

COMISION DE LA UNION EUROPEA

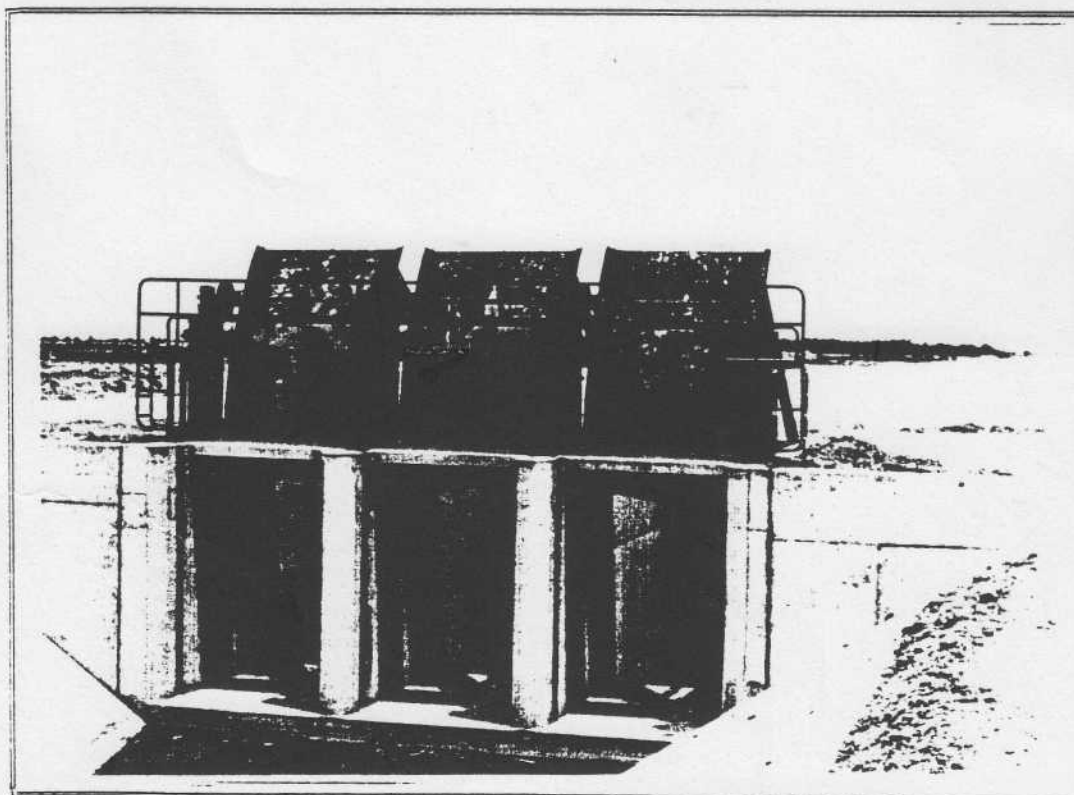
REPUBLICA DEL PARAGUAY Y DE ARGENTINA

Proyecto de gestión  
Integrada y Plan  
Maestro de la Cuenca  
del Rio Pilcomayo

## **BIBLIOTECA**

INFORME FINAL DE LA TERCERA MISION DE ASISTENCIA TECNICA,  
ENVIADA POR LA COMISION DE LA UNION EUROPEA  
A LA ZONA DEL RIO PILCOMAYO.

(Obras de control, geotecnia y sedimentología)



Enero de 1996

**EP - 003**

**EURAGRI**

Temporary Association

**INFORME FINAL DE LA TERCERA MISION DE ASISTENCIA TECNICA,  
ENVIADA POR LA COMISION DE LA UNION EUROPEA  
A LA ZONA DEL RIO PILCOMAYO.**

**(Obras de control, geotecnia y sedimentología)**

**(Repúblicas del Paraguay y de la Argentina)**

**(MISION REALIZADA DENTRO DEL CONTRATO MARCO)  
Pedido n° CC/A/EURA. ?)**

Informe final realizado por

M. A. POOL  
J.D.G VAN DULNE

Enero 1996

Este informe ha sido encargado por la UE y redactado después de una misión técnica con intercambios de opiniones con las autoridades responsables de estos países. Es para el uso exclusivo de la UE. Sin embargo, las opiniones expresadas en él son las de los consultores y no reflejan necesariamente las de la Unión Europea ni las de los Gobiernos de estos países.

## INDICE

1. INTRODUCCION	1
1.1 PREMISA	1
1.2 DATOS BASICOS DE LA CUENCA DEL RIO PILCOMAYO	2
1.3 LA PARTICIPACION DE LA COMISION EUROPEA EN EL PROGRAMA DEL RIO PILCOMAYO	5
2. LA CUENCA CHAQUENA DEL RIO PILCOMAYO	6
2.1 HISTORIA Y CONSECUENCIAS DEL RETROCESO DEL RIO PILCOMAYO	6
3. ACCIONES (BI)NACIONALES	7
3.1 El canal argentino y la entrada natural de St. Teresa.	7
3.2 El canal paraguayo y la limpieza vegetal	8
3.3 Excavacion del cauce colmatado	8
4. INTERVENCIONES A CORTO PLAZO	8
4.1 EL PLAN DEL SISTEMA DE CONTROL	8
4.1.1 Introducci3n	8
4.1.2 Generalidades.	8
4.1.3 Criterios para el Sistema de control	10
4.1.4 Los canales hidroequilibrantes	12
4.1.5 Dise1o de las estructuras para aguas m3nimas y medias	13
4.1.6 Dise1o del vertedero de aguas medias	15
4.1.7 El cuenco del vertedero	16
4.2 MONITOREO	18
4.2.1 Selecci3n del m3todo de medici3n de caudal	18
4.3 GEOTECNIA DEL SISTEMA DE CONTROL	23
4.3.1 Aspectos geot3cnicos de las Estructuras de Control para las aguas m3nimas y medias.	23
4.3.2 Aspectos geot3cnicos generales de un terrapl3n	26
4.4 PROTECCION DE LOS PUNTOS CRITICOS Y OTROS MARGENES DEL RIO PILCOMAYO	27
5. SEDIMENTOLOGIA DEL SISTEMA FLUVIAL DEL RIO PILCOMAYO	29
5.1 GENERALIDADES	29
5.1.1 El cauce principal.	30
5.1.2 Las llanuras de inundaci3n	31
5.1.3 estudios a realizar Sedimentolog3a	33
5.2 LOS CAUDALES LIQUIDOS Y SOLIDOS	33
5.3 LA SEDIMENTACION Y EL ANALISIS DE FACTIBILIDAD DEL SISTEMA DE CONTROL	34
5.3.1 Introduccion	34
5.3.2 El atenuacion del retroceso del cauce principal	35
5.4 LOS CANALES DE ENTRADA	36
5.4.1 La vida 3til de los canales de entrada existentes	36
5.4.2 Evaluaci3n de los futuros canales de entrada	37
5.5 CONSIDERACIONES DE LA VIDA UTIL DEL SISTEMA DE CONTROL	38
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38

APENDICE A:	Bibliograf3a y Personalidades involucrados.
APENDICE B:	Figuras y fotograf3as.
APENDICE C:	Ejemplos de revestimiento.
APENDICE D:	Terminos de Referencia de la Mis3n
APENDICE E:	Memorandum
ANEXO 1 :	Normativas ISO

**INFORME FINAL DE LA TERCERA MISION DE ASISTENCIA TECNICA,  
ENVIADA POR LA COMISION DE LA UNION EUROPEA  
A LA ZONA DEL RIO PILCOMAYO.**

(Obras de control, geotecnia y sedimentología)

## **1. INTRODUCCION**

### **1.1 PREMISA**

Durante los últimos cincuenta años aproximadamente 300 km del cauce natural del Río Pilcomayo en la Cuenca Baja han sido totalmente colmatado por sedimentos, originandos de la Alta Cuenca en Bolivia. La revitalización del río y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y antrópicos, dentro el área de influencia del Río Pilcomayo necesitan un sistema de control de las aguas en el punto terminal del río (taponamiento). En las primeras dos misiones de asistencia técnica (junio de 1993 y noviembre de 1994), enviados a la zona por la Comisión de la Unión Europea, la intervención humana fue propuesta y elaborada. Con la presente (*tercera*) misión los estudios y especificaciones del proyecto Río Pilcomayo Binacional deberían ser terminados incluyendo criterios para los diseños definitivos del Sistema de Control. La Comisión de la Unión Europea ha decidido que la tercera misión se ejecutará en tres fases sucesivas, cada una con sus especialistas, véase los Terminos de Referencia, Apéndice D). Este informe enfoca a algunos objetivos específicos de la primera y segunda fase de la tercera misión en donde los siguientes temas son tratados:

- 1) Definir conjuntamente con los ingenieros nacionales el diseño de las obras constructivas del Sistema del Control.
- 2) Determinar las zonas de prestamo de los materiales de construcción y asistir a la organización de la campaña geotécnica de medidas.
- 3) Designar las zonas de sedimentación controlada, las cuales determinan en principio la vida útil del proyecto, y la ubicacion de canales de entrada para el Sistema Distribuidor.

Tanto el Ing. van Duijne (segunda fase del misión), experto en obras hidráulicas como Dr. Pool (primera fase), experto en geotecnia y sedimentología, han interrumpido sus misiones por hacer falta de datos importantes del campo. El Ing. van Duijne viajó el 2 de junio a Paraguay y regresó el 20 de junio. El Dr. Pool viajó también el 2 de junio y regresó el 25 de junio. No obstante, durante su estadía, Ing. van Duijne y Dr. Pool ya han elaborado un parte de sus tareas. Para terminar su misión el Dr. Pool viajó el 11 de setiembre a Paraguay y regresó el 5 de octubre. Tanto en la ida como la vuelta del ultimo viaje una reunión a Buenos Aires fue incluido con la Comision Nacional Argentina del Río Pilcomayo. El Ing. van Duijne viajó el 30 de setiembre y regresó el 19 de octubre via Buenos Aires.

A la salida del Ing. van Duijne se elaboró un Memorandum con criterios sobre el diseño del sistema de control. Por la disponibilidad de datos topográficos se ha decidido de

elaborar las obras de control en dos etapas. La primera etapa para una división de aguas mínimas y medias y la segunda etapa para aguas altas. El Memorandum está incluido en apéndice E. El Memorandum fue elaborado en Asunción conjunto con el equipo técnico de Paraguay y un experto Argentino. Para informar las autoridades Argentinas el Ing. van Duijne regresó a Europa via Buenos Aires para explicar el Memorandum personalmente.

## 1.2 DATOS BASICOS DE LA CUENCA DEL RIO PILCOMAYO.

Este epígrafe ya está descrito en el informe final de febrero 1995 (ref: CC/A/EU-RA/2B7-3010/93/151 ADD2) de la Comisión de la Unión Europea, pero los aspectos lo más importantes son repetidos aquí. El Río Pilcomayo nace y forma la red fluvial de su cuenca activa (la cuenca en donde las aguas originan) casi totalmente en la República de Bolivia. En esa región de la Alta Cuenca se producen las precipitaciones que forman la parte más significativa de los caudales líquidos y sólidos en su curso principal y que son las que determinan y ocasionan los problemas actuales. Se divide entonces la Cuenca del Río Pilcomayo en dos cuencas: La Cuenca Alta con un largo de 500 kilómetros y la Cuenca Baja o Cuenca Chaqueña con un largo de 785 kilómetros. Dentro de la Cuenca Chaqueña se divide el Río Pilcomayo en el Río Pilcomayo Superior y Río Pilcomayo Inferior respectivamente, que corresponde a un tramo de 545 y 240 kilómetros. El Río Pilcomayo Superior se halla entre la ciudad de Villamontes en Bolivia y las poblaciones de Salto Palmar/Fortín Cabo en Argentina/Paraguay. El taponamiento actual es situada en el Río Pilcomayo Superior a una distancia de 220 kilómetros aguas abajo de Villamontes y a una distancia de 65 kilómetros del Punto Trifinio, dirección aguas arriba.

Merece señalar que no hay (y no había tampoco en la historia reciente) una conexión superficial directa (o física) entre el Río Pilcomayo en la Cuenca Alta y su desembocadura en el Río Paraguay; entonces no existe una conexión superficial entre el Río Pilcomayo Superior y Inferior.

### Topografía

La superficie de la cuenca vertiente es de:

- 80.000 km<sup>2</sup> en la Cuenca Alta (Bolivia)
- 100.000 km<sup>2</sup> en la Cuenca Chaqueña.

La Cuenca Alta tiene origen a 5.700 metros (snm) en la Cordillera de Los Andes, llegando a Villamontes con un desnivel de 5.300 metros. Esto equivale a un descenso promedio de 1%, o sea 10 metros por cada kilómetro de recorrido.

A partir del límite entre la Cuenca Alta y la Cuenca Chaqueña, en las cercanías de la ya citada población Boliviana de Villamontes (cota 400), el río discurre a lo largo de más de 540 kilómetros, con un primer tramo de 68 kilómetros en la Precordillera, entre Villamontes e Ibybobo (cota 340), y después el río desciende 65 km con una pendiente de 1.1 ‰ hacia la población de Santa María (cota 275) en Argentina. Esta zona forma el cono de deyección. Después viene la parte meándrica del Río Pilcomayo, donde el mismo desciende suavemente desde 275 metros (snm) hacia el punto del último entarquinamiento (Estancia La Dorada, a cota 200); una distancia de 90 kilómetros con una pendiente promedio de 0.83‰. El último tramo hacia Fortin Pilcomayo ya ha sido colmatado, con una pendiente promedio de 0.28‰.

### Régimen de las crecidas.

Las precipitaciones pluviales en la cuenca activa o Cuenca Alta se producen entre mediados de noviembre y mediados de marzo de cada año. Durante esos cuatro meses el agua caída es prácticamente el 90% de la que precipita durante todo el año, repartiéndose el 10% restante en los nueve meses siguientes. Esta concentración de la lluvia en tan corto lapso, da origen a dos procesos físicos de fundamental importancia en la totalidad de la cuenca: grandes crecientes e intensa erosión/deposición fluvial.

La creciente máxima instantánea registrada llegó a 4.000 metros cúbicos por segundo, medidos en Misión La Paz (Argentina), cercano al límite entre los tres países. El período de aguas máximas, concentradas y violentas son las causantes de la intensa erosión del cauce y de las laderas de las montañas en la Alta Cuenca, en el curso principal del río Pilcomayo y en el de su principal afluente, el río Pilaya, así como en el de los numerosos afluentes que los conforman.

Si se tiene en cuenta que el caudal módulo, o promedio anual es de unos 180 m<sup>3</sup>/s en el mismo lugar de observaciones, se advierte que la creciente máxima registrada supera más de 27 veces el promedio anual y que, a su vez, en períodos de sequías (de marzo a diciembre) el caudal mínimo registrado disminuyó hasta 56 veces menos que el valor módulo (el 28 de setiembre de 1994 el caudal fue de 3.2 m<sup>3</sup>/s). Esos números dan una clara idea de la gran irregularidad del río, especialmente si se los compara, por ejemplo, con los del río Paraná en Posadas (Argentina). Allí los caudales máximo y mínimo son de 45.000 y 5.700 m<sup>3</sup>/s respectivamente y corresponden a 4 veces más y casi 2 veces menos el valor módulo, que es de unos 12.000 m<sup>3</sup>/s (fuente: Ing. Fossati, Comisión nacional Río Pilcomayo, Argentina; doc. interno)

### - Caudales líquidos

Los caudales medios diarios, medios mensuales y medios anuales son registrados en Misión La Paz desde 1960. Importante son los caudales medios diarios y mensuales en la época de crecida (noviembre a marzo) que pueden superar respectivamente 1000 m<sup>3</sup>/s y 500 m<sup>3</sup>/s.

### - Caudales sólidos

El muy fuerte transporte sólido en suspensión, es registrada también en Misión La Paz. Aun los caudales sólidos son aproximaciones se puede contar con un valor plurianual de sedimentos en suspensión de 60.000.000 toneladas.

### - Naturaleza del lecho y las orillas.

El río tiene en su curso meandrífico un lecho muy inestable, compuesto de arena fina. El río está bordeado en el tramo de desbordes de orillas sobrealzados (albardones) compuestas de arena muy fina y limo. En las llanuras de inundación (esteros y bañados) se deposita limo y arcilla. El cauce colmatada dentro y a nivel de sus albardones asoma entonces por encima de los aledaños, que está por encima del nivel del terreno natural adyacente.

### - Hidrogeología

Parece ser que la infiltración de las aguas de crecida del Río Pilcomayo, que alimentan las aguas subterráneas, tiene lugar principalmente en la zona del Pre-Cordillera, el cono de deyección y la parte superior del Delta Segundo. El agua dulce subterránea se encuentra en la mayoría de los casos a modo de bolsones (agua de precipitación infiltrada) en un ambiente de agua salina. Estos bolsones reflejan en general la existencia

y posición de cauces antiguos enterrados. Esto significa que los pozos tienen un caudal limitado y que están amenazados de salinización en el caso de realizarse una extracción excesiva. Como consecuencia existe una escasez de agua dulce subterránea y la población en un grande parte de la Cuenca Chaqueña del Río Pilcomayo depende realmente del agua superficial que proviene del Río Pilcomayo (durante sus crecidas). El perfil del *pozo de Estación La Dorada de 1994* muestra claramente varios acuíferos (semi)confinados entre 70m y 200 m de profundidad dentro de la zona hidrológica, denominada "Sistema Acuífero Chaco Yrenda". Dentro esta zona algunas acuíferos (perforaciones hasta 200 m de profundidad) existen, sirviendo como fuente principal de agua en la región del Chaco, agua apta para humano y ganado.

La evaporación media y anual en la región del Río Pilcomayo (Cuenca Baja) varía entre 1200 y 1400 mm, de Oeste a Este. La pluviometría mínima de la región del Pilcomayo corresponde al Cabo Irigoyen (situado entre el Pilcomayo Superior y el Inferior) con un valor de 400 mm/año. En la dirección de Asunción el máximo obtenido es de 1200 mm. En el extremo occidental del Chaco, en Villamontes, la precipitación es de unos 800 mm anuales. La variabilidad relativa de la precipitación es del 20% -25% .

### **Fluviomorfología**

La Cuenca Chaqueña del Río Pilcomayo (también denominada como cuenca del *Pilcomayo Superior e Inferior*, se puede dividir en cuatro zonas, aguas abajo desde Ibybobo:

#### **Pilcomayo Superior:**

- 1) Una zona (o tramo) de 65 kilómetros con zonas de desbordamiento y desvíos antiguos; el Delta Primero, situado entre Ibybobo (Bolivia, cota 340 m) y Santa Maria (Argentina, cota 275 m, situada a 25 kilómetros aguas arriba del Punto Trifinio). Este tramo del Río Pilcomayo está caracterizado por un cauce ancho y anastomosado, con márgenes bajos e inestables.
- 2) Un tramo de Santa Maria hasta el punto del taponamiento actual (La Dorada, cota 200 m). Esta zona tiene ahora unos 90 km, disminuyendo cada año. La zona se caracteriza por un cauce meandriforme con desbordes al final de su curso, ocurriendo durante las crecidas. La topografía general en esta zona es determinada por los cauces antiguos y recientes del Río Pilcomayo y por la escorrentía superficial. La zona tiene bañados (depresiones locales), probablemente debido a la consolidación de arcilla en las llanuras de inundación de cauces antiguos.
- 3) Un tramo de aproximadamente 320 kilómetros desde La Dorada (donde se ubica el entarquinamiento actual) hasta Salto Palmar (cota 108 m s.n.d.m.). Parte de esta zona se denomina también zona de divagación. Con el retroceso del río, la zona de divagación se desplaza cada año en dirección aguas arriba. Esta zona es de carácter inestable; en la época de crecida el agua se desborda y alimenta una serie de esteros y bañados. Así de la misma manera que cambia la zona de obstrucción del río, la localización de los esteros y bañados, que se rellenarán durante las crecidas, también cambiará. La zona de La Dorada, donde se encuentra el taponamiento actual, no está caracterizada por grandes esteros y bañados conectados como en la zona entre Fortín Pilcomayo y Salto Palmar; Estero Patiño (Paraguay) y Bañado La Estrella (Argentina). Dichas zonas funcionaban como grandes receptores de aguas y sedimentos.

#### **Pilcomayo Inferior:**

- 4) Un tramo de unos 240 kilómetros de río, que nace en los alrededores de Salto Palmar, sin conexión superficial directa (o física) con el Pilcomayo Superior. Este

río, o mejor dicho ríos Pilcomayo (hay un brazo Sur y un brazo Norte) tienen el mismo origen que muchos ríos y riachos en la parte más oriental del Delta Segundo. Están alimentados principalmente por las precipitaciones locales y por las aguas subterráneas. La zona del Pilcomayo Inferior tiene mayor precipitación anual que la zona del Pilcomayo Superior. Las aguas subterráneas tienen un alto contenido salino. En la zona donde nacen los ríos: Río Verde, Río Siete Puntas, Río Negro, Río Pilcomayo Inferior y Río Monte Lindo Grande, el nivel freático intersecta con la superficie. La función principal de dichos ríos no es la desagüe de los esteros, cuyas aguas provienen del desbordamiento del Río Pilcomayo Superior, sino el drenaje de las lluvias de verano. La conexión entre las aguas freáticas en la zona de divagación (actual) y el nivel de agua en dichos ríos y riachos ha sido demostrada recientemente.

### 1.3 LA PARTICIPACION DE LA COMISION EUROPEA EN EL PROGRAMA DEL RIO PILCOMAYO

En junio y julio del año 1993 la Comisión Europea ha enviado una misión de identificación a Argentina y Paraguay. Esta misión tenía como tarea la identificación de los problemas creados por el variable y dinámico comportamiento del Río Pilcomayo, el río limítrofe entre los dos países. En general, los motivos de la disputa binacional enfocaban el abastecimiento de agua para la población durante aguas mínimas, el control del retroceso del cauce principal y la restitución del flujo de las aguas a ambos países hasta zonas ubicadas más aguas abajo que en 1993, previniendo, entre otras cosas, una sequía en la zona aguas abajo del taponamiento.

La misión de 1993 concluyó con las Comisiones Nacionales del Río Pilcomayo de ambos países que tipos de intervenciones a diferentes plazos eran necesarias. Sin intervenciones, el retroceso continuará sin atenuación y, a su debido tiempo, llegará a lugares (puntos críticos), donde el río, como pasó siempre en el pasado, podrá cambiar su curso e ingresar a uno de los dos países, con daños para ambos.

En marzo de 1994 una delegación de las Comisiones Nacionales de Argentina y Paraguay viajó a Bruselas, a la Comisión Europea, para elaborar, junto con los expertos de la misión de 1993, los términos para la solicitud de asistencia técnica para el proyecto Río Pilcomayo. Una vez elaborada, la solicitud fue sometida a la Comisión Europea. La Comisión consideró que algunos aspectos técnicos deberían ser aclarados y una misión intermedia fue enviada a la zona del Río Pilcomayo en diciembre de 1994 con el objetivo de preparar una evaluación del anteproyecto y asistir a la preparación de los Términos de Referencia de la presente misión. La presente misión tiene como objetivo fundamental la participación de equipos de especialistas, proporcionados por la Comisión de la Unión Europea, con los responsables locales en la elaboración de los estudios y el diseño del proyecto constructivo. La misión ha sido dividida en tres fases, cada compuesta por sus especialistas. En la presente informe se describió los análisis de una parte de tanto la primera como la segunda fase de la tercera misión, enfocando a las obras de control y elementos de sedimentología relacionados.

Durante el período de su permanencia en Argentina y Paraguay, la misión pudo hablar con las máximas autoridades involucradas en el tema del Río Pilcomayo y pudo examinar la documentación disponible y las intervenciones a corto plazo ya ejecutadas.

## 2. LA CUENCA CHAQUENA DEL RIO PILCOMAYO

### 2.1 HISTORIA Y CONSECUENCIAS DEL RETROCESO DEL RIO PILCOMAYO

Después de casi un siglo, se constata un proceso de colmatación del cauce del río por sus sedimentos. Inicialmente lento (pero regular) en los años 1910-1920, el río corría hacia Estero Patiño (lado Paraguayo), donde sus aguas se extendían y depositaba sus sedimentos. Allí una parte de las aguas se infiltraba y, junto con aguas de las lluvias, daba el nacimiento del Río Pilcomayo Inferior, cerca de Salto Palmar. Aparentemente poco a poco la deposición de sedimentos fue tal que el río no pudo repartirlos y a partir de un momento la colmatación del cauce se aceleró. En 1944 este taponamiento estaba localizado cerca de Fortin Pilcomayo. En 1977 el taponamiento estaba localizado en Sombrero Negro/Fortin M. Cabello; una distancia de casi 100 kilómetros (en línea recta). Hasta 1983 no había mucho retroceso por razones climatológicas y acciones (canales experimentales de ambos países). Pero en 1984 el retroceso por colmatación llegó a unos 45 kilómetros en un solo época de crecida. Desde 1985 y 1993 el retroceso progresa con un promedio de 6 kilómetros/año. Con este promedio el retroceso puede alcanzar la frontera de Paraguay con Bolivia (Punto Trifinio) en 10 a 15 años.

Merece decir que desde el punto de vista geomorfológico la evolución del Río Pilcomayo es completamente normal. El Río Pilcomayo es un río salvaje, que discurre por su delta (Primero y Segundo) sin tener un lecho fijo. Las imágenes de satélite muestran estos deltas en los que el río ha cambiado su curso de forma más o menos brusca durante los últimos siglos. Se piense, por ejemplo, que los ríos Verde y Montelindo son antiguos cauces del Río Pilcomayo. El mecanismo general es simple; después de que sus áreas de deposición (esteros y bañados) se llenan hasta un cierto nivel, ocurre el entarquinamiento del cauce principal. Este entarquinamiento llegará a un punto crítico, en que un "nuevo" cauce se forma. Cual punto crítico será utilizado por el río para su cambio brusco, depende sobre todo de la topografía en conjunto con la magnitud de la crecida. En las imágenes se observan ahora dos puntos críticos posibles, ambos aguas arriba del taponamiento actual.

Con el retroceso del cauce se produce un avance de otros problemas hidrológicos en dirección de aguas arriba: la distorsión en el abastecimiento de agua en la región y sus consecuencias para el medio ambiente (véase el informe de la tercera fase de esta misión). También con el retroceso del cauce un proceso de desertificación se produce aguas abajo del taponamiento. Con el retroceso del cauce principal se produce un retroceso contemporáneo de la zona de divagación (la zona de divagación es el área integral incluyendo la zona donde las aguas se desbordan y la zona donde las aguas entran en los bañados). El desplazamiento de la zona de divagación, la zona de almacenamiento, se desplazará en dirección aguas arriba. La salinización es otro problema que acompaña el retroceso de la zona de divagación. Debido a este desplazamiento la calidad de aguas subterráneas se deteriorará en una faja de influencia de las crecidas del Río Pilcomayo actual. La geohidrología de la zona muestra que el nivel de aguas salobres se ubica muy cerca de la superficie.

La crecida anual en la zona tiene un mayor efecto en la zona de aguas abajo del taponamiento, en una región confinada por bañados y esteros, los cuales reciben sus aguas de la crecida y también -más aguas abajo- por la infiltración de las aguas y la nueva aparición de cauces en forma de cañadas, en función de la topografía existente.

La intensidad de la evapotranspiración es variable con un promedio total de mas de 2000 mm/año en la zona Paraguaya del Río Pilcomayo actual. Mínimas estan en el orden de 120 mm/mensual y maxima mensual hasta 290 mm en noviembre. Los caudales de los ríos, - como el Río Pilcomayo Inferior, el Río Verde, el Río Negro, el Río Montelindo, el Riacho Monte Lindo Grande, que son alimentados por lluvias y además (indirectamente) por las crecidas del Río Pilcomayo, - muestran que hay una lenta corriente subterránea en una dirección Noroeste-Sureste. En la período normal hay una correlación entre la época de lluvias con la crecida (noviembre a febrero) y la época de aguas altas en dichos ríos. Pero hay una segundo período de aguas altas en junio a agosto (que es un tiempo estiaje) en donde los ríos mencionados son almacenados por aguas subterráneos.

La cuantificación de los daños en relación con la densidad de la población, y sus modos de vivir, la agricultura, la pesca, la explotación forestal y la cría de ganado vacuno, no está bien definida. En general, se sabe que no se trata ahora de una región de alta importancia económica, pero el desarrollo de la zona depende mucho del alcance, en dirección aguas abajo, de las aguas de la crecida. Este tema está tratado en detalle en el informe sobre el medio ambiente (tercera fase de este misión).

### **3. ACCIONES (BD)NACIONALES**

#### **3.1 OBRAS (BD)NACIONALES YA EJECUTADAS EN LA ZONA DEL TAPONAMIENTO**

Desde 1991 algunas obras al lugar del taponamiento fueron ejecutadas. Tanto Argentina como Paraguay hicieron excavaciones y/o limpiezas vegetales para la garantía que las aguas mínimas pueden entrar en su territorio. Estas obras han sido descritos en el informe de la Comisión de la U.E. de febrero 1995, y entonces merece mas señalar su desarrollo y las obras recientemente ejecutadas.

##### **3.1.1 El canal argentino y la entrada natural de Sta. Teresa (Argentina).**

El Canal de entrada Argentino fue totalmente colmatado durante la ultima crecida ('94-'95). Por falta de limpieza vegetal y mantenimiento. Efectivamente, la colmatación del canal Argentino presentó la posibilidad de monitorear el proceso de la colmatacion mas en detalle. Hay que prever que la dimensión y la continuación de un canal será suficiente para el transporte de las aguas y los sedimentos. Falta de mantenimiento en el sentido de limpieza durante el periodo de sequía resultará en colmatacion del canal. No se olvide que una sola limpieza vegetal se convierta en una erosion (canal/quebrada) durante la primera fase de la crecida. Este proceso será descrito mas en detalle en el epígrafe 5.4.1. Durante el periodo de aguas mínimas de este año (mayo - noviembre 1995) en Argentina casi no había agua para las poblaciones ribereños, aguas abajo del taponamiento. Es porqué que Argentina decidió de mejorar/limpiar una entrada natural a 2 kilómetros aguas arriba del taponamiento. Esta entrada es conocido como "Sta. Teresa". Se trata aqui de una decision que puede tener consecuencias negativas para el retroceso del cauce principal y posiblemente para el Canal Paraguayo.

### 3.1.2 El canal paraguayo y la limpieza vegetal.

El Canal Paraguayo funcionó bien durante las últimas crecidas ('93/'94 y '94/'95), por mantenimiento intensivo intermedio. La compra de la anfiexcavadora "Kori" ayudó mucho. También de nuevo ha sido probado que una limpieza vegetal, bien accesible, se puede convertir en un canal por efecto de erosión. La crecida de '93/'94 no solo erosionó primero los canales de Paraguay y Argentina, con la formación de un banco de arena en la embocadura Paraguaya. Esta erosión fue seguida por mucha sedimentación, tanto en la zona de ambos canales como en la zona aguas abajo (es decir la zona de las cañadas naturales). La entrada Paraguaya fue bloqueada con sedimentos y con Palo Bobo (Alisos), formando un banco de obstrucción en la entrada del canal. En julio 1994 los Paraguayos ejecutaron una limpieza de su canal, restituyendo hacia 1500 m de la toma (no había acceso para las máquinas entre enero y julio). También Paraguay terminó en octubre de 1994 una nueva entrada por medio de un segundo canal (auxiliar) para asegurarse de la toma de agua. Este canal auxiliar fue colmatado completamente durante la última crecida ('94/'95). La utilización de la anfiexcavadora "Kori", comprado por Paraguay, permite (desde mayo 1995) a los Paraguayos de hacer los trabajos de mantenimiento del canal y de la limpieza vegetal más pronto que antes. Únicamente La "Kori" tiene todavía una restricción importante; no se permite trabajar en aguas profundas, porque la máquina no es flotante y también, cuando estaría flotante, necesitará fuerza de reacción.

### 3.1.3 Excavación del cauce colmatado.

Después la visita del campo y una reunión binacional en junio de este año, se decidió con la presencia de expertos de la Unión Europea, de excavar un canal piloto de 2 kilómetros en el cauce colmatado, seguido por una limpieza vegetal del quebrada Farias, en el territorio Argentino. Este trabajo se consideró importante para la conexión del Río Pilcomayo con la Quebrada la Hacha, y para la garantía de designar zonas de recepción de sedimentos aguas abajo del taponamiento actual. Lamentablemente, por razones que ignoro, solo se ejecutó el canal piloto en el cauce colmatado con la Kori. Sin continuación esta excavación no funcionará.

## 4. INTERVENCIONES A CORTO PLAZO.

### 4.1 EL PLAN DEL SISTEMA DE CONTROL

#### 4.1.1 Introducción

Durante los meses de noviembre y diciembre del año 1994 un plan fue elaborado para tratar de atenuar el proceso del retroceso del río Pilcomayo y llegar a una distribución equitativa del agua entre Argentina y Paraguay. En este capítulo se describe la distribución del agua por un Sistema de Control. En primer lugar se describe los criterios y funcionamiento del sistema de control como conjunto y luego se describe los diferentes partes del sistema.

#### 4.1.2 Generalidades

Durante la misión de noviembre/diciembre de 1994, se acordó planificar un dique distribuidor con tres obras de control hidráulico para cada país para la división del agua:

- aguas mínimas hasta 25 m<sup>3</sup>/s, por una alcantarilla
- aguas medias hasta 75 m<sup>3</sup>/s, por un vertedero de fondo bajo
- aguas máximas hasta 2000 m<sup>3</sup>/s, por un vertedero de fondo más elevado

Desde el momento del proyecto, anteriormente elaborado, y a la fecha, se dispone de información topográfica de la traza identificada y del punto donde las aguas salen del cauce principal del río. En base de esta información se puede observar que tenemos una diferencia de altura entre los dos países de aproximadamente 2 metros. Es decir que la parte del valle al lado Paraguayo es dos metros mas alto que la parte del valle al lado Argentino. Esta diferencia de altura hace difícil distribuir las aguas mínimas, medias y máximas sin la construcción de una presa con mas altura que previsto anteriormente.

Las aguas mínimas y medias tienen un flujo a través bañados y cañadas en ambos países. Sin embargo las aguas altas cubren un área mas amplio en el recinto del valle entre el cauce colmatado y las alturas al lado norte y sur del río colmatado. En este momento no tenemos datos sobre la distribución de los caudales y la topografía del valle aguas abajo del punto de colmatación y por lo tanto no es aconsejable dar una solución para la distribución de todo el rango de los caudales. Por ende se sugiere elaborar obras de control en dos etapas. La primera etapa es distribuir aguas mínimas y medias y la segunda etapa es para distribuir las aguas altas.

Teniendo en cuenta que se pretende aprovechar lo máximo posible del comportamiento hidráulico natural de los bañados y cañadas, se considera conveniente modificar las obras anteriormente proyectadas (1994), de la siguiente manera:

- Realizar una única obra de control para aguas mínimas y medias ubicada dentro del área de drenaje natural de las mismas.
- Ambas obras de control estarán interconectadas por un canal hidroequilibrante que funcionará sólo para este nivel de caudales (aguas mínimas y medias).
- Las aguas máximas no tendrán en esta fase una estructura de control.
- El terraplén previsto en el diseño anterior será substituido por un camino de acceso que preverá un tramo del mismo para el paso de las aguas máximas, alejado de las obras anteriormente mencionadas (véase la Figura 4.1).

Se llega a los siguiente criterios generales para cada país:

- una estructura con compuertas para las aguas mínimas (hasta 25 - 30 m<sup>3</sup>/s)
- un vertedero ubicado al lado de la obra anterior, para las aguas medias (hasta 150 - 200 m<sup>3</sup>/s)
- la regulación de estos caudales (hasta 200 m<sup>3</sup>/s) se hará con el auxilio de compuertas.
- las obras para los caudales máximos deben ser planificadas separadamente de las obras para aguas mínimas y medias, puesto que las mismas requieren un mayor conocimiento del comportamiento del recinto como topografía, efecto de laminación, distribución entre ambos países, posibles lugares de fuga, etc.
- las vías de acceso a las obras de aguas mínimas y medias se planificarán cruzando el valle aprovechando las alturas naturales lo máximo posible, tomando en cuenta que serán atravesadas por las aguas máximas. Las vías de acceso se construirán sin revestimiento y utilizando en lo posible el suelo del lugar y compactando con las máquinas de construcción. Las mismas servirán de terraplenes de prueba.
- incluir una compuerta dentro del canal hidroequilibrante para poder cerrar el canal durante aguas máximas, para evitar la erosión del canal.
- es imprescindible realizar el monitoreo durante el período de crecidas del año hidrológico 1995/96.

#### Observación:

La distribución equitativa de las aguas máximas está condicionada asimismo por un estudio integral de todo el tramo del río desde Villamontes, a fin de ubicar con precisión los puntos de desborde existentes (puntos críticos) en el mismo y diseñar en consecuencia las obras de protección.

Asimismo deben evaluarse los usos consuntivos del agua que cada país realice para la compensación correspondiente.

#### 4.1.3 Criterios para el Sistema de control

Las aguas mínimas, medias y máximas deben ser divididas entre los dos países de manera tal a crear un equilibrio en el sistema una vez que las aguas salen de su cauce. Los datos para el ante-proyecto al momento del estudio (octubre 1995) no tienen suficiente amplitud para cubrir la solución del problema en su totalidad.

Se tienen pocos datos de la zona, como topografía, hidrogeología, geología, geomorfología, hidrología y hidráulica para un diseño final de estructuras y medidas que abarcan el rango total de los caudales; como se señaló en el primer informe de febrero de 1995. Para entender los flujos dentro el sistema es necesario analizar los datos de la cuenca del río Pilcomayo en su conjunto. La recopilación de los mismos puede ser abarcada dentro de un plan maestro/director, en todos sus aspectos: técnicos, ecológicos y socio-económicos.

Dentro el diseño del ante-proyecto la división de las aguas mínimas y medias han sido tratadas. Sin embargo las aguas máximas forman un aspecto muy importante dentro la repartición de las aguas y además tienen efecto sobre un área más grande. Las obras planteadas dentro el esquema descrito pueden ser influenciadas por crecidas de gran magnitud. La posibilidad de que las aguas de crecidas salgan del cauce aguas arriba del recinto del área de influencia de las obras de control y tomen la pendiente más favorable es sólo una de las posibilidades. Dentro los bañados puede ocurrir erosión al lado paraguayo o argentino del cauce colmatado durante un caudal grande.

Para el diseño de las obras a manera de conseguir una división de las aguas mínimas y medias se partió de la idea que las aguas máximas sean repartidas por varios hidroequilibrantes lo más cerca posible a la partición del caudal en el punto de colmatación del río. Su división es muy incierto por varias razones. Las obras para aguas mínimas y medias se están planificando en un lugar más favorable al flujo natural de las cañadas. Es muy improbable que el curso de las cañadas cambie. Desde el año 1986, en el cual la colmatación llegó al punto de la proyección de las obras el curso de las cañadas no ha cambiado, lo que no quiere decir que no cambiará bajo condiciones extremas.

Durante el proyecto para la definición de las obras a ser ejecutadas se tomaron como base los siguientes criterios:

##### *Sistema de control en general*

- El agua del río entra en el valle donde se plantearon las obras y no saldrá de su valle

aguas arriba.

- La partición de las aguas altas requiere un estudio más profundo/amplio al nivel de la cuenca en su conjunto.
- La experiencia con la división de las aguas al punto de colmatación debe dar más criterios sobre el proceso de la colmatación y su distribución de caudal hacia los dos valles norte y sur del cauce colmatado.
- Al mismo tiempo se debe ampliar el sistema de monitoreo para obtener más datos sobre erosión, hidráulica, fluvio-morfología, hidrología, geología, etc.
- Para saber el comportamiento de las crecidas es necesario de incluir un sistema de monitoreo sobre todo en caso de los hidroequilibrantes para aguas máximas.
- Al momento que se tenga más información especialmente durante las crecidas, se sugiere proyectar las obras con mucha cautela.
- La influencia a las obras para la división de las aguas mínimas y medias debe influir al flujo máximo lo menos posible, sin embargo no dejar aislar las obras tampoco. Por lo tanto se han proyectados las obras dentro el sistema de drenaje natural existente lo máximo posible.
- La proyección de las obras está planificada cerca el cauce colmatado conectado por un canal hidroequilibrante para aguas mínimas y medias. El área dentro el valle entre las obras y un área mas alto es suficiente ancho para dejar pasar las crecidas.

#### *Sistema de control de las aguas mínimas y medias*

- se estima que la capacidad de conducción de las cañadas es suficiente para conducir el caudal de aguas mínimas y medias. (a ser comprobado por la topografía, trabajos que se están realizando actualmente (octubre 1995) al lado paraguayo y a ser iniciados al lado argentino).
- la localización de la estructura de control de aguas mínimas y medias, aprovechará la dirección natural del flujo cerca de las cañadas existentes, y asimismo tener un canal hidroequilibrante tan corto como sea posible, justamente aguas arriba de ambas estructuras.
- las aguas mínimas y medias se regulan y midan con compuertas.
- las vías de acceso a las obras de aguas mínimas y medias se planifican cruzando el valle aprovechando las alturas naturales lo máximo posible, tomando en cuenta que puede ser cruzado por aguas máximas.

Por lo tanto, al localizar en un solo lugar las obras de control de aguas medias y mínimas en ambos países se obtienen las siguientes ventajas en:

- aprovechar el comportamiento hidráulico del sistema (direccionamiento de las aguas), 70 - 90 % del año.
- la operación y el mantenimiento de las obras de aguas mínimas y medias.
- la menor obstrucción posible para dividir las aguas mínimas y medias.
- la construcción, al centralizar las obras de hormigón en un sólo sitio en ambos países, cerca del cauce colmatado.

#### *Sistema de control de aguas máximas*

- Las obras de control para los caudales máximos requiere más conocimiento del sistema de la cuenca como conjunto y por ende esta planificado separadamente de las obras para aguas mínimas y medias. Asimismo, las aguas máximas requieren más

investigación, por un lado el desagüe de las avenidas en el valle mismo y por otro la división de las aguas de crecida entre los dos países. Especialmente el último punto es de suma importancia para el balance hídrico de los dos países y abarca un área más amplia de la que ha sido investigada hasta el momento.

#### 4.1.4 Canales hidroequilibrantes

Los canales hidroequilibrantes deberán garantizar una distribución equitativa de aguas para todo el rango de los caudales: aguas mínimas, medias y máximas.

Los canales hidroequilibrantes para aguas mínimas y medias corren el riesgo de verse afectados por las aguas altas que pueden causar una erosión de los taludes.

Se propone dividir el funcionamiento de dichos canales en hidroequilibrantes para aguas mínimas/medias y separado los de aguas altas.

##### *a. Canales hidroequilibrantes aguas mínimas/medias*

Considerando el desnivel general del terreno entre los dos países, (del cual se disponen datos topográficos en el lugar de la traza del dique), se hace difícil conseguir el equilibrio del espejo de agua entre las estructuras del lado paraguayo y argentino, sin la construcción de una presa.

Los canales hidroequilibrantes de aguas mínimas/medias funcionarán un 70 al 90 % del tiempo, y deberán ser protegidos adecuadamente.

Para obtener una distribución equitativa se tienen las siguientes opciones o una combinación de ellas:

- un canal hidroequilibrante conectando las cañadas al mismo nivel (n.s.m.) en el lecho de las cañadas.
- incluir estructuras con compuertas de regulación para poder regular el caudal en ambos sistemas y una estructura dentro el canal hidroequilibrante mismo para poder cerrarlo durante aguas máximas.
- ajustar los niveles de las estructuras en relación a la topografía.
- ajustar el dimensionamiento de las obras: altura de los umbrales y ancho de las mismas

##### *b. Canales hidroequilibrantes para aguas máximas*

Para identificar la ubicación de los canales hidroequilibrantes y vertederos de aguas máximas es necesario disponer de los datos topográficos y conocer el flujo natural en la situación de aguas altas, a través de las dos planicies. Para ello se tiene que preparar un plano indicando estos flujos con diferentes caudales. Además de esto, se han de considerar los siguientes criterios:

- Los canales hidroequilibrantes de aguas máximas, deberán conectar los almacenamientos (bañados) cerca del cauce colmatado en ambos países.
- Esta conexión funcionará para aguas altas y para un mejor funcionamiento deben buscarse dos o más conexiones.
- El equilibrio de los caudales máximos preferiblemente tiene que ser obtenido lo más cerca posible de los canales de entrada.
- La conexión consiste en una excavación que cruza el cauce colmatado.

- La profundidad de la excavación depende del nivel de las aguas medias.

Como mencionado antes la distribución de las aguas máximas está dejado para una etapa posterior dentro un marco mas grande del estudio.

#### 4.1.5 Diseño de las estructuras para aguas mínimas y medias.

##### General

Antes de diseñar las estructuras en detalle tenemos que poner algunas criterios de diseño. Estos datos generales se describa en el primer parte de este capítulo, después se describe las dimensiones y como ultimo cómputos para la operación de las compuertas y el funcionamiento del vertedero.

##### Criterios generales.

Los dos sistemas de control de caudales de los países Argentina y Paraguay reciben sus aguas de áreas de inundación en lo cual el agua ha depositado su sedimento cerca de su salida del lecho original del río Pilcomayo. Las aguas pasan por un área bastante amplia atraves bañados y quebradas. Las aguas que llegan al sistema de control están relativamente libre de sedimentos, sin embargo al momento de aguas altas pueden traer basura. La estructura con las compuertas tiene como objetivo medir y regular las aguas mínimas y medias en conjunto con un vertedero y el canal hidroequilibrante.

##### Criterios para las aguas mínimas y medias:

Los caudales a ser regulados están en el orden de 2 hasta 40 m<sup>3</sup>/s.

La perdida de energía sobre la estructura es variable.

La altura aguas arriba de la estructura esta en el orden de 0,5 hasta 2 metros.

El factor  $\tau$  para cada compuerta entre aguas Q medias max. y Q mínimas mín. es  $20 \text{ m}^3/\text{s} / 2 \text{ m}^3/\text{s} = 10$ .

El factor de error en la medición puede ser entre 3% y 5%.

El caudal por m<sup>1</sup> de compuerta debe ser menor al 5 m<sup>3</sup>/s y puede ser mayor al 0,5 m<sup>3</sup>/s.

Para aguas con caudales en el rango máximo de flujo la basura debe pasar la estructura. Considerando estos criterios se puede diseñar una compuerta tipo radial o una compuerta ascendente (ver figura 4.2). Los puntos para girar la puerta de la primera compuerta están arriba del agua y por lo tanto tiene la preferencia por su mantenimiento mas fácil que la ultima.

##### La compuerta tipo radial:

La compuerta tipo radial es una estructura que puede regular aguas arriba de la estructura y con la formula de descarga es posible medir el agua. La ventaja es que la estructura no requiere una guía adentro los paredes de la estructura de hormigón. Es posible de poner la compuerta sobre el piso levantado o sobre el fondo de la estructura sin elevación.

Evaluación del caudal de las compuertas. El caudal para las aguas mínimas alcance unos 25 m<sup>3</sup>/s. Para una operación mas flexible se opta por dos compuertas con los siguientes características (ver figuras 4.3 y 4.4):

Ancho compuerta (b<sub>c</sub>) = 3 m

Radius de la compuerta (r) = 4 m

Punto de gira (a) = 2,50 m  
 Fondo de la estructura (p) = 0,25 m sobre el fondo del lecho de la cañada

Para una apertura de 1 m de la compuerta:

$$Q = C_0 C_1 w b \sqrt{2gy_1} \quad (1)$$

Profundidad aguas arriba ( $y_1$ ) = entre 1,5 m y 3,5 m  
 Apertura de la compuerta (w) = 1 m  
 Coeficiente de contracción ( $C_0$ ) = entre 0.54 y 0.60  
 Coeficiente de corrección ( $C_1$ ) = 1,02

Los caudales Q se encuentran entre 9 y 18 m<sup>3</sup>/s con la apertura de por ejemplo 1 m.

En caso que la compuerta esta sumergida la formula es:

$$Q = C_e b_c w \sqrt{(2g(y_1 - y_2))} \quad (2)$$

en lo cual:

Profundidad aguas abajo = ( $y_2$ ) m

Para fines de diseño el coeficiente  $C_e$  puede ser calculado del coeficiente  $\delta$  para las condiciones de flujo libre.

$$C_e = \delta / (\sqrt{(1 - \delta w / y_1)^2}) \quad (3)$$

en lo cual:

$$\delta = 1 - 0,75 (\Theta / 90^\circ) + 0,36 (\Theta / 90^\circ)^2$$

en lo cual:

$\Theta$  esta en grados de la inclinación de la compuerta.

#### Limitaciones de aplicación:

El fondo debe ser horizontal y liso;

La profundidad aguas arriba debe ser medida en una sección rectangular;

La apertura de la compuerta (w) debe ser menor que 0,8 \* profundidad de las aguas arriba ( $y_1$ );

La profundidad aguas abajo tiene que ser tal que:

$$y_2 / w < \delta / 2 (\sqrt{(1 + 16((H/\delta) w) - 1)}) - 1 \quad (4)$$

#### Medición de caudal

Los gráficos elaborados para este tipo de compuerta dan la relación entre el caudal, profundidades de las aguas y la apertura de las compuertas (ver figura 4.5). Sin embargo

los gráficos teóricos deben ser calibrados según la situación real. Después de la instalación los gráficos deben ser adaptados con mediciones de tipo velocidad-área. Las secciones aguas arriba y abajo de la estructura para este tipo de medición deben ser uniforme, con suficiente profundidad (sección de control). El método "stage discharge" es muy común en los casos que se requiere un registro del caudal y que no es práctico para medir continuamente las secciones con el método velocidad-área. Las condiciones para este método de medición son que el flujo aguas abajo está libre y que el "control" es suficiente constante. Después un tiempo de medición con el método velocidad-área los niveles del agua medido aguas arriba y abajo con un "data logger". La norma para el método velocidad-área es ISO 748 y del método "stage-discharge" es ISO 1100 (ver anexo I).

### 3.1.6 Diseño del vertedero de aguas medias

Para las aguas medias el caudal máxima es de unos 150 m<sup>3</sup>/s. El caudal puede ser desaguado dentro el área de los cañadas existentes. Por lo tanto es conveniente de buscar la ubicación de la estructura cerca de las cañadas. Al lado paraguayo es posible, sin embargo al lado argentina será mas cerca el cauce colmatado para tener los dos estructuras juntas. En el anexo I se encuentra la norma ISO 4362 para su diseño.

Como ejemplo de pre-diseño tenemos los siguientes criterio:

La formula para el caudal es:

$$Q = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)^3} C_D C_v C_{dr} b \sqrt{g} \sqrt{h^3} \quad (5)$$

$Q_{max}$	= 150 m <sup>3</sup> /s.
$b$	= ancho perpendicular de la cresta (m).
$C_{dr}$	= coeficiente del flujo modular o sumergido, no-dimensional.
$C_D$	= coeficiente de caudal, no-dimensional.
$C_v$	= velocidad de entrada, lo cual es no-dimensional [= (H/h) <sup>3/2</sup> , en lo cual H es la carga total, en metros].
$h$	= La altura del nivel del agua sobre la cresta, en metros.
$g$	= La aceleración por la gravedad, en metros por segundo cuadrado.
$l$	= ancho paralelo al flujo de la cresta

$C_v$  puede ser determinada por la ecuación:

$$C_v = \sqrt{\left[1 + \frac{4}{27} C_D^2 \left(C_D \frac{bh}{A}\right)^2\right]^3} \quad (6)$$

El valor  $C_D$  es expresado como una función de h/l esta indicado en anexo I. Con una pendiente del talud aguas arriba de 1 : 2, y aguas abajo de 1 : 3, un ancho l de 1 m, una altura h de agua entre 0,5 m y 1,0 m el factor  $C_D = 0,985 - 1,054$ .

Consecuentemente  $C_v = 1,00 - 1,02$ . Por el factor  $\sigma_c = 0,84 - 0,73$  se obtiene el  $C_{dr}=1$

El  $Q/m^1 = 0,58 \text{ m}^3/s$  con un  $h = 0,50 \text{ m}$

El  $Q/m^1 = 1,14 \text{ m}^3/s$  con un  $h = 0,75 \text{ m}$

El  $Q/m^1 = 1,83 \text{ m}^3/s$  con un  $h = 1,00 \text{ m}$

El ancho del vertedero es 100 m con una seguridad de aproximadamente 20%. El vertedero tiene cinco secciones de 20 m. Un puente peatonal prefabricado (pre-tensionado) puede ser colocado de una pilastra al otro.

#### 4.1.7 El cuenco del vertedero.

La construcción de vertederos levanta el nivel de energía aguas arriba de la estructura. La diferencia entre la línea de energía aguas arriba y abajo de la estructura será mas alto que la situación natural. Por ende es necesario de construir un dissipador de energía. Este dissipador debe ser incluido para evitar daños a los taludes y erosión del lecho de las cañadas. El flujo sobre la cresta del vertedero es super-crítico y el salto dentro un cuenco aguas abajo de la cresta debe disipar la energía. La ubicación del salto, la protección del lecho y los taludes debe ser determinado por medio del siguiente calculo.

Aplicar la ecuación de Bernoulli aguas arriba y abajo de la cresta para determinar la perdida de carga en dos secciones. La ecuación aguas arriba da un valor que tiene que equilibrar con el valor aguas abajo de la cresta (aguas arriba del salto).

$$\text{nivel} + y_1 + v_1^2/2g = \text{nivel} + y_2 + v_2^2/2g \quad (7)$$

La fricción de la cresta misma no fue tomada en cuenta.

Con la velocidad  $v_2 \text{ m/s}$  el numero de Froude puede ser calculado:

$$F = v_2 / \sqrt{gy_2} \quad (8)$$

En lo cual:

F = numero de Froude

v = velocidad del agua en m/s

g = La aceleración por la gravedad, en metros por

La profundidad del agua, aguas abajo del salto puede ser computado con la formula:

$$y_3 / y_2 = 1/2( \sqrt{1 + 8 F^2} - 1) \quad (9)$$

$y_x$  = Profundidad del agua en m

El longitud del cuenco es 6 - 8 veces de la profundidad del agua ( $y_3$ ). (Chow) El tipo de cuenco debe ser calculado al momento que mas datos están disponible de la ubicación de la estructura. Como primera estimación el cuenco debe tener dentales y un umbral al final del cuenco. El longitud del cuenco está dentro de 10 hasta 12 m.

#### Análisis del flujo subterráneo

La permeabilidad del subsuelo debe ser determinada para calcular el flujo subterráneo por medio de la teoría de Bligh, Lane, Khosla o un red de flujo.

Sobre arena fina o limo el método de Bligh es mas conservador que lo de Lane. El método de Khosla o un red de flujo son mas exacto.

En este momento una estimación conservadora puede indicar que el gradiente (diferencia de los niveles del agua (arriba y abajo) en relación con el longitud de la estructura) permitido es de 1/18 en suelo de arena fina y limo. En caso que la diferencia de carga es de 3,5 m (con poco profundidad del agua al lado aguas abajo de la estructura) en conjunto con una longitud de la estructura de 30 m se requiere tres cortinas de unos 6 m de profundidad.

Al momento de conocer el valor de permeabilidad y la ubicación de la estructura se puede calcular el longitud de las cortinas con mas exactitud.

#### Estaciones de medición de carga.

La estación de medición debe ser colocada suficiente alejado de la estructura aguas arriba para evitar la influencia de la estructura sobre la superficie del agua. El nivel del agua normalmente está indicada por una mira lo cual está relacionada al nivel de la cresta de la estructura que sea una cresta elevada o el fondo bajo de la compuerta. Por otro lado la mira debe ser suficiente cerca para evitar la influencia de perdida de la carga en el superficie del agua. En general la distancia hacia aguas arriba de la estructura, como cresta o compuerta es de 2 a 4 veces la profundidad máxima del agua (aguas arriba).

La medición del caudal pasando las estructuras puede ser registrado por medio de un equipo acústico. La descripción de este equipo está descrito en el capitulo del Monitoreo. La ventaja es que la registración es muy exacto y continuo, sin embargo la desventaja es que el precio es bastante elevado en relación con un equipo convencional.

#### Materiales

Los materiales para la construcción del vertedero puede ser de hormigón para las pilastras y la presa del vertedero mismo. Losas de hormigón deben ser armado por su rigidez y la posibilidad de asentamiento. Colchonetas con malla tejido galvanizado con una capa de hormigón en la parte superior de la colchoneta también puede ser una solución para la presa. En todos casos es necesario de colocar un geotextil abajo todo la estructura para evitar que los fines salen en caso que se forma fisuras por el asentamiento de la estructura. El cuenco del vertedero es del mismo material que la presa. Aguas abajo de la estructura una transición con protección hasta la sección de la cañada debe ser suficiente largo para cubrir la transición de velocidad del agua.

#### El canal de entrada de la estructura

Todas las estructuras para medir y regular el agua requieren un canal de entrada con un

flujo que está libre de interferencia turbia y debe tener una distribución de flujo regular. El mismo puede ser obtenido en tener una sección recta y libre de estructuras. El canal de entrada debe tener una sección transversal regular/uniforme y está recta por lo menos 10 veces su anchura pro medio del lecho, con la condición que la apertura de la estructura está por lo menos igual o mas grande que la mitad del ancho del canal. En caso que la apertura es menos que la mencionada la sección recta del canal debe tener por lo menos 20 veces la apertura de la estructura.

#### El canal de salida de la estructura

La diferencia entre el nivel del agua, arriba y abajo de la estructura debe ser tal que el flujo modular se mantiene bajo todo el rango de operación de la estructura. Para el control del flujo modular se debe instalar una mira y/o "data-logger". En la época de crecidas será necesario de registrar el nivel aguas abajo para saber el caudal pasando la estructura.

Para mas detalle sobre la medición se refiere al capitulo "Monitoreo".

#### El canal hidroequilibrante

El canal hidroequilibrante depende de la ubicación de las estructuras a ambos lados del cauce colmatado del río Pilcomayo. Para una primera estimación se puede tomar un canal revestido en todo su longitud con geotextil tipo colchoneta (un ejemplo esta indicado en apéndice C). Colchetas con alambre tejido con piedras (tamaño manzana) y sobre un geotextil es un otro posibilidad. El precio del ultimo es bastante elevado sabiendo que solo el precio de las piedras es de unos 60 US\$/m<sup>3</sup>. Las piedras pueden venir de Villamontes en Bolivia, el lugar mas cerca a la obra. La primera opción con un colchón de geotextil el material (arena seleccionada) del lugar puede ser utilizado. ok

La profundidad del canal es aproximadamente la misma que las cañadas (3 m) y el ancho del lecho de 15 m. El canal con los taludes con un pendiente de 1 : 2,5-3 tiene una capacidad de caudal con un flujo de 1 m/s de 70 m<sup>3</sup>/s.

Una estructura dentro el canal hidroequilibrante tiene que ser incluido para cerrar el canal en tiempos de crecidas. La compuerta dentro la estructura funciona como "stoplog". Sin embargo la operación de la compuerta es mas frecuente, por lo tanto es necesario de incluir un equipo fácil de operación. atrapa

## 4.2 MONITOREO

### 4.2.1 Selección del método de medición de caudal

#### Generalidades

Para la medición de caudales en cauces naturales varios métodos pueden ser seleccionados. En general se puede diferenciar unos siete métodos, de lo cual tres son métodos incidentales y cuatro continuos.

Las mediciones incidentales mas que todo son usadas para calibrar métodos continuos. Los métodos incidentales son: Velocidad-Área, Pendiente, Dilución. Para el proyecto del Río Pilcomayo están usando la primera opción. No tenemos criterios preponderante

para cambiar este sistema, sin embargo sería necesario de ampliar/mejorar las mediciones. Los sugerencias para se encuentra en los siguientes párrafos.

Los métodos de medición continuos generalmente forman parte de un red de un sistema hidrológico, en lo cual diariamente el manejo es necesario. En la sección abajo se menciona: Stage-discharge, Acústico, Estructuras de medición. (La cuarta medición sería con bomba y por ende no aplicado en este proyecto).

Cada uno de los métodos de medir el caudal tiene su área de aplicación. Se tiene que llegar a una selección según los criterios siguientes:

- se requiere una medición incidental, o continuo del caudal?
- Cuales son el ancho, profundidades del perfil transversal y en que magnitud se puede encontrar las velocidades? Con estos datos podemos diferenciar:

	pequeño (P)	medio (M)	grande (G)
Ancho (A)	$A < 5 \text{ m}$	$5 < A < 50 \text{ m}$	$A > 50 \text{ m}$
Profundidad (y)	$y < 1 \text{ m}$	$1 < y < 5 \text{ m}$	$y > 5 \text{ m}$
Velocidad (v)	$v < 1 \text{ m/s}$	$1 < v < 3 \text{ m/s}$	$v > 3 \text{ m/s}$

Un esquema de los criterios para llegar a un método de medir el caudal.

Método	Criterio					error de medición (%)	standard
	Incidental o Continuo	ancho del perfil	profundidad del perfil	velocidad	condiciones de flujo		
Método velocidad-área puente/teleférico	I	M G	M G	P M G	b c d	3 - 6	ISO 748
Método Stage-discharge	I	M G	M G	M G	a c e	5 - 10	ISO 1100
Acústico	C	M	M G	P M G	b c d	3 - 12	ISO 6416
estructuras para medir . calibrado . no calibrado	C	P M	P M	P M	a b c d e	< 5 > 5-10	varios

I = Incidental  
C = Continuo

P = Pequeño  
M = Medio  
G = Grande

a = corriente,  $Fr < 1$   
b = sin flujos transversales  
c = fondo y taludes libre de vegetación  
d = tramo de medición recto y uniforme  
e = perfil transversal estable

- Cuanto es la disponibilidad de la pérdida de energía?
- Tenemos transporte de sedimentos y en cual forma? En suspensión (con aire), o transporte de fondo?
- Cuales son las condiciones de flujo de entrada y salida de la sección de medición?
- Cual es el error permitido (%)?

### Requerimientos del sistema

Del punto de vista de un manejo adecuado las siguientes condiciones pueden ser mencionadas:

- Función de regular y medir el agua;  
El requerimiento que la estructura debe regular y medir el agua quiere decir que, a veces, el perfil de flujo debe ser completamente abierto o cerrado por medio de una compuerta.
- La exactitud de la medición;  
La misma exactitud para todo el rango de medición debe ser valido.
- Requerimientos no-técnicos;
  - . conocimiento local con un cierto tipo de medición;
  - . la necesidad para standarizar uno o varios estructuras;
  - . los costos de la inversión;
  - . ajuste a la condición ambiental local;
  - . adaptación para dejar pasar peces y/u otros organismos.

### Las condiciones del campo

Para obtener un diseño equilibrado se requiere los siguientes datos:

- La disponibilidad de la energía del agua. Cada estructura causa una diferencia de niveles, provocada por un aumento del nivel del agua, aguas arriba, u una reducción del nivel del agua, aguas abajo. Ambo cambios son relativamente restringido, especialmente en áreas planas como del sistema de control.
- El rango de los caudales y niveles del agua.  
En cauces de agua naturales el rango de los caudales y niveles de agua debe ser conocido u estimado. La rango del Q, mas que todo, determina el tipo de estructura y el nivel del agua mas el nivel de la cresta.
- Transporte de sedimento y basura.  
Principalmente para cauces aluviales, sin embargo también canales, pueden transportar grandes cantidades de sedimento. Basura flotante y transporte de sedimento depende de la época y es generalmente de corta duración.

### **Selección del método para el proyecto**

#### General

En el caso del proyecto Pilcomayo se puede seleccionar de los sistemas Incidental Velocidad-Área para la medición del caudal en el río a la altura de la Misión La Paz y para calibrar las estructuras del sistema de control.

El método stage-discharge puede ser usado a la altura de la misión La Paz en caso que el fondo está en una situación estable. En caso de crecida es necesario de medir con el sistema de molinete, véase abajo.

El método stage-discharge se aplica en conjunto con las estructuras para tener la información sobre el caudal continuamente que entra por las cañadas de ambos países. En conjunto con la curva Q-H (calibrada) de cada estructura puede ser calculada para llegar al caudal con exactitud hasta 5% de error.

En breve se describe los métodos con ejemplos de equipo, sin embargo hacemos referencia a las normas ISO en lo cual las mediciones están standarizados.

#### Método standard velocidad-área

El caudal del río puede ser calculado como producto del área y el superficie del área transversal. La profundidad y la velocidad deben ser medidas en un numero de verticales de los cuales se calcula la velocidad pro medio y su área respectivo. Se tiene diferentes métodos para medir la velocidad pro medio. Los verticales tienen una distancia máxima de 20% del ancho del cauce en secciones regulares y 5% del ancho en cauces irregulares. El método con 7 - 10 puntos por vertical requiere bastante tiempo y usualmente está reemplazado por 3 puntos en el vertical. El método integral es en lo cual el medidor de velocidad está bajado al fondo y elevado con una velocidad constante. El perfil puede ser calculado gráficamente, con el método por área entre los verticales de medición de velocidad y por área con lo cual el vertical está en la mitad del área.

#### Medidor con molinete.

Para medir la velocidad varios sistemas están en el mercado. La molinete es muy común en varios tamaños para diferentes rangos de velocidad.

Con velocidades altos la molinete debe tener un peso para poder medir la velocidad en el vertical. Aún así no es posible de medir sobre un vertical exactamente y además el teleférico o puente de lo cual la medición está hecha no están exactamente perpendicular sobre el río. Los proveedores de estos equipos han desarrollados equipo electrónico en conjunto con su software para corregir estos errores.

#### Medidor con sensores electro-magnético.

Este tipo de medidor con sensores electro-magnético no tiene elementos movibles. El principio está basado sobre el Ley de Faraday: La tensión que está generada por el conductor que está perpendicular al un área homogéneo y magnética, y está relacionada con la velocidad de lo cual el conductor se mueve por el área magnético. El uso está apta para aguas con plantas acuáticas, en áreas de poco profundidad (flujos sobre las orillas y bañados), aguas contaminados, está independiente de temperatura, salinidad y sedimentos en suspensión y en aguas con velocidades muy bajos. Normalmente el rango de velocidad de cero hasta 1,5 m/s.

#### Medición de caudal por medio del método acústico.

El principio de medición de caudal está por medición de velocidades por ondas acústicos en conjunto con la registración del nivel del agua. La velocidad está determinada por la medición del tiempo de transmisión de pulsas acústicas, cuales son transmitidos abajo de la superficie en una dirección diagonal en relación con el eje del río hacia un receptor al otro lado del río. Por la diferencia en tiempo en lo cual las ondas se muevan de un al otro receptor se puede calcular la velocidad. Para equilibrar flujos transversales se instala dos líneas de medición formando un cruz. (vea ISO 6416, en al ANEXO I)

*Las desventajas son:*

- . Los costos de adquisición son altos en relación con el sistema tradicional;
- . El sistema es nuevo para el uso en flujos como en el Pilcomayo con una variedad de temperatura, sedimento y velocidad;
- . La altura de los traduce debe ser instalados a tal altura que la influencia de la rugosidad del fondo está corregido. En cauces con una grande variación de altura en nivel del agua y erosión del fondo no es muy apta.

*Las ventajas son:*

- . Una medición continuo para saber continuamente el caudal disponible;
- . La medición tiene una exactitud dentro 1 mm/s, dependiendo el longitud de la onda;
- . Después su instalación el mantenimiento es mínimo.

Medición de niveles de agua.

La mayoría de las estaciones de medición de nivel del agua tienen un sensor o medidor de nivel en conjunto un registrador. En muchos casos se coloca un tubo ("stilling well") en lo cual olas cortas son eliminadas. Los tipos mas aplicados son:

- . miras
- . flotadores
- . sensores de presión
- . sensores ultra-sonoros

Las miras son para la medición lo mas sencilla y siempre está bien ponerlas cerca una estructura para dar una información directa global. Miras deben ser colocadas al muro de la estructura, a una pilastra o dentro una estructura para eliminar ola o velocidad del agua. Una estructura como indicada en figura 5.1 puede ser incorporada con las estructuras del sistema de control.

Las flotadores están conectadas a un sistema de registro y deben ser mantenidos frecuentemente para segurar su funcionamiento. Especialmente en aguas con sedimento se tiene que cuidar que el sistema no se tranca.

Sensores de presión miden la presión del agua sobre una membrana que es transmitida en una corriente que está registrada dentro la parte electrónica. Usualmente los "data loggers" están colocados dentro un tubo cerca una estructura. La parte baja del tubo debe ser abierto y además la tapa no debe ser cerrado. La presión atmosférica se debe mantenerse adentro el tubo.

Sensores ultra-sonoros se use para mediciones continuos de los niveles del agua. El sensor está colocado arriba del superficie del agua (sin contacto) y transmite pulsos. Estos pulsos serán refletados al superficie del agua. Sensores ultra-sonoros son sensible a diferencias de temperatura y humedad, presión, salinidad.

Conclusión

Las mediciones serán efectuadas en el río Pilcomayo mismo y también cerca la obra de control. En el río Pilcomayo cerca el pueblo de Pozo Hondo un puente está en construcción. Este puente puede servir como punto de medición con un equipo móvil. En la Misión La Paz existe un teleférico con equipo de molinete y registración de nivel del agua.

Para el equipo se sugiriera tener el equipo movil en conjunto con una movilidad. El equipo móvil puede hacer mediciones en el puente sin embargo también está apta para calibrar las obras de control.

En caso del río Pilcomayo sugerimos aplicar miras, sensores a presión y sensores electro-magnético. El ultimo como estuche liviana para ser complementario al sistema con molinete para obtener información rápida en lugares un difícil acceso.

### 4.3 GEOTECNIA DEL SISTEMA DE CONTROL.

#### 4.3.1 Aspectos geotécnicos de las Estructuras de Control para las aguas mínimas y medias.

Con referencia a las obras de control, descritos en este capítulo el asentamiento por consolidación de la base de la estructura fué calculada con referencia al esquema y las especificaciones de las estructuras. Los ensayos de laboratorio a la fecha de este informe no están del todo hechos, por lo cual algunos parámetros son aproximados.

Los cálculos han sido hechos sobre la base de 2 métodos.

- 1) Compresión del subsuelo sin deformación lateral y,
- 2) Compresión del subsuelo con deformación lateral.

- ad 1) Este método es utilizado con fundaciones situadas encima de estratos *confinados* de arcilla. Se trata del método de Terzaghi/Skempton  
ad 2) La método con deformación lateral es utilizado para fundaciones sobre suelos no estratificados (Skempton y Bjerrum).

#### Compresión del subsuelo sin deformación lateral.

El método 1 es unilateral y da una estimación del asentamiento a esperar. Se utiliza el método con " $m_v$ ": el coeficiente de compresibilidad volumétrica. Aun que no tenemos los datos de la cohesión ni del ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) estimamos el asentamiento con la formula:

$$s_c = \int_0^H m_v \Delta \sigma' dz \quad (1.1)$$

El coeficiente  $m_v$  es calculado por medio de los ensayos de consolidación, hechos en laboratorio. Se han utilizado los valores del "Calicata El Bajo" hecho en Argentina con suelos a una profundidad de 3 metros. Se estimó un valor promedio de  $m_v$  con la relación de vacíos ( $e$ ) y la presión correspondiente. Sabemos que  $m_v$  varia normalmente durante la presión inicial; y entonces hemos tomado el valor de presión esperada correspondiente, que es alrededor de  $0.6 \text{ kg/cm}^2$  o :  $60 \text{ KN/m}^2$ .

Entonces utilizando la planilla del ensayo de consolidación (oedómetro) se deduce que  $m_v$  varia de 0.29 y  $0.39 \text{ m}^2/\text{MN}$ .

Asumiendo que  $m_v$  y  $\sigma'$  son constantes y utilizando la formula (1.1) se puede simplificar el

método de cálculo en:

$$s_c = m_v \Delta \sigma' H \quad (1.2)$$

La presión es calculada en el medio de una fundación sobre murallas (zapatas) sobre una platea rectangular, cuya dimensión es 14m \* 15m. El espesor de la platea es de 50 cm. Las murallas tienen una dimensión de 25 cm de ancho y 14 m de longitud. Importante es como la presión se transmite de la zapata a la platea. Hemos supuesto un ángulo de 45°, que resulta en un área de contacto con el suelo de ancho 1.25 m. Tenemos entonces una platea de 30m\*14m\*0.5m, con tres zonas intermedias de influencia con sobrecarga de murallas angostas, las cuales en la base tienen un área de 1.25\*14 m

Con los gráficos de Fadum (o Newmark) se calcula la presión (tensión) a una profundidad determinada. La profundidad de la zona de influencia es una función del tamaño del platea con murallas. El espesor de la platea debe ser suficiente para impedir presiones diferenciales. Luego hemos determinado la zona de influencia máxima vertical a tres metros bajo nivel de la fundación, teniendo en cuenta una excavación de 4 metros bajo el nivel del terreno y un relleno de un metro con arena fina. Esto último es importante para una mejor división de las presiones bajo la platea. El suelo ya estaba preconsolidado por los 4 metros de tierra excavada.

El gráfico de Fadum indica que la presión "q'" en el medio de la platea a 3 m de profundidad (D) es casi "q", entonces 60 KN/m, debido al cociente L/D (largo/prof.) y el cociente B/D (ancho/prof.). La presión efectiva es entonces:

$$\sigma'_1 = \Delta P + (9.2 * 1) + (10.2 * 1) \quad (1.3)$$

$$\sigma'_0 = 5 * (10.2 * 1) \quad (1.4)$$

La sobrepresión efectiva es la diferencia:

$$\Delta \sigma' = \sigma'_1 - \sigma'_0 = 79.4 - 51 = 28.4 \text{ KN/m}^2$$

La sobrepresión efectiva no tiene en cuenta el periodo de construcción, durante el cual la obra de control se realiza en seco, es decir por medio de una excavación con bombeo. Después de la construcción se llenará la excavación, y entonces no hay grandes diferencias en la presión neutra del agua en el perfil del suelo bajo el nivel freático, o en otras palabras la carga piezométrica no cambiará mucho.

Utilizando la fórmula 1.2 el asentamiento se calcula como:

$$S_c = 0.39 * 2 * 28.4 = 19 \text{ mm.}$$

#### Compresión del subsuelo con deformación lateral.

Los factores de influencia son obtenidos de la geometría de la platea y el subsuelo. Así

se determina H/B, D/B y L/B.; D = profundidad de la platea bajo superficie (= 3 m). H = profundidad de la zona de influencia (3 m). B = ancho de la platea (14 m). L = largo de la Platea (15 m). Los factores de influencia  $\mu_0$  y  $\mu_1$  son aproximados por los gráficos de Janbu et all.(1956)

$$\mu_0 = 0.95 \text{ y } \mu_1 = 0.1$$

El asentamiento inmediato es descrito por:

$$s_i = \mu_0 \mu_1 \frac{qB}{E_u} \quad (1.5)$$

El valor de  $E_u$  es derivado del ensayo Triaxial (módulo de Young no drenado) y por ahora estimado en 55 MN/m<sup>2</sup>

$$s_i = 0.95 * 0.1 * (60 * 15) / 55 = 1.55 \text{ mm}$$

Este valor significa el asentamiento por tensión lateral del subsuelo.

El asentamiento por consolidación es calculado con el coeficiente de la presión de poros (A). El valor de A se obtiene del ensayo triaxial y está descrito por:

$$u_i = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (1.6)$$

Por ahora el valor de A es estimado en 0.35. El valor de  $\mu$  también se puede obtener del gráfico hecho por Scott, 1963, en donde los parámetros "A", H/B y  $\mu$  son interrelacionadas. Así el valor de  $\mu$  es determinada por 0.9.

El asentamiento por consolidación es calculado de la siguiente manera

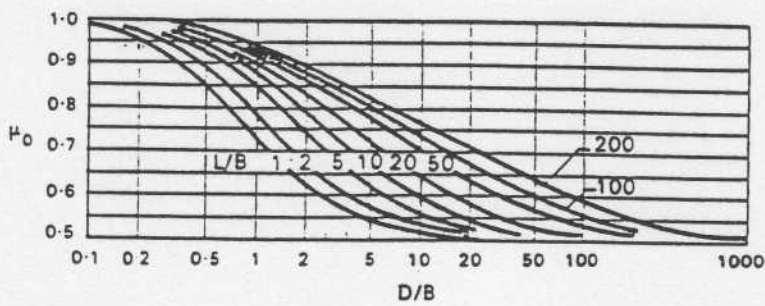
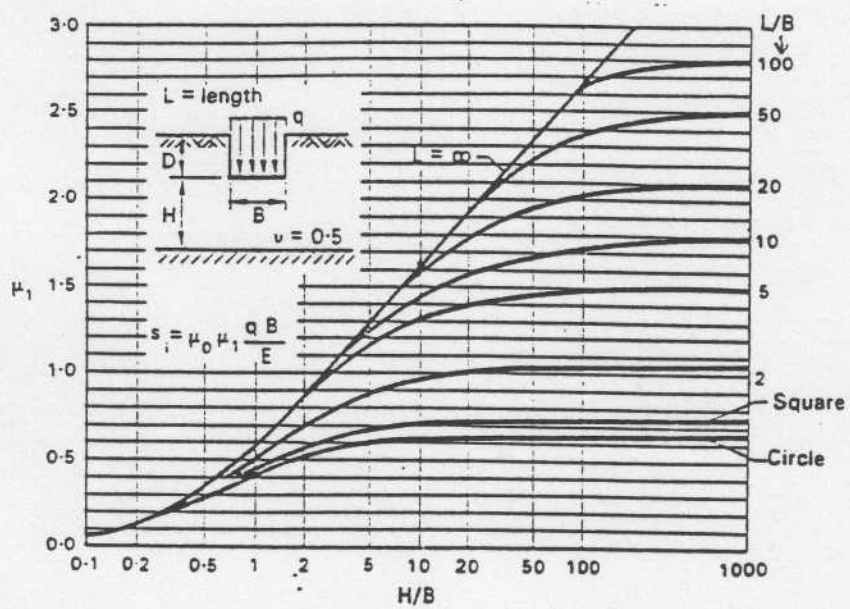
$$s_c = \mu * s_{oed} \quad (1.7)$$

Los valores de  $s_{oed}$  son calculados con la fórmula 1.2, en donde se substituyen  $s_c$  por  $s_{oed}$ .

Ahora incorporamos el tramo de influencia de la profundidad de la capa de arcilla. Esto se hace con el gráfico de Fadum.

Los valores de m, n, e  $I_r$  son mostrados en la siguiente tabla:

Capa	z (m)	$m_z$ (B/2z)	$n_z$ (L/2z)	$4 * I_r$	$d\sigma'$ ( $4I_r * 28.4$ )	$s_{oed}$ (mm) ( $m_v * d\sigma'$ )
1	1	7	7.5	1	28.4	11.07
2	2	3.5	3.75	0.97	27.5	10.72
3	3	1.75	1.87	0.95	27	10.53 +
						32.86



Janbu (1956)

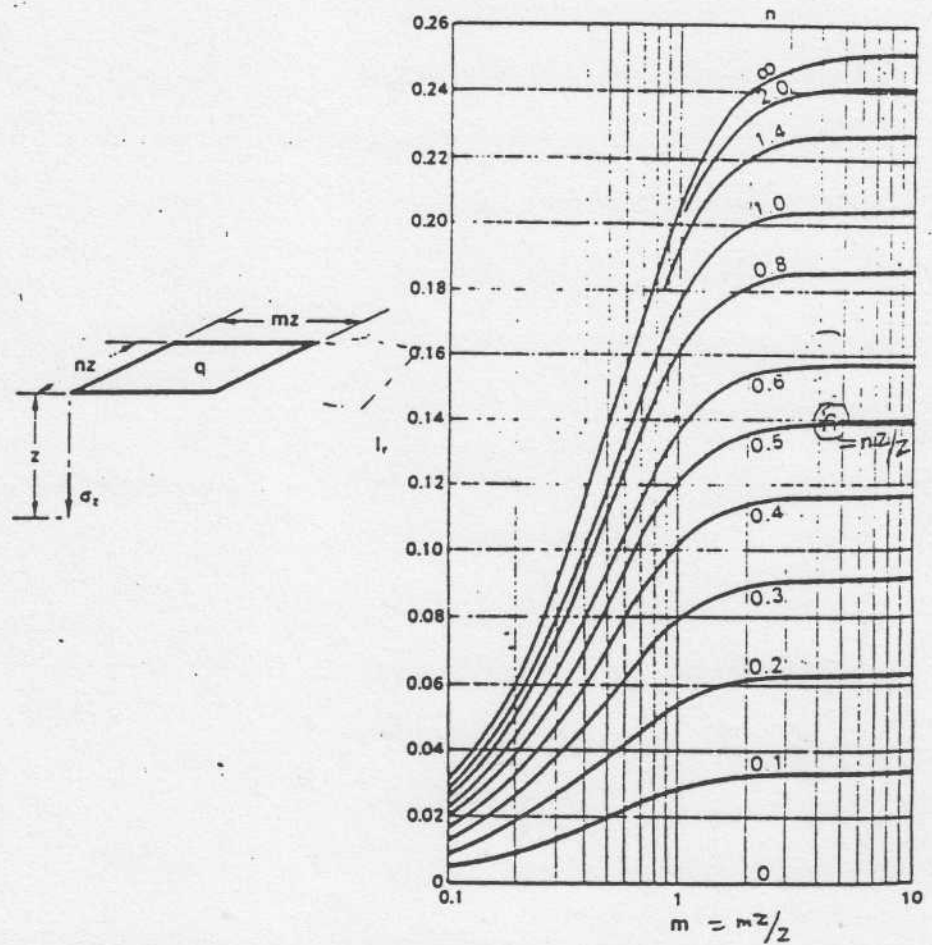


Figure 6.7 Vertical stress under corner of rectangular area carrying uniform pressure (After Fadum)

ejemplo :

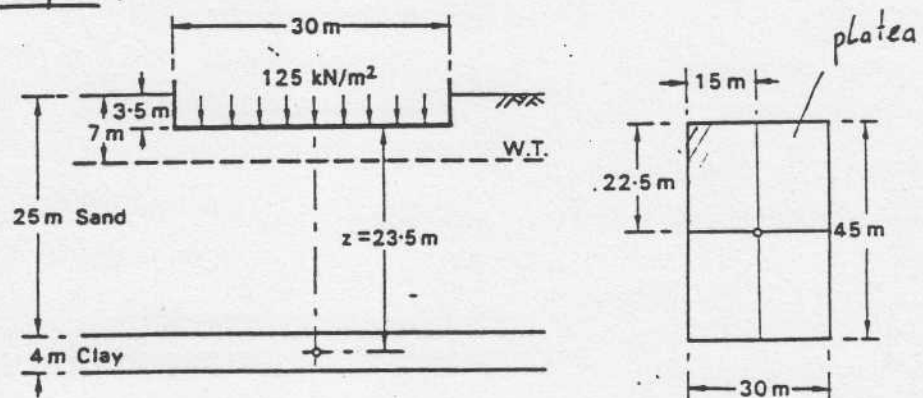


Figure 7.9 Example 7.2.

$$m_z = \frac{22.5}{23.5} \quad n_z = \frac{15}{23.5}$$

$$I_r \text{ total} = 4 \times I_r$$

El asentamiento por consolidación es entonces:

$$s_c = s_{oed} * \mu_0 = 32.86 * 0.9 = 29.5 \text{ mm}$$

El asentamiento total es calculado como:

$$s_i + s_c = 1.5 + 29.5 = 31 \text{ mm}$$

Estos valores dan solamente un idea global sobre el asentamiento a esperar en relación con la presión otorgado. La in-situ investigación geotécnica quedará necesario.

#### 4.3.2 Aspectos geotécnicos generales de un terraplén.

Considerando la modificación de las obras de control, acordada en octubre de 1995, en donde el terraplén del vertedero para aguas máximas está substituido por un camino de acceso, se puede imaginar que la necesidad de la investigación en terminos de sifonaje, asentamiento del subsuelo, ni la rotura del dique existía mas. No obstante el proyecto del sistema de control tiene en cuenta la posibilidad de algun tipo de terraplén (un relleno entre la estructura con compuertas y el cauce colmatado) para los caudales maximos, alejado de las obras anterioremente mencionadas. El ultimo depende de las obras de la topografía y, por su puesto de la experiencia con las estructuras de control. Cada dique de tierra debe ser adaptado a los materiales de construcción disponibles. Depende de la permeabilidad del subsuelo y de los materiales de construcción. La rotura de un dique debe clasificarse entre los accidentes lo más serios que pueden producirse en la ingeniería civil. Entre las causas de rotura hay sifonaje, escurrimiento, expansión, el paso de agua sobre su cresta, y taludes demasiado inclinados en relacion con el material (compactado) utilizado. No obstante debemos recordar que la mayor parte del terraplén control no va tener una carga hidraulica permanente. Solamente, quizás durante picos grandes de crecida (duracion periodos cortos dentro de los 3 meses de crecida) una carga hidráulica, que corresponde con una lamina de 3 metros o menos de agua, podría ocurrir, que en el diseño actual será evacuado por el camino de acceso.

En este momento un equipo geotécnico está previsto, ejecutando en el campo los ensayos de SPT, Permeabilidad ("constant head") y muestreo para las fundaciones. Es muy difícil entonces por ahora hacer los calculos de estabilidad sin tener los parámetros necesarios. No obstante, podemos estimar que la presión efectiva con un terraplén de 3 m no alcanzará el 0.6 kg/cm<sup>2</sup>. El asentamiento máximo también será en el orden de 3 hasta 5 cm, valores que no ofrecerán peligros. También algunos resultados de una investigación del campo ya estan disponibles. Se trata de los resultados de las áreas de prestamo en caso que una construcción de un dique deberá ser ejecutada. Los resultados generales son descritos abajo.

##### Prestamos

En general el área de la traza proyectado se puede dividir en tres partes:

- 1) Un tramo con limos, limos arenosas y limos con trazas de arcilla que representan áreas lo mas noreste (lado Paraguay) dentro el valle actual del Río Pilcomayo. La profundidad máxima analizada es de 2 metros. Estas suelos hasta 2 m de profundidad reflejan en general el proceso dinamico de una traslación (shift) del cauce principal (semi)continua en direccion sur.
- 2) Dos tramos con arcillas limosas, ubicados a ambos lados del cauce colmatado actual. Se trata de zonas de bañados y cañadas actuales, con subsuelos que reflejan las llanuras de inundación antiguas.

- 3) La zona del cauce colmatado actual. Por encima hay el reflejo de la ultima fase del colmatacion con material en suspencion; limo, arcilla mas bajo. A profundidades > 3m el suelo contiene mas arena fina (carga de fondo).

#### Estabilidad del terraplén .

Se trata aqui de los suelos a utilizar para la construccion de un terraplén. La dimension está ya por definir en relacion con la topografia detallada. Como descrito anteriormente el asentamiento general no formará el problema. La estabilidad de un dique es una función del sifonaje, la erosion de los taludes y la cresta y: en el subsuelo el asentamiento parcial.

Dentro del diseño de un terraplén, materiales locales deberá ser incluido. Cuales de los áreas, mencionadas en el subcapitulo "Prestamos", se puede indicar ahora solamente la experiencia general. Los limites Atterberg, a donde se refiere casi siempre deberán utilizados con much cuidado; se trata de ensayos de laboratorio disturbados y moldeadas. También los ensayos de Proctor (modificado) no son mas que indicaciones para la compactacion con humedad optima. El uso del terraplén implicará la aplicacion de un nucleo con filtro de base para dirigir las aguas de sifonaje (flownet). Los figuras 4.8 a 4.10 muestran resultados tipicos de la campaña de materiales de prestamo.

Los ensayos de la campaña de prestamos, ya analisados en el laboratorio indiquen lo siguiente:

- 1) No se puede utilizar los suelos del tramo 1; limos y limos con trazas de arcilla. Estos suelos limosos con bajo plasticidad no son bien compactables, y son demasiado sensible a pequeños cambios de humedad.
- 2) El nucleo del dique se puede construir con suelos del tramo 2. Estos suelos tienen la ventaja de que se ubican cerca de la ubicacion prevista del futuro terraplén. La utilizacion de suelos plasticos con  $LL > 40\%$ , (suelos CH tienen un  $LL > 50\%$  en la clasificacion de UCS) tienen la ventaja de que, aparte de la permeabilidad, mejor resistencia a la formacion de grietas (fisuras) por tensiones ("cracking").
- 3) El material de relleno puede ser una mezcla de material proviniendo de tramo 2 y 3. El talud mínimo con estos materiales deberá ser mas que 1:2, casi 95% del material es más fina que el tamiz 200 de ASTM (0.074 mm). La compactación máxima no garantizará estabilidad suficiente para rotura o extension por su cambio critico de humedad y la erosion superficial, eso es también una función de la geología del subsuelo. Los resultados de los ensayos triaxial son necesarios para indicar los valores de "c" y  $\phi$ . La aplicacion de cemento (10 - 15% en peso) del para su estabilizacion es una posibilidad, pero costoso, y entonces solamente a utilizar en casos extremos. La investigacion de las arcillas existentes en el área muestró que la fraccion de esmectita dentro la parte arcillosa está en general de 25%. Esmectita comprende al grupo de minerales de arcilla expansivas y plásticos (grupo montmorillonita y otros). Es también porqué el uso de cemento (reacciones químicas) deberá ser considerado con mucho cuidado.

#### **4.4 PROTECCION DE LOS PUNTOS CRITICOS Y OTROS MARGENES DEL RIO PILCOMAYO**

Durante la primera parte de la mision en junio del año 1995 el punto crítico identificado anteriormente (1993 y 1994) fue visitado. Como descrito antes, el río se movio dentro

su lecho ancho y aparentemente no formó un peligro de salir de su cauce. En este momento el flujo principal esta alejado de la barranca (ver foto 4.1). Sin embargo, si en caso que la sedimentación del lecho del río progresa hacia aguas arriba, la morfología fluvial cambiará de igual manera como en la cuenca baja. Es decir que en caso que no se frena la colmatación del lecho posiblemente el río salgará al lado Argentino por la situación favorable del pendiente. De todos modos es necesario de iniciar el trabajo de topografía y en conjunto con los fotografías aéreas determinar los puntos más sensibles a correr el riesgo de ser erosionado hacia un cauce diferente.

#### Protección de las áreas de inundación de las orillas

Para anticipar este peligro se sugiere de establecer un área "negra" en lo cual no se permite la construcción de caminos, casas y la agricultura. En este momento algunas pueblos están ubicados al lado del río como ser: Misión La Paz, Pedro P. Peña y Santa Victoria. Será necesario de empezar una campaña de concientización de los pueblos para que ellos mismos guardarán que los márgenes del río sean respetados. Además existen líneas de investigación de las empresas petroleras que en algunos otros casos ya han guiado el agua. Por ende es importante hacer el levantamiento de estas brechas para luego cerrar lo con vegetación y/o con terraplenes para frenar el drenaje superficial agua pluvial y fluvial (desbordes).

#### Protección de las margenes

En los puntos a la altura de Santa Victoria y Pedro P. Peña obras de protección fueron construidas. En Santa Victoria consiste de un dique protector y en Pedro P. Peña cuatro espigones.

En ambos casos el flujo durante las aguas medias fue direccionado casi perpendicular hacia la barranca. Con los fotos se puede indentificar áreas de ajuste aguas arriba de estos puntos para cambiar el flujo mas favorable en relación con su angulo de impacto a la barranca. Estos ajustes pueden ser efectuados por medio de una limpieza u/e excavaciones ligeras para que las aguas bajas tienen una dirección diferente.

En caso de la protección con un dique contra las inundaciones, como a la altura de Santa Victoria, sin una protección del margen es muy probable que el dique será socavado antes que el agua sobrepasa la barranca.

Al momento de la inspección el dique existente se encuentra varios carcavas. Estas carcavas deben ser rellenadas para evitar una concentración del flujo al momento que las aguas sobre pasan la orilla.

Cuatro espigones fueron construidos para la protección la barranca a la altura de Pedro P. Peña. El impacto del flujo puede ser orientada en una manera más suave, por una limpieza (o ligera excavación) aguas arriba. Además el numero de espigones puede ser ampliada hacia aguas arriba. Al momento que el río tiene una curvatura más suave se puede construir un envolvente conectando los espigones.

## 5. SEDIMENTOLOGIA DEL SISTEMA FLUVIAL DEL RIO PILCOMAYO

### 5.1 GENERALIDADES

#### *Cuenca Alta.*

Para explicación más amplia de las epígrafes descritos abajo se refiere al informe de misión técnica de la Comisión de la Unión Europea de febrero 1995. Los temas más importantes son repetidos y elaborados aquí. La Cordillera boliviana es el área fuente mayor de los sedimentos que son transportados en el Chaco. El relieve alto y las pendientes fuertes favorecen la erosión de barrancos profundos en capas Devónicas, Pérmicas, Cretácicas y Terciarias. Las capas típicas son de areniscas y arcillitas. Las subordinadas son tillitas (Pérmico), calizas y areniscas calcáreas (Cretácico) y conglomerados (Cretácico y Terciario superior hasta Cuaternario). Los conglomerados Cuaternarios fueron depositados en cauces precursores del Río Pilcomayo actual. La parte oriental del Cordillera tiene una estructura de anticlinales paralelas, los cuales favorecen una erosión fluvial. Se observó que los sedimentos en la Cuenca Alta están mal cementados, estando sujetos a una erosión intensiva. La escasa cobertura vegetal ayuda a este proceso. La erosión ocurre sobre todo durante las inundaciones o crecidas (Diciembre a Marzo). En la base de la Cuenca Alta (cerca de Villamontes) la granulometría media del lecho del río es de arena media (0.250 - 0.500 mm), aunque existen sedimentos de tamaño de grano más grueso. Las gravas proceden también de los conglomerados de la Cuenca Alta y de las terrazas fluviales locales Cuaternarias. Estos aspectos serán tratados más en detalle en la misión Trinacional, también iniciado por la Comisión de la Unión Europea que comenzará en 1996.

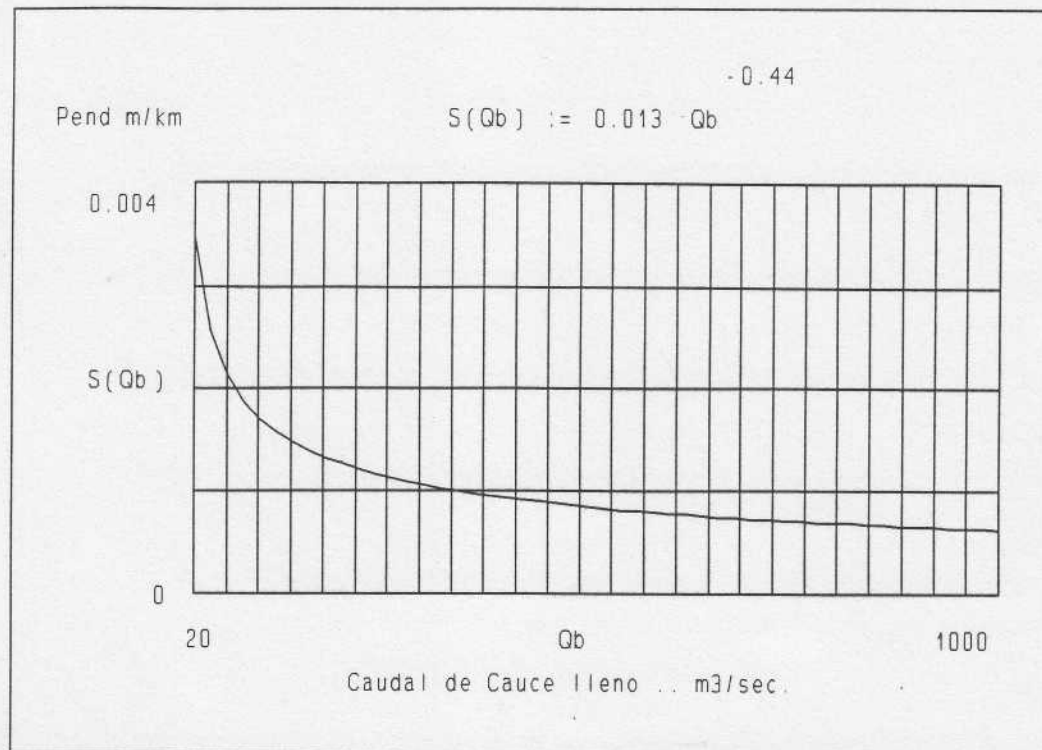
#### *Cuenca Chaqueña*

En la base de la Cuenca Alta, donde el Río Pilcomayo entra en el valle Chaqueño, situado al Este de la Pre-Cordillera, las pendientes disminuyen rápidamente. La anchura del río aumenta y pasa de una geometría típicamente montañosa a una geometría anastomosada (es decir "braided", usando la terminología sedimentológica). La pendiente media en la sección anastomosada, aguas abajo de Ybybobo es de unos 1.1 m/km. El río anastomosado está caracterizado por agua que fluye alrededor de barras de arena. Estas barras están emergidas durante épocas de caudales bajos y submergidas durante las crecidas. La granulometría media es de arena fina a media. La dispersión de los sedimentos es mediana (p.e., los sedimentos presentan una variación significativa de la granulometría)

Aproximadamente unos 20 km aguas arriba del Punto Trifinio (y entonces a 85 kilómetros del taponamiento actual), la geometría del río cambia de anastomosada a meandriforme. La pendiente media en la sección meandriforme es de unos 0.35 m/km. Los ríos meandriformes se caracterizan por su sinuosidad, la proporción entre la distancia a lo largo del lecho del río y la distancia más corta, ambas medidas entre dos puntos de inflexión consecutivos. La sinuosidad del Río Pilcomayo, medida sobre la imagen de satélite varía entre 1 y 3.33. La sinuosidad media es de 1.50 a 0.45. No se ha encontrado tendencia a la sinuosidad a lo largo del curso del río. Empíricamente se ha distinguido entre los cauces anastomosados y meandriformes en términos de pendiente y caudal con la fórmula:

$$S = 0.013 Q_b^{-0.44}$$

$Q_b$  es el caudal de cauce lleno en  $m^3/s$ ;  $S$  es el pendiente (valor del tangente). El grafico abajo muestra que, con la pendiente de 0.00038 (38 cm/km), el río siempre está meandriforme. Con una pendiente de 0.001, como en la zona de Ybibobo hacia Santa Maria, el caudal donde cambiará el río de anastomosado a meandriforme será en el orden de  $300 m^3/sec$ .



La granulometría en el cauce actual no colmatado muestra arena fina. La misma granulometría se ha encontrado en el comienzo actual de la colmatación. Sobre los albardones se ha depositado limo arenoso. Las llanuras de inundación contienen limos arcillosos y arcillas.

### 5.1.1 El cauce principal.

Problemas, c.q. factores importantes que determinan el funcionamiento del Sistema de Control son el caudal líquido y el aporte sólido, la topografía y fluviomorfología del valle actual del Río Pilcomayo. Se observa en general que el Río Pilcomayo meandriforme desde 1987 formaba un valle con un largo de 50 km y con un ancho mínimo de 10 km. Este ancho incluye el cauce principal y sus llanuras de inundación (bañados) donde emergen quebradas hacia aguas abajo.

En general el proceso completo de la colmatación de un tramo del cauce dura dos años, depende de la crecida. El primer año una capa de 1 a 1.5 m es depositado con un largo estimado de 5 hasta 8 kilómetros. El año siguiente, todo depende de la crecida, una

segunda capa de 1 m esta depositada, dentro los albardones adyacentes. Así la acumulación de los sedimentos causa la sobreelevación del fondo del lecho; el fenómeno queda evidenciado por la altura que alcanza en algunos lugares, el fondo del lecho y que está por encima del nivel del terreno natural adyacente. Mas aguas arriba los márgenes se rompen durante la crecida causando la divagación del agua con nuevos escurrimientos; los desbordes. Este desbordes tiene una forma abánico. El ápice de desborde se ubica a una distancia aguas arriba del taponamiento, la distancia siendo en relacion directo con el caudal. En los últimos años el ápice se ubicó a unos 15 km aguas arriba del taponamiento. Con la crecida muchos troncos de la especie "Alisos" quedan sepultados en las márgenes (y alvardones), bloqueando las entradas naturales en el área del desborde. En el comienzo de la proxima crecida las aguas buscarán nuevas entradas por su escurrimiento superficial.

La ubicación del *ápice de desborde* depende entonces por su mayor parte del caudal y la posición del taponamiento. Eso es muy importante para la estimación de los trabajos de mantenimiento de los canales de entrada, las posible nuevas canales de entrada y los trabajos de limpieza de las entradas naturales de desborde.

### 5.1.2 Las llanuras de inundación

La mayor parte del sedimento en suspensión (limo y arcilla) esta depositada en las llanuras de inundación. Con el retroceso del Río Pilcomayo y entonces con el desplazamiento de la zona de divagación, la zona de almacenamiento de estos sedimentos se desplazará en dirección aguas arriba. Esta zona tiene un carácter inestable; en la época de crecida el agua que desborda y alimentará una serie de esteros y bañados. La localización de los esteros y bañados, que se rellenarán durante las crecidas, también se desplazará de la misma manera que la zona de obstrucción del río. La zona de La Dorada, donde se encuentra el taponamiento actual, no está caracterizada por grandes esteros y bañados conectados como en la zona entre Fortín Pilcomayo y Salto Palmar; Estero Patiño (Paraguay) y Bañado La Estrella (Argentina). Dichas zonas funcionaban como grandes receptores de aguas y sedimentos. ¿Qué pasa entonces (ahora) con la sedimentación? Los imágenes de satélite de los años 1986, 1989 y 1994 muestran claramente la búsqueda de nuevas receptores de caudales. El valle del Río Pilcomayo en este tramo se amplió, formando nuevos bañados en zonas relativamente bajas y erosionando las laderas de la zona "alta" a ambos lados.

Después de la construcción de los canales de desvío ambos países recibieron sedimentos en la zona de su canal. Antes que el canal de entrada paraguayo existía, el canal de desvío argentino funcionaba como terminal del Río Pilcomayo y recibió un mayor cantidad de sedimentos resultando en su taponamiento y desplazamiento lateral de la quebrada natural al la salida del canal. Con la presencia del canal paraguayo se logró un mejor división en la sedimentación. Ambos canales y sus quebradas sufrieron sedimentación y los desbordes causaban una capa de sedimentos a ambos lados.

#### Geometría de las inundaciones en el valle del Río Pilcomayo desde 1989 y aspectos geomorfológicas en general.

Basándose sobre las imágenes de satélite se puede distinguir otros aspectos importantes, con relación con, la "erosión"/inundación de valles antiguas y los efectos de las crecidas recientes. Utilizando los imágenes de satélite de los años 1976, 1989 y 1994 se ha observado la progresión, dirección aguas arriba, de la ampliación del valle del Río

Pilcomayo. También se observó un fenómeno biofísico, que permitió de definir erosión por escurrimiento y otro aspecto ambiental. Los imágenes de satélite de colores falsas de 1989 y 1994 son procesadas con las bandas espectrales de 2,4 y 7; el de 1976 en las bandas 1,2 y 4. La numeración de los imágenes de satélite de 1989 y 1994 esta en la zona (Landsat 4/5) con "orbita (path) 229 y fila (row) 76. Entonces por la diferencia en las bandas la comparación entre los 3 imágenes debe ser hecho con cuidado, no obstante permitiendo obtener en general la información sobre cambios de ríos, quebradas y cobertura vegetal.

#### Interpretación de los colores falsos.

La información multispectral es difícil a interpretar sin visitar el campo, y además después una visita quedan muchas variables a analizar. El problema es la densidad y tipo de vegetación, la calidad de las aguas y el tipo de suelos. La combinación de todos los factores mencionados, es reflejado en el imagen. El imagen de 1994 tiene las bandas 2,4,7 (con dos frecuencias en la banda infrarrojo y un llave de distribución no conocido) han asignado respectivamente los colores azul, verde y rojo. Así en este imagen mucha cobertura vegetal tienen colores de rosada vía rojo hasta verde. La intensidad de la cobertura es reflejado en el color (falsa), y entonces una cobertura de plantas acuáticas por ejemplo es reproducido por un color rojo vivo (chillón). Los alisos son reflejados por una color verde vivo, con poco azul. Alisos de 3 años de edad o mas por verde con mas azul que alisos de menor edad. Áreas de inundación con árboles muertos, sin hojas, por un combinación de rojo y marrón; áreas con una cobertura vegetal densa por verde, y cobertura intermedio rojo hasta marrón; áreas con escurrimiento por rosado y blanco, y verde. La sedimentación en las áreas adyacentes que queda después una crecida es muy difícil a reconocer, en general tiene un color verde cuando la capa es seco, y con mas humedad mas rojo, debido a los árboles ya no muertos.

#### Geometría de las inundaciones en el valle del Río Pilcomayo desde 1989

Comparando las imágenes de satélite de 1989 y 1994 hay varios fenómenos importantes observados.

El valle del río ha sido ensanchado. El retroceso durante este período sumaba unos 25 km medido en línea recta. La erosión vegetal y superficial, es decir: muerte y cambio de cobertura vegetal por inundación, cambio de quebradas y sedimentación, fue medido. Para esto la zona fue dividido en cuatro subzonas, dos en Paraguay y dos en Argentina. En Paraguay mas o menos al este y oeste de la ubicación de la estancia La Dorada, en Argentina al este y oeste del fin del Cañada la Hacha. Se observó el siguiente:

Paraguay: Al este de La Dorada: (long.) 8.5 \* (ancho) 3.6 km = 30 km<sup>2</sup>  
 Al oeste de La Dorada: (long.) 9.0 \* (ancho) 2.0 km = 18 km<sup>2</sup>

Argentina: Al este de Q. La Hacha: (long.) 11 \* (ancho) 3.0 km = 33 km<sup>2</sup>  
 Al oeste de Q. La Hacha: (long.) 10 \* (ancho) 4.0 km = 40 km<sup>2</sup>

Esto significa un erosión promedio (vegetal)/inundación (seguida por sedimentación local) de 4.9 km<sup>2</sup>/km <sup>de retroceso</sup>. No obstante la mayoría de los árboles respiran por sus raíces, se puedan aguantar 3 meses de inundación, pero no mucho mas. Entonces con el retroceso quedan pantanos, secos y con agua, sin árboles. Áreas sin árboles tienen mas evaporación y entonces quizás también suelos mas salinos. La ultima observación tiene importancia para trazar cauces antiguas del Río Pilcomayo y quebradas importantes. Aparentemente en las cauces antiguas es muy difícil para árboles de crecer de nuevo, una vez que el río abandonó su curso.

Entonces el estudio físico ambiental (forestal), ya hecho, es muy importante y ayudó y ayudará con el análisis de la erosión y sedimentación.

### 5.1.3 Estudios sedimentológicos realizados y a realizar

El conocimiento (pronóstico) de las cantidades de sedimentos (referente a la carga de fondo y a la carga en suspensión) y del área de recepción en relación con los canales de entrada, es fundamental para garantizar una vida útil del Sistema de Control. Así se puede desarrollar un marco lógico, incluyendo la ubicación de futuros canales de entrada para la dirección de las aguas hacia su áreas de sedimentación (bañados), las obras de mantenimiento (desmonte, excavación de nuevos canales y limpieza de canales existentes) y la protección de poblaciones contra las inundaciones. En este sentido los estudios del anteproyecto de la Sistema de Control deberán enfocarse sobre la topografía existente (en relación con la geomorfología), la sedimentología, y la metodología de las obras a ejecutar para canales de entrada (nuevas y existentes). Con la ayuda de las fotografías aéreas y mas datos topográficos, que casi estan disponibles, este análisis puede ser elaborado.

## 5.2 LOS CAUDALES LIQUIDOS Y SOLIDOS

La información actual sobre los caudales provienen de los datos de dos estaciones:

1. Villamontes, en la base de la Cuenca Alta. Las mediciones de los caudales fueron realizadas desde 1941/42, pero no continuamente

La mayor parte de la información sobre los caudales del Río Pilcomayo proviene del Misión "La Paz" en Argentina, cercano al límite entre los tres países.

2. Esta estación de aforo esta situada en la sección meandriforme de la Cuenca Baja, 180 km aguas abajo de Villamontes. Las mediciones de los caudales fueron realizadas entre 1960/61 y ahora. Los datos sobre los volúmenes de sedimentos en suspensión disponibles abarcan un período desde 1967/68 hasta hoy.
3. Tambien se dispone de los datos de la estación de aforo Fortín Pilcomayo, en la sección colmatada, 220 km aguas abajo de Misión La Paz. Las mediciones útiles de los caudales fueron realizadas entre 1950/51 y 1966/67 en que el río se colmató. Las mediciones del transporte sólido abarcan desde 1953/54 hasta 1966/67 (con excepción de 1962/63).

Se tiene que tomar en cuenta que correlacionar los datos de Villamontes y Misión La Paz es poco difícil; por razones de no conocer bien la geometría variable del cauce en Villamontes (curvas caudal-altura) no se puede relacionar directamente los niveles de agua (en epocas de crecida) de esta ciudad con caudales en Misión La Paz.

### Caudal líquido

Los caudales líquidos, medidos en Misión La Paz:

El caudal medio plurianual (1961/1994) es 270 m<sup>3</sup>/s

El caudal medio plurimensual de marzo (1960/1994) es 550 m<sup>3</sup>/s

El caudal maximo medio diario de crecidas (1986/1994) varía entre 750 m<sup>3</sup>/s y 3000 m<sup>3</sup>/s; en 1984 alcanzó hasta 4000 m<sup>3</sup>/s.

### Aporte sólido.

En Villamontes, el Río Pilcomayo transporta un volumen medio de 80-100 millones de toneladas de sedimento cada año (según Guyot y otros, 1990 y Bouloc, 1991). En Misión La Paz el volumen anual varía entre los 27 millones de toneladas (1982-1983) y los 288 millones de toneladas (1983-1984, crecida excepcional). El volumen medio es de 125 millones de toneladas por año. En Fortín Pilcomayo el volumen medio era de 69 millones de toneladas por año, o sea un 55% del de Misión La Paz (aproximadamente un 60% en años idénticos). El volumen anual varía entre los 19 millones de toneladas (1964/65) y los 142 millones de toneladas. El 80 % del volumen anual pasa por Misión La Paz durante la crecida (Diciembre - Marzo). El transporte de la carga de fondo es menos que el transporte de la carga en suspensión en el Río Pilcomayo, ya que no aparecen grandes formas de lecho en sedimentos finos. Guyot y otros (1990) apreciaron que solamente un 10% de la carga total esta constituida por carga de fondo.

Estos valores dan un idea de la cantidad de sedimentos en suspensión, pero son generalizados, y quizás exagerados. Ya sabemos que cuando comparamos el caudal líquido con la carga en suspensión y la concentración de los sedimentos en el perfil vertical, hay una diferencia en tiempo. Es característico que dentro la parte medio del río los caudales sólidos máximos y concentración de sólidos máxima se presentan antes del caudal líquido máximo. También debemos considerar que el caudal sólido a caudal líquido no es proporcional a la velocidad del flujo (pero elevado a la tercia - quinta potencia). Entonces, graphicar el caudal líquido con caudal sólido mostrará grandes dispersiones y debe ser considerado dudoso.

Se ha tratado de analizar la velocidad/caudal crítica, con cual el fondo del río inicia moverse. Este analisis es difícil, y en este momento solamente se determinó la velocidad crítico. Figura 5.2.1 muestra que en la sección de Misión La Paz, la velocidad crítica está en el orden de 2.9 m/sec. Arriba de este valor es casi seguro que el nivel del río subirá. Este análisis es complejo; también el informe Ruso de 1993 ha mencionado un relacion logarítmico entre profundidad de cauce y caudal (véase figura 5.2.2 y 5.2.4). La figura 5.2.3 muestra que la subida del nivel es una función del caudal diario inicial, el caudal diferencial (el aumento diario del caudal) y la escala (nivel) diario inicial. Con mas registros exactos del estación de aforo es posible de deducir el momento (en terminos de aumento de caudal diario y cambio de nivel) donde el fondo del cauce se moverá. Sin embargo la condición es, que se debe conocer la sección inicial del río.

## 5.3 LA SEDIMENTACION Y EL ANALISIS DE FACTIBILIDAD DEL SISTEMA DE CONTROL

### 5.3.1 Introduccion

La evaluación de la sedimentación ocurrida durante las ultimas crecidas comprende los siguientes items:

- 1) Localización de:
  - a) Apice de desborde.
  - b) Entradas naturales

2) Cuantificación de:

- a) Áreas de sedimentación (llanuras de inundación)
- b) Sedimentación de canales existentes.

Justamente en el momento de preparar el presente informe se han volado la aerofotografía, la cual está indispensable para el análisis detallado de la localización de los sedimentos y la ubicación de canales de entrada futuros. La sedimentación es un factor sumamente importante en las obras futuras de mantenimiento del Sistema de Control. Algu parte ya está analizado durante las visitas del campo, pero la disponibilidad de las aerofotografías y de la topografía completará este estudio. No solo la distribución equitativa de las aguas es importante, sino también la atenuación del retroceso del cauce principal. El item 1) es descrito abajo, el item 2) en los epígrafes 5.1.3 y 5.4.1.

### 5.3.2 El atenuación del retroceso del cauce principal

Ad 1.a): Apice de desborde:

Como determinada en diciembre del año 1994, este punto también se observó con la presente visita. El ápice de desborde, es decir: el punto, situado en dirección lo mas aguas arriba de taponamiento, donde el río se desbordó durante la crecida, se ubica mas o menos en el mismo lugar que el año anterior. La ubicación del ápice de desborde depende de los siguiente factores y sus combinaciones:

- 1) Caudal de cauce lleno (liquido) y contenido solido en combinación con:
- 2) La distancia del taponamiento, o el cambio de la geometría del cauce y,
- 3) por un menor parte; el pendiente general del río.

El hecho que el ápice de desborde se ubica casi en el mismo lugar que el año anterior significa lo siguiente:

a) Cuando el caudal liquido máximo tuvo lo mismo que el del año anterior, y también la posición del taponamiento del Río Pilcomayo mismo no ha cambiado después la ultima crecida, la geometría de la zona de divagación en total es determinada. Eso debe explicado en mas detalle.

- El río "siente" a un distancia determinada dirección aguas arriba que hay un cambio en el "bankfull discharge" (caudal de cauce lleno). Este depende de algunas factores, entre otros: pendiente y sinuosidad, caudal solido y sección del cauce. También depende de la forma del taponamiento, es decir cantidad y geometría de los canales y cañadas desembocantes. Aparentemente los factores mencionadas fueron comparables durante las ultimas 2 crecidas. Este información significa que las aguas fueron detenidos (formando un aflujo/remanso en el cauce) y así con tiempo el punto, dirección lo mas aguas arriba, del desborde (ápice de desborde) fue alcanzado.

Entonces, la extensión de las capas de sedimentos de los últimos crecidas una vez determinado, podrá dar un idea sobre la relación de caudal liquido y solido en la fase de sedimentación.

La factibilidad del Sistema de Control dependerá entonces por una mayor parte de la cooperación de ambos países ribereños en las decisiones anuales a tomar para el mantenimiento de canales existentes y la preparación de nuevos canales de entrada. La

adquisición de maquinaria, apta para mantener canales y excavar nuevas entradas es también de suma importancia para la atenuación del retroceso. Se trata de obras de excavación tanto aguas abajo como aguas arriba del taponamiento actual.

## 5.4 LOS CANALES DE ENTRADA

### 5.4.1 La vida útil de los canales de entrada existentes.

Con lancha y helicóptero los áreas de sedimentación fueron visitados, que resultaba en una estimación de la capa de sedimentación existente.

En el lado Paraguayo la sedimentación de la última crecida se extendió en la zona del limpieza vegetal con 3 kilómetros más, dirección aguas abajo, que la de la crecida '93/'94; la penúltima. La capa observado aguas abajo del canal Paraguayo, es decir en la zona del solo limpieza varió al lado del solo limpieza vegetal de 12 km de largo varió de 40 cm a 0. El Canal Auxiliar de 1600 m de largo, 25 m de ancho y 1.7 m de profundidad inicial y un limpieza vegetal de 100 m se colmató con una capa con un espesor promedio de 60 cm. La razón es un posible remanso en la conexión entre el Canal propio y el auxiliar, provocando el sedimentación en este punto, después de que el canal auxiliar se colmató completamente.

La sedimentación lateral en la sección del canal paraguayo (5 km aguas abajo del mencionada es supuesto de no pasar los 2 kilómetros. Durante la crecida el área de la pista de aterrizaje de La Estancia La Dorada tenía una capa de agua de máximo 50 cm. Después la crecida quedó una capa de 6 a 10 centímetros de arcilla limosa. Este fenómeno muestra que el contenido sólido en suspensión es bastante. También hemos observado el ingreso fuerte de aguas por un canal artificial, hecho por la traslación del "Kori" (excavadora anfibia) que corre de La Dorada vía la Laguna El Corchal hacia el canal Paraguayo. Este canal puede provocar sequía en el canal Paraguayo durante aguas muy bajas (mínimas). Se propone la cierre de este canal no solo por las aguas mínimas, sino por el peligro de erosión y extensión del área de inundación.

En el lado Argentino la sedimentación casi solamente ocurrió en el Canal Argentino. La sedimentación llenó el canal existente, y una vez llenado no permitió más el ingreso de aguas ni de sedimentos. Durante la crecida un escurrimiento/incisión del antiguo cauce del Río Pilcomayo fue acompañado con aguas entrando en una entrada natural a 2 km aguas abajo del taponamiento. El idea es de utilizar este entrada como canal de ingreso para la crecida siguiente, y así esforzar la sedimentación en una dirección aguas abajo del taponamiento.

Esto implicará un trabajo de limpieza (de bastante tamaño) en la zona de la entrada natural.

#### Implicaciones por el año (la crecida) que viene.

La situación actual, con el canal Paraguayo funcionando como entrada principal del Río Pilcomayo provocará su sedimentación, parcial o completa, si el lado Argentino no tendrá otra entrada limpia. La ubicación del canal de entrada Argentino a dos kilómetros aguas abajo del taponamiento y entonces a la misma distancia aguas abajo de la entrada Paraguaya existente provocará una sedimentación inicial de la entrada del canal paraguayo. Su canal auxiliar deberá ser excavado, para garantizar el ingreso continuo de las aguas de crecida. Si Argentina no cumplirá sus tareas, el canal natural, ubicada a dos kilómetros aguas arriba del taponamiento, funcionará como entrada principal, provocan-

do una sedimentación en el área del ex-Santa Teresa y el bañado el Chorro.

#### **5.4.2 Evaluación de los futuros canales de entradas.**

La determinación, tanto su posición como la dimensión de los canales de entrada es un objeto muy complejo. Se trata de muchos factores que determinarán la desviación necesaria de partes del flujo de agua dentro del sistema fluvial. Dentro de los factores importantes se hallan:

##### **A: Factores topográficos:**

- 1) Topografía general de los mayores elementos del valle del Río Pilcomayo Superior (tramo de Villamontes hacia Salto Palmar/Fortín Pilcomayo).
- 2) Topografía detallada de la zona del Sistema de Control incluyendo:
- 3) Posición de bañados existentes y zonas relativamente bajas y,
- 4) Ubicación/posición de cañadas no colmatadas y,
- 5) Posición de entradas naturales.

##### **B: Factores hidráulicos, (geo)hidrológicos y vegetales:**

- 1) Los caudales sólidos y líquidos.
- 2) La erosión y colmatación.
- 3) El escurrimiento, la intensidad pluvial y la (evapo)transpiración.
- 4) La vegetación existente y futura.

##### **C: Factores de construcción:**

- 1) Excavaciones y/o limpieza vegetal dentro del valle del Río Pilcomayo Superior.
- 2) La protección de puntos críticos y laderas inestables.

Abajo algunos factores son descritos más en detalle, cuando tienen mayor importancia para los canales de entrada del Sistema de Control.

##### **Ad A1): Topografía general.**

La topografía general es necesario para conocer la tendencia general en el valle actual del Río Pilcomayo. La parte importante ahora para los canales de entrada es la zona de Pedro P. Peña hacia San Antonio/Surubi, un tramo de 65 kilómetros. Ya sabemos que la parte Argentina es más bajo que la parte Paraguaya, pero en este momento faltan algunos cortes topográficos. La dirección y longitud de los canales de entrada depende de la topografía general. La relación entre el caudal líquido (y sólido) y la pendiente general es claro y determinará la geometría del canal de entrada a excavar/limpiar/modificar (inclusive el canal hidroequilibrante, que también puede ser considerado como canal de entrada, aún su función está un poco diferente).

##### **Ad A2): Topografía detallada.**

La ubicación y geometría relativa de futuros receptores de agua y sedimentos es de suma importancia. Se trata aquí de niveles diferenciales de 0,5 m o menos.

##### **Ad A5): Posición de entradas naturales**

La disponibilidad de aerofotografías es indispensable para la elaboración de este tema. Por una breve descripción se refiere al informe de febrero 1995.

## 5.5 CONSIDERACIONES DE LA VIDA UTIL DEL SISTEMA DE CONTROL

Este párrafo ya está descrito en el informe de febrero 1995. Para su actualización se necesita las aerofotografías, que están en este momento en el primer proceso de desarrollo. No obstante las imágenes de satélite han demostrado que la vida útil del Sistema de Control dependerá por la mayor parte de las decisiones anuales de la Comisión Binacional sobre el mantenimiento anual y la coordinación en la determinación de las nuevas canales de entrada. Muchos datos y experiencia ya existen, que facilitan las decisiones futuras.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al momento de la elaboración de este informe la información de la zona, como topografía, hidrogeología, geología, geo-morfología, hidrología y hidráulica para un diseño final para las estructuras y medidas que abarcan el rango total de los caudales es limitada. Para entender los flujos dentro del sistema es necesario analizar los datos de la cuenca del río Pilcomayo en su conjunto. La recopilación de los mismos puede ser abarcada dentro de un plan maestro/director, en todos sus aspectos: técnicos, ecológicos y socio-económicos.

Dentro del diseño del ante-proyecto la división de las aguas mínimas y medias han sido tratadas. Sin embargo las aguas máximas forman un aspecto muy importante dentro la repartición de las aguas y además tienen efecto sobre un área más grande. Las obras planteadas dentro el esquema descrito pueden ser influenciadas por crecidas de gran magnitud. La posibilidad de que las aguas de crecidas salgan del cauce aguas arriba del recinto del área de influencia de las obras de control y tomen la pendiente más favorable es sólo una de las posibilidades. Dentro los bañados puede ocurrir erosión al lado paraguayo o argentino del cauce colmatado durante un caudal grande.

Para el diseño de las obras a manera de conseguir una división de las aguas mínimas y medias se partió de la idea que las aguas máximas sean repartidas por varios hidroequilibrantes lo más cerca posible a la partición del caudal en el punto de colmatación del río. Su división en este momento es muy incierto por varias razones.

Desde el momento del proyecto elaborado en el año 1994, se dispone de información topográfica de la traza identificada y del punto donde las aguas salen del cauce principal del río. En base de esta información adicional se puede observar que tenemos generalmente una diferencia de altura entre los dos países de aproximadamente 2 metros. Es decir que la parte del valle al lado Paraguayo es dos metros más alto que la parte del valle al lado Argentino. Esta diferencia de altura hace difícil distribuir las aguas mínimas, medias y máximas sin la construcción de una presa con más altura que previsto anteriormente.

Las aguas mínimas y medias tienen un flujo a través bañados y cañadas en ambos países. Sin embargo las aguas altas cubren un área más amplia en el recinto del valle entre el cauce colmatado y las alturas al lado norte y sur del río colmatado. En este momento no tenemos datos sobre la distribución de los caudales y la topografía del valle aguas abajo del punto de colmatación y por lo tanto no es aconsejable dar una solución para la distribución de todo el rango de los caudales. Por ende se sugiere elaborar obras de control en dos etapas. La primera etapa es distribuir aguas mínimas y medias y la

segunda etapa es para distribuir las aguas altas.

Teniendo en cuenta que se pretende aprovechar lo máximo posible del comportamiento hidráulico natural de los bañados y cañadas, se considera conveniente modificar las obras anteriormente proyectadas (1994), de la siguiente manera:

*Realizar una única obra de control para aguas mínimas y medias ubicada dentro del área de drenaje natural de las mismas.*

*Ambas obras de control estarán interconectadas por un canal hidroequilibrante que funcionará sólo para este nivel de caudales (aguas mínimas y medias).*

*Las aguas máximas no tendrán en esta fase una estructura de control.*

*El terraplén previsto en el diseño anterior será substituido por un camino de acceso que preverá un tramo del mismo para el paso de las aguas máximas, alejado de las obras anteriormente mencionadas (ver figura 4.1).*

Se llega a los siguiente criterios generales para cada país:

- Una estructura con compuertas para las aguas mínimas (hasta 25 - 30 m<sup>3</sup>/s)
- un vertedero ubicado al lado de la obra anterior, para las aguas medias (hasta 150 - 200 m<sup>3</sup>/s)
- la regulación de estos caudales (hasta 200 m<sup>3</sup>/s) se hará con el auxilio de compuertas.
- las obras para los caudales máximos deben ser planificadas separadamente de las obras para aguas mínimas y medias, puesto que las mismas requieren un mayor conocimiento del comportamiento del recinto como topografía, efecto de laminación, distribución entre ambos países, posibles lugares de fuga, etc.
- las vías de acceso a las obras de aguas mínimas y medias se planificarán cruzando el valle aprovechando las alturas naturales lo máximo posible, tomando en cuenta que serán atravesadas por las aguas máximas. Las vías de acceso se construirán sin revestimiento y utilizando en lo posible el suelo del lugar y compactando con las máquinas de construcción. Las mismas servirán de terraplenes de prueba.
- incluir una compuerta dentro del canal hidroequilibrante para poder cerrar el canal durante aguas máximas, para evitar la erosión del canal.
- es imprescindible realizar el monitoreo durante el período de crecidas del año hidrológico 1995/96.

Para elaborar un diseño final para la primera etapa se requiere mas topografía, una investigación geotécnica detallada en el área de las estructuras proyectadas y el análisis detallado en todo la zona del Sistema de Control de la geomorfología inclusive la sedimentología.

La distribución equitativa de las aguas máximas está condicionada asimismo por un estudio integral de todo el tramo del río desde Villamontes, a fin de ubicar con precisión los puntos de desborde existentes (puntos criticos) en el mismo y diseñar en consecuencia las obras de protección.

El análisis de los fotografías aéreas deberá ser ejecutado, a fin de hacer propuestas básicas por la mejor ubicación actual y futura de los canales de entrada y los receptores de sedimentos en la zona del taponamiento, teniendo en cuenta un retroceso, quizás atenuado, pero inevitable, del Río Pilcomayo.

**APÉNDICE A**

### **Personalidades importantes encontradas:**

Por la Republica Argentina:

- Embajador Saracho, presidente de la Comisión Trinacional.
- Ing. Perelda, ingeniero adjunto.
- Ing. H. Zambón, director nacional de la Comisión Nacional.

Por la Republica del Paraguay:

- Ing. Luís A. Meyer, director nacional de la Comisión Nacional.
- Ing. Oscar Camé, ingeniero residente.
- Ing. Maria de Carmen Alvarez. Ingeniera adjunta.

Por la Union Europea:

- Mr. Joel Fessaguet, Jefe de la delegación de la Comisión Europea en Uruguay.

### **Bibliografía:**

- Comisión de las Comunidades Europeas: *Estudio del Río Pilcomayo, informe final*, setiembre 1993.
- Comisión de la Unión Europea: *Informe final de la Misión Técnica en el area del Río Pilcomayo*, fevrero 1995.
- Misión Rusa de asesoramiento: *Informe técnico Río Pilcomayo*, agosto de 1993.
- Craig, R.F. *Soil Mechanics*. Van Nostrand Reinhold, 1978
- Allen, John R.L. *Physical processes of sedimentation*, George Allen & Unwin Ltd. 1970
- Allen, John R.L. *Principles of Physical Sedimentology*, George Allen & Unwin Ltd. 1985
- Baban, Rozgar. *Design of Diversion Weirs*
- Bos, M.G. *Discharge Measurement Structures*
- Stowa. *Handboek debietmetingen in open waterlopen*.

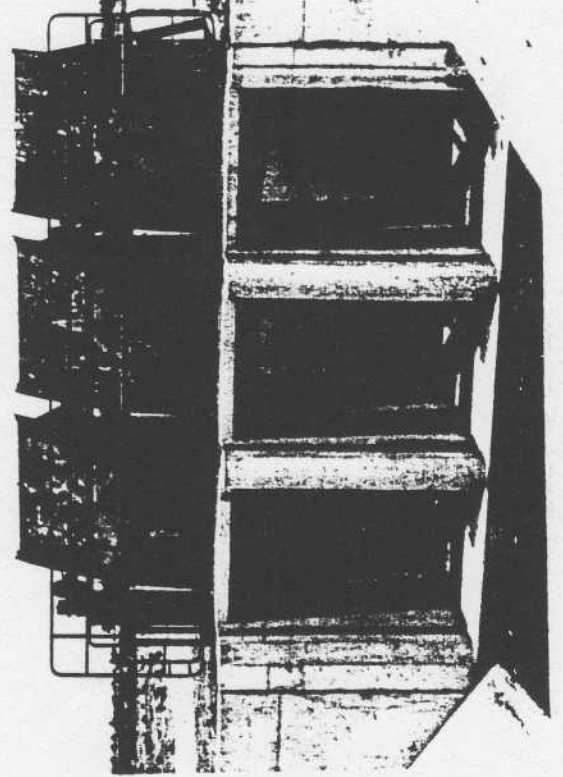
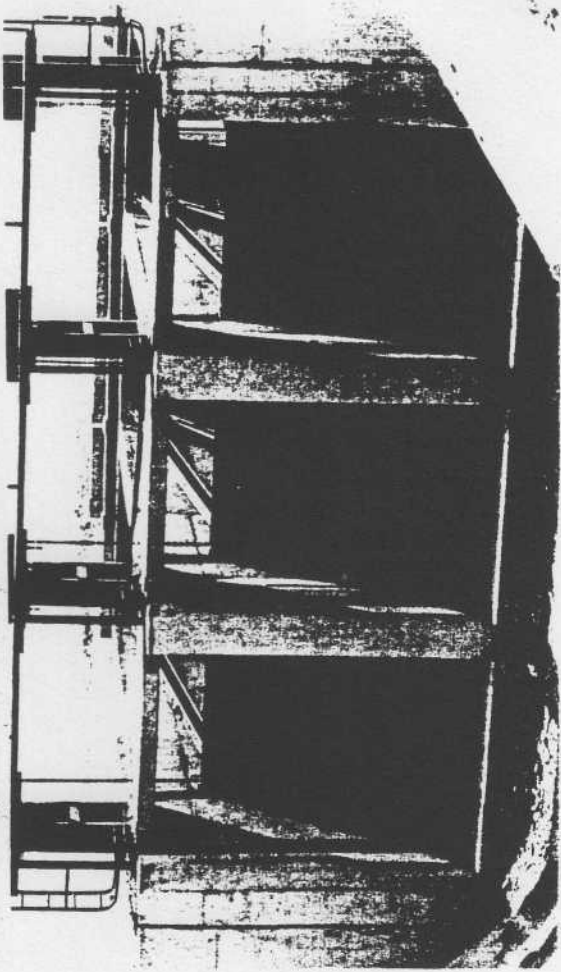
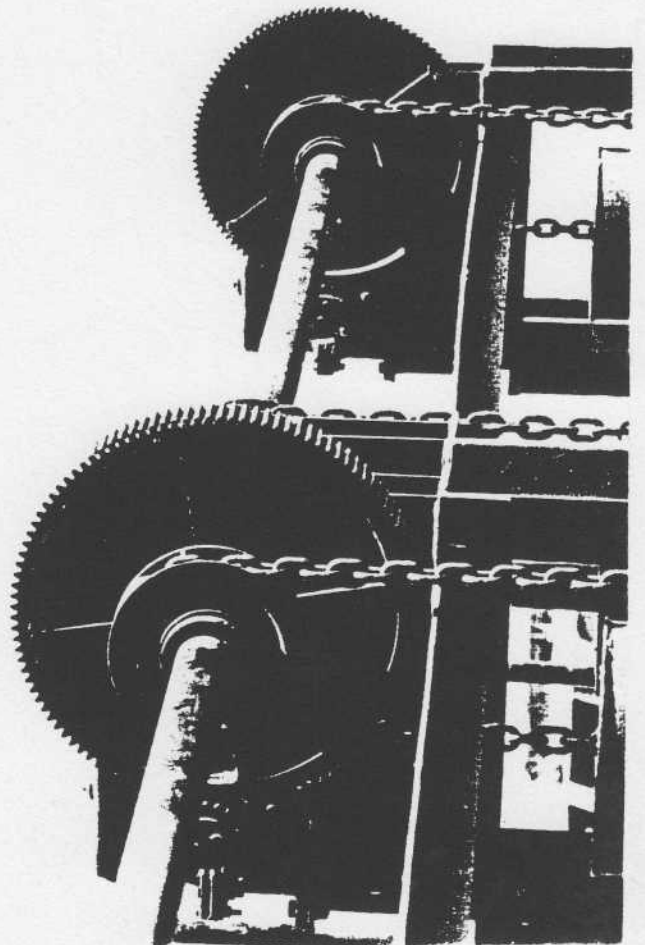
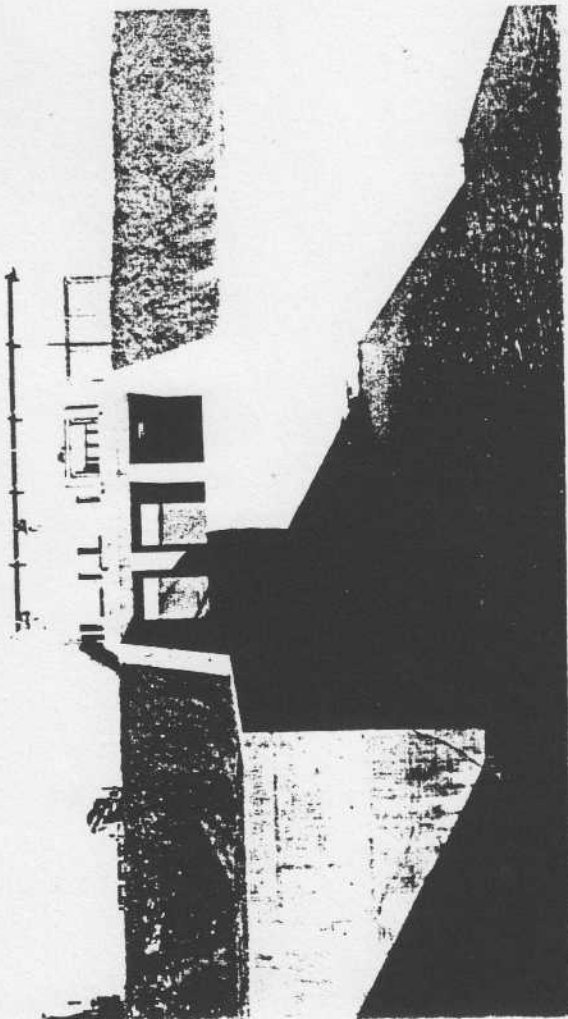


FOTO 4.1 Ejemplo de una estructura con compuertas radial



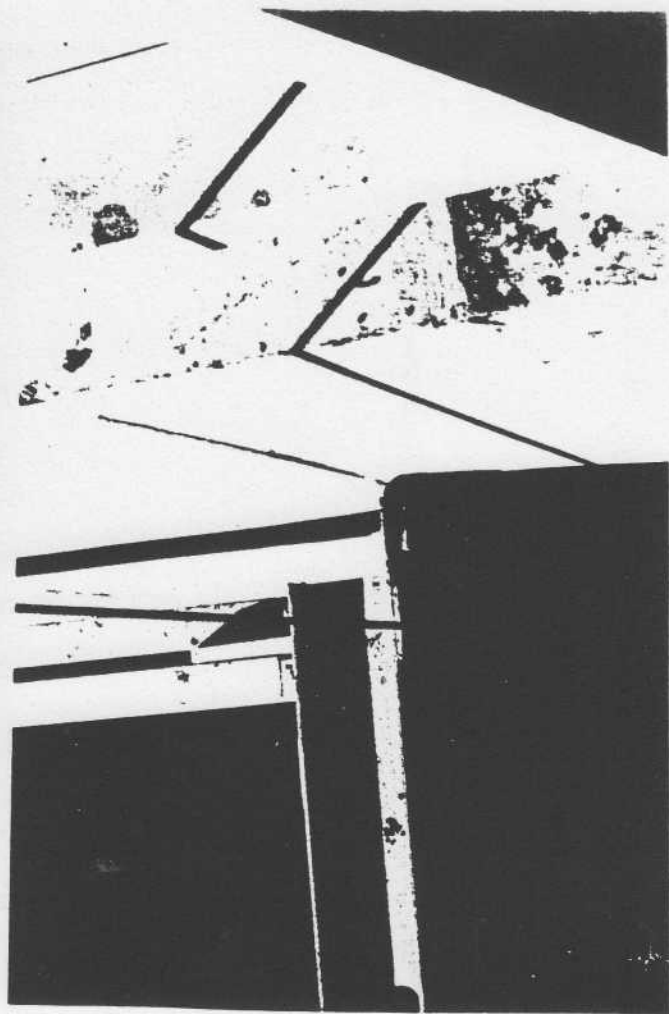
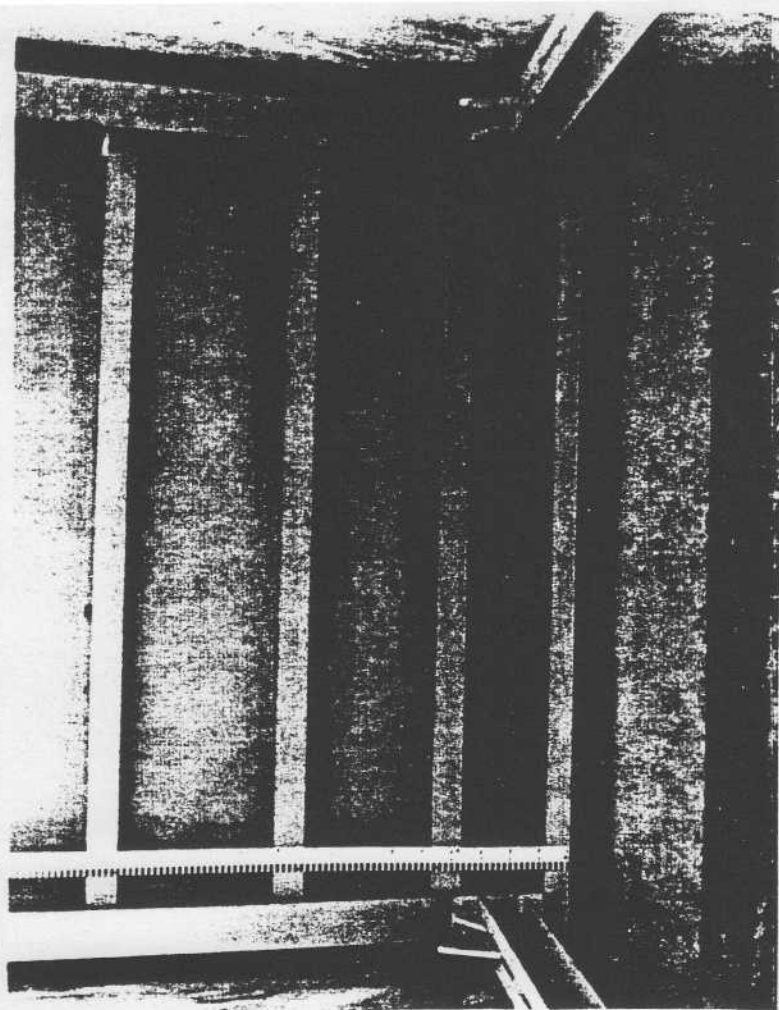
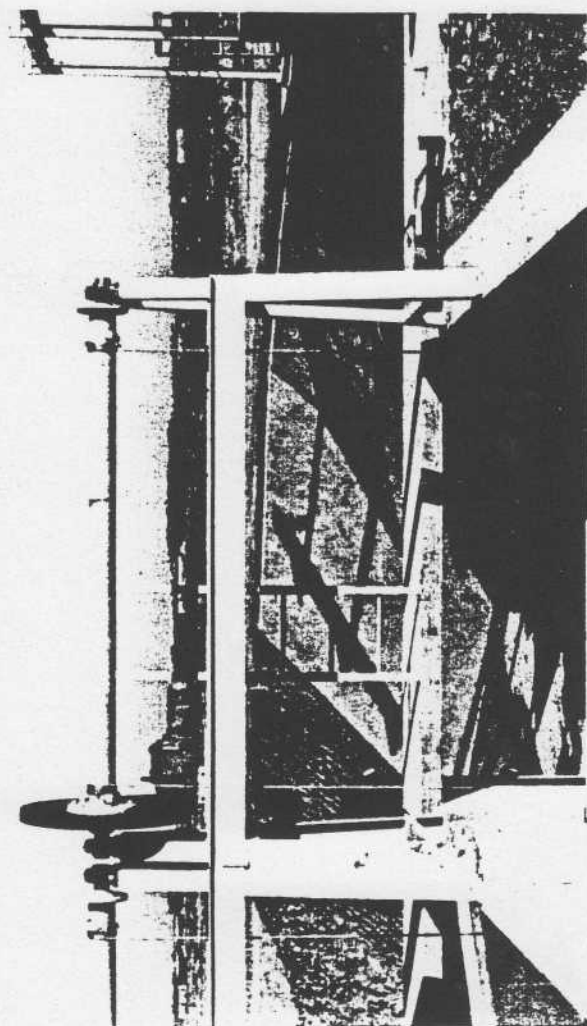
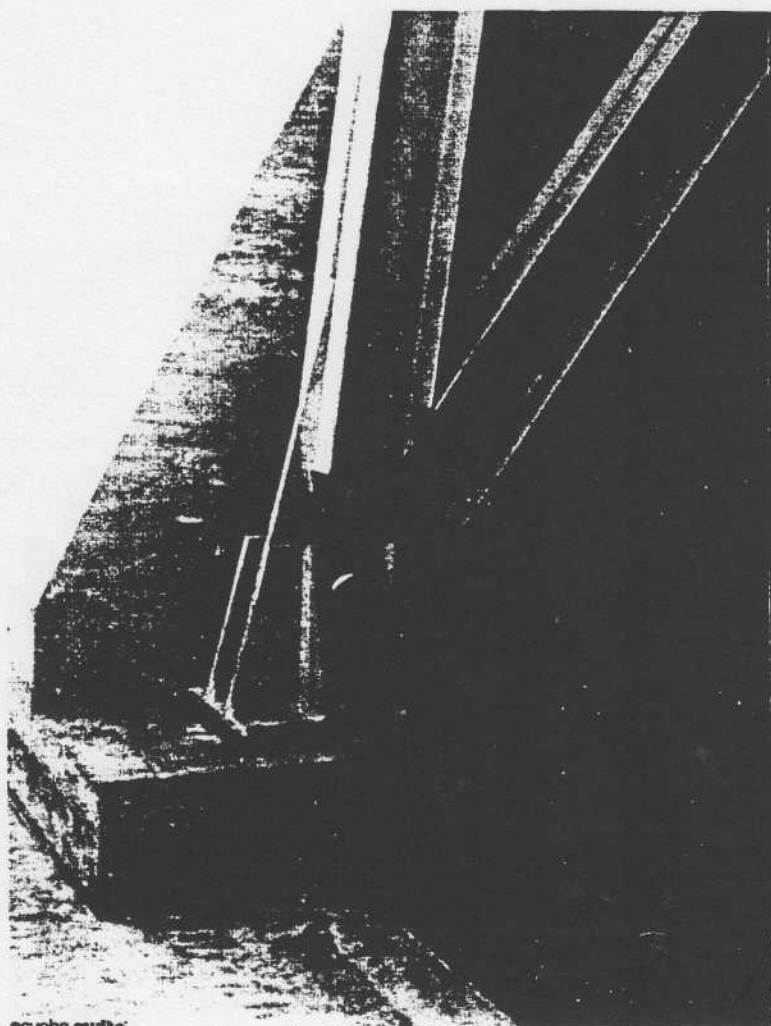
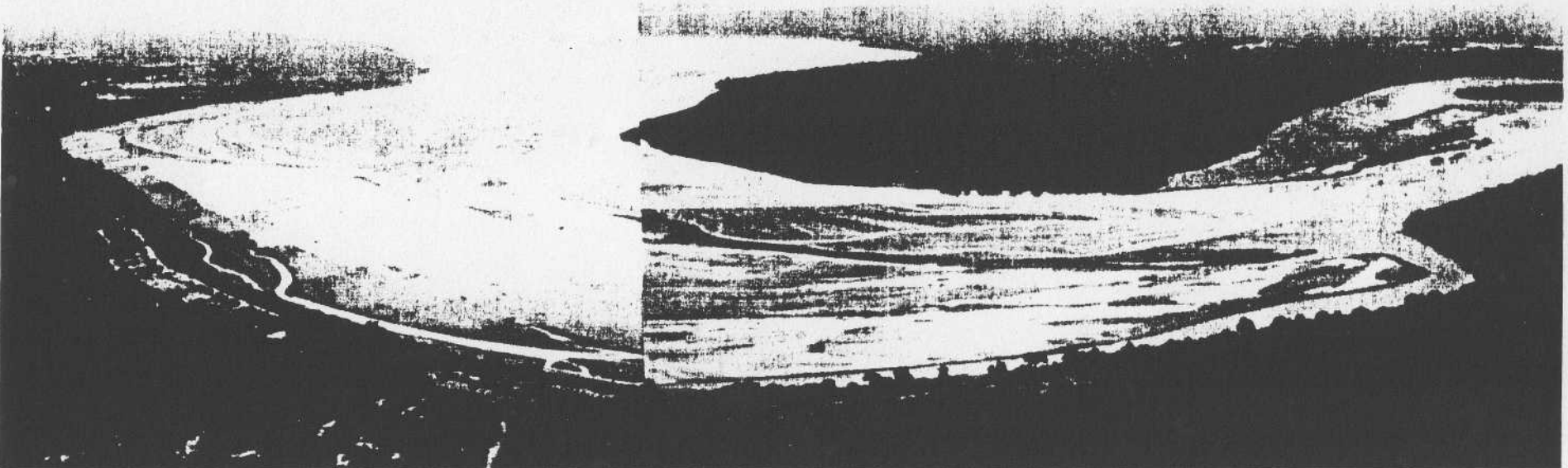


FOTO 4.2 Detalles de la compuerta, tipo radial.





Punto critico Santa Victoria

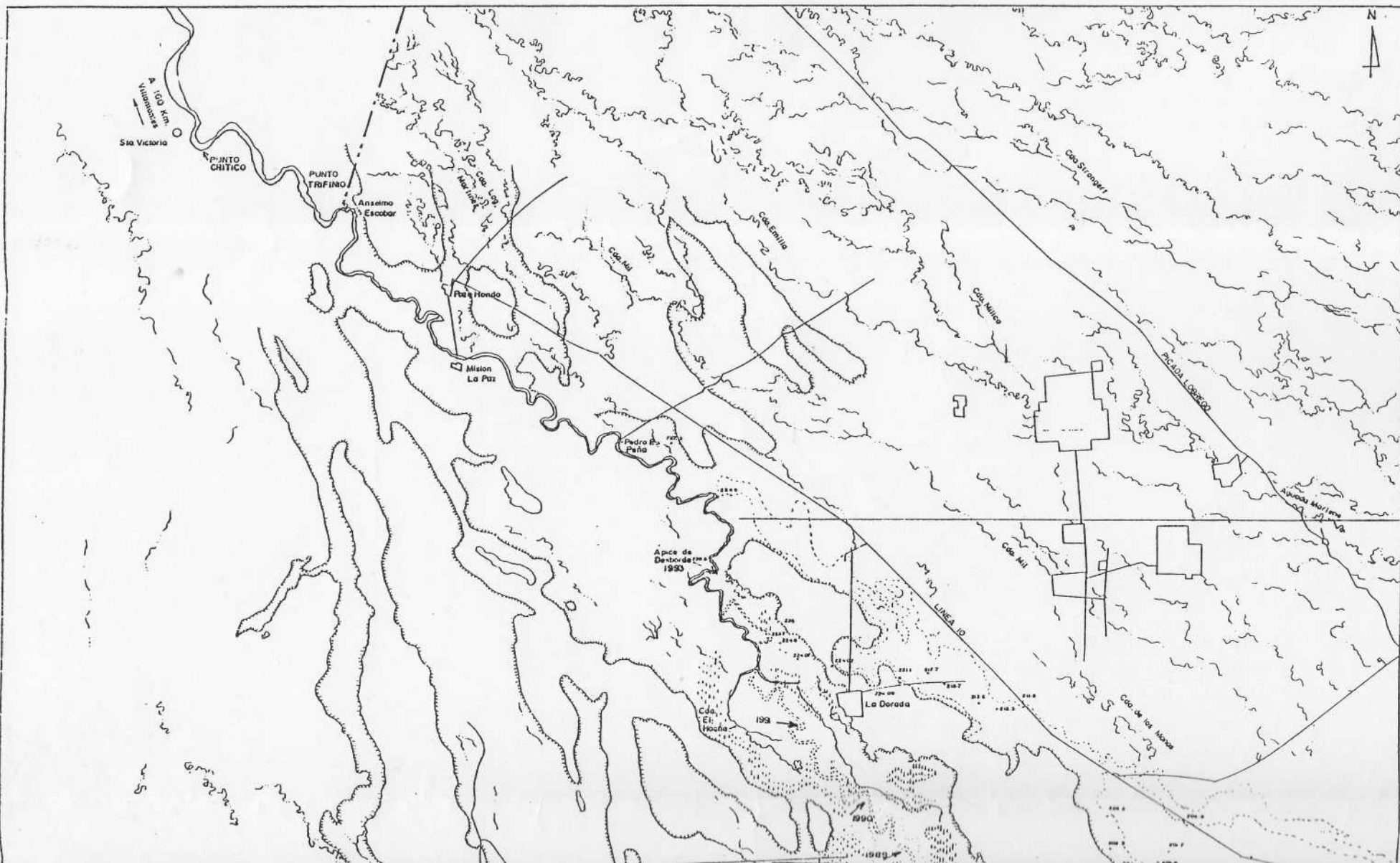
Río Pilcomayo colmatado



FOTO 5.1 Situación taponamiento, setiembre 1995  
Canal Auxiliar en el lado Paraguayo, y el Canal Argentino  
están colmatados.



FOTO 5.2 Nivel de la crecida,  
(año ?) en la cañada Madrid,  
ubicación cerca del  
sistema de control.







MAPA II

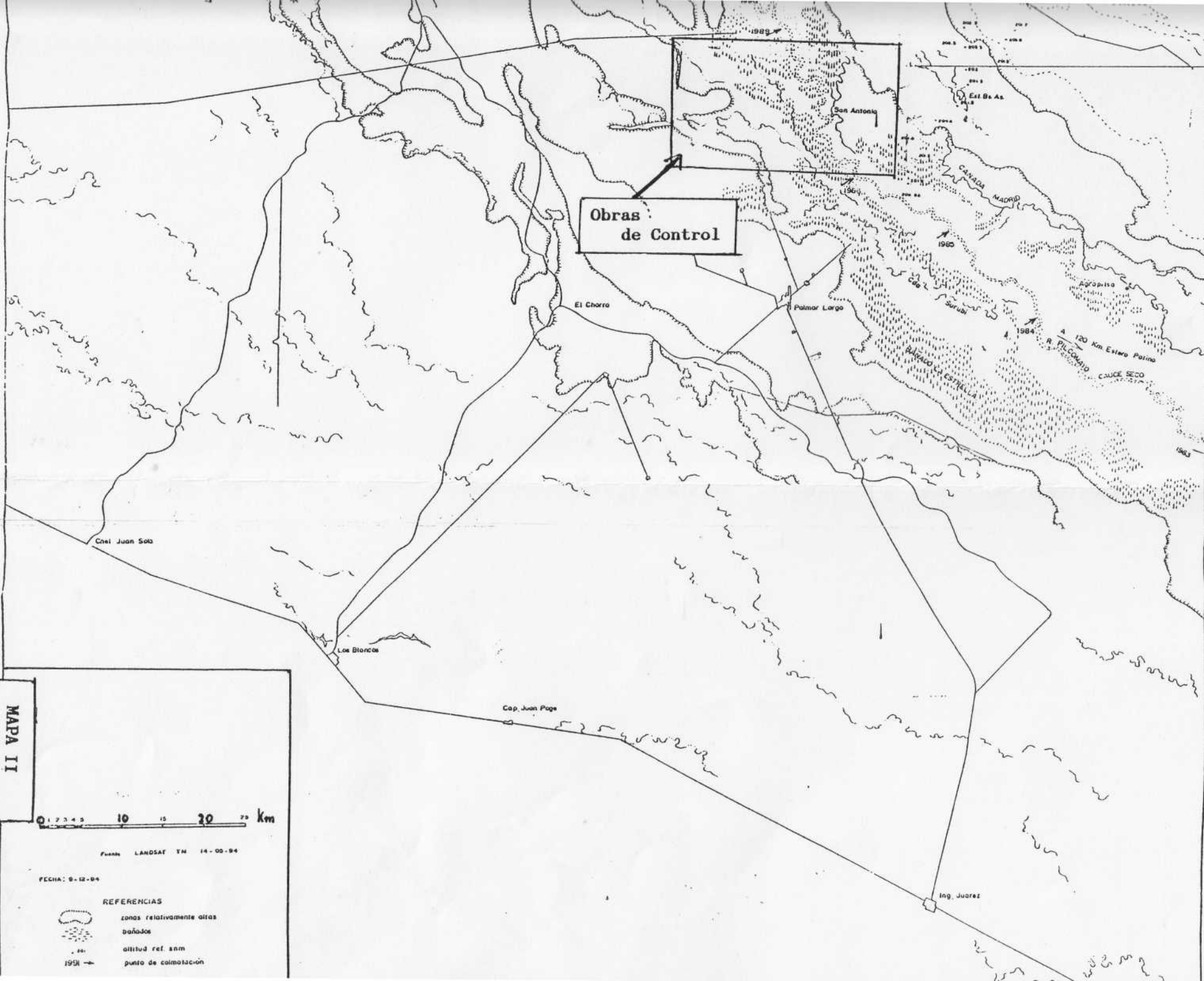


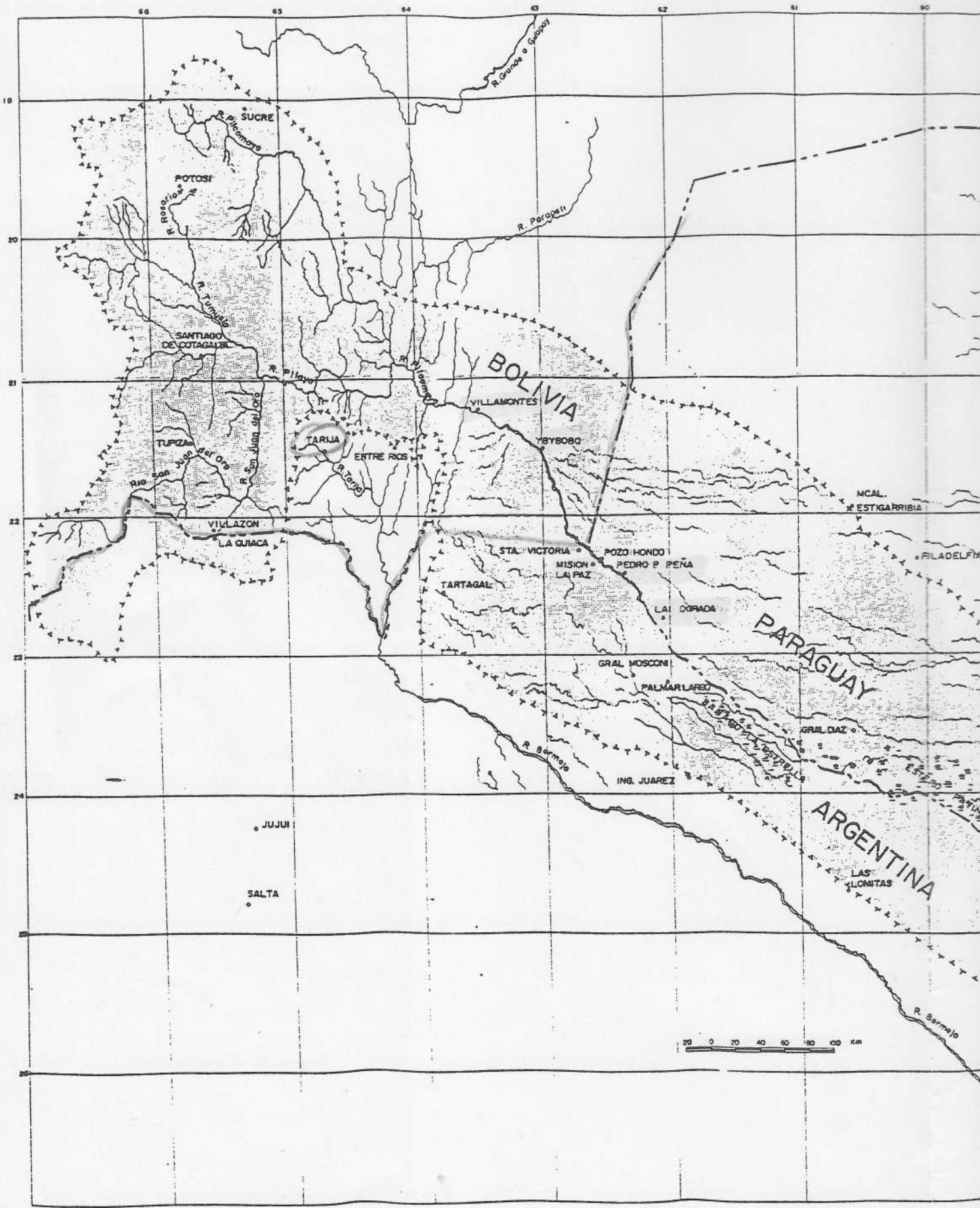
Fuente: LANDSAT TM 14-00-94

FECHA: 9-12-94

REFERENCIAS

-  zonas relativamente altas
-  bañados
-  altitud ref. snm
-  punto de calibración





66

65

64

63

62

61

60

18

20

21

22

23

24

25

26

SUCRE

POTOSI

SANTIAGO DE COTAGAITA

TUPIZA

VILLAZON

LA QUACA

TARIJA

ENTRE RIOS

BOLIVIA

VILLAMONTES

YSYBOSO

TARTAGAL

STA. VICTORIA

MISION LA PAZ

POZO HONDO

PEDRO P. PENA

GRAL. MOSCONI

PALMAR LARGO

ING. JUAREZ

PARAGUAY

ARGENTINA

LAS LLANITAS

MCAL. ESTIGARRIBIA

FILADELFA

R. Bermejo

R. Grande o Guapoy

R. Parapetí

R. Pilayo

R. Tarija

R. Tupiza

R. Beni

R. Orinoco

R. Yungas

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

R. Beni

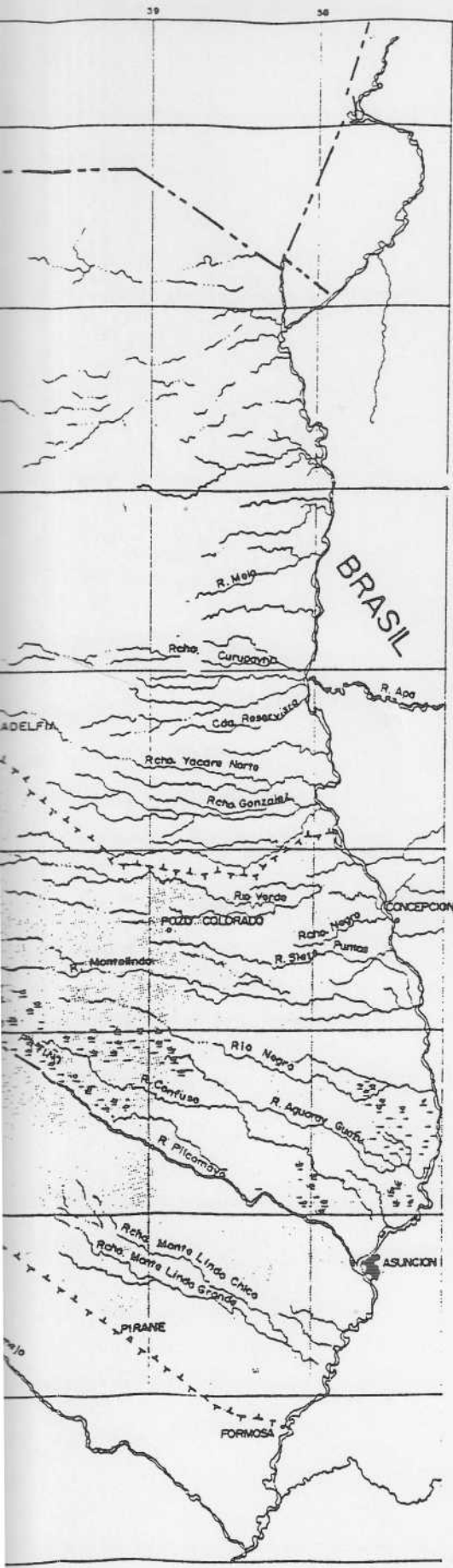
R. Beni

R. Beni







R. Beni

R. Beni

0 20 40 60 80 100 KM

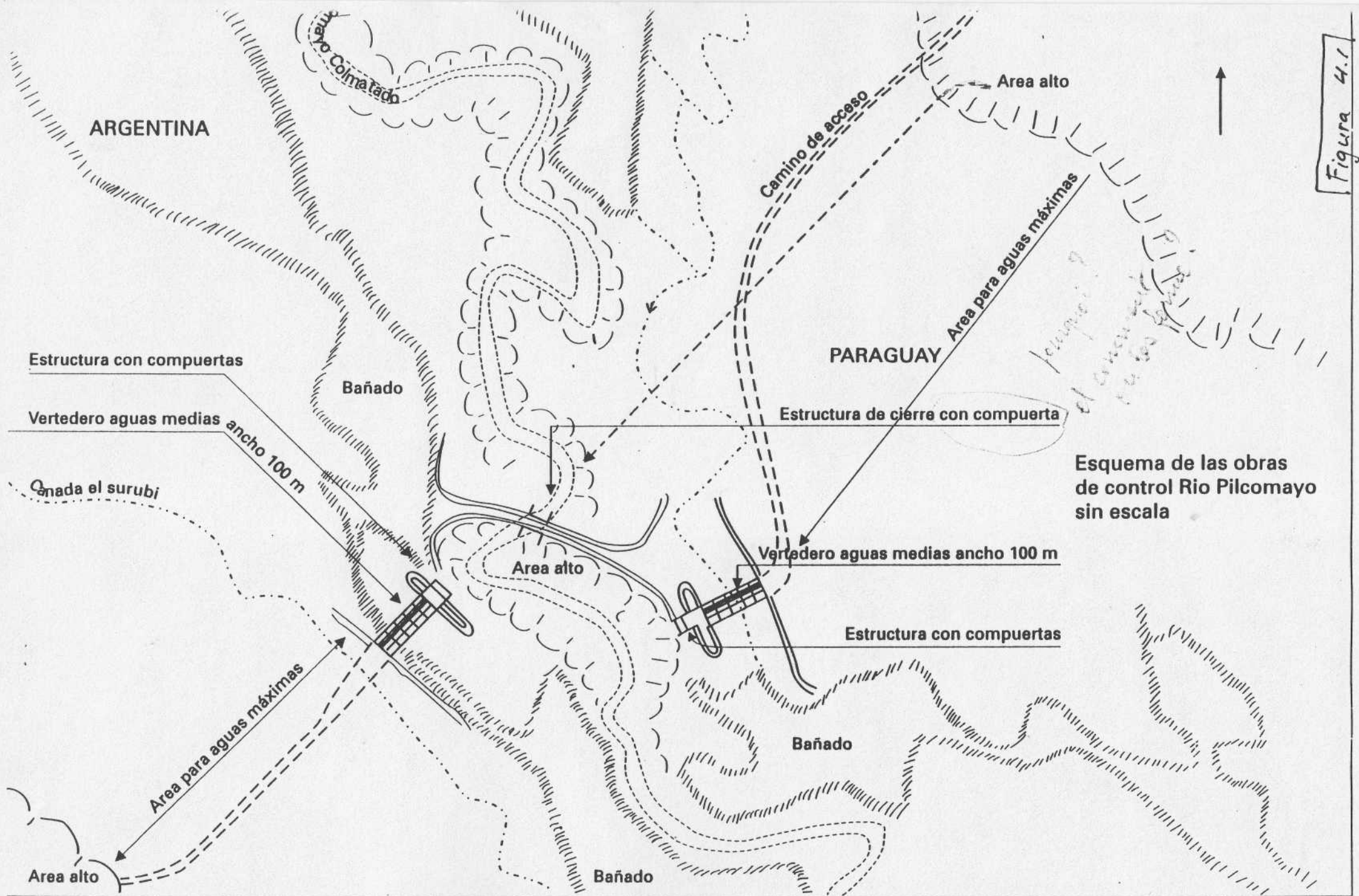


REFERENCIAS

- Ríos 
- Cañadas 
- Quebradas 
- Límite Territorial 
- Límite de Cuenca 
- Humedales 



Administradora de la <b>Pilcomayo</b> Cuenca Inferior	
<b>Comisión Binacional</b>	<b>DISEÑO INFORMATIVO</b>
<b>MAPA I</b>	
Director Nacional/Paraguay Ing. Luis A. Meyer	Fecha:
Director Nacional/Argentina Ing. Julio Fossati	Nº



Esquema de las obras de control Rio Pilcomayo sin escala

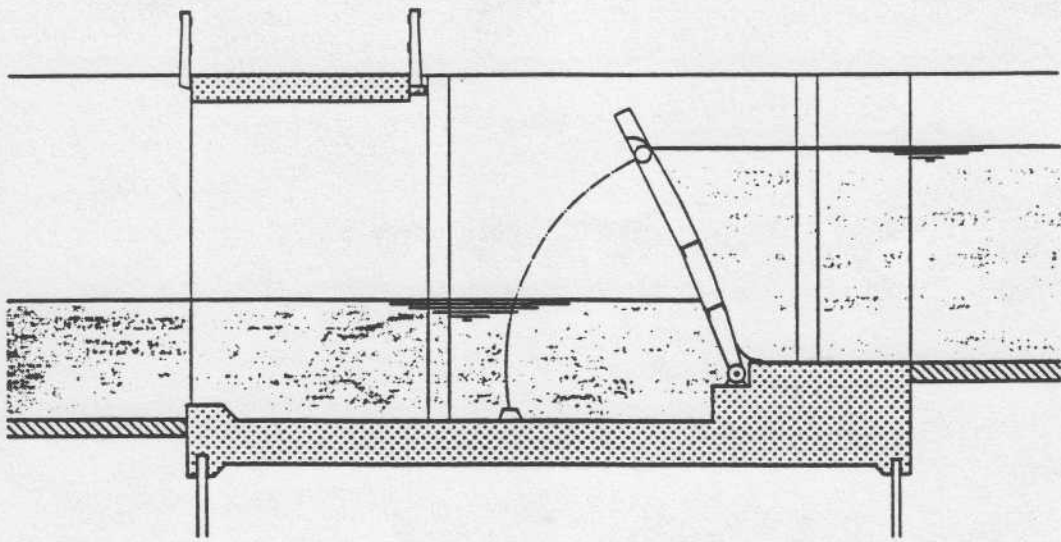
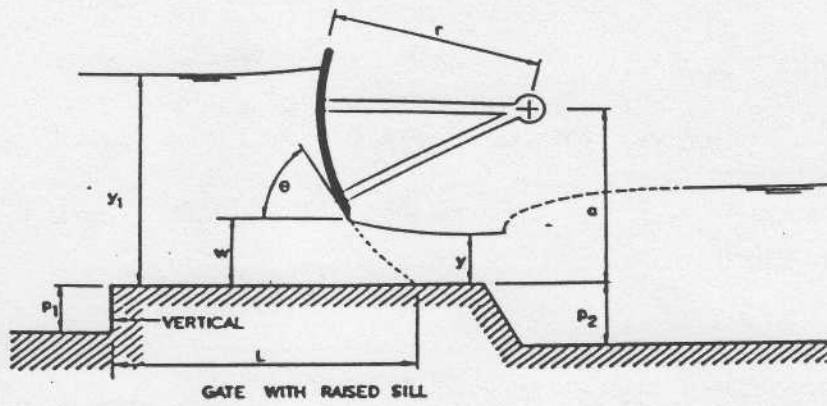
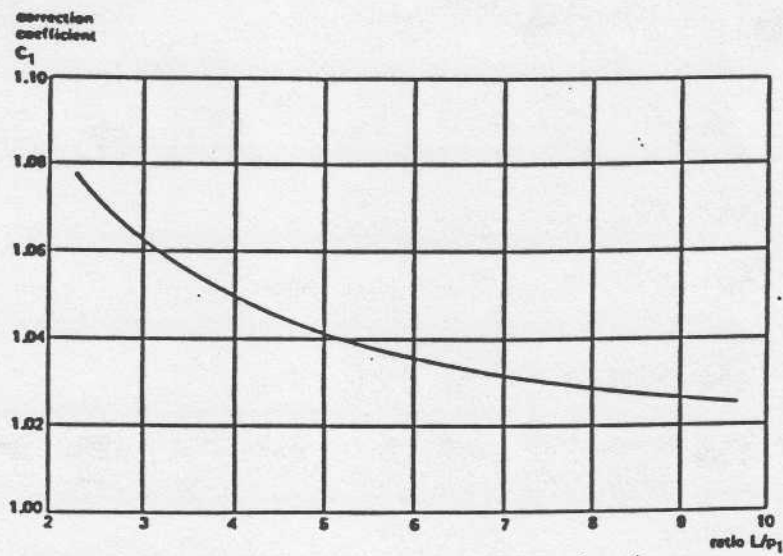


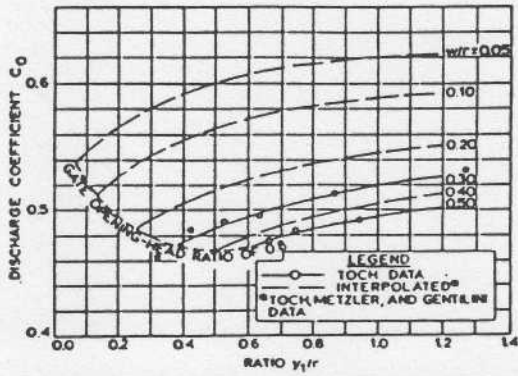
Figura 4.2.



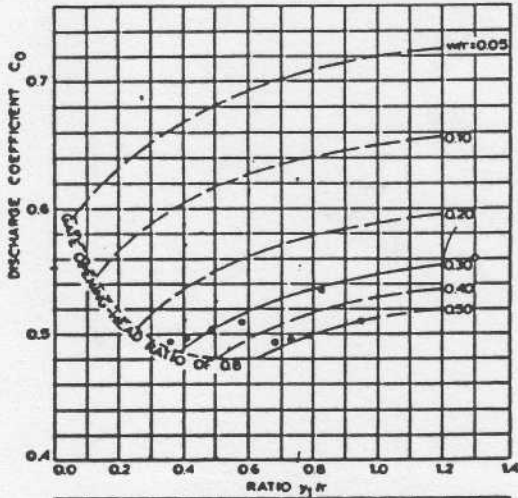
∴ Flow below a radial or tainter gate



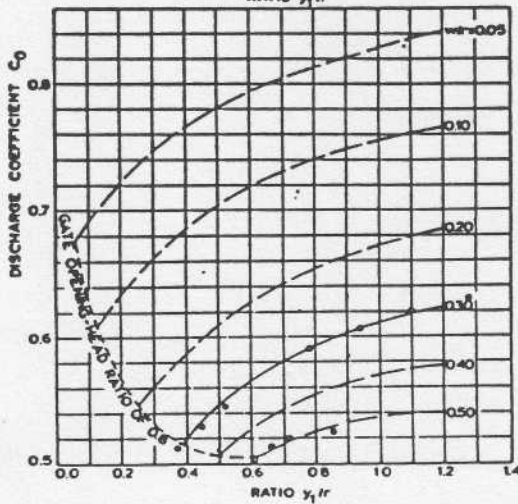
$C_1$ -values for radial gates with raised sill (from U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station)



$a/r=0.1$



$a/r=0.5$



$a/r=0.9$

$C_0$ -values as a function of  $a/r$ ,  $y_1/r$  and  $w/r$  (from U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station 1960)

Caudales con diferentes aperturas de la compuerta con flujo libre aguas abajo de la compuerta

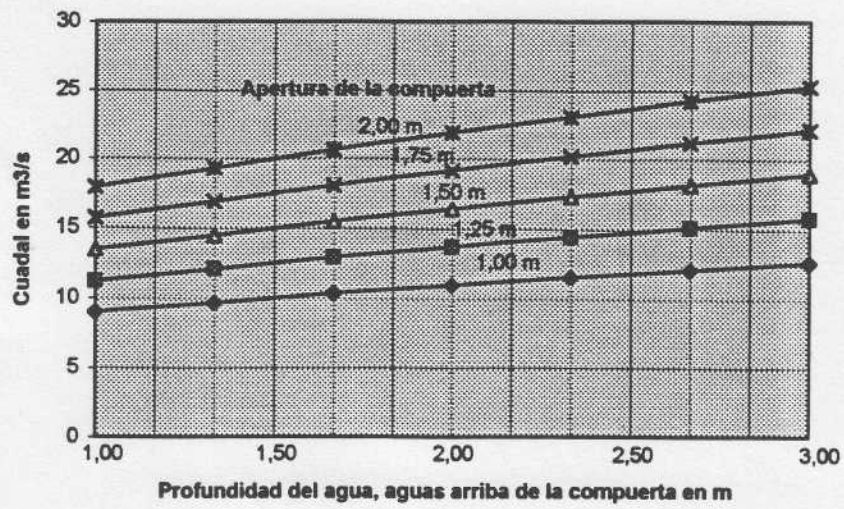


Figura 4.5

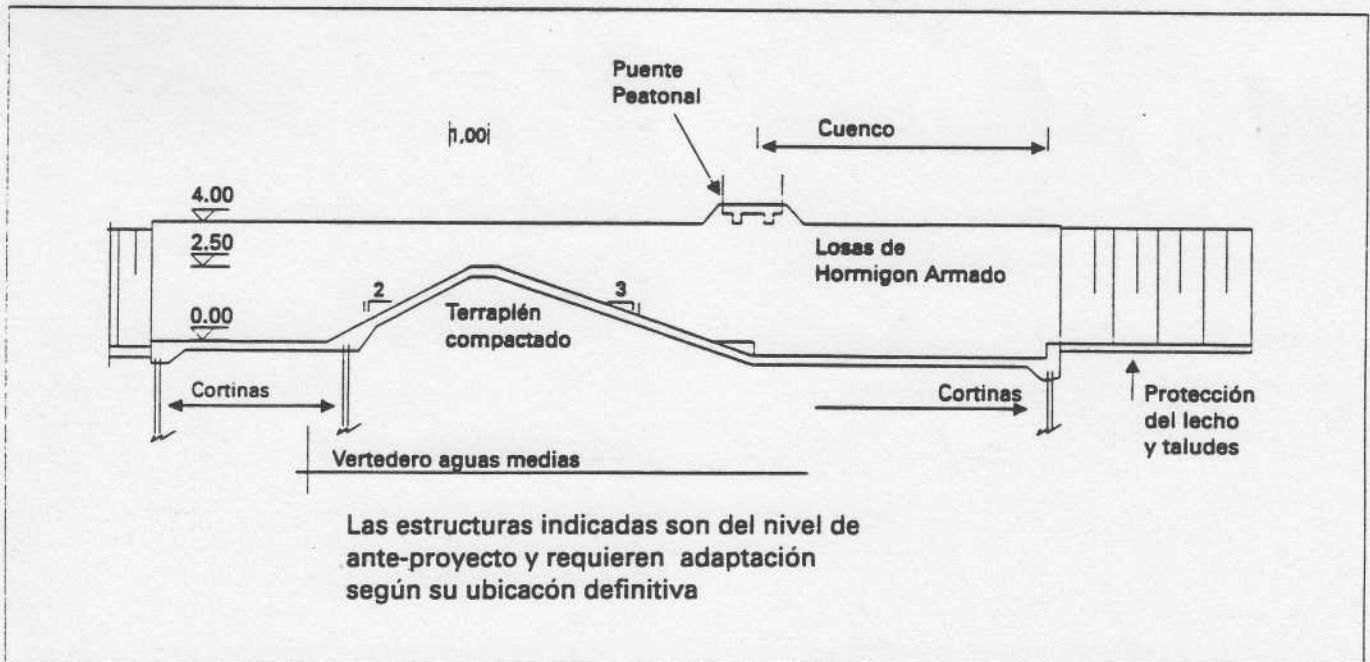
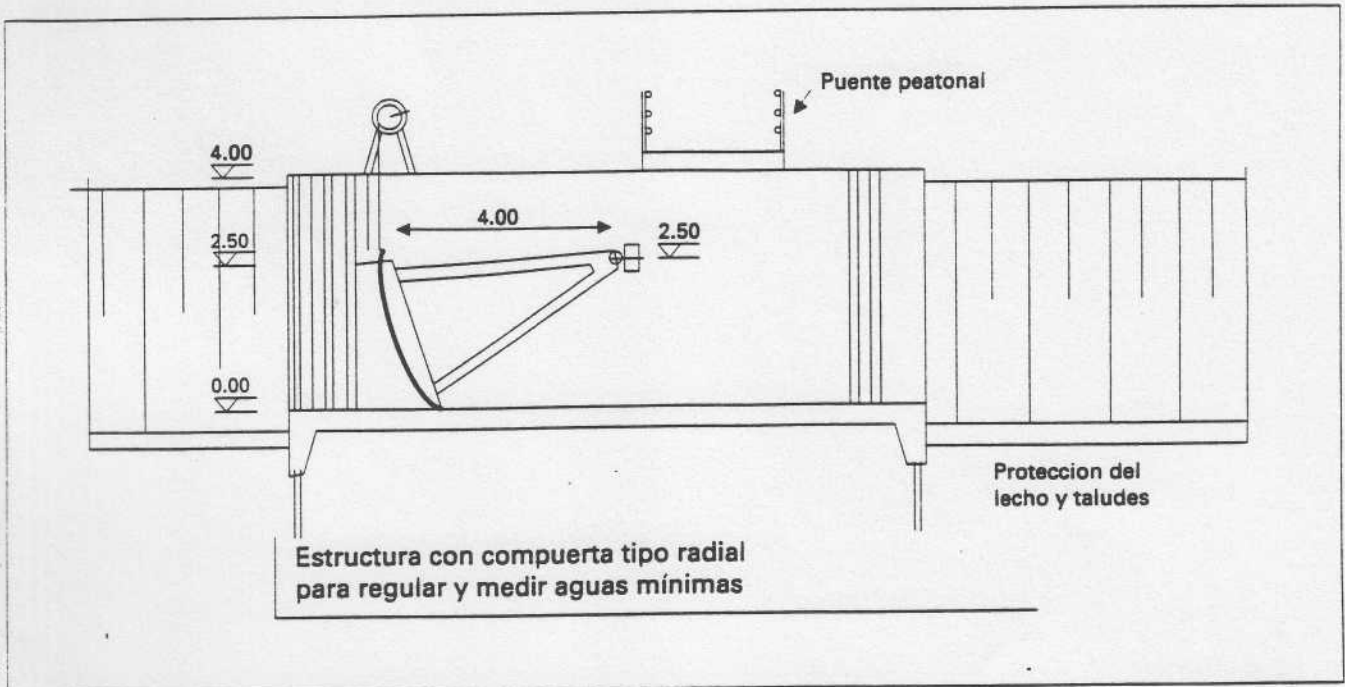


Figura 4.6

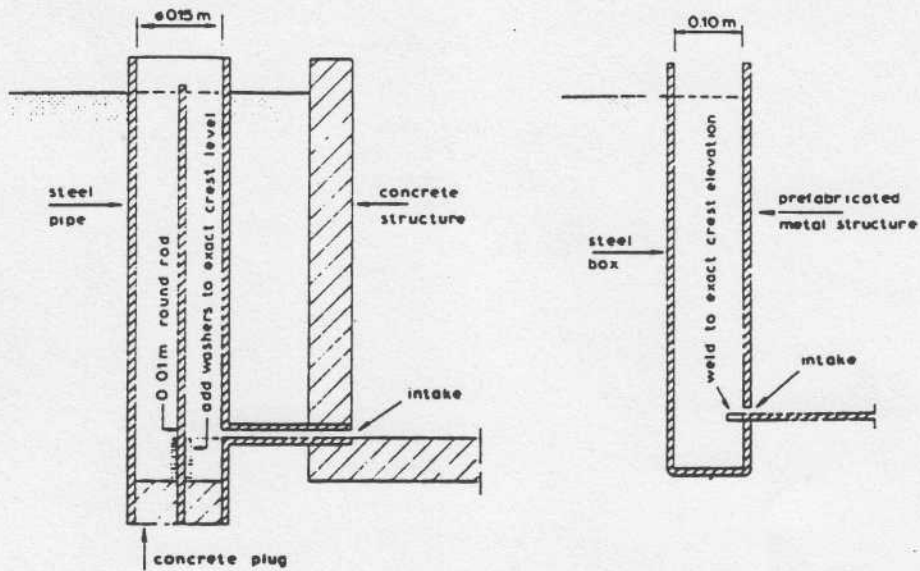


Fig.2.3. Examples of a stilling well used in combination with a dip-stick.

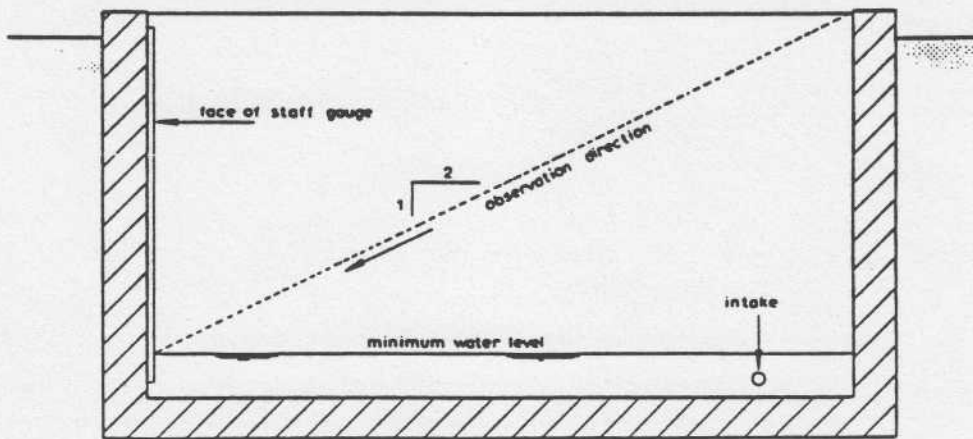


Fig.2.4. Stilling well used in combination with a staff gauge.

CALICATA PUESTO AKIAS  Laboratorio de Ingeniería Civil	ENSAYO DE PERMEABILIDAD A CARGA VARIABLE	
	OBRA: DIQUE INTERCEPTOR SOLICITADO POR: Ing. SCHMIDT E.O.	

Sondeo N°:	Muestra N°: 2	Prof.(m):	Equipo N°: 1
Próctor... Dss. Máx.:	Humeda Optima (%):	Permeabilidad al Dss.=	gr/cm3
Molde (A) cm2: 19.63	Esp.Muestra(L)cm: 5.2	Presión Axial kg/cm2:	
Area del Tubo Piezométrico (a) cm2: 0.5	Fecha de Armado del Permeámetro: 1/12/94		

TIEMPO DE OBSERVACION			LECTURAS (cm)	H1/H2	log (H1/H2)	K
FECHA	HORA	INTERVALO (seg)				
2/12/94	9:00	1800	H1 90.0	1.1194	0.0490	8.30E-06
2/12/94	9:30		H2 80.4			
2/12/94	10:00	1800	H1 90.0	1.1307	0.0535	9.06E-06
2/12/94	10:30		H2 79.6			
2/12/94	11:00	2400	H1 90.0	1.1719	0.0689	8.75E-06
2/12/94	11:40		H2 76.8			
2/12/94	11:45	2700	H1 90.0	1.2195	0.0862	9.74E-06
2/12/94	12:30		H2 73.8			
5/12/94	9:00	2400	H1 90.0	1.1889	0.0751	9.54E-06
5/12/94	9:40		H2 75.7			
5/12/94	10:00	2400	H1 90.0	1.1421	0.0577	7.33E-06
5/12/94	10:40		H2 78.5			
5/12/94	11:00	3900	H1 90.0	1.2821	0.1079	8.44E-06
5/12/94	12:05		H2 70.2			
5/12/94	13:15	2700	H1 90.0	1.2228	0.0874	9.87E-06
5/12/94	14:00		H2 73.6			
5/12/94	14:15	2700	H1 90.0	1.2212	0.0868	9.80E-06
5/12/94	15:00		H2 73.7			
5/12/94	15:15	2700	H1 90.0	1.2195	0.0862	9.74E-06
5/12/94	16:00		H2 73.8			
			H1			
			H2			

OBSERVACIONES:

Figura 4.8

CALICATA  
EL BAJO

ENSAYO DE CONSOLIDACION

OBRA: DIQUE INTERCEPTOR.

Laboratorio de Ingeniería Civil

SOLICITADO POR: Ing. SCHMIDT E.O.

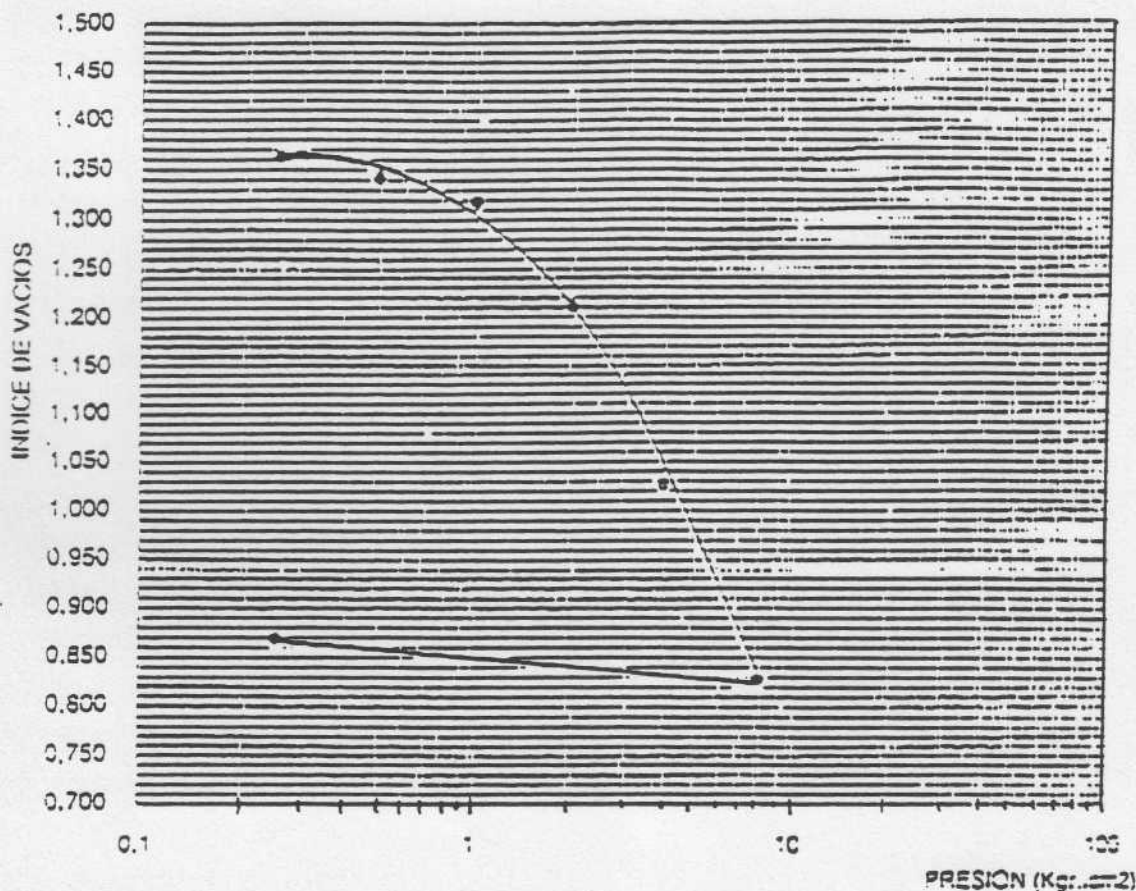
Sondeo N°: Muestra N° 1

Prof. (m):

Consolidómetro N°: 4

Fecha Inicio: 28-11-94

Fecha Fin: 06-12-94



RELACION DE VACIOS (e)

Presión Kg/cm <sup>2</sup>	Lectura Final 0.001 (cm)	Deformación Observada (cm)	Altura de la Muestra (cm)	Altura de Vacíos (cm)	Relación de Vacíos (Adimens.)
0.25	19	0.019	1.861	1.073	1.362
0.5	25	0.035	1.845	1.057	1.341
1	53	0.053	1.827	1.039	1.319
2	138	0.138	1.742	0.954	1.211
4	283	0.283	1.597	0.809	1.027
8	440	0.440	1.44	0.652	0.827
0.25	407	0.407	1.473	0.625	0.669

Anillo N°: 2 | D: 6.35 cm | Ho: 1.68 cm | A: 31.67 cm<sup>2</sup> | V: 59.54 cm<sup>3</sup> | SUCS: CL  
 Psn: 81.2 gr. | H: 18.7 % | Hs: 0.788 cm | G: 2.74 g/cm<sup>3</sup> | Si: 37 % | eo: 1.386 g.  
 Dh: 1.364 g/cm<sup>3</sup> | Ds: 1.149 g/cm<sup>3</sup> | Condición: Humedad natural

Figura 4.9

# ENSAYO COMPACTACION

DIQUE INTERCEPTOR-RIO PILCOMAYO

Clasificación de la muestra: CALICATA - EL BAGO

Nº de la muestra: \_\_\_\_\_ Fecha de ensayo: \_\_\_\_\_

Calle: \_\_\_\_\_

$P.R.D. = 2.3$   
LRCILLA (CL)

Nº Ep. sayo	%	Peso del		Peso del		Peso del		Vol. del		Densidad suelo		OBSERVACIONES
		Suelo y molde		molde		suelo		molde		g/cm³		
		Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	cm³	cm³	Humedo	Seco			
	Aproxim agua	P <sub>sm</sub>	P <sub>m</sub>	P <sub>s</sub>	P <sub>m</sub> - P <sub>s</sub>	V <sub>m</sub>	$\frac{P_s}{V_m} = D_m$	$\frac{P_{sm}}{V_m} = D_s$				
	10,5	3445	1770	1675	946	946	1,77	1,60			2 - 39	
	12,5	3530	1770	1760	946	946	1,96	1,65				
	14,5	3600	1770	1830	946	946	1,93	1,68				
	17,0	3805	1770	1935	946	946	1,94	1,66				
	18,5	3590	1770	1770	946	946	1,92	1,62				

No. de ensayo					
Peso filtro No.	25	59	70	175	175
P <sub>f</sub> + S <sub>h</sub> + c	40820	32420	34950	39930	43430
P <sub>f</sub> - S <sub>h</sub> + b	37870	30060	32060	36350	39100
Agua + a + b + c	2250	2360	2290	2580	4330
Tara P <sub>f</sub> + c	16870	11360	12560	13150	15700
Suelo seco + a + b + c	21000	18700	19500	21200	23400
% h = $\frac{a+b+c}{P_f - S_h + b} \times 100$	10,7	12,6	14,8	16,9	18,8

Material	L.P.	I.P.	Condiciones	Temperatura	200
A-6-G	30,2	11,9			97

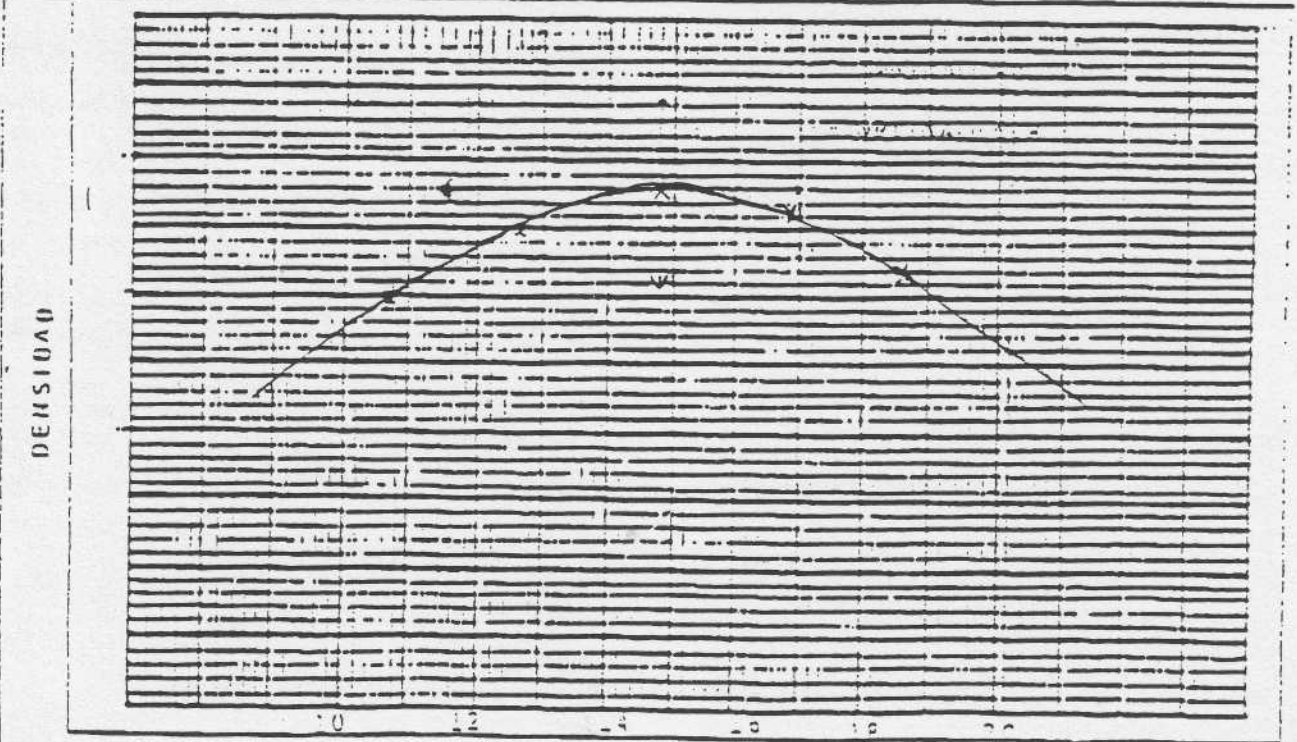


Figura 4.10

FECHA

Grafico, mostrando la relacion del caudal con la velocidad y escala.

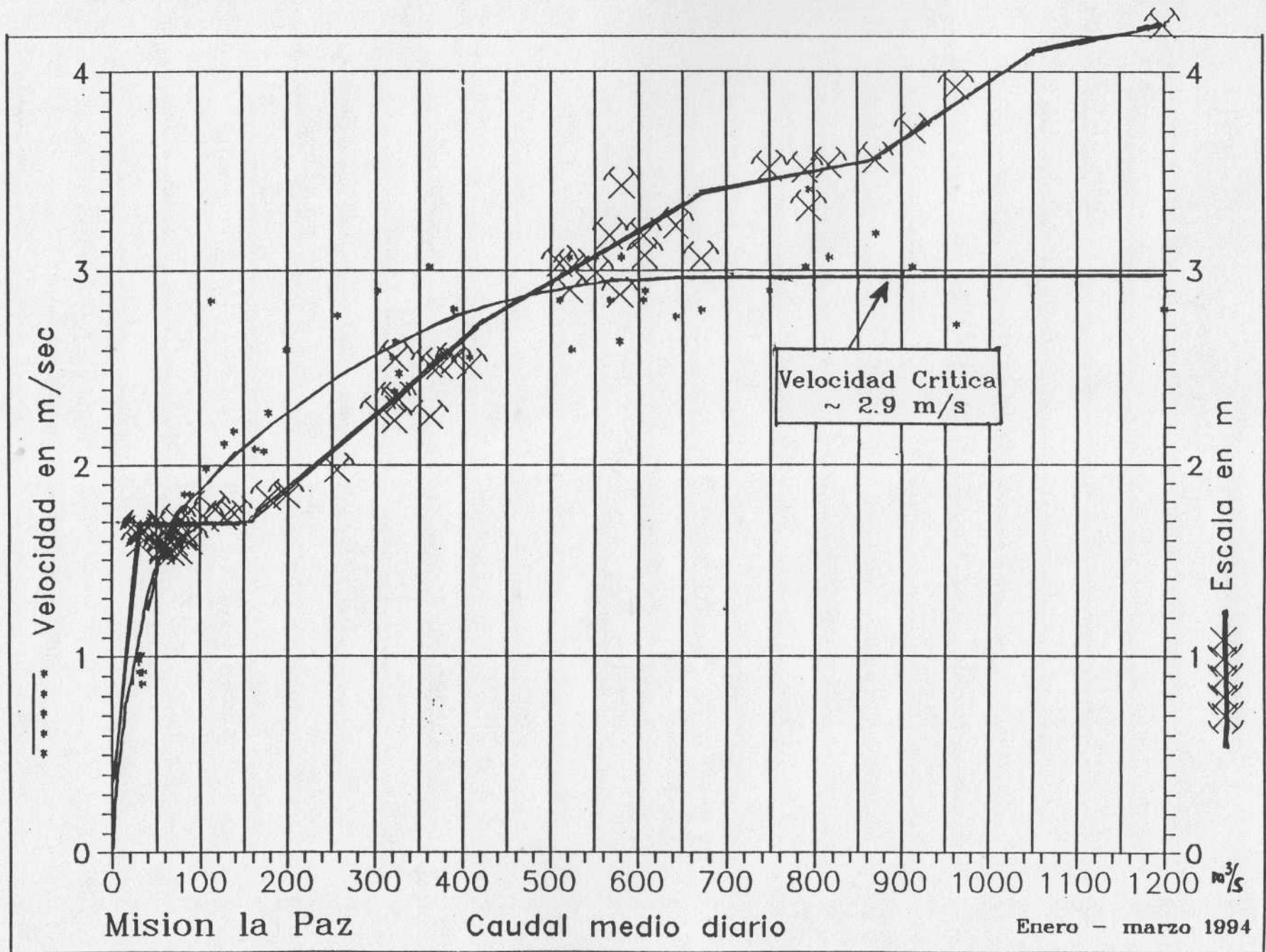


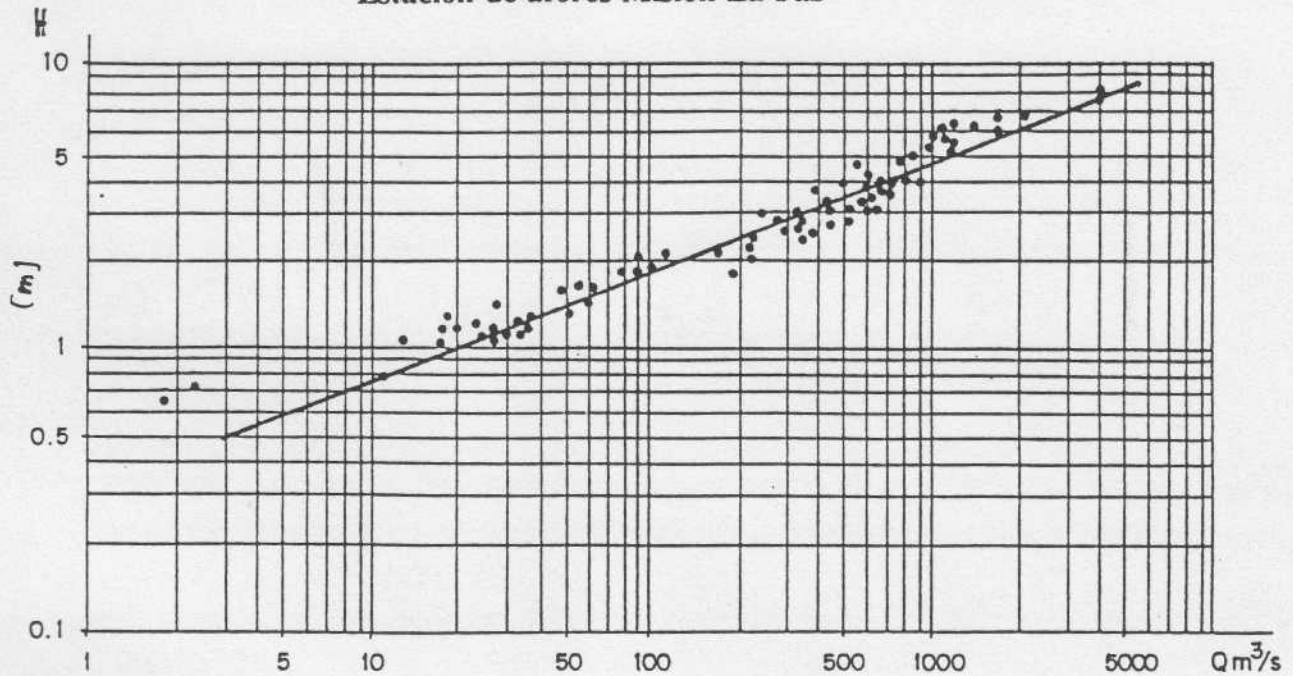
Figura 5.2.1

**ANEXO I**

**(Normativas ISO)**

# RELACION PROFUNDIDAD MAXIMA DEL CAUCE Y CAUDAL

Estación de aforos Misión La Paz



## ERODING FLOW VELOCITIES FOR UNIFORM NON-COHESIVE MATERIAL

Mean size of particles d,mm	MEAN VELOCITY (m/s) al flow depth				
	0.5 m	1 m	3 m	5 m	10m
0.05	0.52	0.55	0.60	0.62	0.66
0.15	0.36	0.38	0.42	0.44	0.26
0.25	0.37	0.39	0.41	0.46	0.48
0.37	0.38	0.41	0.46	0.48	0.51
0.50	0.41	0.44	0.50	0.52	0.55
0.75	0.45	0.51	0.57	0.59	0.63
1.00	0.51	0.55	0.62	0.65	0.69
2.00	0.64	0.70	0.79	0.83	0.89
2.50	0.69	0.75	0.86	0.90	0.97
3.00	0.73	0.80	0.91	0.96	1.03
5.00	0.87	0.96	1.10	1.17	1.25
10.00	1.10	1.23	1.42	1.51	1.64
15.00	1.26	1.42	1.65	1.76	1.92
20.00	1.37	1.55	1.84	1.96	2.14
25.00	1.48	1.65	1.98	3.12	2.32
30.00	1.56	1.76	2.10	3.26	2.48
40.00	1.68	1.98	2.32	2.50	2.75
75.00	2.01	2.35	2.83	3.14	3.48
100.00	2.15	2.54	3.14	3.46	3.85
150.00	2.35	2.84	3.62	3.96	4.46
200.00	2.47	3.03	3.92	4.13	4.87
300.00	2.90	3.32	4.40	4.34	5.58

Figura 5.2.2

Fuente: Informe Ruso 1993.

Relacion Q y H.  
 Condiciones:  $dQ > 0 : H > 1.85 \text{ m}$

Misión la Paz

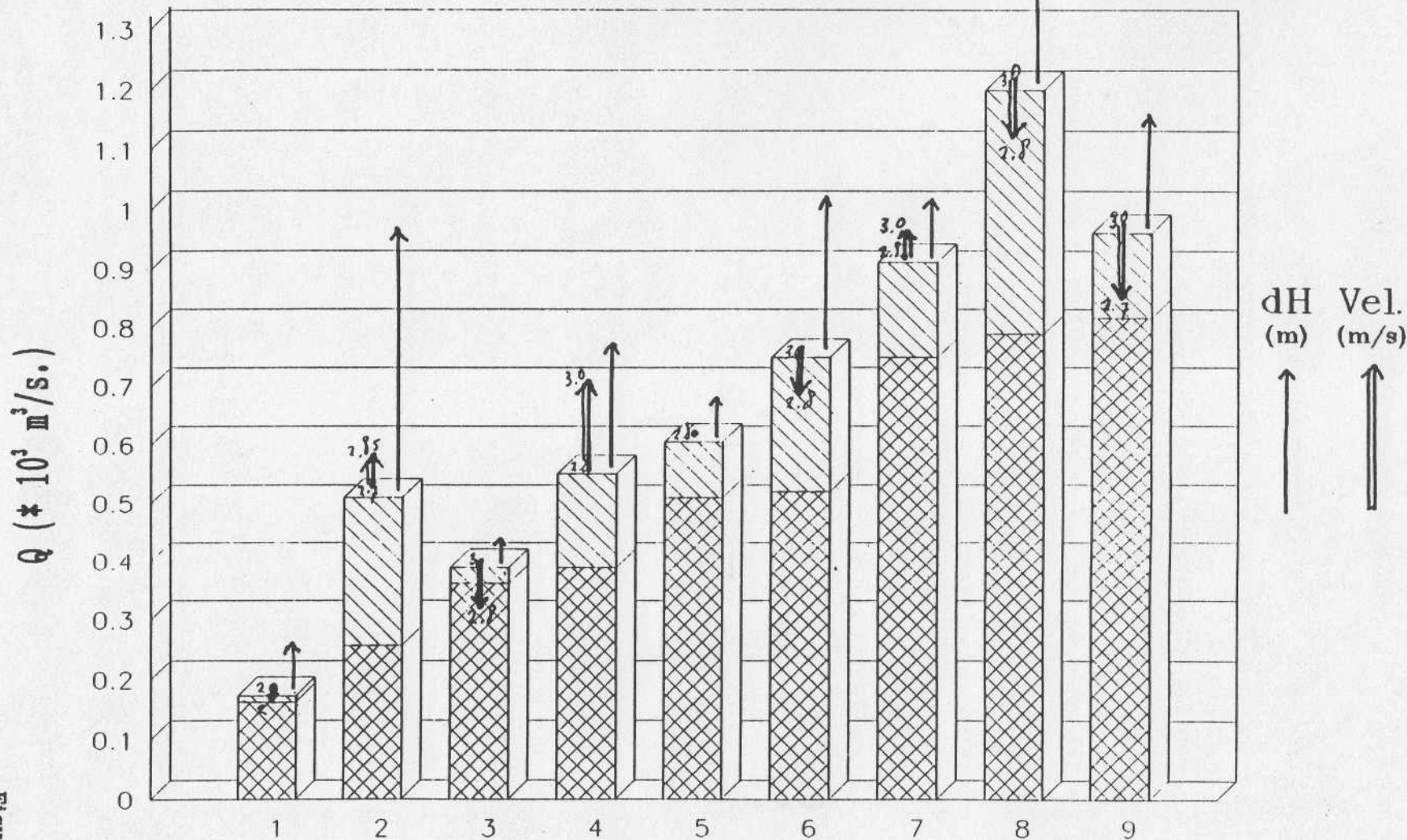


Figura 5.2.3

Q inicial

Grafico, mostrando el efecto de aumento de caudal sobre la velocidad promedio y la escala (H)

$dQ$  por dia.

Ejemplo del perfil del cauce  
Mision La Paz, (Informe Ruso)

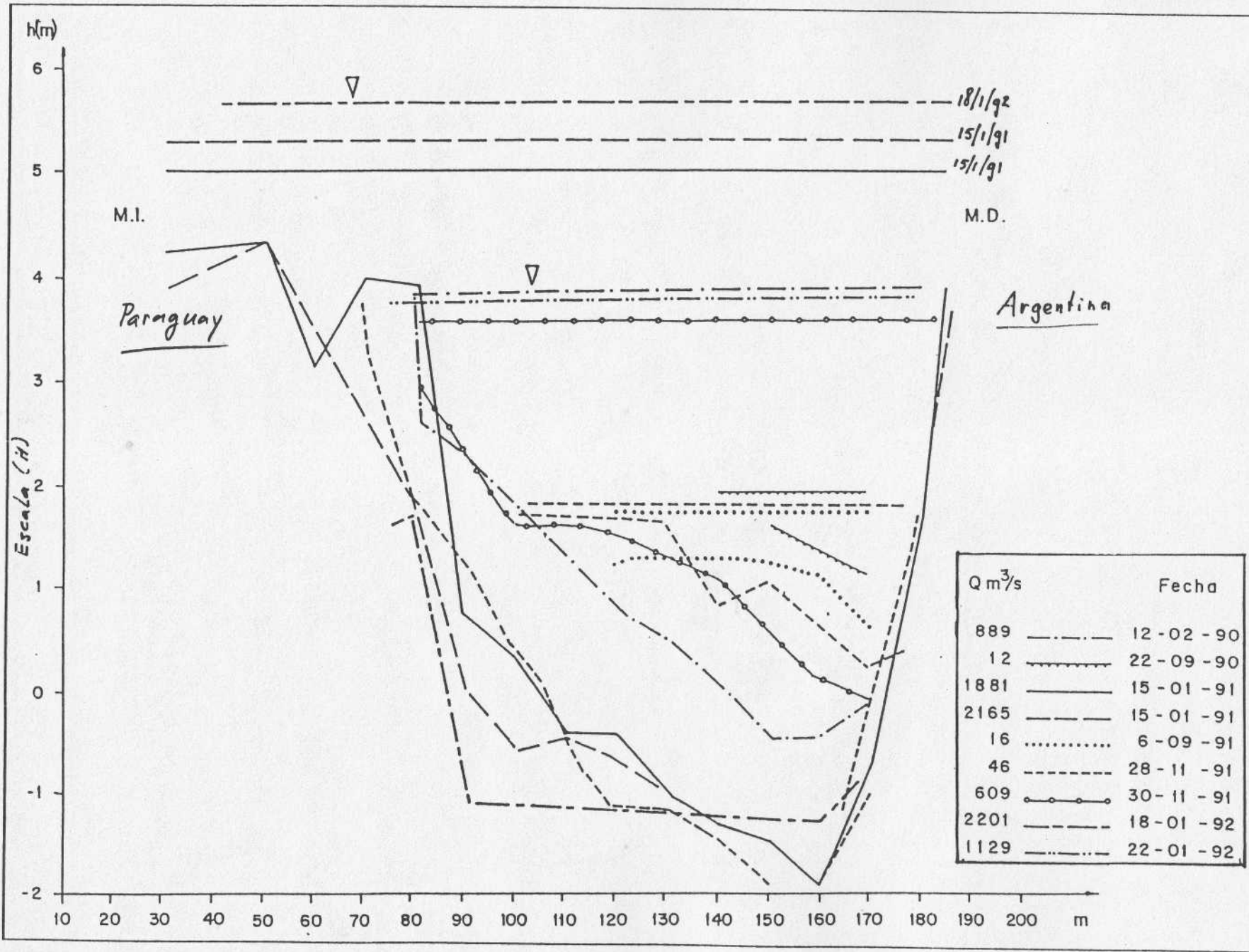
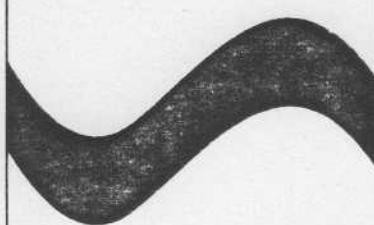


Figura 5.2.4

**APENDICE C**

**Ejemplos de revestimiento**



### Filling

For the filling different systems are available.

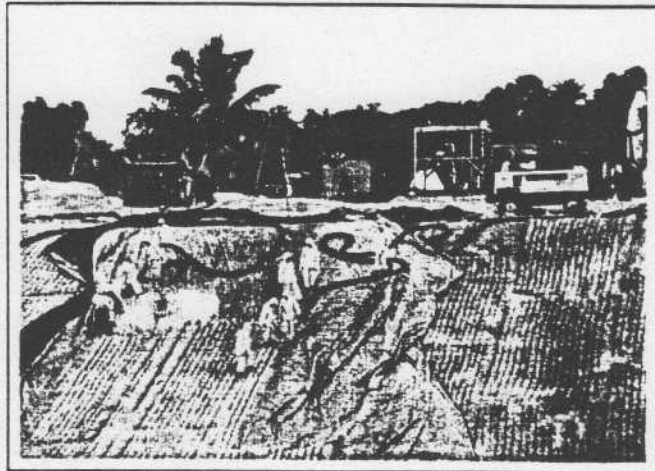
#### 1. Pneumatic filling

This system is very suitable where large areas of ProFix have to be installed. By means of a compressor and a sandhopper with feeder, the sandfill is blown through a flexible hose into the ProFix-tubes.

#### 2. Dry filling

This system is suitable for jobs where large areas can be filled in the dry simultaneously by a great number of labourers.

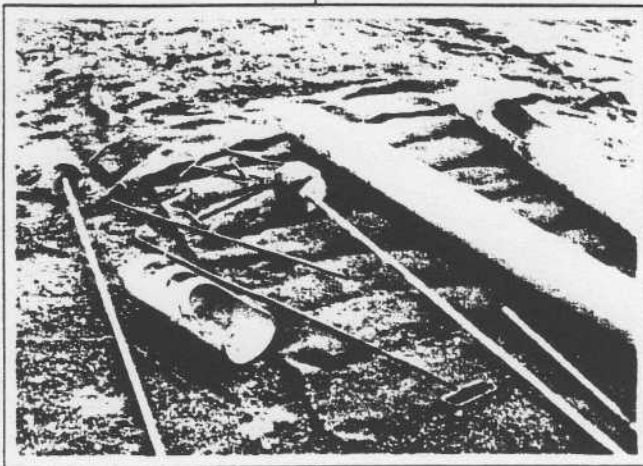
A PVC-pipe is inserted into the ProFix-tube, sand is dropped through the fill-opening in the pipe and subsequently rammed down with a concrete rammer. The advantage of the ramming is that the sand ballast inside the ProFix is reasonably compacted.



Sand filling operation (Air compressor method)



Sand filling operation (Rammer method)



Sand filling operation (Water method)

#### 3. Wet filling

The wet-filling system is similar to the dry-filling method with the rammer but here the sand is being washed down by a waterjet. The wet filling provides a more continuous process with a well compacted sand ballast inside the ProFix.

#### Anchoring

When used on steep slopes or in areas with strong currents or fluctuating water levels it is advised to anchor the mats on top of the slope in a trench. After backfilling the trench the developing vegetation will protect and hide the build-in anchor

Equipments for sand filling: plastic tube, metal hooks, concrete rammer with pipe casted in.



Anchoring back of ProFix Mattress

A PENANCE C

**APENDICE D**

**Terminos de Referencia de la misión**

# TERMINOS DE REFERENCIA

Proyecto : Estudios técnicos del Río PILCOMAYO

## 1. Marco General

El río Pilcomayo nace en la Cordillera de los Andes, en territorio boliviano. Luego de recorrer unos 500 Km de zona montañosa, penetra en la planicie del Gran Chaco en las proximidades de la ciudad de Ybybobo, Bolivia. Hasta el denominado punto trifinio - frontera trinacional- el cauce del río es el límite fronterizo entre Argentina y Bolivia y, a partir de dicho sitio, entre Argentina y Paraguay.

Durante los últimos cincuenta años -a partir de 1944- aproximadamente 300 Km del cauce natural del río han sido totalmente colmatados y taponados por sedimentos (50 millones de m<sup>3</sup> /año)

El retroceso del cauce, por un lado, ha desencadenado una acelerada transformación de las condiciones naturales en una vasta zona, de una gran importancia económica y ecológica, pues ella forma parte de una ecoregión de características sumamente peculiares y alberga productivos asentamientos ganaderos. Por otro lado, ha impuesto al Paraguay y a Argentina el problema de la distribución de las aguas del río en el punto trinacional del cauce.

La revitalización del río y el mantenimiento de los ecosistemas naturales y antrópicos que están dentro de su área de influencia, necesitan un sistema de control de las aguas en el punto terminal del cauce.

Sin la intervención humana, la distribución se produce en forma aleatoria, en función a la topografía y las condiciones locales, lo cual ha generado ya divergencias entre ambos países. El sistema propuesto percibe, en consecuencia, una doble finalidad :

1. la atenuación del retroceso del cauce del río Pilcomayo
2. la distribución equitativa de sus aguas entre ambos territorios.

La atenuación del retroceso será obtenida utilizando la metodología denominada "colmatación controlada". La aplicación de esta metodología supone derivar las aguas con suficiente velocidad en tal forma que lleven consigo los sedimentos y que la deposición de los mismos se produzca principalmente fuera del cauce natural. Al evitarse que la mayor parte de los sedimentos queden dentro del cauce, se obtiene una atenuación del proceso de colmatación.

En consecuencia, para lograr este objetivo se dispondrán amplios CANALES DE ENTRADA en ambas márgenes hasta conectarlos con las zonas de bañados y esteros aledaños que puedan recibir los sedimentos. La metodología es dinámica puesto que, luego de cada crecida, hay que acondicionar los canales de entrada y las conducciones para recibir la próxima crecida. De allí que se contemple en el proyecto la adquisición de maquinarias especiales (anfdragas) capaces de operar la tarea de mover sedimentos y abrir canales.

La distribución equitativa de las aguas será realizada por medios de obras de control hidráulico -consistentes en VERTEDEROS para aguas mínimas, medias y máximas- distribuidos simétricamente en ambas márgenes.

Para posibilitar el funcionamiento de estos vertederos, las aguas, serán conducidas hacia ellos por medio de un DIQUE DISTRIBUIDOR, ubicado en una zona en donde la topografía del terreno permite su construcción sin alterar el escurrimiento ni provocar inundaciones adicionales a las ya producidas en forma natural.

Este terraplén, de unos 20 Km de longitud y 2,5 m de altura promedio, será utilizado además como ITERCONEXION VIAL entre ambos territorios.

A fin de obtener un espejo de agua común que permita la distribución equitativa de las aguas, es necesario además la excavación de CANALES HIDROEQUILIBRANTES que atraviesan el cauce colmatado del Pilcomayo -ubicado por encima del nivel de los bañados- y comunican ambas márgenes.

El correcto funcionamiento del sistema exige además la construcción de ENDICAMIENTOS LATERALES de cierre en zonas bajas, a fin de impedir la fuga de agua , y de DIQUES DE PROTECCION DE LOS PUNTOS CRITICOS, sitios en los que el río amenaza con salirse enteramente de su curso actual.

El sistema de Control permitirá a ambos países "ganar tiempo" a fin de iniciar acciones de más largo plazo en la alta cuenca, origen de los sedimentos. La vida útil del sistema fue estimada entre 15 y 20 años.

## 2. Localización del proyecto

Las obras de protección de los puntos críticos se encuentran ubicadas, a 15 Km aguas arriba de los actuales canales experimentales entre Argentina y Paraguay, y a 20 Km aguas arriba del punto trifinio, en la frontera entre Argentina y Bolivia, respectivamente.

El terraplén del Sistema Interceptor se localizará en las cercanías de lo que fuera la localidad argentina de San Andrés, en las inmediaciones de Palmar Largo (Argentina), en donde están ubicados los pozos petrolíferos de la Provincia de Formosa, y la Estancia Buenos Aires (Paraguay), 46 Km aguas abajo del punto de taponamiento actual (22° 41' 15" S / 62° 11' 30" W).

## 3. El objetivo de la misión

El proyecto se encuentra ahora en la etapa de estudios y elaboración del proyecto constructivo. Esta etapa, de una duración aproximada de 4 meses, está a cargo de los técnicos de las Comisiones Nacionales de Argentina y Paraguay, y cuenta con la participación de equipos de especialistas proporcionados por la Unión Europea.

El objetivo fundamental de la misión es :

- Colaborar con los responsables locales en la elaboración de los estudios y del diseño del proyecto constructivo.

Para alcanzar estos objetivos la misión debe lograr los objetivos específicos siguientes :

- enseñar a los técnicos locales las metodologías de utilización de la instrumentación específica proporcionada en el marco de la misión (Navstar GPS, Ecosonda, Total Station topográfica)
- definir conjuntamente con los ingenieros nacionales el diseño de las obras constructivas del dique distribuidor, del dique de cierre, de los canales de entrada, de los canales evacuadores de crecida, de los disipadores de energía, de los espigones correctores de cauces, y determinar los puntos críticos de posibles avulsiones.
- determinar las zonas de préstamo de los materiales de construcción y organizar las campaña geotécnica de medidas y investigaciones.
- designar las zonas de sedimentación (aguas arriba del taponamiento actual del río), las cuales determinan en principio la vida útil del proyecto, y analizar los aspectos generales siguientes :
  - zonas de divagación y de disipación
  - llanuras de inundación
  - ápice de desborde
  - aporte sólido y granulometría
  - análisis (en conjunto con la adquisición y procesamiento) de imágenes de satélite multispectrales
  - nuevos canales de entrada y áreas de deposición
- analizar las condiciones locales a fin d proponer las maquinarias de dragado más adaptadas; proponer planos de trabajo y metodología específica de excavación a los técnicos locales.
- analizar y determinar el impacto ambiental de las obras de hidráulica en particular y del proyecto en general.

#### 4. Composición, duración y organización de la misión

La misión, que se ejecutará en fases sucesivas, será compuesta por los especialistas siguientes:

##### - Primera Fase

- a) Ingeniero en Geodesia, Topografía, experto en DGPS.  
Duración : 3 semanas + tiempo para compra y recepción de los equipos
- b) Ingeniero experto en S.I.G.  
Duración : 3 semanas + una semana en Europa (informe)

La adopción de metodologías modernas basadas en la utilización de equipos de DGPS es necesario por las características difíciles del terreno remoto. Las estaciones de referencia se vincularán con mojones de los Institutos Geográficos. En forma complementaria se utilizarán la aerofotogrametría y las imágenes satelitales para elaborar los mapas básicos de la zona del proyecto.

- c) Geologo experto en fluvio-geomorfología/sedimentología y geotecnia  
**Duración : 4 semanas + una semana en Europa (informe)**

Con investigaciones, perforaciones y ensayos, las características del subsuelo siguientes deben ser determinadas :

- localización de las distintas zonas "litológicas" en los sitios de las infraestructuras.
- situación del subsuelo en función de la sobrecarga de los diques (permeabilidad, clasificación de los suelos, CBR, Proctor)
- designación de las zonas de sedimentación (aguas arriba del taponamiento actual).

Otros temas que deben ser tratados son:

- las zonas de divagación y de disipación
- las llanuras de inundación
- el ápice de desborde
- las características del aporte sólido
- las imágenes de los satélites

### Segunda fase

- d) Técnico experto en dragado especial, con amplia experiencia en obras de dragado en ríos y áreas pantanosas.  
**- Duración: Dos semanas**

Tareas:

- analizar las condiciones locales a fin de definir las características de las maquinarias, y las adaptaciones necesarias.
- definir la metodología de trabajo con la maquinaria propuestas.
- formar el personal local.

- e) Ingeniero experto en obras hidráulicas fluviales  
**- Duración: Un mes + dos semanas en Europa (Informe).**

Tareas:

Validación de los diseños existentes.  
Diseños de las obras de regulación

### Tercera fase.

- f) Experto en evaluación de impacto ambiental para las obras de hidráulicas.  
g) Experto en Agro-Forestería, gestión de recursos naturales con experiencia en EIA (Environmental Impact Assessment) para el proyecto global.

9) El calendario provisional de la misión prevé:

- un día completo de "briefing" en Bruselas para todos los expertos antes de la salida.
- El establecimiento de los informes y de los demás documentos, cuando proceda, deberán remitirse en "draft" a la Comisión Europea una semana antes del "debriefing" (un día completo) en Bruselas .
- remisión de los informes definitivos, quince días después del "debriefing" , en seis ejemplares y en lengua española.

**APENDICE E**

## MEMORANDUM DEL SISTEMA DE CONTROL DEL RÍO PILCOMAYO

Fecha: 15 de octubre de 1995

Participantes : Ing. Luis A. Meyer  
Ing. Hans van Duijne  
Ing. Oscar Camé  
Ing. Ma. del C. Alvarez

Durante la reunión del 28 de noviembre de 1994, se acordó diseñar el dique distribuidor con tres obras de control hidráulico para cada país:

- aguas mínimas hasta 25 m<sup>3</sup>/s, por una alcantarilla
- aguas medias hasta 75 m<sup>3</sup>/s, por un vertedero de fondo bajo
- aguas máximas hasta 2000 m<sup>3</sup>/s, por un vertedero de fondo más elevado

Desde el momento del proyecto anteriormente elaborado a la fecha, se dispone de más información (topografía de la traza y geotecnia) y teniendo en cuenta que se pretende aprovechar lo máximo posible del comportamiento hidráulico natural de los bañados y cañadas, se considera conveniente modificar las obras anteriormente proyectadas, de la siguiente manera:

*Realizar una única obra de control para aguas mínimas y medias ubicada dentro del área de drenaje natural de las mismas.*

*Ambas obras de control estarán interconectadas por un canal hidroequilibrante que funcionará sólo para este nivel de caudales (aguas mínimas y medias).*

*Las aguas máximas no tendrán en esta fase una estructura de control.*

*El terraplen previsto en el diseño anterior será substituido por un camino de acceso que preverá un tramo del mismo para el paso de las aguas máximas, alejado de las obras anteriormente mencionadas.*

Se llega a los siguiente criterios generales para cada país:

- una estructura con compuertas para las aguas mínimas (hasta 25 - 30 m<sup>3</sup>/s)
- un vertedero ubicado al lado de la obra anterior, para las aguas medias (hasta 150 - 200 m<sup>3</sup>/s)
- la regulación de estos caudales (hasta 200 m<sup>3</sup>/s) se hará con el auxilio de compuertas.
- las obras para los caudales máximos deben estar planificadas separadamente de las obras para aguas mínimas y medias separadamente de las obras para aguas mínimas y medias, puesto que las mismas requieren un mayor conocimiento del comportamiento del recinto como topografía, efecto de laminación, distribución entre ambos países, posibles lugares de fuga, etc.

- las vías de acceso a las obras de aguas mínimas y medias se planificarán cruzando el valle aprovechando las alturas naturales lo máximo posible, tomando en cuenta que serán atravesadas por las aguas máximas, en puntos a decidir. Las vías de acceso se construirán utilizando en lo posible el suelo del lugar y compactando con las máquinas de construcción. Las mismas servirán de terraplenes de prueba.
- incluir una compuerta dentro del canal hidroequilibrante para poder cerrar el canal durante aguas máximas, para evitar la erosión.
- es imprescindible realizar el monitoreo durante el periodo de crecidas del año hidrológico 1995/96.

Observación:

La distribución equitativa de las aguas máximas está condicionada asimismo por un estudio integral de todo el tramo del río desde Villamontes, a fin de ubicar con precisión los puntos de desborde existentes en el mismo y diseñar en consecuencia las obras de protección.

Asimismo deben evaluarse los usos consuntivos del agua que cada país realice para la compensación correspondiente.

Para criterios más detallados referirse al informe conjunto para la Comisión de la Unión Europea de Dr. M.A. Pool y Ing. J.D.G. van Duijne.