

ingeniería hidráulica en méxico

Incluida en el ISI y en el Índice de revistas mexicanas de investigación científica y tecnológica, actualización 2006-2007 del Conacyt



Comité Editorial

Luis Aboites Aguilar, El Colegio de México • **Julián Aguirre Pe**, Universidad de Los Andes, Venezuela • **Lawson F.S. Beltrame**, Universidad Federal de Río Grande del Sur, Brasil • **Moisés Berezowsky Verduzco**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Rafael Bras**, Instituto Tecnológico de Massachusetts, EUA • **Nathan Buras**, Universidad de Arizona, EUA • **Enrique Cabrera Marcet**, Universidad Politécnica de Valencia España • **Daniel Francisco Campos Aranda**, profesor jubilado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí • **Adolfo Chávez Rodríguez**, Universidad Autónoma de Chihuahua • **Carlos Cruickshank Villanueva**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Alfonso de María y Campos**, Instituto Nacional de Antropología • **Axel Duorojeanni**, consultor internacional • **José Luis Fernández Zayas**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Marcelo García**, Universidad de Illinois, EUA • **Nahún Hamed García Villanueva**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Simón González**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Rafael Guarga**, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Uruguay • **Anne Hansen Hansen**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Ismael Herrera Revilla**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Peter R. Jaffe**, Universidad de Princeton, EUA • **Andrei S. Jouravlev**, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Chile • **Javier Luján García**, Telefónica, España • **Cristóbal Mateos Iguacel**, Universidad Politécnica de Madrid, España • **Daene McKinney**, Universidad de Texas en Austin, EUA • **Roberto Melville**, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social • **Ciro Menéndez**, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador • **Gabriela Moeller Chávez**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Jacinta Palerm Viqueira**, Colegio de Postgraduados • **Diosdado Pérez Franco**, Centro de Investigaciones Hidráulicas, Cuba • **Manuel Perló Cohen**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Víctor Miguel Ponce**, Universidad de San Diego, EUA • **Carlos Puente**, Universidad de California en Davis, EUA • **Aldo Iván Ramírez Orozco**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **José Raynal Villaseñor**, Universidad de las Américas, Puebla, México • **Luis Rendón Pimentel**, Comisión Nacional del Agua • **Ignacio Rodríguez Iturbe**, Universidad de Princeton, EUA • **Michel Rosengaus**, Comisión Nacional del Agua • **Juan Sagardoy**, consultor internacional • **José D. Salas**, Universidad de Colorado, EUA • **Américo Saldívar**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Daniel Sempere**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Rodolfo Silva Casarín**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Gilberto Sotelo**, Universidad Nacional Autónoma de México • **Serge Léonard Tamari Wagner**, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua • **Leonardo Tijerina Chávez**, Colegio de Postgraduados • **Eduardo Varas**, Pontificia Universidad Católica de Chile • **Juan Pedro Martín Vide**, Universidad Politécnica de Cataluña, España • **Fedro Zazueta**, Universidad de Florida, EUA.

Consejo Editorial

Editor en Jefe

Nahún Hamed García Villanueva
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editora en Calidad del Agua

Blanca Elena Jiménez Cisneros
Universidad Nacional Autónoma de México

Editora en Ciencias Políticas y Sociales

Rosalva Landa Ordaz
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Editor en Gestión del Agua

Carlos Fernández-Jáuregui
Organización de las Naciones Unidas

Editor en Hidráulica

Felipe I. Arreguín Cortés
Comisión Nacional del Agua

Editor en Hidrología de Superficie

Carlos Escalante Sandoval
Universidad Nacional Autónoma de México

Editor en Hidrología Subterránea

Fco. Javier Aparicio Mijares
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Editor en Innovación Científica y Tecnológica en Materia de Agua

Polioptró F. Martínez Austria
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Secretario Técnico

Jorge Martínez Ruiz
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación editorial y cuidado de edición

Helena Rivas López

Responsable de logística del proceso de arbitraje y comercialización

Marco Antonio Bonilla Rincón

Asistencia editorial y formación

Luisa Guadalupe Ramírez Martínez

Ilustraciones

Luisa Guadalupe Ramírez Martínez y Rosario Castro Rivera

Apoyo editorial

Antonio Requejo del Blanco

Corrección de textos en inglés

Emilio García Díaz

Negativos e impresión: Organización Impresora y Editora, S.A. de C.V.

Ingeniería hidráulica en México, segunda época, se publica y distribuye trimestralmente. Constituye la continuidad de las revistas *Irrigación en México*, que empezó a publicarse en 1930; *Ingeniería hidráulica en México*, que en 1947 sustituyó a la anterior, y *Recursos hidráulicos*, que se publicó de 1972 a 1978. Editada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Comunicación, Participación e Información, Subcoordinación de Vinculación, Comercialización y Servicios Editoriales. El tiraje consta de 1 000 ejemplares, incluyendo los de reposición. Se permite la reproducción total o parcial, siempre y cuando se mencione esta fuente y se envíe a esta redacción un ejemplar de la publicación. Toda correspondencia deberá dirigirse a **Ingeniería hidráulica en México**, Paseo Cuauhnáhuac núm. 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550, México. Teléfono: + (52) (777) 329 3670 o 329 3600, extensiones 605 y 532, fax: + (52) (777) 329 3670. Suscripción por dos años: \$400.00, nacional y 100 dólares americanos, extranjero; por cinco años: \$800.00, nacional. Números atrasados: \$50.00, nacional y 20 dólares americanos, extranjero. El precio incluye gastos de envío y manejo. Registros legales: © Derechos reservados. Reserva de derechos al uso exclusivo: 04-1998-102015525300-102. Certificado de licitud de título 2806. Certificado de licitud de contenido 2528. ISSN-0186-4076. Impresa en México en los talleres de Organización Impresora y Editora, S.A. de C.V. **NOTA:** la responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a los autores y no necesariamente refleja la postura del Consejo Editorial.

Contenido

Artículos técnicos

Agradación y degradación del río Piura - realineamiento del cauce principal inferior, fenómeno El Niño, Perú
César Adolfo Alvarado-Ancieta
Bernd Eittner

Retención de arsénico en embalses: el caso del río Elqui, Chile
Gonzalo Galleguillos
Jorge Oyarzún
Hugo Maturana
Ricardo Oyarzún

Modelo hidrológico-agronómico-económico para la operación óptima del sistema de presas del río Yaqui, usando algoritmos genéticos
José Luis Minjares-Lugo
Roberto Fernando Salmón-Castelo
Lucas Antonio Oroz-Ramos
Isidro Roberto Cruz-Medina

Alteración que presenta la distribución de sedimentos en una bifurcación de un río de planicie debido a cambios morfológicos inducidos. Estudio de campo
Fabián Rivera-Trejo
José Manuel Vázquez-Rodríguez
Juan de Dios Mendoza-Palacios
Maximiano Estrada-Botello
Gabriel Soto-Cortés

Predicción de la resistencia al flujo en ríos de montaña
Raúl López-Alonso
Javier Barragán-Fernández
Ma. Angels Colomer-Cugat

Estudio de la cuña salina: río Pánuco, México
Gabriel Arcos-Espinosa
Raúl Medina-Santamaría
Fernando J. Méndez-Incera
Sergio B. Jiménez-Hernández

Cuantificación del escurrimiento y erosión hídrica en andosoles de una microcuenca experimental en Valle de Bravo
David Viramontes
Michel Esteves
Luc Descroix
Celine Duwig
Fernando Rojas-Rojas
Alfonso Gutiérrez
Benjamín de León-Mojarro

Modelación estocástica del consumo doméstico de agua potable, empleando el esquema de Neyman-Scott
Victor Hugo Alcocer-Yamanaka
Velitchko Tzatchkov
Rafael García-Bartual
Steven Buchberger
Felipe I. Arreguín-Cortés
Telly León-Rodríguez

Influencia del grado de discretización espacial en la respuesta hidrológica de una cuenca de llanura mediante modelación matemática distribuida
Hernán Roberto Stenta
Gerardo A. Riccardi
Pedro A. Basile

Eliminación de cromo (III) y cadmio (II) mediante el uso de un bio-reactor utilizando *Scenedesmus obliquus* inmovilizado
Alexis Pellón
María del Carmen Espinosa
Rosa O. Cañizares
Julio Frades
Anaelsis Chacón
Elsa Pérez
Antonio Oña
Caridad Ramos-Alvaríño
Rogelio Mayarí
Rigoberto Escobedo

Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo
Javier Paredes-Arquiola
Abel Solera-Solera
Joaquín Andreu-Álvarez

Análisis del filtro instalado en la presa El Batán, Querétaro
José Raúl Flores-Berrones
Xiangyue Li-Liu

Fechas de inicios y terminación de la temporada de lluvias en la región Pacífico Norte
Fernando García-Páez
Isidro Roberto Cruz-Medina

Discusión

Guía para colaboradores

Contents

Technical articles

Aggradation and degradation of Piura River - Realignment of the main lower riverbed, El Niño phenomenon, Peru
César Adolfo Alvarado-Ancieta
Bernd Eittner 5

Arsenic capture in dams: the Elqui River case, Chile
Gonzalo Galleguillos
Jorge Oyarzún
Hugo Maturana
Ricardo Oyarzún 29

Hydrologic-agronomic-economic model for the optimal operation of the Yaqui River reservoir system using genetic algorithms
José Luis Minjares-Lugo
Roberto Fernando Salmón-Castelo
Lucas Antonio Oroz-Ramos
Isidro Roberto Cruz-Medina 37

Sediment distribution alteration in a plain river bifurcation due to induced morphological changes. A field study
Fabián Rivera-Trejo
José Manuel Vázquez-Rodríguez
Juan de Dios Mendoza-Palacios
Maximiano Estrada-Botello
Gabriel Soto-Cortés 49

Flow resistance estimation in mountain rivers
Raúl López-Alonso
Javier Barragán-Fernández
Ma. Angels Colomer-Cugat 65

Study of the salt wedge of the Pánuco River, Mexico
Gabriel Arcos-Espinosa
Raúl Medina-Santamaría
Fernando J. Méndez-Incera
Sergio B. Jiménez-Hernández 77

Quantification of runoff and erosion in an experimental andosol watershed in Valle de Bravo
David Viramontes
Michel Esteves
Luc Descroix
Celine Duwig
Fernando Rojas-Rojas
Alfonso Gutiérrez
Benjamín de León-Mojarro 89

Stochastic modeling of residential drinking water demand using the Neyman-Scott scheme
Victor Hugo Alcocer-Yamanaka
Velitchko Tzatchkov
Rafael García-Bartual
Steven Buchberger
Felipe I. Arreguín-Cortés
Telly León-Rodríguez 105

Influence of the spatial discretization degree on the hydrological response of a flatland watershed through distributed mathematical modeling
Hernán Roberto Stenta
Gerardo A. Riccardi
Pedro A. Basile 123

Use of a reactor for the removal of chromium and cadmium with immobilized Scenedesmus obliquus
Alexis Pellón
María del Carmen Espinosa
Rosa O. Cañizares
Julio Frades
Anaelsis Chacón
Elsa Pérez
Antonio Oña
Caridad Ramos-Alvaríño
Rogelio Mayarí
Rigoberto Escobedo 139

Operation rules for multireservoir systems combining heuristic methods and flow networks
Javier Paredes-Arquiola
Abel Solera-Solera
Joaquín Andreu-Álvarez 151

Analysis of the filter installed in the El Batán Dam, Querétaro
José Raúl Flores-Berrones
Xiangyue Li-Liu 165

Onset and end dates of the rainy season in the North Pacific Region
Fernando García-Páez
Isidro Roberto Cruz-Medina 179

Discussion

Contributor's guide 189

191

Agradación y degradación del río Piura - realineamiento del cauce principal inferior, fenómeno El Niño, Perú

César Adolfo Alvarado-Ancieta

ILF Beratende Ingenieure ZT Gesellschaft mbH, Austria

Bernd Ettmer

Escuela Técnica Superior-Hochschule Magdeburg-Stendal, Alemania

La erosión de la cubierta vegetal en la cuenca alta acompañada del fenómeno El Niño altera los regímenes hidrológicos y de transporte de sedimentos en el río Piura, en el extremo norte de 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, lo cual significa tener que adoptar medidas de mitigación para 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 eficaz comprensión de los procesos morfológicos que envuelven el ajuste de la geometría del cauce y de las condiciones de equilibrio proyectadas. El objetivo de esta investigación fue 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.

Palabras clave: Perú, río Piura, morfología de ríos, encauzamiento, erosión/sedimentación, agradación/degradación, transporte de sedimentos.

Introducción

El río Piura, perenne, pero con periodos irregulares y efímeros, posee una cuenca deficitaria con una área superior a los 12 000 km² profundamente alterada por la acción humana, lo cual ha modificado en forma constante la morfología del río. Es uno de los dos ríos en el área de influencia de la región Piura, 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 ambos 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 de que la salida principal del río era en aquella dirección. En el transcurso del siglo pasado, la presión agrícola obliga a 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 aquel 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 Chipilllico, 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 (ilustraciones 1 y 2).

Entre 1972 y 1973 ocurren inundaciones debido al evento extraordinario de El Niño y se registran roturas en diques de mediano tamaño que son reforzados hacia 1976, con la planificación del proyecto Chira-Piura en su primera fase. Posteriormente, alrededor de 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, se alargan estos diques confortantes del sistema de defensa contra inundaciones del Bajo Piura, y por ello muestran algunas singularidades en su planta del alineamiento actual del río Piura.

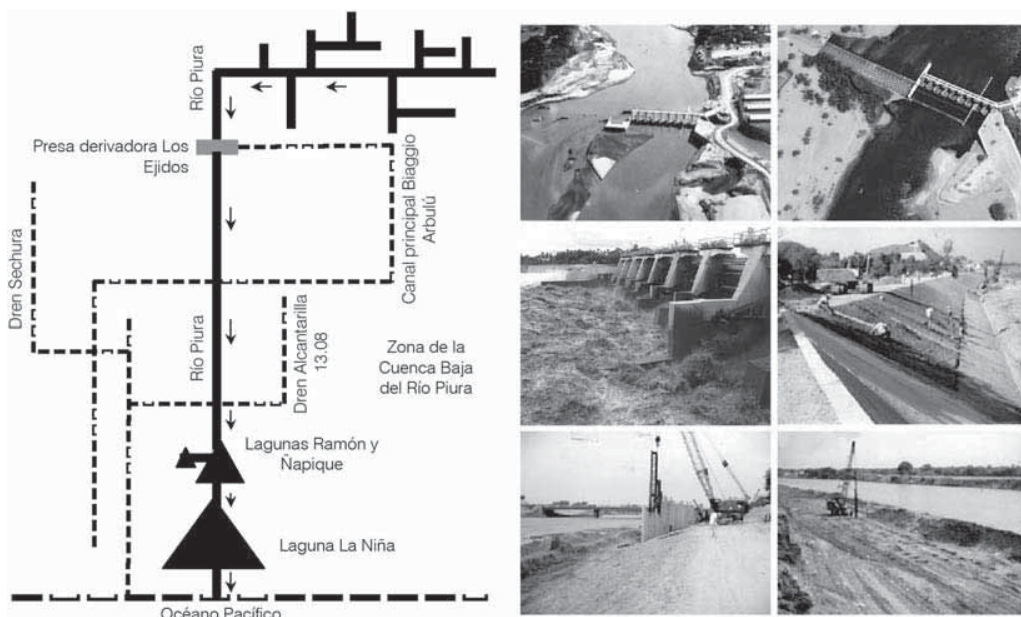
Con el inicio de la segunda etapa del proyecto Chira-Piura, entre 1981 y 1985, se ejecutan los diques de encauzamiento actuales, con un distanciamiento entre ellos de 500 a 800 m, así como la construcción de la presa derivadora Los Ejidos, obras prácticamente concluidas en 1982.

El fenómeno de El Niño hace su aparición entre 1982 y 1983; se producen roturas y la destrucción total de aproximadamente 15 km de diques y la destrucción del

Ilustración 1. Vista por satélite 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©).



Ilustración 2. Izquierda, esquema hidráulico de la cuenca del río Piura. Derecha, arriba, colapso del vertedero fijo (El Niño, 1983) de la presa derivadora Los Ejidos en el río Piura, y presa actual (Fuente: Google Earth 2007©). Derecha, centro, tránsito de avenida máxima registrada (El Niño, 1998). Centro y abajo, construcción del sistema de protección contra inundaciones en el tramo que el río Piura atraviesa el área urbana (revestimiento de taludes de concreto después del fenómeno de El Niño, 1983).



aliviadero fijo de la presa Los Ejidos en mayo de 1983, además de la erosión de las márgenes de una importante longitud del río a orillas de la ciudad, que en aquel entonces no se encontraba protegida, como en la actualidad, por taludes revestidos de concreto y más bien se conformaba de diques de materiales sueltos (ilustración 2).

En ese tiempo, la falla del dique derecho por socavación de su pie en una sección localizada 2.5 km aguas arriba de una obra de cruce denominada 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.

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 falla.

Entre 1998 y 1999, nuevamente hace su aparición el fenómeno 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 (ilustración 3), habiéndose estimado dos años más tarde que en aquella oportunidad transitó una avenida inferior a los 3 200 m³/s (Leichtweiß-Institut, 1984a, 1984b; Alvarado, 2002; Class-Salzgitter, 2000a, 2000b, 2001, 2002).

Estos sucesos, que implican aprender a convivir con eventos extraordinarios producidos por el fenómeno El Niño, llevaron, entre los años 2000 y 2001, a una evaluación del sistema de defensas contra inundaciones del río Piura, en donde se investigaron 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, así como la formulación de la rectificación o realineamiento del trazo del río en el tramo final sin encauzar mediante un canal guía, que ha sido ejecutado a fines del año 2006 (ilustraciones 16 y 18) 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.

Características morfológicas del río Piura

Generalidades

Principalmente se distinguieron dos tramos a lo largo del cauce de la cuenca baja del río Piura:

- a) 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 el km 0+000 y el km 33+300) e incluye la zona urbana de Piura/Castilla (ilustraciones 3, 4 y 5), 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.
- b) 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 km (progresivas entre el km 33+300 y el 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 de 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 periodos 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).

Con base en la información topográfica disponible del *thalweg* del río, se determinaron los diferentes tramos indicados (ilustraciones 16 y 17).

Tramo del cauce entre la salida urbana y la terminación del encauzamiento de las dos márgenes

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 (1957), 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 1982-1983 y 1997-1998). 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 con los levantamientos

Ilustración 3. Río Piura. Arriba, izquierda y derecha, colapso del puente San Miguel o puente Viejo (El Niño, 1998). Centro, izquierda y derecha, vista de las protecciones de talud de concreto en el tramo donde el río atraviesa el área urbana (2001) y nuevo puente Bolognesi (2006). Abajo, izquierda, tramo comprendido desde la presa derivadora Los Ejidos hasta el ingreso a la ciudad de Piura, en el puente Cáceres. Abajo, derecha, vista del río Piura de aguas arriba hacia aguas abajo (Fuente: Google Earth 2007©).

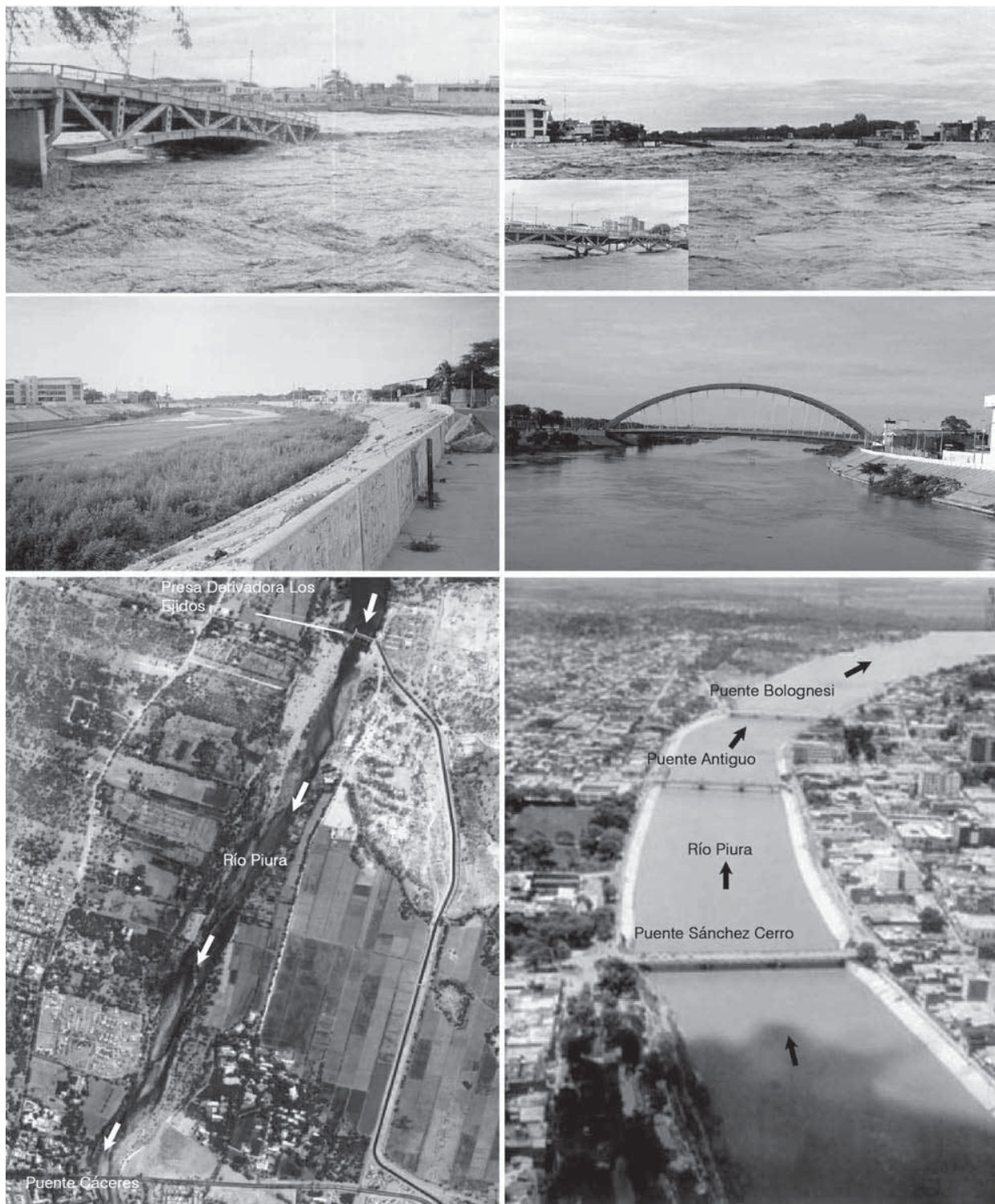


Ilustración 4. Río Piura. Arriba, izquierda, aguas arriba, colapso del puente San Miguel o puente Viejo; aguas abajo, colapso del puente Bolognesi en el tramo donde el río atraviesa la ciudad de Piura (El Niño, 1998). Arriba, derecha, colapso del puente Independencia, ubicado en el área rural de Piura. Abajo, izquierda, encauzamiento con protección de taludes revestidos de concreto en el tramo donde el río cruza la ciudad de Piura. Abajo, 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. Ilustraciones inferiores a similar escala (Fuente: Google Earth 2007©; Alvarado, 2004).



Ilustración 5. Singularidades del encauzamiento del río Piura mostrando las zonas de falla de los diques derecho e izquierdo durante las máximas avenidas de los fenómenos 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.



efectuados, se determinó una longitud promedio de los meandros de 3 900 m, con una variación de 4 600 m en el primer meandro que se presentó después del puente Bolognesi y de 2 800 m en el último tramo del río encauzado.

La amplitud de los meandros varía entre 280 y 560 m hasta el puente Independencia. Si se considera hasta el cruce de la alcantarilla del Dren Alcantarilla 13.08 se obtiene un promedio de 370 m. Según Leopold-Wolman (1957), las amplitudes de los meandros deberían ser en estado natural de aproximadamente 1 500 m, mientras que el encauzamiento no permite valores mayores que cercanos de 560 metros.

Perfil longitudinal

Desde el punto de vista de pendientes promedio, determinadas con base en la información obtenida de

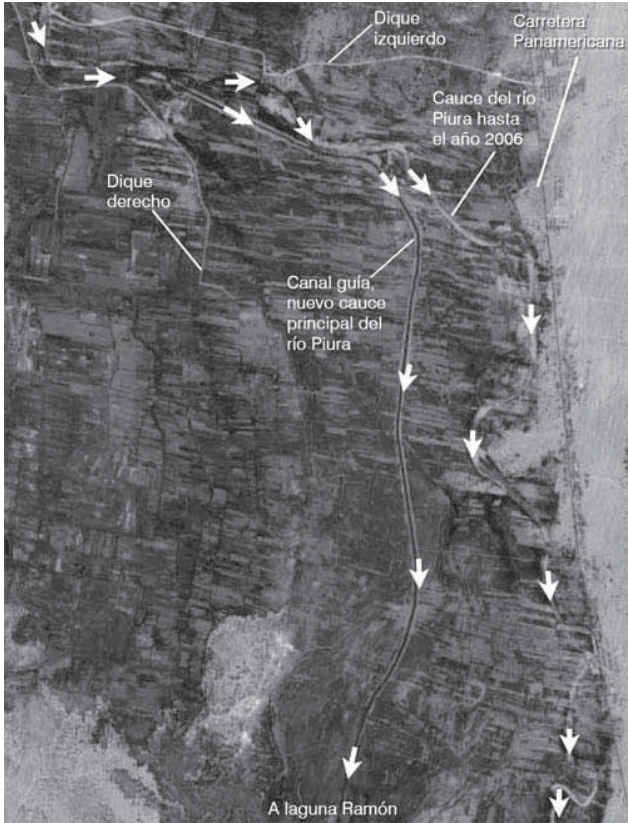
los levantamientos de las secciones transversales del año 2000, para el tramo encauzado del río se observaron dos tramos con una pendiente promedio que casi no difiere:

- Tramo km 0+114 a km 20+657 (Los Ejidos-puente Independencia), pendiente de $s = 0.022\%$ (ilustraciones 3, 4 y 16).
- Tramo km 20+657 a km 33+300 (puente Independencia-4.4 km aguas abajo cruce de alcantarilla del Dren Alcantarilla 13.08), pendiente de $s = 0.020\%$ (ilustraciones 4, 5 y 16).

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

Ilustración 6. 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©).

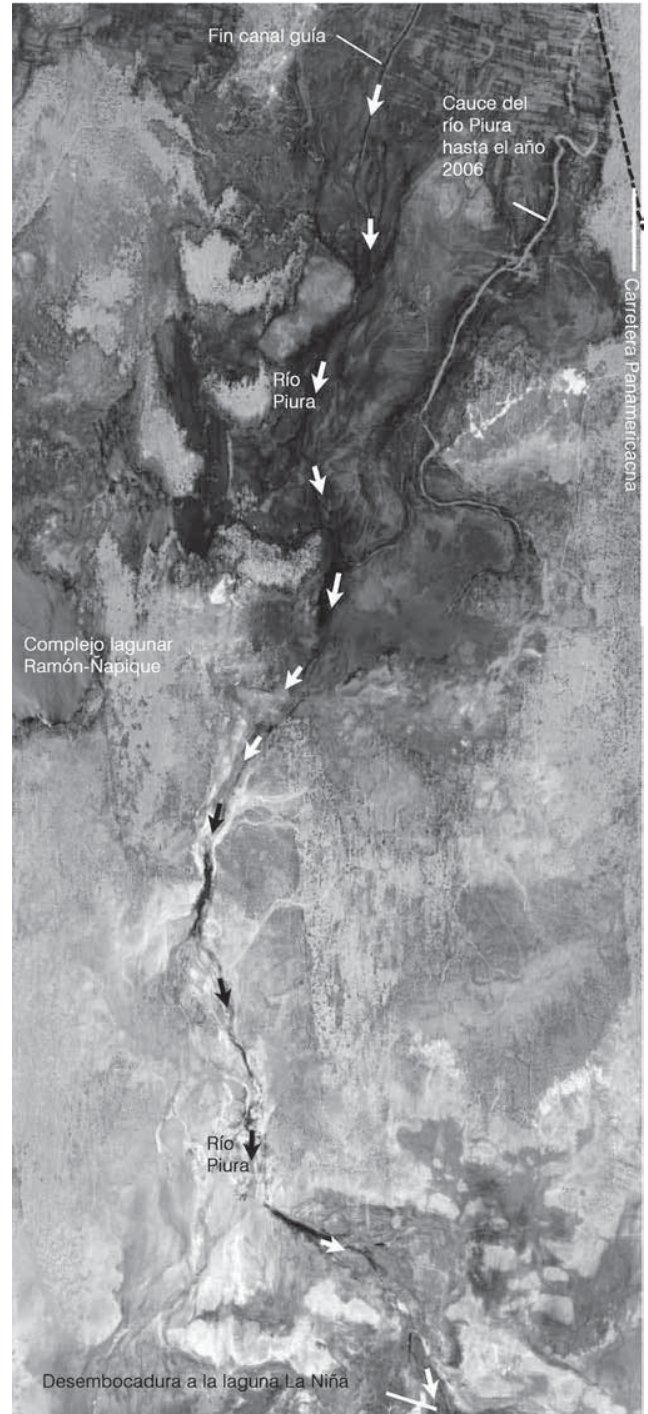


correspondiente al techo de la losa de concreto de 18.40 msnm, impide la erosión continua del cauce. La superficie del concreto forma hoy día el fondo del cauce.

- 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 msnm, que corresponde aproximadamente a la cota del fondo del río en ese tramo (ilustración 5).

A partir de la información topográfica disponible del *thalweg* del río de los años 1979 y 2000 (Salzgitter-Lagesa, 1979; Class-Salzgitter, 2000a, 2000b, 2001, 2002), además de la obtenida en el año 1997, es que el río Piura, desde Los Ejidos hasta aproximadamente 4 900 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 (ilustraciones

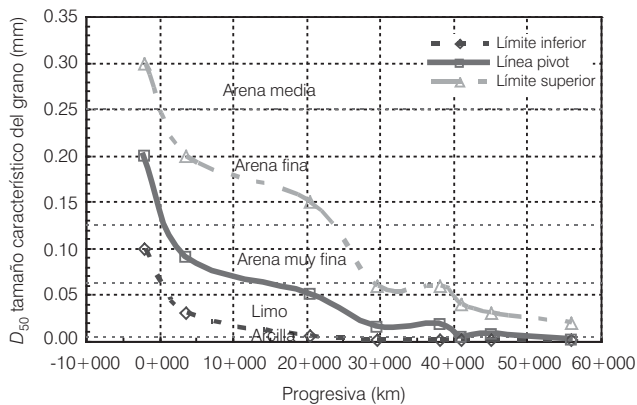
Ilustración 7. Izquierda, cauce del río Piura después de su realineamiento mediante el canal guía, atravesando el complejo lagunar Ramón-Napique y hacia la laguna La Niña. Derecha, tramo final del río Piura comprendido entre el complejo lagunar Ramón-Napique y su desembocadura en la laguna La Niña (Google Earth 2007©).



16 y 17), 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.

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

Ilustración 8. Función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} .



m. La sedimentación en el tramo inferior llega a un promedio de 0.70 metros.

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 de la construcción de la presa derivadora Los Ejidos, en donde se profundizó el fondo del cauce natural en aproximadamente 3 m (ver la sección titulada "Distribución de los sedimentos a lo largo del río").

Anchura del encauzamiento y secciones transversales del cauce

De acuerdo con las condiciones existentes después de la construcción de las defensas del río Piura, aguas abajo

Ilustración 9. Diagrama de Hjulström, velocidad crítica promedio para las muestras de sedimentos tomadas a lo largo del río Piura, estimado para avenida de 3 200 m³/s.

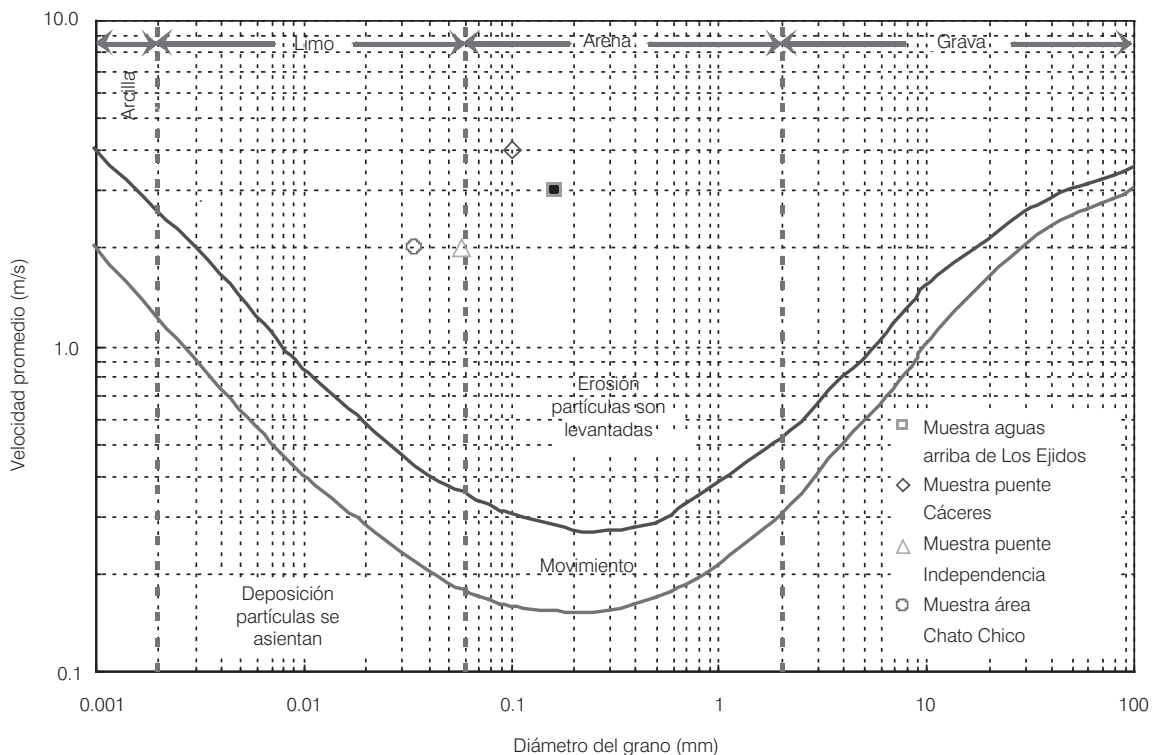
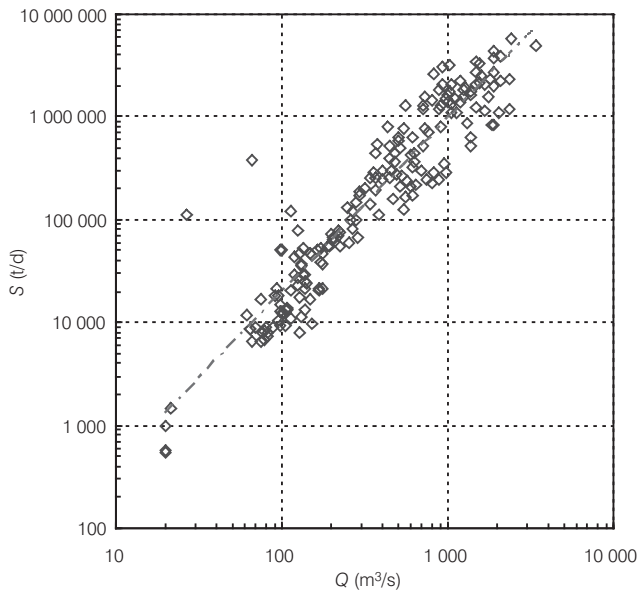


Ilustración 10. Ploteo de tasa de sedimentos en suspensión y caudales en el río Piura para los periodos de avenidas, El Niño, de 1973, 1983 y 1998, entre los meses de febrero y abril, estimados con base en la avenida de 1983 y medida en el puente Piura.



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 del puente Bolognesi, donde el ancho inicial es de 135 m, para continuar en una ampliación de 1 km de longitud hasta alcanzar un ancho de 600 m, ese ancho se mantiene aproximadamente hasta el sifón de cruce del canal "Biagio Arbulú" del Bajo Piura, donde se produce un estrechamiento que alcanza los 310 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 280 m. Además de los pilares del puente, se encuentra interferido el cauce por ocho 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 y 750 m hasta la alcantarilla de cruce del Dren 13.08, donde disminuye el ancho a 450 m, para luego abrirse nuevamente en un ancho de 800 a 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 ilustraciones 3 y 4 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 (ilustración 16) 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 (ilustración 3). El cauce principal tiene un ancho de entre 100 y 200 m, pero con una gran variación; no hay vegetación significativa, mientras que en las terrazas la vegetación es copiosa; en la mayoría de su longitud, éstas tienen desarrollo agrícola.

El cauce menor tiene en ese tramo una capacidad de descarga de entre 100 y 250 m³/s, sin inundar la terraza baja, y a partir de caudales de aproximadamente 800 a 1 000 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, las orillas no son muy altas y tienen taludes más tendidos (ilustración 4).

En esta zona, el cauce menor tiene una capacidad de descarga de aproximadamente 80 a 100 m³/s sin formar brazos, siendo la profundidad menor que en el tramo anterior; pero a partir de caudales de 300 a 500 m³/s, ambas márgenes del cauce son inundadas hasta el pie de los diques.

Tramo del cauce entre la terminación del encauzamiento y la desembocadura a la laguna La Niña

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 (ilustración 6). Esa observación cumple, según Lane (1957), en que el río se encuentra en la parte intermedia entre ríos meandriformes y entrelazados.

Ilustración 11. 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.

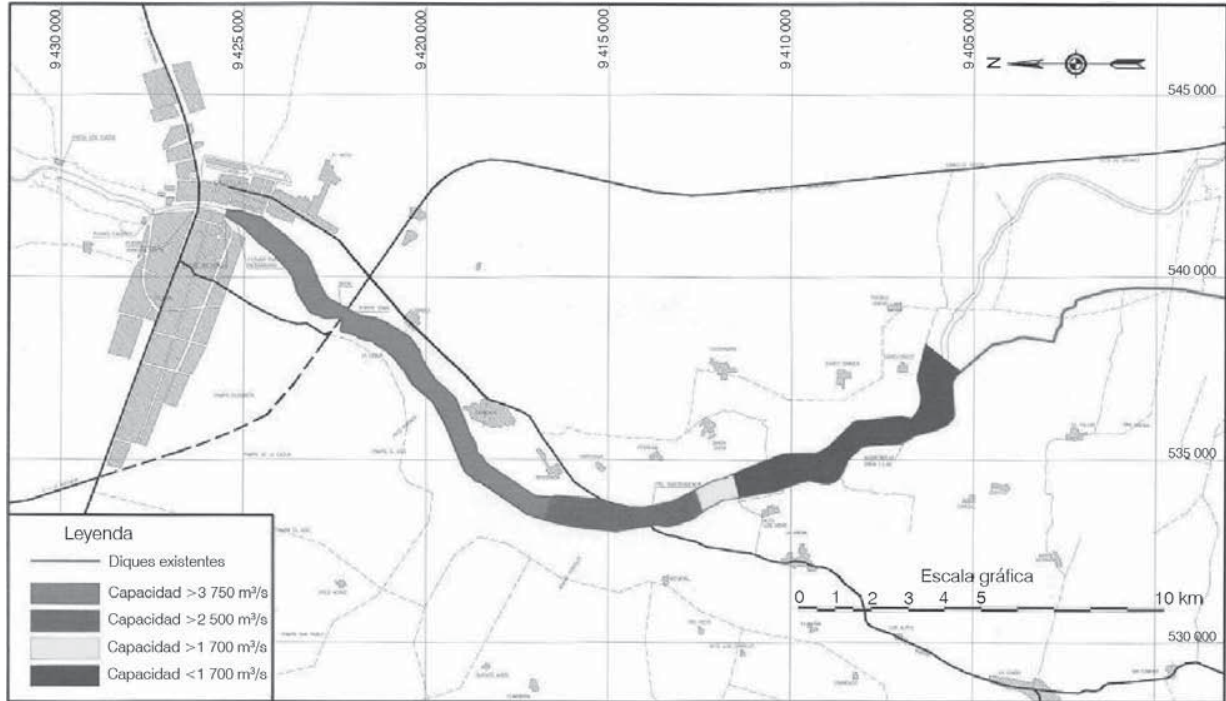
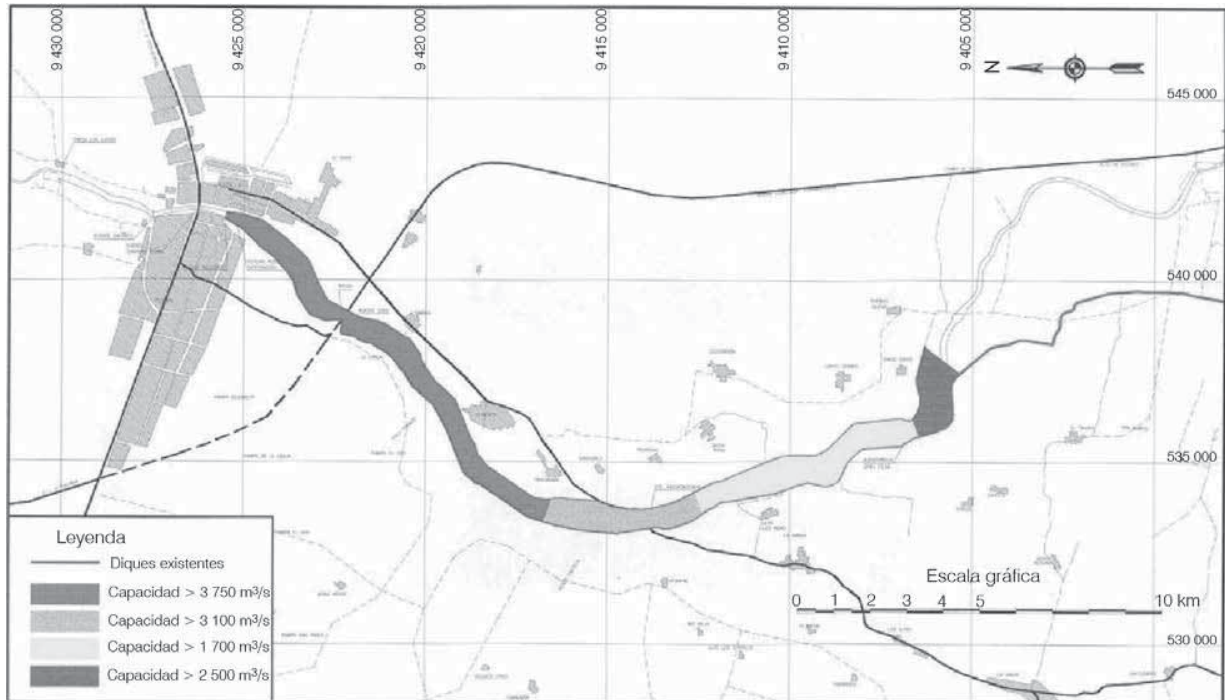


Ilustración 12. Capacidad de descarga del cauce del río Piura sin desbordamiento de diques, tramo entre el puente Bolognesi y el fin del encauzamiento posterior a la rehabilitación proyectada en el año 2000-2001.



Durante el periodo de estiaje, la mayoría de los cauces están secos y se activan sólo en el periodo de avenidas. Debido a que la capacidad hidráulica del cauce principal y los secundarios es pequeña, el flujo

durante el periodo de avenidas alcanza inmediatamente las orillas e inunda amplias áreas.

En la zona del complejo Ramón/Ñapique continúa la forma entrelazada. Debido a la pequeña pendiente en esa zona (ilustración 6), 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 msnm, 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.

Ilustración 13. Estabilidad contra erosión en el cauce principal-tramo comprendido entre la presa derivadora Los Ejidos y la ciudad de Piura.

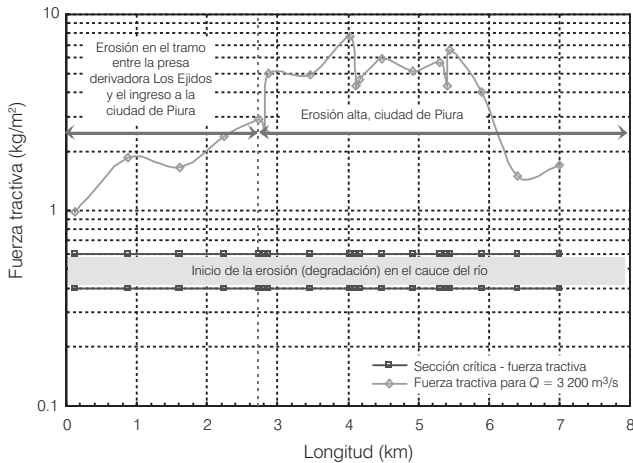


Ilustración 14. Velocidad del flujo en el cauce principal y áreas de inundación en la cuenca baja del río Piura para un caudal de 3 100 m³/s.

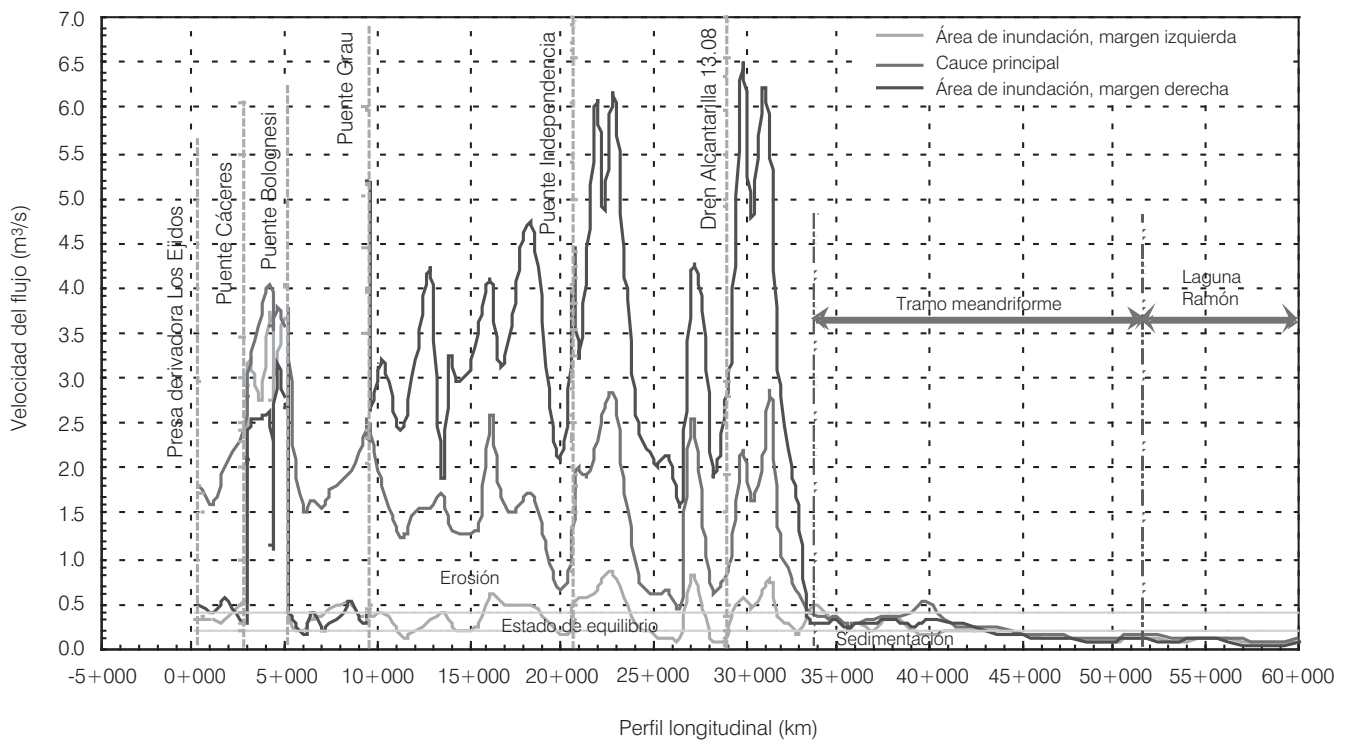
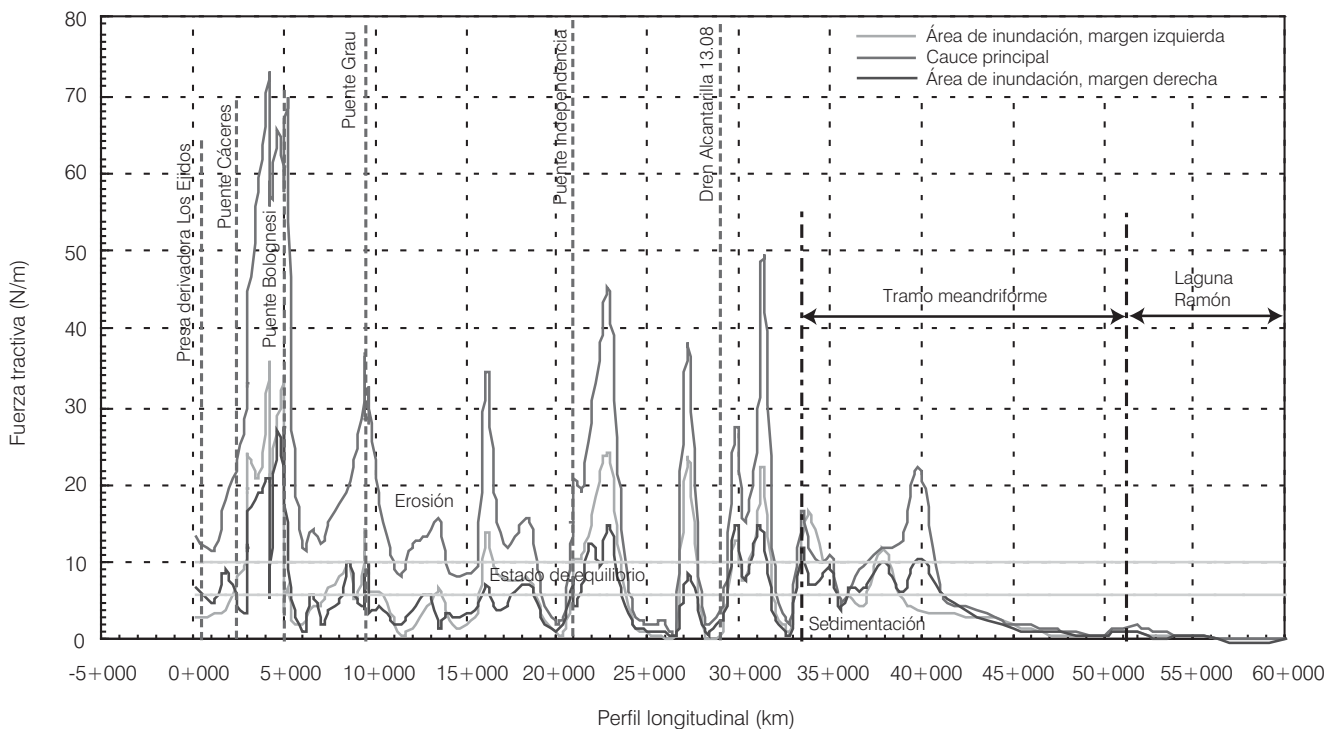


Ilustración 15. Fuerza tractiva en el cauce principal y áreas de inundación en la cuenca baja del río Piura para un caudal de 3 100 m³/s.



Perfil longitudinal

Con base en 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 $s = 0.048\%$ (ilustración 6).
- Tramo km 50+700 a km 59+800 (sin encauzamiento, cauce predominante), pendiente de $s = 0.012\%$ (ilustración 7).
- Tramo km 59+800 a km 71+800 (sin encauzamiento, cauce predominante), pendiente de $s = 0.042\%$ (ilustración 7).

Mientras que la pendiente en las lagunas es casi horizontal, las pendientes en el tramo aguas arriba del complejo lagunar Ramón/Napique 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, incluso 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 (ilustraciones 7 y 16). Se debe notar en este contexto que la comparación de los datos levantados en diferentes años y por diferentes métodos tiene algunas incertidumbres, 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,

Ilustración 16. 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 (elaborado con las fuentes: Salzgitter-Lagesa, 1979; Class-Salzgitter, 2000a y 2000b, 2001, 2002; Energoprojekt, 1983).

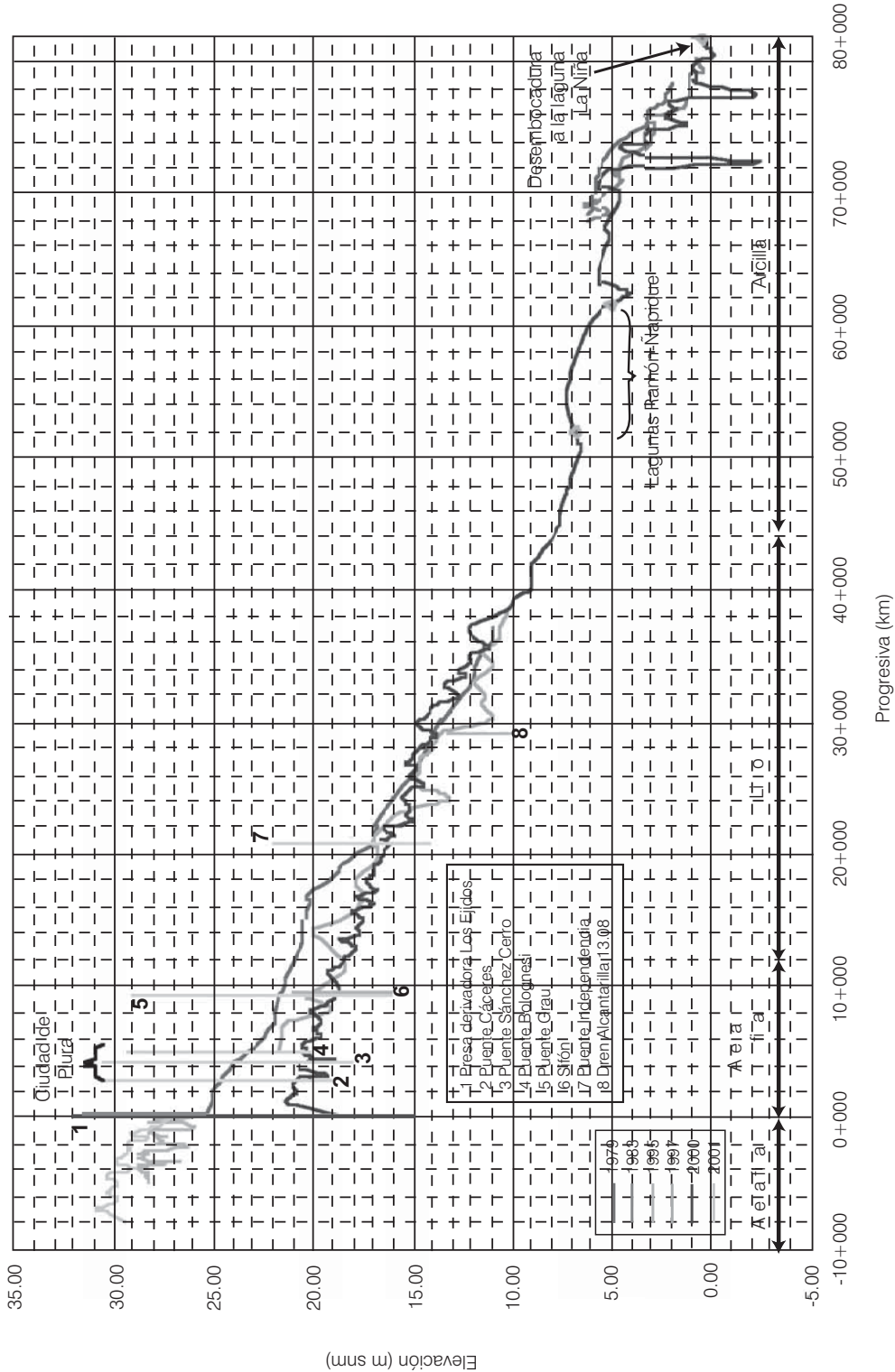
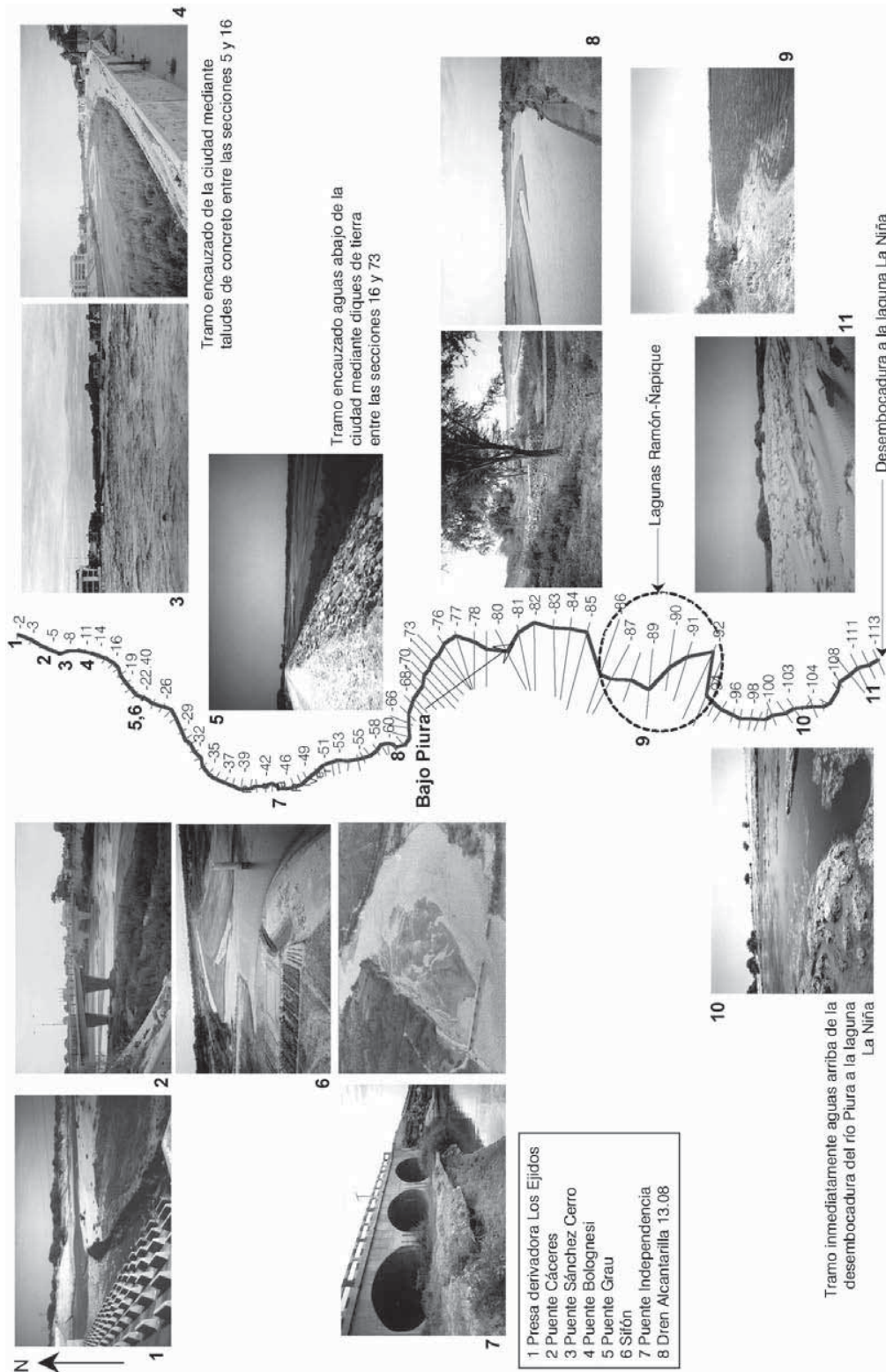


Ilustración 17. *Thalweg* del río Piura en cuenca baja, tramo entre la presa derivadora Los Ejidos y la desembocadura a la laguna La Niña.



lo que indica un desplazamiento entre los diferentes levantamientos.

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 y 6 km (ilustración 7).

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 su importancia, 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 a 3 m, con taludes bien definidos y anchos que varían de 150 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 a 3 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 msnm desaparecen bajo el agua, dando un ancho de entre 4 y 5 km, aproximadamente, alcanzando una profundidad de agua entre 2 y 3 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 a 7 m, con poca ondulación y varios cauces que cortan el plano entre 1.5 y 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 msnm 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 existe significativa cobertura vegetal en los bordes de los cauces.

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 de 10 m localmente, con cotas por debajo del nivel del mar (ilustraciones 16 y 17). 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.

Análisis del material de fondo

Con base en una campaña de muestreo en el 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, en el cuadro 1 se presenta la clasificación del tamaño de las partículas de sedimentos para las dimensiones características D_{10} , D_{50} y D_{90} que sirvieron como base para el análisis de agradación-degradación (sedimentación-erosión) del río y determinación del tipo

Cuadro 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 Ramón	56+000	<< 0.001	Arcilla	0.0018	Arcilla	0.02	Limo	Arcilla	

de material predominante en el fondo, así como también para determinar la función de distribución uniforme del tamaño característico de la partícula de sedimento, D_{50} (ilustración 8).

A partir del 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 (1993) y Zanke (1982) hasta una fracción de flujo de 6 a 10 N/mm². Según Hjülstrom (1935), Zanke (1982) y Van Rijn (1993) (ilustración 9), el movimiento de los materiales del fondo para el mismo diámetro determinante comienza con velocidades promedio de entre 0.2 y 0.4 m/s. Este diámetro determinante del material de fondo implica que aproximadamente un 70% del material sea más pequeño que el diámetro de 0.0625 mm y que un 30% del material sea mayor en dimensión que 0.0625 mm, que es el límite entre limos y arenas, conforme la clasificación de la American Geophysical Union (Jansen, 1979). Siendo el material muy uniforme, este material de fondo en el tramo de estudio aguas abajo de la presa derivadora Los Ejidos es calificado como un material limo-arenoso, compuesto de limos gruesos y arenas finas.

Tal como se observa en el cuadro 1, la variación del diámetro (D_{50}) es, desde Los Ejidos, de 0.2 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 ilustraciones 8 y 9 se observa claramente que siguiendo el curso, el material depositado se hace cada vez más fino y 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%). En el tramo del río entre la zona encauzada y la salida del complejo lagunar, los suelos varían entre limos arenosos y limos arcillosos.

Descarga de sedimentos

A partir de 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 los

datos obtenidos para los tres eventos históricos en la ilustración 10. De esta manera, también se estimaron los volúmenes de sólidos transportados durante dichos eventos (cuadro 2).

En efecto, los valores superiores significaron descargas de sedimentos específicas elevadas, entre 1 300 y 12 600 t/km² por evento, respectivamente, con base en el área de la cuenca del río Piura, sólo hasta la presa derivadora Los Ejidos, de 7 740 km². La concentración alcanza valores de entre 590 y 800 g/m³. En un año promedio (1975-1976), 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.

Capacidad hidráulica del encauzamiento

La evaluación de la capacidad hidráulica de la cuenca baja el río Piura en el tramo encauzado existente, el que se proyecta rehabilitar (año 2000-2001) se presenta en las ilustraciones 11 y 12. 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 presa derivadora Los Ejidos, incluido un modelo hidráulico físico con fondo móvil y rígido, que 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 de marzo de 1998 (4 400 m³/s) nunca se presentó y fue mucho menor, habiendo sido estimada entre 3 000 y 3 500 m³/s (Class-Salzgitter, 2000a, 2000b, 2001, 2002).

Para el modelado hidráulico se distinguieron claramente dos sectores, según las propiedades hidráulicas del río: a) el flujo en cauces principales y sobre áreas de inundación bien limitadas, en el que predomina el proceso hidráulico de traslación, y b) el flujo en largas o amplias zonas de inundación, en el que predomina claramente el proceso hidráulico de retención sobre

Cuadro 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)
1997-1998	74 (130)**	41
1982-1983	98 (100)**	54
1971-1972	10 (10)**	5

* Peso específico de 1.8 t/m³

** El valor entre paréntesis significa el peso total anual.

el de traslación. Se complementó con una calibración efectiva del modelo.

Determinación de los tramos de erosión (degradación) o sedimentación (agradación)

Con base en el diámetro determinante de los materiales del fondo del río ($D_g = 0.045$ mm), la estabilidad del fondo del cauce es dada según Lange-Lecher (1993) y Zanke (1982) hasta una fracción de flujo de 6 a 10 N/mm². Según Hjülstrom (1935) y Zanke (1982) (ilustración 9), comienza el movimiento de los materiales del fondo para el mismo diámetro determinante con velocidades promedio entre 0.2 y 0.4 m/s.

De acuerdo con los cálculos hidráulicos, a lo largo del río Piura se verificaron las fuerzas tractivas del flujo y las velocidades promedio en el cauce principal y en ambas llanuras para los caudales de 360 m³/s (periodo de retorno de dos años), 1 100 m³/s (periodo de retorno de cinco años), 1 700 m³/s (periodo de retorno de diez años), 2 500 m³/s (periodo de retorno de 25 años) y 3 100 m³/s (periodo de retorno de cincuenta años) (ilustraciones 13, 14 y 15).

Los resultados tomaron en cuenta las siguientes condiciones límite:

- El proceso de erosión comienza con tracciones del flujo mayor de 10 N/mm² y/o con la velocidad del flujo mayor que 0.4 m/s.
- Estado de equilibrio con tracciones del flujo en el orden de 8 N/mm² y/o con la velocidad de 0.3 m/s.
- El proceso de sedimentación comienza con tracciones del flujo menor que 2 N/mm² y/o con velocidades menores que 0.2 m/s.

Los resultados correspondientes son resumidos en el cuadro 3.

En el tramo entre Los Ejidos (km 0+000) y el puente Cáceres (km 2+900), se observa que a partir de caudales de 1 100 m³/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 3 100 m³/s, y se observan velocidades de 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.

Aguas abajo de la zona de la ciudad, entre el puente Bolognesi (km 5+037) y el puente Grau (km 9+400), se obtuvo de los cálculos el estado de equilibrio en caudales de hasta 1 100 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.

El tramo entre los puentes Grau e Independencia (km 9+400 - km 20+700) se caracteriza por el estado de equilibrio hasta caudales de 1 700 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,

Cuadro 3. Determinación de los tramos de erosión (degradación) y sedimentación (agradación) en el río Piura (2000).

Tramo del río	Caudal														
	360 m ³ /s			1 100 m ³ /s			1 700 m ³ /s			2 500 m ³ /s			3 100 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	n/s	-	n/s	n/s	-	n/s	n/s	-	n/s
Puentes 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	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

MI: margen izquierda; CP: cauce principal; MD: margen derecha; -: erosión; 0: estado equilibrio; +: sedimentación; n/s: no aplicable/sin datos.

existen sitios locales en que se puede observar el proceso de erosión.

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. Con base en 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 (periodo de retorno de dos años) y 3 100 m³/s (periodo de retorno de cincuenta años) (cuadro 4).

Mientras que en el tramo encauzado las velocidades promedio varían de 0.8 m/s (con pequeños caudales) y más de 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 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.

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

A partir de las velocidades promedio se obtuvieron los tiempos de traslado que se presentan en el cuadro 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 1997-1998 de la siguiente manera: tomando como base la curva de duración de los volúmenes embalsados

Cuadro 4. Velocidad promedio de flujo para diferentes caudales en los dos tramos existentes en la cuenca baja del río Piura (2000).

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
1 100	1.05	0.18
1 700	1.18	0.19
2 500	1.35	0.21
3 100	1.57	0.22

Cuadro 5. Tiempos de traslado de las partículas en suspensión en los dos tramos de análisis del río Piura (2000).

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
1 100	9	31
1 700	7	29
2 500	6	26
3 100	6	25

durante la avenida, que muestra un volumen de 90×10^6 m³ para la frecuencia de excedencia de 50% y a partir del caudal promedio del evento, 526 m³/s, se ha aproximado un valor de 171 000 s o 48 h para el tiempo de permanencia promedio. Se ha obtenido un valor semejante (40 h) para el evento de 1982-1983.

En vista de 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 y 25 m/h (resultados según ecuación de Stokes) (cuadro 6).

Con base en los diferentes tirantes promedio 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 (cuadro 7).

Los tiempos de decantación necesarios ascienden a valores menores de una hora para la fracción de granos entre d_{30} y d_{90} . A partir de los tiempos de traslado, calculados entre 25 y 38 horas, 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 de 1 h y 39 h (cuadro 8).

Considerando que el tiempo de permanencia alcanza valores entre 40 y 48 h (ver párrafo anterior), 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

Cuadro 6. Velocidad de decantación de los sedimentos en suspensión (2000).

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

Cuadro 7. Tiempo de decantación necesario de los sedimentos en suspensión en el río Piura, tramo comprendido entre el fin del encauzamiento y el ingreso a la laguna Ramón (2000).

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
1 100	1.5	11	<1	<1	<1	<1
1 700	2.0	14	1.1	<1	<1	<1
2 500	3.0	21	1.7	<1	<1	<1
3 100	3.5	25	1.9	1	<1	<1

Cuadro 8. Tiempo de decantación necesario de los sedimentos en suspensión en las lagunas Ramón y Ñapique (2000).

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 1997-1998, que se estiman en $74 \cdot 10^6$ t o $41 \cdot 10^6$ m³ (peso específico de

1.8 t/m³), se aproximaron las cantidades de sedimentos que se han decantado en los diferentes tramos del río (cuadro 9).

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 ilustración 15 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 se construyeron antes de 1982-1983, es decir, la sedimentación proviene de dos fenómenos de El Niño.

Aproximación de la erosión (degradación) general en el cauce principal del tramo encauzado

Antecedentes

Los fenómenos de El Niño de 1982-1983 y 1997-1998 han puesto en evidencia erosiones generales fuertes en el cauce principal del río. El término "erosión general" (Alvarado, 2004) 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.

Cuadro 9. Decantación de los sedimentos en suspensión en los diferentes tramos del río Piura (2000).

Tramo	Decantación de sedimentos			Sobreelevación promedio del terreno m
	%	10 ⁶ t	10 ⁶ m ³	
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 msnm, que significa la cota con la frecuencia de duración de 50% durante el evento 1997/1998).

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 (ilustración 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.

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 1982-1983 y 1997-1998, 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 (ilustración 16). De la misma forma se han comparado ambas informaciones con los datos disponibles del levantamiento topográfico del año 1997 (ilustración 16), es decir, entre los eventos de 1982-1983 y 1997-1998.

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 (ilustración 16); 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" (Lane (1957; De Vries, 1973, 1985; Vide, 2002) situado alrededor de la alcantarilla Dren 13.08 (ilustración 16). La observación a partir 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 ni 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

1982-1983, y del 0.029% en 1997, después del evento 1982-1983, y antes del fenómeno de El Niño 1997-1998.

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 (ilustración 16).
- 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 (ilustración 16).

En vista de que la alteración en el transporte sólido no es tan significativa, dado el volumen prácticamente inexistente del embalse de Los Ejidos, 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 estrecha. 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 (ilustración 16).

Aproximación cuantitativa de la erosión (degradación) futura

Se ha evitado efectuar un modelo (por ejemplo, aplicando Odirmo) (Klaassen, 2001) 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 hecho 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 suceda esto 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, los puentes y todas las obras en el cauce del río. Afortunadamente existe 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 (Jansen, 1979; Klaassen, 1995; Zanke, 1982), 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 4 000 m y una pendiente de 0.052%, se ha calculado la 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 con el 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.

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 (Breusers-Raudkivi, 1991) 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.

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, e influye favorablemente en las cotas del pelo de agua en el tramo inferior de la parte encauzada. Sin embargo, también tiene la desventaja de bajas velocidades y, en consecuencia, la sedimentación en las llanuras de inundación, como se explica en las secciones "Análisis del material de fondo", "Determinación de los tramos de erosión (degradación) o sedimentación (agradación)" y "Realineamiento del cauce principal inferior". La sedimentación afecta directamente la capacidad hidráulica de este tramo, y conducirá en el futuro a un remanso hacia aguas arriba, que dará lugar a la sobreelevación 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 sobreelevación, prolongación de los diques y desvío del cauce existente a su cauce original hasta el realineamiento del cauce existente, considerando lo siguiente: 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 tanto socioeconómica como ambientalmente (por ejemplo, la desaparición del complejo lagunar) en el área. De las opciones evaluadas, se recomendó aquella (ilustración 18) 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.

Conclusiones

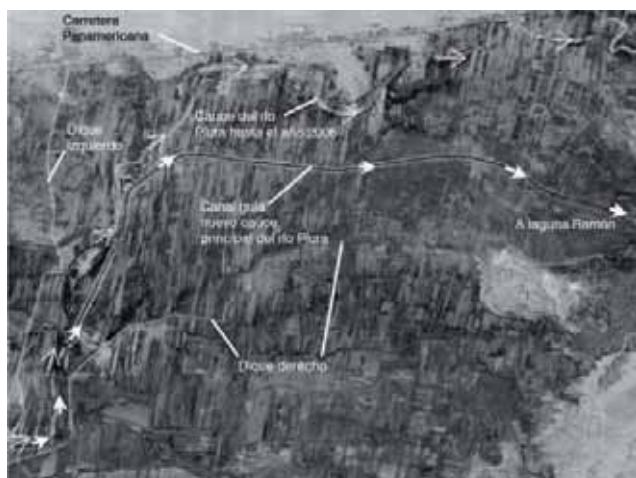
Se han evaluado detalladamente las causas y los efectos futuros de las medidas de control de agradación-degradación, concluyéndose principalmente:

- En el tramo entre la salida de la ciudad de Piura (progresiva km 5+037) hasta un poco aguas arriba del fin del encauzamiento (aproximadamente 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 de 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%. Con base en el criterio de Lane se ha apreciado que la futura pendiente debido a la erosión general tendría aproximadamente un valor de 0.020%. En vista de 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 de que actualmente existe 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, en las secciones de control se obtienen los valores futuros de profundización del fondo del cauce del cuadro 11.
- La mayor parte de los sedimentos se decantan en el área del tramo entrelazado del río, que significa una sobreelevación promedio del terreno natural de aproximadamente 0.75 m, por un evento de la magnitud de 1997-1998. En vista de la capacidad

Ilustración 18. Realineamiento del cauce principal inferior ejecutado a fines del año 2006.



Cuadro 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 de 1982-1983
1997	0.029	6.09	1.71	Entre 1982-1983 y 1997-1998
2000	0.025	5.25	0.76	Después de 1997-1998
Futuro	0.020	4.20	0.95	-

* Estimación según Lane. ** Cota relativa a la progresiva km 28+000.

Cuadro 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%.

hidráulica de descarga reducida en esta zona debido a la sedimentación futura posible, la sedimentación, si continúa, tendrá influencia en las condiciones hidráulicas en el tramo encauzado. Para evitar la influencia desfavorable, se recomendó efectuar el realineamiento del cauce principal inferior (ver la sección "Realineamiento del cauce principal inferior").

Dedicación, de los autores y agradecimiento

Este trabajo es dedicado a Nélica Mercedes Ancieta Brush de Alvarado (†) y a César Esteban Alvarado Loli. Vuestra enseñanza y formación son reflejo en vuestros hijos.

Los autores, César Alvarado-Ancieta, entre los años 2000 y 2002, y Bernd Ettmer, en el año 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 la 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 (1999-2007), respectivamente. Los autores agradecen muy especialmente al doctor Gerd Strübing de Alemania, al ingeniero Rodolfo Rothgiesser de Perú, al doctor Juan Pedro Martín-Vide de España, al doctor Wolfgang Trau de Alemania, al doctor Ulrich Maniak de Alemania y al ingeniero Eduardo Zegarra de Perú por la oportunidad de trabajo en conjunto durante la ejecución del estudio.

Nota

Las ilustraciones y cuadros aquí presentados fueron en su totalidad elaborados por los autores.

Recibido: 28/10/2007
Aprobado: 21/01/2008

Referencias

- ALVARADO-ANCIETA, C.A. Preparing for El Niño-Los Ejidos Diversion Dam Spillway, Peru. *International Water Power and Dam Construction Journal*. Vol. 54, no. 12, 2002, pp. 24-29.
- ALVARADO-ANCIETA, C.A. *Bed Topography and Scour in Sharp River Bends, and Influence of Bank Protection Works*. M.Sc. Dissertation-thesis HE 179. Vol. 1 & 2. Delft: International Institute for Infrastructure, Hydraulic and Environmental Engineering (IHE), 2004.
- ASOCIACIÓN SALZGITTER-LAGESA. *Estudio de control de avenidas del río Piura: diques de defensa y encauzamiento del río Piura*. Piura, Perú: Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura (DEPECHP), INADE-Banco Mundial, 1979.
- BREUSERS, H.N.C. and RAUDKIVI, A.J. *Scouring*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991.
- CLASS-SALZGITTER. *Informe verificación de la máxima avenida del 12.03.98 en Los Ejidos, estudio evaluación de la presa derivadora Los Ejidos*. Piura, Perú: DEPECHP, INADE-Banco Mundial, 2000a.
- CLASS-SALZGITTER. *Estudio de evaluación y afianzamiento de la presa derivadora Los Ejidos*. Piura, Perú: DEPECHP, INADE-Banco Mundial, 2000b.
- CLASS-SALZGITTER. *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*. Piura, Perú: DEPECHP-Banco Mundial, 2001.
- CLASS-SALZGITTER. *Estudio definitivo de las obras de afianzamiento de la presa derivadora Los Ejidos*. Piura, Perú: DEPECHP, INADE-Banco Mundial, 2002.
- DE VRIES, M. River bed variations - aggradation and degradation. *Proc. Int. Seminars of Hydraulics of Alluvial Streams, Int. Association for Hydraulic Research*. Delft, Holand, 1973, pp. 1-10.
- DE VRIES, M. *Engineering Potamology - Lecture Notes*. Delft: IHE, 1985.
- ENERGOPROJEKT. *Estudio definitivo del proyecto de rehabilitación del Bajo Piura*. Perú: Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura, INADE-Banco Mundial, 1983.
- HJÜLSTROM, F. The morphological activity of rivers as illustrated by river Fyris. *Bulletin of Geological Institute*. 1935.
- JANSEN, P.Ph. *Principles of river engineering-the non-tidal alluvial river*. Delft: Delftse Uitgevers Maatschappij, Delft University of Technology, 1979.
- KLAASSEN, G.J. Lane's Balance Revisited. *Proc. 6th Intern. Symp. on River Sedimentation*. New Delhi, India, 1995, pp. 671-686.
- KLAASSEN, G.J. *Advanced River Dynamics - Lecture Notes*. Delft: IHE, 2001.
- LANE, E.W. *A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodible materials*. U.S. Army Corps of Engineers, Missouri River Division, Sediments Series. Vol. 9, 1957, 106 pp.
- LANGE, G. and LECHER, K. *Gewässerregulung-Gewässerpflege. Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fliegewässern*. 3. Auf. 1-343. Parey, Berlin, Hamburg, 1993.
- LEICHTWEIß-INSTITUT FÜR WASSERBAU-UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BRAUNSCHWEIG. *Informe N° 564 - Ensayos en modelo de la presa derivadora Los Ejidos*. Leichtweiß-Institut für Wasserbau-Universidad Técnica de Braunschweig, 1984a.
- LEICHTWEISS-INSTITUT FÜR WASSERBAU - UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BRAUNSCHWEIG. *Informe N° 577 - Ensayos en Modelo de la Presa Derivadora Los Ejidos*. Leichtweiß-Institut für Wasserbau-Universidad Técnica de Braunschweig, 1984b.
- LEOPOLD, L.B. and WOLMAN, M.G. River Channel Patterns. Braided, Meandering and Straight. U.S. Geological Survey Professional Paper 282-B, 1957, pp. 39-85.
- MARTÍN-VIDE, J.P. *Ingeniería de ríos*. Barcelona: Ediciones UPC, 2002.
- VAN RIJN, L.C. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries, coastal seas and oceans*. Lecture Notes. Delft: IHE, 1993.
- ZANKE, U. *Grundlagen der sedimentbewegung*. Berlin, 1982.

Abstract

ALVARADO-ANCIETA, C.A. & ETTMER, B. *Aggradation and degradation of Piura River - Realignment of the main lower riverbed, El Niño phenomenon, Peru. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XXIII, no. 3, July-September, 2008, pp. 5-28.*

Manmade erosion in the upper basin, together with the natural phenomenon El Niño, alters the hydrologic and sediment transport regimes of the Piura River, in the northern part of Peru. A dam and existing river training works in the lower basin cause disequilibrium in channel platform and geometry; however, they are needed for flood protection in order to avoid substantial damages to property, existing infrastructure, and irrigation areas. Finally, the deviation of a natural course in the lower basin causes a complex problem in river morphology. As a consequence aggradation-degradation processes occur, leading to having to take mitigation measures to counteract streambed level changes if adequate actions are not taken to solve the problem. An effective evaluation of the riverbed 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 Piura River streambed, and the realignment of the main stream, therefore lengthening the river training.

Keywords: Peru, Piura River, river morphology, river training, scour/sedimentation, aggradation/degradation, sediment transport.

Dirección institucional de los autores:

César Adolfo Alvarado-Ancieta

Ingeniero Civil, Dipl.- Ing., M. Sc.
Departamento de Presas, Centrales Hidroeléctricas
e Ingeniería de Ríos
ILF Beratende Ingenieure ZT Gesellschaft mbH
Feldkreuzstraße 3
A-6063 Rum/Innsbruck
Austria
LG Innsbruck, FN 106300 z
teléfono: + (43) (512) 2412 5593
fax: + (43) (512) 2412 5902
Página Web: www.ilf.com
cesar.alvarado@ilf.com

Bernd Ettmer

Prof. Dr.- Ing.
Escuela Técnica Superior-Hochschule Magdeburg-Stendal
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Recursos Hídricos
Breitscheidstr. 2
39114 Magdeburg
Alemania
teléfonos: + (49) (0) (391) 886 4429 y 886 4357 (secretariado)
celular (móvil): + (49) (0) (170) 280 7605
fax: + (49) (0) (391) 886 4430
Página Web: www.hs-magdeburg.de/fachbereiche/f-wasserukreislauf/
bernd.ettmer@hs-magdeburg.de