	0.282	0.096	Arena fina limpia
	I1-c	2.00				100.00	99.67	94.28	4.75	1.64	95.25	3.11	1.64	0.145	0.081	Arena fina limpia
	I2-a	6.00	97.35	92.64	89.15	82.97	62.32	16.85	4.48	1.54	95.52	2.94	1.54	0.382	0.139	Arena fina limpia
	I2-b	5.00			100.00	99.85	98.58	76.40	1.38	0.48	98.62	0.90	0.48	0.183	0.088	Arena fina limpia
	I2-c	2.00					100.00	99.87	73.90	15.82	26.10	58.08	15.82	0.016	0.014	Limo arenoso
	I3-a	7.50					100.00	95.06	13.17	4.54	86.83	8.63	4.54	0.139	0.020	Arena fina limpia
	I3-b	5.00					100.00	98.45	2.60	0.90	97.40	1.70	0.90	0.148	0.083	Arena fina limpia
	I3-c	2.00				100.00	99.64	43.75	1.97	0.68	98.03	1.29	0.68	0.309	0.098	Arena fina limpia

Fuente: Consultores Galindo (1994).

Los ríos de la región de Puerto Villarroel son de esta característica. En la Tabla 2, se presenta la granulometría de 33 muestras de sedimentos sacados en marzo 1994 distribuidas sobre el área del

proyecto y clasificados según los criterios de la USDA. De las 33 muestras, 9 muestras corresponden al río Sajta aguas arriba de la confluencia, 15 muestras al río Ichilo aguas arriba de la confluencia, y 9 muestras al río Ichilo aguas abajo del atracadero. De las 33 muestras, 29 corresponden a arena fina limpia, una muestra es una arena gruesa limpia, dos muestras son una arena fina limosa y una muestra es un limo arenoso. Las arenas son no cohesivas, fácilmente erosionables permitiendo transporte como carga de fondo y carga en suspensión.

En la **Tabla 3** se tiene para cada área del proyecto los valores del diámetro característico d_{50} mínimo, máximo y promedio. Considerando el área total d_{50} promedio es 0.228 mm, mínimo 0.081 mm y máximo 0.486 mm.

Tabla 3: Análisis estadístico sobre d_{50} (mm) de las 32 muestras de arena de 1994

Zona del proyecto	min	promedio	max
Río Sajta aguas arriba confluencia	0,081	0,168	0,322
Río Ichilo aguas arriba confluencia	0,135	0,274	0,486
Río Ichilo aguas abajo atracadero	0,139	0,244	0,382
Sobre todo el área de proyecto	0,081	0,228	0,486

Fuente: Elaboración propia en base datos Consultores Galindo (1994).

2.3. La tensión cortante.

La tensión cortante en el lecho de un río ancho, se calcula con la siguiente fórmula:

$$\tau_0 = \rho ghS$$

En la cual ρ es la densidad del agua en el río, g la aceleración de la gravedad de la Tierra, h el tirante de agua en el río y S la pendiente del lecho del río, de la superficie de agua o del gradiente de energía del flujo en el río considerando flujo normal.

La tensión cortante es mayor para grandes tirantes de agua y pendientes grandes.

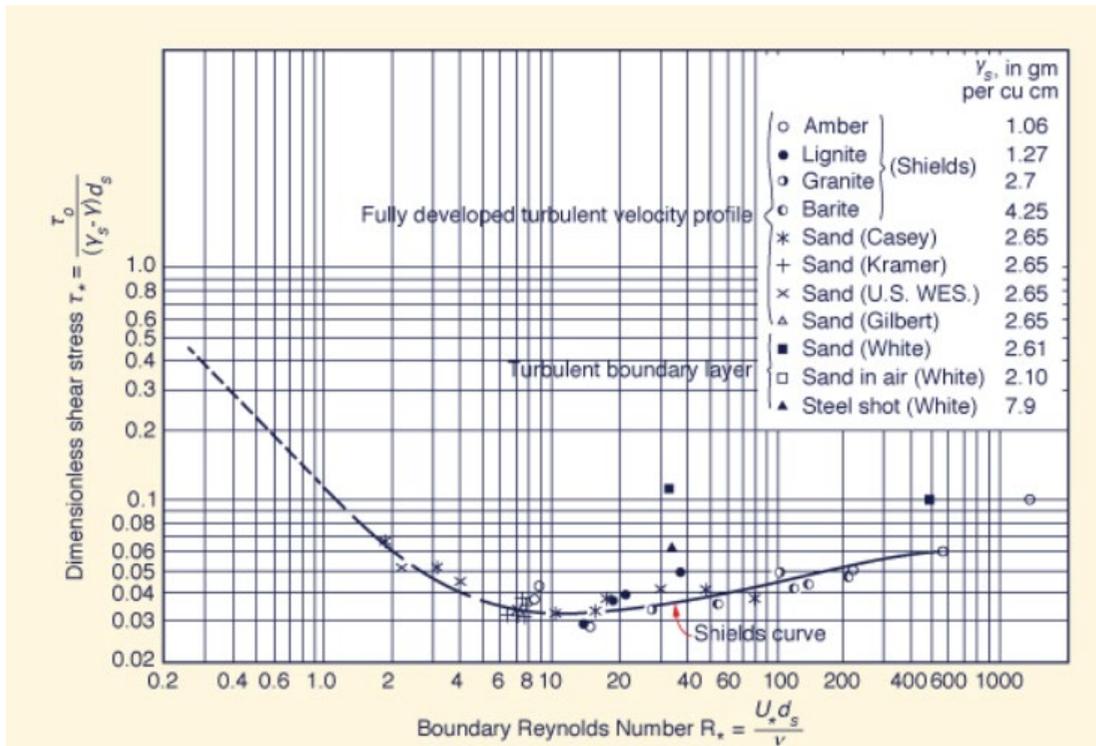
2.4. Iniciación de movimiento – criterio de Shields.

El criterio de Shields para la iniciación del movimiento de un sedimento relaciona el esfuerzo cortante adimensional, τ_* con el número de Reynolds límite del grano, R_{*c} (Figura 2). La curva sólida separa el movimiento por encima de la curva, de la ausencia de movimiento por debajo de la curva. El criterio de Shields es el siguiente:

$$\tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d_s} \geq \tau_{*c}$$

En el cual τ_0 es el esfuerzo cortante en el lecho el río, γ_s el peso específico de las partículas de sedimento, γ el peso específico del agua, d_s el diámetro de las partículas, y τ_{*c} el esfuerzo cortante crítico adimensional.

Figura 2: Curva de Shields para iniciación de movimiento



Fuente: Ponce y Da Silva (2018)

La curva de Shields da el esfuerzo cortante crítico adimensional, τ_c en función del número de Reynolds límite del grano, R_* que se calcula con:

$$R_* = \frac{d_s u_*}{\nu}$$

Con d_s el diámetro de las partículas, u_* la velocidad de fricción contra el lecho y ν la viscosidad dinámica.

La velocidad de la fricción contra el lecho del río se calcula con:

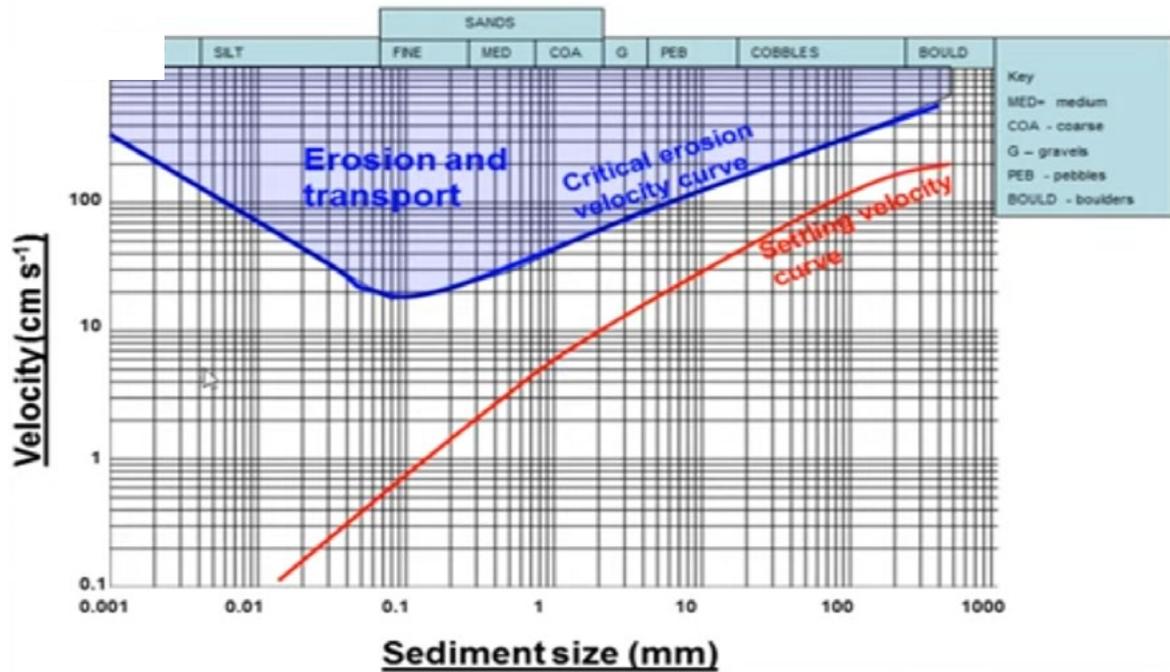
$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

En donde τ_0 es el esfuerzo cortante en el lecho del río y ρ es la densidad del agua en el río.

2.5. Iniciación de movimiento – criterio de Hjulstrom.

El criterio de Hjulstrom para iniciación de movimiento de un sedimento con diámetro d_s se basa en la comparación gráfica de la velocidad media del flujo con una velocidad crítica. Ver la curva de color azul en la Figura 3 que corresponde a la curva de la velocidad crítica para iniciar erosión.

Figura 3: Curvas de Hjulstrom para iniciación de movimiento y finalización de movimiento



Fuente: Fardiansyah (2014).

En el diagrama de Hjulstrom se presenta también la curva de inicio sedimentación / deposición, ver la curva de color rojo. Esta curva siempre se encuentra debajo de la curva que corresponde a iniciación de erosión.

Si en una situación de flujo hidráulico para un diámetro de sedimento, d_s , se encuentra debajo de la curva que corresponde a inicio de sedimentación, no habrá inicio de erosión para este sedimento, d_s . Sí se encuentra por encima de la curva que corresponde a inicio de erosión, habrá erosión y transporte del sedimento, d_s . Si se encuentra entre las dos curvas depende si previo fue erosionado el sedimento, d_s , entonces se quedará en movimiento en transporte, y si previo no fue erosionado, el sedimento se mantendrá en el lecho sin moverse.

2.6. Transporte de sedimentos en un lecho aluvial arenoso en tramos rectos y curvas.

El transporte de sedimentos en un lecho de material aluvial arenoso en un tramo recto se hace simultáneamente de dos formas: transporte en forma de carga de fondo y en forma de carga en suspensión.

Figura 4: Formas de lecho en material arenoso

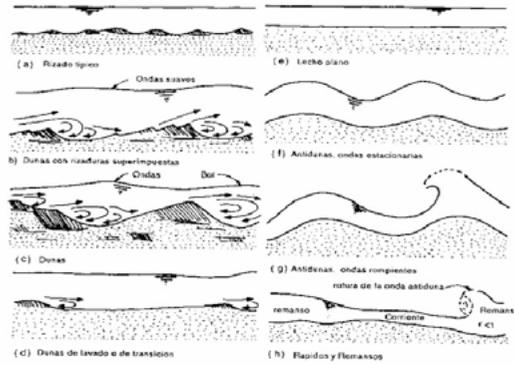
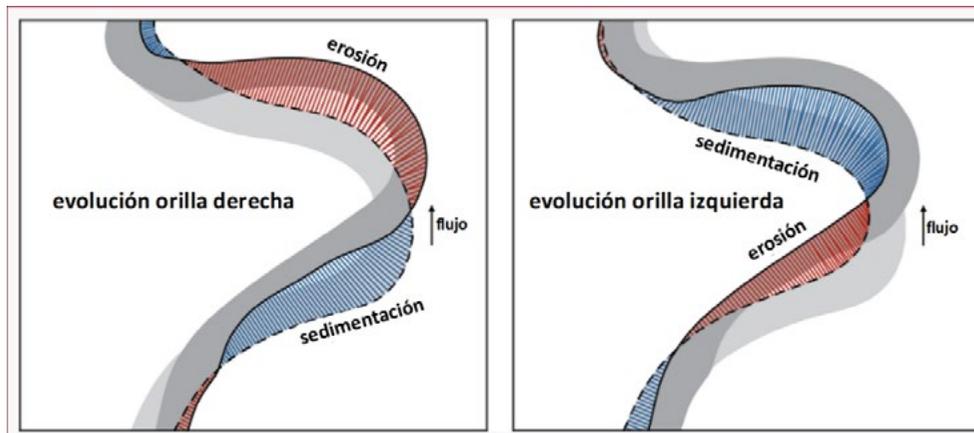


Figura 5.12.- Formas del lecho en ríos arenosos (en Chang, 1988).

Fuente: Chang (1988).

La carga de fondo con material arenoso se mueve conforme formas de lecho correspondientes con la potencia del caudal líquido. Con caudal líquido incrementándose (por ejemplo, durante la creciente de una crecida) las formas de lecho (o formas de fondo) sucesivas con régimen de flujo subcrítico son: plano con risas, dunas con risas, dunas, dunas lavándose (Figura 4). Paralelamente a este aspecto el parámetro de rugosidad al flujo (p.ej. el coeficiente de rugosidad de Manning) baja. Estos fenómenos forman la base para el tema de la capacidad adaptiva de los ríos aluviales. A nivel de detalle el transporte de carga de fondo es intermitente con un continuo proceso de deposición y erosión, aunque a nivel global se observa este transporte de carga de fondo como continuo.

Figura 5: Procesos morfológicos de deposición y erosión en una curva.



Fuente: Sylvester, Durkin y Covault (2019).

En una curva se produce un flujo líquido helicoidal tridimensional, el cual causa en la primera mitad (inicio) de la curva en lado convexo (parte interna inicial de la curva) erosión y en el lado cóncavo (parte externa inicial de la curva) sedimentación y en la segunda mitad (final) de la curva

en el lado convexo (parte interna final de la curva) sedimentación y en el lado cóncavo (parte externa final de la curva) erosión (Figura 5). El desarrollo de las 4 zonas indicadas se debe al trazado en planta y en perfil del thalweg en una curva (Figura 7). La sedimentación que se forma en la parte aguas abajo de una curva interna se caracteriza como una barra de punta.

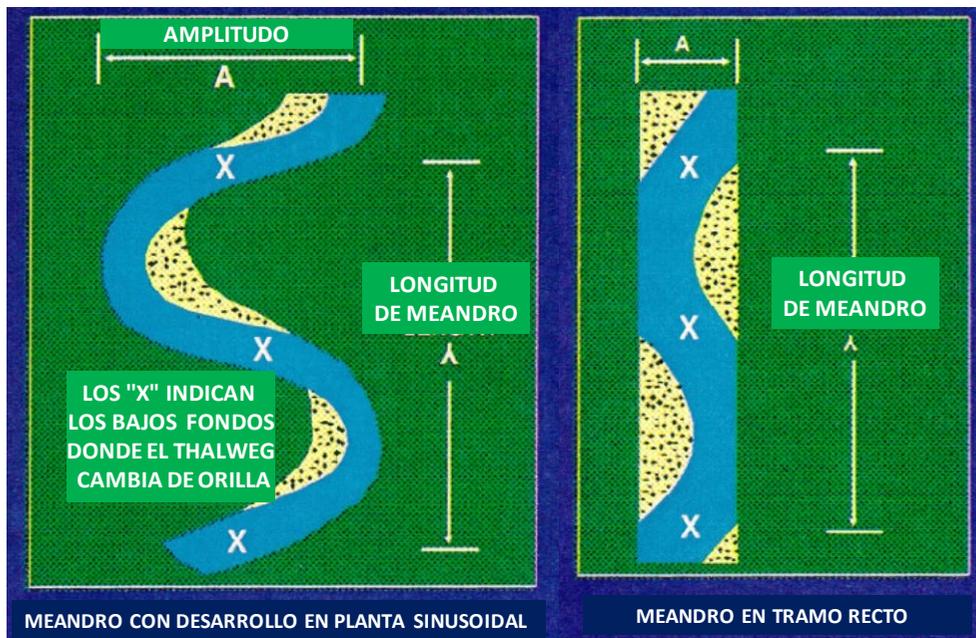
2.7. Un patrón de meandros en planta se mueve en dirección aguas abajo y en sentido transversal.

Del punto 2.6 se concluye que, en un suelo homogéneo y un río con condiciones hidrológicas normales, que los meandros sucesivos se mueven en sentido aguas abajo (en sentido del caudal) y se mueven en un menor grado de magnitud en sentido transversal (Figura 5).

2.8. Formas en planta de un río meándrico.

Un río meándrico se puede presentar en planta de dos formas: con trayectoria sinusoidal o con trayectoria recta. En el área de estudio se presentan las dos formas (Figura 6).

Figura 6: Dos formas en planta para ríos meándricos.



Fuente: Berger y Hochstein (1981).

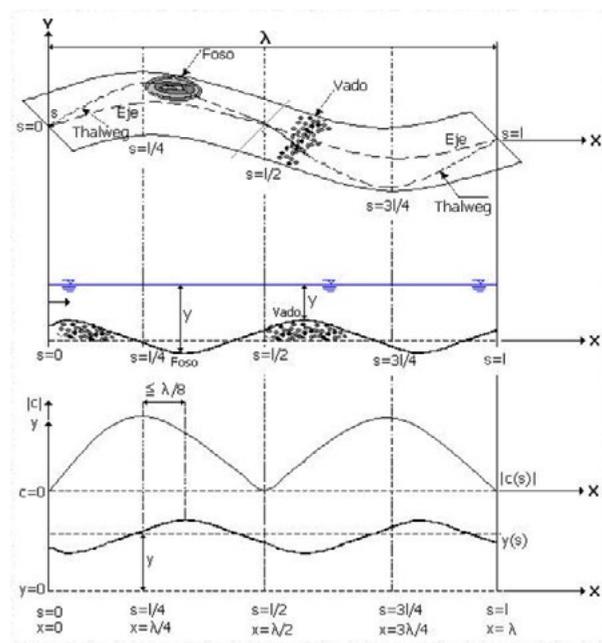
2.9. Leyes de Fargue – relaciones empíricas entre las dimensiones de un meandro.

Según Marín Uribe, G. y Rodríguez Díaz, H.A. (2002):

“El ingeniero francés Fargue presentó los resultados de su estudio empírico de los patrones de meandros sobre el río Garona en el año 1908. Sus conclusiones se conocen como las leyes de Fargue. Son una descripción más detallada de la morfología de un meandro, muy útil para diseñar obras de defensa. Según Fargue existe una relación entre la curvatura en planta del cauce y la pendiente local del fondo del río, ligando el grado de libertad horizontal (planta) con el grado de libertad vertical (perfil).”

Las leyes de Fargue desarrollan las características geométricas de los meandros (Figura 7). Designa como eje de un cauce (coordenada s) el punto medio del segmento perpendicular a las tangentes comunes a las orillas y como thalweg a la línea de puntos más hondos de las secciones transversales. Fargue observó la correspondencia con un desfase máximo igual a $1/8$ (siendo l la longitud de onda), entre la curvatura del eje (en valor absoluto) y la profundidad del agua por el thalweg. Las dos funciones: curvatura $c(s)$ y el tirante o calado $y(s)$ son aproximadamente sinusoidales.

Figura 7: Planta y perfil de un tramo sinuoso y representación gráfica de las funciones de curvatura y calado (profundidad). Leyes de Fargue.



Fuente: Marín Uribe y Rodríguez Díaz (2002).

Una función seno con argumento $(4\pi s)/l$, puede servir para ambas funciones. A partir del gráfico de $y(s)$ puede construirse el fondo del río por el thalweg, el cual muestra que las regiones profundas

(fosas) situadas en las partes cóncavas o externas de las curvas van seguidas por regiones de baja profundidad (umbral – vado - barra) situadas en la inflexión de las curvas.

Más exactamente estos fondos consecutivamente profundos y someros se dan ligeramente aguas abajo de los lugares de curvatura máxima y de curvatura nula.

La expresión más formalizada que puede proponerse para las leyes de Fargue es:

$$\frac{dc}{ds} = k \frac{dy}{ds}$$

Se puede enunciar así: la pendiente local del fondo del *thalweg* (dy/ds) es proporcional (constante k) a la variación de la curvatura del eje (dc/ds). Se supone que la superficie es prácticamente horizontal o bien tiene una pendiente mucho menor que la pendiente local del fondo.

La expresión anterior muestra que:

- La fosa en la parte cóncava de una curva es más profunda cuanto mayor es la curvatura máxima de la curva.
- Un cambio brusco de curvatura ocasiona un cambio brusco de profundidad. Un cambio de curvatura gradual da un perfil de fondo continuo.
- A igualdad de longitud s , la profundidad media en un tramo es mayor a mayor ángulo entre las tangentes a la entrada y a la salida del tramo, es decir, a mayor curvatura media en el tramo.

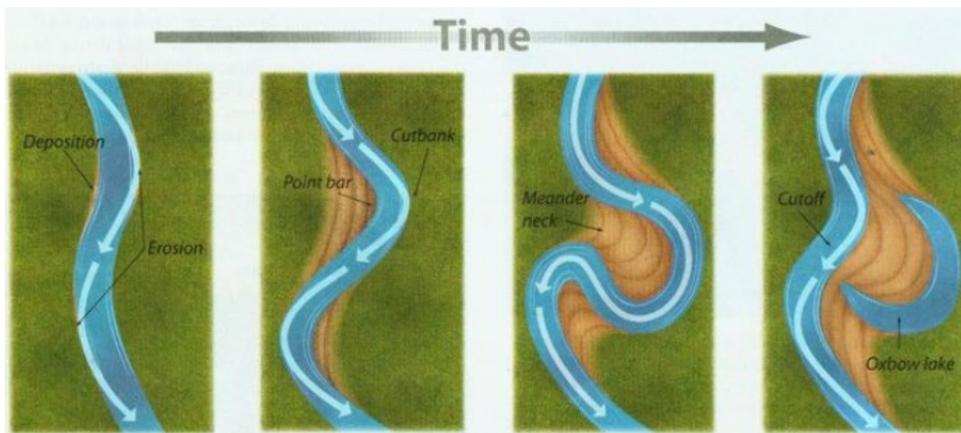
Los meandros de los ríos a la altura de Puerto Villarroel cumplen con las Leyes de Fargue.

2.10. Formación de un lago de herradura (o lago oxbow) y de puntos duros

Cuando un gran meandro es cortado en su cuello del curso principal de río, se forma un lago en forma de herradura a la cual se llama un lago oxbow o un lago de herradura por su típica forma.

La existencia de estos lagos es importante, porque el tapón de material depositado al inicio y al final de estos lagos forman dos puntos duros a considerar en los análisis fluviomorfológico. Estos tapones son más duros que el terreno general, debido a que son formados por una deposición de material granular arenoso bien graduado durante sucesivas crecidas. En la creciente los diámetros sedimentados van subiendo de tamaño y en la bajante van disminuyendo de tamaño. Formándose así un material con granulometría bien gradado arcilloso con cohesión mejor resistente a los procesos de erosión. Es típico, sobre el río Ichilo que varios asentamientos humanos están contruidos sobre tapones de lagos de herradura, por ejemplo, Puerto Villarroel (Figura 10).

Figura 8: Creación, dentro del proceso de formación de los meandros, de lagos tipo herradura

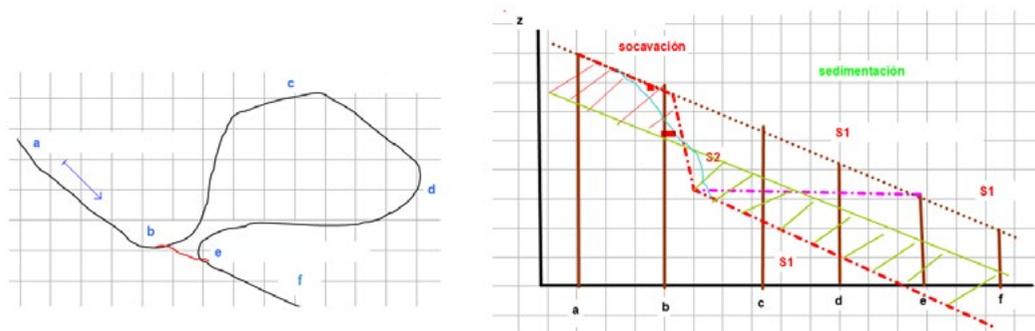


Fuente: Tuschen (2020).

2.11. Perfil del lecho de un río con un corte de meandro

Con el corte la longitud “af” del río se reduce con una distancia “bcde”. El nuevo perfil longitudinal instantáneamente es una línea quebrada “abef”. Este perfil cambiará a un perfil paralelo al lecho original. En el tramo inicial “ab” se tiene erosión y en el tramo final “ef” se tiene deposición. En el tramo central “be” aguas arriba erosión y aguas abajo deposición.

Figura 9: Perfil longitudinal en un corte de meandro.



Fuente: Elaboración propia. (2024).

2.12. La relajación / autoadaptación de un corte de meandro, monitoreo y obras medidas recurrentes

Previo a su corte natural o artificial, el meandro ha ido acumulando energía. Esta energía durante y un tiempo posterior al corte se libera (inicialmente a veces muy brusco y luego de forma más gradual). Se conoce como el fenómeno de relajación / autoadaptación del corte. La relajación se acompaña de tensiones fluviomorfológicas muy grandes generalmente causando un desorden substancial, con riesgos de evoluciones no deseables, tal como pérdida de acceso a infraestructura portuaria u otra infraestructura que requiere de acceso por río, hasta inclusive la destrucción

de obras fluviales, industrias y urbanizaciones en la margen del río. Aquí la gran importancia del monitoreo del río, de la interpretación de este monitoreo y de la intervención con obras tipo medidas recurrentes, si se precisan.

2.13. Irregularidad de un patrón de meandros por no homogeneidad en los suelos y en las condiciones hidrológicas/hidráulicas

Un verdadero patrón de meandros no es tan regular como aparenta de los análisis de los puntos anteriores. Hay más parámetros que influyen.

Un patrón de meandros se ve afectado por condiciones geológicas – tipos de suelos – usos de suelos - existencia de puntos duros.

Lo mismo sucede cuando las características hidrológicas/hidráulicas a lo largo del río varían de forma brusca discontinua en las confluencias, ver 2.1 y Le Noir (1993).

El patrón resultante de un meandro o de una serie de meandros consecutivos depende también de eventos sucedidos y no sucedidos durante el periodo de relajación de un corte de meandro.

Figura 10: Patrón de meandros Puerto Villarroel ríos Ichilo, Sajta y Chimoré – vista 12/94



Fuente: Google Earth Pro (2024).

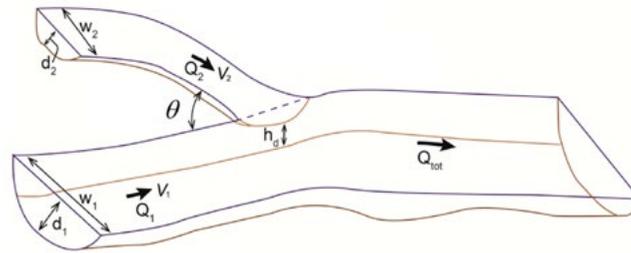
2.14. En una confluencia los dos ríos se deben unir bajo un ángulo suave.

Las confluencias de los ríos son elementos clave de las cuencas de drenaje, su naturaleza hidrológica y geomorfológica influye fuertemente en las características de los ríos aguas abajo.

En una confluencia, el comportamiento del flujo líquido y sólido y los cambios morfológicos están influenciados por la geometría de la confluencia. La **Figura 11** muestra la geometría de una confluencia. Particularmente el ángulo de la confluencia (θ) y la diferencia en posición vertical del lecho entre los dos tributarios (h_d) son los factores típicos geométricos que afectan a la dinámica morfológica de la confluencia.

La hidrodinámica de una confluencia se divide en seis zonas de flujo Best (1984), (i) una zona de flujo estancado, (ii) de deflexión del flujo, (iii) de separación de flujo, (iv) de máxima velocidad, (v) de recuperación gradual del flujo normal y (vi) dos capas mezcladas (**Figura 12**). La extensión de cada zona depende de las relaciones entre los caudales y los momentums del tributario respecto del río principal, del ángulo (θ) de la confluencia, del desnivel (h_d) entre los lechos, de la forma en planta de los dos ríos aguas arriba (**Figura 12**).

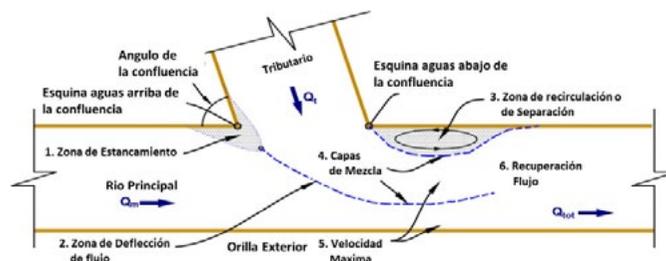
Figura 11: Definición de la geometría de una confluencia



Fuente: Bilal, Xie y Zai (2020).

En la capa de mezcla cerca a la orilla exterior las líneas de flujos del río principal y del tributario se encuentran con velocidades de borde distintas según curvilíneas generando turbulencia y flujos helicoidales. Si el río principal y el tributario entran bajo curvas a la confluencia, cuando mayor sea el ángulo de la confluencia esta capa de mezcla se producirá con mayor turbulencia, flujos helicoidales de mayor importancia y barras importantes se pueden formar aguas abajo.

Figura 12: Seis zonas de flujo identificables en una confluencia



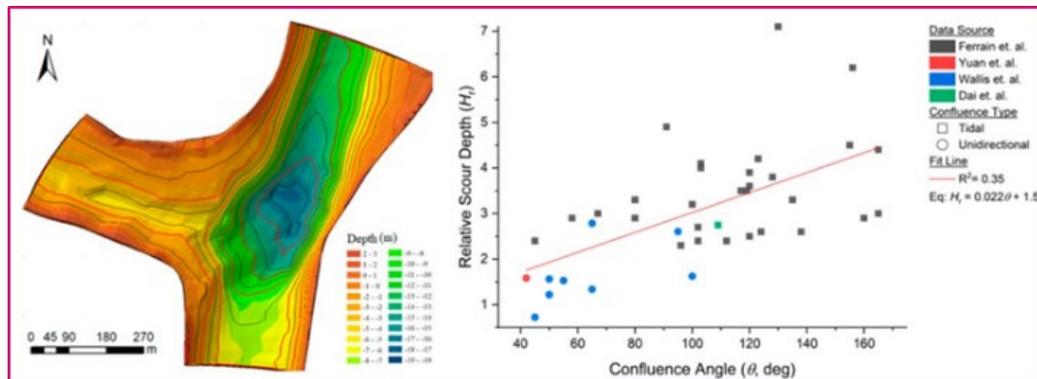
Fuente: Best (1984).

La dinámica de sedimentos en una confluencia resulta compleja dependiendo de las características

de los aportes de sedimentos de los dos ríos que confluyen (el tipo de material del lecho, el diámetro mediano de la granulometría del material del lecho, d_{50} , el caudal líquido y sólido de cada río, la proporcionalidad entre transporte de carga de fondo y carga en suspensión, la geometría batimétrica de la confluencia, ...).

La posibilidad de que se forma una fosa de socavación aumenta con grandes valores del ángulo de la confluencia (θ), con presencia de turbulencia fuerte y con caudales idénticos (Mosley, 1976) (Figura 13). Con grandes valores para la diferencia de niveles (h_d) entre los lechos de los tributarios se ve que la fosa de socavación disminuye en tamaño e inclusive se puede tornar ausente.

Figura 13: Batimetría de una confluencia con una fosa de socavación



Fuente: Bilal, Xie, y Zai, (2020).

En resumen, se puede ver, que para tener una confluencia “sin” problemas, el ángulo de la confluencia (θ) debe ser muy pequeño, de preferencia bastante inferior a 30 grados. Influye también positivamente cuando el afluente tenga un nivel de lecho por encima del lecho del río.

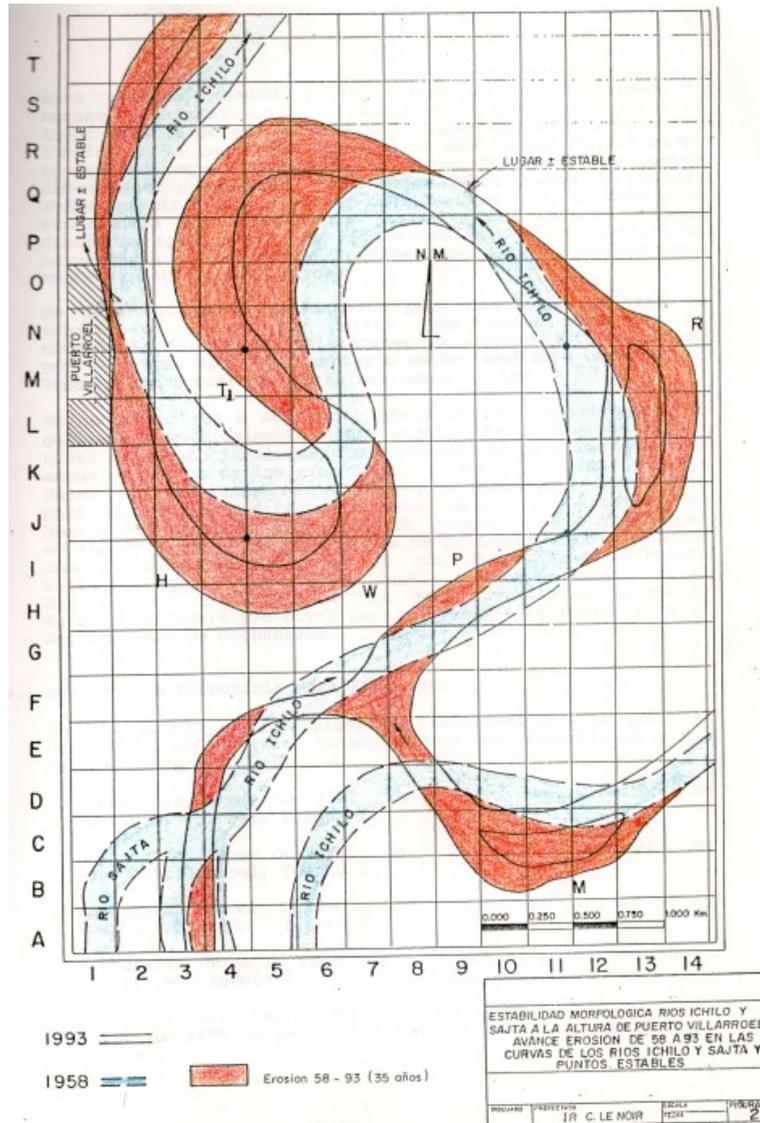
A continuación, se trata brevemente los aspectos más importantes de los dos estudios realizados respecto a la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel.

2.15. Estudio fluviomorfológico de Puerto Villarroel de 1958 a 1993.

En este estudio, Le Noir. (1993), concluyó que de 1958 a 1993, en una superficie S_1 de $3.5 \times 5.0 = 17.5 \text{ km}^2$ alrededor de Puerto Villarroel que contenía la confluencia Sajta-Ichilo, se produjo la erosión de una superficie de 6.175 km^2 o una erosión promedio anual de 0.170 km^2 ($= 1\%$ de S_1) (Figura 14). El análisis gráfico realizado en la Figura 14 hace ver que, para los 36 años de analizados, hubo dos puntos que no sufrieron erosión o que no sufrieron mucha erosión. El primer punto coincide con el sector aguas abajo de Puerto Villarroel y el segundo punto se ubica sobre la margen derecha aguas arriba de la curva T. En la Figura 10 se puede ver que estos dos puntos se sitúan sobre el tapón de un viejo meandro cortado. Estos tapones por su proceso de formación son puntos de control morfológico. El análisis gráfico en la Figura 14 hace ver que las dos curvas T-T1

y W-H respecto a otras curvas han estado erosionando con velocidades grandes y que su situación de ambas curvas en 1993 estaba crítica pudiendo convertirse en cortes desfavorables para Puerto Villarroel.

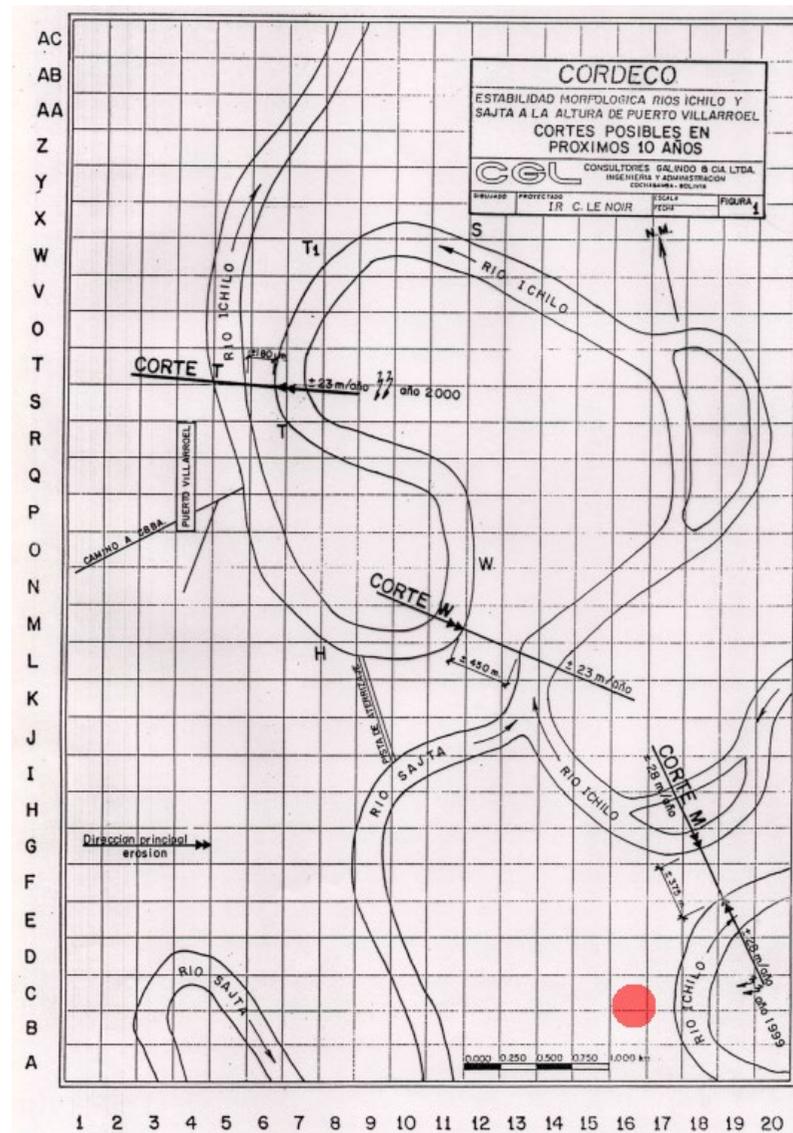
Figura 14: Erosión total producida de 1958 a 1993 y análisis de puntos duros en superficie S_1



Fuente: Le Noir (1993).

El estudio presenta también análisis hidrológico para hacer ver la importancia de los afluentes fuertes como el río Sajta y el río Chimoré. Aplica además la teoría de Yang de la mínima disipación de energía por unidad de tiempo a los meandros del río Ichilo y Sajta. Destaca que aguas arriba de la confluencia existen unos meandros regulares sobre los ríos Ichilo y Sajta, el río Chimoré no tiene más meandros conforme patrones. Hace al mismo tiempo un análisis extenso de las superficies erosionadas y depositadas y de la longitud de ríos entre los momentos sucesivos de los 4 cortes históricos que se produjeron en el periodo de estudio 1958 a 1993.

Figura 15: Características posibles futuros cortes en Puerto Villarroel a partir de 1993



Fuente: Le Noir (1993).

En este estudio, se indicó gráficamente los tres posibles conflictivos cortes T, W y M para Puerto Villarroel con la distancia de cuello que quedó, con la indicación de la velocidad anual de corte, la dirección principal del corte y una estimación para el posible año de corte (Figura 15).

Ante el escenario del corte conflictivo T, mediante el estudio se solicitó mayor intervención para el diseño de la solución al problema del corte T e inmediata ejecución de este diseño, argumentando que sin prontas Obras de Defensa Puerto Villarroel corría el serio riesgo de ser arrasado de igual forma como sucedió en 1962 con el Puerto de Todos Santos, siendo Puerto Villarroel el único lugar factible para un puerto en el Departamento de Cochabamba.

2.16. Estudios fluviomorfológicos – diseño, ejecución y seguimiento a Obras de Defensa – 1994-1998

A partir de noviembre 1993 SEMENA y la COOPERACIÓN BELGA contrataron al Prof. Dr. Ir. Peters J.J.†, experto internacional belga en Transporte de Sedimentos, Hidráulica y Morfología de Ríos con el objetivo de analizar los cambios morfológicos pasados, predecir los cambios morfológicos futuros y realizar el diseño hidráulico – morfológico de las obras necesarias para dar nuevamente a Puerto Villarroel estabilidad fluviomorfológica (a la urbanización, a la infraestructura portuaria y al acceso fluvial a la infraestructura portuaria).

Para la predicción de los cambios morfológicos el Prof. Peters no usaba modelos matemáticos ya que entonces estos modelos (MIANDRAS del Laboratorio DELFT HYDRAULICS, por ejemplo) únicamente se basaban en los cambios en planta sin considerar el carácter tridimensional, tampoco variabilidad hidráulica y sedimentológica del río, elementos claves en sistemas como el del Ichilo-Sajta-Chimoré. El Prof. Peters tenía desarrollada su propia metodología para la predicción de cambios morfológicos en ríos salvajes divagantes, basándose en observaciones visuales al río (terrestres, fluviales y aéreas), interpretación de planos batimétricos y datos de mediciones hidrográficas, hidráulicas y sedimentológicas. Aplicó su método con éxito a varios ríos a nivel internacional como ser algunos: río Zaire (o Congo) en Africa Central, río Brahmaputra en Bangladesh, río Ganges en India, ríos Pirai y Desaguadero en Bolivia, río Schelde y río Loire en Europa, río Balsas en México Peters J. J. (1993).

Hubo 3 informes: Peters (1994), Peters (1997) y Peters (1998) y varias comunicaciones directas con el Prof. Dr. Ir. Peters, J.J.

2.17. Obras de Defensa tipo Medidas Recurrentes, Monitoreo y Análisis de Datos Fluviomorfológicos.

El experto J.J. Peters definió la necesidad de emplear un programa de obras de defensa tipo medidas recurrentes. El no optó por un programa de obras grandes costosas de varios volúmenes de hormigón que no dan finalmente la seguridad necesaria, (ver actuales problemas con el río Mississipi en los E.U, con varios ríos en Europa,..), pero si optó por un programa de obras tipo medidas recurrentes acompañado de un programa de monitoreo y análisis de datos fluviomorfológicos, donde se acepta cierto grado de riesgo y donde se interviene constantemente con pequeñas obras preparando con los flujos de aguas bajas el río para el tránsito de caudales grandes. Se trabaja normalmente con obras de bajo costo, construido con materiales y mano de obra local. Esta metodología a nivel mundial ha demostrado dar el mejor resultado para ríos salvajes divagantes como el río Mekong en China, Tailandia, Camboya y Vietnam, el río Brahmaputra en Bangladesh, el río Ganges en India, el río Pirai en Bolivia (Peters, 2000).

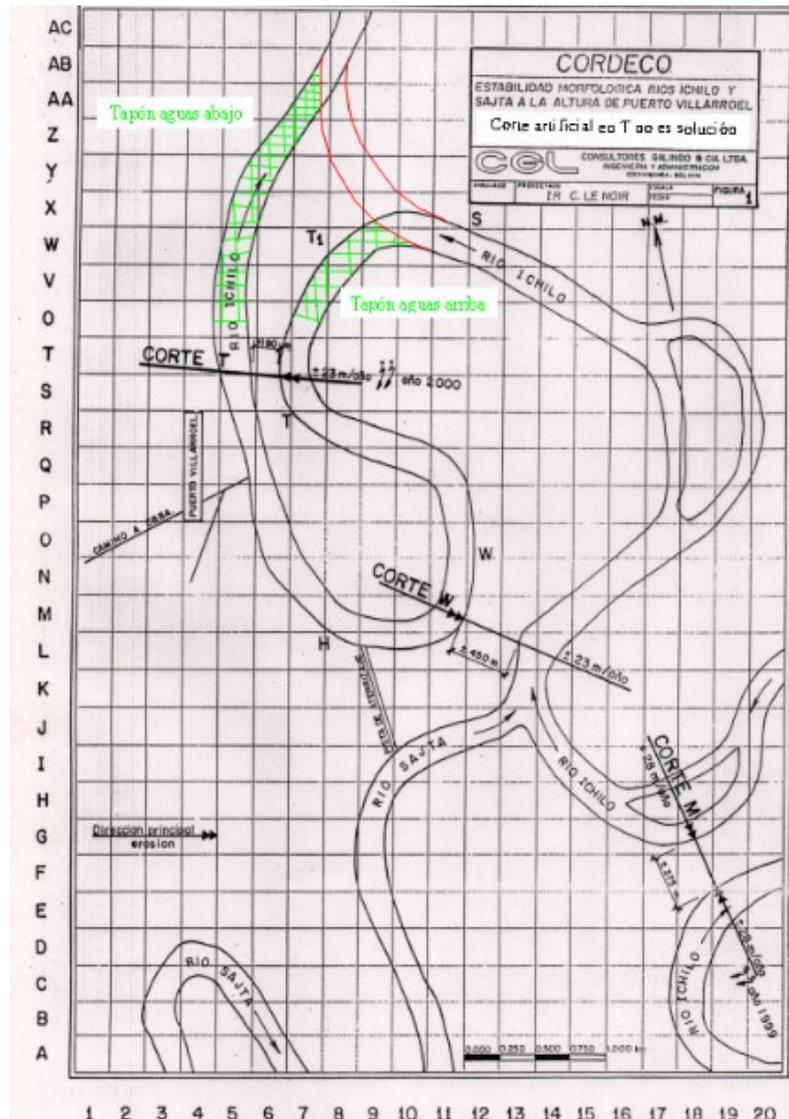
3. RESULTADOS – OBRAS DISEÑADAS Y EJECUTADAS 1995 A 1998

3.1. Año 1994

3.1.1. Un corte T artificial no fue la solución al problema.

Algunos profesionales sugirieron realizar artificialmente el corte T según un trazado alejado del sector conflictivo de corte natural, de la urbanización y de la infraestructura portuaria. Puerto Villarroel hubiese así estado ubicado al lado oeste de un lago (Figura 16). El problema de la erosión de márgenes iba ser resuelto (erosión cero) para la urbanización y la infraestructura portuaria. Para el acceso fluvial al puerto ellos estaban convencidos que con regularidad se iba a tener que realizar y financiar trabajos de dragado de mantenimiento desde el río activo hasta la infraestructura portuaria.

Figura 16: Un corte T artificial no es aceptable



Fuente: Elaboración propia (2024).

El experto J.J. Peters rechazó esta alternativa, indicando la experiencia, con trabajos de dragado de un acceso a un puerto fluvial, que son de carácter muy repetitivos, exigiendo costos elevados que resultan generalmente superiores a los ingresos del puerto fluvial. Es una condición *sine qua non* en transporte fluvial que los puertos fluviales deben ubicarse en la margen del río vivo.

3.1.2. La protección de los bancos no fue considerada una buena opción

Obras de protección de ladera eran muy costosas para Puerto Villarroel viendo la gran diferencia entre aguas altas y bajas de 8.5 m, la gran longitud de margen que debería ser protegida, la no disponibilidad cerca a Puerto Villarroel de material escollera y la problemática con la morfología de los ríos de Puerto Villarroel.

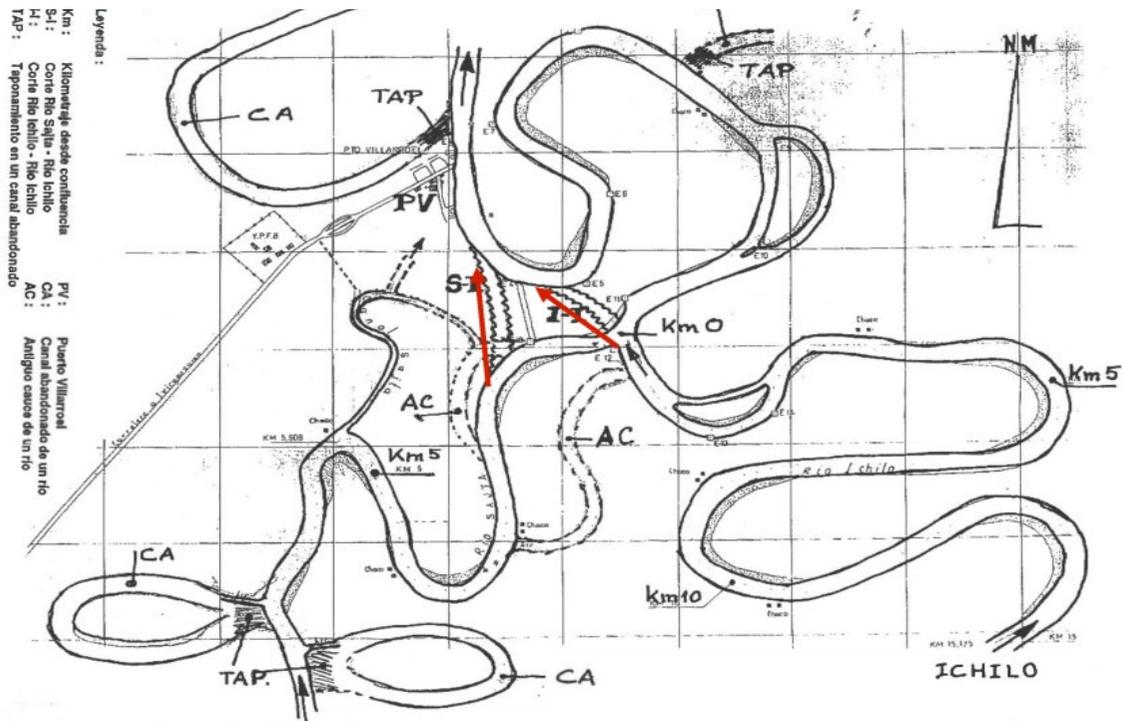
Obras de protección de ladera se justifican cuando la morfología del lugar está en un equilibrio relativamente aceptable. "Ese" no era el caso en 1994 manifestándose el problema con el corte T, la erosión grande en la margen izquierda aguas arriba de Puerto Villarroel y la dificultosa confluencia del río Sajta al río Ichilo. La confluencia estaba bajo un ángulo de 90 ° obligando a un flujo de orden secundario helicoidal con gran potencial de erosión y remanso de agua (inundación) hacia aguas arriba, ver **Figura 10**.

3.1.3. La mejor alternativa fue la ejecución de dos cortes S-I e I-I

El proyecto de dos cortes S-I (del río Sajta al río Ichilo) e I-I (del río Ichilo al río Ichilo) con trazados que garantizan una confluencia suave del río Sajta con el río Ichilo, de tal forma que los dos ríos fluirían hacia Puerto Villarroel con una curva leve (radio lo más grande posible, para evitar flujo helicoidal y erosión asociada de la orilla) (**Figura 17**).

Este proyecto desactivaría el corte T, resolvería el problema de la confluencia conflictiva del río Sajta al río Ichilo y parcialmente resolvería problemas en el tramo de río de 1.5 km aguas arriba de Puerto Villarroel.

Figura 17: Análisis morfológico de la confluencia Ichilo-Sajta y proyectos para los cortes artificiales S-I e I-I

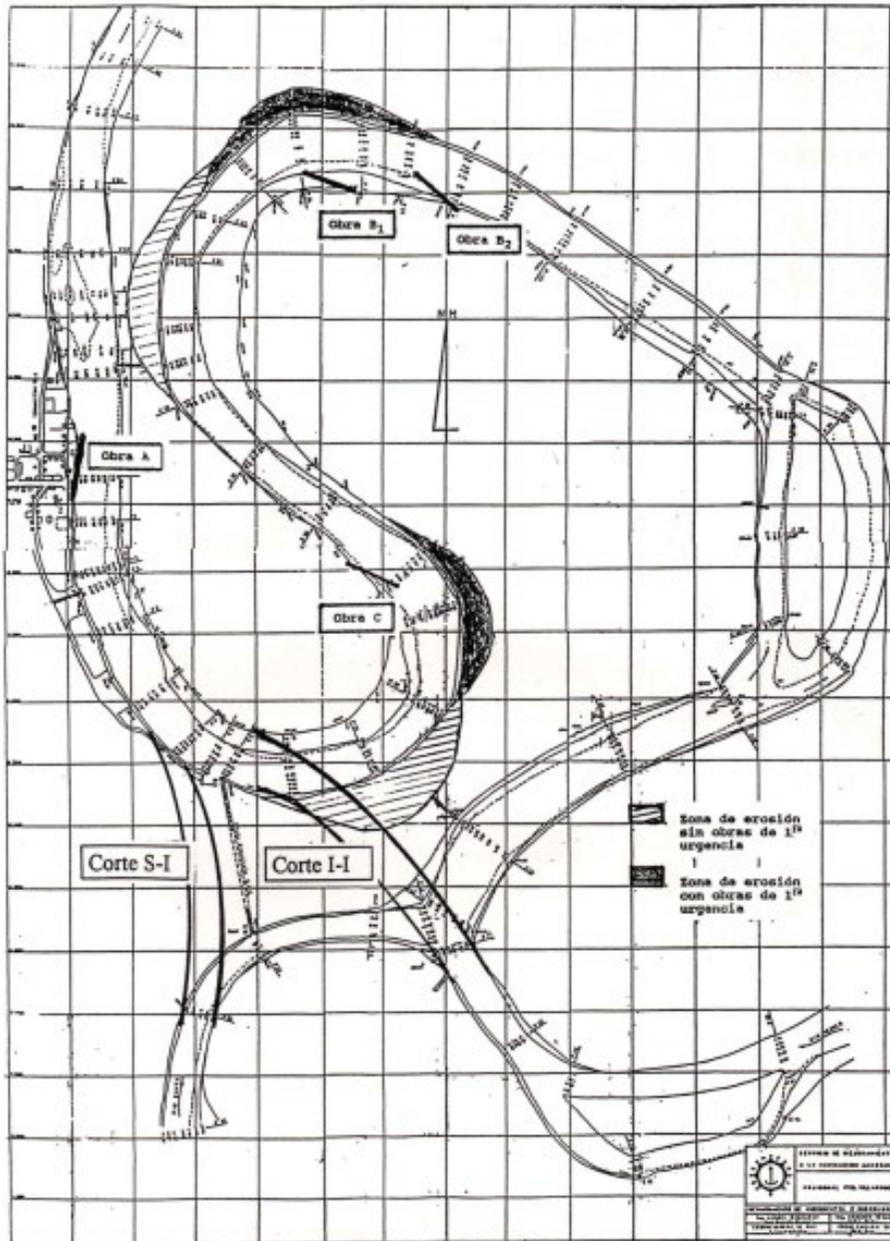


Fuente: Peters (1994).

3.1.4. Trabajos de emergencia de alta prioridad

Como el diseño, el visto bueno con el financiamiento, la licitación y la adjudicación de contrato para y la ejecución de los cortes S-I e I-I iban a tomar tiempo, se propuso construir estructuras para temporalmente disminuir retardar la erosión en el esperado conflictivo corte natural “T” (Figura 18).

Figura 18: Trabajos de emergencia de alta prioridad



Fuente: Peters (1994).

Obras de emergencia de alta prioridad B₁ y B₂

Dos estructuras “B₁” y “B₂” tipo “medidas recurrentes” fueron diseñadas aguas arriba de T para desviar el flujo y reducir el radio de curvatura allí de modo que la erosión de la orilla externa en el sector conflictivo de T disminuya (Figura 18).

Obra de emergencia de alta prioridad C

Otra estructura “C” similar a las estructuras B₁ y B₂ fue diseñada para que el radio de la curva

aguas arriba de Puerto Villarroel disminuya y crea mejores condiciones para la ejecución de los Cortes I-I e S-I (Figura 18).

Obra de emergencia de alta prioridad A

Una estructura de retraso de flujo “A” fue diseñada para reducir la erosión de las orillas de Puerto Villarroel aguas arriba del puerto (Figura 18).

3.2 Año 1995

3.2.1 Ejecución de obras B₁, B₂ y C de abril a julio 1995

Las obras B₁, B₂ y C estaban compuestas de espigones permeables cada uno de ± 300 m de longitud. Su pantalla de 1 m de altura era de bambú fijado a bolillos de 4 m de longitud, hincado 3 m en el suelo (Figura 19).

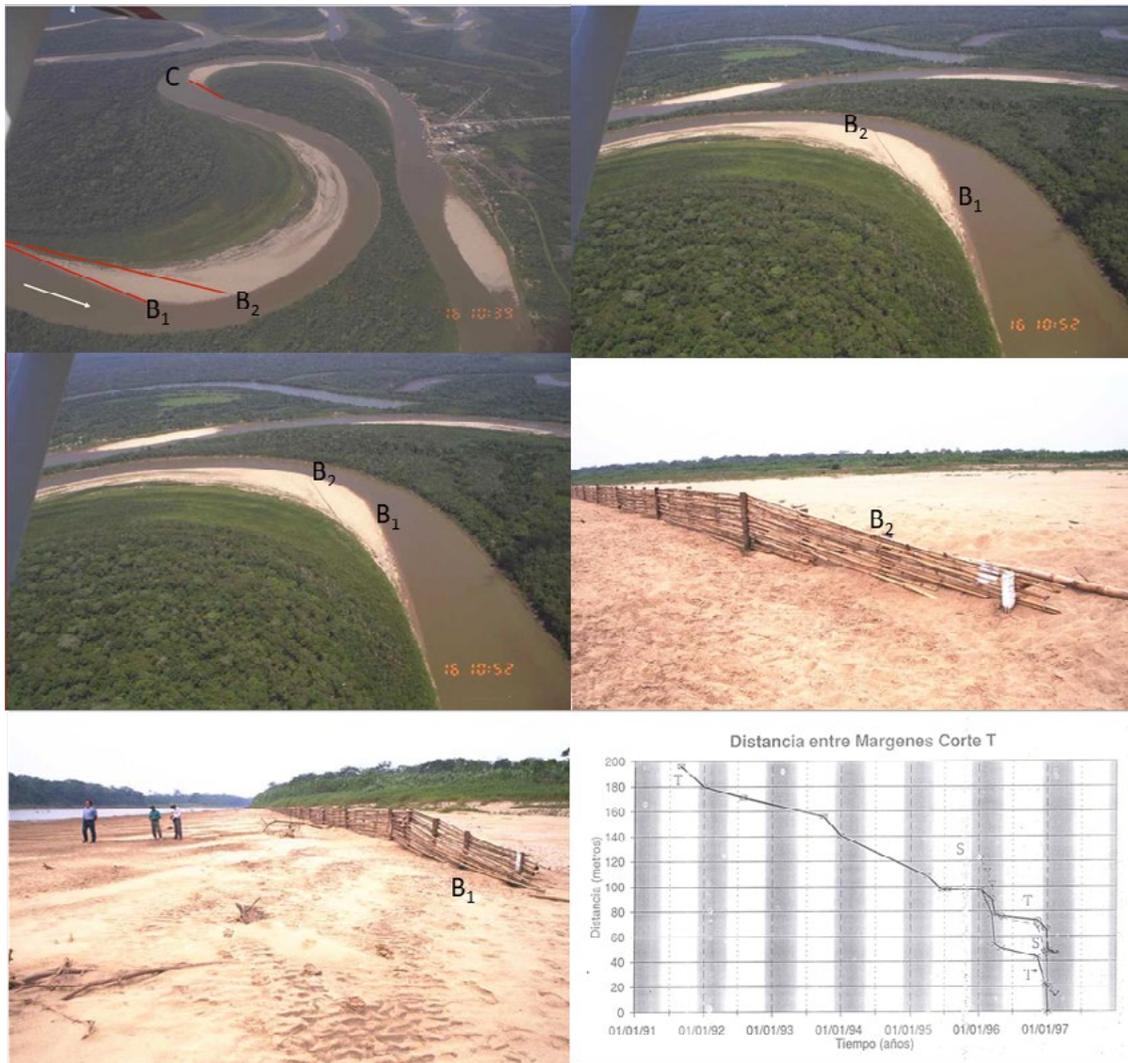
Las obras B₁ y B₂ fueron construidas en la margen izquierda en el sector más aguas arriba del banco de arena que corresponde a la curva T. El propósito de estas obras fue de disminuir la erosión en la margen derecha del sector aguas arriba del sector conflictivo del corte T. Estas obras ayudaban a reorientar el ataque erosivo del flujo a un lugar menos conflictivo más aguas arriba.

Durante las crecidas pequeñas del río Ichilo en aguas bajas, los espigones permeables iban a generar detrás de su pantalla por reducción de velocidad del flujo de agua una deposición del material fino de la carga en suspensión. De esta forma detrás del espigón de forma natural se generó una barra de mayor resistencia. En la Figura 19, se observa la creación de la barra detrás de ambos espigones.

Durante crecidas mayores la barra creada iba ayudar a empujar parte del flujo principal hacia la margen derecha haciendo que el ataque erosivo se produzca más aguas arriba del sector conflictivo del corte T. La gráfica que está en la Figura 19, demuestra que con obras B₁ y B₂ el corte T en sector conflictivo en febrero 97 en el momento de la apertura de los cortes S-I e II quedó en 44 m y que sin estas obras hubiese quedado en 14 m. 14 m hubiese sido en realidad roto – corte T activado. Se concluye que las obras B₁ y B₂ cumplieron su objetivo exitosamente.

La obra C fue un espigón similar a los espigones B₁ y B₂, tenía como objetivo suavizar la actividad erosiva en la margen izquierda de la curva del río Ichilo aguas arriba de Puerto Villarroel. Fue un espigón de altura variable desde la punta de la orilla siguiendo el terreno de tal forma que diferentes partes de la obra trabajan según el nivel de la crecida (Figura 20).

Figura 19: Obras B_1 , B_2 y C espigones longitudinales permeables tipo medidas recurrentes



Fuente: Peters (1997) y Peters (1998).

Las obras B_1 y B_2 y C fueron planteadas y construidas como obras tipo medidas recurrentes. Por su material de construcción, bolillos de madera y ramas bambú, su costo de inversión era bajo. Además, es una obra que no se precisaba por años.

Figura 20: Obra C espigón longitudinal permeable de tipo medida recurrente



Fuente: Peters (1997).

3.2.2 Desbroce preventivo en los lugares de corte S-I e I-I de enero a abril 1995

Como a principios 1995 el financiamiento para la construcción de los grandes cortes de río S-I e I-I no estaba claro, se vio por necesario intentar lo más posible disminuir la intensidad erosiva en el lado aguas arriba del posible conflictivo corte T. Por lo tanto, mediante la realización del desbroce del bosque sin remoción de las raíces en los lugares de los cortes S-I e I-I, se permitió que con grandes crecidas las aguas de inundación ya podían dirigirse con mayor facilidad por los lugares de los cortes S-I e I-I. El desbroce se realizó sobre un ancho de 30 m, 15 m a ambos lados del eje de los cortes.

3.3 Periodo 1996 – 01/1997

3.3.1 Ejecución excavación cortes S-I e I-I de octubre 1996 a enero 1997

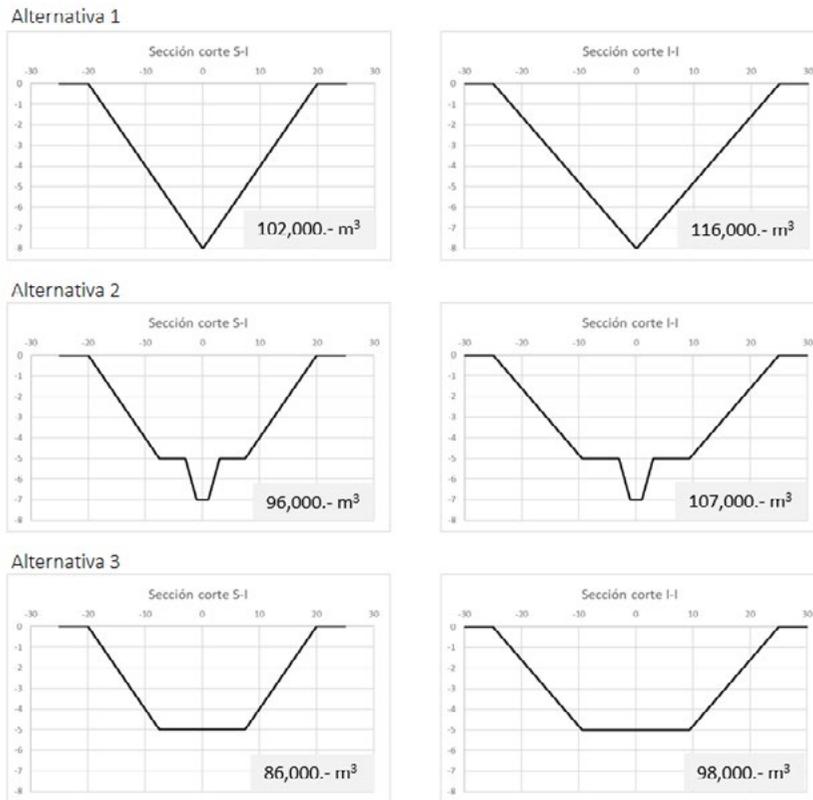
Los cortes S-I e I-I aparte de desactivar al conflictivo corte T en un plazo corto, debían garantizar una confluencia suave del río Sajta con el río Ichilo y además debían tener un trazado geométrico que inducía la formación de meandros hacia el este (alejándose de Puerto Villarroel). El cumplimiento de estos tres requerimientos con cortes inducidos por un canal piloto pequeño era imposible y de mucho riesgo.

Para cumplir con lo anterior, se debía diseñar dos canales pilotos con dimensiones grandes, los cuales debían favorecer una autoadaptación/relajación rápida y segura del canal piloto al canal normal del río basándose sobre altas tensiones de arrastre.

Se analizaron 3 alternativas de secciones transversales: (1) triangular S-I ancho 40 m y 8 m de profundidad e I-I 50 m y 8 m; (2) doble trapezoidal S-I base superior 40 m, base inferior 15 m a 5

m de profundidad y base superior (en la base inferior de la sección grande) 6 m, base inferior 2 m a 2 m de profundidad, I-I base superior 50 m, base inferior 18.75 m a 5 m de profundidad y base superior (en la base inferior de la sección grande) 6 m, base inferior 2 m a 2 m de profundidad, profundidad total sección alternativa 2 7 m (3) *trapezoidal* S-I base superior 40 m, base inferior 15 m a 5 m de profundidad I-I base superior 50 m, base inferior 18.75 m a 5 m de profundidad (Figura 21).

Figura 21: Alternativas para la sección transversal de los cortes S-I e I-I

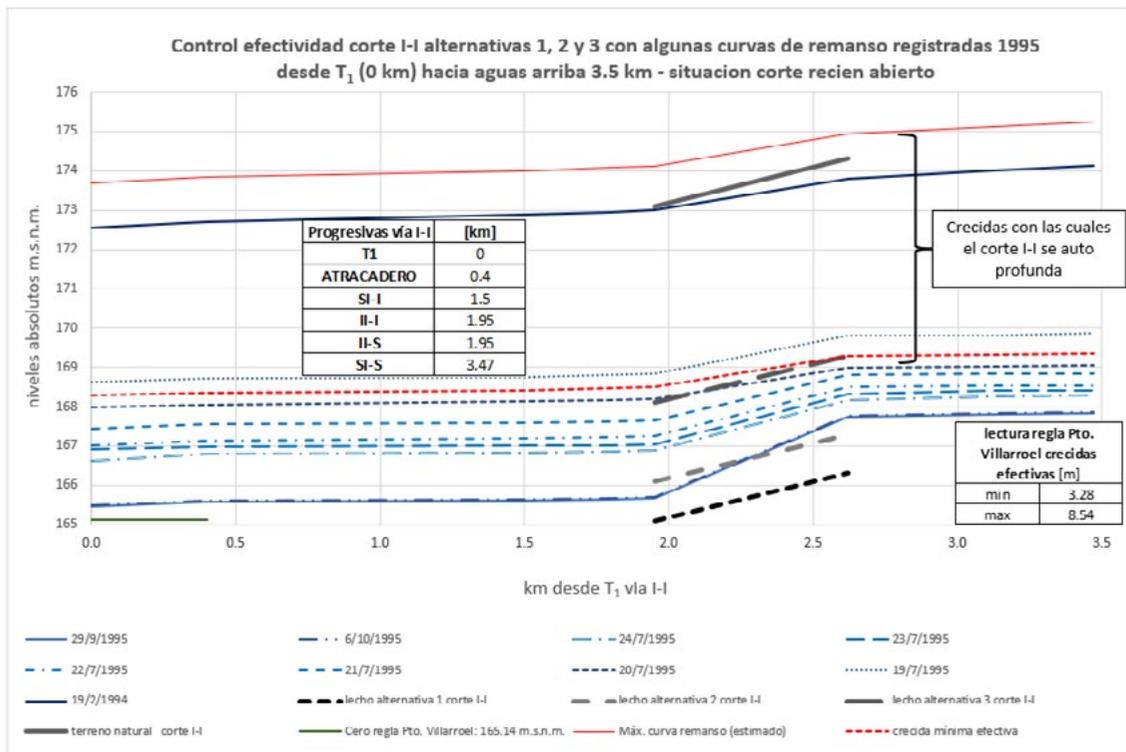


Fuente: Peters (1995).

Aparentemente canales pilotos con las secciones de las alternativas 1 y 2 fueran mejor que canales pilotos con las secciones de la alternativa 3. Analizando niveles, alternativas 1 y 2 se autoadaptarían ya desde época de aguas muy bajas, con niveles en la regla de Puerto Villarroel superior a -1.70 m y -0.70 m (Figura 22 y Figura 23). Habían tres puntos en contra: (1) en época de aguas muy bajas los caudales en los ríos son bajos y el efecto global de la autoadaptación del canal piloto a la sección normal del río sería mínimo y tal vez inclusive contraproducente (2) los canales pasan por estratos de suelos arenosos, muy permeables transmitiendo de forma casi inmediata los niveles del agua del río a la fosa de excavación forzando a una excavación costosa bajo agua obligando a una excavación con grúas de cable o con excavadoras grandes en lugar de excavación barata

con tractor (3) los volúmenes de excavación de alternativas 1 y 2 son superiores a los volumen de excavación de alternativa 3. El costo de inversión de alternativas 1 y 2 era superior a alternativa 3. La alternativa 3 resultaba la mejor alternativa a nivel técnico y económico. Los canales pilotos pudiendo ser excavadas en época de aguas bajas de junio a septiembre 1996 y abiertos a la acción de los ríos fines septiembre 1996 entrando gradualmente a la época de aguas altas 1996-1997 permitiendo una autoadaptación gradual de los canales pilotos a las dimensiones reales de los ríos Ichilo y Sajta (Figura 24). Para no perjudicar en la autoadaptación / relajación suave de los dos cortes, todo el material de excavación de los canales debía colocarse a 50 m del borde izquierdo de cada canal piloto.

Figura 22: Análisis efectividad alternativas para canal piloto corte I-I



Fuente: Elaboración propia (1995).

Figura 23: Análisis efectividad alternativas para canal piloto corte S-I

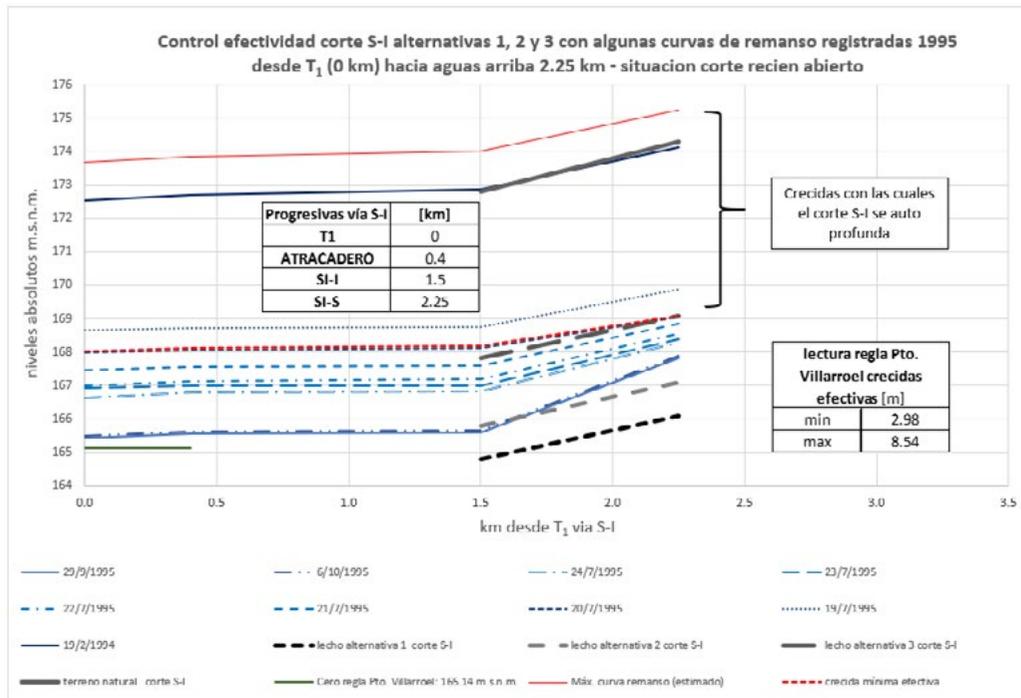
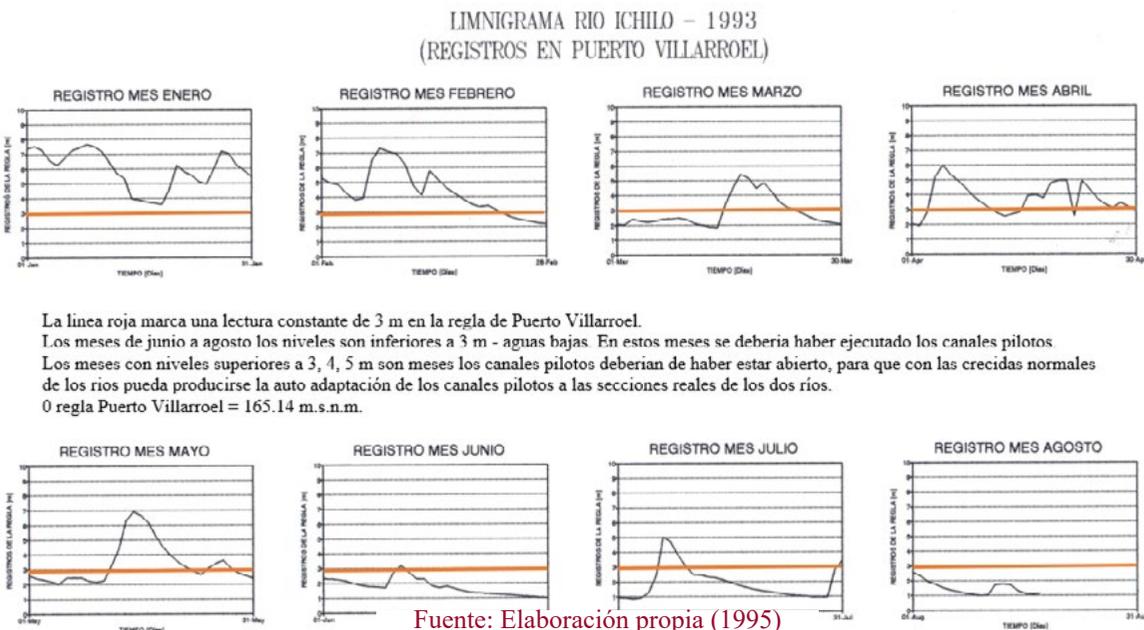


Figura 24: Análisis niveles regla Puerto Villarroel para excavación y apertura de los canales pilotos S-I e I-I



Los canales pilotos debieron haberse construido en época de aguas bajas 1995. Lamentablemente los fondos para el proyecto se liberaron recién en septiembre 1996. Dado el crítico estado del corte

T en septiembre 1996 no hubo tiempo para postergar el inicio de obras a época de aguas bajas 1997. Después de un periodo procedimental para licitación / adjudicación / firma de contrato, las obras se iniciaron fines octubre 1996 con la estación de lluvia y época de aguas altas en la puerta.

La excavación a partir de octubre 1996 fue complicada. La presencia de agua en la fosa de excavación por filtración de agua, desde los ríos, que estaban con niveles altos, obligaba a excavar con excavadora material húmedo – lodoso (excavación con tractor fue imposible). Las precipitaciones, que estaban continuas e intensas, por época de lluvias, dificultaban impedián el tránsito con volquetas para el transporte horizontal y el acomodo del material excavado. La mayor parte de la excavación fue realizada con excavadoras grandes. El transporte y la deposición final del material de excavación se realizó hasta donde se podía empujando con tractores y en casos extremos traspaleando con excavadoras.

A fines diciembre 1996 y principios enero 1997 hubieron crecidas fuertes que inundaron el área de trabajo y que causaron fuertes tensiones sobre el área del corte T. En su parte más conflictiva el corte T llegaba a medir solamente 44 m e importante flujo de agua había pasado del lado aguas arriba al lado aguas abajo. Por esta crítica situación del conflictivo corte T se definió entregar lo más pronto posible las excavaciones de los canales pilotos de los cortes S-I e I-I “en el estado que estaban avanzados al momento” a la acción de los dos ríos para que se formen los cortes S-I e I-I, mismos desactivando así al corte T.

Después de realizar excavaciones de ajuste para garantizar un flujo fluido por los cortes, los canales pilotos, tal como excavados hasta el momento, fueron abiertos a la acción de los ríos mediante la excavación de los tapones aguas arriba y aguas abajo. El corte I-I se abrió el 15 de enero (Figura 25) y el corte S-I el 21 de enero (Figura 26).

3.4 Día 30 de enero 1997

3.4.1 Fase de autoadaptación de los canales pilotos S-I e I-I desde el 30 de enero 1997

A partir del 30 de enero 97 se produjo una crecida fuerte de varios días con niveles en la regla de Puerto Villarroel superior a 7 m, la cual inicio la fase de autoadaptación de las secciones de los canales pilotos S-I e I-I a las secciones de los ríos Sajta e Ichilo (Figura 27).

La Tabla 4 es el resumen cronológico de los volúmenes de excavación acumulados por los dos cortes durante los ocho primeros meses del periodo autoadaptación.

Hubo al principio una gran erosión en el corte S-I debido a tres razones. (1) A que este corte ha recibido parte de los caudales del río Ichilo, que debían dirigirse por el corte I-I. (2) A que el corte S-I tuvo la ventaja de que aguas arriba se encontraba en un ex lecho del río Ichilo, donde le fue muy fácil realizar la profundización que se produce con un corte de río en el perfil longitudinal (en material no compactado de deposición de sedimentos del propio río Sajta). Esto no costó

mucha energía al río Sajta y este río logro de tal forma a movilizar fácilmente un gran volumen de sedimentos de aguas arriba y de su canal piloto mismo y (3) el canal del corte S-I se encontraba mucho más cerca de su sección de diseño 80 % que el canal piloto del corte I-I 44%.

Figura 25: Fotografía 22/01/97 en primer plano corte I-I y a la izquierda corte S-I



Fuente: Elaboración propia (1997).

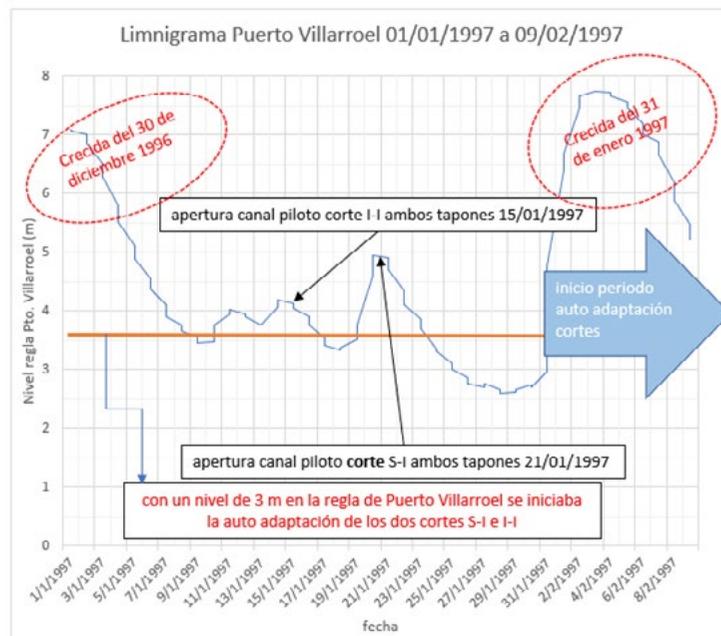
Con el corte I-I hubo menos erosión al principio, sin embargo, a medida que el tiempo avanzó ha continuado la erosión en este corte. Es extraño, porque los suelos en el lugar tenían condiciones más desfavorables que en el corte S-I. Existen varias razones por el funcionamiento con menor eficiencia del corte I-I. (1) desvío de una parte considerable de su caudal por el corte S-I; (2) menor grado de avance obtenido en el canal piloto; (3) la corrección de la margen izquierda del río Ichilo aguas arriba de la entrada que no estaba ejecutada. (4) los efectos del corte I-I se estaban desarrollando en un lecho completamente virgen, así que el río Ichilo precisaba también disipar parte de su energía en la profundización del tramo del río Ichilo aguas arriba del corte, y por ende el río no ha podido disipar la totalidad de la energía del corte en el canal piloto mismo, lo que sí ha podido el río Sajta en el corte S-I.

Figura 26: Fotografía 22/01/97 en primer plano corte S-I y a la derecha corte S-I



Fuente: Elaboración propia (1997).

Figura 27: Limnigrama Puerto Villarroel enero 1997 - fechas de apertura y de inicio periodo de autoadaptación de los canales piloto



Fuente: Elaboración propia (1997).

Tabla 4: Análisis inicio periodo de autoadaptación de los canales pilotos I-I y S-I

fecha	Evento	Corte I-I		Corte S-I	
		[m ³ /s]		[m ³ /s]	
		98,000	Volumen a excavar según proyecto	86,000	Volumen a excavar según proyecto
15/1/1997	Apertura corte I-I	44,050 44.9% % de avance en apertura	excavado mecánicamente (I)		
21/1/1997	Apertura corte S-I			68,910 80.1% % de avance en apertura	excavado mecánicamente (II)
31/1/1997	Inicio auto adaptación de los dos canales pilotos				
4/2/1997	Batimetría SEMENA 04/02/1997	212,000	TOTAL excavado mecánicamente (I) y auto adaptación al 04/02/1997	450,000	TOTAL excavado mecánicamente (II) y auto adaptación al 04/02/1997
		216.3% proporcionalidad respecto a proyecto		523.3% proporcionalidad respecto a proyecto	
24/2/1997	Batimetría SEMENA 24/02/1997	250,000	TOTAL excavado mecánicamente (I) y auto adaptación al 24/02/1997	550,000	TOTAL excavado mecánicamente (II) y auto adaptación al 24/02/1997
		255.1% proporcionalidad respecto a proyecto		639.5% proporcionalidad respecto a proyecto	
14/8/1997	Batimetría SEMENA 14/08/1997	500,000	TOTAL excavado mecánicamente (I) y auto adaptación al 14/08/1997	490,000	TOTAL excavado mecánicamente (II) y auto adaptación al 14/08/1997
		510.2% proporcionalidad respecto a proyecto		569.8% proporcionalidad respecto a proyecto	

Fuente: Elaboración propia (1997).

La relajación fluviomorfológica en el corte S-I, no consiste solamente de excavación por erosión en unas partes, pero también de sedimentación en otras partes. Se determina de las secciones del mes de abril y de las secciones del mes de agosto del corte S-I que en febrero este corte estaba mucho más profundo (en algunos lugares hasta 2.5 a 3 m). Estos sedimentos vienen de más aguas arriba y no de los cortes. Entonces parte de los sedimentos que se encuentran en el lecho entre la nueva confluencia y Puerto Villarroel provenían también de aguas arriba de los cortes.

3.5 Periodo 02/1997 - 1998

3.5.1 Obras de corrección de margen I-I/a, I-I/e, S-I/c, S-I/d y obra A pared guía 1997-1998.

Era seguro en agosto 1997, que el conjunto de obras de defensa B₁, B₂, C, cortes S-I e I-I han salvado a Puerto Villarroel de una catástrofe. Las obras B₁ y B₂ han cumplido un papel importante en postergar y evitar la apertura del corte conflictivo T. Las obras S-I e I-I ya desviaban casi el 90 % de los caudales de los ríos Ichilo y Sajta (Figura 28).

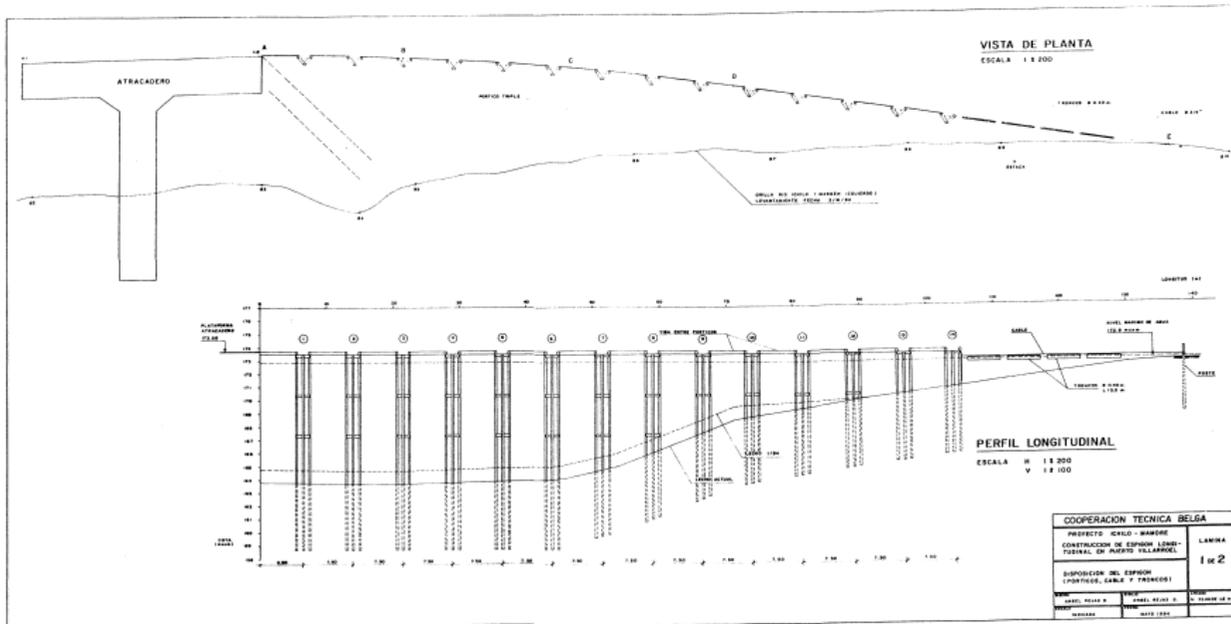
Figura 28: Fotografía cortes I-I, S-I y parte brazo abandonado río Ichilo – agosto 1997



Fuente: Elaboración propia (1997).

No obstante, la construcción tardía de los cortes (se definió la necesidad principios 1994 pero recién se ejecutaron fines 1996) y su apertura con secciones menores que las de diseño debido a la difícil época de lluvias y la urgencia por el casi virtual rompimiento del corte T que había, han tenido como consecuencia un desarrollo de los cortes de forma muy repentina (primeros funcionamientos en época de lluvias) y en una morfología no muy ideal por los retrasos de 1994 a 1996. Por ende, los expertos manifestaron la necesidad de las obras de corrección de margen I-I/a, I-I/e, S-I/c y S-I/d (Figura 30): obra I-I/a para mejorar la entrada del río Ichilo al corte I-I; obra I-I/e para mejorar la nueva confluencia y para luchar con un carácter dominante del canal corte I-I sobre el canal S-I para así influir sobre la desaparición del banco de arena en la margen derecha; obra S-I/c para mejorar la entrada del río Sajta y obra S-I/d para evitar el futuro desarrollo de un meandro sobre el río Sajta que amanecería a la estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel. Recomendaron también la ejecución de la pared guía aguas arriba del atracadero – obra A, ya planteada desde 1994, (Figura 18 y Figura 29), para proteger esta zona contra la erosión que pudiese haber aumentado por las tensiones fluviomorfológicas liberadas por los cortes I-I e S-I.

Figura 29: Diseño Obra A (obra de protección longitudinal)- 1997



Fuente: Elaboración propia (1997).

Con una obra de corrección de margen se establece un nuevo barranco mejor alineado para garantizar en el lugar un objetivo fluviomorfológico con el río en el futuro. Se excava mecánicamente el terreno entre el barranco actual y el barranco proyectado hasta el nivel 168.50 m. Este nivel es similar al nivel promedio de los canales pilotos. Con crecidas con lectura superior a 3 m en la regla de Puerto Villarroel, se establecerá un flujo de agua sobre el lecho excavado, el cual erosionará el lugar hasta niveles similares del lecho del río. El material de excavación mecánica se almacena sobre el terreno a 5 m de distancia del nuevo barranco.

Las obras A, I-I/a y S-I/c se iniciaron agosto 97. Por aguas altas no se pudo terminar las obras A e I-I/a.

La obra A, aunque no concluida, generó ya a fines de octubre 97 una sedimentación de dimensiones considerables en un tiempo menos que el esperado. La obra A en su totalidad resistió teóricamente bien a las grandes crecidas, pero fines de marzo 98, cuando las aguas empezaron a bajar, algunos duques de Alves se inclinaron fuertemente, básicamente por cuatro factores que desestabilizaron el talud: (1) probable formación de una fosa de socavación muy profunda durante las crecidas en el canal profundo del río (ver leyes de Fargues y la situación fluviomorfológica más conflictiva generada por la simultaneidad o no simultaneidad entre las crecidas de los ríos grandes que interactúan en el lugar río Ichilo – río Sajta – río Chimoré; (2) desaparición brusca de la presión estabilizante por columna de agua cuando los niveles de agua bajan rápidamente; (3) la pronta sedimentación sobre el talud (= protección) detrás de la obra en dimensiones más grandes que las

esperadas; (4) el efecto de una napa freática alta sobre un talud seco. La obra A en el proyecto estaba diseñada como una obra tipo medida recurrente. Con los 6 duques de Alves en mal estado y con el gran paquete de sedimentación detrás de la obra, la obra en su totalidad seguía cumpliendo su objetivo fluviomorfológico y su objetivo de proteger al atracadero y parte de Puerto Villarroel.

Figura 30: Obras de corrección de márgenes: Obras I-I/a, I-I/e, S-I/b y S-I/d



Fuente: Peters (1997).

Entre junio y mediados agosto 1998 se concluyeron las obras I-I/a, S-I/d, I-I/e y se efectuaron arreglos sencillos a la obra A. Dentro de la filosofía de las obras de medidas recurrentes se definió aún no intervenir con arreglos grandes a la obra A, pero se prefirió esperar, estudiar la obra en base a un monitoreo y ver la necesidad después de que la estructura haya trabajado una o dos épocas de lluvia más.

3.6 Periodo 11/1998 – adelante.

3.6.1 Obras de regulación en el tramo entre la nueva confluencia con el río Sajta y el puerto de Puerto Villarroel.

El experto J.J. Peters recopiló en 1998 todos los datos disponibles para llegar a un mapa fluviomorfológico interpretado de agosto 1997, ver **Figura 31**.

Este mapa mostró que el Ichilo estaba trabajando bien, ensanchando su sección de manera progresiva (relajación del corte I-I), pero que el Sajta tenía menores profundidades por una barra en el río Ichilo obturando su desembocadura.

Por el efecto de la relajación de los dos cortes S-I e I-I una cantidad de sedimentos había entrado en el tramo del río Ichilo aguas abajo de la nueva confluencia formando bancos de sedimentos que inducían un efecto de meandro pronunciado, arriesgando a tiempo Puerto Villarroel por un ataque en la margen izquierda del río Ichilo.

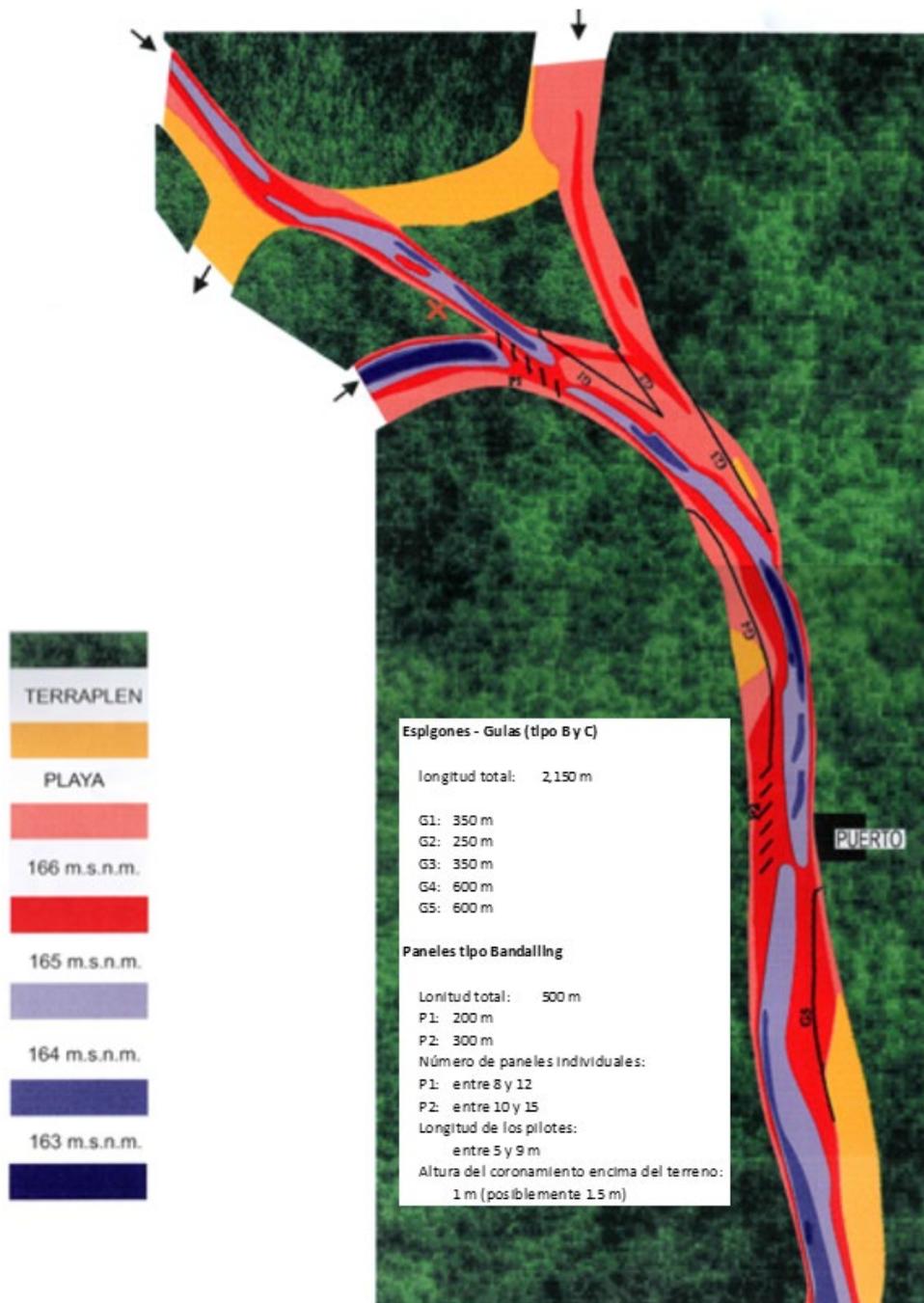
Esos nuevos bancos playas de arena preocupaban. Probablemente se necesitaría una nueva intervención con pequeñas obras de defensa de tipo medida recurrente, de tipo espigón guía y/o de tipo “bandal” para corregir en planta el río Ichilo entre la confluencia Sajta/Ichilo y el atracadero.

En **Figura 31** se tiene una idea de la envergadura de obras en un diseño aproximado basado en el mapa fluviomorfológico de agosto de 1997) consistiendo en 2 grupos de paneles tipo “bandal” y 5 espigones guía. El experto dejó en claro que este tipo de diseño requería de estudios detallados y necesitaba de más datos y observaciones de campo, preferiblemente después de la época de lluvias 1998-1999, es decir, cuando la morfología se habría relajado suficientemente.

El experto J.J. Peters dejó en claro que la dificultad mayor para definir las obras complementarias en el cauce del Ichilo era la incertidumbre sobre el régimen hidrológico hidráulico de los ríos Ichilo, Sajta, Ivirgarzama y Chimoré en los siguientes años. Por esta razón recomendó trabajar por fases, empezando por obras prioritarias y observando la reacción del sistema para definir o no más bien las obras siguientes, o adaptaciones a las obras construidas.

Lamentablemente el Convenio de Cooperación entre Bolivia y Bélgica para las Obras de Defensa de Puerto Villarroel, no pudo continuar después de su fecha de vencimiento 10/1998. Esto principalmente por cambios estructurales en la Cooperación Belga respecto a proyectos de Infraestructura. Por ende, el suscrito a partir de 11/1998, ya no continuo con el proyecto y no sabe cómo a partir de entonces SEMENA dio continuidad al proyecto.

Figura 31: Obras de Regulación de los Cauces de los Ríos Ichilo & Sajta borrador (batimetría 1997)



Fuente: Peters (1998).

4. CONCLUSIONES

Se ha cumplido con la descripción técnica del diseño, de la ejecución y del seguimiento al funcionamiento fluviomorfológico de las Obras de Defensa construidas en Puerto Villarroel entre 1995 y 1998.

Estas Obras de Defensa fueron necesarias para recuperar la estabilidad fluviomorfológica de los ríos Ichilo y Sajta, que estaba a punto de perderse por un corte de meandro en frente de Puerto Villarroel que hubiese arrasado en la orilla izquierda del río Ichilo con toda la infraestructura de YPFB, SEMENA y TRANSSNAVAL y gran parte de la infraestructura civil y privada de la Comunidad de Puerto Villarroel. Puerto Villarroel hubiese desaparecido del mapa de la misma forma que Puerto Todos Santos.

El resultado general de estas Obras de Defensa para 1997 fue exitoso y sigue prolongándose actualmente, 28 años más tarde, habiéndose mantenido la macro estabilidad fluviomorfológica de Puerto Villarroel. Se ha mantenido el acceso portuario a Puerto Villarroel y así la comunicación de gran parte del sur de Bolivia con la Hidrovía Ichilo-Mamoré. También estas obras han permitido el crecimiento demográfico de la población de Puerto Villarroel en la margen del río.

Respecto la estabilidad fluviomorfológica del río Ichilo a la altura de Puerto Villarroel:

- Los ríos de la Amazonía Boliviana, que incluyen al río Ichilo, son de carácter fluviomorfológico, muy jóvenes y dinámicos llamados también ríos salvajes. Eso por extremas condiciones geográficas, geológicas, hidrográficas, de uso de suelos, hidrológicas e hidráulicas.
- El “tramo del río Ichilo a la altura de Puerto Villarroel entre las confluencias de los ríos Sajta, Ivirgatzama y Chimoré” no lleva propio equilibrio dinámico fluviomorfológico, los ríos citados son de carácter fuerte y juntamente con el río Ichilo pueden imponer varios regímenes hidráulicos diferentes, cada uno de estos regímenes correspondiendo a otro escenario de estabilidad dinámica fluviomorfológica.
- Siendo los ríos que confluyen con el río Ichilo en la zona de Puerto Villarroel y el río Ichilo mismo de carácter fuerte en cuanto a caudales líquidos y sólidos, la geometría de las confluencias con los ríos Sajta, Ivirgatzama y Chimoré influyen sobre la estabilidad morfológica del río Ichilo. Para estudiar la estabilidad del río Ichilo a la altura de Puerto Villarroel se debe considerar los efectos de la confluencia con el río Sajta.
- El curso del río Ichilo es característico de una llanura aluvial joven y dinámica. Suficientemente aguas arriba de Puerto Villarroel, los meandros tienen una forma regular

donde la erosión progresa a una velocidad uniforme de equilibrio. Se observan numerosos lagos, testigos de brazos de antiguos meandros que fueron cortados de forma natural. Los extremos de estos meandros se encuentran obstruidos por depósitos sucesivos de sedimentos finos y gruesos, más resistentes a la erosión que los depósitos de sedimentos que dejan los meandros durante su movimiento normal. Estos puntos duros pueden ocasionalmente perturbar al movimiento de los meandros, tal como es el caso con un viejo meandro en la margen izquierda de Puerto Villarroel. Puerto Villarroel está construido sobre este punto duro y hay que mantener y conservar Puerto Villarroel en el futuro allí. El atracadero de Puerto Villarroel está construido allí. Se trata muy probablemente del único punto duro en la zona.

Dos tipos de Obras de Defensa:

- Un primer tipo de Obras de Defensa son de alto costo, considerados de carácter duradero de hormigón, fijas para siempre en un mismo lugar y estimados indestructibles. La experiencia sobre los grandes ríos en Estados Unidos y en Europa [Peters J.J. 1993] ha demostrado que, estas obras a pesar de ser muy costosas mayormente no brindan el nivel esperado de seguridad, presentándose daños de consideración porque las obras no funcionan al 100 % bien por la falta de diseño preciso, porque se presentaron fenómenos más críticos con periodo de retorno mayor que el considerado o por cambio climático. Por el alto costo y el resultado no siendo siempre el enfocado, este tipo de obra de defensa en 1994 fue rechazado para Puerto Villarroel.
- Un segundo tipo de Obras de Defensa son de tipo medidas recurrentes con monitoreo y análisis fluviomorfológico. Son obras de bajo costo construidas con materiales baratos del lugar y con mano de obra del lugar. Estas obras son de carácter temporal y enfocan una autoprotección del río generada por estas obras durante época de aguas bajas con los sedimentos del mismo río. Durante la época de aguas altas es la autoprotección que resista a las tensiones fluviomorfológicas del río. Se acepta daños a la obra o total destrucción de esta. Se acepta también daños a la autoprotección esperando que resista hasta el final de la época de aguas altas. Después de las crecidas, se monitoreará la zona de influencia de la obra con batimetría, topografía, registro de curvas de remanso, registro de líneas de flujo, registro de caudales líquidos y sólidos, muestreo de fondo y tomas de fotografías aéreas. Luego los monitoreos serán analizados con expertos fluviomorfólogos quienes estudiarán la necesidad de repetir una obra tipo recurrente mejorada o de ya no tener que repetir la obra. Se ha demostrado a nivel mundial (Río Bramaputra en Bangladesh, río Ganges en India, ... Peters J.J. 1993, ... Río Piraí en Bolivia Peters J.J. 1998) que la forma de trabajar con obras de defensa tipo medidas recurrentes tiene menor costo de inversión y logra

proteger bien contra las tensiones fluviomorfológicas de los ríos. Las obras de defensa construidas en Puerto Villarroel de 1995 a 1998 fueron construidos según el concepto de obras recurrentes apoyadas con monitoreos de tipo fluviomorfológico.

Obras de defensa propuestas en 1994 – 1995 y ejecutadas en 1995 – 1996 – 1997 - 1998:

- Un conjunto de obras provisionales debiendo ejecutarse en 1995 para retardar el proceso de socavación a la altura del corte conflictivo “T”, en espera de poder diseñar los cortes artificiales y conseguir presupuesto para la construcción de estos.
- Una obra llamada “A”, justo aguas arriba del atracadero para retardar parcialmente la corriente del río (creando sedimentación en la margen izquierda) y para disminuir la corriente erosiva en dirección de la margen derecha en el lugar “T”. Por razones presupuestarias esta obra recién fue iniciada en 1997, cuando ya los cortes artificiales fueron realizados y donde su objetivo cambio a proteger la orilla izquierda de Puerto Villarroel contra la acción erosiva del río incrementada por la relajación de los dos cortes. La obra consistía en pilotes con maderamen guía y una estructura cable troncos para generar flujos secundarios helicoidales. Esta obra antes de ser concluido genero una excesiva deposición de sedimentos entremezclado con un enorme volumen de palizada. Esta deposición afecto la estabilidad de algunos de los pilotes de esta obra. Con estos pilotes la obra ha seguido cumpliendo su funcionalidad un tiempo posterior a 1998.
- Tres obras similares llamadas “Obra B₁”, “Obra B₂” y “Obra C” con el objetivo de desviar la corriente principal del río. “B₁” y “B₂” desviaban la corriente a 300 m aguas arriba del lugar conflictivo “T” para atenuar durante un tiempo la socavación en el lugar “T”. “C” desviaba la corriente de la curva aguas arriba de Puerto Villarroel a un lugar algo más aguas arriba para aliviar la erosión de la misma curva y así tener mejor alineado en planta el río donde los dos cortes futuros iban entrar a esta curva. Fueron construidas estas 3 obras en 1995. Tienen la particularidad de ser obras muy livianas construidos con material local bambú y bolillos. Los bolillos de 4 m fueron hincados 3 m y se tejo entre los bolillos una pantalla de bambú de 1 m de alto apoyado sobre el lecho. Estas obras tuvieron una longitud cada una de 300 m. Estas obras funcionaron en 1995, 1996 y parte de 1997 manteniéndose intactos y con detrás de su pantalla generado un pequeño dique de material sedimentado (=autoprotección). Obtuvieron su fin deseado. Las Obras B₁ y B₂ han jugado un papel importante en evitar que el corte conflictivo T no se rompe durante 1996.
- Los dos cortes de meandro llamados “corte I-I” (del río Ichilo al río Ichilo) y “corte S-I” (del río Sajta al río Ichilo). Estos cortes fueron diseñados como canales con secciones

grandes de ancho 50 y 40 m sección trapezoidal con profundidad de 5 m para evitar una malformación en el perfil en planta de estos dos cortes (debían crear futuros meandros que se alejaban de Puerto Villarroel para proteger a Puerto Villarroel) y debían ayudar a disminuir el efecto de la sedimentación en el tramo del río Ichilo entre el puerto y la nueva confluencia por relajación de los dos cortes artificiales. El objetivo era construir los dos canales pilotos en aguas bajas de 1996 de marzo a octubre y abrir los cortes en noviembre 1996 dejar trabajar los canales inicialmente con caudales medios y luego con caudales grandes para permitir una relajación de los cortes de forma muy gradual para tener sedimentación mínima en el tramo del río Ichilo hasta el puerto. Debido al retraso en el financiamiento de las obras de defensa, que recién se aprobó en septiembre 1996, después de un periodo mínimo de licitación de obras, obligó a arrancar con la excavación de los 2 cortes fines octubre 1996 con el periodo lluvioso de 1996 a 1997 encima (con un avance nada optimo en la excavación vertical y el transporte horizontal del material de excavación). Por una casi rotura del corte conflictivo T últimos días en diciembre 1996, se tuvo que abrir los cortes al río en enero 1997 con los canales pilotos no excavados al 100 % (S-I 80 %) y (I-I 45 %). Por suerte esta acción en extremis ha desactivado el corte conflictivo T y devolvió a Puerto Villarroel una estabilidad fluviomorfológica a nivel macro. Hubo el problema de que el corte S-I se desarrolló con mayor velocidad que el corte I-I, porque parte del caudal de crecida del río Ichilo se desvió por el corte S-I con la primera crecida que causo relajación (primeros días de febrero 1997). Esto porque el corte I-I se relajó de forma más lenta por su canal piloto en el momento de la apertura haber tenido un grado de excavación inferior al grado de excavación del corte S-I. La relajación de los dos cortes ha continuado y en agosto 1997 ya el canal del corte I-I tenía mayores dimensiones que el corte S-I tal como debía ser.

- Obras de corrección de margen. Se ejecutaron 4 obras de corrección de margen.
 - I-I/a en la margen izquierda del río Ichilo aguas arriba de la entrada al corte I-I, con dos objetivos (1) mejorar la entrada de caudales del río Ichilo al corte I-I y (2) garantizar que se generan meandros con el corte I-I que se alejan de Puerto Villarroel para proteger a Puerto Villarroel. Obra iniciada en 1997 y concluida en 1998.
 - I-I/e en la margen izquierda aguas abajo del corte I-I, con el objetivo de garantizar que se generan meandros con el corte I-I que se alejan de Puerto Villarroel para proteger a Puerto Villarroel. Obra ejecutada en 1998.
 - S-I/c en la margen izquierda aguas arriba en el corte S-I, con el objetivo de garantizar que se generan meandros con el corte S-I que se alejan de Puerto Villarroel para proteger a Puerto Villarroel. Obra ejecutada en 1998.

- S-I/d en la margen izquierda aguas abajo en el corte S-I, con dos objetivos (1) garantizar que se generan meandros con el corte S-I que se alejan de Puerto Villarroel para proteger a Puerto Villarroel y (2) disminuir el ángulo de la confluencia para generar una confluencia fluviomorfológicamente más estable. Obra ejecutada en 1998.

Obras de defensa posterior 10/1998:

A fines de 1998 preocupaba la formación del depósito de sedimentos aguas abajo de la nueva confluencia, las playas de arena por la relajación de los dos cortes. Era probable que se necesitaba una intervención con obras de medida recurrente pequeñas y sencillas de tipo espigón guía y/o tipo “bandal”. Se dejó un diseño preliminar en base a plano fluviomorfológico de agosto 1997 de estas obras a evaluar su necesidad después de la época de lluvia 1998-1999 en base a estudios detallados con datos y observaciones de campo levantados posterior época de lluvia 1998-1999.

También hubo la recomendación a evitar que “directamente” aguas arriba de los dos cortes se deja producir cortes naturales sobre el río Ichilo y/o sobre el río Sajta, ya que estos cortes iban a dejar una cantidad adicional de sedimentos en el tramo entre la confluencia con el río Sajta y Puerto Villarroel, dificultando la morfología fluvial de este tramo.

El Convenio de Cooperación Belga para las Obras de Defensa de Puerto Villarroel término en octubre 1998 no pudiendo ser prorrogado, por razones estructurales en la Cooperación Belga en relación con proyectos de infraestructura. Desde noviembre 1998 el suscrito ya no estaba con el proyecto, y, por ende, no puede informar como SEMENA u otra institución estatal ha continuado con el proyecto.

5. REFERENCIAS

- Acciona Ingeniería & Essing Srl (2016) “Análisis de las Obras de Protección y Encauce el Río Ichilo” – Informe solicitado por la Corporación Andina de Fomento CAF en el marco de la Construcción de la Doble Vía Cristal Mayu – Montero.
- Angus, N.H. (2019) “Métodos de Encauzamientos Aplicados y su Implementación en el Río Ichilo para Evitar Daños a la Red Vial Fundamental de la ABC en la RVF-04 – Análisis de Meandros a la altura del cruce del Puente.” Tesis de Maestría en Conservación Vial, Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno, Escuela de Post Grado, Facultad de CS. Exactas y Tecnología.
- Balcázar Rodal, H.E. (2019) “Hidrología e Hidráulica del Río Mamoré – Puerto Varador” Exposición bajar de: www.dropbox.com/s/w2w2u8wtls36c2w/Hidrologia-Hidr%C3%A1ulica-Puerto%20Varador.pdf?dl=0. Divagaciones del río Mamoré, exposición complementaria bajar de: www.dropbox.com/s/48qpqv0m19r4ti/R%C3%8DO%20MAMOR%C3%89-1973-2013.pdf?dl=0
- Berger L. y Hochstein A. (1981) – “NATIONAL WATERWAYS STUDY – Waterway Science and Technology” -Institute for Water Resources / Corps of engineers – Final Report
- Best, J.L. (1985). Flow Dynamics and Sediment Transport at River Channel Confluences. Ph.D. Thesis, University of London, London, UK.
- Bilal, A., Xie, Q., y Zai, Y. (2020). “Flow, Sediment, and Morpho-Dynamics of River Confluence in Tidal and Non-Tidal Environments”. Journal of Marine Science and Engineering, August 2020 8(8), 591; <https://doi.org/10.3390/jmse8080591>
- Chang, H. (1988) “Fluvial Processes in River Engineering”, New York Estados Unidos, John Wiley & Sons
- Consultores Galindo (1994). “Análisis Mecánico de Suelos de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel”; Informe marzo 1994.
- Dialogue Earth (2021). “Bolivia busca acercarse a Europa cruzando la Amazonía” – publicación en internet - <https://dialogue.earth/es/negocios/50048080-48080-bolivia-busca-acercarse-a-europa-cruzando-la-amazonia-hidrovia/>
- Eaton, B.C. y Church, M. (2011). “A rational sediment transport scaling relation based on dimensionless stream power” Earth Surface Processes and Landforms 36 (7): 901-910 <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2120>
- El Diario Nacional (2016) “Construyen Defensivos en Sector Río Ichilo” – artículo de periódico.

- Fardiansyah, I. (2014) “Diagram Hjulstrom dalam Hidrodinamika Sedimentologi”. Geopangea Research Group Indonesia (April 16 2014); recuperado 28/05/2024 de <https://gprgindonesia.wordpress.com/2014/04/16/diagram-hjulstrom-dalam-hidrodinamika-sedimentologi/>
- García Sánchez, J. y Bernex de Falen, N. (1994). “El Rio que se Aleja Cambio del Curso del Amazonas Estudio Histórico Técnico - Iquitos” CETA – IIAP – Iquitos Perú.
- Henrich, R. (2021). “Todos Santos, el pueblo desaparecido del Beni” – publicación en internet - <https://www.facebook.com/benihistoria/posts/todos-santos-el-pueblo-desaparecido-del-beni/1386421985089371/>
- Ivarado, A. C. y Ettmer B. (2008). “Fluvial morphology and erosion in abrupt curves of the Ucayali River, Peru”. Ingeniería hidráulica en México. 23. 69-90.
- La Razón (2021). “Hidrovia Ichilo-Mamoré, una realidad tangible” – publicación en internet - <https://www.la-razon.com/voces/2021/07/12/hidrovia-ichilo-mamore-una-realidad-tangible/>
- Lehner, B., Grill G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world’s large river systems. Hydrological Processes, 27(15): 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- Le Noir, C. (1993). ” Análisis de la Estabilidad Morfológica de los ríos Ichilo y Sajta a la altura de Puerto Villarroel – Informe proveniente del Estudio de Factibilidad del Mejoramiento y la Modernización de Puerto Villarroel realizado por Consultores Galindo Ltda”. Proyecto Mejoramiento de los Ríos Amazónicas – Cooperación Técnica Belga, Cochabamba – Bolivia.
- Marín Uribe, G y Rodríguez Díaz, H.A. (2002). “Hidráulica Fluvial. Conceptos Generales sobre morfología y transporte de sedimentos en ríos aluviales. Ecuaciones y métodos de uso más extendido para su evaluación y cálculo.” Colombia: Ingeniería Colombiana de Consulta y Desarrollo Ltda. Recuperado 25.01.2024 de <https://transportesedimentos.tripod.com>
- Mosley, M.P. (1976). “An experimental study of channel confluences” – J. Geol. 1976, 84, 555-562. <http://dx.doi.org/10.1086/628230>
- Peters, J. J. (1993) “Morphological Studies and Data Needs” - Proceedings of the Workshop on Morphological Behavior of Large Rivers – River Survey Project FAP 24 – November 1993 – Dhaka – Bangladesh.
- Peters, J. J. (1993) “Problèmes de Navigation Fluviale dans les Bassins de l’Amazone et de l’Orénoque dans les Pays Andins”. Bulletins des Séances Académie Royale des Sciences d’Outre-Mer 38 (1992-3):505-524 (1993).
- Peters, J.J. (1994) “Estudio de Obras de Regulación de Cauce del río Ichilo a la Altura de Puerto Villarroel” Informe de Misión del 07 al 15 de febrero 1994, contrato I, por encargo SEMENA y la Cooperación Técnica Belga.

- Peters, J.J. (1997) “Estudio de Obras de Regulación de Cauce del río Ichilo a la Altura de Puerto Villarroel” Informe Final abril 1997, contrato II, por encargo SEMENA y la Cooperación Técnica Belga.
- Peters, J.J. (1998) “Estudio de Obras de Regulación de Cauce del río Ichilo a la Altura de Puerto Villarroel” Informe Final abril 1997, contrato III, por encargo SEMENA y la Cooperación Técnica Belga.
- Peters, J. J., (2000), “Manejo de Ríos en la Cuenca del Piraí”. Proyecto financiado por la Comisión Europea. SEARPI Santa Cruz - Bolivia.
- Ponce, V.M., y Da Silva J. (2018). “Número de Froude para la iniciación del movimiento calculado en línea”; recuperado 28/05/2024 de https://ponce.sdsu.edu/numero_froude_iniciacion_movimiento.html
- Porco, Z. (2021). “Gobierno Nacional exportará madera por la Hidrovía Ichilo Mamoré.” - Vías Bolivia Administradora de Peaje y Pesaje – publicación en internet - <https://www.viasbolivia.gob.bo/2021/07/12/gobierno-nacional-exportara-madera-por-la-hidrovia-ichilo-mamore/>
- Rodriguez Ostría, G. (1997). “Historia del Trópico Cochabambino 1768 – 1972” – Libro – Prefectura del Departamento de Cochabamba - Bolivia, paso a paso– Depósito Legal Nº 2-1-931-97 – Impresiones Poligraf – Cochabamba - Bolivia.
- Soria Martins, O. J. (2015) “Riada del Acre reduce en 80 % la franja limítrofe de Brasil con Bolivia” – entrevista con Eju.tv bajar de <https://aju.tv/2015/03/riada-del-acre-reduce-en-80-la-franja-limtrofe-de-brasil-con-bolivia/>
- Sylvester, Z., Durkin P.R. y Covault J.A. (2019), “High curvatures drive river meandering”. *Geology* 47(3), 5 p. doi: <https://doi.org/10.1130/G45608.1>
- Torrez, J.G. (2017). “Todos Santos: la tierra del Edén” – publicación en internet - <https://www.lostiempos.com/actualidad/opinion/20170731/columna/todos-santos-tierra-del-eden>
- Tuschen, M. (2020). “Change Detection of a river reach using UAV technology: Agger Basin, NRW” (Proyecto de Pregrado). Geographisches Institut Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn Germany. DOI:10.13140/RG.2.2.30887.16805
- Xie, Q. (2019). “Field Measurements and Numerical Solutions of Sediment Tansport in a tidal river” – Ph.D. Thesis, Lulea University of Tecnology, Lulea, Sweden.
- Zavala, B. y Vilchet, M. (2005). “Peligro por Erosión Fluvial en la Ribera de Pucallpa” Instituto Geologico, Minero y Metalurgico – Sector Energias y Minas – Republica del Perú.

BIOGRAFÍA CORTA DEL AUTOR

Claude Le Noir (Zottegem, Bélgica 1961) ha estudiado Ingeniería Civil (1984) e Ingeniería en la Mecánica de la Construcción (1985) en la Universidad de Gante de Bélgica (U-Gent).

De 1985 a 1989 estuvo relacionado con la Universidad Católica de Lovaina de Bélgica (KU-Leuven) y la Universidad Mayor de San Simón de Bolivia (UMSS) para el Proyecto Mejoramiento de la Enseñanza Académica y la Investigación Aplicada en el Área de los Recursos Hídricos en Cochabamba, Bolivia (= Proyecto del Laboratorio de Hidráulica de la UMSS).

De 1989 a 2001 estuvo relacionado con la Cooperación Técnica Belga (CTB) y el Servicio de Mejoramiento a la Navegación Amazónica (SEMENA) de Bolivia. De 1989 a 1991 trabajo como Experto Portuario, de 1991 a 1996 como Jefe de Proyecto, de 1996 a 1998 como Experto sobre el Proyecto Obras de Defensa de Puerto Villarroel y de 1999 a 2001 como Experto para la Construcción del Complejo Portuario de Guayaramerín.

De 2001 a la fecha ha trabajado como Consultor Particular en diferentes proyectos en Bolivia entre otros:

- Dragado del río Desaguadero en el marco del Proyecto de la Autoridad del Lago Titicaca (2002).
- Llenado Rápido del Tajo de Kori Kollo de la Mina de Inti Raymi con agua del río Desaguadero (2003).
- Supervisión Estudio de Factibilidad de Puerto Quijarro sobre el Canal Tamengo – Hidrovía Paraguay Paraná (2003 – 2004).
- Estudio de la Factibilidad de un Empujador para Maniobras en el Canal Tamengo y para Travesía en la Hidrovía Paraguay Paraná (2005).
- Supervisión Estudio de Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico Cachuela Esperanza 900 MW sobre el río Beni (2009 - 2010).
- Estudios de Pre-inversión del Proyecto Ferroportuario Motacusitos – Mutún – Puerto Busch (2012 - 2013).
- Varios Estudios Hidrológicos, Hidráulicos, de Socavación y de Obras de Defensa para Puentes importantes (Puente Coroico (2008), Puente General Barrientos (2010), Puente San Pedrito (2015), Puente Serkheta (2017) y Puente Titiri (2017)).

Actividad docente:

- En la UMSS de 1986 a 1996 diferentes materias curriculares de la carrera básica de Ingeniería Civil del área de la Hidráulica: Obras Hidráulicas Pequeñas, Modelos, Puertos y Vías Navegables y Temas Especiales. Programa de la Maestría de Recursos Hídricos de la UMSS docente invitado con la materia de Hidráulica de Ríos.
- En la Universidad del Valle Cochabamba de 2017 a 2022 Departamento de Ingeniería Civil docente de las materias Hidráulica I, Hidráulica II e Hidrología.
- En el Centro Empresarial Latino Americano – Universidad Técnica del Beni 2017 – 2024 docente de la materia Socavación en Ríos y Puentes en los programas de la Maestría de Recursos Hídricos y del Diplomado de los Recursos Hídricos.

Áreas de investigación: Morfología de Ríos, Puertos Fluviales, Transporte Fluvial y Centrales Hidroeléctricas.

