

**PROYECTO PNUD – GOBIERNO PER 98/018
CTAR Piura**

**ESTUDIO PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL
DEL RÍO PIURA**

APÉNDICE D

**INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y
DEL MODELO HIDROLÓGICO**

PIURA, MAYO DE 2000

ESTUDIO PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL DEL RÍO PIURA

CONTENIDO GENERAL DEL ESTUDIO

Volumen I – Sumario

- 1. Introducción**
 - 1.1. General
 - 1.2. Zona del Proyecto
 - 1.3. Problemas que el estudio debe resolver
 - 1.4. Objetivos del estudio
- 2. Antecedentes**
- 3. Criterios del Proyecto**
- 4. Información Básica**
 - 4.1. El Niño 1998
 - 4.2. Topografía
 - 4.3. Geología
 - 4.4. Geotecnia
 - 4.5. Hidrología
 - 4.6. Sedimentación
- 5. Estado Actual del Sistema de Protección**
- 6. Protección de las Riberas**
 - 6.1. Esquema General
 - 6.2. Modelo matemático de flujo
 - 6.3. Modelo hidráulico
 - 6.4. Variantes analizadas y variantes óptimas
 - 6.5. Modo de operación del sistema de protección
 - 6.6. Diseño definitivo
 - 6.7. Documentos de licitación
- 7. Conclusiones y recomendaciones**
- 8. Anexos**

Volumen II – Apéndices

Apéndice A: Comportamiento del río Piura durante Fenómeno del Niño 98

Apéndice B: Información topográfica

Apéndice C: Información de Geología y Geotecnia

Apéndice D: Información Hidrológica y del Modelo Hidrológico

Apéndice E: Sedimentación

Apéndice F: Estado actual del sistema de protección

Apéndice G: Modelo Hidráulico

Apéndice H: Modelo matemático de flujo

Apéndice I: Optimización y selección de alternativas

Apéndice J: Reglas de operación del sistema de protección

Apéndice K: Diseño Definitivo

Apéndice L: Impacto Ambiental

Apéndice M: Documentos de licitación

APÉNDICE D

INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y DEL MODELO HIDROLÓGICO

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA	1
1.2.	OBJETIVO DE ESTUDIO	2
1.3.	DIVISIÓN DE LA CUENCA	4
1.4.	ESTUDIOS ANTERIORES.....	5
2.	METODOLOGÍA DE CÁLCULO	10
2.1.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	10
2.2.	PROGRAMA HEC-HMS – SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA	15
2.3.	ESTACIONES PONDERADAS POR EL USUARIO (“ <i>USER-SPECIFIED GAGE WEIGHTS</i> ”).....	17
2.4.	PRECIPITACIÓN EFECTIVA	18
2.5.	HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO.....	20
3.	DATOS BÁSICOS.....	23
3.1	CAUDALES	23
3.2	PRECIPITACIONES.....	23
4.0	AVENIDAS TÍPICAS.....	29
4.1.	ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	29
4.2.	ANÁLISIS DE MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS.....	32
Tabla 8.	Valores de números adimensionales de curva CN usados.....	33
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	34
6.	PROGRAMA DE TRABAJOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA	37
7.	BIBLIOGRAFÍA	39

8. ANEXOS

Anexo 1 PLANOS

- 1.1 Cuenca y subcuencas del río Piura
- 1.2 Estaciones hidrometeorológicas en la cuenca

Anexo 2 METODOLOGÍA

- 2.1 Números de curva de escorrentía para diferentes usos de tierra, con AMC II. Método del US SCS.
- 2.2 Relación entre “k” y área de la cuenca

Anexo 3 DATOS BÁSICOS

- 3.1 Caudales máximos instantáneos anuales del río Piura en el puente Sánchez Cerro
- 3.2 Caudales máximos instantáneos a lo largo del río Piura
- 3.3 Pluviometría máxima diaria

Anexo 4 ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE CAUDALES ESTACIÓN PUENTE SÁNCHEZ CERRO

- 4.1 Análisis probabilístico de precipitaciones máximas diarias
- 4.2 Análisis estadístico de caudales máximos instantáneos del río Piura, estación Sánchez Cerro, periodo (1926-99)

Anexo 5 MODELO HIDROLÓGICO HMS

- 5.1 Perfil longitudinal del afluente más largo por subcuenca
- 5.2 Tabla Hidrograma de avenidas, río Piura, estación Sánchez Cerro
- 5.3 Gráfico Hidrograma de avenidas, río Piura, estación Sánchez Cerro

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA

La cuenca del río Piura está ubicada geográficamente cerca de la línea ecuatorial y comprendida entre los 4° 40' y 5° 40' de latitud sur y los 79° 30' y 81° 00' de longitud oeste, abarcando un área de 10.229,64 km². El río Piura nace como río Chalpa, de la confluencia de las quebradas Chalpa y Overal, en el distrito de Huarmaca (Huancabamba), a 2680 msnm, luego toma los nombres de río Huarmaca y río Canchaque, adquiriendo el nombre de río Piura desde su confluencia con el río Bigote.

La red hidrográfica de la cuenca del Río Piura está constituida principalmente por los ríos Huarmaca, Bigote, Piscán, Yapatera, San Jorge y La Gallega, siendo de 1010 km. la longitud total aproximada de la red hidrográfica y 295 km. la longitud del cauce principal del río.

El río Piura es irregular y caprichoso. Anteriormente, corría por el centro del valle, pero en las fuertes crecientes de 1871, cambió de curso labrando uno nuevo por el extremo occidental del valle. En el año 1983, en el que también hubo crecidas extraordinarias, el río volvió a cambiar su curso dirigiéndose al otro extremo del valle y avanzando por el desierto de Sechura para regresar, después, casi llegando al mar, a desembocar al norte de la localidad de Sechura. Actualmente, el río Piura desciende con dirección noroeste hasta la localidad de Tambogrande, cambiando de dirección para dirigirse hacia el sur, donde desemboca en la Laguna Ramón. La pendiente promedio del río es de 8.7‰; sin embargo, en sus últimos 130 km. la pendiente promedio es de 0.4‰.

En general, la costa norte se caracteriza por ser una zona de convergencia intertropical, producto de la compulsión de fuerzas provenientes de los hemisferios norte y sur, que promueve la presencia de un período lluvioso que se hace presente entre los meses de diciembre y abril. Esta zona de convergencia varía latitudinalmente de año en año, creando situaciones de largos períodos de sequía y también años de lluvias extraordinarias.

Otros factores que tipifican el clima de la cuenca del Río Piura son: La Corriente Peruana, el Anticiclón del Pacífico Sur y el Fenómeno del Niño; caracterizándose este último, cuando se presenta, como una manifestación espectacular del clima en la zona norte del Perú, evidenciada principalmente por extraordinarias precipitaciones pluviales como las ocurridas en los veranos de 1983 y 1998, y por ello la consecuente activación de los cauces ocasionando inundaciones y acciones morfológicas de gran dinamismo.

El río Piura lleva caudales significativos hasta su desembocadura sólo durante el verano, que es el período de lluvias estacionales, permaneciendo con un caudal no significativo el resto del año.

La variedad de tipos climáticos presentes en la cuenca del río Piura refleja la situación biogeográfica que tiene entre los desiertos costeros al sur y la gran

nubosidad de la costa ecuatoriana limítrofe. Refleja también la gradación altitudinal de la cuenca.

Según el sistema de clasificación de Thorntwaite, el clima de la cuenca varía según franjas longitudinales que van desde muy seco y cálido en la parte baja de la cuenca, hasta seco y semi-cálido en la parte media, siguiendo con moderadamente húmedo y templado cálido, coincidiendo con el cauce principal, y llegando hasta muy húmedo y frío moderado en las nacientes de la margen derecha.

La precipitación pluvial y la temperatura son los elementos meteorológicos más importantes, considerándose la lluvia netamente veraniega. La precipitación anual a lo largo de la cuenca varía entre 50 y 800 mm, para años normales; alcanzando la precipitación anual, en algunos puntos de la cuenca, valores superiores a los 4000 mm, en presencia del Fenómeno del Niño.

La temperatura es de carácter tropical, sin manifestaciones extremas durante el año; la temperatura media mínima en la cuenca es del orden de los 19°C y se presenta en las zonas de cabecera de cuenca, como la localidad de Frías. En la zona de la ciudad de Piura oscila entre 18,8°C y 31,2°C.

Los vientos que predominan son de O - SO; después de atravesar el despoblado de Piura, penetran en los valles a manera de brisas de invierno o cargados de humedad en verano.

La evaporación presenta una relación directa con la temperatura y la precipitación pluvial, por ello, la evaporación es mayor durante el verano. La evaporación (Piché) promedio total anual en el valle es relativamente alta, del orden de 1500 mm. En la zona de estudio, cerca a la ciudad de Piura, en la estación Miraflores, se registra un promedio de 1700 mm anuales; en Morropón 1800 mm.

Las horas de sol por día, durante el año varían entre 5 y 6.5 con un porcentaje de horas de sol de 40% y 52%. La nubosidad en promedio mensual varía entre 5/8 a 8/8 en toda la cuenca

1.2. OBJETIVO DE ESTUDIO

El objetivo del presente estudio es la determinación de las avenidas características que pueden ocurrir en el río Piura a su paso por la ciudad del mismo nombre como consecuencia de las lluvias que se producen en la parte de la cuenca aguas arriba de la zona urbana. Es importante destacar que durante los impactos del fenómeno del Niño, las precipitaciones en la cuenca baja sobrepasan las intensidades de las precipitaciones en la parte media y alta de la cuenca. Los resultados de estudio hidrológico son importantes para el análisis de parámetros hidráulicos del flujo del río Piura en la zona del estudio, que se han de determinar usando modelo matemático de flujo y modelo físico. Las avenidas típicas en la zona del estudio definen la intensidad y las características del

impacto hidráulico de parámetros tales como, las fuerzas hidráulicas, velocidades, profundidad de agua, zona de inundación, erosión o sedimentación y otros.

El área de estudio ha sido dividida en cinco zonas bien definidas con diferentes objetivos cada una de ellas:

- **Zona “a”**: Río Piura a su paso por la ciudad de Piura, entre la presa Los Ejidos y el puente Cáceres.
- **Zona “b”**: Río Piura a su paso por la ciudad de Piura, entre el puente Cáceres y el proyectado puente Integración.

En estas dos zonas se realizará un estudio hidráulico para diseñar los sistemas de defensas de la zona urbana de Piura y Castilla ante la amenaza potencial del río.

- **Zona “c”**: Río Piura aguas abajo del proyectado puente Integración hasta el puente Grau.
- **Zona “d”**: Río Piura aguas abajo del puente Grau hasta su desembocadura en la Laguna Ramón.

El estudio en estas dos zonas permite contar con los lineamientos hidráulicos para afianzar las zonas “c” y “d” y elaborar estudios definitivos y documentos de licitación, que no forman parte de los análisis que se realizan en este estudio, sino que se analizan en un estudio paralelo, organizado por INADE.

- **Zona “e”**: Cuenca media y alta del río Piura, aguas arriba de la presa Los Ejidos. Será objeto de un estudio hidrológico para determinar las avenidas que se presentan en las zonas “a” y “b”.

Para lograr el objetivo relacionado con esta última zona, es necesario analizar todos los datos disponibles que influyan en la forma e intensidad de las avenidas en la zona “a” y “b”, especialmente las precipitaciones en la cuenca y los datos relacionados a avenidas históricas registradas en las estaciones hidrológicas típicas, que controlan y determinan los parámetros de las avenidas. Teniendo en cuenta la problemática del estudio, se decide usar dos grupos de análisis:

- Análisis estadístico de avenidas en la estación hidrológica Puente Sánchez Cerro, de la ciudad de Piura.
- Modelo hidrológico de la cuenca del río Piura para simular la ocurrencia y transformación de las precipitaciones de la zona “e” en avenidas, y su correspondiente ruteo a lo largo del cauce. Este grupo incluye el análisis de las tormentas, las avenidas y los caudales máximos probables que pueden producirse.

Una vez calculados los caudales típicos de avenidas en la cuenca, se analiza el problema de flujo y de ruteo de estas avenidas a lo largo de las zonas “a” y “b”, en los Apéndices G y H.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal del estudio es la protección integral de las riberas del río Piura, a lo largo de los tramos “a” y “b”, los análisis hidrológicos tienen como fin específico el definir las avenidas típicas, sus formas e intensidades, para conocer su influencia e impacto hidráulico en la zona de estudio y especialmente en la zona donde se ubicarán las estructuras de protección ribereña recomendadas en este estudio. Por ello, el análisis hidrológico se dirige a resolver la problemática de las avenidas típicas, sin la necesidad de analizar otros parámetros hidrológicos (clima, balance hídrico, caudales mínimos y otros).

Se analizan avenidas que influyen en análisis, diseño, construcción y operación de las estructuras de protección, con probabilidades lógicas y económicamente aceptables, para este tipo de estructuras, asumidas por la práctica internacional. El rango usual de períodos de retorno de las avenidas, considerado para este tipo de ríos y de protección ribereña, es el intervalo entre 5 y 150 años. Según numerosos análisis para varios ríos en diversas partes del mundo, y dado que la inversión económica en protección ribereña podría sobrepasar largamente los daños eventuales que pudieran ocurrir en la cuenca, se puede concluir que, económicamente, no es recomendable aplicar avenidas de diseño con una probabilidad de ocurrencia mayor a los 100 años.

También es importante mencionar que, de acuerdo a estudios anteriores de la cuenca del río Piura, se concluye que el período de retorno recomendable está entre los 20 y los 100 años. Por ello, se decide realizar los estudios para avenidas con 20, 50 y 100 años de período de retorno, aplicando los dos métodos especificados anteriormente. Con estos resultados se define el input principal para los estudios hidráulicos y para la aplicación de los modelos hidráulicos físico y matemático.

1.3. DIVISIÓN DE LA CUENCA

Para el análisis de los parámetros hidrológicos, se presta especial atención a la influencia de las subcuencas del río Piura, que participan en la ocurrencia e intensidad de las avenidas.

En base a los puntos de control hidrológicos con que se cuenta, se divide la cuenca del río Piura en las cinco subcuencas que aparecen en la Tabla 1, donde, además, se presentan sus principales características. En el Anexo 1.1 se presenta el croquis de la cuenca del río Piura con la indicación de las subcuencas importantes.

Tabla 1. Subcuencas del río Piura

Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Cauce principal			
			Longitud (km)	Hmáx (msnm)	Hmín (msnm)	S (%)
Bigote-Huarmaca	1.934,98	222,36	69,72	2570	128	3,50%
Chulucanas	2.796,14	256,79	54,6	128	119	0,02%
Tambogrande	1.442,79	204,64	37,5	119	66	0,14%
Medio Piura	1.615,47	183,68	82,1	66	23,3	0,05%
Bajo Piura	2.440,26	227,68	50,9	23,3	9	0,03%
Total	10.229,64	601,56	294,82	2570	9	0,87%

1.4. ESTUDIOS ANTERIORES

1.4.1. Desarrollo Integral de las cuencas Tumbes – Chira – Piura del Perú. Volumen I – Informe *International Engineering Company, Inc. USA. Mayo, 1968*

Se describe un plan para el desarrollo integral de los recursos naturales de las cuencas de los ríos Tumbes, Chira y Piura: electricidad, hidráulica, agricultura, transporte, entre otros.

En este estudio se muestra una descripción general de cada área de estudio, se plantea una discusión de los problemas y necesidades del área y se realiza un inventario de los recursos naturales: clima, agua, tierra, energía, minerales, servicio de transporte e industria, así como de los recursos humanos existentes. Debido a que el agua y la tierra son los mayores recursos naturales disponibles, el objetivo principal del estudio es la máxima utilización de estos para la irrigación. Los demás recursos (minerales, petróleo, gas, pesca y bosque), son igualmente importantes, pero figuran en el plan, como secundarios.

Desde el punto de vista hidrológico, este proyecto concluye que el abastecimiento disponible total de agua de superficie, de todas las fuentes, está estimado en 7900 MMC como promedio anual. De este volumen, el río Tumbes aporta 3370 MMC; el Chira, 3470 MMC y el Piura, 820 MMC. Normalmente y durante la mayor parte del año, el río Piura se encuentra seco, pero se han registrado grandes descargas del orden de los 3300 MMC en los meses de marzo y abril.

Además se muestra una relación detallada de la información hidrometeorológica existente hasta la fecha (1965): temperatura, humedad relativa, vientos, precipitación, caudales; como promedios mensuales.

**1.4.2. Desarrollo Integral de las cuencas Tumbes – Chira – Piura del Perú.
Volumen II – Apéndices A - E
International Engineering Company, Inc. USA. Mayo 1968.**

Desde el punto de vista hidrológico y tomando en cuenta, solamente, la cuenca del río Piura, se tiene lo siguiente: clima e inventario de recursos hidráulicos.

Dentro de este ítem se muestra una descripción del clima de la zona: precipitación, temperatura, humedad relativa, viento, nubosidad, horas de sol. Los datos del tiempo para Piura han sido tomados de una serie de 1932 hasta 1950 en promedio, con valores mensuales. No se indican los registros bases, de donde han sido tomados estos valores, sólo se indican en tablas.

Sólo se mencionan, mas no se muestran los registros de los datos de estaciones hidrológicas para la cuenca del río Piura en Tambogrande, desde 1954 hasta 1967; en el Puente Ñácara desde 1942 hasta 1966; en el Puente Piura, desde 1925 hasta 1966; en la Quebrada San Francisco desde 1954 hasta 1966. Estos han sido trabajados y se han calculado los hidrogramas de descargas mensuales para cada estación, así como la respectiva naturalización de la data.

Se estima que la descarga máxima para el río Piura, sobre el puente Piura, es de 2540 m³/s producida el 31 de marzo de 1965.

Se muestra una gráfica de la correlación de escorrentía ajustada del río Piura en Piura y Tambogrande, con el período de 1954 a 1967.

Además, los hidrógrafos de la avenida máxima probable del río Piura en La Peñita (descarga máxima de 5330 m³/s) y en la presa de El Ala (4200 m³/s).

Por su parte, se señalan las respectivas cédulas de cultivo de la zona.

**1.4.3. Estudio de planificación y aprovechamiento de agua de las cuencas Piura y Chira y Estudio de Factibilidad del Valle del Chira. Tomo II.
International Engineering Company, Inc. USA. 1967.**

Se muestran datos y resultados del estudio, referentes a Climatología, Hidrología de agua superficial, Geología y Geomorfología, mercado de fuerza, producción actual después de la construcción del proyecto, valle del Chira – Estudio de operación de uso de agua, drenaje y recursos del suelo.

Para el caso de la cuenca del río Piura se tiene precipitaciones promedio mensuales de Ayabaca, Canchaque, Huarmaca, Pacaipampa, y datos del tiempo para la zona norte. Datos de caudales mensuales del río Quiroz y río Chira.

1.4.4. Estudio de utilización de excedentes del río Piura. *Bustamante, Williams y Asociados. 1977.*

Se hace una descripción de la cuenca del río Piura, teniendo en cuenta la geografía y fisiografía, además del cauce del río mismo.

Debido a que este estudio está orientado a utilizar los excedentes del río en reforestación, se indican unos conceptos básicos para desarrollar proyectos de reforestación en la zona de estudio.

Como datos básicos, se muestran las masas mensuales totales (MMC) del río Piura en la estación Puente Piura, desde 1924 hasta 1976; así como las del río Chira (MMC) en el Puente Sullana desde 1937 hasta 1975.

La evaluación de los recursos excedentes del río Piura, implica el análisis de las fuentes hídricas actuales (descargas directas del río Piura y aguas de retorno del Bajo Piura) y de aquellas potenciales (excedentes del río Chira sobre el canal de derivación), luego de atender las demandas.

Con las descargas diarias máximas anuales (1926 a 1976, fuente SENAMHI) se ha elaborado la función de probabilidad de excedencia y; con las descargas diarias independientes mayores a 200 m³/s, otra función de probabilidad de excedencia. La descarga independiente se ha definido como aquella separada en 10 o más días de toda descarga mayor a ella.

Para calcular la probabilidad de excedencia de cada evento se ha utilizado la siguiente relación:

$$P = \left(\frac{m - 0.3}{N + 0.4} \right) * 100$$

donde P, es la probabilidad de excedencia de cada evento; m, es el orden de cada evento (m=1 para el evento máximo) y N, es el número de eventos. A la serie de puntos obtenidos no se le ha ajustado ninguna curva de distribución teórica de probabilidades conocida, ya que la posición de los puntos sugiere otra forma de distribución. Se obtuvieron máximas avenidas probables para distintos períodos de retorno.

La máxima descarga diaria registrada es la del 31 de marzo de 1965 con 1958 m³/s, a la que le corresponde un período de retorno de 75 años. Se concluye que el excedente medio anual es de 412 MMC, con un máximo de 2755 MMC. Además de 627 meses, habría una posibilidad de excedentes en 85, es decir, 13.5% del tiempo.

1.4.5. Recursos hidrológicos de la región Alto Piura.

Dirección General del Proyecto Especial Chira Piura–DOM. Julio, 1981.

Este documento, muy sucinto, presenta un análisis de los recursos hídricos del Alto Piura. Sin mostrar datos básicos, se señala un análisis de frecuencias de las masas *mínimum minimorum* anuales de los registros de caudales en la estación Puente Ñácara, a la que se le aplica la función probabilística Pearson tipo III; obteniéndose como resultado que la masa minimorum de 69.1 MMC tiene un período de retorno de 2 años, correspondiendo a una masa anual de 349.4 MMC, de los cuales el 87% de ésta discurrirá entre febrero y abril, y en los meses de estiaje, 45.4 MMC.

Se presentan módulos mensuales anuales y rendimientos de área de cuenca de 3 estaciones hidrológicas ubicadas en el cauce del río Piura (Malacasí, Carrasquillo y Puente Ñácara).

De acuerdo con el análisis efectuado para 10 años de registro en la estación Puente Ñácara, se concluye que el período de avenidas está comprendido entre enero y abril, con una masa promedio anual de 442 MMC (85 m/s) y el período de estiaje entre mayo y diciembre con una masa anual promedio de 58.7 MMC (algunas veces completamente seco).

1.4.6. Protección contra avenidas y trabajos de encauzamiento en el río Piura, Perú.

Prof. Dr. Guenther Garbrecht, UTB Alemania, 1981.

Es un informe, solicitado por Salzgitter Consult GmbH, sobre la protección contra avenidas y sobre los trabajos de construcción del encauzamiento del río Piura, previstos y en algunos tramos ya ejecutados.

Se muestran los datos básicos que han servido de base para el diseño del sistema de protección, tales como la hidrología, morfología, coeficientes de rugosidad y gastos sólidos. Realizan un análisis de las medidas de protección contra avenidas (diques).

El ítem referente a hidrología dice que el río trae avenidas en los meses de febrero a abril (sobre todo en marzo), el resto del año baja, hasta secarse. Estas avenidas se producen por lluvias en la sierra, mientras que en la costa hay un promedio anual de 50 a 70 mm de precipitación.

En la estación Puente Sánchez Cerro, con 7742 Km² de cuenca colectora, y para el período 1926 a 1978 se han estimado los siguientes caudales de avenidas: para 5 años, 1000 m³/s; para 10 años, 1600 m³/s; para 25 años 2150 m³/s; para 50 años, 2800 m³/s y 3300 m³/s para 100 años.

1.4.7. Anuarios Meteorológicos e Hidrológicos de las cuencas de los ríos Chira y Piura, desde 1977 hasta 1990.

Dirección Ejecutiva Proyecto Especial Chira – Piura.

Se muestran series de datos básicos, tomados de diferentes estaciones de las cuencas de los ríos Chira y Piura y que corresponden a diferentes parámetros hidrometeorológicos: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, mediciones de caudales, entre otros, correspondientes a los años 1977 a 1990.

1.4.8. Estudio hidrológico-hidráulico para la construcción de los puentes Bolognesi, Viejo e Integración de la ciudad de Piura.

Universidad de Piura, 1998.

Este estudio se enmarca dentro del proyecto de diseño de dos puentes (colapsados) y de uno nuevo, en Piura. Los objetivos son: determinar el caudal máximo previsto para un período de retorno de 200 años y el nivel de aguas máximas correspondientes al caudal calculado anteriormente.

Se utiliza la serie de registros hidrológicos del río Piura, desde 1926 hasta 1998 la que presenta una alta variabilidad. Muestra años húmedos (1983 y 1998) en los que la descarga total supera en doce veces la media anual. Esta tendencia es más pronunciada en los últimos años.

Por otro lado, la persistencia de los caudales en el último fenómeno El Niño ha sido elevada. Por más de 60 días se han registrado caudales medios diarios superiores a los 1000 m³/s.

Se emplea modelos probabilísticos y metodología tradicional (Log-Pearson, Gumbel, Levediev, BR, etc.) y se ha obtenido un caudal de 5500 m³/s para 200 años de período de retorno. También se indican los niveles de agua estimados para dicho caudal en las secciones de los puentes en estudio. La profundidad máxima de erosión estimada para el caudal de diseño, según resultados teóricos, es de 16 m.

1.4.9. Estudio hidrológico del sistema Chira – Piura

Universidad de Piura, 1996.

El presente estudio muestra los resultados obtenidos del Balance Hidrológico del Sistema Chira–Piura con la finalidad de incluir nuevas áreas agrícolas al sistema. Entre las variables más importantes de la simulación del sistema, se encuentra la serie hidrológica del río Piura en Tambogrande, naturalizada y extendida, obtenida a partir de la serie hidrológica mensual registrada en la estación Puente Sánchez Cerro. Los datos del río Piura en Tambogrande son el input al sistema. Debido a que se trata de un balance, sólo muestran las series de caudales promedio mensuales desde 1954 a 1991. No se indican valores de máximos instantáneos ni ningún análisis de diseño. Sin embargo, es muy útil para conocer mejor la topología del sistema, y en particular muestra un análisis cronológico de eventos en el río Piura, necesarios para naturalizar la serie.

2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Como se explica en la introducción de este documento, se usan dos métodos de cálculo de avenidas típicas en la zona de estudio: el método estadístico y el método de simulación hidrológica aplicando un modelo hidrológico. Debido a que el procedimiento de cálculo del análisis estadístico es conocido, no se explica en detalle su metodología, pero sí se explica más detalladamente la metodología de simulación hidrológica.

Debido a que las observaciones y mediciones de parámetros hidrológicos en las quebradas y subcuencas de la zona del proyecto no existen o son insuficientes para este tipo de análisis, las avenidas de las subcuencas se calculan con ayuda del modelo hidrológico, aplicando el método del hidrograma unitario sintético a las precipitaciones efectivas correspondientes.

2.1. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

Para estimar los caudales de diseño para diferentes períodos de retorno, se aplican los modelos probabilísticos conocidos en todo el mundo con sus respectivas metodologías hidrológicas y estadísticas tradicionales. Además, también se calcula el mismo parámetro (caudales de diseño) con los mismos modelos, pero con una metodología actualizada y moderna como son los “momentos lineales”.

Los resultados obtenidos con los modelos probabilísticos, usando la metodología tradicional, servirán para comparar resultados con estudios anteriores y para tener una idea de dichos caudales. Al revisar los estudios anteriores se observa que en estos sólo se aplican los modelos con metodología tradicional, que es lo correcto debido a la antigüedad de los estudios.

En cambio, desde hace algún tiempo, estas metodologías de cálculo han ido mejorando y actualizándose, de acuerdo con las herramientas disponibles, tanto de software como de hardware, que han permitido la realización de numerosos estudios y pruebas. Así, la metodología tradicional ha sido mejorada con algunos ajustes, tal es el caso de los momentos lineales; que se viene aplicando en varias partes del mundo con muy buenos resultados.

2.1.1. Metodología tradicional

Es ampliamente conocida a nivel mundial, con resultados bastante aceptables. El principio básico es realizar un análisis de frecuencias con los datos reales y observar en la gráfica la tendencia de los mismos. Posteriormente, ajustar la serie de datos de caudales máximos instantáneos, de acuerdo a unos modelos probabilísticos predeterminados y comparar “gráficamente” cómo se distribuyen los datos con la realidad, además de realizar unas pruebas de bondad de ajuste.

Los modelos probabilísticos utilizados en el presente estudio son:

- Weibull.
- Gumbel.
- Log Normal II
- Log Normal III
- Gamma
- Log Pearson III

No se presentan las fórmulas que gobiernan cada uno de estos modelos, por ser ampliamente conocidos.

2.1.2. Momentos Lineales (L-Moments)

Si, x_i para $i=1$, hasta n , es una muestra aleatoria de caudales máximos anuales, entonces el momento “ r ” de la muestra con respecto al origen es:

$$M'_r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^r}{n}$$

El momento “ r ” de la muestra con respecto al promedio \bar{x}

$$M'_r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^r}{n}$$

Las medidas que describen las distribuciones de probabilidad son: tendencia central, dispersión, simetría y la forma del “pico” de la distribución; las mismas que se calculan con el promedio (\bar{x}), la varianza (S^2), el coeficiente de asimetría (C_s) y el curtosis (C_k):

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

$$C_s = \frac{M_3}{M_2^{3/2}} = \frac{\sqrt{n} \sum (x_i - \bar{x})^3}{\left(\sum (x_i - \bar{x})^2\right)^{3/2}}$$

$$C_k = \frac{M_4}{M_2^2} = \frac{n \sum (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sum (x_i - \bar{x})^2\right)^2}$$

El promedio, es el momento de primer orden de la muestra con respecto al origen; la varianza es el momento de segundo orden con respecto al promedio; el coeficiente de asimetría es una función con momentos de tercer y segundo orden, con respecto al promedio; y la curtosis es una función con momentos de cuarto y segundo orden con respecto al promedio.

Los valores del coeficiente de asimetría y curtosis son muy sensibles a los valores muy alejados de la media (outliers). Estos valores, extremadamente altos o bajos en la serie, determinan el comportamiento de la cola de la distribución.

Mientras que los momentos convencionales son expresiones de sumas de potencias de las observaciones en la muestra, una alternativa aproximada es usar combinaciones lineales de los valores ordenados de la muestra para obtener momentos lineales estadísticos o L-Moments

Para una muestra aleatoria x_1, x_2, \dots, x_n , ordenada de acuerdo a: $x_{1:n} \leq x_{2:n} \leq \dots \leq x_{n:n}$, el momento lineal (L- momento) "r" de la muestra se puede estimar por:

$$\lambda_r = \binom{n}{r}^{-1} \sum_{l \leq i_1} \sum_{i_1 \leq i_2} \dots \sum_{i_{r-1} \leq i_r} r^{-1} \sum_{k=0}^{r-1} (-1)^k \binom{r-1}{k} x_{i-k:n}$$

En tal sentido, se tiene:

Promedio: $\lambda_1 = n^{-1} \sum x_i$

L- Desviación estándar:

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} \binom{n}{2}^{-1} \sum_i \sum_{j \succ i} (x_{i:n} - x_{j:n})$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{3} \binom{n}{3}^{-1} \sum_i \sum_{j \succ i} \sum_{k \succ j} (x_{i:n} - 2x_{j:n} + x_{k:n})$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4} \binom{n}{4}^{-1} \sum_i \sum_{j \succ i} \sum_{k \succ j} \sum_{l \succ k} (x_{i:n} - 3x_{j:n} + 3x_{k:n} - x_{l:n})$$

L- Asimetría: $\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2$

L- Curtosis: $\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2$

Las ventajas más importantes, cuando se usan momentos lineales (L-Moments), en lugar de momentos tradicionales, son:

- a) Las variaciones de la muestra no afectan los resultados significativamente; prácticamente no tienen sesgo. Se ajustan mejor en pequeñas muestras.

- b) Son menos sensitivos a los valores máximos extremos, es decir, a aquellos valores muy alejados de la media de la muestra (outliers), en cambio los momentos convencionales sí son afectados.
- c) Para pequeños grupos de datos de caudales máximos, proporciona mejores resultados con la distribución seleccionada.

Si tenemos una muestra con outliers y aplicamos momentos tradicionales, los coeficientes de asimetría (C_s) y curtosis (C_k) (ver fórmula) elevarán la diferencia entre el valor " x_i " y la media a la tercera y cuarta potencias, aumentando dicho valor y, por lo tanto, asignándole un mayor peso; es decir, los momentos convencionales están sesgados hacia los valores alejados de la media. Sin embargo, los momentos lineales asignan el mismo peso a todos los datos.

Algunos experimentos publicados recientemente en la mayoría de journals especializados, demuestran la superioridad de los momentos lineales, comparados con los momentos convencionales:

- Wallis (1990): Demostró, con ayuda de una simulación de Monte Carlo, cómo los momentos lineales carecen virtualmente de sesgo, a comparación de los momentos convencionales.
- Royston (1991): A través de un experimento de simulación no paramétrica de Monte Carlo, demostró que los momentos lineales son generalmente menos sensitivos a los "outliers" en los datos, especialmente en distribuciones asimétricas.

2.1.3. Análisis de avenidas aplicando métodos estadísticos

Un gran número de estudios de defensa de inundaciones exige únicamente la evaluación del caudal típico y de su probabilidad de ocurrencia. Sin embargo, las demás características de inundaciones, como volumen de la avenida y duración de inundaciones pueden ser también críticas en algunos casos.

La fiabilidad con la que se establece la función caudal típico – probabilidad de ocurrencia; depende mayormente de la cantidad de información disponible para la localidad – perfil del río o tramo de interés.

El establecimiento de función caudal típico – probabilidad de ocurrencia para perfiles de ríos donde existen mediciones de caudales y observaciones de niveles de agua, es un procedimiento que requiere del análisis estadístico de caudales máximos registrados (anuales o análisis de series parciales). Este análisis, por su parte, exige una serie de datos lo suficientemente larga, suponiendo la homogeneidad y la calidad de la información.

Utilizando los datos de medición provenientes de las localidades en la cuenca y de las cuencas vecinas (previo análisis de homogeneidad, desde el aspecto del parámetro analizado), la calidad con la que se establece la función caudal típico - probabilidad de ocurrencia puede mejorarse adicionalmente.

El procedimiento de preparación y análisis de la calidad de la información, antes de acceder a los análisis estadísticos, debe realizarse estricta y completamente, ya que, de lo contrario, puede llevar a conclusiones muy equivocadas.

Longitud de la serie medida/ observada

No es fácil contestar a qué duración de observaciones es suficiente para los análisis estadísticos. La fiabilidad y calidad de la función caudal máximo – probabilidad de ocurrencia depende, principalmente, de la longitud o calidad de la serie, pero también de la representatividad, homogeneidad de la información y de la posibilidad de análisis regional de caudales máximos dentro de la zona homogénea.

No obstante y en términos generales, el mayor número de hidrólogos concordará que la extrapolación de observaciones es permitida por dos a tres veces; esto es, que, en base de la observación de unos 20 años, es posible establecer la función fiablemente hasta el período de retorno de 60 años, como máximo.

En consecuencia, sucede frecuentemente el encontrar variaciones significativas en la función caudal máximo – probabilidad de ocurrencia con la recopilación y análisis de datos nuevos, aún después de la ejecución de las obras de defensa de inundaciones.

Homogeneidad /calidad de la serie

La causa típica de la no homogeneidad de la serie pueden ser los cambios en la cuenca, aguas arriba del punto de medición (construcción de presa con embalse, urbanización, variación en la forma de aprovechamiento de las tierras agrícolas, destrucción de cubierta vegetal – tala de bosques, etc.).

Los cambios artificiales ocasionados de este modo pueden resultar en diferentes volúmenes de escurrimiento, formas de hidrogramas y caudales máximos diferentes para las mismas precipitaciones. Si estos cambios son importantes, es preciso efectuar la separación de la serie de datos y hacer su análisis aparte. Igualmente, hay que examinar también la calidad de los datos, tomando en cuenta los avances de las técnicas de medición, la fiabilidad y los tipos de instrumentos (limnógrafo /limnómetro), etc.

La función caudal típico – probabilidad de ocurrencia establecida para la serie de datos suficientemente larga y fiable es, indudablemente, la técnica más segura, aunque representa la característica referida a la localidad de medición. El caso más frecuente es que es necesario establecer esta función para otras localidades en el mismo curso de agua/cuenca o región homogénea. Por ello, en estos casos, es necesario aplicar y calibrar métodos de análisis que se utilizan cuando no existen mediciones de caudales (por ejemplo, el de hidrograma unitario sintético), paralelamente para la ubicación del puesto de medición, y aplicar luego el modelo, calibrado y ‘verificado’ de esta manera, a otras localidades en el mismo curso de agua/región.

2.2. PROGRAMA HEC-HMS – SISTEMA DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA

2.2.1. Descripción del modelo

El Hydrologic Modeling System, HEC-HMS¹, es un programa hidrológico que brinda una serie de opciones para simular procesos lluvia-escorrentía, indispensables para el cálculo de avenidas en las cuencas similares a la del río Piura. El programa está desarrollado en base al modelo HEC 1, muy conocido y frecuentemente usado para todo tipo de análisis de problemas e impactos de avenidas. Además de las opciones básicas de su antecesor (hidrograma unitario y ruteo hidrológico), el programa HEC-HMS incluye una opción de transformación del escurrimiento distribuido linealmente, una opción de “reducción de humedad” aplicable para la simulación a largo plazo y una opción de rutinas de optimización de parámetros.

El HEC-HMS está compuesto de una interfaz gráfica con el usuario (GUI) componentes de análisis hidrológicos integrados, capacidades de almacenamiento y manejo de datos y facilidades de reportes gráficos y tabulares. El GUI provee un medio para especificar los componentes de la cuenca y el ingreso de sus datos, así como la visualización de resultados.

Este programa permite realizar modelos agregados y modelos distribuidos. En los modelos agregados, las pérdidas y las precipitaciones son promediadas, espacialmente, a lo largo de las subcuencas, mientras que en un modelo distribuido se requiere la lluvia en una malla o conjunto de celdas que componen la subcuencas. En ese caso, las pérdidas y excesos son calculadas por separado para cada celda de la subcuenca. Dependerá de la información disponible para realizar uno u otro modelo.

En general, los elementos hidrológicos son dispuestos en una red dendrítica y los cálculos se realizan en una secuencia de aguas arriba a aguas abajo. La simulación requiere de tres conjuntos de datos:

- **Modelo de la cuenca:** Contiene los parámetros y los datos de conexión de los elementos hidrológicos. Los tipos de elementos son: subcuenca, curso de agua, confluencia, bifurcación, reservorio, ingreso y salida.
- **Modelo de precipitación:** Consiste en los datos meteorológicos y la información requerida para procesarla. El modelo puede representar condiciones históricas o hipotéticas (tormentas de diseño).

¹ US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center.

- **Especificaciones de control:** Especifica la información relacionada con el tiempo para una simulación: fecha y hora de inicio y fin de la misma, así como el intervalo de tiempo para los cálculos.

Por otro lado, tres tipos de procesos son realizados en la simulación:

- **Pérdidas:** Calcula las pérdidas o abstracciones que deben deducirse de las precipitaciones brutas para determinar las precipitaciones efectivas o netas.
- **Transformación:** Convierte la precipitación neta en escorrentía directa.
- **Ruteo:** Considera el flujo de agua a través de sus cursos, sean éstos de características geométricas definidas (trapezoidal, circular, etc.) o de sección irregular, mediante el ingreso de ocho puntos de la sección del cauce y hasta tres valores diferentes de coeficiente de Manning.

2.2.2. Uso del HEC-HMS

El programa HEC-HMS ha sido analizado para definir su uso en este proyecto específico. Es importante destacar que el modelo seleccionado tiene una aplicación mundial para problemas similares. Los resultados de su aplicación son conocidos y fácilmente aplicables, además sus parámetros claves y el procedimiento aplicado, prácticamente representan un estándar mundial para los modelos hidrológicos de avenidas. Por la diferencia con los métodos estadísticos, el modelo hidrológico, aplicando un procedimiento diferente, determina un hidrograma completo de la avenida analizada, y no solamente un caudal máximo. El programa HEC-HMS cumple todas estas especificaciones. La conclusión es que HEC-HMS es útil, dando un hidrograma de diseño para el río Piura en la presa Los Ejidos.

HMS tiene algunas opciones de métodos para usar, las cuales se analizan y seleccionan. A continuación, atendiendo a la disponibilidad de datos mencionamos las siguientes:

- Para el modelo de precipitación, se usa la opción “User-Specified Gage Weights” con polígonos de Thiessen para determinar los factores de peso.
- Para pérdidas, se usan los métodos del Número de curvas Servicio de Conservación de Suelos (ver sección 2.4.1) y Pérdidas inicial/constante para calibrar la cuenca y luego, en la predicción misma se emplea aquél que haya dado los mejores resultados durante la calibración del modelo.
- Para la transformación hidrológica, se usa el Hidrograma unitario del SCS.
- Para el ruteo hidrológico, se usa el método de Muskingum.

Los datos existentes están en el formato de altura de precipitación para varios períodos durante las tormentas, entre los años 1972-1986, aproximadamente. Hay también datos más recientes de precipitación total mensual –y en algunos casos diaria- para cada estación. Hay algunas estaciones para las cuales no se tienen datos. Considerando que la cuenca del río Piura es grande, sobre los 10,000 km², con variedad de climas, se procede con cuidado, estimando lluvias en las estaciones para las cuales no tenemos datos.

2.3. ESTACIONES PONDERADAS POR EL USUARIO (“USER-SPECIFIED GAGE WEIGHTS”)

Este método, que presenta el HEC-HMS, permite definir, entre sus opciones para el modelo de precipitaciones, la influencia o ponderación de cada estación en la cuenca. La ponderación, usando polígonos de Thiessen, es usada frecuentemente, y apropiada para usar con nuestros datos a fin de estimar las lluvias de las áreas sin datos.

Para ello, es necesario definir los polígonos en la cuenca, sobre la base de las estaciones pluviográficas con que se cuenta. En este estudio, los polígonos se trabajan mediante el uso del AutoCAD. Debe procurarse que cada polígono represente una región con el mismo clima; de modo que, si una región sin datos tiene un clima muy diferente que el de la estación más cercana, se necesita hacer asunciones de cuáles son los datos de esta estación. Es decir, se necesita hacer un tipo de estudio regional de la cuenca.

Usualmente, el modelo es calibrado usando los datos, medidos simultáneamente, de las intensidades de las precipitaciones históricas para cada subcuenca, datos de las mediciones de la evaporación en cada subcuenca y los datos limnigráficos de los caudales transcurridos en las estaciones hidrológicas que controlan cada subcuenca. Cuando estos grupos de datos simultáneos existen, antes de la calibración del modelo, usualmente se analizan y seleccionan datos y periodos típicos, determinando datos y periodos de los hidrogramas de avenidas, observados en las estaciones hidrológicas típicas que controlan cada subcuenca y al mismo tiempo y para el mismo periodo, de las intensidades de las precipitaciones. En el caso del río Piura, sería suficiente tener datos de las precipitaciones horarias típicas para cada subcuenca, datos de evaporación (diarios o eventualmente mensuales) y los datos horarios de los hidrogramas de las avenidas para cada estación hidrológica seleccionada.

De esta manera, sería posible calibrar el modelo en base a los datos meteorológicos de cada subcuenca (intensidades de las precipitaciones y evaporación), comparando los resultados del modelo con los datos observados de los caudales típicos simultáneos, en las estaciones hidrológicas que controlan cada subcuenca. Durante el proceso de la calibración sería posible cambiar parámetros del modelo, comparando con los datos medidos de las avenidas típicas, hasta que se logre que los resultados del modelo, usando datos específicos de las avenidas seleccionadas, coincidan con los resultados medidos en las estaciones hidrológicas.

Sin embargo, en la cuenca del río Piura no existen todos los datos especificados y faltan también los datos simultáneos de la medición de las intensidades de la precipitación, evaporación y caudales horarios, que impide la aplicación de este método estándar de la calibración del modelo. Por ello, el Consultor ha aplicado el método alternativo del hidrograma sintético unitario, que, según la disponibilidad de los datos, se puede usar para la cuenca del río Piura, respetando criterios y procedimientos internacionales que son previstos para este tipo de cálculos del modelo hidrológico.

La aplicación del modelo hidrológico, usando el hidrograma sintético unitario es también el método estándar, recomendado para las condiciones hidrológicas y meteorológicas de los ríos similares al río Piura, teniendo en cuenta la disponibilidad y la calidad de los datos mencionados. En la literatura hidrológica mundial existen varios ejemplos de aplicación, similar al modelo hidrológico, usando el hidrograma unitario sintético, que confirman que los resultados obtenidos son muy confiables y que representan de manera adecuada la forma y la intensidad de las avenidas analizadas para cada cuenca y subcuenca típica.

Como confirmación de esta experiencia mundial también se pueden analizar los resultados de este mismo estudio, donde la diferencia entre las intensidades máximas de avenidas, aplicando el modelo HEC-HMS y un análisis estadístico de las avenidas, en base de los caudales máximos instantáneos anuales observados en la estación Sánchez Cerro; prácticamente, no existe y alcanza solamente el 9% (ver capítulo 5 de este informe).

2.4. PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación neta o efectiva es la que no se retiene en la superficie, ni se infiltra en el suelo. Después de fluir por la superficie terrestre se convierte en escorrentía a la salida de la cuenca.

Para determinar la precipitación neta y el escurrimiento de agua de lluvias desde las cuencas que no cuentan con mediciones hidrológicas, se deben determinar las pérdidas o abstracciones, para lo cual existen diversos métodos. En el presente estudio se aplica el método desarrollado por el Soil Conservation Service, el mismo que es explicado a continuación.

2.4.1. Método SCS para abstracciones o pérdidas (1), (2)

Sobre la base de las características determinadas de la cuenca (tipo de suelo, tipo de cultivo, cubierta vegetal, etc.), se determina un número adimensional de curva, CN, a través del cual se transforman las precipitaciones brutas en precipitaciones netas usando la relación:

$$Pe = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P + 0.8 S}$$

donde:

P : precipitación bruta o total (mm)

P_e : precipitación neta (mm)

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25.4 \quad : \text{retención potencial máxima del suelo (mm)}$$

CN : número adimensional de curva.

Este CN se determina de la tabla presentada en el anexo 2.1, que ha sido preparada para condiciones antecedentes de humedad media, AMC II. Para condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva correspondientes pueden estimarse en base a los datos para AMC II:

$$CN(I) = 0.008CN(II)^2 + 0.169CN(II) + 2.166$$

$$CN(III) = -0.007CN(II)^2 + 1.596CN(II) + 6.931$$

En la tabla 2, se muestra el rango para las condiciones antecedentes de humedad para cada clase.

Tabla 2. Clasificación de antecedentes de humedad (AMC)

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (mm)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	menor que 12.7	menor que 35.6
II	12.7 a 28	35.6 a 53.3
II	sobre 28	sobre 53.3

Los números de curva han sido tabulados en base al tipo de suelo y uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo A: Bajo potencial de escorrentía y alta infiltración. Arenas profundas, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Infiltración moderada cuando los suelos están completamente mojados. Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Infiltración lenta cuando los suelos están completamente mojados. Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Alto potencial de escorrentía y baja infiltración. Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente

plásticas y ciertos suelos salinos.

Para una cuenca formada por varios tipos de suelo y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un *CN* compuesto.

Dado que los escurrimientos máximos en una zona dependen, no sólo de la magnitud de las precipitaciones, sino también de su duración, en el modelo se asume que antes de las lluvias, la zona del estudio ha soportado algunas precipitaciones iniciales y el suelo tiene un cierto contenido de humedad (AMC II). Para las precipitaciones iniciales se puede asumir que representan la suma de las pérdidas iniciales básicas, que para el caso de los fenómenos tipo El Niño representa una estimación muy ajustada a la realidad.

Puesto que no existen datos del escurrimiento y de las precipitaciones correspondientes, medidos en el campo, el valor de *CN* se estima sobre la base de las características físico-geográficas de las cuencas, obtenidas en los recorridos y mapeo del terreno.

2.5. HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO

Los cálculos del hidrograma sintético se basan en la determinación del hidrograma unitario sintético, de acuerdo a los elementos de las subcuencas y de las quebradas que es posible determinar a partir de los mapas topográficos, de los análisis y cálculos en función de pérdidas (abstracciones iniciales y por infiltración) y de la relación entre la intensidad, duración y periodo de retorno (curvas IDF) de las precipitaciones.

Se analizan varios métodos, según diversos autores, del hidrograma unitario sintético y se aplica el método de cálculo, conforme a los procedimientos establecidos en el modelo hidrológico HEC-HMS.

Según las recomendaciones, para casos similares se utiliza el hidrograma unitario en forma de triángulo, definido por los parámetros mostrados en el Gráfico 1, donde también se muestran los valores usados para su determinación.

Para el hidrograma unitario triangular se puede calcular:

$$T_b = T_p + T_r$$

$$T_r = k * T_p$$

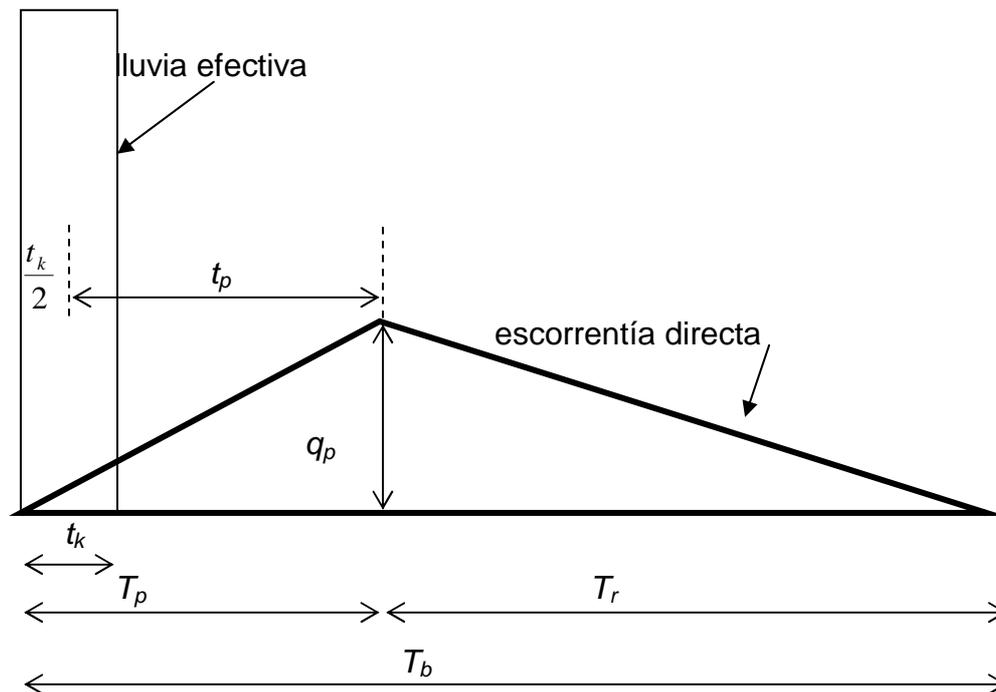
$$T_b = T_p * (1 + k)$$

$$T_p = \frac{t_k}{2} + t_p$$

donde:

- T_b : Tiempo de duración de hidrograma,
- T_p : Tiempo de crecida de hidrograma,
- T_r : Tiempo de recesión de hidrograma,
- t_k : Tiempo de duración de la lluvia,
- k : Relación entre T_r y T_p (Ver Anexo 2.2).

Gráfico 1: Elementos del hidrograma unitario sintético triangular



Los valores de tiempo indicados pueden relacionarse con características físico-geográficas, como superficie y factor de forma de la cuenca, longitud del curso principal y desnivel de la cuenca en la dirección del flujo de agua.

De los numerosos trabajos que tratan los elementos de tiempo del hidrograma unitario, se han escogido, para el presente estudio las siguientes fórmulas (Bel Omcar, Energoprojekt, Informe final, Apéndice B: Hidrología y Topografía, Vol.B.1. Estudio Hidrológico de las Quebradas) para el tiempo crítico de duración de la lluvia:

$$t_k = t_c * (1 - t_c)^{-0.2} \quad (\text{horas})$$

donde t_c es el tiempo de concentración:

$$t_c = \frac{L^{0.8} \left[\frac{1000}{CN} - 9 \right]^{0.7}}{1140 S^{0.5}}$$

con:

- L : longitud hidráulica de la cuenca (mayor trayectoria de flujo) (pies)
- CN : número de curva SCS
- S : pendiente promedio de la cuenca (%)

y para la ordenada máxima del hidrograma unitario, se ha utilizado:

$$Q_m = 2A * \frac{P_{ef}}{T_b} \quad (\text{mm/hora})$$

$$Q_m = 0.56 \frac{P_{ef}}{T_b} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

con:

- A = área de la cuenca (Km^2)
- P_{ef} = precipitación neta, efectiva (mm)
- T_b = duración de la base del hidrograma (hora)

3. DATOS BÁSICOS

3.1 CAUDALES

En la realización del presente estudio se usan los datos de descargas del río Piura para el período 1926–1999 registrados en la estación Puente Sánchez Cerro (23.3 msnm, 5°11'55" latitud sur, 80°37'20" longitud oeste) ubicada en la ciudad de Piura y que controla una cuenca de 7,790 km² aproximadamente.

Para el planeamiento de las obras civiles, es importante conocer el comportamiento de los niveles del río en la estación hidrológica Puente Sánchez Cerro, ya que al producirse las descargas máximas instantáneas, se conocerá el nivel con el que se podría dotar de seguridad a las obras que se proyecte construir o instalar, para evitar daños catastróficos derivados de su destrucción. Tal seguridad estaría orientada a determinar el mayor nivel que alcanzaría el río para un período de retorno dado y la vida útil de cada obra propuesta.

Las descargas máximas en la cuenca del río Piura se presentan generalmente en el primer trimestre de cada año, tratándose de lluvias estacionales.

En el período de registro de la Estación Puente Sánchez Cerro (1926-1999) la descarga máxima instantánea alcanzó los 4424 m³/s (1998, año excepcionalmente húmedo con presencia del Fenómeno del Niño). En el anexo 3.1 se presentan los datos de caudales máximos anuales medidos en la estación Puente Sánchez Cerro y usados para el análisis estadístico.

3.2 PRECIPITACIONES

Los análisis de las precipitaciones de este estudio, realizadas, básicamente, con el objetivo de implementar el modelo matemático HEC-HMS, de acuerdo con la metodología explicada.

De los anuarios hidrometeorológicos y otros documentos del Proyecto Especial Chira–Piura y de SENAMHI, se ha recopilado la información meteorológica que se emplea en el presente estudio. La Tabla 3 presenta la relación de estaciones pluviográficas de las que se obtuvo información.

Teniendo en cuenta los parámetros, generalmente heterogéneos, de hidrología, climatología, forma y dimensiones de la cuenca, así como los requerimientos del modelo; el análisis de las precipitaciones máximas, se lleva a cabo usando los datos disponibles de todas las estaciones en la cuenca, en base de la distribución de las subcuencas (ver Anexo 1 y Anexo 3).

Debido a que no existen datos suficientes de mediciones de las intensidades de lluvias en la cuenca del río Piura, ya sea por falta de estaciones pluviográficas o por pérdida de la información correspondiente, ha sido necesario usar, además, los datos de precipitaciones máximas diarias que se muestran en el Anexo 3.3.

Tabla 3. Estaciones pluviográficas con información disponible en la cuenca del río Piura.

Subcuenca	Estación
Bigote-Huarmaca	Chignia
	Barrios
	Huarmaca
	Canchaque
Chulucanas	Morropón
	Chulucanas
	Paltashaco
Medio Piura	Miraflores
Bajo Piura	Monte grande

3.2.1. Precipitaciones máximas diarias

Para el análisis estadístico de las precipitaciones se han usado los datos de las precipitaciones máximas diarias registradas en las estaciones que se detallan en la Tabla 4. Los registros correspondientes aparecen en el anexo 3.3.

Durante el proceso de análisis estadístico de los datos de las precipitaciones máximas diarias, es necesario aplicar diferentes distribuciones teóricas. Los resultados de la aplicación de diferentes distribuciones y su coherencia con la serie de los datos observados, se evalúan usando los métodos de Chi-cuadrado y el método de desviación. Las distribuciones teóricas que se usan son:

- Log- Normal con dos parámetros
- Log- Normal con tres parámetros
- Gamma de dos parámetros
- Pearson III
- Gumbel (Valores Extremos Tipo I)

Usando los criterios de bondad de ajuste de los datos observados en las distribuciones teóricas (Chi- cuadrado y método de desviación), se determinan los modelos probabilísticos más apropiados. Los resultados de los análisis que se realizan se presentan en las tablas y los gráficos del anexo 4.1.

Tabla 4. Estaciones con registros de precipitaciones máximas diarias

Subcuenca	Estación	Observaciones
Bigote-Huarmaca	Barrios	
	Bigote	
	Canchaque	
	Chignia	
	Huarmaca	
	Pirga	
Chulucanas	Pasapampa	
	Ñacara:	
	Chulucanas	
	Frías	
	San Pedro	
	Altamiza	
	Chalaco	
	Morropón	
Paltashaco		
Santo Domingo		
Tambogrande	Chulucanas	Estaciones con datos confiables, utilizadas
	Frías	
	San Pedro	
	Curbán	Por las series muy cortas de los datos observados fue imposible usar como datos confiables
	Cruceta	
	San Isidro	
	Malingas	
Partidor		
Tejedores		
Tambogrande		
Medio Piura	San Joaquín	Estaciones con datos confiables
	Miraflores	
	Partidor	Por las series muy cortas de los datos observados fue imposible usar como datos confiables
	San Isidro	
Cruceta		
Hualtaco		

En base de todos estos análisis que se ejecutan y las explicaciones adicionales del acápite siguiente, se toma como la estación clave de la cuenca la de Miraflores. A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de la distribución Log-Normal con 3 parámetros a esta estación:

Tabla 5. Análisis estadístico de las precipitaciones observadas en la estación Miraflores (Distribución Log-Normal con 3 parámetros).

Período de retorno	(años)	10	25	50	100	200	500
P_{24h}^{max}	[mm]	62	106	147	196	230	275

3.2.2. Intensidades máximas de las precipitaciones con duración menor a 24 horas

En el acápite anterior se presentan los resultados de los análisis estadísticos de las precipitaciones máximas diarias para cada subcuenca, para lo cual fue necesario usar todos los datos disponibles en la cuenca del río Piura, tanto a nivel espacial, como temporal.

De acuerdo con la metodología del modelo hidrológico HEC-HMS, para calcular las avenidas típicas, es necesario determinar los valores de las intensidades máximas de las precipitaciones con duración menor a 24 horas. En la cuenca del río Piura, las mediciones de las intensidades de las precipitaciones, con duración menor de 24 horas, son muy escasas, con la densidad espacial y temporal no adecuadas para el análisis del modelo. Por ello, no fue posible usar directamente los datos de las mediciones existentes en la cuenca (intensidades de las precipitaciones con duración de 24 horas) y fue necesario realizar los análisis adicionales que se explican a continuación.

En la cuenca del río Piura la única estación que tiene una serie confiable, con la duración necesaria de las intensidades de las precipitaciones con duración menor a 24 horas, es la estación de Miraflores. Una de las ventajas de esta estación es que se encuentra en la ciudad de Piura, tiene personal calificado y un control constante de las mediciones realizadas. A su vez, esta estación tiene una serie suficientemente larga de datos de las intensidades de las precipitaciones, que permite la aplicación de los métodos estadísticos y la determinación de los parámetros necesarios para el modelo matemático.

Como parte del estudio de Energoprojekt (3), elaborado a fines de 1998, se realizó un análisis detallado de la intensidad de las precipitaciones para diversas estaciones en la cuenca baja del río Chira y para la zona de la ciudad de Piura. Uno de los resultados del estudio fue la confirmación de que existe una similitud muy clara entre las intensidades de las precipitaciones en las estaciones Chilaco, Mallares y La Esperanza, que se encuentran en la cuenca vecina del río Chira, con las intensidades de la precipitación en la estación de Miraflores.

El Consultor ha analizado todos los datos disponibles de las precipitaciones en la cuenca del río Piura, pero dado que el modelo requiere intensidades con duración menor de 24 horas, fue necesario aplicar la metodología alternativa, que se usa frecuentemente en el caso de las cuencas similares, cuando no existen todos los datos necesarios de intensidades de precipitaciones con duración menor de 24 horas. Se ha usado la curva adimensional de las intensidades, con sus duraciones respectivas, para la estación de Miraflores, fin de determinar valores respectivos de las precipitaciones con duración menor que 24 horas, en todas las estaciones en la cuenca que sólo cuentan con datos de precipitaciones diarias.

De esta manera, es posible usar intensidades de precipitaciones con duración de 24 horas en todas las estaciones de la cuenca, con el apoyo de la curva

adimensional de la estación de Miraflores, determinando de tal manera precipitaciones típicas para cada estación con la duración de menos de 24 horas.

Como parte de los análisis en el estudio mencionado, se investigó la intensidad de las precipitaciones registradas en la estación de Miraflores, ubicada en la ciudad de Piura, incluyendo el análisis estadístico de las intensidades de las precipitaciones de 15 min., ½h, 1h, 3h, 6h y 24h.

Como resultado de estos análisis en el estudio se presentan relaciones entre las precipitaciones con duración menor a 24 horas y de las precipitaciones diarias. Estas relaciones son los coeficientes de duración, definidos como:

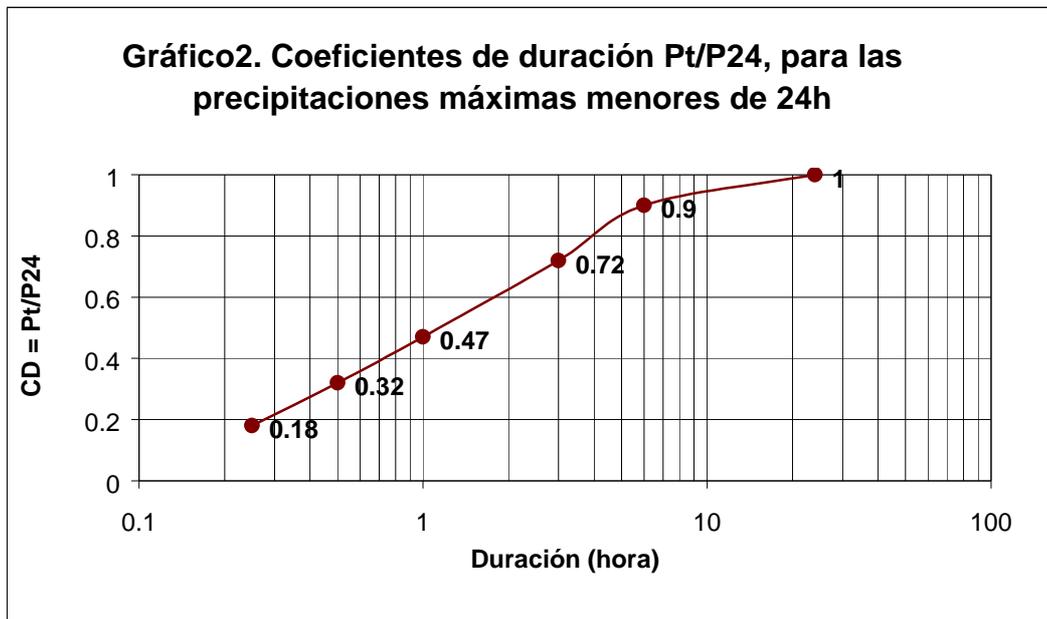
$$CD = \frac{P_t}{P_{diaria}}$$

para todas las estaciones analizadas y que se presentan en la tabla 6. El gráfico 2 presenta los valores para la estación de Miraflores.

Tabla 6. Coeficientes de duración para precipitaciones máximas menores de 24^h.

Estación	D u r a c i ó n (horas)					
	0,25	0,5	1	3	6	24
CHILACO	0.20	0.32	0.46	0.71	0.83	1.0
MALLARES	0.17	0.27	0.41	0.82	0.94	1.0
LA ESPERANZA	0.14	0.26	0.39	0.63	0.85	1.0
MIRAFLORES	0.18	0.32	0.47	0.72	0.90	1.0

Analizando los datos presentados en la tabla anterior, se puede ver que existe una consistencia entre las intensidades de las precipitaciones de duración menor a 24 horas y las intensidades de las precipitaciones diarias. Teniendo en cuenta que la estación de Miraflores se encuentra en la cuenca del río Piura y que los resultados del estudio anterior confirman que no existe gran variación en las intensidades para las precipitaciones de diferentes duraciones, los resultados obtenidos para la estación de Miraflores, se usan para los análisis de las avenidas en la cuenca del río Piura.



Los resultados mencionados se usan como datos adimensionales, permitiendo definir las precipitaciones de diferentes duraciones, sobre la base de los datos de las precipitaciones máximas diarias en toda la cuenca.

4. AVENIDAS

El análisis de las avenidas típicas para este estudio, se realiza para la sección del puente Sánchez Cerro (represa derivadora Los Ejidos), usando dos métodos diferentes, análisis estadístico y un modelo matemático hidrológico.

La serie de los caudales instantáneos máximos anuales, registrados en la estación Sánchez Cerro, se usa como base sólida para el cálculo de la probabilidad de ocurrencia de los caudales típicos en esta zona de la cuenca del río Piura. Sin embargo, usando únicamente el método estadístico, no es posible definir la forma de los hidrogramas típicos de las avenidas. Dado que estos parámetros (volumen total de la avenida, forma del hidrograma y distribución de las intensidades de la avenida), son importantes para los cálculos hidráulicos en la zona urbana, las Consultoras usan el modelo matemático hidrológico, preparado en base de las precipitaciones y otros parámetros típicos de la cuenca del río Piura, para definir todos los parámetros importantes necesarios para el desarrollo del estudio integral de la protección ribereña. Los cálculos correspondientes para cada método fueron realizados para diferentes probabilidades de ocurrencia entre 10% y 0.2%, o para los períodos de retorno entre 10 y 500 años.

4.1. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

Para el análisis probabilístico de este estudio se usan todos los datos presentados en el capítulo 3 de este Apéndice. En el anexo 3.2 se presentan los datos de los caudales máximos instantáneos anuales, disponibles y registrados simultáneamente en las estaciones de Malacasí, Puente Ñacara, Tambogrande y Sánchez Cerro. En base de la experiencia y conocimiento de los parámetros hidrológicos, climatológicos y geográficos de la cuenca del río Piura, se analizan todos los datos disponibles. Como resultado de estos análisis fue posible determinar algunas anomalías comparando los datos de los caudales máximos desde 1972 (un efecto inesperado y muy pronunciado de la transformación de las avenidas entre las estaciones de Tambogrande y Sánchez Cerro). Casi la misma conclusión se puede tomar para el año siguiente 1973. De la misma manera, no se pueden tratar como lógicos los datos de caudal máximo de 1982, registrados en la estación de Tambogrande (inicio de El Niño).

En base de los análisis de la disponibilidad y calidad de los datos disponibles, relacionados a la problemática de los caudales máximos instantáneos anuales y máximos diarios, se puede concluir lo siguiente:

- Los datos de los caudales máximos registrados en las estaciones de Malacasí, Ñacara y Tambogrande, no tienen el período de observación suficientemente largo y su calidad no es adecuada, lo que determina que estos datos no puedan ser tratados y considerados como confiables para análisis estadísticos para determinar avenidas típicas en la cuenca del río Piura.

- Estos datos, sin embargo, pueden ser usados para el control, análisis y correlación con los datos de la estación Sánchez Cerro.
- Teniendo en cuenta la disponibilidad y confiabilidad de los datos de la estación Sánchez Cerro (1926 – 1999), se puede recomendar usar éstos como base para el análisis estadístico de las avenidas típicas en la cuenca del río Piura (ver anexo 3.1).

De acuerdo con los comentarios anteriormente presentados, el Consultor ha usado datos de la estación Sánchez Cerro, como base para el análisis estadístico de las avenidas en la cuenca del río Piura. Es importante recordar que para el análisis estadístico de las avenidas en una zona específica, en nuestro caso, tramo urbano del río Piura, es de suma importancia tener una serie confiable y larga de los datos medidos, en la misma zona del estudio. En el caso de la estación Sánchez Cerro, dada su ubicación y una serie de más de 75 años con mediciones confiables, el Consultor tiene, exactamente, este tipo de estación hidrológica ubicada en la zona central del estudio.

De acuerdo con la literatura hidrológica mundial (Yevdjevic y otros), es muy importante tener una serie de observaciones durante un periodo largo (lo más largo posible), determinando que la serie observada pueda ser extrapolada, con la confiabilidad adecuada, hasta la relación 2 o, como máximo 3, que en el caso específico del Estudio del río Piura, donde se analizan avenidas con periodo de retorno entre 100 y 150 años, el periodo recomendable de mediciones alcanza entre 50 y 75 años (entre 33 y 50 como extremo). De tal manera, el Consultor considera que la serie de datos en la estación Sánchez Cerro es adecuada para el análisis de las avenidas con periodo de retorno entre 100 y 150 años, que la estación se ubica exactamente en la zona central del estudio y que los datos observados, según varios estudios mencionados, son confiables.

El Consultor también ha analizado series de datos con duración menor, como por ejemplo, la serie de los últimos 25 ó 35 años, donde es obvio que estas series tienen parámetros estadísticos diferentes en comparación con toda la serie hidrológica observada. Sin embargo, y de acuerdo con las conclusiones de varios estudios a nivel mundial, el Consultor considera que estas diferencias no pueden ser directamente consideradas como la confirmación de cambios en las tendencias y parámetros principales de una cuenca. La experiencia mundial indica que, en caso se quiera determinar si existe un cambio en los parámetros hidrológicos principales de una cuenca, es necesario tener:

- a) varias series, por un periodo muy largo, observaciones en la cuenca donde se considera que han podido ocurrir algunos cambios
- b) varias series, de un periodo también muy largo, las observaciones de alguna otra cuenca, con la correlación muy buena con la primera cuenca

Si existen estos grupos de datos sería posible comparar las tendencias de correlación y, eventualmente confirmar que han ocurrido cambios reales en los parámetros hidrológicos principales. Por un lado, en la zona de la cuenca del río Piura y en las cuencas vecinas, no existe este tipo de disponibilidad de datos, mientras que, análisis parciales (comparando datos disponibles entre diferentes

cuencas), no han confirmado la existencia de fenómenos de cambio en los parámetros de las avenidas durante un periodo limitado. Según las recomendaciones para los casos similares, el mejor método es usar siempre la serie más larga de datos disponibles, dado que, sólo de esta manera, se está garantizando que se están analizando todos los fenómenos y las desviaciones que normalmente ocurren durante el periodo de análisis. Vale la pena destacar una vez más, que la estación Sánchez Cerro cumple con este requerimiento y representa una de las pocas estaciones hidrológicas en el norte del Perú, con una serie tan larga y confiable de datos de mediciones y observaciones.

Sin embargo, el Consultor considera que las instituciones encargadas de la recopilación, control y análisis de los datos de las avenidas en la cuenca del río Piura, como SENHAMI y Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chira-Piura y otros, pueden analizar el problema de los cambios eventuales en los parámetros hidrológicos de la cuenca del río Piura, iniciando las mediciones y las observaciones respectivas, con el objetivo de tener, después de un periodo suficiente de mediciones y análisis, una respuesta mas detallada sobre esta problemática.

Como resultado de las consideraciones arriba especificadas el Consultor considera que la aplicación y el uso de los datos de las mediciones en la estación Sánchez Cerro durante últimos 75 años es recomendable y de acuerdo con todos los criterios aplicables a este tipo de análisis.

Con el objetivo de definir la distribución teórica óptima se aplican cinco diferentes distribuciones teóricas. De acuerdo con los resultados de análisis de los parámetros de la distribución y las pruebas de bondad de ajuste (método Chi cuadrado y método de desviación), el mejor ajuste con los datos observados se logra usando la distribución teórica Gamma. En el Anexo 4.2 se presentan los resultados de ajuste de las diferentes distribuciones ensayadas y gráficamente los de la distribución teórica seleccionada con los datos registrados de la estación de Sánchez Cerro.

De acuerdo con lo arriba explicado, en la Tabla 7 se presentan resultados del análisis estadístico, aplicando la distribución teórica seleccionada, que definen la relación entre la probabilidad de ocurrencia y los caudales máximos instantáneos.

Tabla 7. Probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos instantáneos. Modelo estadístico – Río Piura – Estación Sánchez Cerro (Los Ejidos).

Probabilidad de ocurrencia	(%)	10	4	2	1	0,5	0,2
Tr	(años)	10	25	50	100	200	500
Q_{inst}^{max}	[m3/s]	1801	2698	3412	4153	4919	5967

4.2. ANÁLISIS DE MODELO HIDROLÓGICO HEC-HMS

La cuenca del río Piura hasta la estación Puente Sánchez Cerro, es dividida en cuatro subcuencas con los límites hasta las estaciones hidrológicas de Malacasí, Puente Ñácara, Tambogrande y Sánchez Cerro (Los Ejidos), respectivamente. Los parámetros más importantes, que se usan para el desarrollo del modelo hidrológico son las características físicas y geográficas de la cuenca, las características del suelo que influyen la escorrentía y las precipitaciones para cada estación y cada subcuenca analizada.

Por ello, uno de los parámetros claves es la incorporación de los resultados del análisis estadístico regional de las precipitaciones máximas diarias en la cuenca (ver capítulo 3), permitiendo la simulación óptima de los parámetros climatológicos reales de la cuenca del río Piura.

Las intensidades de las precipitaciones se analizan en base de los datos de la estación Miraflores, y los resultados se usan, en la forma adimensional, para modelar las precipitaciones correspondientes en la cuenca del río Piura.

Para modelar cada subcuenca se calcula las intensidades de las precipitaciones máximas con los períodos de retorno respectivos, usando los resultados de los análisis estadísticos de las precipitaciones máximas diarias y la relación adimensional de las precipitaciones con duración menor que 24 horas, proveniente de la estación Miraflores, como ya se explicó anteriormente.

De tal manera, usando los datos de las precipitaciones específicas de cada subcuenca, es posible incluir parámetros hidrológicos que caracterizan cada una de las subcuencas.

El análisis de la infiltración o de las pérdidas en relación con las precipitaciones totales, determinando así las precipitaciones efectivas, en la cuenca y en cada subcuenca, se realiza aplicando el método de CN (Número de Curva) SCS, que se explica detalladamente en el acápite 2.4.1. Para este objetivo se analizan mapas topográficos (IGN), de escala 1:50,000 y 1:100,000, y el tipo del suelo y su uso correspondiente, para cada subcuenca, determinando valores de CN para cada subcuenca. En la tabla 8 se muestran los valores de CN empleados. En el anexo 5.1 se presentan los demás parámetros geográficos que se emplean en la modelación.

Tabla 8. Valores de números adimensionales de curva CN usados.

SUBCUENCA	Grupo Hidrológico del Suelo	CN(II) ponderado	S (mm)
Bigote - Huarmaca	C	79	67.52
Chulucanas	C	81	59.58
Tambogrande	B	74	89.24
Medio Piura	A	54	216.37
Bajo Piura	(40%)A; (60%) D	73	93.95

En el texto arriba presentado se explica la determinación de los elementos principales del modelo matemático hidrológico y de acuerdo a los elementos determinados es posible realizar la simulación de la ocurrencia y la propagación de las avenidas típicas a lo largo de la cuenca, hasta la sección de la presa Los Ejidos (estación Sánchez Cerro). Según los datos y las explicaciones del capítulo 2 es posible definir el modelo de cada subcuenca, respetando características topográficas, climatológicas, geológicas, hidráulicas y otras de cada subcuenca.

El cálculo y la simulación se realizan aplicando las precipitaciones asociadas con la probabilidad de ocurrencia, para un período de retorno entre 10 y 500 años.

Tabla 9. Probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos – modelo hidrológico HEC-HMS, río Piura, Sánchez Cerro (Los Ejidos).

Probabilidad de ocurrencia	(%)	10	4	2	1	0,5	0,2
Período de retorno	(años)	10	25	50	100	200	500
Q_{inst}^{max}	[m3/s]	1948	2906	3773	4546	5537	6799

Los hidrogramas de las avenidas típicas se presentan tabulados y graficados en los anexos 5.2 y 5.3 respectivamente.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- a) El objetivo principal del presente estudio es la determinación de las avenidas características que pueden ocurrir en los tramos a y b del río Piura, como consecuencia de las lluvias que se producen en la cuenca.
- b) Teniendo en cuenta la problemática del estudio, se decide usar dos métodos de análisis:
- Análisis estadístico de avenidas máximas anuales en la estación hidrológica Puente Sánchez Cerro.
 - Modelo hidrológico lluvia - escorrentía de la cuenca del río Piura hasta la estación Puente Sánchez Cerro.
- c) Según la práctica internacional, se consideran caudales con un período de retorno entre 10 y 500 años, que influyen en la construcción y operación de las estructuras de protección, aunque el caudal de diseño para la zona urbana es para el periodo de retorno entre 20 y 100 años.
- d) Del análisis probabilístico se determinan los siguientes caudales de diseño:

Probabilidad de ocurrencia	(%)	4	2	1
Período de retorno	(años)	25	50	100
Q_{inst}^{max}	[m ³ /s]	2698	3412	4153

- e) Del análisis de modelo hidrológico se determinan los siguientes caudales de diseño:

Probabilidad de ocurrencia	(%)	4	2	1
Período de retorno	(años)	25	50	100

Q_{inst}^{max}	[m3/s]	2906	3773	4546
------------------	--------	------	------	------

- f) La comparación de los resultados usando dos modelos se presenta a continuación:

Probabilidad de ocurrencia	(%)	4	2	1
Período de retorno	(años)	25	50	100
Estadístico Q1	[m ³ /s]	2698	3412	4153
Modelo Q2	[m ³ /s]	2906	3773	4546
Diferencia: (Q1 – Q2)/Q2		0.07	0.09	0.09

- g) La comparación de los resultados obtenidos usando dos métodos diferentes, confirma que no existe una diferencia importante entre los resultados obtenidos (menos del 10%). Estos resultados, con una diferencia pequeña, pueden considerarse muy buenos y confiables, especialmente teniendo en cuenta los datos disponibles para los análisis realizados.

6. PROGRAMA DE TRABAJOS HIDROLÓGICOS 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 hidrológicos y meteorológicos 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 ello, es indispensable realizar un programa de investigaciones meteorológicas e hidrológicas en la cuenca, con el objeto de definir todos los parámetros necesarios para futuros estudios y trabajos de construcción y mantenimiento del sistema de protección.

Para cumplir con este objetivo es necesario garantizar que todas las estaciones de la cuenca cuenten con el equipo necesario (limnógrafos y teléfonos/radio), conectados con el centro de operación de la cuenca o con la represa de Los Ejidos. Las investigaciones y los registros hidrológicos en cada estación deben ser permanentes y confiables, determinando curvas caudal-nivel para cada año, controlando los resultados obtenidos y la operación y funcionamiento del equipo hidrológico.

Dentro de los trabajos prioritarios, se debe enfatizar la problemática de las mediciones de los parámetros hidrológicos del río Piura y sus tributarios, y especialmente la de medición de caudales, erosión en la cuenca y sedimentación en la zona aguas abajo de la represa Los Ejidos.

Con el fin de definir el transporte real de las partículas sólidas es necesario establecer un control y medición adecuados de transporte de sedimentos en la sección de la represa Los Ejidos, incluyendo las mediciones correspondientes en intervalos de tiempo menores a los cinco años, como la batimetría de la represa Los Ejidos, para determinar el proceso de colmatación y volumen útil del embalse. La batimetría debe realizarse a través de los perfiles estables y adecuados, que permiten la determinación óptima del volumen muerto y volumen útil del embalse.

Para controlar el proceso de erosión y sedimentación, aguas abajo de la represa Los Ejidos, se debe organizar el levantamiento de las secciones típicas del cauce del río Piura hasta la desembocadura, con una frecuencia que garantice el análisis y el control del fenómeno de erosión y sedimentación. Este levantamiento topográfico debe realizarse obligatoriamente después de cada avenida grande y especialmente después de los años con el fenómeno de El Niño.

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

En las estaciones pluviales de la cuenca, se debe instalar, además de los pluviómetros, unos pluviógrafos, para registrar el comportamiento adecuado de

las tormentas a lo largo del tiempo. Una vez obtenidos los datos de las mediciones, se deben actualizar y analizar cada año. Las estaciones que convendría conservar, reactivar o implementar son las siguientes: Chignia, Paltashaco, Huarmaca, Canchaque, Barrios, Morropón y Chulucanas, que por su posición geográfica garantizarían una densidad aceptable de la información. Asimismo, las siguientes estaciones pluviométricas deben ser implementadas para complementar la información de la red: Bigote, Pasapampa, Virrey, Altamiza, Santo Domingo, San Pedro, Frías, Tejedores, Malingas, Hualtaco y San Joaquín. Esta implementación incluye, no sólo el equipamiento adecuado, sino también la asignación de personal idóneo y que garantice su correcto funcionamiento.

Sería de mucha utilidad poner en marcha un programa de implementación de estaciones telemétricas, tanto hidrométricas como pluviométricas y pluviográficas en la cuenca, que brinden en tiempo real la información registrada.

7. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Chow, Ven T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. Hidrología aplicada. 1994.
- (2) Bras, Rafael L. Hydrology: An Introduction to Hydrologic Science
- (3) ENERGOPROJEKT. Estudio Hidrológico de las Quebradas. Informe Final, Apéndice B: Hidrología y Topografía, Volumen B.1. Setiembre, 1998.
- (4) Modelo VISUAL HEC
- (5) Modelo HEC-HMS

**ESTUDIO PARA EL TRATAMIENTO INTEGRAL
DEL RÍO PIURA**

APÉNDICE D

**INFORMACIÓN HIDROLÓGICA Y
DEL MODELO HIDROLÓGICO**

ANEXOS

ANEXO 1

PLANOS

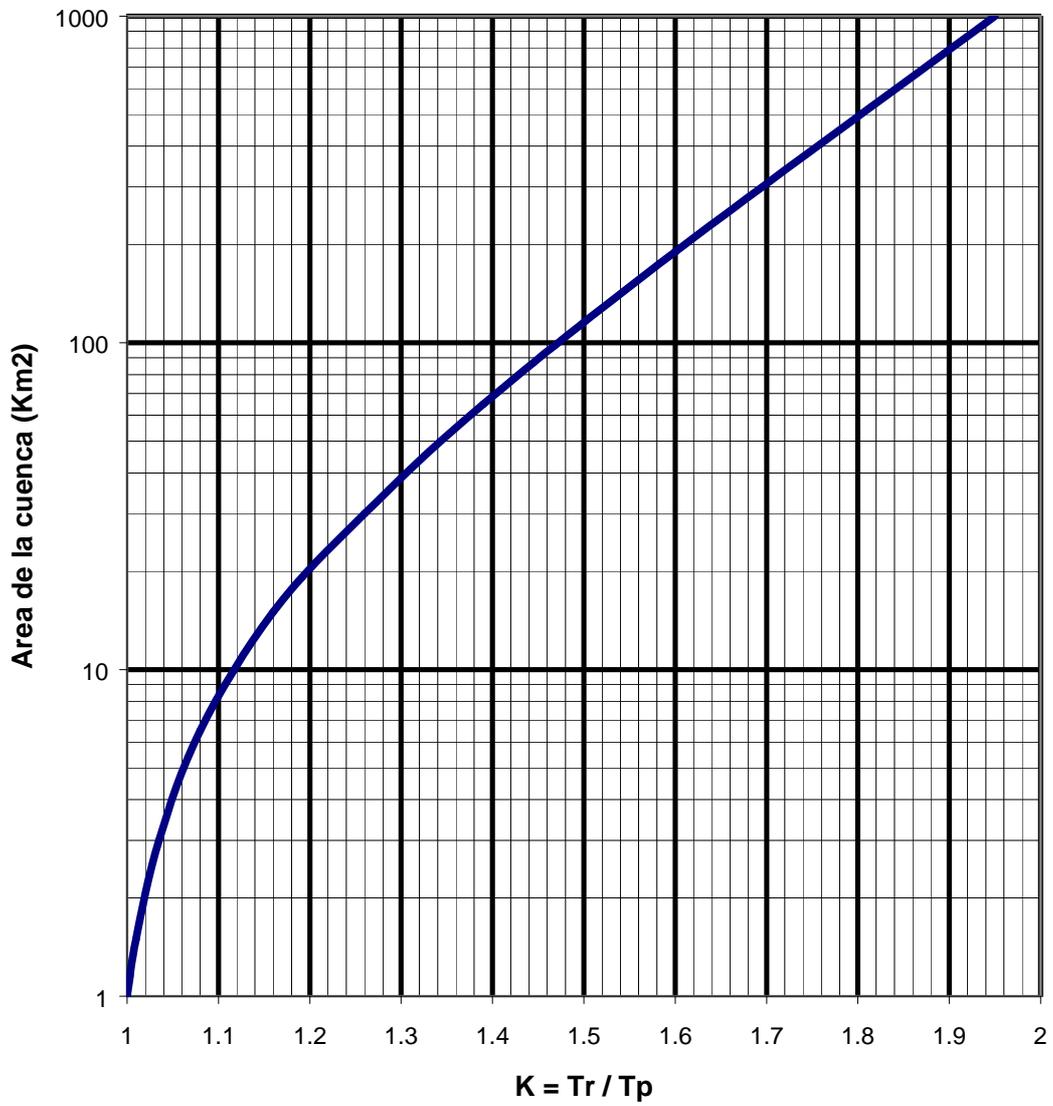
- 1.1 Cuenca y subcuencas del río Piura**
- 1.2 Estaciones hidrometeorológicas en la cuenca**

ANEXO 2

METODOLOGÍA

- 2.1 Números de curva de escorrentía para diferentes usos de tierra, con AMC II. Método del US SCS.**
- 2.2 Relación entre “k” y área de la cuenca**

2.2 Relación entre "K" y el área de la cuenca



ANEXO 3

DATOS BÁSICOS

- 3.1 Caudales máximos instantáneos anuales del río Piura en Puente Sánchez Cerro**
- 3.2 Caudales máximos instantáneos a lo largo del río Piura**
- 3.3 Pluviometría máxima diaria**

3.1. Caudales máximos instantáneos anuales del río Piura en Puente Sánchez Cerro.

AÑO	Q (m³/s)
1926	860.0
1927	610.0
1928	124.0
1929	135.0
1930	95.0
1931	450.0
1932	1900.0
1933	620.0
1934	438.0
1935	379.0
1936	390.0
1937	39.0
1938	508.0
1939	1525.0
1940	185.0
1941	2220.0
1942	405.0
1943	2250.0
1944	273.0
1945	220.0
1946	134.0
1947	41.0
1948	42.5
1949	1010.0
1950	0.0
1951	0.0
1952	153.0
1953	2200.0
1954	44.0
1955	350.0
1956	1530.0
1957	1700.0
1958	690.0
1959	900.0
1960	81.0
1961	88.0
1962	115.0

AÑO	Q (m³/s)
1963	37.0
1964	33.0
1965	2500.0
1966	49.0
1967	82.0
1968	21.0
1969	180.0
1970	29.0
1971	545.0
1972	1616.0
1973	845.0
1974	58.0
1975	272.0
1976	388.0
1977	646.0
1978	167.0
1979	74.0
1980	45.0
1981	568.0
1982	390.0
1983	3200.0
1984	980.0
1985	112.0
1986	25.0
1987	574.0
1988	6.0
1989	845.0
1990	6.0
1991	14.0
1992	1793.0
1993	1042.0
1994	1108.0
1995	75.0
1996	100.9
1997	638.1
1998	4424.0
1999	3107.0

ANEXO 4
ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE CAUDALES ESTACIÓN
PUENTE SÁNCHEZ CERRO

- 4.1 Análisis probabilístico de precipitaciones máximas diarias.**
- 4.2 Análisis estadístico de caudales máximos instantáneos del Río Piura, Estación Sánchez Cerro, periodo (1926-99)**

ANEXO 4.1

Análisis probabilístico de precipitaciones máximas diarias

ANEXO 5

MODELO HIDROLÓGICO HMS

- 5.1 Perfil longitudinal del afluente más largo por subcuenca**
- 5.2 Tabla Hidrograma de avenidas, río Piura, estación Sánchez Cerro**
- 5.3 Gráfico Hidrograma de avenidas, río Piura, estación Sánchez Cerro**