



INVESTIGACIÓN HIDRÁULICA Y SEDIMENTOLÓGICA DEL TRAMO URBANO DEL RÍO PIURA

Marcos Miguel Velasco Ocaña

Piura, 30 de Octubre de 2002

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Civil

Octubre 2002





Esta obra está bajo una <u>licencia</u> <u>Creative Commons Atribución-</u> <u>NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú</u>

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

UNIVERSIDAD DE PIURA FACULTAD DE INGENIERIA



" Investigacidn hidrr ulica y sedimentologica del tramo urbano del rio Piura''

> Tesis para optar por el Titulo de Ingeniero Civil

Marcos Miguel Velasco Ocana

Asesor: Ing. Jorge Reyes Salazar

Piura, Octubre 2002

PROLOGO

El Río Piura afecta a las ciudades de Piura y Castilla, durante las ocurrencias catastróficas del Fenómeno "El Niño ", desde los puntos de vista de inundación, erosión de riberas y fondo. Así por ejemplo en el fenómeno de 1998 se produjo la inundación de la margen derecha en la zona de la presa Los Ejidos, también en la margen derecha, en la zona aguas abajo del puente Bolognesi; provocando la destrucción de viviendas y graves daños económicos y materiales y la evacuación de sectores de la población, así como la destrucción parcial del sistema vial de transporte terrestre.

En cuanto a la erosión de riberas y fondo podemos mencionar la desaparición casi por completo del Malecón Eguiguren en el año 1983 y la caída de los puentes Bolognesi y San Miguel en el año 1998. Si bien es cierto que ciertos tramos de las riberas del Río Piura en la zona urbana se encuentran actualmente protegidos, esta protección, se ha visto seriamente deteriorada por efectos de infiltración afectando su estabilidad y funcionamiento como consecuencia del último Fenómeno "El Niño "en 1998.

Lo anterior demuestra que los sistemas existentes de defensa tanto ribereña como de protección de puentes no han logrado soportar eventos extraordinarios, lo cual hace imprescindible que se realicen estudios con mayor profundidad para determinar los parámetros hidráulicos y sedimentológicos, tales como: capacidad hidráulica, valores y distribución de velocidades, cuadros de flujo, parámetros de erosiones en el tramo de estudio, influencia de las estructuras existentes, con el objetivo de lograr la realización de diseños adecuados.

Agradezco al Ingeniero Jorge Reyes por su valioso apoyo en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio es analizar y definir los parámetros hidráulicos necesarios para la elaboración del Diseño Definitivo de protección en el tramo urbano del río Piura. Primero se determinó una escala apropiada a la investigación para evitar que fuerzas no significativas en el prototipo pudieran adquirir importancia en el modelo. Luego se trató de establecer una similitud de comportamiento hidráulico y sedimentológico entre el modelo y el prototipo.

Establecida la similitud el siguiente paso fue realizar exhaustivas mediciones de velocidad, niveles de agua y erosiones a lo largo del tramo modelado.

De las conclusiones más resaltantes podemos destacar que las mayores velocidades se producen en la ribera izquierda del puente Bolognesi y en la ribera derecha del puente Sánchez Cerro.

La capacidad hidráulica del cauce del río Piura aumenta en 400 m³/seg. si ensanchamos la sección del puente Cáceres.

No se puede considerar aumentar la capacidad hidráulica del cauce del río Piura debido a las edificaciones existentes en el tramo urbano.

El puente Cáceres presenta la generación de líneas de corriente dirigidas hacia la ribera derecha del río.

La peñita influye negativamente en el cuadro de flujo, causando grandes turbulencias las que se manifiestan en erosiones de fondo muy fuertes.

INDICE GENERAL

CAPITULO 1: INTRODUCCION

- 1.1. Tramo de estudio
- 1.2. Objetivos del modelo físico.
- 1.3. Descripción del río Piura en la zona de estudio.

CAPITULO 2: INFORMACIÓN BÁSICA

- 2.1. Impacto de el niño 1998.
- 2.2. Topografía.
 2.2.1. Obras de defensa existentes.
 2.2.2. Secciones transversales levantadas topográficamente.
- 2.3. Geología y Geotecnia.
- 2.4. Hidrología.
 - 2.4.1. Precipitaciones.
 - 2.4.2. Caudales.
- 2.5. Reconocimiento de campo.2.5.1. Objetivos.
 - 2.5.2. Breve descripción.
 - 2.5.3. Estimación de los parámetros.
- 2.6. Registros de campo de los Fenómeno El Niño 1983 y 1998 efectuados por el Proyecto Chira Piura.
- 2.7. Criterios hidráulicos

CAPITULO 3: SEDIMENTOLOGIA

- 3.1. Conceptos
 - 3.1.1. Fenómeno de la sedimentación.
 - 3.1.2. Conceptos sobre erosión.
 - 3.1.3. Estudio de las erosiones.
 - 3.1.3.1. Fenómeno de la erosión local en pilas.
 - 3.1.4. Formas de fondo.
 - 3.1.5. Transporte de sedimentos.
 - 3.1.5.1. Conceptos fundamentales de transporte.
 - 3.1.5.2. Factores que afectan al transporte y deposición de sedimentos.
 - 3.1.5.3. Modos de transporte.
 - 3.1.6. Comportamiento de los cauces estrechos o estrechados.
- 3.2. Problemática de erosión y sedimentación
 - 3.2.1. Determinación del tamaño de las partículas.
 - 3.2.2. Principio de movimientos.
 - 3.2.3. Transporte de sedimentos.
 - 3.2.4. Estado actual de la erosión y sedimentación en el tramo urbano.

- 3.3. Trabajos relacionados con sedimentología del río Piura.
 - 3.3.1. Generalidades
 - 3.3.2. Estudios anteriores
 - 3.3.3. Programa de investigaciones de sedimentología en la cuenca

CAPITULO 4: MODELOS FISICOS.

- 4.1. Escala y análisis de semejanza
 - 4.1.1. Escala.
 - 4.1.2. Análisis de Semejanza.
- 4.2. Construcción e infraestructura del modelo
 - 4.2.1. Construcción.
 - 4.2.2. Infraestructura del Modelo.
- 4.3. Elementos principales del modelo
 - 4.3.1.Tanque de aquietamiento.
 - 4.3.2. Vertedero de ingreso.
 - 4.3.3. Poza de ingreso al modelo.
 - 4.3.4. Compuerta de fondo.
 - 4.3.5. Compuerta de superficie.
 - 4.3.6. Canal de derivación.
 - 4.3.7. Poza de decantación.
 - 4.3.8. Cisterna de almacenamiento.
- 4.4. Proceso de ensayo

CAPITULO 5: PROGRAMA DE INVESTIGACION

- 5.1.- Introducción.
- 5.2.- Alcances y secuencias de ensayos.
 - 5.2.1. Alcance de ensayos.
 - 5.2.2. Secuencia de ensayos para la calibración.
- 5.3.- Ensayos con la hipótesis del zapallal en la cota 12 msnm
 - 5.3.1. Ensayo Nº 1.
 - 5.3.1.1. Condiciones de ensayo.
 - 5.3.1.2. Resultados.
 - 5.3.2. Ensayo Nº 2.
 - 5.3.2.1. Condiciones de ensayo.
 - 5.3.2.2. Resultados.
 - 5.3.3. Ensayo Nº 3.
 - 5.3.3.1. Condiciones de ensayo.
 - 5.3.3.2. Resultados.
- 5.4.- Ensayo con zapallal cota 15 msnm.
 - 5.4.1. Condiciones de ensayo.
 - 5.4.2. Resultados.

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

A. Topografía y Geotecnia

- A.1: Gráfica de sección 3+015
- A.2: Gráfica de sección 3+107
- A.3: Gráfica de sección 3+206
- **A.4:** Gráfica de sección 3+305
- **A.5:** Gráfica de sección 3+394 **A.6:** Gráfica de sección 3+479
- **A.0:** Grafica de sección 3+479 **A.7:** Gráfica de sección 3+603
- **A.8:** Gráfica de sección 3+803
- **A.9:** Gráfica de sección 4+301
- **A.10:** Gráfica de sección 4+400
- **A.11:** Gráfica de sección 4+500
- A.12: Gráfica de sección 4+600
- A.13: Gráfica de sección 4+699
- A.14: Gráfica de sección 4+797
- A.15: Gráfica de sección 4+897
- A.16: Gráfica de sección 5+705
- **A.17:** Gráfica de sección 5+805
- A.18: Gráfica de sección 5+910
- A.19: Gráfica de sección 6+014

B. Secciones transversales estrato duro cota 15.00

- **B.1.1:** Sección transversal en Progresiva 2+850
- **B.1.2:** Sección transversal en Progresiva 2+914
- **B.1.3:** Sección transversal en Puente Cáceres
- B.1.4: Sección transversal en Progresiva 3+009
- **B.1.5:** Sección transversal en Progresiva 3+100
- **B.1.6:** Sección transversal en Progresiva 3+200
- **B.1.7:** Sección transversal en Progresiva 3+293
- **B.1.8:** Sección transversal en Progresiva 3+470 **B.1.9:** Sección transversal en Progresiva 3+697
- **B.1.10:** Sección transversal en Progresiva 3+697 **B.1.10:** Sección transversal en Progresiva 3+896
- **B.1.10:** Sección transversal en Progresiva 5+890 **B.1.11:** Sección transversal en Progresiva 4+093
- **B.1.12:** Sección transversal en Progresiva 4+194
- **B.1.13:** Sección transversal en Progresiva 4+194
- **B.1.14:** Sección transversal en Progresiva 4+693
- B.1.15: Sección transversal en Progresiva 4+891

C. Ensayos zapallal cota 12.00 y cota 15.00

C.1. Distribución de velocidades en planta cota 12.00

- C.1.1: Distribución de velocidades en planta sección 2+850
- C.1.2: Distribución de velocidades en planta sección Puente Cáceres

C.1.3: Distribución de velocidades en planta sección Puente Cáceres (Frente a los pilares)

C.1.4: Distribución de velocidades en planta sección Puente Sánchez Cerro

C.1.5: Distribución de velocidades en planta sección Puente Bolognesi

C.1.6: Distribución de velocidades en planta sección Puente Integración

C.1.7: Distribución de velocidades en planta sección 4+793 (Zona aguas debajo de la peñita)

C.1.8: Distribución de velocidades en planta sección Puente Viejo

C.1.9: Distribución de velocidades en planta sección Puente Colgante Intendencia

C.2. Distribución de velocidades en planta cota 15.00

C.2.1: Distribución de velocidades en planta sección 2+850

C.2.2: Distribución de velocidades en planta sección 3+009

C.2.3: Distribución de velocidades en planta sección Puente Cáceres

C.2.4: Distribución de velocidades en planta sección Puente Sánchez Cerro

C.2.5: Distribución de velocidades en planta sección Puente Bolognesi

C.2.6: Distribución de velocidades en planta sección Puente Integración

C.2.7: Distribución de velocidades en planta sección 3+293

C.2.8: Distribución de velocidades en planta sección 3+797

C.2.9: Distribución de velocidades en planta sección Puente Colgante Intendencia

C.2.10: Distribución de velocidades en planta sección Puente Viejo

C.2.11: Distribución de velocidades en planta sección 4+093

C.2.12: Distribución de velocidades en planta sección 4+294

C.2.13: Distribución de velocidades en planta sección 4+793 (zona aguas debajo de la peñita)

C.3. Gráfica de secciones transversales erosionadas cota 15.00

C.3.1: Gráfica de sección transversal en progresiva 2+850

C.3.2: Gráfica de sección transversal en progresiva 2+914

C.3.3: Gráfica de sección transversal en progresiva 2+960 - Puente Cáceres

C.3.4: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+009

C.3.5: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+100

C.3.6: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+200

C.3.7: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+293

C.3.8: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+388

C.3.9: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+597

C.3.10: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+597

C.3.11: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+697

C.3.12: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+797

C.3.13: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+896

C.3.14: Gráfica de sección transversal en progresiva 3+993

C.3.15: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+093

C.3.16: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+194 – Puente Sánchez Cerro

C.3.17: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+294

- C.3.18: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+394
- C.3.19: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+494
- C.3.20: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+594
- C.3.21: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+693
- C.3.22: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+793C.3.23: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+891
- C.3.24: Gráfica de sección transversal en progresiva 4+999 Puente Bolognesi

INTRODUCCION

El presente trabajo de tesis consiste en definir y analizar todos los parámetros hidráulicos tales como: capacidad hidráulica, valor y distribución de velocidad, cuadros de flujo, parámetros de erosión en el tramo de estudio, influencia de las estructuras existentes y mejoras hidráulicas que se pueden lograr; los que serán necesarios para la elaboración del diseño definitivo para el tratamiento integral del Río Piura.

El resultado obtenido ayudará a definir el sistema de protección integral en la zona urbana, de tal manera que se pueda garantizar su funcionamiento seguro y confiable.

El trabajo realizado se ha dividido en seis capítulos en los cuales se tratan las características principales que suceden en el tramo urbano del Río Piura.

El capítulo I presenta los objetivos del modelo Físico así como la descripción del Río Piura en la zona de estudio.

El capítulo II presenta la información básica del Río Piura, impacto del Fenómeno el Niño en 1998, topografía, hidrología, geotecnia, reconocimiento de campo, registros de campo de los Fenómenos el Niño 1983 y 1998 efectuados por el proyecto Chira Piura y Criterios hidráulicos.

En el capítulo III se estudia la influencia de la sedimentología en el tramo urbano del Río Piura.

En el capítulo IV se define la escala a usar en el modelo físico así como la construcción e infraestructura del mismo.

En el capítulo V se realizan los distintos programas de investigaciones en el modelo físico.

Por ultimo el capítulo VI indica las conclusiones obtenidas del estudio del Río Piura y se presentan las recomendaciones pertinentes.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1. TRAMO DE ESTUDIO

El tramo a investigar (parámetros hidráulicos y sedimentológicos) en el modelo físico abarca desde 500 metros aguas arriba del Puente Cáceres hasta 500 metros aguas abajo del futuro Puente Integración (Ver plano 1.1). En este tramo se debe garantizar que las condiciones de ingreso y salida correspondan a las reales.

1.2. OBJETIVOS DEL MODELO FISICO

El objetivo general de la modelación física es analizar y definir todos los parámetros hidráulicos necesarios para la elaboración del diseño definitivo. Por lo tanto el programa de ensayos debe ser tal que sus resultados respondan las diversas interrogantes del diseñador, tales como capacidad hidráulica, valores y distribución de velocidades, cuadros de flujo, parámetros de erosiones en el tramo de estudio, influencia de las estructuras existentes y mejoramientos hidráulicos que se pueden lograr. Dentro de la optimización del diseño definitivo se ha programado incorporar la alternativa seleccionada al modelo y realizar los ensayos necesarios para evaluar su comportamiento hidráulico y sedimentológico ante el paso de avenidas consideradas críticas.

Según lo establecido en los términos de referencia, los objetivos específicos del modelo son:

- a) Mediciones en el modelo físico para definir condiciones y parámetros de flujo.
- b) Análisis en el modelo físico de las condiciones de flujo para diferentes caudales típicos.

Para lograr los objetivos establecidos fue necesario realizar los siguientes grupos de actividades:

- a) Análisis de la capacidad hidráulica del cauce del Río Piura en el tramo urbano, simulando el incremento paulatino de las avenidas y determinando la capacidad máxima, hasta el momento de inundación.
- b) Determinación de las condiciones y cuadros de flujo (líneas de corriente, estructuras que provocan perturbaciones de flujo, vórtices, influencia de las estructuras existentes y otros).
- c) Determinación de la erosión general y local del fondo del cauce (perfiles longitudinales y secciones transversales de la erosión máxima del fondo del río y de las márgenes).
- d) Determinación de la distribución y de la intensidad de las velocidades del flujo para todos los casos analizados.
- e) Análisis y determinación del comportamiento real del sistema seleccionado de protección.
- f) Análisis y recomendaciones para la eliminación y/o mejoramiento de las estructuras existentes dentro del cauce principal con el objetivo de mejorar las condiciones actuales de flujo.

g) Análisis de la importancia y de la influencia de la ubicación del zapallal en el fondo del cauce.

Para cumplir los objetivos generales y específicos del modelo físico, es necesario representar la topografía y geología del tramo a estudiar. El Río Piura está conformado por una primera capa de material arenoso (no cohesivo) fruto de la sedimentación que se produce al disminuir los caudales en el tramo final de la avenida. Debajo de este estrato arenoso existe un estrato de mayor dureza y cohesión. Ambos estratos deben verse reflejados en la modelación física para poder obtener una representación real de los fenómenos de erosión y sedimentación. Tanto la erosión y como la sedimentación serán diferentes en un suelo de un único estrato que en un suelo de varios estratos. La erosión en un tramo recto de suelo arenoso y estratos duros cohesivos que presentará un desplazamiento de la erosión hacia aquellas zonas arenosas.

1.3.DESCRIPCIÓN DEL RÍO PIURA EN LA ZONA DEL ESTUDIO.

E l Río Piura ha sido dividido en 3 tramos para efectuar su estudio:

- a) Los Ejidos Puente Cáceres
- b) Puente Cáceres Futuro Puente Integración
- c) Futuro Puente Integración Laguna Ramón

El tramo a estudiar por el modelo físico es el b), es decir desde el Puente Cáceres al futuro Puente Integración. Ver fotos 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5

El sistema de defensa integral del Bajo Piura incluye como elementos claves:

- a) Represa derivadora Los Ejidos.
- b) Defensa de Piura y Castilla contra las inundaciones que incluye todas las obras en el tramo Los Ejidos futuro puente Integración.
- c) Defensa del área agrícola y centros urbanos del Bajo Piura, entre el futuro Puente Integración y la Laguna Ramón.

Como se explica en el capítulo anterior el objetivo del modelo hidráulico es analizar la problemática hidráulica del sistema de la protección de la zona urbana, en el tramo b, entre Puente Cáceres y futuro Puente Integración.

Las obras de la defensa en los tramos a y b se han desarrollado generalmente después del 1983 y forman parte del sistema de la protección del Río Piura. Tienen una importancia especial dado que se trata de la zona urbana, donde las inundaciones provocan no solo los daños económicos muy altos sino ponen en peligro las vidas humanas de gran parte de la población de la zona.

Antes de 1983 la zona urbana disponía para la protección contra inundaciones de los diques provisionales, construidos en el pasado en las mismas orillas del río, de una altura que no sobrepasaba dos metros y que apenas ofrecían al área aludida una protección adecuada para las avenidas con el período de retorno de no más de cinco años. Bajo tales condiciones el área urbana de Piura ha sido gravemente afectada por las inundaciones durante las avenidas en los años 1965 y 1972.

Teniendo en cuenta estas deficiencias, se desarrollaron los estudios Preliminar y Definitivo del Sistema de protección en el caso de las inundaciones en el Bajo Piura, incluyendo estudios de la zona urbana en el tramo aguas abajo de la Represa Derivadora Los Ejidos, hasta el puente Bolognesi, en una longitud de 5 Km. aproximadamente, siendo la longitud del tramo que atraviesa la ciudad de unos 2 Km.

El Estudio Definitivo de la zona urbana se ha elaborado teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Alto grado de edificación de las orillas, especialmente en el tramo entre los Puentes Sánchez Cerro y Bolognesi de la margen izquierda y entre los Puentes Viejo y Sánchez Cerro de la margen derecha.
- b) Contornos y la referente capacidad hidráulica de los entonces existentes puentes (Bolognesi, Viejo y Sánchez Cerro).
- c) Ubicaciones de los existentes diques provisionales de defensa.

Como defensas urbanas de Piura y Castilla contra inundaciones en el tramo encauzado fueron consideradas, según este Estudio:

- a) Diques de defensa.
- b) Revestimiento de las orillas del río y del talud, aguas arriba de los diques de defensa, con losas de concreto.
- c) Muros de contención.

Los alineamientos de las obras de encauzamiento del río Piura se determinaron para proporcionar un ancho del fondo del cauce no menor de 80 metros.

Las avenidas del Fenómeno El Niño de 1983 desbordaron parcialmente el cauce del río e inundaron las áreas urbanas de Piura y Castilla, con el caudal máximo registrado de 3200 m³/s. La erosión y socavación producida por estos caudales ensancharon el cauce, derrumbando las orillas, destruyendo los diques provisionales existentes de defensa, vías de tránsito y edificios ubicados en las mismas orillas del río. De este modo aumentó la capacidad hidráulica del cauce y fue posible el paso del caudal máximo de estas avenidas registrado en 3200 m³/s.

La casi total destrucción de los diques provisionales de defensa durante este evento dio lugar al inicio de la elaboración del Proyecto Actualizado y ejecución de las obras de encauzamiento del río Piura en su tramo urbano, con el propósito de defender el área urbana contra inundaciones, teniendo en cuenta el Diseño Definitivo arriba mencionado.

Debido a las enormes variaciones de la topografía de las orillas del río Piura en su tramo urbano, como consecuencia de las avenidas de 1983, el correspondiente Estudio Definitivo perdió validez y para la ejecución de las obras fue necesario elaborar un nuevo Estudio Definitivo que contemplara todos los cambios ocurridos. De tal manera fue posible iniciar los trabajos de reconstrucción en 1983 con un cauce hidráulicamente formado, sin los costos correspondientes de la reubicación de la población y la excavación de las orillas.

Dadas las limitaciones financieras que tenia el proyecto, se decidió ejecutar el sistema de defensa en la zona urbana en dos etapas.

Primera etapa:

Esta etapa incluyó:

Obras de la orilla izquierda, en el tramo entre los puentes Bolognesi y Sánchez Cerro. Obras de la orilla derecha desde unos 400 metros aguas arriba del Puente Sánchez Cerro hasta aguas arriba del puente Bolognesi.

Segunda etapa:

Dado que a inicios de 1997 existían indicios de ocurrencia del fenómeno de El Niño con una magnitud similar e inclusive mayor que 1983, se desarrollaron durante ese año trabajos de protección adicional ribereña de la zona urbana de Piura y Castilla:

Limpieza del cauce del río a lo largo de todo el tramo que atraviesa la ciudad.

Recuperación del enrocado en el talud de aguas arriba del Dique Derecho, entre el Puente Bolognesi y Quinta Julia.

Construcción de las defensas faltantes contra inundaciones de la orilla derecha en el tramo entre los puentes Sánchez Cerro y Cáceres y aguas arriba del puente Cáceres.

Es importante destacar que las dos márgenes del tramo aguas arriba del puente Cáceres hasta la Presa Derivadora Los Ejidos, carecen de cualquier tipo de defensa contra inundaciones, debido a que el proyecto no los consideró.

Los parámetros principales del sistema de defensa contra inundaciones antes del impacto de las avenidas de 1998 fueron:

- a) Elevación de los niveles de las orillas de los cauces del río, construyendo diques y otras estructuras (muros de contención).
- b) Revestimiento del talud de la orilla del cauce y del dique con losas de concreto.
- c) Protección del talón del revestimiento de taludes, con losas de concreto contra la erosión y socavación, por medio de tablestacas de concreto en los tramos en que el fondo del cauce este compuesto de material aluvial (arenas y limos, sujetos a erosión y socavación). Este sistema está generalmente ubicado a lo largo de toda la orilla derecha. En los tramos que presentan formación zapallal en el fondo del cauce (en varios tramos de la orilla izquierda), el talón de revestimiento se ha apoyado directamente en este material.
- d) Colocación de parapetos de concreto en borde superior de los taludes de defensa para separar el cauce del río de las pistas para transito peatonal y vehicular.

Durante 1998 no se llevó a cabo ningún trabajo en el fondo del cauce para lograr su estabilidad contra la erosión y socavación, debido a que la erosión del fondo, hasta ese entonces, no se consideraba de impacto significativo para el sistema de defensa ribereña.

Como prevención antes del fenómeno de El niño de 1998 se realizaron trabajos de emergencia, a través de los cuales sólo se pudo reparar la parte más dañada del sistema de la protección existente, con especial atención en la zona de los puentes. Por un lado, se reparó la protección ribereña destruida durante las avenidas anteriores, principalmente con enrocado, se llenó además la zona aguas abajo de los puentes con diversos tipos de materiales para estabilizar esta zona y prevenir una erosión local aguas abajo de los pilares. Sin embargo, estos trabajos no resultaron totalmente exitosos puesto que dos puentes (Bolognesi y Puente Viejo) colapsaron durante el fenómeno El Niño 1998.



Foto 1.4 : Vista panorámica del Río Piura en el tramo entre el Pte. Sánchez Cerro y el Pte. Peatonal San Miguel (margen derecha)



Foto 1.6 : Vista panorámica del río Piura del tramo de aguas abajo del pte. Bolognesi



Foto 1.5 : Vista panorámica del Río Piura en el tramo entre el Pte. Sánchez y el Pte. Peatonal San Miguel (margen izquierda)



Foto 1.1 : Vista panorámica del Río Piura aguas arriba del Pte. Cáceres







Foto 1.3: Vista panorámica del Río Piura en el tramo entre el Pte. Peatonal Intendencia y Pte. Sánchez Cerro

CAPITULO 2

2. INFORMACION BASICA

2.1.Impacto de el niño 1998

Las avenidas del Fenómeno del Niño de 1998, de acuerdo con la magnitud de las avenidas, caudales máximos y promedios y el tiempo de persistencia (en total 161 días), no han podido pasar por el tramo urbano sin dañar y debilitar seriamente las obras de encauzamiento y otras infraestructuras en el cauce del Río Piura, especialmente en los puentes.

Por efectos hidráulicos y socavación de los cimientos de apoyos, en la ciudad de Piura colapsaron dos puentes, (Viejo y Bolognesi), perdiéndose en estos accidentes varias vidas humanas. El primer puente no resistió los caudales máximos del día 12 de marzo y colapsó en la madrugada del mismo día, mientras que el segundo cayó el 16 de marzo debido a la fuerte socavación de los cimientos de sus apoyos en los días anteriores y posteriores de la avenida del 12 de marzo.

Fueron diferentes las causas que produjeron la caída de los puentes en Piura; en la foto 2.1 se observa que, a pesar de que existe un borde libre de aproximadamente 2 m, el puente está soportando esfuerzos de trabajo no previstos y no se produce colapso. En la foto 2.2 se muestra el mismo puente, pero colapsado, donde el nivel del agua no llegó a tocar el tablero (como sucedió en el Puente Cáceres), sin embargo, las fuerzas producidas fueron suficientes para que colapsara.

Otro puente de la ciudad de Piura que colapsó fue el Bolognesi (ver foto 2.3). El nivel de agua se mantuvo por debajo del tablero. Según los datos presentados y la experiencia de los hechos ocurridos, es obvio que los puentes no estaban diseñados para soportar empujes y/o socavaciones originados por caudales tan altos como los producidos durante 1998.

Sin embargo, el Puente Cáceres, de reciente construcción, soportó el Fenómeno del Niño de 1998. En las fotos 2.4 y 2.5 se muestra dicho puente con la máxima avenida registrada en alrededor de 4400 m^3/s y se observa que no existe borde libre e incluso hay un pequeño remanso de algunos centímetros que ya estaba presentándose. De acuerdo a los procesos constructivos utilizados y ya que el diseño no tiene previstas situaciones como esta, se puede afirmar que el puente estuvo muy cerca de colapsar.



Foto 2.1. - El Puente Viejo, con un caudal de 4400 m³/s.



Foto 2.2.- Vista del Puente Viejo colapsado.



Foto 2.3.- Vista del Puente Bolognesi colapsado.



Foto 2.4.- Vista del Puente Cáceres con el caudal de 4400 m³/s.



Foto 2.5.- Otra vista del Puente Cáceres con el caudal de 4400 m³/s.

Como consecuencia de los impactos especificados, la defensa urbana sufrió los siguientes daños:

- a) Debido a la profunda erosión del fondo del cauce a lo largo de las tablestacas, en el talón del revestimiento de las losas de concreto, en el talud de la orilla y de los diques de defensa en las orillas del río, las tablestacas han quedado descubiertas y sin contrapeso en una altura de más de 2,0 m. Bajo tales circunstancias, no han podido resistir a las correspondientes cargas, lo que a dado como resultado las roturas de las tablestacas en varios tramos de las márgenes izquierda y derecha entre los Puentes Bolognesi y Sánchez Cerro y especialmente, en la orilla derecha entre los Puentes Sánchez Cerro y Cáceres.
- b) Las roturas de tablestacas han tenido como consecuencia las caídas de las contiguas losas del revestimiento, quedándose el talud de la orilla expuesto a las erosiones y socavaciones, lo que ha aumentado el volumen de daños.
- c) Por efectos de la erosión y la socavación en el fondo del cauce y en el talón del talud, se ha caído completamente el revestimiento de concreto de la orilla izquierda en torno del Puente Cáceres.
- d) En varios sitios se ha presentado el lavado del material en los taludes de las orillas, por debajo del revestimiento de concreto, lo que ha provocado asentamiento, roturas, caídas y otros daños en las losas de concreto de revestimiento.
- e) Se han producido fuertes erosiones y socavaciones en el talud de la orilla y del dique provisional de defensa en el tramo entre los Puentes Sánchez Cerro y Cáceres de la margen izquierda.

Teniendo en cuenta los regímenes hidrológico e hidráulico del río durante las avenidas de 1997/1998, probablemente se iban a esperar daños de mayor volumen. El no haber ocurrido, aparte de los parámetros hidráulicos mencionados, también se debe a los arduos trabajos y medidas de emergencias llevadas a cabo todo el tiempo, especialmente en los Puentes Sánchez Cerro y Cáceres y otras ubicaciones con problemas en las dos orillas del tramo entre los Puentes Sánchez Cerro y Cáceres. Debido a la fuerte erosión y socavación del cauce del Río Piura, en su tramo urbano, los estribos y cimientos de los estribos y pilares (apoyos intermedios) de estos dos puentes también estuvieron expuestos a fuerte erosión y se encontraban en serio peligro de caerse, con la consecuente interrupción de las únicas vías de tránsito entre las dos partes de la ciudad, situadas en la margen derecha (Piura) y margen izquierda (Castilla).

Actualmente, por erosión y socavación de más de 2,0m de profundidad, todos los tablestacados en el talón de las losas de concreto del revestimiento de los taludes de las orillas y diques de la defensa, ubicados en el tramo entre los Puentes Bolognesi y Viejo de la margen izquierda y entre los Puentes Bolognesi y Cáceres de la margen derecha, han quedado descubiertos y sin los correspondientes contrapesos y contraempujes. Bajo las circunstancias indicadas, las obras de encauzamiento y de protección de la orilla han sido seriamente debilitadas, sin seguridad necesaria, lo que se refleja directamente en la inestabilidad de los revestimientos y taludes de las orillas y en general, de toda la defensa urbana de Piura y Castilla contra la inundación.

Durante la emergencia se tomaron algunas medidas de protección, tratando de improvisar un sistema que impidiera el desborde del río. En un determinado momento se analizó la posibilidad de construir bloques de concreto fabricados in situ y así evitar el transporte (durante la emergencia era difícil traer piedras desde las canteras porque las carreteras estaban destruidas y los volquetes trabajaban intensamente). Esta solución fue descartada porque los bloques necesitaban un tiempo de fraguado y era urgente tomar medidas de protección. En la foto 2.6 se observa la colocación del enrocado de protección.



Foto 2.6.- Vista de la colocación del enrocado de protección.

La construcción del Puente Cáceres redujo el ancho del cauce del río, logrando que la corriente principal se dirija hacia la margen derecha, inmediatamente aguas abajo del mencionado puente (ver foto 2.7). Esta situación se agravó porque en esa zona no existen losas de protección (70 m) y como medida de emergencia se colocó un enrocado de un tamaño promedio de piedra de 50 cm, que abarcaba desde el fondo del cauce hasta aproximadamente la cota de las losas existentes.



Foto 2.7.- Vista de aguas abajo del Puente Cáceres.

El elevado caudal que pasó por el Río Piura, trajo como consecuencia la destrucción de viviendas en la margen derecha, inmediatamente aguas abajo del Puente Cáceres, tal como se observa en las fotos 2.8. En la visita de inspección se observó que la cimentación de las viviendas llegaba a una profundidad promedio de 1.20 m.

La erosión lateral producida por el río fue dejando sin apoyo a las bases, luego se produjo la destrucción. Debido a que las casas que se encuentran en la margen derecha del Río Piura, aguas abajo del Puente Cáceres, estaban en contacto directo con las aguas del río, actuaron como defensas contra la inundación de la ciudad (ver foto 2.9). Se debe tener en cuenta que el río estuvo a punto de desbordarse y no lo hizo porque estas construcciones lograron resistir, aunque quedaron muy afectadas.



Foto 2.8.- Casas ubicadas aguas abajo del Puente Cáceres.



Foto 2.9.- Otra vista de la margen derecha aguas abajo del puente Cáceres.

2.2.Topografía

La investigación en el modelo físico se realizó teniendo como situación de partida la topografía realizada el año 2000 por las Consultoras. Debemos mencionar que la topografía del cauce del río Piura en el tramo urbano, es resultado del proceso de sedimentación que normalmente ocurre cuando el fenómeno lluvioso termina, caracterizado por que los caudales van disminuyendo paulatinamente lo que produce una disminución de la velocidad de flujo y una sedimentación acelerada del cauce.

La cota de partida para iniciar la nivelación durante el proceso de levantamiento topográfico, fue de 30.053 msnm, ubicada en la intersección Av. Panamericana y Av. Irazola cuya chapa de Bronce tiene la inscripción CAST-38, instalada por el PRONAP. La nivelación en todos los tramos fue realizada mediante el método de diferencia cerrada.

El tramo comprendido entre la Presa Los Ejidos y el futuro puente integración tiene una longitud de 5444.00 por la margen izquierda y 5300.00 por la margen derecha.

La cota promedio del fondo del río en la Presa Los Ejidos (progresiva 0+000) es de 23.50 msnm, la cota del fondo del río en el Puente Cáceres es de 21.28 msnm, en el puente colgante Intendencia es de 21.20 msnm, en el puente Sánchez Cerro es de 21.10 msnm, en el puente colgante San Miguel es de 21.04 msnm, en el puente Bolognesi es de 20.59 msnm y en el futuro puente Integración es de 20.57 msnm.

Como parte de los trabajos de levantamiento topográfico también se han determinado zonas críticas desprotegidas en ambas márgenes del río, zonas con estructuras destruidas, desagües de alcantarillado drenes pluviales que desembocan en el río y otros datos necesarios para la construcción y ensayos en el modelo físico.

2.2.1.- Obras de defensa existentes

A continuación se presentan los principales parámetros de las obras existentes de defensa ribereña, que se tuvieron en consideración durante la construcción del modelo físico:

Defensa - Muros de Tierra

- Progresiva 3+015.990 margen izquierda colindante a la Av. Guillermo Irazola hasta el puente Sánchez cerro progresiva 4+200.681.
- Progresiva 5+097.439 margen izquierda desde el puente Bolognesi hasta la sección 5+635.644.
- Progresiva 4+897.694 Margen derecha (puente Bolognesi) hasta 5+635.644 muro de tierra que ha sido erosionado, y protegido temporalmente con rocas sueltas de 60 cm de diámetro.

Defensa losa de Concreto

Dentro de la ciudad existe losa de concreto:

• Progresiva 2+722.561, se inicia la losa de concreto para la defensa de la margen izquierda y termina en la progresiva 3+107.020.

Nota : En este tramo desde la progresiva 2+923.953 hasta 3+015.990 esta losa ha sido erosionada y transportada completamente durante el fenómeno de El Niño del año 1998, quedando desprotegido el muro, para protegerlo temporalmente se han colocado rocas sueltas de aproximadamente 80 cm de diámetro .

• Progresiva 4+200.681 margen izquierda (pasando el puente Sánchez cerro) inicia losa de concreto hasta la progresiva 5+097.439 (puente Bolognesi).

Nota: en este tramo desde la progresiva 4+699.908 hasta 4+797.693 la losa se encuentra destruida, para su protección temporal se ha colocado roca suelta de 50 cm de diámetro.

• Progresiva 2+793.990 margen derecha antes del puente Cáceres hasta la progresiva 4+875.908 (puente Bolognesi), la losa se encuentra debilitada, destruida por tramos, las tablestacas se evidencian aproximadamente 1.80 m.

Nota: en este tramo desde la progresiva 2+952.026 hasta 3+307.664 la losa ha sido destruida por la erosión del agua, y se ha reemplazado temporalmente con roca suelta de 50 cm de diámetro. Desde la progresiva 4+385 margen derecha hasta 4+485.001 y desde la 4+579.079 hasta 4+663.826 la losa se encuentra destruida.

Enrocado con Malla Metálica

• Desde la progresiva 2+635.910 hasta 2+793.990 margen derecha existe un muro de roca con malla metálica en buen estado

2.2.2.- Desagües de alcantarillado y drenes pluviales

Desagües de Alcantarillado Público

Progresiva 3+305.696 margen izquierda (hospital regional). Progresiva 5+005.329 margen izquierda (cerca al puente Bolognesi). Progresiva 2+952.026 margen derecha (cerca al puente Cáceres). Progresiva 3+518.342 margen derecha (cerca al puente Intendencia). Progresiva 5+242.696 margen derecha (futuro puente Integración).

Drenes Pluviales

Progresiva 3+624.330 margen derecha (Av. San Teodoro).
Progresiva 4+021.345 margen derecha (Colegio Ex-Salesiano).
Progresiva 4+291.893 margen derecha (cerca Academia San Fernando).
Progresiva 4+380.645 margen derecha (cerca Academia San Fernando).
Progresiva 4+380.645 margen derecha (cerca Academia San Fernando).
Progresiva 4+579.079 margen derecha (cerca al Palacio de Justicia).
Progresiva 4+199.164 margen izquierda (después del puente Sánchez Cerro).
Progresiva 4+875.908 margen izquierda (antes del puente Bolognesi).

2.2.3. Secciones transversales levantadas topográficamente

En el anexo A de este estudio se incluyen las secciones transversales, resultado del levantamiento topográfico del campo (Mayo – Julio 2000), que fueron usadas para la construcción del modelo físico:

2+850, 2+914 : Puente Cáceres, 3+009, 3+100, 3+200, 3+293, 3+383, 3+470, 3+597, 3+697, 3+797, 3+896, 3+993, 4+093, 4+194, 4+294, 4+394, 4+494, 4+594, 4+693, 4+793, 4+891, 4+999: Puente Bolognesi, 5+091, 5+190, 5+290, 5+391, 5+450, 5+489

2.3. Geología y Geotecnia.

Es muy importante representar los estratos duros para obtener resultados adecuados del proceso de erosión y de sedimentación. Por esto, en cada ensayo se dedicó atención especial a la problemática de la influencia del estrato duro, que representa al estrato geológico denominado zapallal en prototipo.

Podemos afirmar que la geología y especialmente la ubicación, forma y la dureza del zapallal, es inclusive más influyente en el comportamiento hidráulico y sedimentológico del tramo urbano del Río Piura que la topografía misma, dado que los parámetros hidráulicos del río Piura dependen directamente del fenómeno de erosión y de sedimentación, principalmente influenciados por la geología del tramo estudiado.

Como resultado de las investigaciones geotécnicas realizadas por las consultoras durante el año 2000, contamos con las secciones transversales indicadas en 2.2.3, que incluyen la Topografía y Geotecnia del cauce del río y que han permitido representar la situación real.

El informe geológico y geotécnico, realizado por las consultoras, abarca desde la Presa Los Ejidos hasta la desembocadura. Para explicar los parámetros de geología y de geotecnia que han influenciado la construcción y los ensayos en el modelo, presentamos en el anexo A un resumen de la zona de estudio comprendida entre el Puente Cáceres hasta el futuro Puente Integración.

Según los resultados de los estudios de geología y de geotecnia se han encontrado los siguientes materiales geológicos:

Sector Puente Cáceres - Puente Sánchez Cerro

- a) Material arenoso a areno limoso de color gris claro a pardo amarillento con interdigitaciones de arenas de grano fino a limoso de baja compacidad y escaso contenido de humedad.
- b) Arenas limosas a arcillosas de color gris claro a marrón oscuro por presencia de abundante materia orgánica de muy baja compacidad y presencia de restos de material de desmonte.
- c) Arenas de grano medio a fino de color pardo amarillento con alto contenido de micas de baja compacidad y mediano contenido de humedad, así como presencia de raíces de plantas menores.
- d) Arenas de color pardo amarillento a gris verdoso de grano medio a fino con alto contenido de humedad y compacidad media, así como alto contenido de micas del tipo biotita y estratificación laminar. Los mayores espesores del cuaternario corresponden a la margen derecha (3.50 m.) y los menores a la izquierda (0.50 m). Por debajo, yacen rocas meteorizadas de la Formación Zapallal, constituida por;
- e) Arenas arcillosas de color gris verdoso a gris azulado con alto contenido de concreciones calcáreas de mediano grado de compacidad, producto de le meteorización de rocas de Terciarias de la Formación Zapallal, de naturaleza arenácea.
- f) Basamento rocoso aflora en ambos estribos del primer puente, cubierto por una capa de sedimentos de 5.00 metros en su margen izquierda.
- g) A la altura del Puente Intendencia el basamento rocoso se ubica a la profundidad de 3.45 metros en su margen derecha, 1.20 metros en el cauce y 0.50 metros en la margen izquierda.

Sector Puente Sánchez Cerro - Puente San Miguel

- a) Arenas limosas con intercalaciones de arcillas en lentes sumamente delgados y de color pardo amarillento a marrón claro con alto contenido de plantas arbustivas, aflorantes a la margen izquierda de modo continuo y a la derecha con acumulaciones en las proximidades del Puente San Miguel y adyacentes a las tablestacas de la defensa ribereña.
- b) Por debajo de los depósitos anteriores, afloran tanto en superficie como en puntones a lo largo de la ribera izquierda del río Piura rocas meteorizadas de la Formación Zapallal, las que muestran una intercalación de areniscas, lodolitas y lutitas de colores variados con ligeras oxidaciones ferruginosas.
- c) El basamento rocoso se ubica a 2.00 metros en la margen derecha, 1.50 metros en el cauce y 3.50 metros en el estribo izquierdo del primer puente. A la altura del Puente San Miguel, el basamento rocoso se ubica a la profundidad de 9.50 metros en la margen izquierda, hacia el cauce 10.50 metros y a la margen derecha a la profundidad de 11.25 metros.

Sector Puente San Miguel - Puente Bolognesi

- a) Arena limosa de color claro de estratificación masiva intercalada con arenas limosas de color marrón oscuro de estructura lenticular de baja compacidad, con presencia de alto contenido de micas, intercaladas con limos y arcillas de color marrón con presencia de micas con estratificación masiva, de baja compacidad y contenido de humedad media. El espesor de los depósitos cuaternarios se establece en 14.50 metros, a la altura del Puente Bolognesi, particularmente en su estribo derecho.
- b) Por debajo de las anteriores y en discordancia erosional, yacen las rocas meteorizadas de la Formación Zapallal, las mismas que muestran una alternancia de areniscas, argilitas y lodolitas en diferentes grados de resistencia y conservación.
- c) La profundidad del basamento rocoso se hace más ostensible, llegando a ubicarse a la profundidad de 0.60 metros a partir de la cota de fondo en la margen derecha, mientras que en la margen izquierda aflora el Zapallal a partir de la cota de fondo. A medida que avanzamos hacia el Sur, con dirección al Puente Bolognesi la profundidad del Zapallal, aumenta a 2.50 metros en la margen derecha y de 10.00 en la margen izquierda.

Sector Puente Bolognesi - Puente Integración

- a) Arena pobremente graduada de color gris claro de grano medio a fino con menor contenido de limos, de baja compacidad.
- b) Arcillas de baja plasticidad de color gris verdoso intercalada con arenas arcillosas de color gris verdoso de baja plasticidad, de mediana compacidad y contenido medio de humedad.
- c) Arena pobremente graduada de grano fino a limoso, de baja plasticidad de color gris claro y estructura homogénea.
- d) Arcillas de baja plasticidad de color gris verdoso de baja plasticidad de estructura masiva y homogénea.
- e) Arena pobremente graduada de color gris claro de grano fino con estratificación masiva, intercalada con arenas limosas de color gris claro de baja plasticidad con estructura homogénea. El espesor del cuaternario en la margen izquierda a la altura del Puente Integración alcanza los 12.15 metros, mientras que en la margen derecha alcanza los 15.10 metros. Por debajo de las anteriores y en discordancia erosional, yacen las rocas meteorizadas de la Formación Zapallal, las que derivan a suelos del tipo ML, SM, Cl, CH y SW, con diferentes grados de resistencia y conservación.
- f) El basamento rocoso se ubica a la profundidad de 14.50 metros en la margen derecha, en el cauce a la profundidad de 14.55 metros y en la margen izquierda a la profundidad de 10.00 metros, medidos a partir de la cota de fondo de los puentes arriba mencionados.

En base de todos estos datos de geología y de geotecnia fue posible definir la ubicación y la forma de los estratos erosionables y de los estratos duros para cada grupo de ensayos.

2.4 Hidrología

La cuenca del río Piura se ubica geográficamente en la costa norte del Perú, entre los meridianos 79°29' y 80° de longitud Oeste y los paralelos 4°42' y 5°45' de latitud Sur. El área de esta cuenca es de 9500 Km², incluyendo la cuenca del dren Sechura y la Laguna Ramón. Generalmente se considera que sólo 31% de la superficie de la cuenca es húmeda mientras que el resto es árido y/o semiárido (ver figura 2.1).

Los niveles de la cuenca oscilan entre 5 y 10 m.s.n.m. cerca de la ciudad de Sechura y la Laguna Ramón, y hasta más de 3600 m.s.n.m. cerca de Huarmaca. La mayor parte de la cuenca está por debajo de 530 m.s.n.m.

El río Piura nace en las alturas de Huarmaca a más de 3600 m.s.n.m. y atraviesa las provincias de Huancabamba, Morropón, Piura y Sechura donde se ubica su desembocadura (Laguna Ramón).

En la cuenca existen varias estaciones hidrológicas para la medición de precipitaciones y caudales mientras que a lo largo del río Piura, las tres estaciones más importantes para las mediciones de los caudales son Chulucanas – Puente Ñácara, Tambogrande y Piura – Estación Sánchez Cerro. Según las mediciones y registros desde 1926 el régimen de flujo del río Piura es muy irregular y depende directamente de las precipitaciones y de la ocurrencia del fenómeno El Niño. Este fenómeno es el factor principal que provoca abundantes precipitaciones y altos caudales en el río. Como resultado de este fenómeno, el caudal máximo registrado alcanza los 4424 m³/s (1998) pero, al mismo tiempo, durante varios meses, fuera de los años en que ocurre el fenómeno El Niño, existen registros de caudales mínimos de 0 m³/s.

2.4.1. Precipitaciones

En la parte baja de la cuenca, las precipitaciones se presentan entre enero y mayo, con los valores más altos en marzo y abril. La magnitud depende directamente de la presencia del fenómeno El Niño en la Costa Norte del Perú. Durante el resto del año prácticamente no hay precipitaciones en la cuenca baja. En la cuenca alta llueve durante todo el año con precipitaciones mayores de enero a mayo y valores mínimos entre julio y setiembre.

Comparando las precipitaciones y la altitud de la cuenca, es evidente un incremento en la precipitación hasta 2300 m.s.n.m. Luego, éste comienza a decrecer. La zona de la máxima precipitación se ubica entre 17000 y 2900 m.s.n.m. Esta distribución de las precipitaciones no es válida para el periodo de los fenómenos El Niño, cuando las condiciones climáticas, como consecuencia las precipitaciones, son totalmente diferentes y corresponden más bien a una cuenca tropical.

Durante el fenómeno El Niño uno de los parámetros hidrológicos que tiene máximas variaciones, comparándolo con los datos promedios anuales, son las precipitaciones. En la siguiente tabla se presentan datos históricos del periodo diciembre 1997 – mayo 1998, en las estaciones más importantes de la zona (ver tabla 2.1):

Estación	Provincia	Precipitación	Fecha	Entidad
		(mm)		
Miraflores	Piura	173,6	24-01-98	SENAMHI
Puente Sánchez	Piura	150,9	24-01-98	CHIRA-PIURA
Cerro				
Mallares	Sullana	112,3	18-01-98	SENAMHI
Puente Sullana	Sullana	210,0	18-01-98	CHIRA-PIURA
Chulucanas	Piura	144,0	24-01-98	SENAMHI
Morropón	Piura	166,0	21-02-98	SENAMHI
Tambogrande	Piura	155,0	21-02-98	SENAMHI
Malacasí	Piura	251,0	10-03-98	SENAMHI
Camp. Sede	Piura	230,0	08-02-98	SENAMHI
Base Aérea	Talara	232,2	18-03-98	FAP
Tambogrande	Piura	117,5	01-04-98	CHIRA-PIURA
El Ciruelo	Sullana	125,0	05-04-98	CHIRA-PIURA
San Lorenzo	Piura	110,0	06-04-98	CHIRA-PIURA
Morropón	Piura	110,0	11-04-98	SENAMHI
El Ciruelo	Sullana	140,0	11-04-98	CHIRA-PIURA
San Lorenzo	Piura	122,0	04-05-98	CHIRA-PIURA

Tabla N°2.1: Precipitaciones pluviales registradas en las estaciones más importantes desdediciembre 1997 – mayo 1998.

 Tabla N°2.2: La precipitación acumulada entre diciembre 1997 y mayo 1998 en diferentes estaciones meteorológicas.

Estación	Precipitación	
	(mm)	
Miraflores	2031,4	
Mallares	1765,2	
Chulucanas	3410,1	
Tambogrande	3949,6	
Ayabaca	1659,2	
Tumbes	2453,5	
Talara	1315,3	
Paita	910,8	
Sechura	1040,2	

Es obvio que las intensidades, pero también los volúmenes totales de precipitaciones, fueron extremadamente fuertes en la cuenca alta del río Piura, provocando caudales muy altos en toda la cuenca, especialmente en la zona de las ciudades de Piura y Castilla.

Comparando las precipitaciones mensuales (en mm) durante los eventos El Niño 1983 y El Niño 1998, en la estación miraflores de Piura, se puede llegar a los resultados presentados a continuación (ver tabla 2.3):

Mes	El Niño 83	El Niño 98
Diciembre	0,0	165,0
Enero	324,7	787,9
Febrero	161,7	500,1
Marzo	428,3	480,6
Abril	786,2	92,8
Mayo	379,4	5,0
Junio	192,5	0,0

Tabla N°2.3: Precipitaciones mensuales (en mm) durante los eventos El Niño 1983 y El Niño1998, en la estación Miraflores de Piura.

Analizando los datos presentados, se puede ver que el volumen de las precipitaciones es similar, pero existe una diferencia en la ocurrencia de las precipitaciones máximas.

2.4.2. Caudales

El Estudio "Hidrología del Río Piura" elaborado en 1972 por la DEPECHP, ha analizado los caudales típicos de la cuenca del río Piura, con el objetivo de definir éstos para el diseño y la construcción del sistema de protección ribereña del Bajo Piura. Los resultados más importantes de este estudio son:

- a) Los años muy húmedos fueron 1926, 1932, 1933, 1939, 1941, 1943, 1953, 1957, 1965 y 1972
- b) El caudal máximo registrado entre 1926 y 1972 fue de 2500 m^3/s (1965)
- c) El caudal mínimo registrado durante el mismo tiempo fue de $0 \text{ m}^3/\text{s}$
- d) El caudal promedio durante todo el periodo analizado fue de 24.8 m^3/s
- e) El caudal promedio máximo anual fue de $108 \text{ m}^3/\text{s}$
- f) El caudal promedio mínimo anual fue de $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$

En base a estos datos históricos, se han realizado análisis estadísticos, determinando que los caudales, con sus respectivos periodos de retorno (ver Tabla N°2.4)

Tabla N°2.4: Análisis estadístico.

Periodo de retorno	Caudal
Años	m ³ /s
25	2300
50	2800
100	3300

Estos datos fueron empleados en el dimensionamiento de los diques de defensa y la elaboración de los Estudios Previo y Definitivo de esta obra.

Desde 1974, como consecuencia del desarrollo del sistema Chira–Piura, el régimen hidráulico del río Piura fue cambiado en dos fases:

- a) En la primera fase (1974), se construyó la planta de bombeo Montenegro y Canal de Derivación "Daniel Escobar", aumentando los caudales registrados en la estación Sánchez Cerro.
- b) Durante la segunda fase (1985) entró en operación la represa derivadora Los Ejidos y el canal "Biaggio Arbulú", trabajos que fueron ejecutados como parte de las obras de la Segunda Etapa del Proyecto Chira Piura. Como consecuencia, los caudales en la estación Sánchez Cerro disminuyeron por los volúmenes captados para el riego de áreas agrícolas del Bajo Piura.

Los caudales determinados en el estudio de 1972 fueron cuestionados durante el impacto del fenómeno El Niño 1982/83, cuando el caudal, con la probabilidad de ocurrencia de 10% (1600 m³/s), ocurrió durante enero; con probabilidad de 4% (2300 m³/s) en marzo y durante mayo del mismo año, el caudal registrado superó el caudal de diseño con un periodo de retorno de 100 años.

Después de 1983 se realizaron varios estudios hidrológicos que generalmente han concluido que el evento de 1983 alcanzó una magnitud muy difícil y casi imposible de repetirse, durante un periodo de retorno razonable, por tal motivo, el caudal máximo de esta avenida (3200 m³/s) se adoptó para el diseño, reconstrucción y rehabilitación de la represa Los Ejidos.

Según los datos de las mediciones en la estación Sánchez Cerro, en el periodo diciembre 1997 – mayo 1998, se registraron caudales máximos (ver tabla 2.5):

Fecha	Caudal m ³ /s	Hora
20-02-98	2846,0	22:00
23-02-98	3414,0	23:00-24:00
12-03-98	4424,0	09:00-12:00
01-04-98	3816,0	13:00-14:00
12-04-98	3516,0	16:00

 Tabla N°2.5: Caudales máximos registrados en la estación Sánchez Cerro, en el periodo diciembre 1997-mayo 1998.
Según los resultados del análisis de Hidrología, se determinaron los siguientes valores de caudales máximos de las avenidas con su periodo de retorno (ver tablas 2.6 y 2.7):

Tabla N°2.6: Análisis probabilístico:

Probabilidad ocurrencia	de	(%)	4	2	1
Período retorno	de	(años)	25	50	100
Q ^{max} inst		[m3/s]	2698	3412	4153

Tabla N°2.7: Análisis de modelo hidrológico:

Probabilidad ocurrencia	de	(%)	4	2	1
Período retorno	de	(años)	25	50	100
Q ^{max} inst		[m3/s]	2906	3773	4546

Durante el fenómeno 1998, los caudales han presentado un crecimiento paulatino, desde 1485 m³/s del 9 de enero, hasta 4424m³/s del 12 de marzo, provocando un aumento también paulatino de la capacidad hidráulica del cauce del río en el tramo urbano, es decir, cada una de las avenidas antecedentes por erosión y socavación del fondo del cauce, fue dejando un cauce de mayor capacidad, lo que posteriormente ha posibilitado el flujo de la siguiente avenida con el caudal máximo mayor sin desbordes de las defensas urbanas.

De tal manera se puede generalmente concluir que en la zona urbana el fenómeno principal durante el impacto El Niño 1998, fue la erosión del cauce, mientras que la sedimentación ocurrió en la zona aguas abajo. Hablando de la erosión se deben analizar dos parámetros diferentes, erosión general del cauce del río Piura en la zona urbana y erosión local a lo largo del mismo cauce, especialmente cerca a los puentes (existentes y los puentes destruidos durante 1998)

Analizando el cauce principal del río Piura en la zona urbana se puede concluir que el proceso principal entre 1983 y 1998 y durante las avenidas de 1998, fue la erosión general. Por ejemplo, analizando los planos según construido de la represa Los Ejidos y comparando datos sobre el terreno y el cauce principal del río Piura, con la situación actual del cauce en la misma zona, se puede concluir que los niveles del fondo de cauce han bajado en algunas zonas hasta 2 m por debajo de los niveles iniciales.

Teniendo en cuenta los resultados del estudio de hidrología de la cuenca para el análisis del modelo hidráulico se han seleccionado caudales entre 2250 m3/s y 4500 m3/s como caudales de las avenidas típicas que influyen en el diseño, construcción y operación del sistema de protección.

2.5.Reconocimiento de campo

2.5.1.- Objetivos

Con la finalidad de reproducir adecuadamente la semejanza entre el modelo físico y el tramo del río modelado, se efectuó un reconocimiento de campo que abarcó desde la Presa Los Ejidos hasta la sección donde se ubicará el Puente Integración.

Los parámetros principales que se observaron fueron:

- a) Condiciones de borde.
- b) Rugosidad
- c) Situación de la protección existente
- d) Pendientes longitudinales existentes
- e) Tipo de material de fondo: cohesivo no cohesivo
- f) Zonas de tendencia a la erosión y sedimentación.
- g) Visualización de tramos con presencia de estratos duros.
- h) Curvas granulométricas del material de fondo.
- i) Efectos locales: Puente Cáceres, Sánchez Cerro, Bolognesi, La Peñita.

2.5.2.- Breve descripción

Desde los Ejidos el río discurre en un cauce más o menos recto para entrar en una curva cerca al sector urbano, lugar donde se ubica el Puente Cáceres, donde a su vez el cauce sufre un estrechamiento (150m). Inmediatamente aguas arriba del puente se han protegido ambas márgenes del río: en la margen derecha el talud se ha recubierto con losas de concreto unos 20m y con gaviones unos 40m aproximadamente, la margen izquierda se encuentra protegida con losas y en la zona cerca al estribo del puente con roca.

Aguas abajo del Puente Cáceres el río colinda directamente con casas y calles importantes. Es de mencionar que en estas riberas se alternan zonas protegidas con losas de concreto cimentadas en tablestacas, con zonas bastante destruidas, otros tramos están protegidos con roca y otros sin ninguna protección más que la escasa vegetación que cubre los taludes.

A continuación se hace una descripción más detallada de estos tramos:

- En la ribera derecha aguas abajo del Puente Cáceres está protegido con losas de concreto unos 70m, para luego continuar con protección de enrocado unos 150m y otro tramo con losas de concreto que actualmente se encuentran destruidas parcialmente por lo que se ha tenido que reforzar con enrocado, la situación continua hasta el puente Colgante Intendencia donde la cimentación ha fallado totalmente.
- En la ribera izquierda se ha protegido con roca la zona del estribo del puente Cáceres, luego con losas de concreto para continuar sin protección alguna hasta el Puente

Sánchez Cerro. En esta zona a ambas márgenes existen desfogues de drenes pluviales y desfogues de desagües.

- El Puente Colgante Intendencia se ubica también en una curva, siendo el lado izquierdo la parte interior de la curva, notándose actualmente la presencia de sedimentos en esta zona. A partir del Puente Colgante, en la margen derecha se inicia el malecón que se prolonga aguas abajo, conservándose al parecer las losas de protección en buen estado. Existen también algunos puntos de desfogues.
- A partir del puente Sánchez Cerro, comienza la protección también en la ribera izquierda con losas de concreto.
- A lo largo del cauce se sitúa también el puente San Miguel (Puente Viejo). La ribera derecha aguas abajo de éste presenta algunos tramos deteriorados que han sido rellenados con roca. La ribera izquierda cerca al puente es vertical cubierta con concreto para luego continuar con roca Así mismo el parapeto está parcialmente destruido. La ribera izquierda aguas abajo del puente viejo está destruida hasta antes de llegar al puente Bolognesi actualmente colapsado.
- Aguas abajo del puente San Miguel se aprecian los restos del antiguo puente en medio del cauce, también se ubica en medio del cauce con influencia negativa una peña constituida de material resistente.
- En la ribera izquierda existe un dren pluvial que descarga el agua a través de una bomba.
- Aguas arriba del puente Bolognesi en la salida del colector la losa ha sufrido un asentamiento. Aguas abajo del puente Bolognesi no hay protección en los taludes.
- A lo largo del río la cimentación de las losas ha quedado al descubierto, lo que presupone que existe una erosión generalizada.
- 2.5.3.- Estimación de los parámetros
 - a) Condiciones de borde del modelo:

Puente Cáceres: La cota del tablero (30.50 msnm) es una condición de borde para el caudal máximo, debido a que se registró este nivel durante El Niño 1998.

Puente Bolognesi: Existen registros de velocidades y niveles. En el recorrido se determinó que el nivel para el caudal máximo fue de 27.85 msnm.

b) Rugosidad: El valor de la rugosidad estimada es de 0.033, influenciada por:

- Material de fondo y taludes: El fondo tiene un estrato arenoso superficial y un estrato arcillo arenoso más profundo. Se ha verificado que después de producirse las avenidas el fondo está constituido por el estrato profundo. En la ribera derecha el talud se encuentra en su mayor parte protegido fundamentalmente por losas de concreto cimentadas en tablestacas y ciertas zonas de enrocado. La ribera izquierda, a excepción del tramo Sánchez Cerro y Bolognesi, se encuentra sin protección.
- El estado de los taludes: Las losas de concreto que protegen los taludes se encuentran en su mayoría agrietadas y el tablestacado que las cimienta en algunos casos ha sufrido volteo o deslizamientos. En general las defensas de concreto muestran una superficie desgastada.
- Efectuando un análisis del tipo de material y del estado en que se encuentran los taludes consideramos que la rugosidad es de 0.028.
- Variaciones de la sección: En el tramo de estudio el ancho de las secciones transversales varían entre 200 y 370 metros. En la zona aguas arriba el río sigue un tramo recto con un ancho promedio de 200m, pero presenta un estrechamiento en la zona de Cáceres de 150m. El tramo entre el puente Cáceres y el puente Sánchez Cerro presenta un ancho promedio de 120m. Las variaciones se consideran que son ocasionales, lo que da un factor de 0.005
- Efecto relativo de las obstrucciones: A lo largo del tramo de estudio las obstrucciones observadas se deben fundamentalmente a los puentes pero no constituyen una barrera que interfiera de manera importante en el flujo. Este efecto se considera despreciable porque se tiene sólo un puente que tiene efectos locales, que no se propagan, dadas las características del flujo, en el caso de avenidas.
- Vegetación: Se observa vegetación de poca altura a lo largo del cauce en la zona de las riberas, siendo más densa hacia la margen izquierda donde no existe protección. El tipo de vegetación que se presenta es en su mayoría maleza y pequeños arbustos. En plenas avenidas ésta vegetación es eliminada totalmente por lo que no representa oposición al flujo. El valor de éste parámetro es cero.
- Sinuosidad: Se observa la presencia de 2 curvas, una ubicada en el Puente Cáceres y la otra ubicada en el Puente Bolognesi, sin embargo podemos afirmar que la sinuosidad es menor y por lo tanto consideramos como factor la unidad.
- Las características del flujo: La rugosidad se podría alterar ante formas de fondo producto de ciertos parámetros del flujo, tales como la velocidad, dirección, etc. En este caso no se considerará ningún efecto debido a que en el valor de la rugosidad base ya se encuentran considerados los efectos del flujo.

c) Situación de la protección existente:

La protección existente abarca la totalidad de la ribera derecha en el tramo urbano, y en la margen izquierda existe entre el Puente Sánchez Cerro y Bolognesi.

El sistema de protección en muchos tramos se encuentra deteriorado, existen losas agrietadas, destruidas; tablestacado que ha sufrido volteo, etc.

d) Pendientes longitudinales existentes

A lo largo del tramo urbano se observa una baja pendiente, mas o menos constante, sin cambios bruscos.

e) Tipo de material de fondo: cohesivo – no cohesivo

Se observó que existe una capa superficial arenosa producto de la sedimentación al disminuir las velocidades en el último tramo del hidrograma de avenidas y también como resultado de un fuerte ingreso de arena eólica.

Debajo de ésta capa arenosa se encuentra un material cohesivo no uniforme en la sección transversal.

f) Zonas de tendencia a la erosión y sedimentación.

En el río existen zonas de tendencia a la erosión, por ejemplo la margen derecha situada aguas abajo del Puente Cáceres.

Alguna zona de sedimentación es la ribera izquierda en la sección del Puente Cáceres.

g) Visualización de tramos con presencia de estratos duros.

A través del reconocimiento de campo se pudo observar la presencia de estratos duros a lo largo del tramo de estudio, que ha sido indispensable representar en el modelo físico para obtener una representación real de la situación presentada en prototipo.

h) Diámetro representativo del material de fondo.

Se observó como material de fondo un material granular fino de un diámetro entre 0.2 a 0.3 mm. Gran parte de este material es de procedencia eólica.

i) Efectos locales: Puente Cáceres, Sánchez Cerro, Bolognesi, La Peñita.

El puente Cáceres se ubica en una zona de estrechamiento de cauce en curva en la que se observan efectos locales. El puente Sánchez Cerro se encuentra en un tramo recto del río y no se aprecian efectos locales. La peñita constituye una obstrucción que se extiende en casi la mitad izquierda del cauce, en la zona de aguas arriba del puente Bolognesi sobresale cerca de 1m actualmente. Tiene influencia local negativa sobre el cauce.

2.6. Registros de campo de los Fenómenos El Niño 1983 y 1998 efectuados por el proyecto Chira Piura.

Para efectuar la calibración del cauce se cuenta con registros realizados en pleno fenómeno del Niño 1983 y 1998 tomados en los Puentes.

Puente Cáceres:

 Tabla N°2.8 Caudales con datos de cota de agua, cota de erosión máxima y velocidad promedio.
 velocidad

Fecha	Caudal m ³ /s	Cota de nivel de agua msnm	Cota de Erosión máxima msnm	Velocidad Promedio m/s
16.03.98	4421	30.50 *		
23.03.98	2219	26.68	17.18	2.28
25.03.98	1324	25.01	17.38	2.14
31.03.98	2289	27.08	17.08	2.51
01.04.98	3650	28.58	16.58	3.15
02.04.98	2352	26.74	17.74	2.68

* Dato extraído de observación directa.

Estos datos deben tomarse efectuando una minuciosa interpretación para no cometer errores, por ejemplo para un caudal similar (ver 23.03.1998 y 31.03.1998) los niveles de agua varían 0.4 metros.

Puente Sánchez Cerro

Tabla N°2.9: Caudales con datos de cota de agua, cota de erosión máxima y velocidad promedio.

Fecha	Caudal	Nivel de agua	Cota de Erosión máxima	Velocidad
	m^3/s	msnm	msnm	Promedio
				m/s
18.03.98	1144	25.89	17.19	2.25
23.03.98	2274	24.72	16.42	3.88
25.03.98	1174	24.66	17.26	2.77
31.03.98	2350	26.18	17.78	3.81
01.04.98	3727	27.43	17.39	4.86
02.04.98	2352	26.01	17.91	4.33

Puente Bolognesi

Fecha	Caudal	Nivel de agua	Area	Cota de Erosión máxima	Veloc.
	m ³ /s	msnm	m^2	msnm	Promedio
					m/s
29.12.82	221.7	26.09	200.46	22.44	1.10
20.01.83	1151.8	29.35	602.56	22.11	1.91
11.03.83	1207.4	26.29	582.99	20.31	3.07
15.03.83	20.3	24.40	45.26	22.20	0.45
30.03.83	2947.4	29.10	905.93	19.63	3.25
22.12.97	308.0	24.74	300.49	19.43	1.02
31.12.97	510.0	25.45	333.20	20.39	1.53
9.01.98	1235.0	26.79	486.90	20.48	2.54
11.03.98	1750.0	27.32	652.08	20.95	2.68
18.03.98	424.0	24.74	430.65	18.52	0.98

 Tabla N°2.10: Caudales con datos de cota de agua, cota de erosión máxima y velocidad promedio.

Para el Puente Bolognesi, adicionalmente se cuenta con valores de velocidades en planta para los caudales de 1750 m³/s y 2268 m³/s. Ver gráfico N°2.1.



 $Q = 1750 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q = 2268 \text{ m}^3/\text{s}$ ------

Gráfico N°2.1: Distribución de velocidades medidas en el puente Bolognesi durante el fenómeno El Niño de 1998.

2.7 Criterios hidráulicos

Teniendo en cuenta el comportamiento real del río Piura en el tramo del estudio y varios parámetros hidráulicos que influyen en este tipo de comportamiento es necesario mencionar los siguientes criterios hidráulicos que fueron usados durante la construcción, calibración e investigación en el modelo hidráulico:

- a) El Río Piura en la zona de las ciudades de Piura y Castilla ya tiene un cauce formado, con un sistema parcial de protección ribereña y con infraestructura bien desarrollada (calles, sistema de transporte, edificios, sistema de agua potable y alcantarillado y otros), que prácticamente impide cambios drásticos en la forma del cauce. Por esto los ensayos en el modelo hidráulico no incluyen variantes con los cambios drásticos de forma y dimensiones del cauce actual.
- b) Una limitación para definir las cotas de coronación de las defensas ribereñas es conservar la accesibilidad entre Piura y Castilla.
- c) El Río Piura dentro de la ciudad tiene reducida su capacidad hidráulica, dado que el ancho del río se reduce a menos que 100 m, en comparación con más de 1000m en la zona fuera de la ciudad. Por este motivo los ensayos del modelo han tenido como criterio principal garantizar y conservar la capacidad más alta posible, dentro de las limitaciones existentes.
- d) Teniendo en cuenta los parámetros arriba especificados, en el caso de la protección ribereña del río Piura, no tiene sentido preestablecer un caudal de diseño, dado que los varios parámetros mencionados anteriormente no permiten cambios importantes de la caja hidráulica. En este sentido el modelo hidráulico ha procedido con una gama de caudales típicos, combinados con otros parámetros que influyen en la capacidad máxima del cauce, como erosión, sedimentación, niveles máximos del pelo de agua en la zona del puente Cáceres y variación de los niveles aguas abajo del modelo, con el objetivo de analizar varios escenarios que pueden ocurrir durante el periodo de avenidas.
- e) Dadas las limitaciones arriba especificadas, la posibilidad principal de aumentar la seguridad de la operación del sistema de protección y reducir el peligro de la inundación es construir un sistema de protección que tenga alta seguridad de operación y que garantice, al mismo tiempo, una capacidad máxima del cauce. Por esto el modelo ha analizado la posibilidad de eliminar todas las estructuras existentes que se encuentran en la zona del flujo principal del río Piura (casas, estructuras antiguas, muros y otros)
- f) La experiencia de las avenidas anteriores indica que la zona de máximo peligro de inundación es la zona del puente Cáceres, dado que aguas abajo usualmente los niveles de agua son mucho más bajos y no ponen en peligro esta parte de la ciudad. En este sentido siempre se ha tomado el puente Cáceres como punto de control y determinación de los niveles máximos.

- g) El parámetro de sedimentación y erosión tiene un impacto muy importante en la seguridad del sistema de protección. En función de la ocurrencia y secuencia de las avenidas, las avenidas criticas que pueden provocar inundaciones en la zona de la ciudad, pueden llegar a un cauce erosionado, que reduce el peligro de inundación, o también a un cauce sedimentado que aumenta de manera considerable el peligro de inundaciones. Por esto se ha dedicado atención especial a este problema, analizando, bajo varias condiciones de flujo, el comportamiento del río y del sistema de protección seleccionado en función de los procesos de erosión.
- h) Durante las investigaciones en el modelo se ha aplicado el criterio de que las estructuras del sistema de protección deben ser diseñadas de tal manera que garanticen la seguridad de la operación bajo condiciones de extrema erosión, que puede ocurrir en el caso de la combinación de los efectos más adversos.

Figura 2.1 : Geología y geotecnia.



CAPITULO 3

3. SEDIMENTACION

3.1. CONCEPTOS

3.1.1. Fenómeno de la sedimentación.

El fenómeno de la sedimentación se produce cuando las partículas que se encuentran en suspensión en aguas en movimiento disminuyen o pierden su velocidad debido a ensanchamiento del cauce, ingreso a estanques o lagunas. La mayor densidad de las partículas determina la precipitación de éstas dando lugar a los sedimentos. Estos pueden ser de origen mineral u orgánico.

3.1.2. Conceptos sobre erosión.

La erosión en un cauce es el descenso del fondo (o el retroceso de las orillas) como consecuencia de fenómenos de dinámica fluvial naturales o suscitados por obras del hombre. La erosión es también una respuesta del cauce a la falta de equilibrio entre las variables principales. Ya que una de estas variables, el caudal sólido, es de tan incierta cuantificación, es lógico que la erosión sea extraordinariamente difícil de prever.

Cabe distinguir la erosión general de la erosión local (figura 3.1). La erosión general del fondo se puede explicar por la acción de un flujo de agua caracterizado simplemente por una velocidad media. Afecta a tramos largos del cauce y sería la única y primordial en un cauce recto, prismático y sin ninguna singularidad. La erosión local del fondo se explica por la acción de un flujo más complejo, que una sección de la corriente (vertical u horizontal) requeriría una descripción bidimensional de las velocidades. Se presenta asociada a singularidades como obstáculos. La erosión local afecta a una pequeña extensión y el flujo local tiene una fuerte turbulencia y desarrolla vórtices. También puede hablarse de erosión general de orillas o márgenes en tramos rectos y de erosión local de orillas en tramos curvos. La erosión lateral.



Figura 3.1: Erosión general (izquierda) y erosión local (derecha)

Además de la distinción espacial puede hacerse una clasificación temporal de la erosión. Existe una erosión transitoria y una erosión permanente. La erosión transitoria es el descenso del fondo durante la fase ascendente de una avenida. Cuando crece la avenida y la superficie libre sube, desciende por su parte el fondo de un cauce aluvial. Cuando decrece la avenida y baja la superficie libre, asciende el fondo rellenando el espacio erosionado de forma transitoria.

Una inspección tras la avenida puede encontrar que el cauce tiene el fondo a la misma cota pero ello no debe engañarnos sobre el estado del fondo durante la avenida. Para describir este fenómeno se dice a veces que el cauce "respira". El área que la erosión transitoria deja libre puede contribuir al desagüe en forma significativa. A la diferencia entre el estado inicial y el estado final, si existe, puede llamársele erosión residual.

Aparentemente la causa de la erosión transitoria es que la tensión en el fondo aumenta al crecer la avenida, pero esta no es una explicación satisfactoria si no hay un desequilibrio entre la capacidad de arrastre y los sedimentos aportados desde aguas arriba. Sin embargo, si el Hidrograma y el diagrama de caudal sólido presentaran un desfase en sus momentos más significativos (el valor punta) se explicaría la existencia de una fase de ascenso del Hidrograma con déficit de sólidos (subalimentación) y erosión, seguida de una de descenso del Hidrograma con superávit de sólidos (sobrealimentación) y sedimentación (figura 3.2).

El fenómeno de la erosión transitoria es aún debatido y no parece tan claro en ríos con gran transporte sólido (ríos de gran pendiente). La erosión transitoria puede ser general o local.



Figura 3.2: Hidrograma y sedimentograma de una crecida.

La erosión permanente es una erosión a largo plazo ocasionada por un desequilibrio geomorfológico o causada por el hombre. Un río puede ofrecer de modo natural una tendencia a la incisión o socavación en los tramos altos y al relleno o sedimentación en los tramos bajos como evolución morfológica hacia un perfil de equilibrio.

Este último es un ejemplo de una erosión progresiva, es decir que avanza aguas abajo. Puede hablarse inversamente de una erosión regresiva que avanza aguas arriba. Esto es lo que ocurre cuando se destruye o elimina una obra transversal como un azud o traviesa (figura 3.3).



Figura 3.3: Erosión progresiva (izquierda) y regresiva (derecha).

3.1.3. Estudio de las erosiones.

La erosión del fondo del río en el lugar en el que se implanta el puente es la causa hidráulica más frecuente de fallo, cuando afecta a cimentaciones imperfectas o insuficientes. A menudo la erosión es invisible porque todo ocurre bajo el agua y por eso podemos ignorar el problema hasta que se manifiesta irreversiblemente como un fallo. La erosión es la combinación de distintos procesos, unos de largo plazo y otros transitorios (avenidas): aunque la mayoría de los fallos ocurren durante las avenidas también los procesos a largo plazo pueden llevar al fallo del puente, que entonces se presentaría inesperadamente.

La erosión para un puente se analiza como erosión potencial y tiene carácter de estimación. Las componentes de la erosión específicas en el caso de un puente son dos:

- La erosión en la sección del puente y sus inmediaciones, debida al estrechamiento causado por el puente con respecto a la anchura ocupada por la avenida antes de existir éste (puede llamarse erosión localizada o por estrechamiento);
- La erosión local en pilas, estribos y otros elementos mojados o rodeados por la corriente.

Las erosiones localizadas y local se calculan mediante expresiones de la erosión máxima que se desarrollaría si la acción hidráulica (el caudal de avenida) durara indefinidamente. Ya que esto es irreal, las estimaciones se consideran del lado de la seguridad. Por otro lado estas, estas erosiones localizada y local se suman a la erosión general del río para obtener la erosión potencial total. La cual mantiene el periodo de retorno del caudal de cálculo.

La cifra de erosión potencial debe compararse con la potencial o espesor real del lecho granular, conocida mediante calicatas, sondeos o ensayos geofísicos.

Naturalmente la erosión potencial no será real si la roca se encuentra a menor profundidad. Los materiales cohesivos también son erosionados, pero más lentamente (o tan lentamente que son erosionables a efectos prácticos); es muy desconocido tal proceso de erosión. Algunos materiales cohesivos como rocas detríticas débilmente cementadas o rocas lajosas (horizontalmente) pueden ser de hecho muy erosionables.

Otras veces un material resistente, que mantiene limitada la erosión, descansa sobre uno menos resistente pero aquél es un estrato delgado que puede desaparecer y acelerarse entonces la erosión.

Otra información interesante es la granulometría de lecho granular. No obstante, el tamaño D tiene poca importancia en los fenómenos de erosión localizada y local, menor importancia que en los procesos de erosión general. La desviación típica de la distribución granulométrica es más importante porque indica la posibilidad de acorazamiento.

La erosión localizada puede estimarse mediante la fórmula de la erosión por estrechamiento. Esta estimación se considera del lado de la seguridad porque un puente es un estrechamiento muy corto, a diferencia de los estrechamientos vinculados a encauzamientos. Una expresión muy semejante, pero un poco más elaborada, preparada para un río con cauce principal que transporta un caudal Qo, en ausencia de puente, si el caudal total es Q, es:

$$Y_2/Y_1 = (Q/Q_0)^{0.86} (B_1/B_2)^{0.59 \cdot 0.69}$$
 $e = Y_2 - Y_1$

3.1.3.1. El fenómeno de la erosión local en pilas.

La erosión causada por el flujo alrededor de obstáculos, como pilas de puente, se llama erosión local. Físicamente el fenómeno consiste en que alrededor de la pila se dan velocidades localmente mayores que las medias de la corriente, acompañadas de un sistema de vórtices frontales, laterales y de estela detrás de la pila. Este sistema de vórtices es el principal responsable de la socavación. Los granos del lecho son 'aspirados' por los vórtices y el fondo parece hervir por el movimiento de los granos. El foso que se forma rodea a la pila, con la mayor profundidad y extensión situada en la cara frontal (figura 3.4).

Como en otros fenómenos de erosión, hay una dependencia mutua entre el flujo y el foso de socavación, de manera que a largo plazo, si las condiciones hidráulicas son permanentes, se alcanza un equilibrio en la forma y tamaño de los fosos.



Figura 3.4: Hidrodinámica y morfología de un foso de erosión local (alzado y planta)

Es sorprendente la magnitud de estos fosos u hoyos, situados precisamente donde más daño puede hacer al puente. La patología típica de un fallo por erosión local es que la pila se hunde y bascula o vuelca hacia aguas arriba (figura 3.5).



Figura 3.5: Patología típica de un fallo por erosión local.

Hay dos modalidades distintas de erosión local en pilas: en la primera la corriente no es capaz de poner en movimiento el material del lecho del río, pero los vórtices si son capaces de socavar la pila (se llama erosión de aguas claras).

La erosión local empieza con una velocidad que es aproximadamente la mitad de la velocidad de umbral para el lecho en general. En la segunda modalidad (normalmente presente en avenidas) existe un transporte general de sedimentos en el lecho al mismo tiempo que la erosión local (erosión en lecho vivo). La naturaleza del equilibrio del foso es distinta en uno y otro caso: en el primero, no existe erosión en el foso una vez alcanzado el equilibrio, mientras en el segundo caso la cantidad de material transportado por la corriente que entra en el foso se compensa con la cantidad que sale.

Curiosamente los fosos de equilibrio en las mismas condiciones permanentes son aproximadamente iguales (figura 3.6). Por otra parte, el foso máximo parece formarse si la corriente es tal que el fondo está en el límite entre el estado de reposo (aguas claras) y el de movimiento general del lecho (lecho vivo), o sea en condiciones de umbral del movimiento (figura 3.6). Estas propiedades son de aplicación posterior a los modelos reducidos.



Figura 3.6: Erosión local en pilas según la velocidad de la corriente.

3.1.4. Formas de fondo.

El fondo de un río con transporte de sedimento, es decir habiendo superado el umbral del movimiento, puede presentar una configuración no plana sino ondulada siguiendo las llamadas formas de fondo. Las formas de fondo tienen importancia porque participan en el transporte de sedimentos y porque intervienen decisivamente en la resistencia al flujo (rugosidad).

Las formas de fondo ocurren con toda propiedad en lechos de arena, mientras que en ríos de grava y en ríos con materiales gruesos de granulometría extendida parece ser que se presentan limitadamente o no se presentan. Esto restringe considerablemente la importancia práctica de esta cuestión, porque pocos de nuestros ríos son ríos de arena.

Al comenzar el movimiento en un lecho de arena e ir aumentando la velocidad se presentan en este orden las siguientes formas: arrugas, dunas, lecho plano y antidunas. Las arrugas (o rizos o ripples) son pequeñas ondulaciones con altura máxima del orden de centímetros y longitud de onda máxima del orden de decímetros. Sólo aparecen con arena fina (<0.6 mm) y su presencia indica que el movimiento no es turbulento rugoso en el fondo (o sea, la subcapa límite granular recubre el grano.)

Las dunas son ondulaciones también triangulares pero con taludes muy diferentes: el de arriba es muy suave y el de aguas abajo muy marcado. El tamaño de la duna es de un orden de magnitud mayor que el de las arrugas, pero además está en una proporción constante con el calado. La superficie libre se ondula suavemente en oposición al fondo (descenso sobre la cresta y ascenso sobre el valle) lo que indica que el régimen hidráulico es lento. Las dunas migran hacia aguas abajo; su movimiento es el resultado del avance de los granos sobre la pendiente suave para quedar atrapados tras la cresta (figura 3.7).

El transporte de fondo en lechos de dunas se puede cuantificar a través de su velocidad de avance.

Aumentando más la velocidad, las dunas se alargan hasta ser barridas, quedando un lecho plano o de transición con transporte de sedimento. Con una velocidad mayor, el lecho se ondula en formas simétricas llamadas antidunas que pueden migrar aguas arriba, pese a verificarse un fuerte transporte de sedimentos aguas abajo. La superficie libre presenta una fuerte ondulación en consonancia con el fondo, lo que indica que el régimen hidráulico de la corriente es rápido. La evolución de este régimen conduce a la aparición de crestas de espuma y finalmente verdaderos resaltos hidráulicos. En ocasiones, se añade a la clasificación de formas una llamada "rápidos y pozos" que es el punto final de la evolución indicada y se presenta en ríos de gran pendiente (figura 3.7). Estos hechos sugieren la idea de que el régimen rápido no ocurre de forma estable y prolongada en los cauces naturales por el hecho de que el fondo es deformable y móvil.

Cada forma de fondo añade a la resistencia de flujo debida al tamaño del grano una resistencia de forma. Esta es lógicamente mayor con las dunas que con las arrugas o con el lecho plano. Por otro lado, este último coincide aproximadamente con el régimen crítico (número de froud=1), separando las formas de fondo de régimen subcrítico o lento (arrugas y dunas) de las de régimen supercrítico o rápido (antidunas).



Figura 3.7: Formas de fondo: arrugas (a), dunas (b), antidunas (c), rápidos y pozos (d).

En ríos de granulometría gruesa y extendida se presentan formas de fondo de mayor escala y desarrollo longitudinal, llamadas barras.

3.1.5. Transporte de sedimentos.

3.1.5.1. Conceptos fundamentales de transporte.

El lecho de un canal se puede clasificar normalmente como, de fondo móvil o de fondo fijo. Se dice que es de fondo móvil cuando se presenta un transporte continuo de partículas constituyentes del fondo, este material es proveniente de la erosión de la cuenca como consecuencia de las lluvias y de otros agentes que se presentan sobre ella.

Cuando el escurrimiento del fluido se da sobre un fondo fijo se pueden establecer ecuaciones determinadas como la de Chezy por ejemplo, que relaciona las variables fundamentales como son: gasto, sección transversal e inclinación.

Pero cuando se trata de un río de fondo móvil resulta más compleja la selección apropiada de las variables, puesto que en estas condiciones se pueden presentar cambios en la sección transversal, inclinación y rugosidad.

Capacidad de transporte, se llama así a al máxima cantidad de material sólido que es capaz de transportar una corriente de agua. Este valor es teórico, ya que generalmente un río transporta cantidades menores que su máxima capacidad, debido a la naturaleza de la cuenca y del lecho.

3.1.5.2. Factores que afectan al transporte y deposición de sedimentos.

La cantidad de material transportado o depositado en la corriente de agua bajo ciertas condiciones establecidas es el resultado de dos grupos de variables.

En el primer grupo se encuentran las variables que influyen en la calidad y cantidad de sedimento llevado a través de la sección de la corriente.

En el segundo grupo se encuentran las variables que influyen sobre la capacidad de transporte de sedimento. A continuación se proporciona una lista de dichas variables.

A. Grupo I: Sedimento acarreado por la corriente :

A) Calidad: Tamaño, velocidad de sedimentación, gravedad específica, forma, resistencia al gasto, estado de dispersión y cohesión.

B) Cantidad: Geología y topografía de desaguadero, magnitud, intensidad, duración y distribución de las lluvias, cubierta vegetal, cultivos y forrajes, superficie de erosión y sección de bancos.

B. Grupo II: Capacidad de la corriente para transportar sedimentos.

A) Propiedades geométricas o forma del prisma de la corriente, fondo forma, ancho y alineación.

B) Propiedades hidráulicas de la corriente del canal: pendiente, radio hidráulico, rugosidad, descarga, velocidad, distribución de velocidades del fluido y uniformidad de descarga.

Las variables del grupo I están sujetas a variaciones, la cual dificulta la cuantificación del sedimento por un largo periodo de tiempo, quedando como alternativa efectuar mediciones periódicas y registrarlas.

Las variables del grupo II están más sujetas al análisis matemático y predicción. Estas están muy relacionadas a las variables hidráulicas controlando la capacidad de la corriente en el arrastre de arena.

La carga del sedimento fino es controlada por las variables del grupo I.

3.1.5.3. Modos de transporte

Los sedimentos de un cauce natural se mueven básicamente de dos maneras, como sedimentos en suspensión en el flujo o como carga de fondo que se desliza y rueda a lo largo del lecho del canal.

Algunas veces se emplea también un tercer término, el de saltación, para definir algunos sedimentos que parecen rebotar contra el fondo del canal. Estas tres formas de transporte pueden presentarse sucesivamente para un mismo material de fondo con diferentes velocidades de flujo.

La figura 3.8 muestra estas tres formas posibles de transporte de sedimentos.



Suspensión.

Figura 3.8: Formas de transporte de sedimentos.

Aunque no existe una proporción definida entre las cantidades de material sólido de fondo y de suspensión, normalmente el gasto sólido en suspensión es mayor que el gasto sólido de fondo.

Siendo el gasto sólido el volumen o peso de sólidos que atraviesan una sección determinada en la unidad de tiempo.

No existe una línea aguada entre saltación y suspensión, pero esta distinción es importante porque permite delimitar los métodos hidráulicos de transporte que siguen diferentes leyes.

3.1.6. Comportamiento de los cauces estrechos o estrechados.

En un cauce de lecho fijo rectangular que presenta un tramo estrecho el régimen hidráulico es lento y la superficie libre refleja las propiedades de las transiciones en lámina libre: en un estrechamiento disminuye el calado (se acelera la corriente) y en un ensanchamiento aumenta (figura 3.9). Pues bien, la superficie de un río nunca se comportaría así porque las variaciones del lecho móvil del río transforman el perfil hidráulico. En el tramo estrecho es mayor el caudal unitario y por lo tanto el fondo se verá expuesto a la erosión. Según la expresión Qs.D^{3/2} \leftrightarrow Q². I² / B, el equilibrio se restablecerá nuevamente con una pendiente menor, concretamente una pendiente tal que i/ \sqrt{B} = cte, siendo B la anchura. De este modo la capacidad de transporte sólido (qs) del tramo ancho y estrecho se igualan, condición necesaria para el equilibrio. En el tramo estrecho la pendiente disminuye y se produce simultáneamente un descenso del fondo (figura 3.9).



Figura 3.9: Explicación del comportamiento de un cauce estrechado.

La erosión en el tramo estrecho se puede propagar como erosión regresiva. Pero lo más interesante es que el perfil hidráulico se modifica desapareciendo en la superficie libre el efecto de depresión de la lámina. El flujo en fondo móvil es semejante a una doble transición (en anchura y fondo). En sentido dinámico puede decirse que una causa (estrechar) intensifica la acción hidráulica sobre el fondo (q) lo que produce un efecto (descenso de fondo) que relaja la intensidad de la acción. No hay efecto, pues, sobre la superficie libre, sino sobre el fondo. Inversamente, un ensanchamiento tiene efecto sobre el fondo (asciende) pero tampoco sobre la superficie libre.

Los ríos en estado natural son sucesiones de ensanchamientos y estrechamientos, de modo que este comportamiento del fondo tiene importancia práctica. Además cuando suben las aguas se acentúa el descenso del fondo del tramo estrecho mientras crece el fondo del tramo ancho, volviéndose al estado anterior cuando bajan las aguas (figura 3.10). Este comportamiento tiene un paralelismo con los fondos en una curva (figura 3.10). Con caudal pequeño el agua está remansada en los pozos u hoyas y se acelera, como si fueran rápidas, en los vados. El aumento del caudal significa aumentar la pendiente motriz dando erosión de fondo en la zona curva del thalweg y lo contrario en la zona de inflexión. Cuando bajan las aguas vuelven los fondos a su posición anterior. En caso de crecida, la corriente trata de ser manos sinuosa que el thalweg.



Figura 3.10: Explicación del comportamiento de un cauce en curva.

Un efecto semejante al de estrechamiento se presenta en un río con cauce principal y llanuras de inundación cuando se dan circunstancias como: revegetación de la llanura o aumento de su rugosidad, reducción de anchura de la llanura o elevación de la cota de llanura.

En resumen, un cauce estrecho en exceso puede originar problemas de erosión y con ello descalce de muros, etc. En un cauce ancho en exceso, por el contrario, se formarán barras por depósito de material, que el río no es capaz de transportar, y con ello se perderá capacidad hidráulica.

Hay otra observación empírica muy interesante en los estrechamientos: la de que la anchura y el calado guardan una relación del tipo $B.y^{\infty}$ =cte. Donde ∞ es un coeficiente cuyo valor más repetido es ∞ =15. Algunos autores llegan a valores algo mayores de ∞ cuando el transporte de sólido es de material grueso (ríos de grava) y otros llegan a valores menores cuando el caudal sólido es pequeño (hasta el valor ∞ =1 cuando qs=0). De la relación anterior se deduce la siguiente fórmula $Y_2/Y_1 = (B_1/B_2)^{0.67}$. Esta fórmula se emplea para estudiar el efecto de un estrechamiento pues la diferencia de calados $Y_2 - Y_1$ puede tomarse como una medida de la erosión del fondo (figura 3.11).



Figura 3.11: Erosión del fondo por estrechamiento.

3.2.PROBLEMATICA DE LA EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN

3.2.1. Determinación del tamaño de las partículas.

Generalmente, los lechos de los ríos pueden ser granulares o cohesivos. En el caso del río Piura, en la zona urbana, básicamente se trata de un lecho constituido por partículas sueltas y de diferentes tamaños, resultado de la erosión en la cuenca del mismo río. Aparte del material principalmente suelto, también se pueden observar algunos tramos del río con el zapallal, material rocoso, que parcialmente representan zonas del lecho cohesivo. Sin embargo, analizando toda la zona urbana, se puede decir que el río Piura tiene las características principales de un río aluvial, dado que discurre sobre el material transportado por el propio río en el pasado, formando su lecho granular.

En el caso de la sedimentología del río Piura, la propiedad individual de las partículas del lecho granular que más importancia tiene, es el peso del material sólido. Según los resultados obtenidos de las investigaciones de campo y en comparación con otros ríos, se puede decir que el río Piura presenta partículas con peso específico similares a otros de este tipo o cerca de $\gamma_s = 2,60t/m^3$. Por eso, el parámetro que influye de manera significativa en el proceso de erosión y sedimentación en la cuenca del río Piura, es el tamaño de la partícula, como representación del volumen.

Para representar el tamaño de las partículas del lecho se usa la curva granulométrica, donde Dn es el tamaño, tal que el n% del peso del material es menor que él. De tal manera que si n₁ > n₂ entonces Dn₁ >Dn₂. El parámetro que frecuentemente se usa para definir la granulometría de un lecho es D₅₀, tamaño medio de la distribución, o como sustituto del diámetro medio. El análisis detallado de la problemática de la granulometría del río Piura se presenta en capítulo 3.4.

Tamaño	Denominación
D< 0,004 mm	arcilla
0,004 mm < D < 0,062 mm	limo
0,062 mm < D < 2,0 mm	arena
2,0 mm < D < 64 mm	grava
64 mm < D < 256 mm	cantos
256 mm < D	bolos

Tabla N°3.1: Denominación de las partículas en la cuenca del río Piura en función del tamaño, según la terminología internacional.

En el caso de la zona urbana del río Piura se puede decir que el lecho principal es de limo y de arena, con las características detalladas en el capítulo 3.4.

3.2.2. Principio de movimiento

Un lecho granular del río Piura que soporta la circulación de una corriente de agua, verá en algún momento desplazada la partícula por la fuerza del arrastre del agua. Uno de los problemas más complicados del análisis sedimentológico en un río, es saber en qué condiciones ocurre este movimiento inicial, usualmente denominado condición crítica del movimiento de fondo. Este problema es uno de los más estudiados, pero por su gran variación, número de parámetros que lo influyen y que son específicos para cada río; no se puede decir que la investigación está terminada y que existe una solución simple y general para este fenómeno.

El conocimiento que se tiene proviene principalmente de ensayos en laboratorio con arenas uniformes y aunque no hay un acuerdo completo, existe un consenso general, que para este tipo de estudios se pueden usar los resultados de Shields (1936).

Según estos resultados la acción de agua sobre el fondo puede caracterizarse por una tensión cortante en el fondo:

 $\tau = \frac{\tau}{(\gamma s - \gamma) D}$ o tensión adimensional

 τ Compara como cociente la fuerza promotora del movimiento (acción de arrastre proporcional a $\tau_0 D^2$), con la fuerza estabilizadora (peso proporcional a ($\gamma s - \gamma$) D^3). Como primera aproximación la tensión de fondo vale:

 $\tau_o = \gamma RI$, donde "R" es radio hidráulico y la "I" pendiente motriz.

La acción del agua sobre el fondo puede representarse también por una velocidad característica, llamada velocidad de corte (V*). Esta velocidad se define convencionalmente a partir de la tensión τ_0 como:

$$\tau_{o} = \rho^{2} * V^{2} * \delta V^{2} * = \sqrt{\left(\frac{\tau_{o}}{\rho}\right)}$$

Según el análisis de Shields se propone un límite de principio de movimiento. Debajo de este límite (ábaco de Shields) no hay movimientos. La tensión adimensional debe alcanzar el valor límite, para llegar al movimiento. Como D participa en denominador de τ , la tensión había de ser lógicamente mayor, cuanto mayor es el tamaño de la partícula, dado que cuesta más mover una partícula gruesa que una fina. Otro parámetro que influye en este fenómeno es el grado de turbulencia, definido como número de Reynolds:

$$Re_* = \frac{V_* \times D}{v}$$
, donde v es viscosidad

El número de Reynolds granular refleja como cociente el valor relativo de las fuerzas de inercia y las viscosas en el entorno de un grano, es decir, el grado de turbulencia. A mayor Re* el movimiento es más turbulento alrededor de la partícula. De hecho, cuando Re* > 70 el movimiento se llama turbulento rugoso, ya que la altura del grano D es mayor que la subcapa límite laminar. En el movimiento turbulento rugoso, la tensión necesaria para iniciar el movimiento o tensión crítica ya no depende del número de Reynolds. En este caso es:

$$\begin{array}{ll} \tau_{o} & \\ \hline & \\ (\gamma s \ -\gamma) \ D & \end{array} = 0,056$$

Teniendo en cuenta los parámetros de flujo del río Piura, especialmente durante el período de avenidas, se puede decir que el número de Reynolds para el cauce principal es más de 70 y que se trata de un flujo turbulento rugoso, determinando que el límite de movimientos en este caso se puede establecer como:

 $\tau_o = 0.056 (\gamma s - \gamma)$. $D = \gamma RI = \gamma hI$

Para un canal ancho, el radio hidráulico y el tirante prácticamente coinciden: R = h, de tal manera que a partir de la relación anterior es posible determinar el tirante mínimo necesario para iniciar el movimiento del lecho en el río Piura, asumiendo el $D_{50} = 0.3$ mm como diámetro característico:

 $\gamma hI = 0,056 (\gamma s - \gamma). D_{50}$

 $h = 0.056 (\gamma s / \gamma - 1)$. $D_{50} / I = 0.056 (2.6 - 1) (0.0003) / 0.00037 = 0.073 m$

Este resultado teórico muestra que un tirante de tan sólo unos cuantos centímetros es capaz de poner en movimiento el material de fondo del río, lo cual significa que durante caudales normales, y más aun durante avenidas, todo el material de fondo se encuentra en movimiento y se podría suponer también que una alta fracción del material entra en suspensión dentro del seno del fluido en movimiento, como se explica posteriormente.

3.2.3. Transporte de sedimentos

El transporte de sedimentos por el río Piura puede clasificarse atendiendo a dos criterios: el modo de transporte y el origen del material.

Según el modo de transporte, el sedimento del río Piura puede ser transportado por suspensión, sostenido por la turbulencia del flujo o bien por el fondo, ya sea rodando, deslizando o saltando. Una partícula inicialmente en reposo puede ser transportada a saltos por el fondo cuando supera el límite de movimiento, pero si el río sigue creciendo, puede ser transportada luego por suspensión. Cuanto más intensa es la acción de la corriente, mayor es el tamaño del material de fondo que es puesto en suspensión y transportado de ese modo. En el caso del río Piura y especialmente durante los períodos de El Niño, que provocan impactos de sedimentación y erosiones fuertes, se puede decir que el transporte de sedimentos en el cauce principal es básicamente por suspensión, pero también existe transporte de fondo con los intercambios correspondientes.

El origen del material que se transporta a lo largo del río Piura puede ser el cauce o la cuenca hidrográfica del río. Se entiende que esta clasificación se refiere al origen durante los períodos de lluvias, que en la cuenca del río Piura ocurren cada verano y pueden ser muy intensas si son acompañadas con el impacto del Fenómeno El Niño. Es obvio que a largo plazo todo el material del cauce del río Piura tiene también su origen en la cuenca, por lo que significa que simultáneamente al transporte de fondo y suspensión con origen en el cauce, la corriente transporta material con origen en la cuenca. Este material es usualmente transportado por suspensión, por lo que ese modo de transporte suma el material de los dos orígenes distintos. Usualmente se asume que el tamaño de la partícula D = 0,065 mm separa el material de origen del cauce y de cuenca, en sentido que el material inferior a este procede mayoritariamente del lavado de la cuenca mientras que el superior procede del lecho.

El río Piura en el tramo urbano tiene exactamente este tipo de transporte de material sólido, donde usualmente el material suspendido representa hasta el 90% o más de todo el transporte sólido.

El material en suspensión del río Piura tiene gran repercusión en la formación del cauce del río Piura, especialmente aguas abajo de la zona urbana, sin excluir la importancia del transporte de fondo que también influye la morfología del río mismo, especialmente formando meandros.

Uno de los parámetros importantes que influye en el comportamiento del río es el equilibrio del transporte de sedimentos (en suspensión y por el fondo), que ocurre cuando éste no sufre modificaciones en su cota. Este equilibrio, así definido, proviene de un equilibrio entre las

acciones. Para tener una idea general de variables que influyen en este equilibrio, en el caso del río Piura, se pueden definir cuatro parámetros:

- Caudal líquido
- Caudal sólido
- Pendiente del río
- Tamaño de sedimento

Es conocido que los caudales líquidos y caudales sólidos de un río pueden estar equilibrados o no equilibrados. En este segundo caso, una corriente puede presentar un exceso de transporte de sólidos o un defecto, causando sedimentación o erosión respectivamente. El equilibrio también depende de la pendiente del río, donde la pendiente de equilibrio es éste que equilibra unos caudales sólidos y líquidos determinados. Por ejemplo, muchos sólidos y poca agua se equilibran formando una gran pendiente y viceversa. En tercer lugar, el equilibrio depende también del tamaño del material. Por ejemplo, el mismo caudal sólido de partículas más gruesas y el mismo caudal de agua se equilibran con una pendiente mayor o viceversa.

En el caso del río Piura y especialmente del tramo urbano se puede decir que dichos parámetros tienen una variación importante en el espacio y en el tiempo. Los caudales del río Piura en la zona del estudio pueden variar entre mínimos, de unos m^3/s , hasta miles de m^3/s . Es obvio que durante el período de avenidas el río no tiene equilibrio y ocurre erosión en este tramo, mientras que después de las avenidas el fenómeno es totalmente contrario y ocurre la sedimentación en varias zonas, especialmente en las de erosión anterior.

Analizando toda la zona del Estudio es obvio que el proceso de erosión es mucho más pronunciado en el tramo urbano (tramo A y tramo B), que en los tramos C y D, por razones de condiciones hidráulicas y especialmente por la morfología del cauce (estrechamiento importante en la zona urbana), determinando que la zona aguas abajo del tramo urbano, es la zona de sedimentación.

De la misma manera se puede analizar la influencia de la pendiente del cauce, dado que la pendiente alta en la cuenca alta y media provoca una erosión importante del cauce, los tramos con la pendiente menor se encuentra en estado de equilibrio relativo que depende de todos los otros parámetros (caudal líquido, caudal sólido y granulometría de gramo), mientras que la zona aguas abajo del tramo urbano, tiene una pendiente más reducida y como consecuencia, una sedimentación muy pronunciada. El impacto del diámetro de material sólido en el río Piura se puede observar analizando la erosión en la parte alta de la cuenca incluyendo quebradas a lo largo del cauce principal del río Piura. La ocurrencia de lluvias intensas en la cuenca alta provoca la erosión de material más grueso, que por su lado, una vez transportado en la cuenca media y baja, genera una sedimentación más pronunciada en esta zona y especialmente aguas abajo del tramo urbano.

Teniendo en cuenta los fenómenos de erosión y sedimentación en los tramos A y B (zona urbana), cabe distinguir la erosión general de la erosión local. La erosión general del fondo se puede explicar por la acción de un flujo de agua caracterizado simplemente por una velocidad

media. Este tipo de erosión afecta a los tramos largos del cauce y sería la única o primordial en un cauce recto, prismático y sin ninguna singularidad.

La erosión local del fondo se explica por la acción de un flujo más complejo, que en una sección de la corriente requeriría una descripción bidimensional de las velocidades. La erosión local afecta a una pequeña extensión y el flujo local tiene una fuerte turbulencia y desarrolla vórtices. En el caso del río Piura el fenómeno más importante es la erosión de orillas en tramos curvos que se llama erosión lateral y la erosión en la zona de las estructuras como pilares de los puentes.

Es obvio que el río Piura, en el tramo urbano, tiene ambos tipos de erosión. Por un lado, el tramo urbano tiene una erosión general más pronunciada que los tramos C y D, por la morfología del cauce y los parámetros hidráulicos correspondientes. Al mismo tiempo, el tramo urbano tiene curvas (zona del puente Cáceres) que provocan erosión lateral, como un tipo de erosión local. También es importante mencionar la erosión en la zona de los pilares de los dos puentes existentes que también es un ejemplo de la erosión local. Esta erosión ocurre como consecuencia de la distribución no uniforme de velocidades en la zona de los puentes.

Las velocidades más altas, provocadas por impacto de los pilares de los puentes y por la curva aguas arriba del puente Cáceres, ocurren en la zona del puente Cáceres provocando una erosión más profunda, comparada con la erosión general que ocurriría en la misma zona del caso de una sección recta y sin estructuras del puente. Por ejemplo, en la zona del puente se ha detectado erosión en los pilares, de más de 10m o mucho más que la erosión general durante el mismo tiempo.

Analizando los fenómenos de erosión es necesario tomar en cuenta la clasificación temporal de la erosión. Existe una erosión transitoria y una erosión permanente. La erosión transitoria es el descenso del fondo durante la fase ascendente de una avenida. Cuando crece la avenida y la superficie libre sube, desciende por su parte el fondo de un cauce aluvial. Cuando decrece la avenida y baja la superficie libre, asciende el fondo rellenando el espacio erosionado de forma transitoria.

Una inspección del río después de una avenida puede encontrar que el cauce tiene el fondo a la misma cota que antes de avenida, pero ello no debe engañarnos sobre el estado del fondo durante la avenida. Por eso el Consultor tomó medidas correspondientes para proteger las estructuras en las riberas y en el cauce del río, que pueden soportar impactos transitorios de erosión. Aunque durante un tiempo limitado estos impactos pueden provocar daños y/o colapso total de las estructuras de protección y por eso el tipo de protección seleccionado debe diseñarse de tal manera que garantiza la seguridad de estructuras y durante los fenómenos de erosión transitoria.

3.2.4. Estado actual de la erosión y sedimentación en el tramo urbano

El tramo del cauce del río Piura en la zona urbana tiene una forma muy particular en comparación con la forma del cauce del río aguas arriba y aguas abajo de la zona urbana. Aguas arriba y aguas abajo el cauce del río tiene un ancho de cerca de un kilómetro, mientras que en la zona urbana el cauce principal varía entre 100 a 150 m de ancho. Este cambio

drástico en la forma del cauce es consecuencia de la construcción de la ciudad misma y especialmente de la ubicación y forma de las estructuras en las orillas del río. En ambos lados del río existen estructuras urbanas (calles, sistema de protección contra avenidas, sistema de agua potable, de alcantarillado, de energía eléctrica, de telefonía y otros) que prácticamente impiden cualquier tipo de solución que implique la ampliación del ancho del cauce (Ver fotos 3.1 a 3.4).



Foto 3.1 : Depósitos de sedimentos acumulados aguas debajo de la represa los ejidos cuya remoción se contempla en el tratamiento de este tramo del río.



Foto 3.2: Situación actual de la margen derecha aguas abajo del Puente Cáceres cuya protección debe estar prevista antes de las próximas avenidas.



Foto 3.3 : Estructura "la peñita " en medio del cauce, cuya presencia provoca gran perturbación del flujo aguas debajo de la misma.



Foto 3.4: Badén aguas abajo del puente Bolognesi que representa un obstáculo para el normal flujo del río.

Según la inspección ocular de la zona del estudio y los datos de la topografía del cauce del río Piura en la zona urbana, antes y después de 1998, se puede generalmente concluir que en la zona urbana el fenómeno principal durante el impacto de El Niño 1998, fue erosión, mientras que la sedimentación generalmente ha ocurrido en la zona aguas abajo de la zona urbana Sin embargo, es necesario resaltar una vez mas que el proceso de sedimentación en el tramo aguas debajo de la zona urbana es transitorio y la forma del cauce en esta zona cambia durante las avenidas.

Dado que las orillas del río Piura, en el tramo urbano, por los trabajos de la protección ribereña y por las edificaciones en esta zona, prácticamente no pueden ser erosionadas, el río solo puede erosionar el fondo del cauce. El gran cambio del ancho del río en el tramo urbano, provoca velocidades mucho más altas que aguas abajo y aguas arriba del tramo urbano. La combinación de todos estos factores ha provocado la erosión generalizada en el tramo urbano, mientras que el material erosionado en el tramo urbano fue depositado aguas abajo, en el tramo donde las velocidades y las fuerzas hidráulicas del río bajan y se establecen condiciones para la sedimentación.

Este fenómeno ha ocurrido durante 1998, con la ventaja que los caudales han crecido de manera paulatina, permitiendo que cada caudal provoque una erosión progresiva en el tramo urbano incrementando las secciones transversales. Comparando los niveles del río Piura en 1998 (caudal 4.424m3/s) y en 1983 (3.200m3/s) se puede concluir que el río tenía los niveles máximos, menores durante 1998 que durante 1983, que sólo puede explicarse como consecuencia de la erosión generalizada en el tramo urbano.

Después del impacto de El Niño 1998 fue posible destacar grandes cambios en la forma del cauce del río Piura en la zona aguas abajo de la zona urbana, especialmente en la zona del dique Chato, donde se ha formado un cauce nuevo, con los niveles del fondo mucho mas altos que antes de 1998.

El material que ha levantado el fondo del río en esta zona ha llegado básicamente desde la zona urbana aunque probablemente hubo sedimentos de otros partes de la cuenca del río Piura. Después de las avenidas de 1998, el río Piura en la zona del Chato tenía una capacidad muy limitada de apenas 10 m^3 /s y cada caudal más grande desbordaba sobre los diques en la zona. Por esto fue necesario excavar el material sedimentado, formando un canal piloto y aumentando la capacidad hidráulica de este tramo del río Piura.

Aparte de la erosión generalizada, durante 1998 el río Piura ha soportado también la erosión local, especialmente aguas abajo de los puentes. Según las mediciones en la zona del puente Cáceres (aguas abajo de los pilares) se han detectado zonas de erosión alta de varios metros de profundidad, que han puesto en peligro la seguridad del mismo puente. Estos impactos, junto con otros impactos hidrodinámicos, han provocado la caída de dos puentes durante avenidas de 1998.

Es importante destacar que los puentes de la zona urbana soportan impactos hidráulicos muy fuertes, por un lado por que se ubican en una zona con la aceleración importante del río y por el otro lado por la forma no adecuada de sus elementos principales.

Por ejemplo, durante la construcción de los pilares no se ha analizado forma hidráulica de los mismos que puede disminuir turbulencia aguas abajo de los pilares y consecuentemente la erosión aguas abajo de los puentes, En el mismo tiempo el diseño definitivo y la construcción del puente Cáceres, incluye un cambio brusco del alineamiento del río, que también tiene un impacto negativo en la situación hidráulica en esta zona y consecuentemente en la erosión local. Uno de los trabajos que se realizará en este estudio será recomendar medidas, dentro de los límites establecidos, de control y de mejoramiento de la situación hidráulica actual.

Según las observaciones actuales parte de la erosión local en la zona de los puentes ha desaparecido entre 1998 y hoy día, como consecuencia de la sedimentación. Sin embrago es obvio que la seguridad de los puentes debe ser analizada en base de los datos de la erosión máxima, que aunque transitoria, tiene una duración e impacto suficiente para destruir pilares de los puentes, caso que desafortunadamente fue confirmado para río Piura y sus dos puentes caídos durante 1998.

3.3. TRABAJOS ANTERIORES RELACIONADOS CON SEDIMENTOLOGIA DEL RIO PIURA.

3.3.1. Generalidades

Desafortunadamente la problemática de la erosión y de la sedimentación en la cuenca del río Piura no fue analizada frecuentemente en el pasado y prácticamente no existe la documentación especialmente dedicada a esta problemática. En algunos documentos relacionados a hidrología del río Piura se habla de la problemática de erosión y de la sedimentación del río Piura, pero básicamente en nivel de análisis cualitativos, sin entrar en mayores detalles.

Las Consultoras tampoco han podido encontrar datos de las mediciones del transporte de sedimentos, realizados según los procedimientos internacionales que se aplican para los ríos similares a río Piura. Dentro del programa de las observaciones y mediciones hidrológicas en la cuenca del río Piura, realizada en 1992 por parte del Proyecto especial Chira – Piura, no figuraba como la obligación y práctica regular tomar las muestras y analizar parámetros de material sólido del río. Después de este periodo cuando los trabajos de observación y medición de los parámetros hidrológicos fueron transferidos a SENHAMI, tampoco se ha realizado un programa regular y organizado de las mediciones de los parámetros de sedimentologia del río.

Una de las explicaciones de la falta de mediciones de campo y de los análisis correspondientes del fenómeno de transporte de sedimentos puede ser el criterio aplicado a los trabajos de protección ribereña que consideraba que la importancia principal es de forma y de tipo de los sistemas de protección y no de los fenómenos de erosión y sedimentación en el cauce principal. Recién con las avenidas de 1983 y especialmente de 1998, se ha podido ver que el parámetro de erosión y sedimentación influye de manera muy importante el comportamiento y la seguridad del sistema de protección contra avenidas. Uno de los ejemplos más importantes es el hecho que durante 1983 los caudales de cerca de 3200 m³/s, que han pasado a lo largo de la zona urbana sin erosión previa del cauce principal, han provocado desbordes del río Piura, mientras que los caudales de mas de 4400 m³/s, en 1998, y con la erosión previa del cauce principal, no han provocado ningún desborde de la caja hidráulica en la zona urbana.

Por esto es obvio que en el futuro este fenómeno debe ser analizado con mucha mas atención y en base de un programa detallado de mediciones y observaciones de campo, realizadas por parte de una institución calificada y organizada para este tipo de trabajos. Como parte de este capítulo se presenta una propuesta general para los trabajos futuros de observación y medición de los procesos de sedimentación y de erosión.

3.3.2. Estudios anteriores

De los estudios anteriores, relacionados a la problemática de sedimentologia del río Piura, vale la pena destacar el estudio de IECO, 1968, "Desarrollo integral de las cuencas Tumbes, Chira y Piura del Perú". En este documento se mencionan mediciones realizadas durante meses de marzo y abril de 1965.

Estación	Concentración de
	sedimentos
	(gr./l)
Río Chira en Sullana	16,9
Río Piura en Piura	5,5
Río Piura en Ñacara	6,0
Río Quiroz en Tandapa	25,0
Río Quiroz en Zamba	18,7
Río Chipillico aguas arriba de la	16,6
bocatoma del canal	

Tabla N°3.2: Mayores concentraciones observadas según estudio.

En algunos otros estudios se pueden encontrar datos de las mediciones en la cuenca del río Chira y del río Tumbes, pero estos resultados no se pueden usar directamente para el análisis de la cuenca del río Piura, dado que la morfología, parámetros de erosión, hidrología, vegetación y todos los otros parámetros que influyen en los procesos de erosión en la cuenca del río Piura y en la cuenca de los ríos de Chira y de Tumbes, son bastante diferentes.

Sin embrago, en base de los datos de las mediciones futuras que se realizaran en la cuenca del río Piura, se puede establecer algún tipo de correlaciones con los parámetros de sedimentologia de otras cuencas y eventualmente aprovechar datos existentes en esta, para analizar mas detalladamente el fenómeno de erosión en la cuenca del río Piura.

3.3.3. Programa de investigaciones de sedimentología en la cuenca

El sistema existente de control de avenidas y del uso del recurso hídrico y su funcionamiento correcto y confiable requieren una investigación detallada y adecuada de todos los parámetros de sedimentologia de la cuenca del río Piura. Estas investigaciones deben realizarse de manera continua, sistemática, confiable y de acuerdo con los parámetros reales de la cuenca.

Por esto es indispensable realizar un programa de investigaciones de los parámetros de sedimentologia en la cuenca, con el objetivo de definir todos los parámetros necesarios para futuros estudios y trabajos de construcción y de mantenimiento del sistema de protección.

Para cumplir con este objetivo es necesario primero definir las ubicaciones de las estaciones donde se realizaran mediciones de los parámetros de sedimentologia. Al mismo tiempo se debe garantizar que la entidad encargada de realizar los trabajos de campo y los análisis de los resultados obtenidos, posea todo el equipo estándar para este tipo de mediciones, conocimiento de los procedimientos correspondientes y equipo necesario de procesamiento de datos. Las investigaciones y los registros hidrológicos en cada estación deben ser permanentes y confiables.

Con el objetivo de definir el transporte real de las partículas sólidas es necesario establecer un control y una medición adecuada del transporte de sedimentos en la sección de la represa Los Ejidos, incluyendo mediciones correspondientes en los intervalos menores de cinco años, incluyendo la batimetría de la represa Los Ejidos con el objetivo de determinar el proceso de colmatación y el volumen útil del embalse. La batimetría debe realizarse a través de los perfiles estables y adecuados, que permitan la determinación optima del volumen muerto y volumen útil del embalse. Aparte de las mediciones en la sección de la represa Los Ejidos, se deben realizar mediciones en otras secciones seleccionadas para obtener datos de los cambios reales de los parámetros de sedimentologia en toda la cuenca del río Piura. Al mismo tiempo seria recomendable combinar estas mediciones con las mediciones en otras cuencas cercanas (Chira, Tumbes, Quiroz), para establecer correlación de los parámetros de sedimentologia entre las cuencas.

Con el objetivo de controlar el proceso de erosión y sedimentación aguas abajo de la represa Los Ejidos se deben organizar levantamientos periódicos de las secciones típicas del cauce del río Piura hasta la desembocadura. Este levantamiento topográfico debe realizarse obligatoriamente después de cada avenida grande.

En la misma represa Los Ejidos se debe establecer un sistema moderno de control de caudales y de niveles del embalse, incluyendo el control de los aportes del río y de las salidas correspondientes. De esta manera será posible controlar el balance hídrico en la zona urbana, recopilando y analizando todos los datos en la represa Los Ejidos o transfiriendo estos datos a un centro de control.

CAPITULO 4

4. MODELOS FISICOS.

4.1. ESCALA Y ANALISIS DE SEMEJANZA

4.1.1. Escala

Se eligió una escala de reducción apropiada a la investigación, para evitar que diversas fuerzas, no significativas en el prototipo pudieran adquirir importancia en el modelo.

Se decidió utilizar para la semejanza geométrica del modelo, la escala de 1:50 teniendo en cuenta varios factores:

- a) El caudal requerido en el modelo
- b) Alcances de la zona modelada y principales propósitos de la investigación
- c) Las mayores y menores dimensiones a ser reproducidas
- d) La ley de semejanza dinámica a ser aplicada
- e) La necesidad de efectuar estudios con lecho móvil
- f) Economía de la investigación

El modelo involucra aspectos que no permiten la distorsión de la escala de las dimensiones verticales, como por ejemplo los efectos morfológicos locales.

Tratándose de flujo con superficie libre, gobernado básicamente por los efectos de la gravedad, la semejanza dinámica del modelo se ha definido utilizando los postulados de la ley de Froude. La identidad de los números de Froude, aplicados al prototipo y al modelo, impide la identidad de los números de Reynolds en el modelo y prototipo. Para garantizar la independencia de los ensayos con respecto al número de Reynolds, se ha satisfecho la condición de identidad de regímenes de flujo (en el modelo y prototipo).

4.1.2. Análisis de semejanza

En el modelo deben cumplirse las semejanzas:

- a) Geométrica
- b) Cinemática
- c) Dinámica
- d) Del proceso de Transporte de Sedimentos

Parámetro	Símbolo	Escala
Longitud, ancho, altura	L, B, H	$L_{r} = 50$
Área	А	$L_r^2 = 2500$
Volumen	V	$L_r^3 = 125000$
Tiempo	Т	$L_r^{1/2} = 7.07$
Velocidad	v	$L_r^{1/2} = 7.07$
Caudal	Q	$L_r^{5/2} = 17677,7$
Coeficiente de Rugosidad	n	$L_r^{1/6} = 1.919$

 Tabla N°4.1: Escala de traslación según la ley de Froude.

Rugosidad:

Según análisis presentado en 2.4.3 se estimó la rugosidad del cauce en el tramo urbano como 0.033, valor que transformado a modelo según las leyes de semejanza es de 0.0172.

Con el valor de 0.017 se eligieron los materiales con los que se construiría el modelo con taludes de mortero y fondo móvil con arena y mortero (representación del estrato duro).

4.2. CONSTRUCCION E INFRAESTRUCTURA DEL MODELO

4.2.1. Construcción

La construcción del modelo, deberá permitir una adecuada investigación, para lo cual se ha seleccionado los materiales adecuados para conseguir una similitud en los valores de rugosidad.

El modelo tiene representada la topografía y la presencia de un estrato duro no erosionable en todo el cauce.

Se ha utilizado la información siguiente:

- a) Secciones transversales cada 100 metros, partiendo desde 500 metros aguas arriba de Cáceres hasta 500 metros aguas debajo de Integración, lo que permite la reproducción adecuada de la topografía.
- b) Secciones transversales en la zona del Puente Cáceres para modelarlo detalladamente
- c) Puente Sánchez Cerro.
- d) La Peñita.

Los materiales utilizados en el modelo son mortero para los taludes, madera para los pilares, arena de una granulometría elegida para el fondo (ver fotografías 4.1 y 4.2).
4.2.2 Infraestructura del modelo

El modelo cuenta con la infraestructura siguiente:

- a) En el modelo del río Piura el caudal máximo a pasar es de 310 l/s que equivale a 5500 m³/s en prototipo. La capacidad de bombeo disponible, es muy superior para el caudal máximo a modelar.
- b) Se ha construido un canal de ingreso al modelo, con capacidad suficiente para transportar el caudal máximo de ensayo.
- c) Se cuenta con un vertedero rectangular de pared delgada, que permitirá elegir el caudal que ingresa al modelo (ver gráfico 4.1, y fotografías 4.3 y 4.4). En el gráfico 4.1 se observa que para el caudal de 2250 m³/s se tiene una carga de 21.80 cm y para el caudal de 5500 m³/seg. se tiene una carga de 39.60 cm.
- d) Se dispone con 10 limnímetros para la determinación de los niveles a lo largo del modelo.
- e) Para la medición de las velocidades se utilizará un correntómetro que es sensible en el rango que se reproducirá en el modelo.
- f) Se dispone de 3 bombas, 2 de ellas tienen una capacidad de 150 l/s cada una y la tercera tiene 50 l/s.
- g) Se cuenta con una cisterna con un volumen de 150 m3.
- h) 02 tanques elevados conectados, con una capacidad total de 47 m³, para el suministro de la carga hidráulica.
- i) Se cuenta con dos equipos de nivelación, un teodolito y una mira milimétrica.
- j) Sistema de recirculación, conformado principalmente por un canal de 150 m³ de capacidad.
- k) 3 Compuertas de fondo ubicadas en la última sección del modelo (Km. 5+910), que permiten tener la posibilidad de ir disminuyendo la cota de la última sección del modelo, de tal manera que se pueda conservar la pendiente general del río. (ver fotografía 4.5). Sin estas compuertas la última sección estaría rigidizada y al presentarse erosión generalizada del cauce, la pendiente iría disminuyendo progresivamente.
- Compuerta de superficie que regula el nivel aguas abajo, de tal manera que no se produzcan curvas de depresión, con el resultado de un aumento de las velocidades y la disminución de tirantes. (Ver fotografía 4.6).
- m) Poza de aquietamiento al ingreso del modelo.
- n) Poza de decantación al final del modelo.



Foto 4.1: La zona elegida para la construcción del modelo físico se ha seleccionado teniendo en cuenta que sea posible abastecer al modelo del caudal máximo con la carga suficiente.



Foto 4.2: El modelo se ha construido dentro de un área cercada por muros de ladrillo y columnas cada 6 metros.





Fotos 4.3 y 4.4: Sistema de ingreso al modelo, en la que se muestra el vertedero para controlar el caudal de ingreso de agua.

4.3. Elementos principales del modelo

4.3.1. Tanque de aquietamiento.

A este tanque ingresa el agua que viene del tanque elevado. Sus dimensiones son 2m de ancho, 3.5 m de largo y 3m de alto.

La finalidad del tanque de aquietamiento es disminuir la energía con la que viene el agua (el tanque elevado tiene una carga de 6 metros), para esto se ha colocado una pantalla de acero, sobre la cual impacta el agua que transportan las tuberías del tanque elevado, logrando disipar la energía cinética, lo que permite el ingreso tranquilo y bien distribuido en la sección transversal del flujo.

4.3.2. Vertedero de ingreso.

El vertedero de ingreso es de forma rectangular, aquí llega el agua proveniente del tanque de aquietamiento, en este vertedero se regula y controla el caudal con que se ensayará. Sus dimensiones son 0.8m de ancho por 0.8 m de alto.

El caudal se regula según se muestra en la gráfica 4.1. La altura de agua se mide con un limnímetro y se va regulando el caudal con una compuerta ubicada en el tanque elevado.

Después del vertedero, se encuentra el canal que lleva el agua hacia una poza al ingreso del modelo, a lo largo de este canal, se han colocado mallas de aquietamiento, que cumplen la función de disipadores de energía.



Foto 4.7: Vista del vertedero de ingreso. Este permite el control del caudal de paso.

4.3.3. Poza de ingreso al modelo

Antes de ingresar al modelo, se cuenta con una poza, en la cual hay otra pantalla de aquietamiento, para que el agua ingrese al modelo con velocidad muy baja.



Foto 4.8: Se muestra la poza de ingreso al modelo. En la fotografía se aprecia la última pantalla de aquietamiento.

4.3.4. Compuertas de fondo.

Son tres y se encuentran ubicadas al final del tramo representado, las dimensiones de cada una son 0.55m de alto por 2m de ancho.

La finalidad de éstas es mantener la pendiente general del fondo constante, ésta operación se realiza conforme se vaya produciendo erosión a lo largo del modelo.

4.3.5. Compuerta de superficie.

Se encuentra ubicada en la parte inicial del canal de recirculación, sus dimensiones son 0.85 m de alto y 1 m de ancho.

Su finalidad es mantener el nivel de agua a lo largo de todo el tramo, para mantener las velocidades, ya que al ascender o descender el nivel de agua, varía el área hidráulica y consecuentemente la velocidad.



Foto 4.9: Se aprecia en la fotografía la compuerta de superficie en el canal de recirculación, que tiene el objetivo de establecer los niveles de agua adecuados para cada caudal y evitar los efectos de la caída en la última sección del modelo y las compuertas de fondo situadas en la sección final del modelo, con el propósito de poder ir bajando el nivel de dicha sección según la erosión generalizada que se vaya produciendo.

4.3.6. Canal de derivación

Luego de pasar por el tramo representado del Río Piura, el agua llega a un canal de derivación, cuyas dimensiones son 1.15m de alto por 1m de ancho, el cual lleva el agua hacia una poza de decantación.



Foto 4.10: Vista hacia el canal de recirculación que conduce hacia la poza de sedimentación.

4.3.7. Poza de decantación.

Debido a que el agua que ha circulado lleva algún contenido de finos, es necesario que éstos sedimenten para volver a utilizar el agua, para esto se cuenta con una poza de decantación, cuyas dimensiones son 3.5m de ancho, 6.5m de largo y 1 m de alto.

4.3.8. Cisterna de almacenamiento.

Después de que el agua está libre de sedimentos, ésta va a un tanque de almacenamiento para luego volver a circular por el modelo.

4.4. Proceso de ensayo

- Topografía de partida

Para condiciones de inicio de ensayo, se parte de topografía 2000.

- Establecimiento del caudal inicial

Se establece el caudal inicial con el cual se va a realizar el ensayo, se mide el pelo de agua con el limnímetro y se regula con la compuerta ubicada en la zona de ingreso de agua a las tuberías.

- Aumento paulatino del caudal en función de la capacidad

A medida que el agua va circulando, se va erosionando el lecho del río, lo cual origina un aumento en la capacidad, para mantener los niveles de agua se aumenta paulatinamente el caudal hasta llegar a una condición de equilibrio.

- Medición de niveles

Es necesario realizar la medición de niveles constantemente en las secciones de interés, para así garantizar que la velocidad se mantenga.

- Control de velocidades en la sección del puente Bolognesi.

Se toman las velocidades en el Puente Bolognesi, y se comparan con los datos reales con que se cuenta, se realizan las mediciones hasta que las velocidades en el modelo se aproximen a las reales, para que las condiciones del ensayo en el modelo sean similares a las reales.

- Establecimiento de niveles para caudales altos.

A medida que los caudales van aumentando, es necesario ir controlando los niveles de agua máximos en las secciones de interés.

- Medición de velocidades en las secciones de interés

En cada sección de interés se toman tres mediciones:

- > Una en la margen izquierda.
- > Una en la parte central.
- > Una en la margen derecha.

A su vez, en cada una se realizan tres mediciones verticales cada una a 0.2H, 0.6H y 0.8H, donde H es el tirante de agua en la sección.

- Cerrado de modelo

Al cerrar el modelo, el caudal se disminuye paulatinamente para evitar que haya mayor erosión en el fondo; ya que si el caudal disminuye de manera brusca, la velocidad del agua aumenta considerablemente y arrastra gran cantidad de material, lo cual originaría una erosión mayor a la real en el lecho del río.

- Levantamiento topográfico

Después de que se ha cerrado el modelo, se procede a realizar el levantamiento topográfico en las siguientes zonas:

> Secciones transversales.

Se realiza el levantamiento topográfico de las secciones transversales cada 100 metros para así determinar como varía el lecho del río luego de las avenidas.

> Zonas de erosión local

Se realiza el levantamiento topográfico en las zonas de mayor interés y que están más propensas a sufrir erosión local, las zonas más importantes son:

• Puentes

Los puentes son los puntos de mayor importancia en el estudio, ya que su serviciabilidad depende del grado de erosión al que estén sometidos.

• Peñita

La Peñita es un estrato duro que se ubica aguas arriba del Puente Bolognesi. La presencia de la Peñita tiene gran influencia tanto aguas arriba como aguas abajo, por eso es muy importante realizar el levantamiento topográfico de esta zona, luego de todos los ensayos, por ser muy propensa a erosión local.

Gráfico 4.1. Curva Q-h del Vertedero de Ingreso



Q prototipo (m3/s)

CAPITULO 5

5. PROGRAMA DE INVESTIGACION.

5.1 Introducción:

El programa de investigación se diseñó teniendo en cuenta el cumplimiento de los objetivos de la investigación, la información básica disponible (caudales, niveles de agua, cotas de erosión, velocidades en determinadas secciones de prototipo).

Debe indicarse que en los términos de referencia del estudio se indica que el modelo físico abarcaría el estudio de la erosión local y el modelo matemático el estudio de la erosión general, sin embargo se determinó que para brindar información adecuada al diseñador, se realizaría también la calibración del modelo físico para la erosión general. Un punto que influyó en esta decisión es que el modelo matemático no puede obtener adecuadamente el patrón de erosión en el tramo urbano (en otros tramos si), debido a la existencia de más de un estrato en dicho tramo. Las corridas del modelo matemático en este tramo se realizaron con las secciones erosionadas obtenidas del modelo físico, en este caso el modelo matemático brindó velocidades, cuadro de flujo con buena aproximación.

La investigación en el modelo físico se inicia con la calibración, fase en la que se garantiza un similar comportamiento del modelo con el prototipo y posteriormente a esto se realiza la investigación propiamente dicha.

Establecidos los nuevos objetivos de la investigación en el modelo físico, surge como una necesidad la representación de la topografía año 2000 y la geotecnia del prototipo. La topografía no representa mayor inconveniente, pero la geotecnia no está bien definida debido a que no existen relaciones certeras entre la resistencia determinada por ensayos de penetración estándar y resistencia a la velocidad cortante, más aún en casos en las que los estratos duros no son planos.

Debido a la dificultad de representar la geotecnia, se considera realizar el primer grupo de ensayos destinados a evaluar si efectivamente el estrato duro influye sobre la erosión, de no influir ya no se incluiría el estrato duro en las investigaciones posteriores. Para esto, se colocó solamente un estrato arenoso que iba desde la topografía 2000, en su parte superior, hasta la cota 12.00 msnm en la parte inferior (fondo rigidizado). Se eligió la cota 12.00 msnm a que la erosión en prototipo no llegaba a dicha cota.

Los resultados obtenidos confirmaron que el estrato duro influye significativamente en la erosión a lo largo del tramo modelado.

La siguiente tarea es aproximarnos a una adecuada representación del estrato duro, para lo cual se conservó la cota 12.00 msnm y se rigidizaron las riberas según información geotécnica de prototipo. Debido a que los resultados mejoraron, se comenzaron a establecer niveles de agua en el modelo, cuando los valores de velocidades entre modelo y prototipo coincidían. Luego de realizar éste ensayo se determinó que las riberas tenían un buen comportamiento y que el fondo en la cota 12.00 msnm era muy baja ya que las erosiones eran muy profundas al compararlas con las registradas en prototipo.

Se realizó un ensayo manteniendo las riberas rigidizadas y la cota de fondo se subió a la cota 15.00 msnm, agregando información del análisis de estabilidad estructural de las protecciones existentes. Analizando los resultados de los ensayos realizados, se puede afirmar que se logró establecer una buena aproximación de los parámetros (erosión, velocidades, cuadro de flujo) entre el modelo y el prototipo.

Al lograse establecer una similitud de comportamiento hidráulico y sedimentológico entre el modelo y el prototipo, el siguiente paso fue realizar exhaustivas mediciones de velocidades, niveles, erosiones a lo largo del tramo modelado, también se tiene listo el modelo para la realización de las pruebas para evaluar el comportamiento de la alternativa seleccionada.

Para seleccionar la cota del estrato duro (zapallal) se estudió el informe geológico, se realizó un reconocimiento de campo y se planteó la necesidad de obtener mayores datos a los disponibles, a través de estudios de estabilidad estructural de la protección, para llegar a una mejor representación del estrato duro.

Por ello se decidió realizar un ensayo teniendo el estrato duro en la cota 12.00 msnm como una primera aproximación y posteriormente ir consiguiendo una buena representación de éste a nivel espacial.

Las características generales de los ensayos son los siguientes:

- a) Para todos los ensayos el caudal durante el ensayo es fijo y se permite que discurra durante un tiempo lo suficientemente largo para provocar la erosión máxima correspondiente a este caudal. Cuando ocurre la erosión máxima y se realizan los trabajos de medición, el ensayo continúa con un nuevo caudal bajo las mismas condiciones.
- b) El inicio de un grupo de ensayos se realiza con la topografía levantada durante el 2000, permitiendo su erosión paulatina con cada caudal seleccionado. La pendiente longitudinal del modelo es 0.0021, que corresponde a la pendiente del río Piura en el tramo de estudio. Durante el ensayo se ajusta la compuerta de fondo de la última sección del modelo, de manera que le conserve la pendiente original.
- c) La ubicación y forma del estrato duro fue variable. (ver 5.3.1 ó 5.3.2).
- d) Los niveles típicos de agua en los Puentes Bolognesi (27.85 msnm) y Cáceres (30.50 msnm) fueron determinados según los datos obtenidos durante 1998 en el prototipo. Estos niveles se consiguieron operando la compuerta de superficie, situada en el canal de recirculación.
- e) Durante el ensayo se registraron las velocidades, niveles de agua, líneas de corriente, etc. Terminado cada ensayo se procedía al levantamiento de la topografía detallada resultante.

 f) Después de cada grupo de ensayos, en base de los datos obtenidos, se efectuó un minucioso análisis, volviéndose a determinar teóricamente un nuevo caudal posible, e iniciando el paso siguiente.

5.2 Alcance y Secuencia de ensayos

5.2.1. Alcance de ensayos

La calibración del modelo es una fase previa a la investigación propiamente dicha, que permite que diversos parámetros adopten valores semejantes al prototipo, esto quiere decir que al pasar un determinado caudal y establecer los niveles adecuados, se debe verificar que el patrón de erosión, velocidades, rugosidades, sean similares a las del prototipo.

De no presentarse valores similares, se tendrá que modificar las características del estrato duro, debido a su gran influencia en el patrón de erosión.

La calibración inicial se realizó con el fondo rigidizado en la cota 12.00 msnm. Estos ensayos tuvieron la finalidad de determinar la influencia de la presencia del estrato duro en los niveles de erosión. En los registros realizados, la erosión en las secciones transversales de los puentes Cáceres y Sánchez Cerro durante el fenómeno El Niño 1998 alcanzaba cotas de fondo del orden de los 17 msnm. Al tener el estrato duro en la cota 12.00, se permitió que la erosión no tenga restricciones para observar, en esas condiciones, su comportamiento.

Los resultados obtenidos mostraron que la configuración de la erosión en las secciones transversales de los puentes no correspondía a lo registrado en prototipo, encontrándose cotas de fondo notoriamente diferentes, confirmando de tal manera que seria necesario ajustar la forma y la ubicación del estrato duro.

5.2.2. Secuencia de ensayos para la calibración

La investigación se dividió en 2 fases principales:

a) Ensayo con la hipótesis del zapallal en la cota 12.00 msnm: Esta fase se divide a la vez en tres partes (Ver Gráficos N°:5.1, 5.2 y 5.3):

Gráfico N°5.1: Zapallal en la cota 12.00 msnm y fondo arenoso.



Este ensayo con fondo arenoso y zapallal en la cota 12.00 msnm. Se realizó con la finalidad de:

- Verificar si la cota promedio del zapallal era la 12.00 msnm.
- Analizar la distribución espacial del zapallal.
- Establecer el caudal máximo para las condiciones topográficas iniciales y finales.
- **Gráfico** N°**5.2:** Zapallal en la cota de fondo 12.00 msnm, zonas rigidizadas según la información geotécnica del prototipo, nivel de agua en Cáceres 30.50 msnm y nivel de agua en Bolognesi 27.85 msnm.



Gráfico N°**5.3:** Zapallal en la cota de fondo 12.00 msnm y zonas rigidizadas según datos de prototipo ajustadas con velocidades en modelo y prototipo.



b) Ensayo con la hipótesis del zapallal en la cota de fondo 15.00 msnm y zonas rigidizadas: Según resultados del ensayo anterior y análisis de estabilidad de la protección actual.

5.3.- Ensayos con la hipótesis del zapallal en la cota 12.00 msnm

5.3.1 Ensayo N°1: Zapallal en la cota 12.00 msnm.

5.3.1.1 Condiciones de ensayo

a) **Topografía:** Los ensayos en el modelo hidráulico se iniciaron teniendo representada la topografía 2000, realizada por las consultoras, la cual se muestra en el anexo A.

- b) Geología: El modelo tiene una capa rígida en la cota 12.00 msnm. Esto indica que existe una capa arenosa de espesor aproximado a 10 metros en prototipo.
 La formación dura, conocida como "La Peñita", no fue representada en este ensayo al no contar con suficiente información, sin embargo para los objetivos de este ensayo no era indispensable (para los futuros ensayos si se representó en el modelo)
- c) Caudales: Se estableció como criterio que durante todo el ensayo se busque un caudal máximo que pueda soportar el cauce, es decir, se establecen los niveles máximos sin que se produzca inundación en la ciudad. Estos niveles son los máximos registrados durante el fenómeno El Niño 1998, para el Puente Cáceres es 30.50 msnm y para el Puente Bolognesi es 27.85 msnm.

El caudal durante el ensayo fue constante y se permitió que discurriera durante un tiempo suficientemente largo como para provocar la erosión máxima correspondiente a este caudal. Cuando ocurría la erosión máxima; realizados los trabajos de medición, el ensayo continuaba con un nuevo caudal bajo las mismas condiciones.

5.3.1.2 Resultados

a) Niveles de Agua

Puente Cáceres: 30.50 msnm Puente Bolognesi: 27.85 msnm

b) Capacidad

La capacidad del cauce se define como el máximo caudal que puede transportar el cauce sin inundar la ciudad. Este máximo caudal varía gradualmente conforme el fondo va siendo erosionado por el paso de caudales, restableciéndose en todo momento los niveles en Cáceres 30.50 msnm y en Bolognesi 27.85 msnm para cada nuevo caudal.

El procedimiento es que se establece el caudal máximo que soporta el cauce y se espera que se consiga el estado de equilibrio, en ese momento se aumenta el caudal y se registra el nuevo valor de caudal.

Los caudales obtenidos fueron:

- 2250 m³/s - 2750 m³/s - 3000 m³/s - 3250 m³/s - 3500 m³/s

No se continuaron aumentando los caudales, debido a que esta fase era de calibración.

c) Erosión general

Con el caudal de 3500 m^3/s se presentó una erosión general de aproximadamente 3 metros, lo que indica que no llegó al estrato duro de fondo.

d) Erosión Local

Se analizó el comportamiento del fondo en los Puentes Cáceres y Sánchez Cerro, comparándolos con los registros del Fenómeno del Niño de 1998. La erosión local generada por el estrato duro "La Peñita" no fue estudiada.

 Tabla N°5.1: Erosión local en los Puentes Cáceres y Sánchez Cerro

Caudal	Erosión local en los Puentes Cáceres y Sánchez Cerro			
3500 m ³ /s	 Gráfico comparativo de la sección Pte. Cáceres: registro 1998 para Q = 3650 m³/s y resultado de modelo (Ver gráfico 5.4). Gráfico comparativo de la sección Pte. Sánchez Cerro: registro 1998 para Q = 3727 m³/s y resultado de modelo (Ver gráfico 5.5). 			

Tabla N°5.2: Parámetros de erosión en los Puentes Cáceres y Sánchez Cerro.

Sección	Parámetro	Modelo	Prototipo
Puente Cáceres Área (m ²)		1236.63	1159.00
	Perímetro (m)	150.50	144.52
	Radio hidráulico (m)	8.22	8.02
	Cota de fondo erosionada (msnm)	12.00	16.30
Puente Sánchez Cerro	Área (m ²)	963.56	775.00
	Perímetro (m)	127.30	120.08
	Radio hidráulico (m)	7.57	6.45
	Cota de fondo erosionada (msnm)	19.6	17.20

Conclusiones:

- Al comparar los patrones de erosión registrados en las avenidas de 1998 con el obtenido en el modelo hidráulico se encontraron diferencias sustanciales, lo cual significa que el estrato duro del prototipo influye significativamente en el proceso de erosión.
- A pesar de no seguir el mismo patrón de erosión, sin embargo las áreas hidráulicas en los Puentes Cáceres y Sánchez Cerro son similares. Esto indica que los parámetros de pendiente energética son semejantes entre modelo y prototipo.

- En la zona del Puente Cáceres se observa el efecto de curva, tanto en las líneas de corriente como en la erosión de fondo, este efecto se presenta mucho más marcado en el modelo debido a que no se ha rigidizado en esta ribera y la erosión se ha desarrollado en un estrato arenoso.
- En la zona del Puente Sánchez Cerro la erosión en el modelo más bien es rectangular, debido a que en esta zona el cauce es casi recto. Sin embargo, esto tampoco es real por la presencia en el prototipo de un estrato duro en la ribera izquierda, lo que hace que la erosión en la ribera derecha se profundice.
- **5.3.2.** Ensayo N°2: Ensayo con zapallal cota 12.00 msnm, zonas rigidizadas, nivel de agua en Cáceres 30.50 msnm y nivel de agua en Bolognesi 27.85 msnm para todos los caudales.

5.3.2.1 Condiciones de ensayo

- a) **Topografía:** Los ensayos se realizaron teniendo representada en el modelo la topografía 2000.
- b) Geología : Ajustada como consecuencia de lo observado en el ensayo anterior (notoria influencia de la necesidad de representar adecuadamente el zapallal), se realizó el análisis de la información de campo, comportamiento erosivo y de sedimentación de diversas secciones, el que sirvió para rigidizar diversos lugares en el modelo para obtener una mejor aproximación a lo real.

La formación dura, conocida como "La Peñita", fue representada en este ensayo. Para ello se empleó la información proporcionada por los trabajos de levantamiento de campo, la cual fue complementada con inspección de campo, registros fotográficos y fílmicos.

c) Caudales: Se estableció como criterio el buscar durante todo el ensayo el caudal máximo que pudiera soportar el cauce, es decir, lograr los niveles máximos sin que se produjera la inundación en la ciudad.

Para los caudales obtenidos, los niveles de agua se mantuvieron en 30.50 msnm en el Puente Cáceres y en 27.85 msnm en el Puente Bolognesi.

El ensayo presentó mayores velocidades de flujo y por lo tanto mayores erosiones. Al mantener los niveles indicados en los Puentes Cáceres y Bolognesi, la pendiente del nivel del agua fue de 1.3 %.

Cada caudal durante el ensayo se mantuvo constante y se permitió que discurriera durante un tiempo lo suficientemente largo como para provocar la erosión máxima correspondiente a este caudal. Ocurrida la erosión máxima, se realizaron los trabajos de medición, continuando el ensayo con un nuevo caudal bajo las mismas condiciones.

5.3.2.2 Resultados

a) Niveles de Agua

Puente Cáceres: 30.50 msnm Puente Bolognesi: 27.85 msnm

b) Capacidad

La capacidad del cauce se define como el máximo caudal que pueda soportar el cauce, cumpliendo con los niveles en Cáceres 30.50 msnm y en Sánchez Cerro 27.85 msnm.

Los caudales obtenidos fueron:

- $2250 \text{ m}^3/\text{s}$
- $2750 \text{ m}^3/\text{s}$
- $3000 \text{ m}^3/\text{s}$
- $3250 \text{ m}^3/\text{s}$
- $3500 \text{ m}^3/\text{s}$

No se continuaron aumentando los caudales, debido a que esta fase era de calibración.

c) Cuadro de flujo y velocidad

A continuación se muestra un cuadro de velocidades promedio de prototipo, que se emplearon como comparación para los caudales bajos. Se adjunta además la curva de tendencia hallada con los valores de velocidad medidos para el Fenómeno del Niño en 1998.

CAUDAL (m^3/s)	Vprom BOLOGNESI (m/s)
2250	3.00
2500	3.10
2750	3.20
3000	3.30
3250	3.37
3500	3.45

Tabla N°5.3: Velocidades promedio de prototipo (Ver gráfico 5.6).

Planta de la zona de estudio mostrando las velocidades superficiales (máximas) para el caudal de 3000, 3250 y 3500 m³/s (ver planos N°5.1, 5.2 y 5.3):
 Se observan velocidades mayores a los registros de prototipo. Para los casos de 3250 y 3500 se observa una menor diferencia entre los valores modelo y prototipo.

d) Erosión general

d.1) Caudal de 3000 m³/s:

- Perfil longitudinal de erosión en la ribera derecha y ribera izquierda (ver gráfica 5.07):

Se observa que el estrato duro influye notoriamente en la erosión, porque según el cuadro de flujo las erosiones deberían ser distintas a las que se presentan. En la margen derecha se observa una erosión generalizada a lo largo del tramo de estudio, con un promedio de fondo en la cota 19.50 msnm. En la margen izquierda se presenta una erosión desde Cáceres hasta Sánchez Cerro, luego desde esta sección hasta Integración se presenta sedimentación, con un promedio en la cota 23.20 msnm.

- Perfil longitudinal de máxima erosión y niveles de agua (ver gráfica 5.08):

Los puntos de máximas erosiones se presentan en la zona de Cáceres y la Peñita. Alcanzándose la cota 15.88 msnm cerca de Cáceres y la cota 14.70 msnm para la zona de la Peñita, resultado de la suma de efectos de erosión local y general.

d.2) Caudal de 3250 m³/s:

- Perfil longitudinal de erosión en la ribera derecha y ribera izquierda (ver gráfica 5.09):

En la margen derecha se observa una erosión generalizada a lo largo del tramo de estudio, con un promedio de fondo en la cota 20.00 msnm. En la margen izquierda se presenta una erosión desde Cáceres hasta Sánchez Cerro, y

sedimentación desde esta sección hasta Integración, con una cota promedio de fondo de 23.00 msnm. Se observa que el estrato duro influye notoriamente en la erosión, presentándose valores notoriamente diferentes que los obtenidos en el ensayo anterior.

- Perfil longitudinal de máxima erosión y niveles de agua (ver gráfica 5.08):

Los puntos de máximas erosiones se presentan en la zona de Cáceres y la Peñita. Alcanzándose la cota 15.40 msnm cerca de Cáceres y la cota 11.55 msnm para la zona de la Peñita. Esto se debe a la suma de efectos de erosión local y general.

d.3) Caudal de 3500 m³/s:

- Perfil longitudinal de erosión en la ribera derecha y ribera izquierda (ver gráfica 5.10):

Como en los caudales anteriores, en la margen derecha se observa una erosión generalizada a lo largo del tramo de estudio, con un promedio de fondo en la cota 18.00 msnm. En la margen izquierda se presenta una erosión desde Cáceres hasta Sánchez Cerro, y desde esta sección hasta Integración se presenta sedimentación, con un promedio en la cota 22.00 msnm.

- Perfil longitudinal de máxima erosión y niveles de agua (ver gráfica 5.08):

Los puntos de máximas erosiones se presentan en la zona de Cáceres y la Peñita. Alcanzándose la cota 14.45 msnm cerca de Cáceres y la cota 11.50 msnm para la zona de la Peñita. Igualmente se han sumado la erosión local y generalizada en el cauce.

e) Erosión Local

Se han realizado comparaciones entre erosión en modelo y prototipo, la disponibilidad de información no permite realizar comparaciones para caudales exactamente correspondientes, sin embargo se pueden obtener algunas conclusiones.

- Gráfico comparativo de la erosión en la Sección Puente Cáceres: registro 1998 Q = $3650 \text{ m}^3/\text{s}$ y resultado de modelo para el caudal de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver gráfica 5.11): La cota de fondo erosionada de registro es de 16.30 msnm y la cota de fondo erosionada del modelo es de 15.80 msnm.
- Gráfico comparativo de la erosión en la Sección Puente Sánchez Cerro: registro 1998 Q = 3727 m^3 /s y resultado de modelo para el caudal de 3000 m^3 /s (ver gráfica 5.12): Las áreas hidráulicas son cercanas. La cota de fondo erosionada de registro es 17.20 msnm y la de modelo es 17.00 msnm. El patrón de erosión es similar en prototipo y modelo.
- Gráfico comparativo de la erosión en la Sección Puente Cáceres: registro 1998 Q =3650 m³/s y resultado de modelo para el caudal de 3250 m³/s (ver gráfica 5.13): Se observa un mismo patrón de erosión lo cual implica tener una misma cota máxima de erosión de la sección, una misma área hidráulica.
- Comparación de la erosión en la Sección Puente Sánchez Cerro : registro 1998 Q =3727 m³/s y resultado de modelo para el caudal de 3250 m³/s (ver gráfica 5.14): Se observa la misma tendencia de erosión, es decir pegada hacia la margen derecha. La erosión es mayor en el modelo aproximadamente 2 metros, por lo tanto el área resultante del modelo es mayor que la registrada en prototipo. Se debe indicar que las velocidades y pendiente energética fueron mayores durante el ensayo en el modelo.
- Comparación de la erosión en la Sección Puente Cáceres : registro 1998 Q =3650 m³/s y resultado de modelo para el caudal de 3500 m³/s (ver gráfica 5.15):
 Se observa similar tendencia de erosión. En el modelo el nivel de agua es 1.50 m mayor que en prototipo, entonces el área resultante del modelo es mayor a la registrada en prototipo.
- Comparación de la erosión en la Sección Puente Sánchez Cerro: registro 1998 Q =3727 m³/s y resultado de modelo para el caudal de 3500 m³/s (ver gráfica 5.16): Se observa la misma tendencia de erosión, es decir pegada hacia la margen derecha. La erosión es mayor en el modelo aproximadamente 2.50 metros, por lo tanto el área resultante del modelo es mayor que la registrada en prototipo.

Se debe indicar que las velocidades y pendiente energética fueron mayores durante el caudal de 3250 m^3 /s, a pesar de que para este caudal se tuvo el nivel remansado en 1.20 metros (nivel de agua en Bolognesi 28.95 msnm)

- La Peñita :

La Peñita genera una erosión local que se extiende longitudinalmente desde 25 metros aguas arriba y 330 metros aguas abajo. Esta erosión transversalmente tiene un ancho de 50 metros (figura 5.1)

La máxima erosión presentada alcanzó la cota 12.00 msnm, teniendo la zona aledaña a la peñita la cota 19.00 msnm. (Producto de la erosión general). La fosa de erosión tiene una influencia que abarcó 70 metros aguas debajo de la sección del puente Bolognesi, en cuya sección la erosión local llegó a la cota 14.00 msnm.

Podemos afirmar que la peñita incide negativamente sobre la seguridad de las obras en su área de influencia.

CONCLUSIONES

El estrato duro en la cota 12.00 msnm y la rigidización según la geología ajustada en el modelo no representaron adecuadamente las condiciones reales, por lo tanto se vio necesario modificar la cota del fondo duro pasando de la cota 12.00 a la cota 15.00 msnm.

Sin embargo este ensayo ha sido muy útil para realizar las modificaciones pertinentes en el futuro y además proporcionó información sobre el cuadro de flujo y de erosión.

5.3.3. Ensayo N°3:

Con zapallal cota 12.00 msnm, zonas rigidizadas, establecimiento de igualdad de velocidades en el Puente Bolognesi entre modelo y prototipo para caudales bajos. Para el caudal máximo se estableció la cota en Cáceres en 30.50 msnm y en Bolognesi 27.85 msnm.

5.3.3.1. Condiciones de ensayo

a) Topografía:

Los ensayos se realizaron teniendo representada en el modelo la topografía 2000.

b) Geología:

Ajustada como consecuencia de lo observado en el ensayo anterior (notoria influencia de la necesidad de representar adecuadamente el zapallal), se realizó un análisis de la información de campo, comportamiento erosivo y de sedimentación de diversas secciones, por lo que se rigidizaron diversos lugares del modelo para obtener una mejor aproximación a lo real. Aún no se cuenta con el análisis de estabilidad estructural de la protección, lo cual nos dará mayor información respecto a la ubicación y distribución del estrato duro.

La formación dura conocida como "La Peñita", fue representada en este ensayo. Para ello se empleó la información proporcionada por los trabajos de levantamiento de campo, la cual fue complementada con inspección de campo.

c) Caudales:

Se estableció durante el ensayo buscar el caudal máximo que pueda soportar el cauce determinando los niveles máximos sin que se produzca inundación en la ciudad.

Así para los caudales obtenidos menores a 4250 m³/s, el criterio utilizado para que se produzca la erosión en el modelo, fue establecer las velocidades registradas durante el fenómeno El Niño 1998 en la sección del puente Bolognesi, Para el caudal máximo de 4250 m³/s como dato el criterio fue establecer en el puente Cáceres 30.50 msnm y para el puente Bolognesi 27.85 msnm.

A continuación se muestra un cuadro de velocidades promedio de prototipo, que se emplearon como comparación para los caudales bajos. Se adjunta además la curva de tendencia hallada con los valores de velocidades medidos para el fenómeno El Niño 1998.

V _{prom} Bolognesi (m/s)
3.00 3.10 3.20 3.30 3.37 3.45

 Tabla 5.4:
 Velocidades promedio de prototipo.

5.3.3.2. Resultados

a) Niveles de Agua

Los valores de velocidad en modelo son en el puente Bolognesi.

• Caudal : $2250 \text{ m}^{3}/\text{s}$

Puente Cáceres	:	30.00 msnm
Puente Bolognesi	:	28.00 msnm
Velocidad en modelo	:	2.90 m/s.
Caudal: 2750 m ³ /s		
Puente Cáceres	:	30.00 msnm
Puente Bolognesi	:	28.00 msnm
Velocidad en modelo	:	3.12 m/s.

• Caudal : $3250 \text{ m}^{3}/\text{s}$

Puente Cáceres	:	30.50 msnm	
Puente Sánchez Cerro	:	29.81 msnm	
Puente Bolognesi	:	28.57 msnm	
Puente Integración	:	30.10 msnm	
Velocidad en modelo	:	3.24 m/s.	
Caudal : $3500 \text{ m}^3/\text{s}$			
Puente Cáceres	:	30.25 msnm	
Puente Sánchez Cerro	:	29.16 msnm	
Puente Bolognesi	:	28.42 msnm	
Puente Integración	:	28.25 msnm	
Velocidad en modelo	:	3.40 m/s.	
Caudal : $4250 \text{ m}^3/\text{s}$			
Puente Cáceres	:	30.50 msnm	
Puente Bolognesi	:	27.85 msnm	

b) Capacidad

La capacidad del cauce se define como el máximo caudal que pueda tener el cauce, cumpliendo con los niveles en Cáceres 30.50 msnm y en Sánchez Cerro 27.85 msnm.

Dichos caudales son:

 $\begin{array}{c} 2250 \text{ m}^3\text{/s} \\ 2750 \text{ m}^3\text{/s} \\ 3000 \text{ m}^3\text{/s} \\ 3250 \text{ m}^3\text{/s} \\ 3500 \text{ m}^3\text{/s} \\ 4250 \text{ m}^3\text{/s} \end{array}$

c) Cuadro de flujo y Velocidades.

Planta de la zona de estudio mostrando las velocidades superficiales (máximas) para el caudal de 4250 m³/s. (plano 5.4).

La máxima velocidad se presenta en la sección 3+293. Las máximas velocidades en el tramo entre el puente Cáceres y Sánchez Cerro se encuentran en la margen derecha, en cambio en el tramo entre Sánchez Cerro y Bolognesi las mayores velocidades se ubican en la margen izquierda.

d) Erosión general.

 Perfil longitudinal de erosión en la margen derecha y margen izquierda para el caudal de 4250 m³/s (gráfica 5.17).

En ambas márgenes se observa erosión generalizada en todo el modelo, debido a que se está forzando a pasar un caudal a capacidad máxima. La cota de fondo promedio es de 16.00 msnm.

Perfil longitudinal de máxima erosión y niveles de agua para el caudal 4250 m³/s (gráfica 5.18).
 La cota de erosión promedio se encuentra en promedio en la cota 14.30 msnm.

e) Erosión Local

- En la sección Puente Cáceres se observa la misma tendencia de erosión, es decir pegada hacia la margen derecha (gráfica 5.19).
- En la sección Sánchez Cerro la erosión es mayor en el modelo aproximadamente 4.00 metros, por lo tanto el área resultante del modelo es mayor que la registrada en prototipo. Se debe indicar que las velocidades y pendiente energética fueron mayores durante este caudal (gráfica 5.20).

La Peñita (figura 5.2)

- Genera una erosión local que se extiende longitudinalmente desde 20 metros aguas arriba y 250 metros aguas abajo. Esta erosión transversalmente tiene un ancho de 40 metros.
- La máxima erosión presentada alcanzó la cota 12.50 msnm, teniendo la zona aledaña a la peñita la cota 17.00 msnm. (producto de la erosión general).
- La fosa de erosión no influye sobre la sección del puente Bolognesi. En este ensayo de 4500 m³/s (caudal máximo del ensayo) se ha tenido una menor fosa que en el ensayo de 3500 m³/s, debido a que la pendiente promedio del nivel del agua fue menor. La pendiente promedio del nivel de agua para 3500 m³/s fue de 1.3 % y para el caudal de 4250 m³/s fue de 0.93 %. La razón de haber elegido estas pendientes es observar la sensibilidad del modelo ante variaciones de la cota del nivel de agua en los puentes y determinar si esto influye en la capacidad del cauce y en las velocidades que se presenten. Para este ensayo N°3 se incluyen fotografías ilustrativas (fotos 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4) de las erosiones locales en los puentes y la peñita, para el caudal de 4250 m³/s.



Foto 5.1: Vista en planta del tramo entre Puente Sánchez Cerro (arriba en la foto) obsérvese los pilares descubiertos y la zona donde se ubica el puente Bolognesi (abajo en la foto) se aprecia claramente el efecto de erosión local causado por la formación denominada "La Peñita". La situación es el efecto de un caudal de 4250 m³/s.



Foto 5.2: Vista de perfil de la sección Puente Cáceres desde margen derecha (abajo en la foto) hacia margen izquierda (arriba en la foto). Nótese el alto grado de erosión luego de 4250 m³/s, llegando inclusive al estrato duro ("zapallal") cota 12 msnm desde el 2do pilar de la margen izquierda y hacia la margen derecha. El segundo y tercer pilar de la margen izquierda muestran mayor erosión dejando descubierto el último cuarto de la longitud de los pilotes de cada zapata. El extremo superior de las varillas de fierro indica el fondo de esta sección antes del ensayo.



Foto 5.3: Otra vista a través de la sección Puente Cáceres esta vez desde margen derecha (izq. en la foto) hacia margen izquierda (der. en la foto). Nótese el alto grado de erosión luego de 4250 m^3 /s. Obsérvese los efectos descritos en foto anterior.



Foto 5.4 : Vista desde aguas arriba (izquierda en la foto) de la ubicación la formación conocida como "La Peñita" hacia aguas abajo (derecha en la foto).El eje del puente Bolognesi se observa aproximadamente en la progresiva 4+999 (prototipo). Nótese: la margen izquierda (al centro en la foto) totalmente erosionada; la forma peculiar como se ha producido la erosión en "La Peñita" hasta llegar a la cota 12 (estrato duro) y la mayor deposición de sedimento en la margen derecha. La situación es ocasionada por un caudal de 4250 m³/s.

5.4. Ensayo con zapallal cota 15 msnm.

Este ensayo con cota 15.0 msnm constituye el primer ensayo con modelo calibrado y por lo tanto con resultados y mediciones válidas para ser utilizados por el diseñador.

La primera parte de los ensayos realizados con cota de zapallal 15.00 msnm constituye la finalización de la calibración y por consiguiente la seguridad de que las mediciones cumplen adecuadamente con las leyes de similitud entre modelo y prototipo. Una vez verificada la similitud se procedió a tomar medidas de velocidades, cuadro de flujo, erosiones.

5.4.1. Condiciones de ensayo

a) Topografía

Los ensayos se realizaron teniendo representada en el modelo la topografía 2000.

b) Geología

Como consecuencia de lo observado en los ensayos anteriores, se realizó un análisis de la información de campo, comportamiento erosivo y de sedimentación de diversas secciones, por lo que se rigidizaron diversos lugares del modelo para obtener una mejor aproximación a lo real. Para este ensayo adicionalmente se contó con el análisis de estabilidad estructural de la protección existente, lo que permitió una mayor información respecto a la ubicación y distribución del estrato duro.

La formación dura, conocida como "La Peñita", fue representada en este ensayo de igual manera que en el caso anterior.

c) Caudales

Se estableció como criterio buscar durante todo el ensayo el caudal máximo soportado por el cauce. Para caudales menores que el máximo, el criterio utilizado para producir la erosión en el modelo, fue establecer las velocidades registradas durante el fenómeno El Niño 1983 en la sección del puente Bolognesi. Para el caudal máximo de 4050 m³/s el criterio fue establecer en el puente Cáceres 30.50 msnm y para el puente Bolognesi 27.85 msnm.

5.4.2. Resultados

A continuación se muestra un cuadro de velocidades promedio de prototipo, que se emplearon como comparación para los caudales bajos. Se adjunta además la curva de tendencia hallada con los valores de velocidades medidos para el fenómeno El Niño 1998.

CAUDAL (m^3/s)	Vprom BOLOGNESI (m/s)
2250	3.00
2500	3.10
2750	3.20
3000	3.30
3250	3.37
3500	3.45

Tabla N°5.5: Velocidades promedio de prototipo.

a) Niveles de agua

•	Caudal Puente Cáceres Puente Bolognesi Velocidad en el modelo	: : :	2390 m ³ /s 30.04 msnm 27.85 msnm 3.09 m/s
•	Caudal : $2500 \text{ m}^3/\text{s}$		
	Puente Cáceres Puente Bolognesi Velocidad en el modelo	: : :	30.15 msnm 27.85 msnm 3.22 m/s
•	Caudal : 2750 m ³ /s		
•	Puente Cáceres Puente Sánchez Cerro Puente Bolognesi Puente Integración Velocidad en el modelo Caudal : 3000 m ³ /s	: : :	30.50 msnm 29.14 msnm 28.50 msnm 28.12 msnm 3.24 m/s
	Puente Cáceres Puente Sánchez Cerro Puente Bolognesi Puente Integración Velocidad en el modelo	: : :	30.35 msnm 29.15 msnm 28.55 msnm 28.21 msnm 3.31 m/s
•	Caudal : $3250 \text{ m}^3/\text{s}$		
	Puente Cáceres Puente Bolognesi Velocidad en el modelo	:	30.31 msnm 27.98 msnm 3.36 m/s

• Caudal : $3900 \text{ m}^{3}/\text{s}$

Puente Cáceres	:	30.17 msnm
Puente Sánchez Cerro	:	28.71 msnm
Puente Bolognesi	:	27.85 msnm
Velocidad en el modelo	:	3.55 m/s
Caudal : $4050 \text{ m}^3/\text{s}$		
Puente Cáceres	:	30.50 msnm
Puente Bolognesi	:	27.85 msnm
Velocidad en el modelo	:	3.62 m/s

b) Capacidad

La capacidad del cauce obtenida en este ensayo fue un caudal de $4050 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para determinar la capacidad máxima del cauce existen 2 condiciones que se deben cumplir y que a su vez entre ellas están relacionadas, una de ellas es la igualdad de velocidades en el puente Bolognesi en el modelo y los registros del año 1998 y la segunda es la similitud entre las secciones erosionadas en el modelo y los registros 1998.

Al alcanzar el equilibrio correspondiente al caudal de 3900 m^3/s , se obtiene una coincidencia muy buena entre el modelo y registros del prototipo. Una vez erosionado el cauce, se procede a aumentar el caudal obtenido 4050 m^3/s .

Sin embargo si dejamos que este caudal alcance el equilibrio, encontraremos que se produce mayores erosiones que las registradas en prototipo, por lo que demuestra que ya este caudal fue el máximo que se produce en modelo sin alejarnos de otros parámetros.

c) Cuadro de flujo y velocidades

- Planta general indicando velocidades superficiales en el tramo modelado, para el caudal de 3900 m^3/s (plano 5.5).

La mayor velocidad superficial en la margen izquierda es de 4.11 m/s y se observa en la sección puente Bolognesi.

En la margen derecha la máxima velocidad superficial es de 5.26 m/s en la sección 3+293

d) Erosión general

Se ha logrado, colocar en el modelo, el estrato duro con un buen grado de confiabilidad debido a que los parámetros representativos del flujo como velocidad, líneas de corriente, patrón de erosión son semejantes entre modelo y prototipo para un determinado caudal. Perfil longitudinal de erosión en la ribera derecha y ribera izquierda para el caudal de 3900 m^3/s . (gráfica 5.21).

En ambas riberas se observa erosión generalizada en todo el modelo.

Es notorio que la ribera izquierda presenta mayor erosión que la ribera derecha: comparativamente la cota de fondo promedio en la ribera izquierda fue de 15.20 msnm, y la de la ribera derecha fue de 20.00 msnm.

Perfil longitudinal de máxima erosión, para el caudal de 3900 m³/s (gráfica 5.22). Todo el tramo presenta erosión generalizada con promedio cota 15.50 msnm. Existen efectos de erosión local en el puente Cáceres y en la Peñita.

e) Erosión local

Comparación de la erosión en la sección puente Cáceres: registro 1998 Q =3650 m³/s y resultado de modelo (gráfica 5.23)

El patrón de erosión es el mismo, cumpliéndose por lo tanto la igualdad de áreas, cotas de fondo de la sección entre modelo y prototipo.

Comparación de la erosión en la sección puente Sánchez Cerro: registro 1998 Q = $3727 \text{ m}^3/\text{s y}$ resultado de modelo (gráfica 5.24).

La tendencia de erosión es semejante, alcanzándose una buena aproximación del área erosionada, existiendo alguna diferencia en la margen izquierda.

La Peñita (figura 5.3)

- Genera una erosión local que se extiende longitudinalmente desde 10 metros aguas arriba y 200 metros aguas abajo. Esta erosión transversalmente tiene un ancho de 40 metros.
- La máxima de erosión presentada alcanzó la cota 12.00 msnm, teniendo la zona aledaña a la peñita la cota 18.00 msnm. (producto de la erosión general).
- La fosa de erosión no influye sobre la sección del puente Bolognesi. En este ensayo de 3900 m³/s (caudal máximo del ensayo) se ha tenido una menor fosa que en el ensayo de 3500 m³/s, debido a que la pendiente promedio del nivel del agua fue menor.

Pendiente

- La pendiente promedio del nivel de agua para 3500 m³/s fue de 1.3 % y para el caudal de 3900 m³/s fue de 1.08 %.
- La razón de haber elegido éstas pendientes es observar la sensibilidad del modelo ante variaciones de la cota del nivel de agua en los puentes y determinar si esto influye en la capacidad del cauce y en las velocidades que se presenten.

- Para graficar mejor lo expresado anteriormente se presentan las fotografías 5.05, 5.06, 5.07, 5.08, 5.09, 5.10, 5.11 y 5.12.



Foto 5.5: Vista en planta de Sección puente Cáceres. Se observa los trabajos finalizados de rigidización del cauce en cota 15 msnm y colocación de material de fondo. En esta situación, el modelo queda listo para el ensayo.



Foto 5.6: Sección Puente Cáceres. Vista en detalle del pase del hidrograma de avenidas a través de dicha sección, el instante corresponde a 3900 m³/s. El sentido del flujo es de abajo hacia arriba en la foto (aguas arriba hacia aguas abajo en el modelo). Se observa el nivel de agua en la cota 30.50 msnm. El resultado de la medición de velocidades en superficie fue 3.86 m/s cerca a margen izquierda y 3.07 m/s cerca de margen derecha.



Foto 5.7: Vista panorámica, desde puente Cáceres hacia aguas abajo, del pase de histograma de avenidas, el instante corresponde a 3900 m³/s. En primer lugar se observan los pilares del puente Sánchez Cerro casi sumergidos, alcanzando el flujo una velocidad promedio en superficie de 4.3 m/s en esta sección; luego el puente de aforo sobre la ubicación del futuro Puente Bolognesi con velocidades promedio en superficie de 3.35 m/s y finalmente el puente de aforo sobre el eje de la posible ubicación del Puente Integración con velocidad promedio en superficie de 3.15 m/s.



Foto 5.8: Sección puente Sánchez Cerro vista desde aguas arriba. Se observa en detalle el pase del hidrograma de avenidas a través de dicha sección, el instante corresponde a 3900 m³/s. El sentido del flujo es de abajo hacia arriba en la foto. Nótese los pilares con el nivel de agua en la parte inferior de su viga superior. La distribución de velocidades medidas en superficie fue 3.97 m/s al centro del vano margen izquierda y 4.67 m/s al centro del vano margen derecha.



Foto 5.9: Sección puente Bolognesi. Vista en detalle del pase del hidrograma de avenidas a través de dicha sección, el instante corresponde a 3900 m³/s. El sentido del flujo es de abajo hacia arriba en la foto (aguas arriba hacia aguas abajo en el modelo). La distribución de velocidades medidas en superficie fue 4.11 m/s en margen derecha y 2.58 m/s en margen izquierda. Se observa la no inclusión en esta sección de ningún vestigio de la actual estructura destruida del puente Bolognesi. Al fondo se observa al staff de investigación controlando las compuertas de fondo del modelo.



Foto 5.10: Vista de la sección Puente Cáceres. Margen derecha (izq. en la foto) hacia margen izquierda (der. en la foto). Nótese el alto grado de erosión luego de 3900 m³/s cuyo valor máximo alcanzó la cota 12 msnm en los pilares centrales.



Foto 5.11: Vista a través de la sección puente Sánchez Cerro, desde margen derecha (abajo en la foto) hacia margen izquierda (arriba en la foto). Se observa un alto grado de erosión luego de 3900 m³/s y como resultado los pilares, zapatas, caisones y pilotes descubiertos. La cota del estrato duro ("zapallal") es 15 msnm y abarca desde el pilar de la margen derecha hasta donde llega el nivel de agua que aparece en la foto. Los caisones se han modelado usando tubos de PVC. El extremo superior de las varillas de fierro indica el fondo de esta sección antes del ensayo.



Foto 5.12: Vista del detalle ampliado del pilar de la margen izquierda del puente Sánchez Cerro luego del pase de 3900 m³/s. La toma es desde aguas abajo y se muestra los detalles de modelamiento de la zapata de refuerzo (sujeta mediante una platina al pilar) y los caisones de los pilotes (tubos de PVC rellenos con mortero yeso cemento). La erosión llegó aproximadamente a la cota 16 msnm.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Las rocas sedimentarias asumidas como Formación Zapallal en el área de estudio se encuentran meteorizadas con pronunciadas manifestaciones de oxidación, lo que determina un grado de alteración que permite niveles de erosión local en las riberas y erosión diferencial en el fondo del cauce.
- En los Tramos a y b, el río Piura tiene todas las características de un río aluvial, dado que discurre sobre el material transportado por el propio río en el pasado, formando su lecho granular.
- Teniendo en cuenta los parámetros de flujo del río Piura, se puede concluir que se trata de un flujo turbulento rugoso.
- En el caso del río Piura y especialmente de los Tramos a y b, los parámetros de transporte de sedimentos tienen una variación muy importante en el espacio y en el tiempo.
- Los caudales del río Piura en la zona del estudio pueden variar entre los caudales mínimos (incluyendo periodos sin flujo de agua) hasta miles de m³/s. Es obvio que durante el período de avenidas el río no tiene equilibrio y ocurre erosión importante en este tramo, mientras que durante periodo después de avenidas el fenómeno es totalmente contrario y ocurre la sedimentación en varias zonas, especialmente en zonas de erosión anterior.
- Uno de los parámetros principales que define las características de los sedimentos del río Piura es la gran cantidad de áreas deforestadas por acción antropica que generan condiciones de denudación y aporte de materiales para el mayor contenido volumétrico de sedimentos en las partes intermedia y distal del Río Piura
- El encauzamiento del tramo urbano del cauce del río ha contribuido a la erosión de más o menos 2.50m de la roca basamento del tipo arcilloso; cosa que en condiciones naturales no se hubiera dado con la intensidad señalada.
- Las obras de la protección de las riberas del río Piura en el tramo urbano, presentadas en este estudio, son expuestas a varios riesgos y exigen mucho tiempo en un proceso de ejecución y experimentación. Las obras ejecutadas se deben verificar e inspeccionar cada año después de las avenidas.
- Teniendo en cuenta que existen limitaciones debido a las infraestructuras existentes de la protección ribereña del río Piura, los ensayos en el modelo hidráulico no fueron limitados a solo un caudal de diseño y en el modelo hidráulico se ha analizado una gama de caudales típicos, combinados con otros parámetros que influyen la capacidad máxima del cauce, como erosión, sedimentación, niveles máximos del pelo de agua en la zona

del puente Cáceres y variación de los niveles aguas abajo del modelo, con la finalidad de analizar varios escenarios que pueden ocurrir durante el periodo de avenidas.

- Las mayores velocidades se producen en la ribera izquierda del puente Bolognesi y en la ribera derecha del puente Sánchez Cerro.
- El río Piura dentro de la ciudad tiene una reducida capacidad hidráulica, dado que el ancho del río se reduce a menos que 100m, en comparación con más de 1000m fuera de la ciudad. La capacidad hidráulica en el tramo estudiado directamente depende del proceso de erosión y de sedimentación, de tal manera que la capacidad máxima sólo se puede obtener con la erosión máxima del fondo del cauce.
- No se puede aumentar la capacidad hidráulica del cauce del río Piura en el tramo de estudio, sin efectuar cambios drásticos de forma y dimensiones del cauce actual, dado que las infraestructuras en ambas riberas del río Piura impiden cambios laterales.
- Bajo condiciones de erosión máxima y paulatina, la capacidad máxima del cauce del río Piura en el tramo urbano llega a cerca de 4050 m³/s.
- El puente Cáceres si bien es cierto no reduce el ancho promedio del cauce, presenta como mayor efecto negativo la generación de líneas de corriente dirigidas hacia la ribera derecha del río.
- La cota de fondo de la erosión general en esa zona es aproximadamente 16 msnm, pero por efecto de Cáceres esta cota desciende a la cota 12 msnm.
- Existe una clara influencia del puente Cáceres en las secciones aguas abajo, que puede apreciarse en los perfiles de máximas erosiones en los diversos ensayos realizados. Respecto del fondo resultante en esa zona, se observan erosiones en la margen derecha y sedimentaciones en la margen izquierda.
- El elemento duro denominado "La Peñita" influye negativamente en el cuadro de flujo, causa grandes turbulencias que se manifiestan en erosiones de fondo muy fuertes y por lo tanto se recomienda retirarla.
- El estrato duro del prototipo influye significativamente en el proceso de erosión.
- La capacidad máxima del cauce depende considerablemente de la influencia de los niveles aguas abajo de la zona urbana.
- El puente Cáceres es el punto más vulnerable a inundación en el tramo urbano del río Piura en donde el máximo nivel de agua corresponde a la cota 30.50 m.s.n.m.
- Como uno de los datos más interesantes puede destacarse que las mayores erosiones del tramo B se presentan en la sección ubicada a 100 m aguas abajo del puente Cáceres, donde el modelo físico determina cotas de 12.4 m.s.n.m.
- Las rocas originarias dominantemente se componen de cuarzo, feldespato, micas y ferromagnesianos y las propiedades físicas de los materiales fluviales muestran un carácter abrasivo, debiendo tomarse en cuenta esta propiedad en el diseño de las obras civiles a proyectarse, particularmente en la resistencia del concreto a utilizarse; debiéndose realizar diseños de mezcla para resistencias mayores de 210 Kg. /cm².
- Se recomienda establecimiento de un sistema de transferencia de información en tiempo real de modo de prevenir a las autoridades y a la población sobre las próximas crecidas del río. Como parte de este sistema se tiene que poner en operación un sistema integral de mediciones y observaciones de parámetros hidrológicos en toda la cuenca del río Piura según el programa especialmente elaborado para este sistema.
- Durante la elaboración del estudio definitivo se deben respetar los niveles de máximos actuales del sistema de protección y consecuentemente del agua en el río Piura durante el período de avenidas, que también son limitados por la infraestructura existente.

BIBLIOGRAFIA

1. - Adams Jorge.

Caudal, prosedencia y distribución de aguas de la Prov. de Tumbes y los Dptos de Piura y Lambayeque. Boletín C.I.M.P N° 27 ; 1905.

2. - Berezowsky Verduzco, Moisés.

Jiménez Castañeda, Amado Abel.

"Cálculo en perfiles en ríos de fondo arenoso con métodos de resistencia al flujo de hidráulica fluvial"; Series del instituto de ingeniería de la UNAM; 1993.

3. - Bravo J. José

Reconocimiento de la Región Costera de los Dptos de Tumbes y Piura. Asociación Peruana para el Progreso de la Ciencia. Archivos Tomo I ; 1921.

4. - Chigne Campos Nestor

Movimiento de Arenas antiguas líneas de Costa en el Noroeste Peruano. Tesis Br. Ing. Geol. UNMSN ; 1975.

5. - Chigne Campos Oscar

Características Geológicas del Desierto de Sechura. Tesis Ing. Geólogo UNMSM; 1979.

6. - Darly B.Simons y Fuat Senturk.

"Sediment Transport Technology ". water resources publications. Fort Collins, Colorado USA 1977.

7. - Fisher Alfred F.

Desarrollo Geológico del Nor Oeste Peruano durante el Mezoico Primer Congreso Nacional de Geología. Bol. Soc. Geol. Perú T. 30 ; 1956.

8. - Giles, Ronald V.

"Mecánica de los fluidos e hidráulica"; Segunda edición; 1991.

9. - Graf

"Hydraulics of sediment transport". Water resources publication, USA 1984.

10. - Graux, Daniel

"Fundamentos de Mecánica de Suelos – Proyecto de Muro y Cimentaciones ". Editores Técnicos Asociados S. A. – Francia – España ; 1975.

11. - Idding A. y Olsón A A

Geology of the Nortwest Perú Boletín AAPE. Vol 12 N° 1 ; 1928

12. - Instituto Geológico Minero y Metalúrgico

"Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Piura ."; 1994.

13. - Juarez B y Rico

"Mecánica de Suelos Tomos I - III, Segunda Edición, México ; 1976

14. - Laboratorio nacional de hidráulica.

"Intoducción a la investigación física en modelos hidráulicos." 1973.

15. - Martín Vide, Juan Pedro.

"Ingeniería fluvial"; Primera edición; 1997.

16. - Maza Alvarez, José Antonio.

García Flores, Manuel.

" Transporte de sedimentos " ; Series del instituto de ingeniería de la UNAM ; 1996.

17. - Meza R. Amiel

Estudio Geológico del Desierto de Sechura ; Inédito ; 1970.

18. - Ojeda D. y Arévalo

"Características Geotécnicas de la Región de Piura. Quinto Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Lima – Perú ; 1983.

19. - Petersen George

Mapa Geológico Generalizado del Nor Oeste del Perú. Ex – Ministerio Fom. Y Obras Públicas- Direc. De Petróleo; 1954.

20. - Quiroga Oscar

Síntesis Geológica de la Región Nor Oeste del Perú. Boletín Oficial de Minas y Petróleo N° 13 y 14 ; 1935.

21. - Rocha Felices, Arturo

"Sedimentación acelerada en embalses ". IV Congreso Nacional de Ingeniería Civil. CIP filial Lambayeque; 1990.

22. - Rocha Felices, Arturo

"Transporte de sedimentos aplicados al diseño de estructuras hidráulicas "CIP filial Lima 1990-1991.

23. - Terzaghi, K. y Peck

"Soils Mechanic Engineering Practice; 1976.

24. - Vargas J.

"Evaluación Geológica del Area de Sechura " Petroleos del Perú – Operaciones en el Nor Oeste ; Reporte pp 300-323 ; 1970.

25. - Unesco

"Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos "sección IV-12. Tomo 1,1973.

26. - Universidad de Piura

" Determinación de los Parámetros Geotécnicos para la Cimentación del Puente San Miguel – Piura, mediante Pozos Perforados ; 1998.

27. - Universidad de Piura

"Determinación de los Parámetros Geotécnicos para la Cimentación del Puente Bolognesi – Piura, mediante Pozos Perforados ; 1998.

28. - Universidad de Piura

" Determinación de los Parámetros Geotécnicos para la Cimentación del Puente Integración – Piura, mediante Pozos Perforados; 1998.

29. - Universidad Nacional de Piura

" Estudio de Mecánica de Suelos para la Cimentación del Puente Intendencia – Piura; 1998.

30. - Universidad Nacional de Piura

" Estudio de Mecánica de Suelos para la Cimentación del Muro de Protección del Puente Cáceres – Margen Derecha. ; 1998.

31. - Universidad de Piura

"Estudio para el tratamiento integral del río Piura – Modelo Hidráulico "Informe

Final; 2001