

CONTROL DEL FENÓMENO DE AGRADACIÓN - DEGRADACIÓN DEL RÍO PIURA, MEDIANTE REALINEAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL INFERIOR FENÓMENO EL NIÑO, PIURA, PERÚ

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

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

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

RESUMEN

La erosión humana en la cuenca alta acompañada del Fenómeno de El Niño altera los regímenes hidrológicos y de transporte de sedimentos en el río Piura, en extremo norte del Perú. Una presa y obras de encauzamiento existentes en la cuenca baja producen el desequilibrio en la forma de planta y geometría del río; sin embargo dichas obras son necesarias para la protección contra inundaciones a fin de evitar daños sustanciales en la propiedad, tales como infraestructura y áreas de irrigación existentes. Finalmente, la desviación del curso o cauce natural de un río en su cuenca baja genera un problema complejo en la morfología del río. Como consecuencia de esto sucede el fenómeno de agradación-degradación significando el tener que adoptar medidas de mitigación a fin de luchar contra los cambios de los niveles de fondo del río, si no se toman en cuenta medidas adecuadas para resolver el problema. Una efectiva evaluación del cauce del río en el proceso de agradación-degradación de la cuenca baja, requiere una efectiva comprensión de los procesos morfológicos que envuelven el ajuste de la geometría del cauce y de las condiciones de equilibrio proyectadas. El objetivo de ésta investigación es el estudio del proceso de agradación-degradación del cauce del río Piura, y el realineamiento del cauce principal y por ende la extensión del encauzamiento del río, ver Figura 1.

ABSTRACT

Mankind erosion in the upper basins accompanied by the natural phenomenon El Niño alters the hydrologic and sediment load regimes of the Piura River, in the northern part of Peru. A dam and existing river training in the lower basin causes disequilibrium in channel planform and geometry; however they are needed for flood protection in order to avoid substantial damages to property, existing infrastructure and irrigation areas. Finally, deviation of natural course in the lower basin causes a complex problem in the river morphology. As consequence aggradation-degradation phenomena occurs meaning have to take mitigation measures to fight again bed level changes, if adequate counter measures are not taken into account. An effective evaluation of river channel in this aggrading-degrading process in the lower basin, requires an understanding of the morphological processes involved in channel geometry adjustment and the projected equilibrium conditions. The objective of this research is the study of the aggradation-degradation process of the bed of Piura River, and the realignment of the main river channel and therefore the lengthening of the river training, see Figure 1.

1. INTRODUCCIÓN

El río Piura, río perenne, pero con períodos irregulares y efímeros, que posee una cuenca



Figura 1.- Realineamiento del cauce principal del río Piura en el tramo final sin encauzar (excavación de canal guía, fines del año 2006) hasta su descarga en la laguna Ramón (Fuente: Google Earth 2007©).

deficitaria con una área superior a los 12000 km², que es un río profundamente alterado por la acción humana y que ha modificado perfectamente la morfología del río, es uno de los dos ríos que configuran el área de influencia de la región Piura y que soporta en la ciudad del mismo nombre una población metropolitana de aproximadamente medio millón de habitantes, con un elevado consumo de agua con fines principalmente agrícolas en su tramo inferior y hacia ambas márgenes del río.

La cuenca baja del río Piura, valle aluvial conformado por materiales areno-limo-arcilloso depositados en el transcurso del tiempo por los diferentes cauces que discurrían en su área en un relieve casi plano, con pendientes entre 0% y 2%, es una franja de tierra irrigada a lo largo del propio río. En el pasado las aguas del río Piura transitaban por la llanura baja del valle por varios cauces que se dirigían en dirección oeste y convergían en Sechura, por lo que el río no tenía un solo cauce definido, siendo ello una señal que la salida principal del río era en aquella dirección. En el transcurso del siglo pasado la presión agrícola obliga la necesidad de asegurar las áreas de riego en desarrollo creciente contra inundaciones y parcialmente el arenamiento de la salida hacia Sechura debido al cambio de los niveles de fondo en el río cercano a su desembocadura por

aquél entonces. La apuesta agrícola sobre la margen derecha del río se acelera hacia 1954 con las obras de derivación del río Quiroz hacia el río Chipillico, que finalmente es derivado hacia el río Piura con el desarrollo de la irrigación San Lorenzo, lo que obliga paulatinamente a desviar el río mediante diques de tamaño mediano que van encauzando poco a poco al río y permiten dirigir su curso hacia el denominado complejo lagunar Ramón - Ñapique, ver Figura 2.

Entre 1972 y 1973 ocurren inundaciones debido al evento extraordinario de El Niño y se registran roturas en estos diques de mediano tamaño, que hacia 1976 con la planificación del proyecto Chira-Piura en su primera fase son



Figura 2.- Vista satelital del río Piura en su trayecto desde su cuenca alto-andina, formando las lagunas Ramón, Ñapique y La Niña en la zona del Bajo Piura, hasta su salida al Océano Pacífico por el estuario de Virrilá. Obsérvese el cauce antiguo en la salida por Sechura, hoy convertido en un dren (Fuente: Google Earth 2003©).

reforzados. Posteriormente hacia 1979 a fin de disminuir los riesgos de inundación de las áreas de riego y de las poblaciones asentadas en el trayecto del Bajo Piura, es que estos diques confortantes del sistema de defensa contra inundaciones del Bajo Piura son alargados, y por ello muestran algunas singularidades en su planta del alineamiento actual del río Piura.

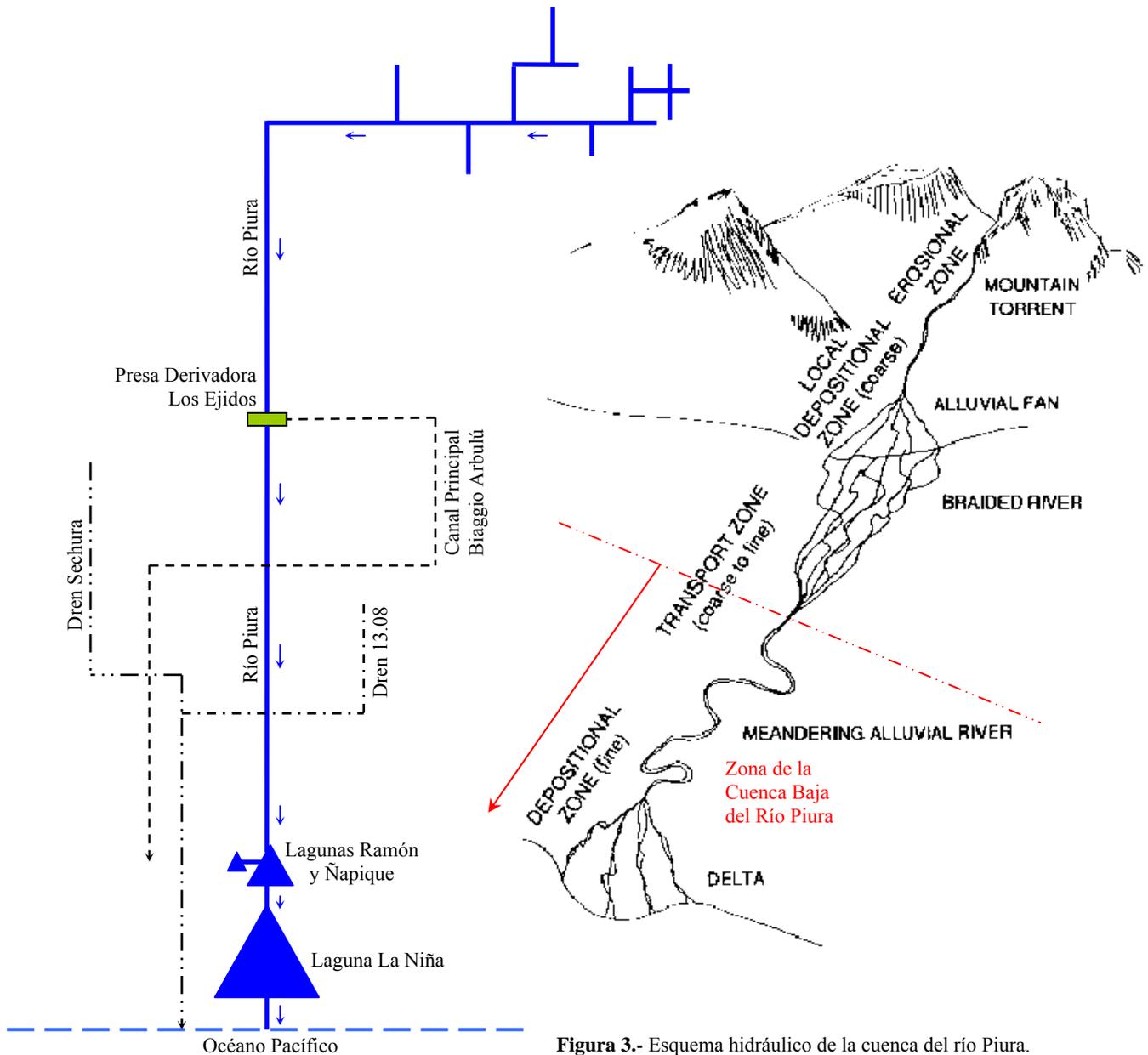


Figura 3.- Esquema hidráulico de la cuenca del río Piura.

Con el inicio de la segunda etapa del proyecto Chira-Piura se ejecuta entre 1981 y 1985 los diques de encauzamiento actuales con un distanciamiento entre ellos de 500 a 800 m, así como también la construcción de la presa derivadora Los Ejidos, obras que hacia 1982 se encontraban prácticamente concluidos.

El fenómeno de El Niño hace su aparición entre 1982 y 1983, produciéndose roturas y la destrucción total de aproximadamente 15 km de diques, destrucción del aliviadero fijo de la presa Los Ejidos en Mayo de 1983, ver Figura 4, además de la erosión de las márgenes de una importante longitud del río a orillas de la ciudad, que en aquél entonces no se encontraba protegida como en la actualidad por taludes revestidos de concreto y más bien se conformaba de diques de materiales sueltos, ver Figura 5.

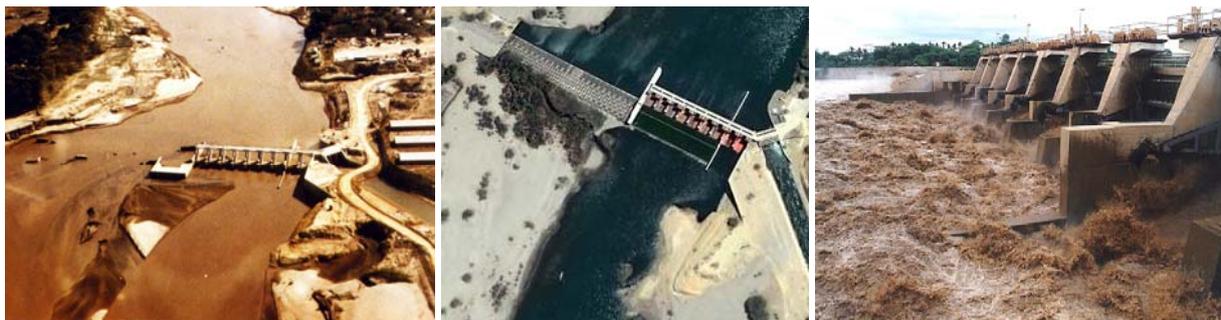


Figura 4.- Presa derivadora Los Ejidos en el río Piura (Fuente: [20, 21]). Izquierda, colapso del vertedero fijo (El Niño, 1983). Centro, actual (Fuente: Google Earth 2007©). Derecha, tránsito de avenida máxima registrada (El Niño, 1998).

La falla del dique derecho por socavación de su pie en una sección localizada a 2.5 km aguas arriba de una obra de cruce, denominada como Dren Alcantarilla 13.08, y precisamente en un tramo que era un antiguo cauce del río Piura por el cual se dirigía hacia el mar, resultó en una catástrofe para las áreas agrícolas y poblaciones vecinas en aquél entonces.



Figura 5.- Construcción del sistema de protección contra inundaciones en el tramo que el río Piura atraviesa el área urbana mediante el revestimiento de los taludes de concreto después del fenómeno de El Niño, 1983 (Fuente: Proyecto Especial Chira-Piura, 1983).

Hacia 1986 se reconstruyen los diques, otorgándoles adecuadas protecciones contra socavación mediante enrocados de protección de pie y espigones, puesto que el fenómeno de socavación o erosión local había sido la causa principal de la falla de los diques en aquél entonces.

Entre 1998 y 1999 nuevamente hace su aparición el fenómeno de El Niño, con una magnitud mayor que todos los eventos registrados desde 1890, con una rotura del dique izquierdo a 0.5 km aguas arriba del Dren Alcantarilla 13.08, además de la pérdida de tres importantes puentes, ver Figuras 6, 7, 8 y 9, habiéndose estimado dos años más tarde que en aquella oportunidad transitó una avenida inferior a los 3200 m³/s, Ref. [1, 5, 6, 7, 8].



Figura 6.- Río Piura. Izquierda, vista de las protecciones de talud de concreto en el tramo que el río atraviesa el área urbana (2001). Derecha, aguas arriba colapso del puente San Miguel (El Niño, 1998).

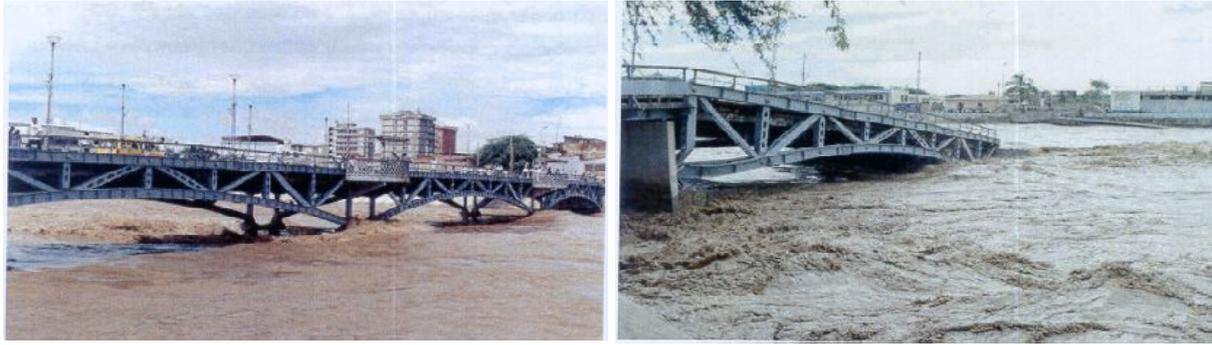


Figura 7.- Río Piura. Colapso del puente San Miguel o puente Viejo (El Niño, 1998).



Figura 8.- Río Piura. Izquierda, aguas arriba colapso del puente San Miguel o puente Viejo y aguas abajo colapso del puente Bolognesi en el tramo que el río atraviesa la ciudad de Piura (El Niño, 1998). Derecha, colapso del puente Independencia ubicado en el área rural de Piura.

Estos eventos extraordinarios que implican el aprender a convivir con eventos extraordinarios producidos por el Fenómeno de El Niño, conllevaron entre los años 2000 y 2001 a una evaluación del sistema de defensas contra inundaciones el río Piura investigándose los cambios morfológicos del río, los fenómenos de agradación y degradación de su cauce, la distribución de sedimentos y los cambios de los niveles de fondo en el cauce a lo largo del río, y la formulación de la rectificación o realineamiento del trazo del río en el tramo final



Figura 9.- Río Piura. Izquierda y derecha, nuevo puente Bolognesi. Nótese las protecciones de taludes de concreto en el tramo que el río atraviesa la ciudad (Piura, 2006).

sin encauzar mediante un canal guía, que ha sido ejecutado a fines del año 2006, ver Figuras 1 y 23, como obra de mitigación, para un posterior alargamiento del encauzamiento favoreciendo las condiciones hidráulicas del tramo inferior existente encauzado y por lo tanto la lucha paulatina contra el fenómeno de sedimentación-erosión o agradación-degradación.

2. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL RÍO PIURA

2.1 GENERALIDADES

Se distinguieron principalmente dos tramos a lo largo del cauce de la cuenca baja del río Piura:

- i) El tramo superior entre la presa derivadora Los Ejidos y la culminación de los diques de protección; este tramo comprende una longitud a lo largo del thalweg de 33.3 km (progresivas entre km 0+000 y km 33+300) e incluye la zona urbana de Piura / Castilla, ver Figuras 10, 11 y 12, donde el río se encuentra prácticamente canalizado; aguas abajo, donde comienzan las amplias áreas de irrigación del Bajo Piura, el río se encuentra encauzado y en consecuencia impedido en su desarrollo natural, y
- ii) El tramo aguas abajo, desde la zona sin protección o encauzamiento hasta la desembocadura a la laguna La Niña, que corresponde a una longitud de 40.0 km (progresivas entre km 33+300 y km 71+800), el cauce consiste de tres sub-tramos:
 - La zona entre la terminación de los diques y la entrada al complejo lagunar Ramón / Ñapique (longitud 18.4 km, entre progresivas km 33+300 y km 50+700).
 - Complejo lagunar Ramón / Ñapique entre las progresivas km 50+700 y km 59+800, donde el cauce tiene un gran ensanchamiento y se forma un lago en los períodos de avenidas.
 - Cauce entre la salida de las lagunas y la entrada a la Laguna La Niña. Este tramo tiene una longitud de 12.0 km (entre progresivas km 59+800 y km 71+800).

En base a la información topográfica disponible del thalweg del río, se determinó los diferentes tramos indicados, ver elaboración de Figuras 23 y 24.

2.2 TRAMO DEL CAUCE ENTRE LA SALIDA URBANA Y LA TERMINACIÓN DEL ENCAUZAMIENTO DE LAS DOS MÁRGENES

2.2.1 TRAZO DEL CAUCE EN PLANTA

Debido a los diques de encauzamiento, protecciones y otras estructuras, que impiden el desarrollo natural del cauce, el cauce es poco sinuoso con una relación entre la longitud del thalweg y la longitud recta de 1.3, mientras que en su estado natural debería tener según Lane (1957) y Leopold/Wolman (1960), una sinuosidad mayor a 1.5, tomando en consideración la pendiente promedio de 0.02 % y un caudal medio anual de 325 m³/s (promedio entre años 1982/83 y 1997/98). A consecuencia de la sinuosidad o amplitud impedida, el río corre entre los diques en más o menos grandes distancias de un lado a otro, y choca al pie de ellos, tal como se observa in-situ.

Después de las avenidas que se presentaron entre los años 1998 y 2000 y de acuerdo a los levantamientos efectuados, se determinó una longitud promedio de los meandros de 3900 m, con una variación de 4600 m en el primer meandro que se presentó después del Puente Bolognesi y de 2800 m en el último tramo del río encauzado.

La amplitud de los meandros varía entre 280 m y 560 m hasta el Puente Independencia. Si se considera hasta el cruce de la alcantarilla del Dren 13.08 se obtiene un promedio de 370 m. Según Leopold/Wolman las amplitudes de los meandros deberían ser en estado natural de aproximadamente 1500 m, mientras que el encauzamiento no permite valores mayores que cerca de 560 m.

2.2.2 PERFIL LONGITUDINAL

Desde el punto de vista de pendientes promedio, determinadas en base a la información obtenida de los levantamientos de las secciones transversales del año 2000, se observó para el tramo encauzado del río, dos tramos con una pendiente promedio que casi no difieren:

- Tramo km 0+114 a km 20+657 (Los Ejidos - Puente Independencia), pendiente de $s = 0.022 \%$, ver Figuras 10, 11 y 23.
- Tramo km 20+657 a km 33+300 (Puente Independencia - 4.4 km aguas abajo cruce de alcantarilla del Dren 13.08), pendiente de $s = 0.020 \%$, ver Figuras 11, 12 y 23.

En dos secciones el desarrollo del cauce, verticalmente es fijado por el cruce de dos obras:

- En la progresiva 9+361, el sifón de cruce del canal “Biagio Arbulú”, con una cota superior correspondiente al techo de la losa de concreto de 18.40 m snm, que impide la erosión continúa del cauce. La superficie del concreto forma hoy día el fondo del cauce.
- En la progresiva 29+000, la alcantarilla del Dren 13.08 cruza el cauce. La protección superior de la alcantarilla tiene la cota de 13.10 m snm, que corresponde aproximadamente a la cota del fondo del río en ese tramo, ver Figura 12.

En base a la información topográfica disponible del thalweg del río de los años 1979 y 2000, además de aquella obtenida en el año 1997, es que el río Piura desde Los Ejidos hasta



Figura 10.- Río Piura. Izquierda, tramo comprendido desde la presa derivadora Los Ejidos hasta el ingreso a la ciudad de Piura, en el puente Cáceres. Derecha, vista del río Piura de aguas arriba hacia aguas abajo (Fuente: Google Earth 2007©).

aproximadamente 4900 m aguas abajo del Puente Independencia se encuentra en proceso de

erosión, para luego continuar un tramo corto en equilibrio y seguir el tramo de sedimentación, observándose de la información comparativa procesada, ver Figuras 23 y 24, que a la altura de la alcantarilla de cruce del Dren 13.08 podría haberse producido una cierta erosión en aproximadamente 200 m y continuar con la sedimentación.

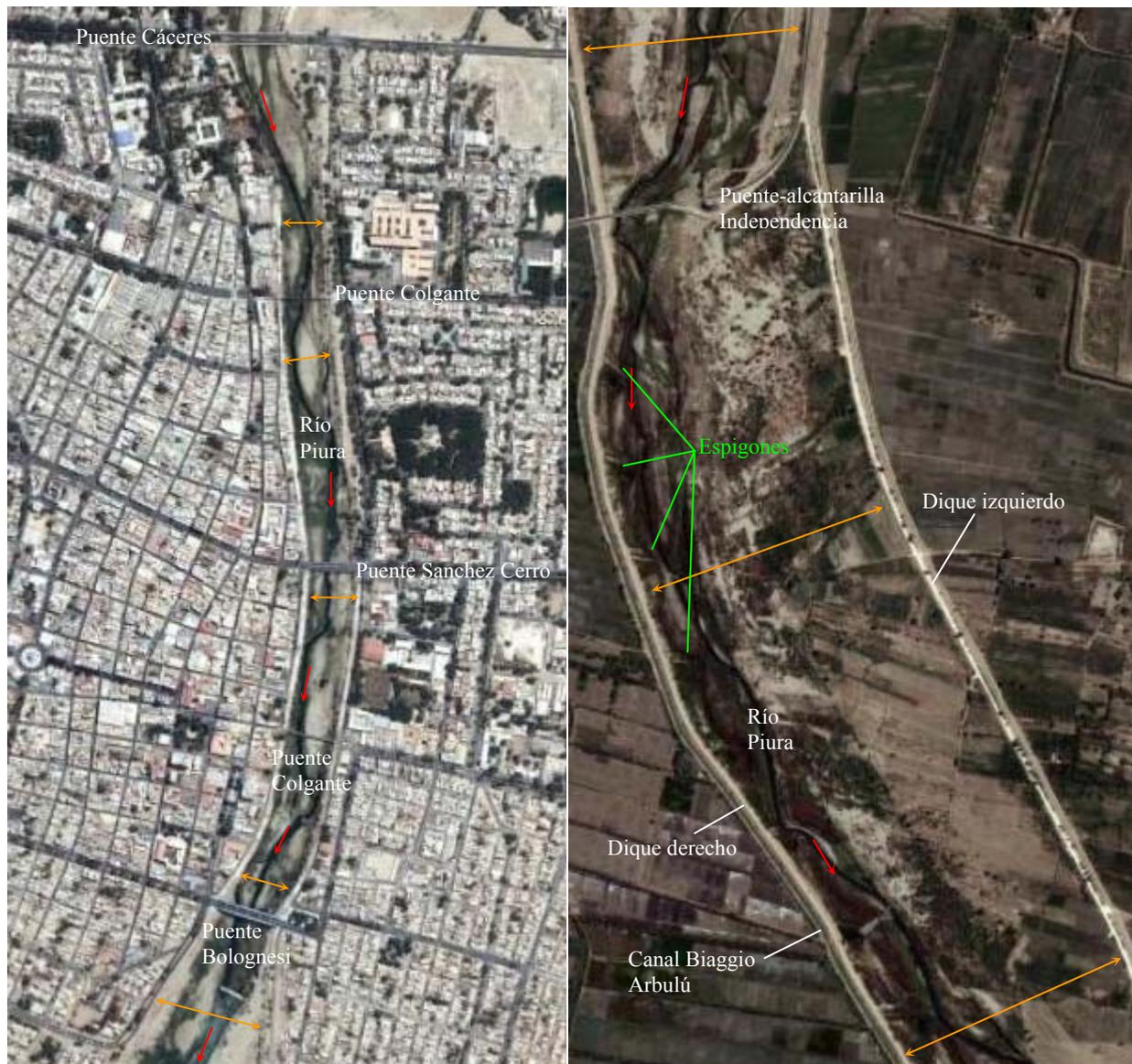


Figura 11.- Río Piura. Izquierda, encauzamiento con protección de taludes revestidos de concreto en el tramo que el río cruza la ciudad de Piura. Derecha, encauzamiento del río mediante diques de tierra con protecciones de pie de enrocado y espigones. Obsérvese la diferencia entre la anchura de encauzamiento en el tramo de ciudad, de unos 110 m en promedio, al tramo en las afueras de la ciudad, en el área rural, de 600 m en promedio. Figuras a similar escala (Fuente: Google Earth 2007©).

En el tramo superior del río hay una mayor erosión hasta el km 17+000 a partir de Los Ejidos del orden de 2.50 m, para después disminuir a un promedio de 1.00 m. La sedimentación en el tramo inferior llega a un promedio de 0.70 m.

En este contexto se debe notar que la comparación entre los levantamientos topográficos de diferentes años tiene algunas incertidumbres; por lo que en su oportunidad se propuso efectuar levantamientos en el futuro en las mismas ubicaciones de las secciones del levantamiento del año 2000 y por lo menos después de avenidas de mayor magnitud para obtener datos confiables que permitan cuantificar el desarrollo futuro del fondo del cauce.

Además, se debe tener en cuenta, que por lo menos parte de la erosión observada, corresponde a la influencia debido a la construcción de la presa derivadora Los Ejidos, en donde se profundizó el fondo del cauce natural en aproximadamente 3 m, ver acápite 7.

2.2.3 ANCHURA DEL ENCAUZAMIENTO Y SECCIONES TRANSVERSALES DEL CAUCE

De acuerdo a las condiciones existentes después de la construcción de las defensas del río Piura, aguas abajo del Puente Bolognesi, se tiene un ancho promedio entre los diques de la margen derecha y margen izquierda de alrededor de 600 m; sin embargo, existen zonas características y anchos diferentes que modifican de alguna manera la morfología del río Piura actual, tal es el caso que en el Puente Bolognesi el ancho inicial es de 132.90 m, para continuar en una ampliación de 1 km de longitud hasta alcanzar un ancho de 600 m, manteniéndose aproximadamente ese ancho hasta el sifón de cruce del canal “ Biagio Arbulú” del Bajo Piura, donde se produce un estrechamiento que alcanza los 306.50 m, para luego continuar con el Puente Grau y mantenerse en promedio un ancho de 600 m hasta 3 km aguas arriba del Puente Independencia, a partir de donde el ancho promedio es de 800 m, produciéndose un estrechamiento en dicho puente hasta los 277.50 m. Además de los pilares del puente, se encuentra interferido el cauce por 8 alcantarillas tipo elipsoidal de 7.30 m de ancho y 4.35 m de elevación (año 2000).

Después del Puente Independencia el ancho del cauce entre diques se mantiene en aproximadamente 600 m en una longitud de 2 km, para posteriormente ampliarse entre 700 m - 750 m hasta la alcantarilla de cruce del Dren 13.08, donde se encuentra una disminución del ancho a 450 m, para luego abrirse nuevamente en un ancho de 800 m - 850 m, que llega al final del dique de la margen izquierda. Luego se presentan varios cauces hacia la Laguna Ramón, predominando a la fecha el cauce ubicado al este, que en algunas zonas llega al borde del valle y a las cercanías de la carretera Panamericana Piura - Chiclayo.

Las características morfológicas del río están influenciadas por el alineamiento de los diques de defensa, presentándose condiciones de un río aluvial con presencia de meandros cambiantes. Tal como se ha mencionado anteriormente, en el tramo de la zona urbana, el cauce del río está prácticamente canalizado. Las Figuras 10 y 11 muestran la característica del encauzamiento. Obsérvese, que el cauce no tiene ninguna libertad lateral y la única posibilidad del desarrollo del río se da por el fondo, ver Figura 23, debido a los materiales naturales.

Aguas abajo de la zona urbana, hasta la zona del Puente Independencia, el río comienza a formar un cauce principal, que es limitado en algunos metros por terrazas laterales, ver Figura 10. El cauce principal tiene un ancho entre 100 m y 200 m, pero con una gran variación, sin encontrarse ninguna vegetación significativa, mientras que en las terrazas la vegetación es copiosa; en la mayoría de su longitud estas tienen desarrollo agrícola.

El cauce menor tiene en ese tramo una capacidad de descarga de entre 100 m³/s y 250 m³/s, sin inundar la terraza baja, y a partir de caudales de aproximadamente 800 m³/s a 1000 m³/s, las márgenes en ambos lados son totalmente inundadas hasta el pie de los diques.

En la zona aguas abajo del Puente Independencia, el cauce principal tiene un ancho algo mayor al del tramo anterior y las orillas no son muy altas y tienen taludes más tendidos, ver Figura 11.

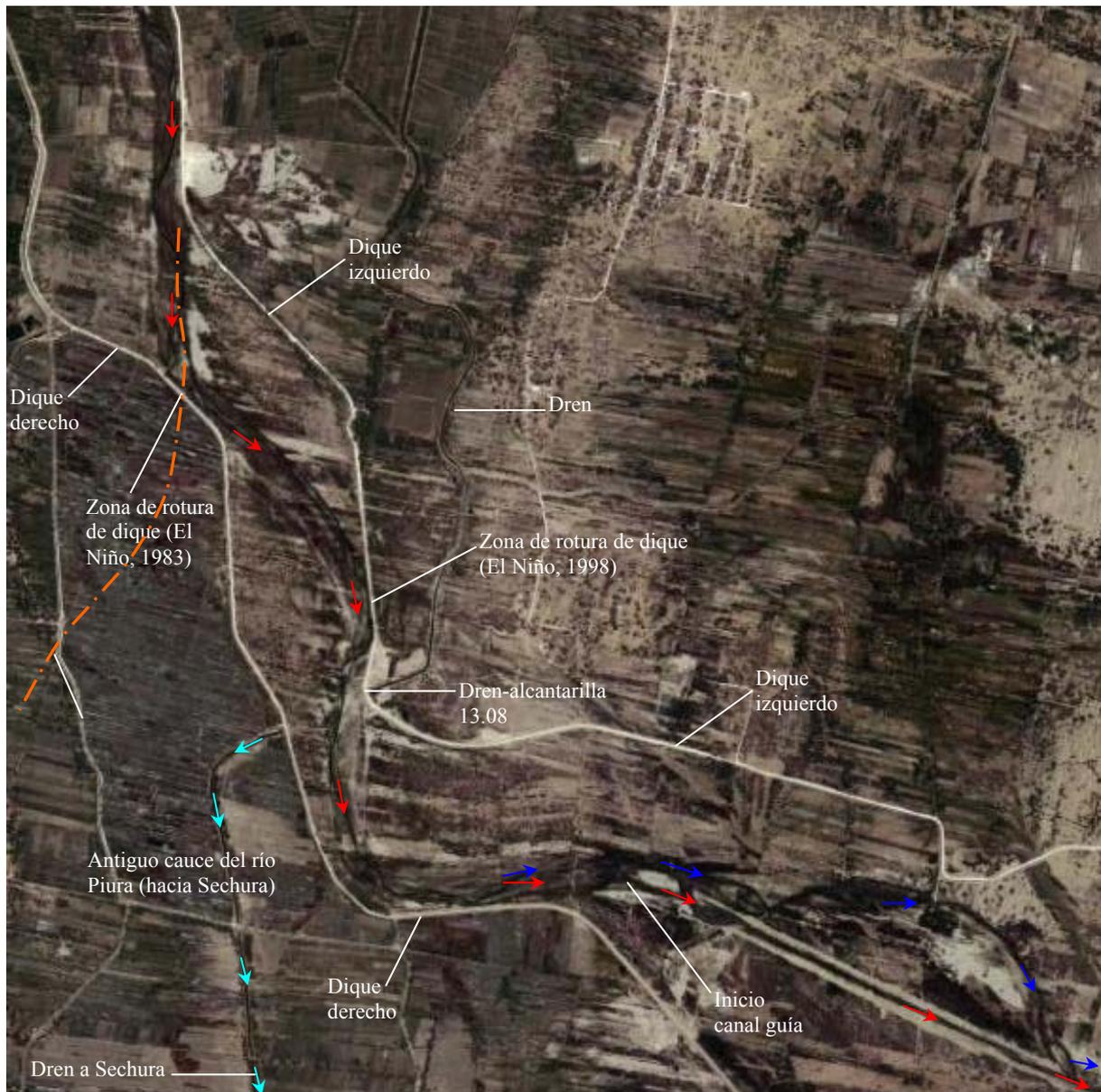


Figura 12.- Singularidades del encauzamiento del río Piura mostrando las zonas de falla de los diques derecho e izquierdo durante las máximas avenidas de los Fenómenos de El Niño 1983 y 1998 respectivamente. Obsérvese la zona del antiguo cauce del río Piura en su anterior desembocadura en Sechura. Inferior derecha, inicio del canal guía (construido a fines del 2006) para la rectificación del cauce principal (proyectado el año 2001) en el tramo comprendido entre el final del encauzamiento existente y el ingreso del río Piura a la laguna Ramón.

En esta zona, el cauce menor tiene una capacidad de descarga de aproximadamente $80 \text{ m}^3/\text{s}$ a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sin formar brazos, siendo la profundidad menor que en el tramo anterior; pero a partir de caudales de $300 \text{ m}^3/\text{s}$ a $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ambas márgenes del cauce son inundadas hasta el pie de los diques.

2.3 TRAMO DEL CAUCE ENTRE LA TERMINACIÓN DEL ENCAUZAMIENTO Y LA DESEMBOCADURA A LA LAGUNA LA NIÑA

2.3.1 TRAZO DEL CAUCE EN PLANTA

En el primer tramo aguas abajo de la zona encauzada, el río tiene todas las características de una forma intermedia entre meandriforme y entrelazado; mientras que el cauce principal tiene

grandes meandros hacia la zona de la antigua laguna Ramón. Es así como el río forma varios pequeños brazos que se ramifican y vuelven a unirse, ver Figura 13. Esa observación cumple según Lane (1957), en que el río se encuentra en la parte intermedia entre ríos meandriformes y entrelazados.

Durante el período de estiaje la mayoría de los cauces están secos y se activan sólo en el período de avenidas. Debido a que la capacidad hidráulica del cauce principal y los secundarios es pequeña, el flujo durante el período de avenidas alcanza inmediatamente las orillas e inunda amplias áreas.

En la zona del complejo Ramón / Ñapique continua la forma entrelazada. Debido a la pequeña pendiente en esa zona, ver Figura 13, es que en el río con caudales pequeños se producen inundaciones en amplias áreas y para niveles de pelo de agua superiores a 7.20 m snm, parte de los caudales embalsan la laguna Ñapique. Cabe

mencionar que la laguna Ramón se encuentra dividida en varias depresiones, por el efecto de la gran sedimentación que se ha presentado en estos últimos años, proceso que prácticamente ha llevado a la desaparición de la laguna Mala Vida y buena parte de la laguna Ramón Grande.

Entre la salida del complejo lagunar y la entrada a la laguna La Niña, el río forma de nuevo un cauce definido; en el primer tramo de este cauce se pasa una zona donde se observan afloramientos de la formación Zapayal, que resiste las fuerzas de tensión debido al flujo. En esos lugares el alineamiento es prácticamente recto, mientras que aguas abajo el río continúa por diferentes brazos hasta la laguna La Niña.



Figura 13.- Realineamiento del cauce principal del río Piura en el tramo final sin encauzar (excavación de canal guía, año 2006) hasta su descarga en la laguna Ramón (Fuente: Google Earth 2007©).

2.3.2 PERFIL LONGITUDINAL

En base a la información obtenida de los levantamientos de las secciones transversales del año 2000 se obtuvieron las siguientes pendientes promedio:

- Tramo km 33+300 a km 50+700 (sin encauzamiento, cauce predominante), pendiente de $s = 0.048 \%$, ver Figura 13.
- Tramo km 50+700 a km 59+800 (sin encauzamiento, cauce predominante), pendiente de $s = 0.012 \%$, ver Figura 14.
- Tramo km 59+800 a km 71+800 (sin encauzamiento, cauce predominante), pendiente de $s = 0.042 \%$, ver Figura 14.

Mientras que la pendiente en las lagunas es casi horizontal, las pendientes en el tramo aguas arriba del complejo lagunar Ramón / Ñapique y en el tramo aguas abajo de ese complejo son casi iguales, 0.04% , que es más grande que la pendiente en el tramo encauzado.

Sin embargo, no obstante la misma pendiente, el río ha formado tipos de cauce diferentes en ambos tramos debido al material de suelo predominante:

- En el tramo aguas arriba de las lagunas, el material del suelo consiste en limo arcilloso, por lo tanto, el río ha formado varios brazos aparte del cauce principal.
- Aguas abajo de las lagunas, el material predominante consiste en arena y grava aun existiendo además tramos en material duro Zapayal, por lo tanto el cauce es más recto, y casi no ha formado entrelazamientos.

Para el complejo lagunar existían datos topográficos solamente del año 2000. Para el tramo del cauce aguas abajo hay también datos topográficos adicionales de los años 1979 y 1983. La comparación de los datos de los diferentes años para la salida de las lagunas, muestra que el cauce se ha profundizado en los últimos años, con excepción de la parte inicial en 3 km de longitud aproximadamente, en que el material del fondo es más duro (Zapayal) y ha resistido a la acción erosiva del flujo, ver Figuras 14 a 23. Se debe notar en este contexto, que la comparación de los datos levantados en diferentes años y por diferentes métodos tiene algunas incertidumbres, tal como que las secciones no se han levantado en el mismo lugar y el thalweg del cauce presenta variación en cuanto a su posición en planta, que indican un desplazamiento entre los diferentes levantamientos.

2.3.3 ANCHURA DEL ENCAUZAMIENTO Y SECCIONES TRANSVERSALES

En el tramo del río Piura entre el final del encauzamiento y la entrada a la Laguna Ramón, las secciones transversales del cauce, muestran un ancho amplio, comprendido entre 3 km a 6 km, ver Figura 14.

Esta zona es predominantemente horizontal o plana, es decir que la variación respecto a las terrazas es de menos de 1.0 m; los varios brazos del río tienen sus cauces determinados según la importancia de ellos, mientras que los pequeños, tienen una profundidad por debajo de la terraza de sólo 1.0 m con anchos angostos. El cauce principal se ha profundizado con respecto a las terrazas aledañas de 2.0 m a 3.0 m, con taludes bien definidos y anchos que varían de

150 m a 300 m. En general, las terrazas están cubiertas de media a densa vegetación, modificándose a muy densa en la cercanía del cauce con una altura de 2.0 m a 3.0 m.

La sección transversal característica de la zona de la laguna Ramón muestra claramente que está formada por varias depresiones, las cuales se encuentran separadas entre ellas. Las divisorias entre esas depresiones no son muy altas; con niveles del pelo de agua de 7.20 m snm, desaparecen bajo el agua, dando un ancho de aproximadamente entre 4.0 km y 5.0 km, alcanzando una profundidad de agua entre 2.0 m y 3.0 m.

Aparte del proceso de sedimentación, que probablemente conducirá en el futuro a la desaparición de las mencionadas depresiones, la zona de la laguna es amenazada por el proceso de acción eólica, particularmente en sus orillas del sur y oeste, donde se han formado dunas de arena fina.

Hacia el oeste, el límite de la laguna cambia, presentándose una plataforma con una altura de 6.0 m a 7.0 m con poca ondulación y con varios cauces que cortan el plano entre 1.5 m a 2.0 m. Más al oeste comienza la laguna Ñapique, separada de la Laguna Ramón por una divisoria no muy definida, que tiene una altura de 7.2 m snm en el punto más bajo, o sea que cuando el pelo de agua sobrepasa esa altura, se embalsa la Laguna Ñapique. Se observó que la vegetación en esa zona no es muy desarrollada, sólo en los bordes de cauces existentes, es que existe significativa cobertura vegetal.

Tal como se indicó anteriormente, hay un cauce principal bien determinado entre la salida del complejo lagunar Ramón / Ñapique y la entrada a la laguna La Niña, que alcanza profundidades mayores que 10 m localmente, con cotas por debajo del nivel del mar, ver Figuras 23 y 24. El ancho del cauce varía entre valores menores a 100 m hasta más de 200 m. La vegetación en esa zona es muy escasa, inclusive no es significativa en las orillas, debido al proceso de erosión eólica predominante de la zona, que no permite la formación de una capa de humus, condición requerida para el desarrollo de una capa vegetal.



Figura 14.- Izquierda, cauce del río Piura después de su realineamiento mediante el canal guía, atravesando el complejo lagunar Ramón - Ñapique y hacia laguna La Niña. Derecha, tramo final del río Piura comprendido entre el complejo lagunar Ramón - Ñapique y su desembocadura en la laguna La Niña (Google Earth 2007©).

3. ANÁLISIS DEL MATERIAL DE FONDO

En base a una campaña de muestreo, año 2000, analizando el material de fondo del cauce del río Piura en el trayecto comprendido desde aguas arriba de la presa derivadora Los Ejidos hasta el ingreso a la laguna Ramón, se presenta en la Tabla 1 la clasificación del tamaño de las partículas de sedimentos para las dimensiones características D_{10} , D_{50} y D_{90} , que sirvieron de base para el análisis de agradación - degradación (sedimentación - erosión) del río y determinación del tipo de material predominante en el fondo, así como también determinar la función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} , Figura 15.

Tabla 1.- Tamaño de las partículas de sedimento muestreadas a lo largo del cauce del río Piura desde aguas arriba de la presa derivadora Los Ejidos hasta la laguna Ramón (2000).

Ubicación a lo largo del río		Progresiva [km]	D_{10} [mm]		D_{50} [mm]		D_{90} [mm]		Clasificación
2 km aguas arriba de la presa derivadora Los Ejidos		-2+000	0.1	arena fina	0.2	arena fina	0.3	arena media	arena fina
Aguas abajo de la presa derivadora Los Ejidos	~ 500 m aguas abajo del Puente Cáceres	3+500	0.03	arena muy fina	0.09	arena muy fina	0.2	arena fina	arena muy fina
	~ 500 m aguas abajo del Puente Independencia	20+500	0.006	limo	0.05	limo	0.15	arena fina	limo
	~ 1 km aguas abajo del Dren Alcantarilla 13.08	29+500	< 0.001	arcilla	0.015	limo	0.06	limo	limo
	Piedral	≈ 38+000	0.0015	arcilla	0.018	limo	0.06	limo	limo
	Carretera Panamericana, km 951	≈ 41+000	<< 0.001	arcilla	0.005	limo	0.04	limo	limo
	Laguna Mala Vida	≈ 45+000	0.0015	arcilla	0.008	arcilla	0.03	limo	arcilla
	Laguna Ramon	≈ 56+000	<< 0.001	arcilla	0.0018	arcilla	0.02	limo	arcilla

En base al diámetro determinante de los materiales en el fondo del río, $D_d = 0.045$ mm, considerado para el Bajo Piura, esto es para el tramo del río desde aguas abajo de la presa derivadora Los Ejidos hasta su ingreso a la laguna Ramón, la estabilidad del fondo del río es dada según Lange/Lecher

[31] hasta una fracción de flujo de 6 N/mm^2 a 10 N/mm^2 . Según Hjulström [31], ver Figura 16, el movimiento de los materiales del fondo para el mismo diámetro determinante comienza con velocidades promedios de entre 0.2 m/s y 0.4 m/s . Este diámetro determinante del material de fondo implica que aproximadamente un 70% del material es más pequeño que el diámetro de 0.0625 mm y que un 30% del material es mayor dimensión que 0.0625 mm , que es el límite entre limos y arenas, conforme la clasificación de la American Geophysical Union [15]. Siendo el material muy uniforme, éste material de

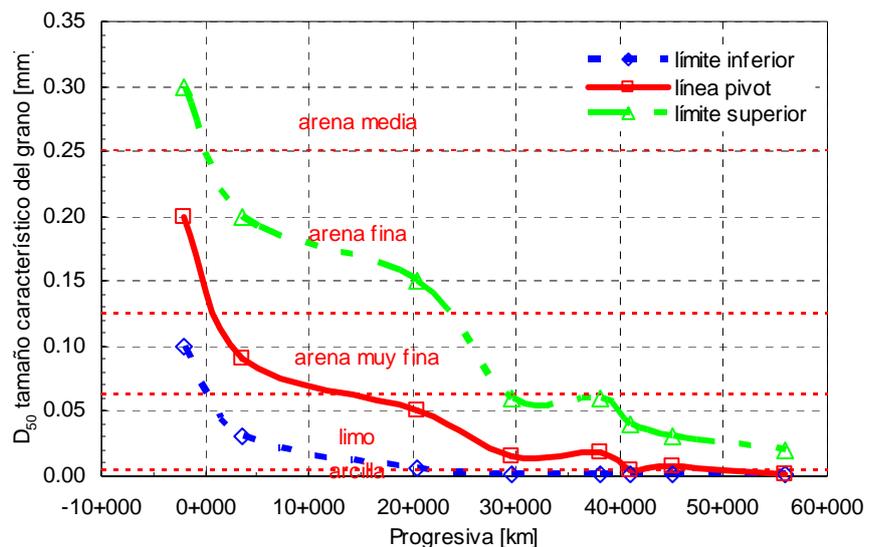


Figura 15.- Función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} .

fondo en el tramo de estudio aguas abajo de la presa derivadota Los Ejidos es calificado como un material limo-arenoso, compuesto de limos gruesos y arenas finas.

Tal como se observa en la Tabla 1, la variación del diámetro (D_{50}) es, desde Los Ejidos de 0.2 mm a 0.09 mm en la Ciudad de Piura, 0.05 mm en el Puente Independencia y 0.015 a la altura de la alcantarilla de cruce del Dren 13.08. De las Figuras 15 y 16 se observa claramente que siguiendo el curso, el material depositado se hace cada vez más fino, y que el material tiene poca resistencia contra las fuerzas del flujo de agua. Debido a esa pequeña resistencia, la estabilidad del fondo y de las orillas del cauce prácticamente no existe, siendo una de las razones para la erosión y el cambio del cauce principal durante las avenidas. Asimismo, mientras que las tres primeras muestras se obtuvieron en zonas donde predomina el proceso de erosión, se observa que la cuarta muestra se obtuvo en la zona donde se inicia el proceso de sedimentación con material de suspensión, en vista de la presencia de un alto porcentaje de arcilla (15%). Ya en el tramo del río entre la zona encauzada y la salida del complejo lagunar, los suelos varían entre limos arenosos y limos arcillosos.

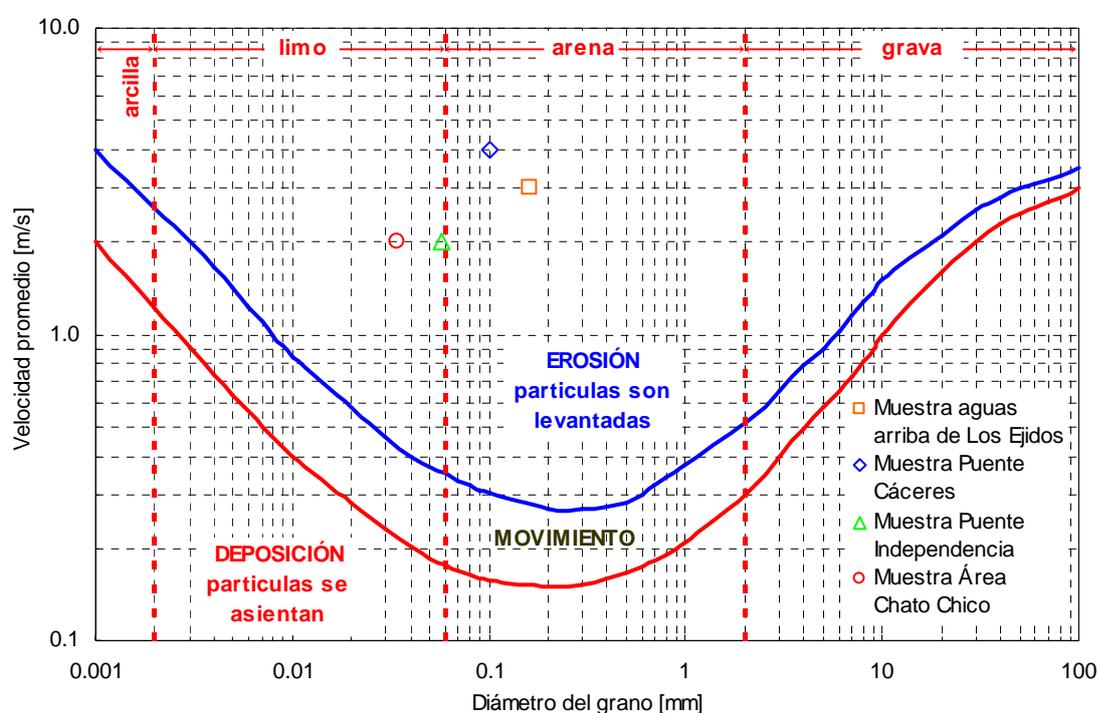


Figura 16.- Diagrama de Hjulström, velocidad crítica promedio para las muestras de sedimentos tomadas a lo largo del río Piura, estimado para avenida de $3200\text{ m}^3/\text{s}$ (Fuente: B. Ettmer, 2000).

4. DESCARGA DE SEDIMENTOS

En base a mediciones de sedimentos en suspensión registrados durante la avenida de El Niño de 1983, se estimaron los correspondientes para los máximos eventos de El Niño de 1972 y 1998, ploteándose la data obtenida para los tres eventos históricos en la Figura 17.

De esta manera también se estimaron los volúmenes de sólidos transportados durante dichos eventos, ver Tabla 2.

Tabla 2.- Volúmenes de sólidos transportados en los máximos eventos de El Niño 1972, 1983 y 1998.

Evento	Peso total [10^6 t]	Volumen total* [10^6 m^3]
1997/98	74 (130)**	41
1982/83	98 (100)**	54
1971/72	10 (10)**	5

* Peso específico de 1.8 t/m^3

** Valor en paréntesis significa el peso total anual

En efecto, los valores superiores significaron descargas de sedimentos específicas elevadas, entre 12600 y 1300 t/km² por evento, en base al área de la cuenca del río Piura, sólo hasta la presa derivadota Los Ejidos, de 7740 km². La concentración alcanza valores entre 590 g/m³ y 800 g/m³. En un año promedio (1975/76), la descarga de sedimentos alcanza 1.4 x 10⁶ t/año, que significa 0.8 x 10⁶ m³/año tomando en consideración el peso específico de 1.8 t/m³. La descarga en sedimentos específicos es de 180 t/km²/año. Sin embargo, todos estos valores han sido estimados y tienen una gran incertidumbre al no disponerse registros continuos.

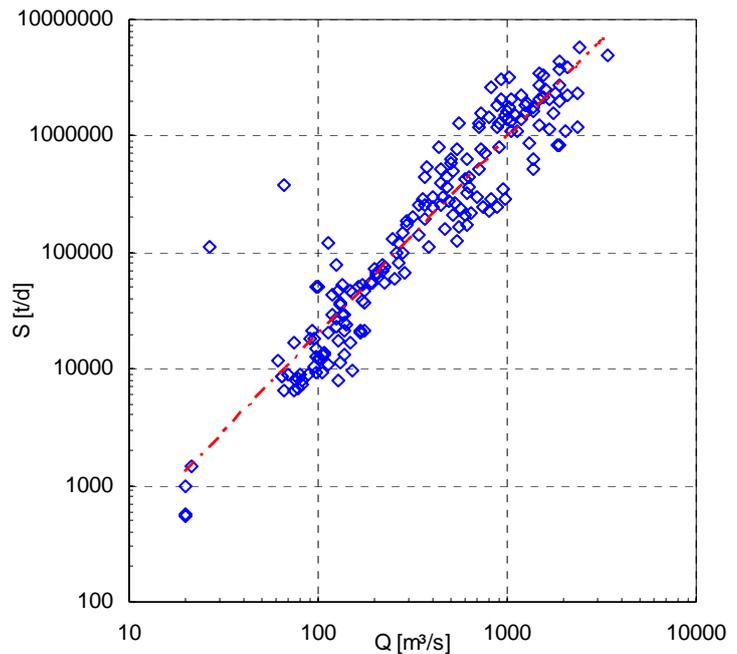


Figura 17.- Ploteo de tasa de sedimentos en suspensión y caudales en el río Piura para los periodos de avenidas, El Niño, de 1973, 1983 y 1998, entre los meses de Febrero y Abril, estimados en base a la avenida de 1983 y medida en el puente Piura.

5. CAPACIDAD HIDRAULICA DEL ENCAUZAMIENTO

La evaluación de la capacidad hidráulica de la cuenca baja el río Piura en el tramo encauzado tal como existente y como proyectado rehabilitar (año 2000-2001), se presenta en las Figuras 18 y 19. La evaluación hidráulica fue complementada con una muy detallada evaluación hidrológica de la cuenca del río Piura, y además de una detallada evaluación hidráulica de la

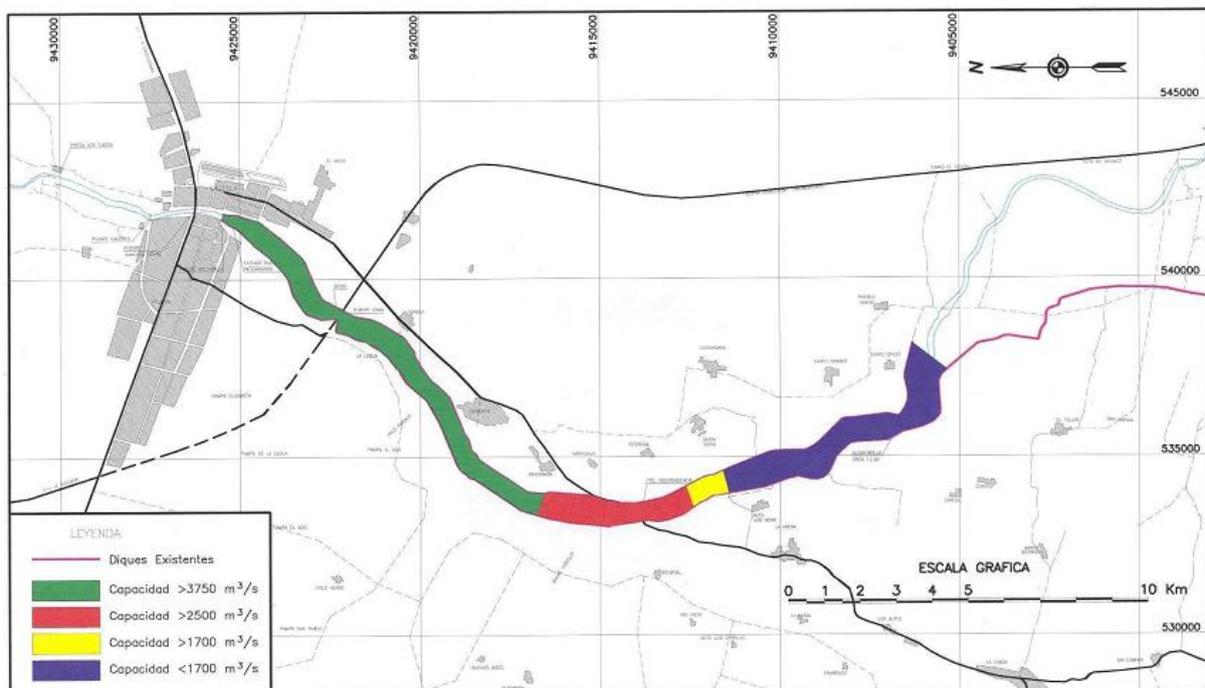


Figure 18.- Capacidad de descarga del cauce del río Piura sin desbordamiento de los diques en el tramo comprendido entre el puente Bolognesi y el fin del encauzamiento existente (Fuente: G. Strübing, 2000).

presa derivadora Los Ejidos, incluido modelo hidráulico físico, los cuales permitieron definir que el tramo encauzado superior tiene una capacidad hidráulica de hasta 3750 m³/s, lo cual

permitió asegurar que la avenida divulgada para el 12.03.1998 ($4400 \text{ m}^3/\text{s}$) nunca se presentó y esta fue mucho menor, habiendo sido estimada entre 3000 y $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ [5, 6, 7, 8].

Para el modelamiento hidráulico se distinguieron claramente dos sectores según las propiedades hidráulicas del río: (i) el flujo en cauces principales y sobre áreas de inundación bien limitadas, en el que predomina el proceso hidráulico de traslación, (ii) el flujo en largas o amplias zonas de inundación, en el que predomina claramente el proceso hidráulico de retención sobre el de traslación. Se complementó con una calibración efectiva del modelo.

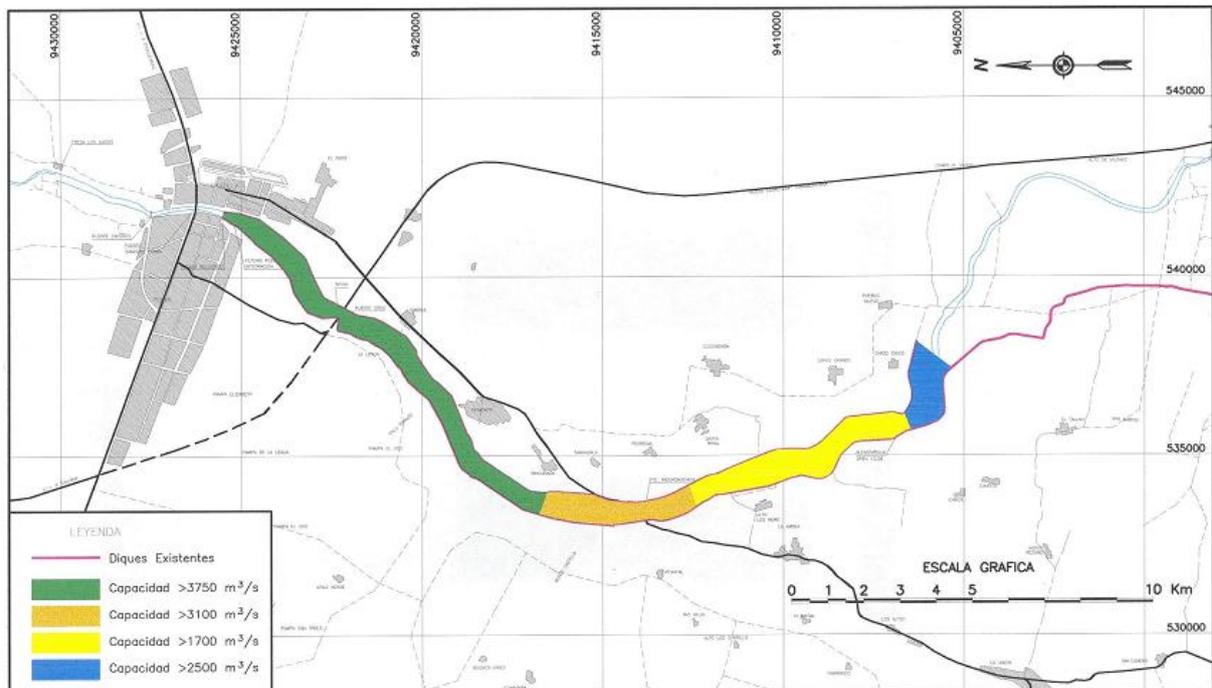


Figure 19.- Capacidad de descarga del cauce del río Piura sin desbordamiento de diques, tramo entre el puente Bolognesi y el fin del encauzamiento, posterior a la rehabilitación proyectada en el año 2000-2001 (Fuente: G. Strübing, 2000).

6. DETERMINACIÓN DE LOS TRAMOS DE EROSIÓN (DEGRADACIÓN) O SEDIMENTACIÓN (AGRADACIÓN)

En base al diámetro determinante de los materiales del fondo del río ($D_d = 0.045 \text{ mm}$), la estabilidad del fondo del cauce es dada según Lange/Lecher [31] hasta una fracción de flujo de 6 N/mm^2 a 10 N/mm^2 . Según Hjülström [31], ver Figura 16, comienza el movimiento de los materiales del fondo para el mismo diámetro determinante con velocidades promedio entre 0.2 m/s y 0.4 m/s .

De acuerdo con los cálculos hidráulicos, se verificó a lo largo del río Piura, las fuerzas tractivas del flujo y las velocidades promedio en el cauce principal y en ambas llanuras para los caudales $360 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno de 2 años), $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno de 5 años), $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno de 10 años), $2500 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno de 25 años) y $3100 \text{ m}^3/\text{s}$ (período de retorno de 50 años), ver Figuras 20, 21 y 22.

Los resultados tomaron en cuenta las siguientes condiciones límites:

- el proceso de erosión comienza con tracciones del flujo mayor de 10 N/mm^2 y/o con la velocidad del flujo mayor que 0.4 m/s ;

- estado equilibrio con tracciones del flujo en el orden de 8 N/mm^2 y/o con la velocidad de 0.3 m/s ;
- el proceso de sedimentación comienza con tracciones del flujo menor que 2 N/mm^2 y/o con velocidades menores que 0.2 m/s .

Los resultados correspondientes son resumidos en la Tabla 3.

Tabla 3.- Determinación de los tramos de erosión (degradación) y sedimentación (agradación) en el río Piura.

Tramo del Río	Caudal														
	360 m ³ /s			1100 m ³ /s			1700 m ³ /s			2500 m ³ /s			3100 m ³ /s		
	MI	CP	MD	MI	CP	MD	MI	CP	MD	MI	CP	MD	MI	CP	MD
Los Ejidos - Puente Cáceres	n/s	0	n/s	+	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+
Ciudad Piura	n/s	0	n/s	n/s	-	n/s									
Puente Bolognesi - Grau	n/s	0	n/s	+	0	-	+	-	+	+	-	+	0	-	0
Puentes Grau - Independencia	n/s	0	n/s	+	0	-	+	0	-	+	-	-	0	-	-
Puente Independencia- Fin de Encauzamiento	n/s	0	n/s	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	-	-
Fin de Encauzamiento- Entrada Laguna Ramón	+			+			+			+			+		
Lagunas	+			+			+			+			+		

Leyenda: MI : Margen izquierda CP : Cauce principal MD : Margen derecha
 - : Erosión 0 : Estado equilibrio + : Sedimentación
 n/s : No aplicable / Sin datos

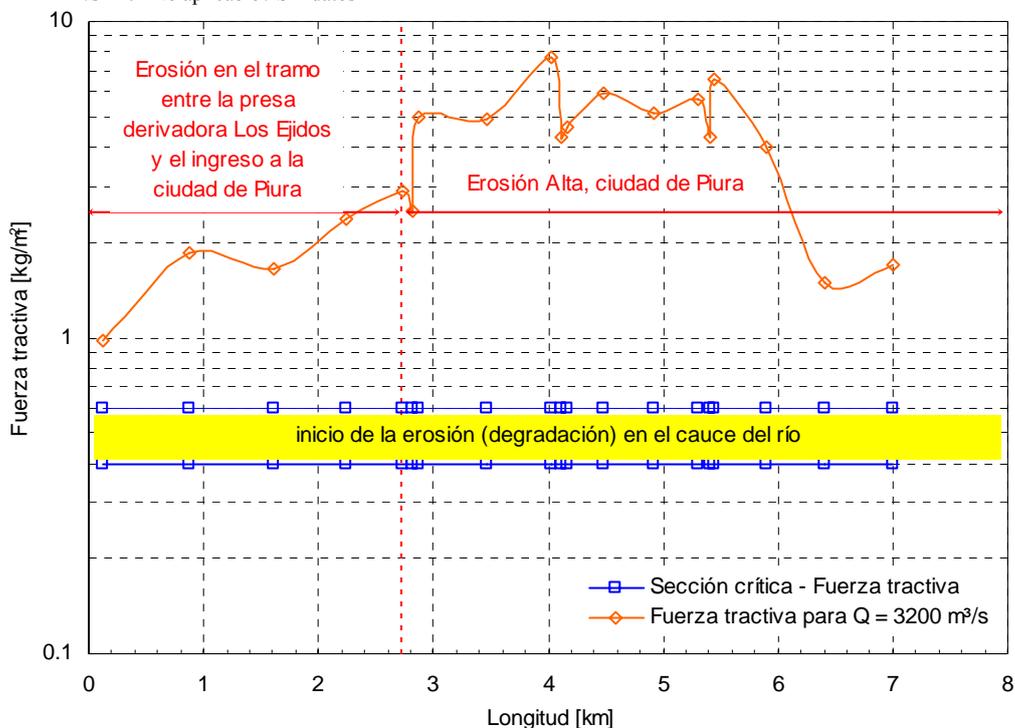


Figura 20.- Estabilidad contra erosión en el cauce principal - tramo comprendido entre la presa derivadora los Ejidos y la ciudad de Piura.

En el tramo entre Los Ejidos (km 0+000) y Puente Cáceres (km 2+900) se observa a partir de caudales de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ el proceso de erosión es mayor para caudales en incremento. En la zona de la ciudad de Piura (entre km 2+900 y km 5+037), la tracción de flujo y la velocidad

de flujo sobrepasan bastante los valores límites; las tracciones de flujo alcanzan valores de 70 N/mm² con el caudal de 3100 m³/s, y se observan velocidades hasta 5 m/s; por lo tanto, se debe tomar en cuenta una fuerte erosión en la zona que se profundiza alrededor de las obras en el río por el proceso de la socavación local.

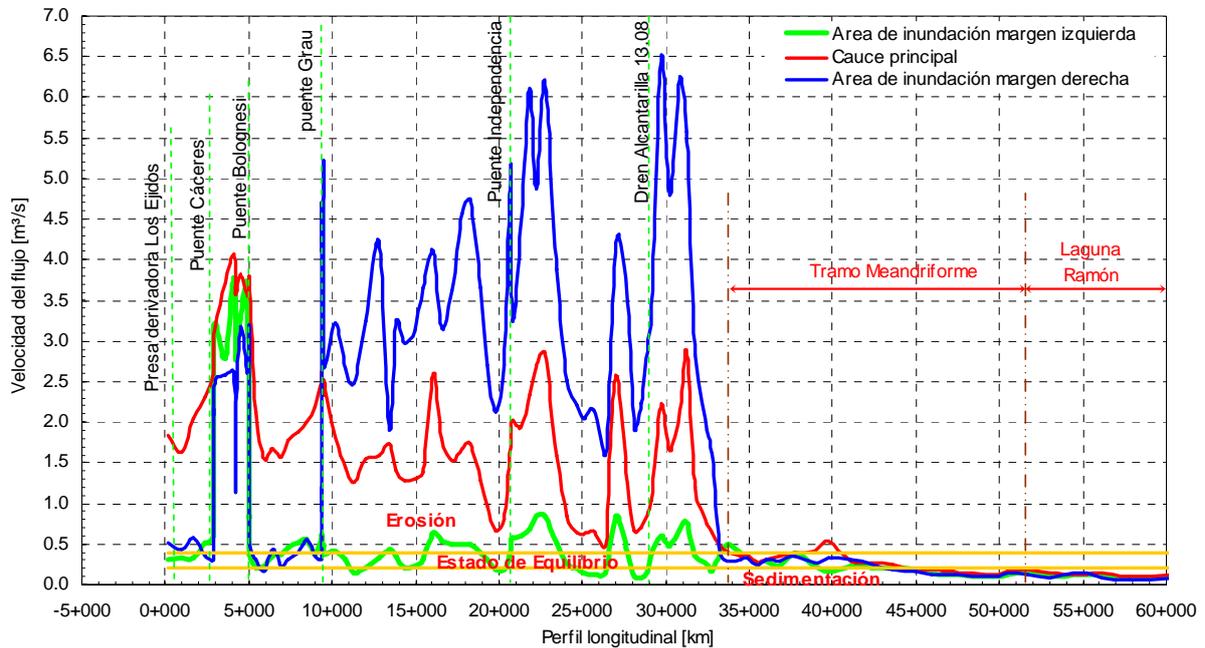


Figure 21.- Velocidad del flujo en el cauce principal y áreas de inundación en la cuenca baja del río Piura para un caudal de 3100 m³/s.

Aguas abajo de la zona de la ciudad, entre el Puente Bolognesi (km 5+037) y Puente Grau (km 9+400) se obtuvo de los cálculos el estado equilibrio hasta caudales de 1100 m³/s. Para caudales mayores se ha constatado un proceso de erosión en el cauce principal. En ambas llanuras de inundación se observó generalmente una sedimentación ligera y/o el estado de equilibrio.

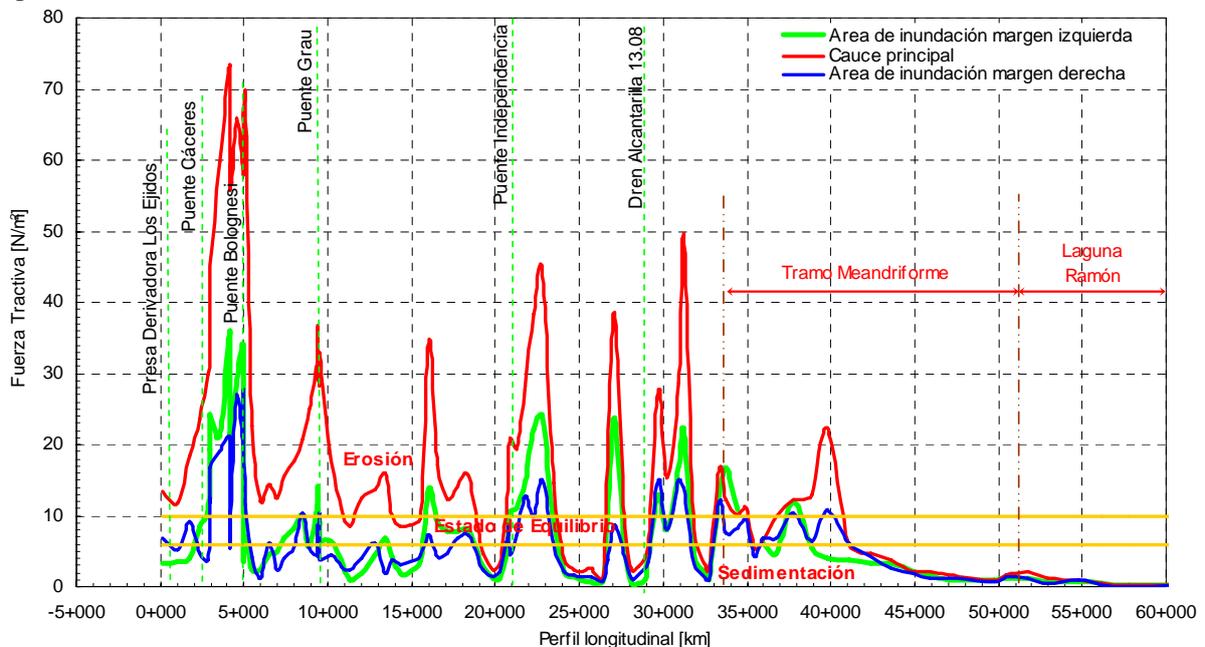


Figure 22.- Fuerza tractiva en el cauce principal y áreas de inundación en la cuenca baja del río Piura para un caudal de 3100 m³/s.

El tramo entre los puentes Grau e Independencia (km 9+400 - km 20+700) se caracteriza por

el estado de equilibrio hasta caudales de 1700 m³/s; para caudales mayores se observa el proceso de erosión. Sobre la llanura izquierda predomina la sedimentación, mientras la zona de la margen derecha se caracteriza por la erosión; sin embargo, existen variaciones de esa situación en algunas zonas.

Entre el Puente Independencia y el fin del encauzamiento (km 33+400) se ha calculado predominantemente el estado de equilibrio con zonas locales en que prevalece el proceso de erosión. Sobre las llanuras en ambos lados se observan sedimentaciones; sin embargo, existen zonas en que predomina la erosión. Aguas abajo del encauzamiento, es decir, en el tramo entrelazado y en las lagunas predomina la sedimentación. Sin embargo, existen zonas locales en que se puede observar el proceso de erosión.

7. DISTRIBUCIÓN DE LOS SEDIMENTOS A LO LARGO DEL RÍO

Los resultados obtenidos se basan en cálculos de flujo estacionario unidimensional, por lo tanto son aproximaciones. En base de los cálculos hidráulicos, con el modelo HEC-RAS se pueden aproximar las velocidades de flujo promedio en los diferentes tramos del río Piura para caudales entre 360 m³/s (período de retorno 2 años) y 3100 m³/s (período de retorno 50 años), ver Tabla 4.

Mientras que en el tramo encauzado las velocidades promedio varían entre 0.8 m/s con pequeños caudales y mayor que 1.5 m/s para grandes caudales, las velocidades en el tramo entrelazado, ubicado entre el fin del encauzamiento y la entrada a la laguna Ramón son bastante más bajas, con valores de 0.2 m/s a 0.4 m/s en promedio, en consecuencia se puede apreciar que gran parte de los sedimentos en suspensión se decanta en ese tramo.

Tabla 4.- Velocidad promedio de flujo para diferentes caudales en los dos tramos existentes en la cuenca baja del río Piura.

Caudal	Tramo	
	Los Ejidos - Fin Encauzamiento	Fin Encauzamiento - Entrada laguna Ramón
	Velocidad promedio de flujo	
m ³ /s	m/s	m/s
360	0.79	0.15
1100	1.05	0.18
1700	1.18	0.19
2500	1.35	0.21
3100	1.57	0.22

Debido a que el proceso de embalsamiento predomina en las lagunas Ramón y Ñapique, las velocidades en esta zona no son conocidas; sin embargo, en base a cálculos teóricos se puede aproximar, que las velocidades promedio son menos que 0.1 m/s, tanto para caudales pequeños como para los más grandes.

En base de las velocidades promedio se obtuvieron los tiempos de traslado que se presentan en la Tabla 5 para los diferentes tramos, tomando en cuenta sus longitudes.

Para las lagunas se ha calculado un tiempo de permanencia promedio teórico para el evento de 1997/98 de la siguiente manera:

Tabla 5.- Tiempos de traslado de las partículas en suspensión en los dos tramos de análisis del río Piura.

Tramo	Los Ejidos - Fin Encauzamiento	Fin Encauzamiento - Entrada laguna Ramón
Longitud	34 km	20 km
Caudal	Tiempo de traslado	
m ³ /s	h	h
360	12	38
1100	9	31
1700	7	29
2500	6	26
3100	6	25

en base de la curva de duración de los volúmenes embalsados durante la avenida, que muestra un volumen de $90 * 10^6 \text{ m}^3$ para la frecuencia de excedencia de 50 % y en base del caudal promedio del evento, $526 \text{ m}^3/\text{s}$, se ha aproximado un valor de 171000 s ó 48 h para el tiempo de permanencia promedio. Se ha obtenido un valor semejante (40 h) para el evento de 1982/83.

En vista que los granos del sedimento en suspensión no son uniformes, sino que varían en promedio entre menor que 0.007 mm (arcilla) y mayor que 0.09 mm (arena fina), su sedimentación o decantación se produce con diferentes velocidades de decantación entre 0.14 m/h y 25 m/h (resultados según ecuación de Stokes), ver Tabla 6.

En base de los diferentes tirantes promedios en el tramo entre el fin de encauzamiento y la entrada a la laguna Ramón con diversos caudales, se obtuvo el tiempo de decantación necesario, ver Tabla 7.

Tabla 6.- Velocidad de decantación de los sedimentos en suspensión.

Diámetro		Velocidad de decantación	
%	mm	cm/s	m/h
d ₁₀	0.007	0.004	0.14
d ₃₀	0.025	0.05	1.8
d ₅₀	0.036	0.10	3.6
d ₇₀	0.064	0.32	11.5
d ₉₀	0.096	0.70	25.2

Tabla 7.- Tiempo de decantación necesario de los sedimentos en suspensión en el río Piura, tramo comprendido entre fin del encauzamiento e ingreso a la laguna Ramón.

Caudal	Tirante Promedio	Diámetro				
		d ₁₀	d ₃₀	d ₅₀	d ₇₀	d ₉₀
		Tiempo de decantación necesario				
m ³ /s	m	h	h	h	h	H
360	0.70	5	<1	<1	<1	<1
1100	1.5	11	<1	<1	<1	<1
1700	2.0	14	1.1	<1	<1	<1
2500	3.0	21	1.7	<1	<1	<1
3100	3.5	25	1.9	1	<1	<1

Los tiempos de decantación necesarios ascienden a valores menores que 1 h para la fracción de granos entre d₃₀ y d₉₀. En base a los tiempos de traslado calculados entre 25 h y 38 h se puede apreciar que una gran parte de la fracción de granos mencionada ya se sedimentó en el tramo entrelazado, sin alcanzar la zona de las lagunas.

En las lagunas, en que la profundidad del agua alcanza valores de hasta 5.5 m, el tiempo de decantación necesario asciende a valores entre menos que 1 h y 39 h, ver Tabla 8.

Considerando que el tiempo de permanencia alcanza valores entre 40 h y 48 h, ver arriba, se concluyó que casi todos los sedimentos finos ya se decantan en las lagunas si no se han sedimentado ya aguas arriba, y en consecuencia, no son transportados hacia aguas abajo. Esto se sustenta, por las observaciones en campo, donde no se encontraron cantidades significativas de sedimentos finos, ni a lo largo de las orillas del río entre las lagunas Ramón y La Niña, ni en las orillas de la Laguna

Tabla 8.- Tiempo de decantación necesario de los sedimentos en suspensión en las lagunas Ramón y Ñapique.

Profundidad del agua	Diámetro				
	d ₁₀	d ₃₀	d ₅₀	d ₇₀	d ₉₀
	Tiempo de decantación necesario				
m	h	h	h	h	h
2.0	14	1.1	<1	<1	<1
3.0	21	1.7	<1	<1	<1
4.0	29	2.2	1.1	<1	<1
5.0	36	2.8	1.4	<1	<1
5.5	39	3.0	1.5	<1	<1

La Niña. En conclusión, de lo anteriormente señalado, se puede apreciar que la mayor parte de los sedimentos en suspensión, es decir, la totalidad de la fracción de granos mayor que d_{30} y una parte de la fracción de granos más finos, se decantan en el tramo aguas arriba de la laguna Ramón.

Tomando en cuenta los sedimentos en suspensión transportados durante el evento de 1997/98, que se estiman en $74 * 10^6$ t ó $41 * 10^6$ m³ (peso específico 1.8 t/m³), se aproximaron las cantidades de sedimentos que se han decantado en los diferentes tramos del río, ver Tabla 9.

Tabla 9.- Decantación de los sedimentos en suspensión en los diferentes tramos del río Piura.

Tramo	Decantación de sedimentos			Sobre - elevación promedio del terreno
	%	10 ⁶ t	10 ⁶ m ³	m
Los Ejidos - Fin Encauzamiento	~ 10	7.0	3.8	Sólo en zonas limitadas
Fin Encauzamiento - Entrada Laguna Ramón	75	55.5	30.8	~ 0.75*
Lagunas Ramón / Ñapique	15	11.1	6.2	~ 0.15**
Abajo de las lagunas	~ 1	0.4	0.2	-

* En promedio sobre un área de 40 km²

** En promedio sobre el área de 55 km² (área del espejo de agua con la cota de 9.2 m snm, que significa la cota con la frecuencia de duración de 50 % durante el evento 1997/98).

Los resultados de los cálculos teóricos son confirmados en líneas generales por las observaciones en campo y por las cotas levantadas del terreno existente dentro del cauce de avenidas junto al dique derecho y la cota de la llanura defendida por el dique, fuera del cauce de avenidas. En la Figura 22 se presenta la comparación de los

datos levantados en forma de perfil longitudinal y muestra claramente que la sedimentación en las llanuras ya comienza un poco aguas arriba de la progresiva 26+500 km. En promedio, el terreno en la zona protegida es aproximadamente 1.0 m más elevado que fuera, y la diferencia alcanza valores máximos de 2.5 m en la cercanía de algunos tramos de diques, que ya han sido construidos antes de 1982/83, es decir, la sedimentación proviene de dos fenómenos de El Niño.

8. APROXIMACIÓN DE LA EROSIÓN (DEGRADACIÓN) GENERAL EN EL CAUCE PRINCIPAL DEL TRAMO ENCAUZADO

8.1 ANTECEDENTES

Los fenómenos de El Niño de 1982/83 y 1997/98 han puesto en evidencia erosiones generales fuertes en el cauce principal del río. El término “erosión general”, se refiere en este sentido a los descensos irreversibles del fondo del cauce que han quedado como resultado de las crecidas a través de toda la sección y a lo largo de longitudes considerables, y que no es causada por ningún fenómeno local.

En primer lugar, en la ciudad se han producido erosiones permanentes o finales, tras el paso de las crecidas, del orden de 2 m (o incluso más) en toda la longitud del encauzamiento urbano, en unos 2 km. Estas erosiones son muy claras y fáciles de medir porque han quedado descubiertas las tablestacas de los revestimientos de las orillas, ver Figura 5. Hay otros datos muy valiosos en los puentes de la ciudad que muestran erosiones generales transitorias (es decir recuperadas) durante las crecidas de 1998, de hasta 3 m más con respecto a la cota final tras las crecidas.

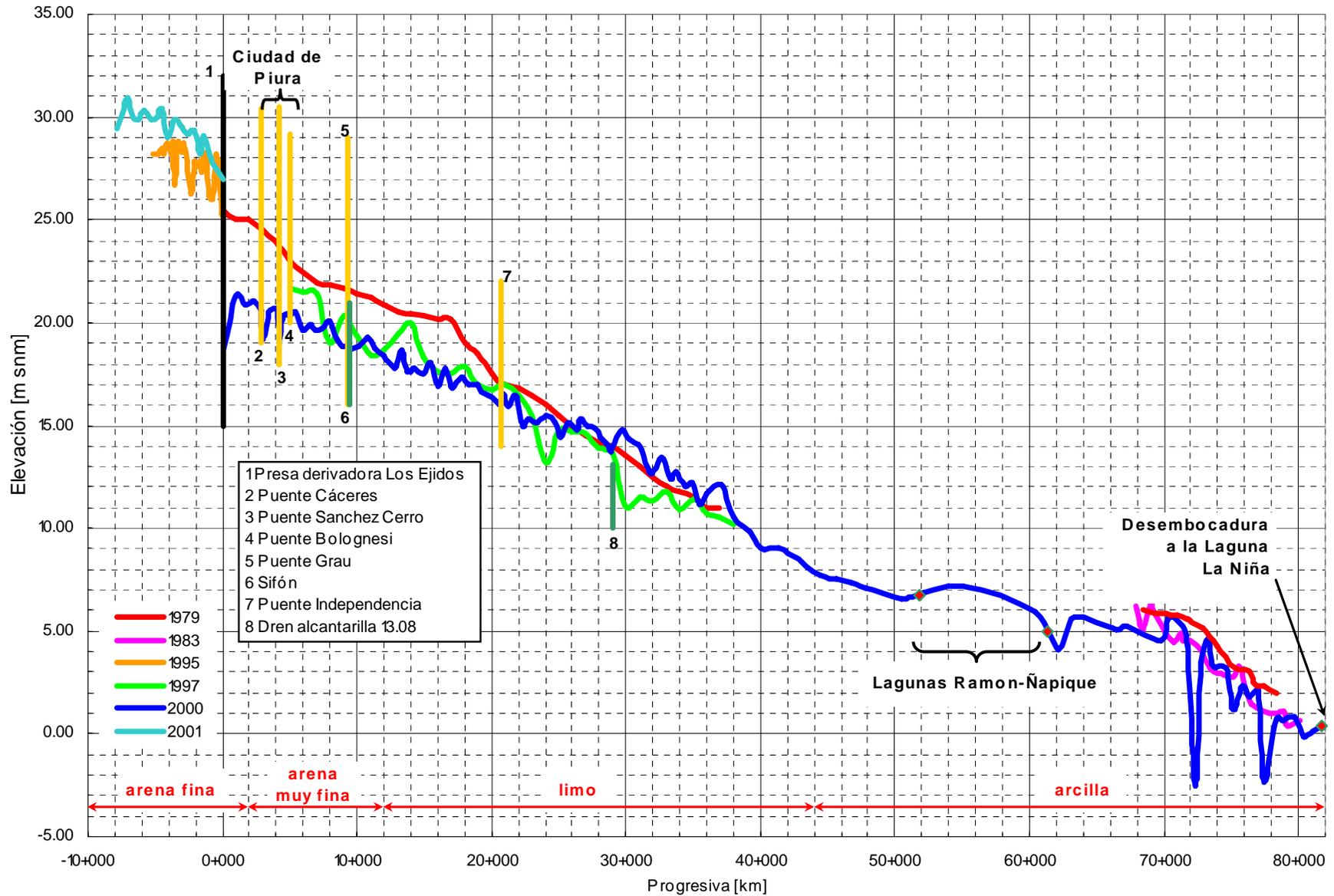


Figura 23.- Perfil longitudinal medido de cambios de niveles de fondo en el thalweg (1979-2001), tipos predominantes de material de fondo. Perfil del Bajo Piura, desde 8 km aguas arriba de la presa derivadora Los Ejidos hasta el final de la desembocadura del río en la laguna La Niña (Fuente: C. Alvarado A., 2000).

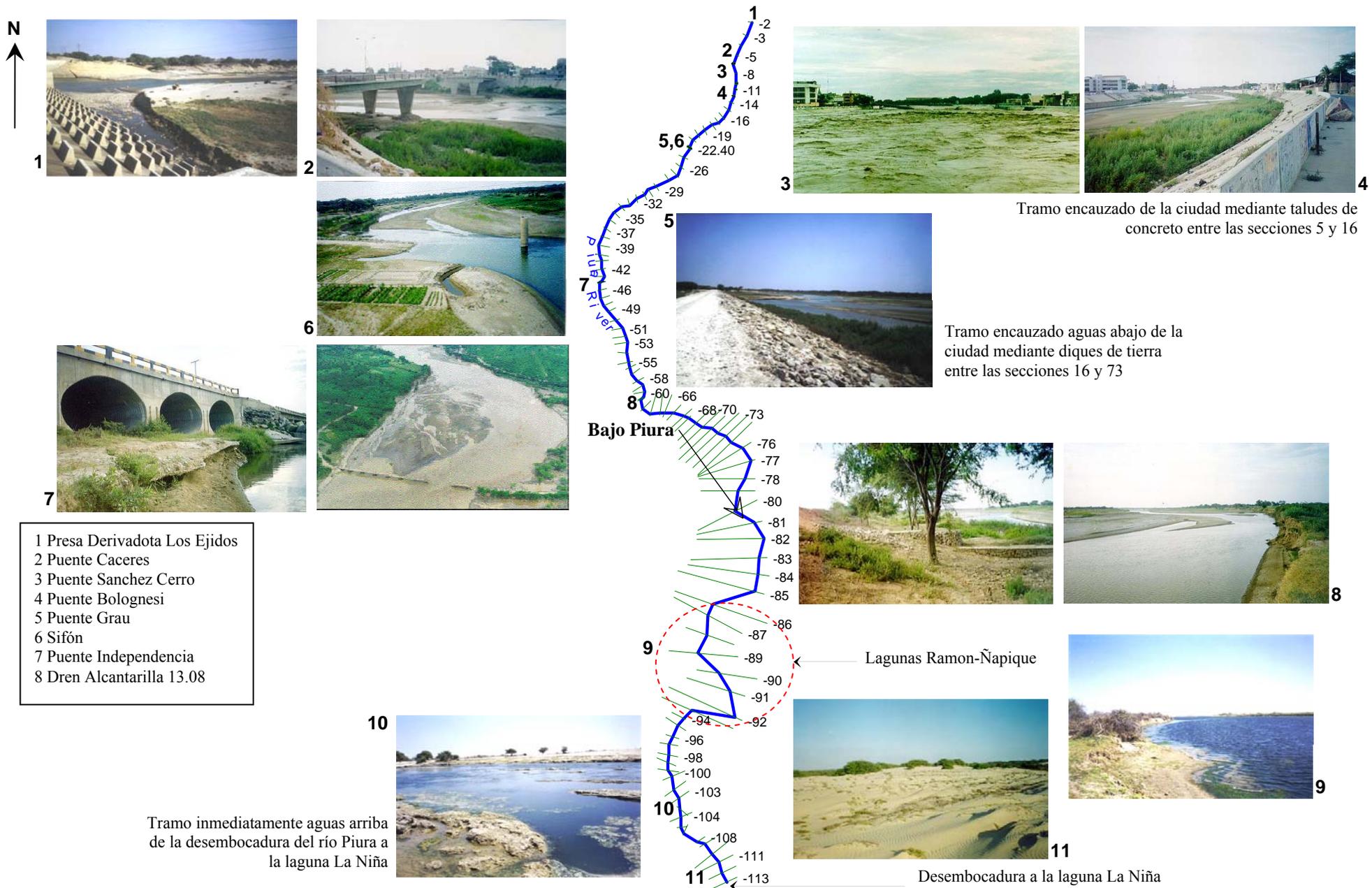


Figura 24.- Vista en planta del thalweg del río Piura en su cuenca baja, tramo entre presa derivadora Los Ejidos y desembocadura a la laguna La Niña (Fuente: C. Alvarado A., 2000).

Evidentemente estas erosiones generales y eventualmente otras locales fueron responsables de la pérdida de por lo menos el puente Bolognesi. Otra evidencia de erosión general permanente debido a los fenómenos de El Niño 1982/83 y 1997/98, se tiene en el km 9.4, en donde un sifón que cruza el río perdió su recubrimiento, aflorando el techo del cajón de hormigón.

En forma más sistemática, se han obtenido las cotas del thalweg de las secciones transversales tomadas en el presente proyecto comparándolas con otras del año 1979, ver Figura 23. De la misma forma se han comparado ambas informaciones con los datos disponibles del levantamiento topográfico del año 1997, ver también Figura 23, es decir, entre los eventos de 1982/83 y 1997/98.

8.2 EVALUACIÓN

A pesar de las incertidumbres e imprecisiones que puedan tener las informaciones topográficas de 1997, en que las secciones no se levantaron en los mismos lugares que las del 2000, pero que fueron trasladados por cálculos de interpolación al lugar del levantamiento del año 2000; es claro que el fondo del cauce ha tenido descensos importantes entre las progresivas km 0+000 y km 28+000 aproximadamente, ver Figura 23, es decir en casi todo el tramo encauzado con diques. Estos descensos serán mayores cuanto más grande sea la distancia hasta la progresiva km 28+000.

El descenso del fondo puede entenderse como un giro o una basculación con respecto a un punto o pivot situado alrededor de la alcantarilla Dren 13.08, ver Figura 23. La observación en base de los datos topográficos fue sustentada por los resultados de los cálculos hidráulicos, que indican para la zona mencionada igualmente un tramo de equilibrio sin erosión y sin sedimentación en el cauce principal. La pendiente de 0.025 % que hoy tiene este tramo era del 0.038 % en 1979, antes del fenómeno de El Niño 1982/83 y del 0.029 % en 1997 después del evento 1982/83, pero antes del fenómeno de El Niño 1997/98.

Dos causas principales explican el fenómeno de erosión general descrito:

- La primera causa la explica la construcción de la presa derivadora Los Ejidos. La presa representa una alteración en el equilibrio del río. La alteración se debe a la modificación de la variable fundamental en el equilibrio dado por el transporte sólido, el cual se ve reducido. En consecuencia, ocurren erosiones generales. Las erosiones empiezan en la presa y progresan hacia aguas abajo, alcanzando una lejanía. Sus magnitudes son mayores cerca del pie de presa. La consecuencia final es la reducción de la pendiente del río aguas abajo de la presa, ver Figura 23.
- La segunda causa es la construcción de los diques de defensa contra inundaciones, significando una modificación de la anchura del flujo en crecidas. Este estrechamiento del río representa una alteración del equilibrio. Ante esta situación se modifican los caudales unitarios, líquidos y sólidos. Su consecuencia es la ocurrencia de erosiones generales. La reducción de la pendiente en el tramo estrechado es la expresión del desequilibrio. La erosión es menor o nula al final del tramo estrechado y va creciendo hacia aguas arriba. La erosión progresa hacia aguas arriba, alcanzando lugares fuera del área estrechada, ver Figura 23.

En vista que la alteración en el transporte sólido no es tan significativa debido al volumen del embalse de Los Ejidos prácticamente inexistente, que en consecuencia no reduce

significativamente el transporte sólido, la erosión observada se debe mucho más a la segunda causa que a la primera. La razón fundamental para ello es la coincidencia entre el punto de giro del perfil longitudinal y el final del área encauzada o estrechada. La primera causa es improbable, ya que justificaría que al cabo de dos fenómenos de El Niño la erosión progresiva hacia abajo hubiera alcanzado el fin del área encauzada. Por el contrario, la erosión ha remontado hacia aguas arriba desde el km 28 aproximadamente, ver Figura 23.

8.3 APROXIMACIÓN CUANTITATIVA DE LA EROSIÓN (DEGRADACIÓN) FUTURA

Se ha evitado efectuar un modelamiento (p. Ej. aplicando ODIRMO) detallado de los cambios morfológicos (predicción de niveles de fondo) y del proceso de transporte de sedimentos en la cuenca baja del río Piura (se efectuará posteriormente, motivo de investigación), y se ha efectuado una aproximación general, clara y concreta. Lo más interesante al identificar algunas causas del proceso de erosión es la posibilidad de predicción de los efectos que tendría la continuación del proceso en el futuro. No existe razón para suponer que el proceso de erosión a modo de giro con respecto a la progresiva km 28+000 haya finalizado. Al contrario, es probable que en futuras avenidas el proceso siga progresando. La consecuencia que esto suceda, es la acentuación de la erosión en los 28 km encauzados del río Piura, con el consiguiente aumento del riesgo para las cimentaciones de los diques, de los puentes y de todas las obras en el cauce del río. Existe, afortunadamente, la posibilidad de que aparezcan en ese proceso controles de erosión, ya sean naturales (afloramiento de formaciones geológicas duras) o artificiales. En este sentido el sifón en el km 9.4 y la alcantarilla en el km 29+000, son ejemplos de esos controles. El perfil probable a partir de allí sería escalonado.

Siguiendo el criterio cualitativo de Lane [15, 17, 31], es decir, que el cociente entre la pendiente y la raíz cuadrada de la anchura permanece constante, y suponiendo que las características del río aguas abajo del encauzamiento significan las características naturales con un ancho de aproximadamente 4000 m y una pendiente de 0.052 %, se ha calculado el constante de Lane con $0.052/\sqrt{4000}$ a 8.22×10^{-4} . Tomando en cuenta que la anchura promedio entre los diques en el tramo encauzado es de 600 m aproximadamente, se calculó la pendiente futura a 0.020 % ($\sqrt{600} \times 8.22 \times 10^{-4}$), que da una erosión general futura en el punto de control del sifón de aproximadamente 1.00, en comparación al estado actual con una pendiente de 0.025 %. Comparando con las erosiones anteriores que se basan en los datos de levantamientos topográficos, se puede apreciar que el valor calculado para la erosión general futura, alrededor del sifón, de poco menos de 1.0 m parece adecuado.

Tabla 10.- Estimación de la erosión para las avenidas estudiadas.

Año	Pendiente calculada* [%]	Cota del fondo en el lugar del Sifón** [m]	Diferencias en las Cotas [m]	Observación
1979	0.038	7.98	-	antes 1982/83
1997	0.029	6.09	1.71	entre 1982/83 y 1997/98
2000	0.025	5.25	0.76	después 1997/98
Futuro	0.020	4.20	0.95	-

* Estimación según Lane.

** Cota relativa a la progresiva km 28+000.

Sin embargo, existieron grandes incertidumbres en los datos de base, en la ecuación aplicada y, en consecuencia, en los resultados de la aproximación; por lo tanto, se recomendó aplicar un factor de seguridad relativamente alto de 2.0, que da una erosión general

de aproximadamente 2.0 m alrededor del sifón, y que significa una pendiente futura del cauce principal de aproximadamente 0.015 % entre el sifón (progresiva km 9+000) y el inicio del tramo de equilibrio que ha sido identificado alrededor de la progresiva km 28+000.

9. REALINEAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL INFERIOR

El cauce principal inferior del río dispone de un gran ancho de 3 a 4 km en promedio, debido a la ubicación de los diques de defensa en el tramo entrelazado del río, aproximadamente a partir de la sección 68 (progresiva km 32+400). Este ancho tiene algunas ventajas con respecto al tirante del flujo que es bajo, y que influye favorablemente en las cotas del pelo de agua en el tramo encauzado. Sin embargo, también tiene la desventaja de bajas velocidades y en consecuencia la sedimentación en las llanuras de inundación como explicado en los acápite 3, 6 y 7. La sedimentación afecta directamente la

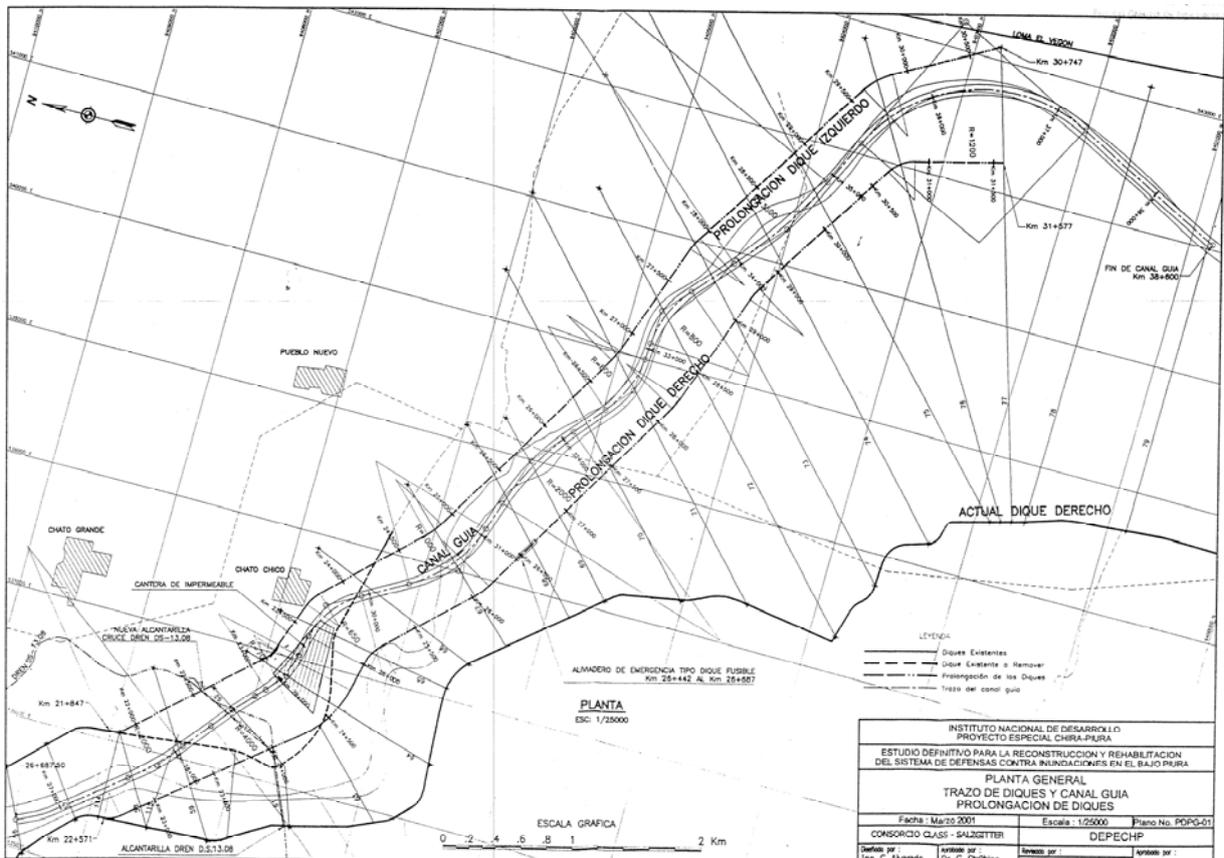


Figure 25.- Abajo, realineamiento del cauce principal inferior y “prolongación” de diques de defensa contra inundaciones del Bajo Piura previsto año 2001. Arriba, realineamiento del cauce principal ejecutado en el año 2006.

capacidad hidráulica de este tramo, y conducirá en el futuro a un remanso hacia aguas arriba, que dará lugar a la sobre-elevación continua de los diques de defensa existentes para proteger adecuadamente las áreas aludidas externas. Para mejorar las condiciones de flujo y evitar en lo posible la sedimentación continua aguas abajo y controlar efectivamente la erosión, se evaluaron varias opciones como sobre-elevación, prolongación de los diques, desvío del cauce existente a su cauce original hasta realineamiento del cauce existente, considerando: criterios de caudal de diseño, medidas de seguridad contra desbordamiento, caudal de diseño del cauce principal, longitud de prolongación de diques y ancho del encauzamiento. De hecho cada opción impacta de una u otra manera desde socio-económicamente como ambientalmente (p. Ej. desaparición del complejo lagunar) en el área. De las opciones evaluadas se recomendó aquella, ver Figura 25, que propone el desarrollo del encauzamiento en fases, ventajas en el mejoramiento de las condiciones hidráulicas existentes en la parte inferior del tramo encauzado y óptimos costos de implementación.

9. CONCLUSIONES

Se han evaluado detalladamente las causas y efectos futuros de las medidas de control de agradación-degradación, concluyéndose principalmente:

- En el tramo entre la salida de la ciudad de Piura (progresiva km 5+037) hasta un poco aguas arriba del fin del encauzamiento (aprox. alcantarilla Dren 13.08, progresiva km 28+000) predomina el proceso de erosión. Sin embargo, se puede observar sobre las llanuras en algunas zonas, que existe sedimentación. La erosión en ese tramo tiene el efecto, que la pendiente del fondo del cauce baja, de manera que en la cercanía de la alcantarilla, el fondo mantiene su cota mientras la pendiente más suave se desarrollaría de este lugar hacia aguas arriba.
- La pendiente actual en este tramo tiene un valor de aproximadamente 0.025%. En base del criterio de Lane se ha apreciado que la futura pendiente debido a la erosión general tendría aproximadamente un valor de 0.020 %. En vista que las aproximaciones efectuadas tienen una gran incertidumbre, se recomienda tomar en cuenta un margen de seguridad de 2.0 m, cuya aplicación significa una pendiente futura de 0.015 %.
- En vista que existe actualmente una sección fija en el cauce, es decir, la erosión general regresiva es controlada en el lugar del sifón en la progresiva ~ km 9+000. El cambio futuro de la pendiente significa una erosión aproximada del fondo del cauce en este lugar de 2 m. Con el fin de reducir este valor, se recomendó instalar en la zona del puente Independencia (progresiva km 21+000) una sección de control adicional, con la protección de fondo debido a la socavación en la zona de pilares. Con esta medida se obtienen en las secciones de control los valores futuros de profundización del fondo del cauce de la Tabla 11.
- La mayor parte de los sedimentos se decantan en el área del tramo entrelazado del río, que significa una sobre-

Tabla 11.- Estimación de la erosión para las avenidas estudiadas.

Lugar	Profundización* debido a la erosión general	
	Pendiente 0.020 % (sin consideración del factor de seguridad) [m]	Pendiente 0.015 % (con consideración del factor de seguridad) [m]
Sifón, Progresiva km 9+000	~ 0.60	~ 1.20
Puente Independencia, progresiva km 21+000	~ 0.40	~ 0.70

* Relación con cotas actuales del fondo estimado con pendiente de 0.025 %.

elevación promedio del terreno natural de aproximadamente 0.75 m por un evento de la magnitud de 1997/98. En vista de la capacidad hidráulica de descarga reducida en esta zona debido a la sedimentación futura posible, la sedimentación, si continúa, tiene influencia en las condiciones hidráulicas en el tramo encauzado. Para evitar la influencia desfavorable, se recomendó efectuar el realineamiento del cauce principal inferior, ver acápite 9.

De los Autores y Agradecimiento: Los autores César Alvarado Ancieta (2000-2002) y Bernd Ettmer (2001) participaron en el estudio de morfología y evaluación hidráulica de la cuenca baja del río Piura en una longitud aproximada de 90 km entre Curumuy (aguas arriba de la presa derivadora Los Ejidos) y laguna La Niña, encargada por el Gobierno Peruano a través del DEPECHP, cuando eran ingeniero de CES Consulting Engineers Salzgitter GmbH (1995-2002) e ingeniero en doctorado del Instituto Leichtweiß de Obras Hidráulicas (1999-a la fecha) respectivamente. Los autores agradecen muy especialmente al jefe del proyecto y destacados profesionales en su oportunidad: Dr.-Ing. Gerd Strübing (Alemania), Ing. Rodolfo Rothgiesser (Perú), Dr. Juan Pedro Martín-Vide (España), Dr. Wolfgang Trau (Alemania), Dr. Ulrich Maniak (Alemania), Ing. Eduardo Zegarra (Perú) por el gran trabajo en equipo.

APÉNDICE I. REFERENCIAS

- [1] ALVARADO ANCIETA, C.A. (2002). *Preparing for El Niño - Los Ejidos Diversion Dam Spillway, Peru*. International Water Power and Dam Construction Journal, ISSN 0306-400X, Volume 54, Number 12, pp. 24-29, Kent-United Kingdom.
- [2] ALVARADO ANCIETA, C.A. (2004). *Bed Topography and Scour in Sharp River Bends, and Influence of Bank Protection Works. M.Sc. Dissertation - Thesis HE 179, Vol. 1 & 2*. International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering - IHE-Delft, The Netherlands.
- [3] Asociación SALZGITTER - LAGESA (1979). *Estudio de Control de Avenidas del Río Piura: Diques de Defensa y Encauzamiento del Río Piura*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [4] BREUSERS, H. N. C. - RAUDKIVI, A. J. (1991). *Scouring*. A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield, The Netherlands.
- [5] CLASS - SALZGITTER (2000). *Informe Verificación de la Máxima Avenida del 12.03.98 en Los Ejidos, Estudio de Evaluación de la Presa Derivadora Los Ejidos*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [6] CLASS - SALZGITTER (2000). *Estudio de Evaluación y Afianzamiento de la Presa Derivadora Los Ejidos*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [7] CLASS - SALZGITTER (2001). *Estudio Definitivo para la Reconstrucción y Rehabilitación del Sistema de Defensas contra Inundaciones en el Bajo Piura y Modelo Matemático para Prognosis de Avenidas en Tiempo Real en la Cuenca del Río Piura*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [8] CLASS - SALZGITTER (2002). *Estudio Definitivo de las Obras de Afianzamiento de la Presa Derivadora Los Ejidos*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank - Peru.
- [9] DE VRIES, M. (1973). *River bed variations - aggradation and degradation*. Proc., Int. Seminars of Hydraulics of Alluvial Streams, Int. Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands, 1-10.
- [10] DE VRIES, M. (1985). *Engineering Potamology - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
- [11] ENERGOPROJEKT (1983). *Estudio Definitivo del Proyecto de Rehabilitación del Bajo Piura*. Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-World Bank -

- Peru.
- [12] ETTMER, B. (2004). *Untersuchungen zu Kolkvorgängen hinter dem unterströmten Schütz*. Dr.-Ing. Dissertation. Instituto Leichtweiß de Obras Hidráulicas vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Germany.
 - [13] GARCÍA, M. H. - LAURSEN, E. M. - MICHEL, C. - BUFFINGTON, J. M. (2000). *The legend of A. F. Shields*. J. Hydr. Engng., ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 718-723.
 - [14] GAWEESH, M.T.K. - RAMADAN K.A.H. - KLAASSEN, G.J. (2001). *Sediment Transport in Rivers - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
 - [15] JANSEN, P.Ph. (1979). *Principles of River Engineering - The Non-tidal Alluvial River*. Delftse Uitgevers Maatsschappij, Delft University of Technology - The Netherlands. ISBN 90-6562-146-6.
 - [16] JULIEN, P. Y. (2002). *River mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, ISBN 0 521 56284 8
 - [17] KLAASSEN, G.J. (1995). *Lane's Balance Revisited*. Proc. 6th Intern. Symp. on River Sedimentation, New Delhi - India, pp. 671-686.
 - [18] KLAASSEN, (2001). *Advanced River Dynamics - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
 - [19] KLAASSEN, G.J. - MASSELINK (1992). *Planform changes of a braided river with fine sand as bed and bank material*. 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe, Germany.
 - [20] LAGASSE (1995). *Stream Stability of Highway Structures*. USA.
 - [21] LEICHTWEIß-INSTITUT FÜR WASSERBAU - UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BRAUNSCHWEIG (1984). *Informe N° 564 - Ensayos en Modelo de la Presa Derivadora Los Ejidos - Estudios Hidráulicos del Vertedero*.
 - [22] LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU - UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BRAUNSCHWEIG (1984). *Informe N° 577 - Ensayos en Modelo de la Presa Derivadora Los Ejidos*.
 - [23] MARTÍN-VIDE, J.P. (2002). *Ingeniería de Ríos*. Ediciones UPC, Barcelona - Spain. ISBN 84-8301-563-3.
 - [24] MELVILLE - COLEMAN (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, USA.
 - [25] NEDECO (1973). *Río Magdalena and Canal del Dique Survey Project*. Netherlands Engineering Consultants, The Hague, The Netherlands.
 - [26] SCHRÖDER, W. (1994). *Regularización y Control de Ríos*. Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria. Universidad de Piura - Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología-CONCYTEC, Perú.
 - [27] U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1994). *Channel Stability Assessment for Flood Control Projects*. Engineering and Design Manual EM 1110-2-1418.
 - [28] U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1993). *River hydraulics*. EM N° 1110-2-1416.
 - [29] VAN RIJN, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries, Coastal Seas and Oceans - Lecture Notes*. International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering, IHE-Delft, The Netherlands.
 - [30] YALIN, M. S. - DA SILVA, A. M. (2001). *Fluvial processes*. International Association of Hydraulic Engineering and Research. Monograph. Queen's University, Kingston, Canada.
 - [31] ZANKE, U. (1982). *Grundlagen der Sedimentbewegung*. Berlin, Germany.

Nota: Todas las Figuras y Tablas fueron elaboradas por los Autores.