

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

## FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

Carrera De Ingeniería Civil

Informe Técnico Final De La Práctica Supervisada

Modalidad: Pasantía Rentada

Empresa: Electroingeniería S.a.

Título: Análisis De Datos Hidrológicos Y Topográficos  
Requeridos Para El Diseño Definitivo De La Presa  
Néstor Kirchner

Autor: Brünner, Raúl Rómulo  
Matrícula: 35.531.727  
Tutor: García, Marcelo  
Supervisor Externo: Serra, Débora



Córdoba, febrero de 2014



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a mi tutor Marcelo García por haberme ayudado en el desarrollo de la practica y contribuido en mi formación académica. También me gustaría agradecer a todo el equipo con el que trabaja durante la practica en ELECTRO INGENIERIA S.A. Entre estos destacar a mi supervisora externa Débora Serra, y a Luciana Degutis quien me brindo toda su colaboración en la elaboración de la practica, y a todos mis compañeros de trabajo que me brindaron todo su apoyo y conocimiento.

Considerando este informe como la actividad final de mi carrera, me gustaría agradecerles a todas y cada una de las personas que de una forma u otra me ayudaron a cumplir con este objetivo planteado:

- A mis padres por el esfuerzo inmenso que realizaron para permitirme estudiar, y por el apoyo constante e incondicional que me brindaron en todo momento durante mi carrera.
- A mis hermanos, Guli, Agustín, Bernardo y Francisco, que al igual que mis padres constituyen un apoyo permanente. Y a mi primo Tomas quien me ayudo en la compaginación del informe final.
- A todos mis amigos y amigas quienes siempre estuvieron a mi lado durante toda esta etapa de mi vida, por brindarme esas distracciones que tanto contribuyeron a que pudiera continuar con la carrera.
- A los docentes de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, que aportaron a mi formación profesional y humana.
- Finalmente quisiera agradecer a 4 personas en especial, quienes fueron los culpables de manera directa de que completara esta etapa de la manera en que lo logre. Ellos son Bruno Aiassa y Max Choquevilca, quienes fueron los principales responsables de que pudiera entregar y completar todos los trabajos durante mi carrera. A Juan Freiria quien fue el encargado de lograr que estudiara. Por ultimo a Rodrigo Winderholler quien me acompaño tantas veces al famoso kiosquito amarillo.

Ya la gloriosa que me acompaño en cada parcial y final desde el primer día.

---



**Nombre del autor:** BRÜNNER RAUL ROMULO

**Plan:** 2005

**Matricula:** 35.531.727

**Título del trabajo:** “ANALISIS DE DATOS HIDROLOGICOS Y TOPOGRAFICOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEFINITIVO DE LA PRESA NESTOR KIRCHNER”.

**Palabras claves:** Presas, Hidrología, Topografía y Aprovechamiento Hidroelectrico

### Resumen

La presa Presidente Dr. Néstor Kirchner, se encontrará localizada sobre el río Santa Cruz en la provincia de Santa Cruz (Argentina). Esta forma parte junto con la presa Gobernador Jorge Cepernic, del proyecto de aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz. El principal objetivo de estas presas es la producción de energía eléctrica. Actualmente esta obra se encuentra en la etapa de proyecto ejecutivo.

Para la realización de este proyecto se debieron recolectar y analizar todos los datos y antecedentes Topográficos y Hidrológicos, para realizar el diseño definitivo de la misma. Para estos análisis se realizaron modelos computacionales generados en HEC-RAS, con la utilización de sistemas informáticos.

Con este modelo se determinaran las curvas Cota-Vol del embalse de la presa, las erosiones generadas por la colocación de un puente provisorio, y los saltos reales con que dispondrá la central hidroeléctrica para la producción de energía eléctrica.

Para la determinación de la curva completa de Cota-Vol del embalse se analizo el embalse mismo de la presa y la influencia del lago Argentino en el mismo.

En el calculo de las erosiones se consideraron cinco geometrías y se optó por la que fuera menos desfavorable desde el punto de vista tanto de las erosiones producidas con de valor económico en su elaboración.

La obtención de la altura de los saltos consiguió mediante la modelación del canal de restitución a la salida de la sala de maquinas.

---



## **INDICE TEMÁTICO**

### **1. CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO**

<b>1.1 Introducción</b> .....	1
<b>1.2 Localización de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner</b> .....	1
1.2.1 Hidrografía de la zona .....	2
<b>1.3 Premisas para el diseño de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner</b> .....	5
<b>1.4 Descripción general de la presa</b> .....	6
<b>1.5 Objetivos de la práctica supervisada</b> .....	9
1.5.1 Objetivo general .....	9
1.5.2 Objetivos específicos .....	9

### **2. CAPÍTULO: RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES**

<b>2.1 Introducción</b> .....	10
<b>2.2 Antecedentes topográficos</b> .....	10
2.2.1 Cartas IGM .....	10
2.2.2 Batimetría y Topografía generada por CONSULAR .....	11
2.2.3 Aerofotografías .....	12
<b>2.3 Antecedentes hidrológicos</b> .....	14
2.3.1 Hidrología de pliego .....	14
2.3.2 Estudios de volúmenes generados por HIDROCUYO S.A. ....	16

### **3. CAPÍTULO 3: ELABORACIÓN DE LOS MODELOS COMPUTACIONALES**

<b>3.1 Introducción</b> .....	18
<b>3.2 Elaboración de la imagen 3D del area de estudio</b> .....	18
3.2.1 Restitución del relevamiento aerofotogramétrico .....	18
3.2.2 Elaboración de la imagen 3D del vaso de la presa en civilcad .....	19
3.2.3 Modelo hidráulico en HEC-RAS .....	21
3.2.3.1 Carga de datos en HEC-RAS .....	24

### **4. CAPÍTULO 4: CÁLCULO DE LOS VOLÚMENES DEL VASO DE LA PRESA**

<b>4.1 Introducción</b> .....	30
<b>4.2 Interpolación de las áreas del espejo de agua cada 1 m</b> .....	30
4.2.1 Cálculo de las áreas de los distintos niveles de pelo de agua .....	30
4.2.2 Cálculo de los volúmenes .....	31
<b>4.3 Influencia del Lago Argentino</b> .....	34



## **5. CAPÍTULO 5: EROSIONES ESTIMADAS POR LA PRESENCIA DEL PUENTE PROVISORIO DE LA PRESA PRESIDENTE DR. NÉSTOR KIRCHNER**

<b>5.1 Introducción</b> .....	36
<b>5.2 Conceptos básicos sobre erosiones fluviales</b> .....	36
5.2.1 Erosión General .....	38
5.2.2 Erosión por Estrechamiento .....	39
5.2.3 Erosión Local .....	39
5.2.4 Generadas por las pilas de un puente .....	40
5.2.5 Generado por los estribos del puente .....	42
<b>5.3 Cálculo de las Erosiones</b> .....	43
5.3.1 Calculo del $D_s$ .....	43
5.3.2 Erosiones generales .....	44
5.3.3 Erosiones locales generadas por las pilas .....	45
5.3.4 Erosiones locales generadas por los estribos .....	46

## **6. CAPÍTULO 6: DETERMINACIÓN DE LOS SALTOS PARA LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA**

<b>6.1 Introducción</b> .....	47
<b>6.2 Descripción del canal de restitución</b> .....	47
<b>6.3 Modelo del canal en HEC-RAS</b> .....	47

## **7. CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES**

<b>7.1 Conclusiones técnicas</b> .....	52
<b>7.2 Conclusiones de la Práctica Supervisada</b> .....	53



## INDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - Ubicación de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner en el río Santa Cruz.....	1
<b>FIGURA 2</b> - Esquema del río Santa Cruz y sus afluentes.....	4
<b>FIGURA 3</b> - Planta general de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner en su ubicación definitiva. ....	6
<b>FIGURA 4</b> - Partes principales de una turbina Francis. ....	8
<b>FIGURA 5</b> - Batimetría realizada por CONSULAR en el tramo de la presa, planos 1 y 2....	11
<b>FIGURA 6</b> - Batimetría realizada por CONSULAR en el tramo de la presa, planos 3 y 4....	11
<b>FIGURA 7</b> - Topografía generada por CONSULAR en el sector de la presa, con la planta general de la presa. ....	12
<b>FIGURA 8</b> - Restitución aerofotogramétrica, SRTM. ....	13
<b>FIGURA 9</b> - Curvas de nivel generadas con SRTM (PLANO 1). ....	13
<b>FIGURA 10</b> - Curvas de nivel generadas con SRTM (PLANO 2).....	13
<b>FIGURA 11</b> - Ubicación de la estación Charles Fuhr y de la estación Calafate. ....	14
<b>FIGURA 12</b> - Caudales medios mensuales, módulo e hidrograma medio anual estación Charles Fuhr. ....	15
<b>FIGURA 13</b> - Serie de datos de caudales diarios de la estación Charles Führ 1955-2007 (fuente: SSRH) ....	15
<b>FIGURA 14</b> - Uno de los planos del relevamiento Aerofotogramétrico con las curvas de nivel cada 5 m, las que se utilizaron son las curvas marcadas y reemplazadas por polilíneas. ....	19
<b>FIGURA 15</b> - Altimetría completa del vaso de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner.....	19
<b>FIGURA 16</b> - Imagen 3D del vaso de la presa generada con CIVIL CAD. ....	20
<b>FIGURA 17</b> - Presa de geometría simplificada incorporada en la imagen 3D. ....	21
<b>FIGURA 18</b> - Imagen 3D del sector de la presa generada con CIVIL CAD, utilizando la topografía de CONSULAR.....	22
<b>FIGURA 19</b> - Geometría del río Santa Cruz en HEC-RAS. ....	24
<b>FIGURA 20</b> - Ventana de HEC-RAS de un perfil del río. ....	25
<b>FIGURA 21</b> - Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal medio anual ( 700 m <sup>3</sup> /s) . ....	25
<b>FIGURA 22</b> - Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal máximo anual (1400 m <sup>3</sup> /s). ....	26
<b>FIGURA 23</b> - Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal de recurrencia de 25 años (2100 m <sup>3</sup> /s). ....	26



<b>FIGURA 24</b> - Perfil longitudinal del río Santa Cruz en el tramo de la presa.	27
<b>FIGURA 25</b> - Curva H–Q de una sección localizada a 870 m aguas abajo del eje de la presa.	28
<b>FIGURA 26</b> - Curva H–Q de una sección localizada a 750 m aguas arriba del eje de la presa.	28
<b>FIGURA 27</b> - Curva H–Q de una sección localizada en el eje de la presa.	28
<b>FIGURA 28</b> - Curva H-Q de una sección localizada a 1667 m aguas abajo del eje de la presa, sección propuesta para el puente provisorio.	29
<b>FIGURA 29</b> - Curva H-Vol del vaso de la presa.	33
<b>FIGURA 30</b> - Curva H-Vol del vaso de la presa comparando con los datos obtenidos por IECI y Agua y Energía.	33
<b>FIGURA 31</b> - Curva Cota-VOL de la presa que aportaría el lago.	35
<b>FIGURA 32</b> - Curva Cota-Vol completa que incluye los volúmenes aportados por el lago Argentino.	35
<b>FIGURA 33</b> - Dimensiones de una partícula aleatoria del lecho del río.	37
<b>FIGURA 34</b> - Corte longitudinal esquemático de un cauce.	38
<b>FIGURA 35</b> - Erosión General ( $Qs_2 > Qs_1$ ) entre dos secciones del río dadas, Q si es caudal de sedimentos transportados.	38
<b>FIGURA 36</b> - Erosión por Estrechamiento.	39
<b>FIGURA 37</b> - Distintas turbulencias generadas por una pila de puente en el flujo del río.	41
<b>FIGURA 38</b> - Patrones de flujo y erosión en un estribo corto.	42
<b>FIGURA 39</b> - Patrones de flujo y erosión en un estribo largo.	43
<b>FIGURA 40</b> - Curva granulométrica del yacimiento cercano al sector de emplazamiento de la presa.	44
<b>FIGURA 41</b> - Modelo computacional generado en HEC-RAS del canal de restitución a la salida de la sala de maquinas.	48
<b>FIGURA 42</b> - Ventana del HEC-RAS donde se cargaron las condiciones de borde.	48
<b>FIGURA 43</b> - Ventana del HEC-RAS en la que se ingresan los datos de la curva H-Q de la sección que se utilizara como condición de borde.	49
<b>FIGURA 44</b> - Curvas en la sección aguas arriba del canal y curva de IATASA.	50



## **INDICE DE TABLAS**

<b>TABLA 1</b> - Áreas y Volúmenes calculados por HIDROCUYO S.A.	17
<b>TABLA 2</b> - Puntos de un perfil transversal de una sección del río generada en EXCEL.	23
<b>TABLA 3</b> - Áreas de los distintos niveles del vaso de la presa Néstor Kirchner.	31
<b>TABLA 4</b> - Volúmenes acumulados del vaso de la presa.	32
<b>TABLA 5</b> - Volúmenes aportados por el lago Argentino al vaso de la presa.	34
<b>TABLA 6</b> - Distintas geometrías ensayadas de los puentes provisorios.	36
<b>TABLA 7</b> - Cálculos de erosiones generales mediante el método de Blench.	45
<b>TABLA 8</b> - Cálculos de erosiones locales generadas por las pilas del puente, por la ecuación de Richardson.	46
<b>TABLA 9</b> - Cálculos de erosiones locales generadas por los estribos, de margen derecha a izquierda por el método de Artamanov.	46
<b>TABLA 10</b> - Curvas H-Q del canala de restitución en la sección a la salida de la sala de maquinas.	50

# **CAPÍTULO I**

## **Marco Referencial Del Trabajo**



## 1.1 INTRODUCCIÓN

La Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner junto con la Presa Gobernador Jorge Cepernic, serán las presas que se construirán en la provincia de Santa Cruz. Estas serán parte del emprendimiento para el aprovechamiento hidroeléctrico del río. Se estima que las mismas generaran una potencia combinada de 1730 MW. Está previsto comenzar su construcción en el 2014. El proyecto de la misma cuenta con la elaboración de otra presa sobre el mismo río, la Presa Gobernador Jorge Cepernic. En la actualidad la obra se encuentra en estado de proyecto ejecutivo.

El proyecto, tanto la ingeniería como el desarrollo de las obras ha sido licitado a la UTE (Unión Transitoria de Empresas) conformada por Electro Ingeniería S.A. y por la empresa china Gezhouba Group. El mismo tendrá un financiamiento con capitales extranjeros, realizado por inversores chinos.

El principal uso que se le brindará a estas presas será el aprovechamiento hidroeléctrico del Río Santa Cruz.

## 1.2 LOCALIZACIÓN DE LA PRESA PRESIDENTE DR. NÉSTOR KIRCHNER.

La Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner se encuentra en la zona de la Patagonia argentina, en la provincia de Santa Cruz, ubicada sobre el Río Santa Cruz.

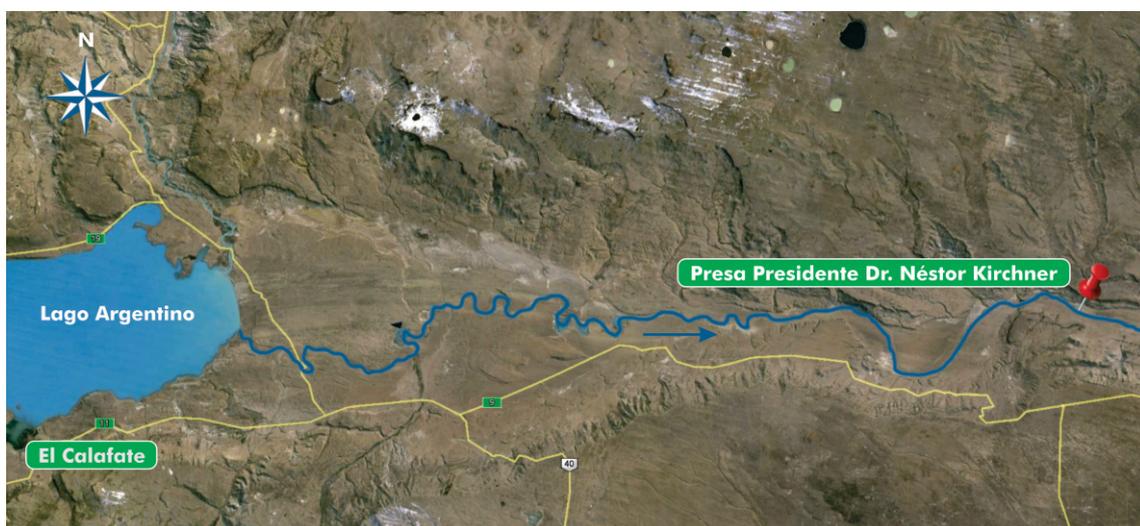


FIGURA 1 - Ubicación de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner en el río Santa Cruz.



El sitio del cierre de la se ubica aproximadamente a 250 km de la desembocadura del río Santa Cruz, y a unos 170 km al Este de la localidad de El Calafate, el principal centro poblado más próximo al sitio de cierre (Ver figura 1).

La zona donde se emplazara la presa es una zona despoblada, por lo que la generación del embalse no conllevara a la inundación de ningún poblado, por lo que no será necesario ningún tipo de reubicación.

### **1.2.1 Hidrografía de la zona**

El río Santa Cruz es emisario directo del lago Argentino y recorre hasta su desembocadura unos 383 km, con una pendiente media de 0,53 m/km. El lago Argentino recibe las aguas del lago Viedma, ubicado 55 km al norte del mismo, a través del río La Leona que hace su aporte unos 5 km al norte del nacimiento del río Santa Cruz (ver figuras 1 y 2). Para describir la cuenca se puede subdividir de la siguiente manera:

- Subcuenca del Lago Viedma;
- Subcuenca del Lago Argentino;
- Río Santa Cruz, emisario final;

A continuación se detallaran las dos principales cuencas que afectan de manera directa a la presa, la subcuenca del Lago Argentino y el mismo Río Santa Cruz. La subcuenca del Lago Viedma no afectara de manera directa el funcionamiento de la presa ya que este desemboca en el Lago Argentino el cual sirve como regulador del mismo.

#### Río Santa Cruz

Este nace en el margen oriental del lago Argentino. En este sector el lecho del río tiene un ancho medio de 150 m y su valle, flanqueado por altas barrancas, alcanza los 3000m. Inmediatamente, aguas abajo, se estrecha hasta alcanzar los 500 m.

En su cuenca superior el río Santa Cruz alterna sectores en que corre encajonado presentando algunos rápidos sobre lechos rocosos, con otros en los que su valle se amplía y el curso aumenta su sinuosidad. En la cuenca inferior se este torna muy meandroso, con escasos tramos rectos en su recorrido pero sin bifurcaciones. Desemboca en Río Gallegos



(brazo sur), donde se ubican numerosas islas y bancos fijos. La influencia de la marea alcanza hasta 57 km aguas arriba de la desembocadura.

A aproximadamente 26 km de su nacimiento, el río Santa Cruz recibe por margen derecho al arroyo bote. Aguas abajo recibe por margen derecho pequeños cursos que descienden de las barrancas. Entre estos cursos hacen su aporte los cañadones del Mosquito, de Vera y el arroyo El Lechuzo. Por el mismo margen confluyen el arroyo de las cuevas, emisario del arroyo Cordero, y los cañadones del Yaten Guajen, el kolian Kaike y Grande.

El Río Santa Cruz presenta los máximos caudales medios en el mes de marzo, con un promedio del 1278 m<sup>3</sup>/s. El menor promedio corresponde al mes de septiembre, con 278 m<sup>3</sup>/s.

#### Subcuenca del Lago Argentino

El Lago Argentino tiene una longitud de oeste a este de 65 km y de 25 km de norte a sur. Ocupa una superficie aproximadamente e 1600 km<sup>2</sup> y su profundidad varia de 35 m en la margen sur hasta mas de 300 m en la margen norte frente al cerro Avellaneda, el fondo del lago esta constituido por arena y limo. El agua es limpia fría y dulce.

Su cuenca de aporte es sumamente articulada e irregular. Al oeste se extienden los glaciares, que aportan sus aguas de fusión a través de los distintos brazos de este lago. El brazo norte recibe por su extremo septentrional al emisario de los lagos Pearson y Tannhäuser. Por su extremo occidental recibe los aportes del brazo Upsala del lago Onelli y del canal Spegazzini, que llevan las aguas de los glaciares homónimos. En el brazo sur hacen su aporte el lago roca, los ríos Cachorro y Camiseta, y el emisario del lago Frías que recibe las aguas de fusión del glaciar homónimo. Aguas abajo, se encuentra el brazo Rico, siguiendo el sentido de escurrimiento aparece el canal de los Témpanos, finalmente las aguas fluyen por bahía Tranquila hasta alcanzar el Lago Argentino.

El glaciar Perito Moreno (250 km<sup>2</sup>) presenta una altura de 60 m sobre el nivel del lago, y es famoso a nivel mundial por provocar el endicamiento de las aguas del brazo Rico. Cuando este glaciar alcanza la península de Magallanes, la salida de las aguas hacia el canal de los témpanos queda obstruida hasta que la presión de estas forma un túnel por debajo del glaciar cuyo frente se desmorona tiempo después. Este fenómeno de impactante belleza



se produjo entre los años 1935 y 1988 con una recurrencia aproximada de 4 años. El ultimo desmoronamiento se produjo en marzo del 2006.

En el estudio de caudales presentes en pliego se procedió a estudiar niveles del Lago Argentino, caudales del río Santa Cruz y sus correlaciones.

Las series de registro de caudales recopilados en la estación Charles Fuhr se definiría como de origen glaciar admitiéndose una corrección por la contribución de la precipitación extra glacial. En los registros hidrográficos continuos de caudales procesados es evidente el fenómeno de fusión de hielo y la nieve, y su dependencia de la energía solar (curvas regulares con máximos de verano y mínimos de invierno).

El ordenamiento homogéneo de las hidrogramas para todas las posibilidades de ocurrencia de los caudales medios mensuales, muestra un régimen de gran regularidad. Y debe señalarse q los mayores aprontamientos de máximos y mínimos que se relevan para el rio Santa Cruz se deben al peso que sobre los valores extremos ejerce el fenómeno periódico de obstrucción y rotura del glaciar Perito Moreno. Este hecho periódico particular en el lago argentino, el cual el bloqueo del brazo sur, y su posteriori liberación por el colapso de la barrera de hielo, provoca el vertimiento violento de las aguas retenidas hacia el cuerpo principal del lago, motivando una brusca variación del nivel del espejo lacustre y una onda subsiguiente de caudales máximos en el río Santa Cruz.

Este fenómeno se registra en el hidrograma del rio con un pico claramente definido de ocurrencia mas o menos regular a intervalos variables del orden de 4 años.

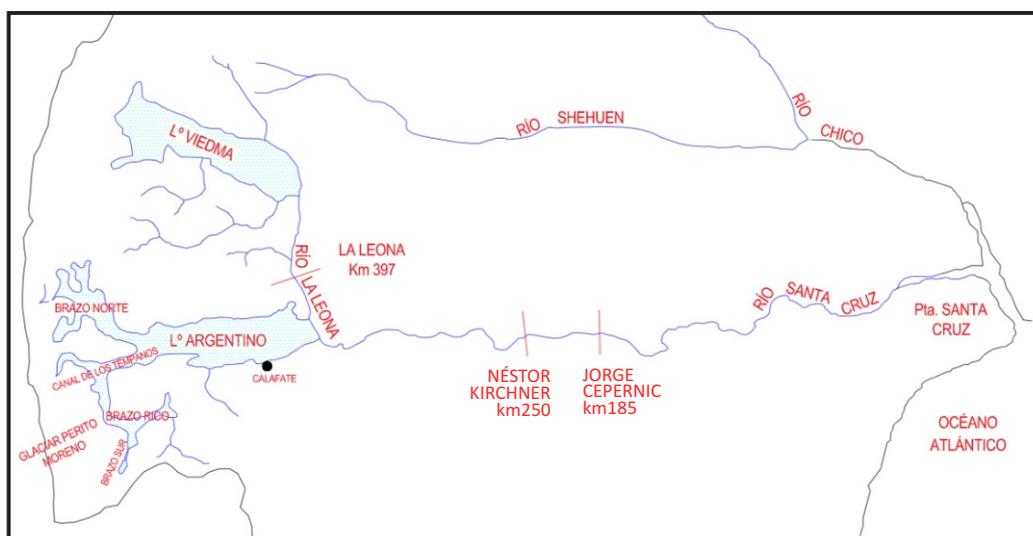


FIGURA 2 – Esquema del río Santa Cruz y sus afluentes



### 1.3 PREMISAS PARA EL DISEÑO DE LA PRESA PRESIDENTE DR. NÉSTOR KIRCHNER.

El grupo consultor encargado de realizar el proyecto ejecutivo y la ingeniería de detalles del aprovechamiento hidroeléctrico del río Santa Cruz tomo en cuenta como premisas los siguientes criterios básicos:

1. El nivel Máximo Extraordinario del embalse de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner no superará la máxima cota de oscilación (depurada de eventos por rotura del glaciar Perito Moreno) del Lago Argentino.
2. La operación de este embalse garantizará que su nivel acompañe las oscilaciones naturales del Lago Argentino (depurada esta de los eventos de rotura)
3. El sistema garantizará un caudal mínimo que sustente los ecosistemas generados en torno al mismo (180 m<sup>3</sup>/s).
4. Se garantizará que el caudal permita las migraciones reproductivas de las especies ictícolas que actualmente se dan en el tramo fluvial considerado.

Para considerar las dos primeras restricciones se realizaron dos acciones principales una estructural y una del tipo operativa:

- a. Se generó en la presa Presidente Dr. Néstor Kirchner, un vertedero de labio fijo que evite posibles operaciones que pudieren afectar al Lago Argentino.
- b. Se fijo que los niveles de operación de este embalse no deberán superar los niveles máximos diarios históricos depurados de eventos de rotura, según análisis realizado por series de Fourier.

El caudal mínimo ecológico se fijo en 180 m<sup>3</sup>/s para cumplir con la premisa 3. Para turbinar este caudal ecológico deberán proveerse grupos a tal fin que, manteniendo eficiencias de generación hidroeléctrica aceptables, puedan turbinarlos en forma continua sin daños a la maquinaria.

Para cumplir con la premisa 4 se consideró un caudal de 7 m<sup>3</sup>/s, a ser empleado en las escalas de peces.

Para el dimensionado del vertedero se estimaron las manifestaciones extremas probables del hidrograma anual. Se considero que para el evento extremo de diseño se tomara el caudal correspondiente a un periodo de recurrencia de diez mil años. Asimismo, se



considero adecuado realizar la extrapolación estadística de la serie disponible aplicando la distribución Gumbel. Esto se hizo con la salvedad de realizar la extrapolación estadística de la tendencia de los eventos de menor recurrencia. Esto resulta en un caudal de 4100 m<sup>3</sup>/s y su correspondiente hidrograma extremo.

#### 1.4 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PRESA

El ancho de la obra de cierre es de aproximadamente 2830 metros y las obras principales tales como el vertedero, toma para la central, conducciones, descargas y central hidroeléctrica, se emplazan en el margen izquierdo (ver figura 3) por encontrar condiciones geotécnicas y topográficas más favorables que en el margen opuesto y que en el valle del río.

Los vertederos estarán constituidos por dos conjuntos:

- Vertederos a descarga libre: constan de dos vanos de 12 m cada uno, la cota de labio corresponde a 178,90 m que es la cota máxima de la curva media de niveles en el Lago Argentino.
- Vertederos con compuertas: constan de seis vanos de 12 m cada uno, la cota de labio es de 172,60 m y la altura máxima extraordinaria es de 181,66 m. Nivel máximo registrado con eventos de rotura en el Lago Argentino.

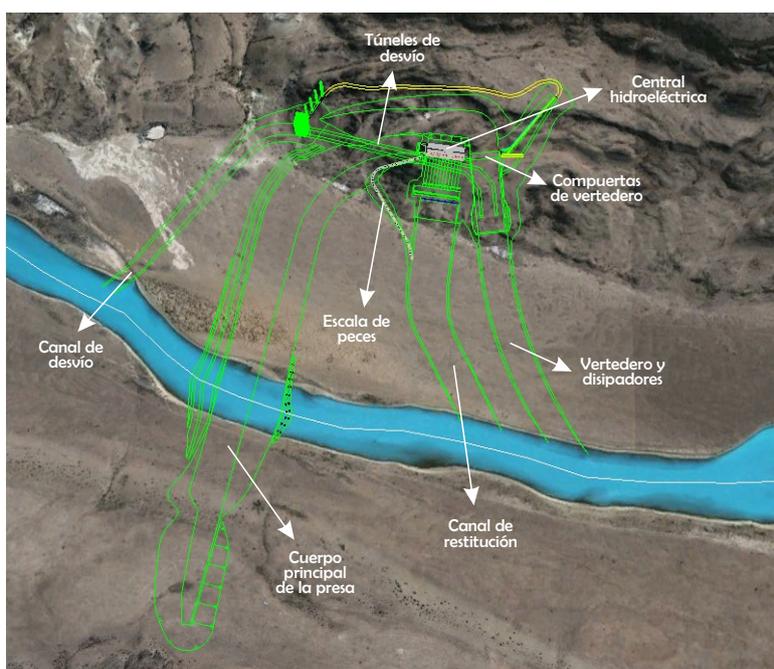


FIGURA 3 – Planta general de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner en su ubicación definitiva.



El objetivo principal de esta presa es la producción de energía hidroeléctrica, la cual se realizará mediante una central hidroeléctrica ubicada en el margen izquierdo de la presa, la cual tendrá un equipo generador de 6 turbinas Francis de eje vertical con una potencia máxima continua de 190 MW cada una.

### Turbinas Francis

Las turbinas Francis son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los dos metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea ampliamente la más usada en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica en centrales hidroeléctricas.

Los componentes principales de una turbina Francis (ver figura 4), en el orden del paso del agua son: el caracol, el distribuidor, el rodete móvil y el tubo de desfogue.

- La *carcasa, caja espiral o caracol*, es un ducto alimentador, de sección generalmente circular y diámetro decreciente, que circunda al rotor, procurando el fluido necesario para la operación de la turbina. Generalmente es de lámina de acero. Del caracol pasa el agua al distribuidor guiada por unas paletas direccionales fijadas a la carcasa, que forman los portillos de acceso.
- El *distribuidor* lo constituye una serie de alabes directores en forma de persiana circular, cuyo paso se puede modificar con la ayuda de un servomotor, lo que permite imponer al fluido la dirección de ataque exigida por el rodete móvil y además regular el gasto de acuerdo con la potencia pedida a la turbina, desde valores máximos a un valor cero en posición cerrada. En el distribuidor se transforma parcialmente la energía de presión en energía cinética.
- El *rodete móvil o rotor* está conformado por los propios alabes, los cuales están engastados en un plato perpendicular al eje de la máquina, de cuyo plato arrancan siguiendo la dirección axial, tomando en forma progresiva un alabeo y abriéndose hacia la dirección radial, con lo que el conjunto presenta forma abocardada, tanto más acentuada cuanto mayor sea la acción axial exigida a la turbina. Los álabes se ciñen en su extremo final por un zuncho en forma de anillo para dar la debida rigidez al conjunto.



- El tubo de desfogue o difusor da salida al agua de la tubería y al mismo tiempo procura una ganancia de carga estática hasta el valor de la presión atmosférica, debido a su forma divergente. Se tiene así, a la salida del rotor, una presión más baja que la atmosférica y, por tanto, un gradiente de presión dinámica más alta a través del rodete. Su forma puede ser simplemente cónica o más compleja cuando es acodada. La forma acodada permite colocar el rodete móvil más próximo al nivel de aguas abajo, exigencia que se tiene particularmente en las máquinas de velocidad específica alta, con mucha acción axial. Que se emplean con caudales más grandes.

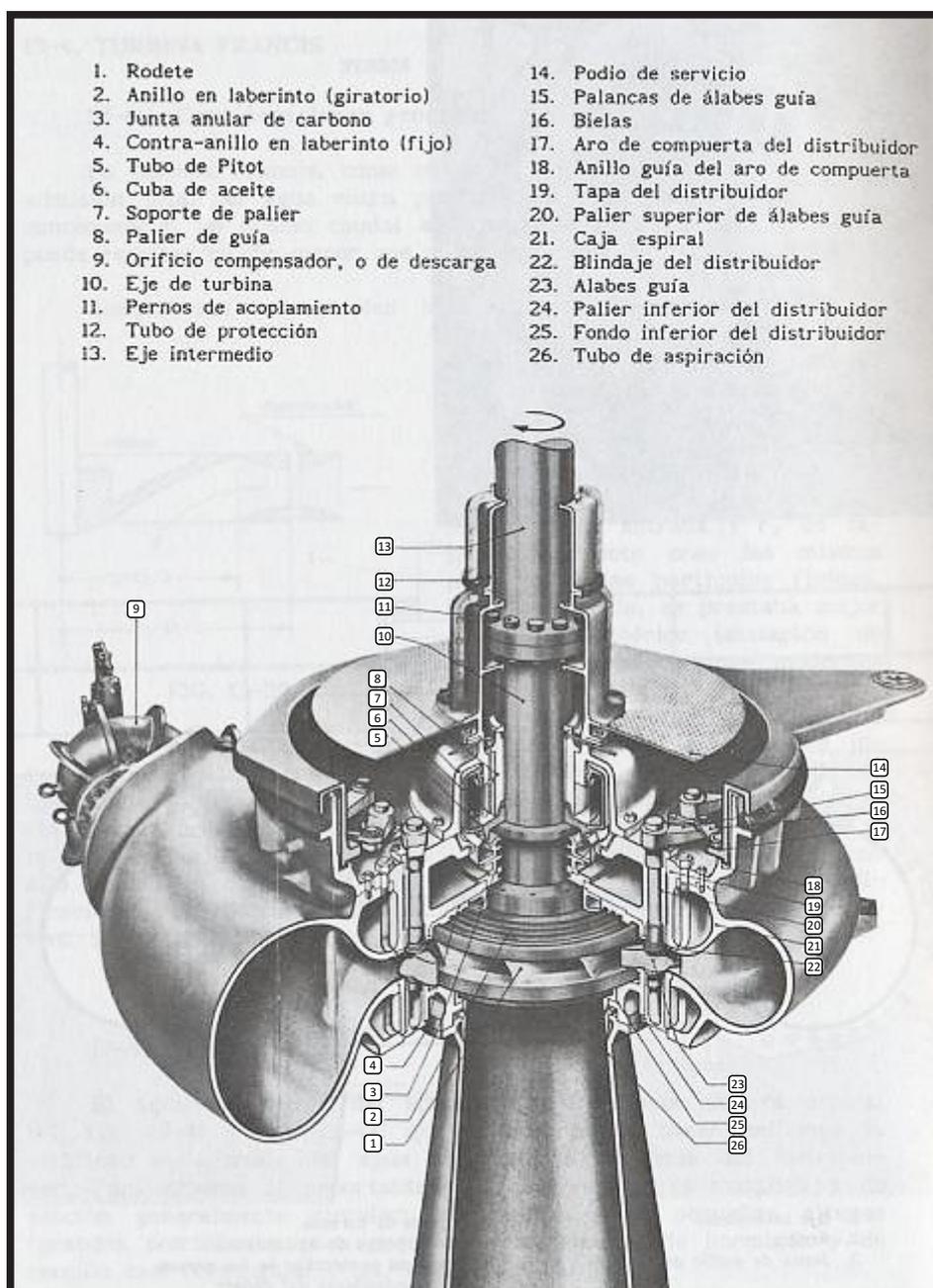


FIGURA 4 – Partes principales de una turbina Francis



## 1.5 OBJETIVOS DE LA PRACTICA SUPERVISADA

### 1.5.1 Objetivo general

El principal objetivo de esta practica supervisada es el analisis de los datos hidrológicos y topográficos requeridos para el diseño definitivo de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner.

Este objetivo se desarrolla en el roll de pasante rentado en la empresa Electro Ingeniería S.A. formado parte del grupo de trabajo del área de ingeniería civil de la misma.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Recopilar y analizar los antecedentes topográficos y hidrológicos necesarios para el desarrollo de la presa.
- Generar mediante un sistema informático del río Santa Cruz del tramo de la presa, un modelo computacional calibrado y confiable que represente el funcionamiento hidráulico del Río Santa Cruz, sobre el cual poder trabajar y obtener datos fiables del mismo.
- Completar la curva altura-volumen que representará la variación de los volúmenes de agua en relación a la altura del vaso de la presa. Los antecedentes disponibles de pliego detallaban los volúmenes desde la altura de cresta de vertederos, sin contemplar los valores hasta la cota inferior del vaso. Esta relación altura-volumen será utilizado entre otras cosas para determinar los tiempos de llenado del embalse y de esta manera planificar la obra.
- Determinar las posibles erosiones, tanto locales como generales, que se puedan generar en el cauce del río Santa Cruz a causa de la colocación del puente provisorio. Para con estas poder realizar un análisis de las distintas geometrías posibles del puente para poder compararlas y poder determinar cual será la mas favorable.
- Determinar la curva H-Q en la sección en el canal de restitución a la salida de la sala de máquinas. Para poder determinar el verdadero desnivel entre el nivel del embalse y la salida de la sala de máquinas, y así poder obtener el salto y determinar la potencia de la estación generadora.

# **CAPÍTULO II**

## **Recopilación De Antecedentes**



## **2.1 INTRODUCCIÓN**

Todos los antecedentes disponibles se adjuntaban al pliego licitatorio de la obra, así estos no podían ser modificados ni alterados. Estos antecedentes eran estudios realizados en las etapas de factibilidad del proyecto, sobre los cuales se pudo trabajar e incorporar nuevos datos obtenidos por la empresa.

Para la realización del trabajo se dispuso de 2 tipos de antecedentes: topográficos e hidrológicos. Los cuales fueron realizados por Agua y Energía entre 1976 y 1978, y por la UTE generada por ESIN S.A. y IATASA en el 2007, e HIDROCUYO S.A. en conjunto con INCONASS.A. y INGE.S.A.

## **2.2 ANTECEDENTES TOPOGRÁFICOS**

La información topográfica brindada en la documentación técnica del proyecto contaba con 3 fuentes de información distintas: cartas IGM, UN relevamiento planialtimétrico de ESIN S.A. – IATASA y la consultora CONSULAR, y una restitución aerofotogrametría IFTA.

### **2.2.1 Cartas IGM**

Se disponía de las cartas IGM (Instituto Geográfico Militar) realizadas en el año 1947 realizadas en proyección Gauss-Krüger faja 2 pero con un datum local. La cartografía de detalle existente se basa en su mayor parte en relevamientos expeditivos y se resume en las planchetas IGM a escala 1: 1.000.000 con curvas de nivel cada 25 m.

Estas cartas brindadas por el cliente en el pliego, fueron digitalizadas para poder ser utilizadas. Lo cual llevó a una disminución de calidad en los planos a causa de la digitalización, generando una pérdida de precisión en la información.

Estas abarcaban la faja central de la cuenca desde el estuario hasta el espejo principal del Lago Argentino.



### 2.2.2 Batimetría y topografía generada por consular

Aparte de trabajar con la restitución de las cartas IGM se trabajó con información generada por CONSULAR, la cual fue utilizada en los estudios previos de la obra. La batimetría generada por consular solo abarcaba un tramo de 3,2 km, donde va a estar situada la presa; 1,25 km aguas arriba de la presa y 1,95 km aguas abajo. Así esta batimetría proporcionó información de gran precisión pero en un tramo muy pequeño.

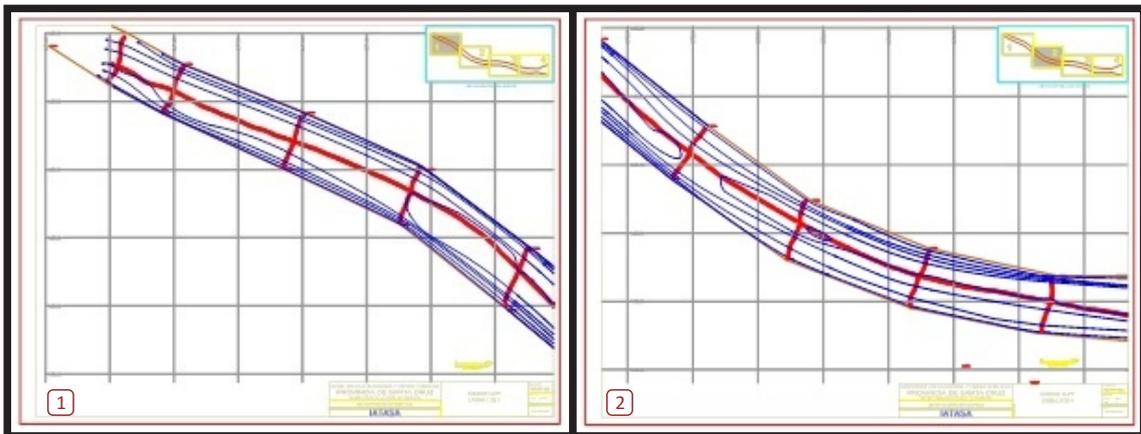


FIGURA 5 – Batimetría realizada por consular en el tramo de la presa, planos 1 y 2.

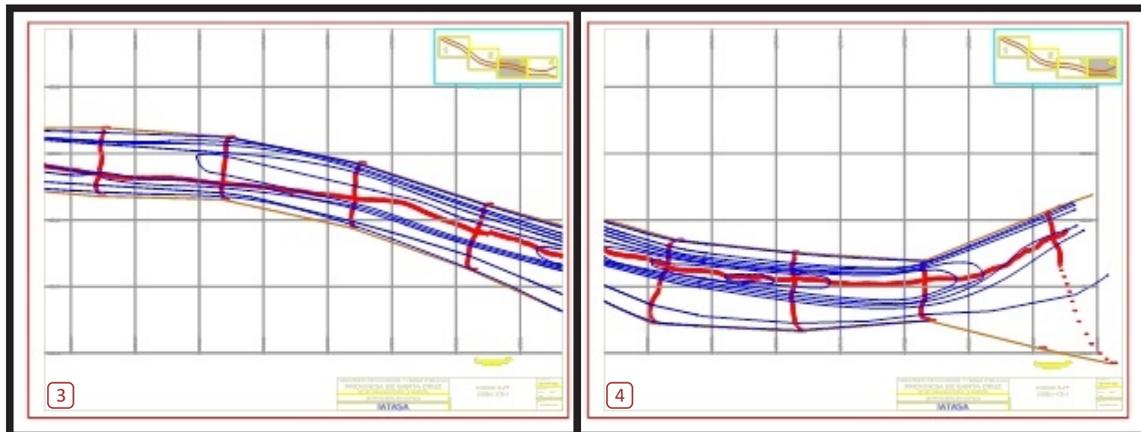


FIGURA 6 – Batimetría realizada por consular en el tramo de la presa, planos 3 y 4.

Esta batimetría se encontraba complementada con una altimetría del terreno aledaño al río a lo largo del mismo tramo en que se realizó la batimetría. Esta altimetría era de una precisión mucho mayor que la obtenida en las cartas IGM pero, al igual que la batimetría, era muy reducida. La altimetría incluía estudios geológicos y excavaciones.

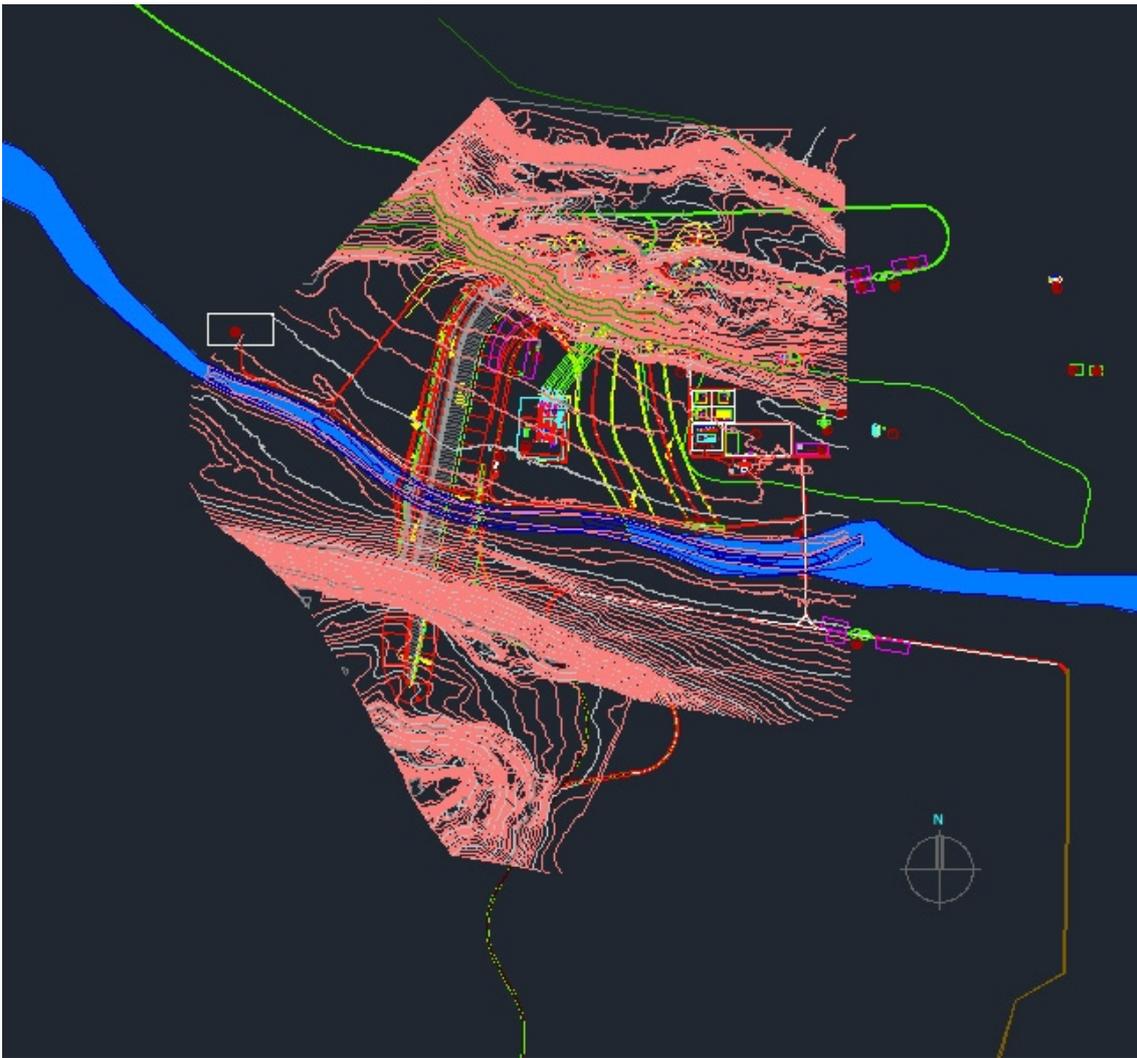


FIGURA 7 – Topografía generada por CONSULAR en el sector de la presa, con la planta general de la presa

### 2.2.3 Aerofotografías

En los estudios realizados por Agua y Energía Eléctrica en 1976-1978, se realizó la Restitución Aerofotogramétrica de una amplia zona que abarcaba los vasos y cierres de las obra de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner.

Este material realizado por IFTA ( Instituto Foto Topográfico Argentino) se disponía en soporte papel y se procedió a su digitalización para el emplazamiento del embalse. Para esto se debieron procesar imágenes satelitales, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)(ver figuras 8, 9 y 10).

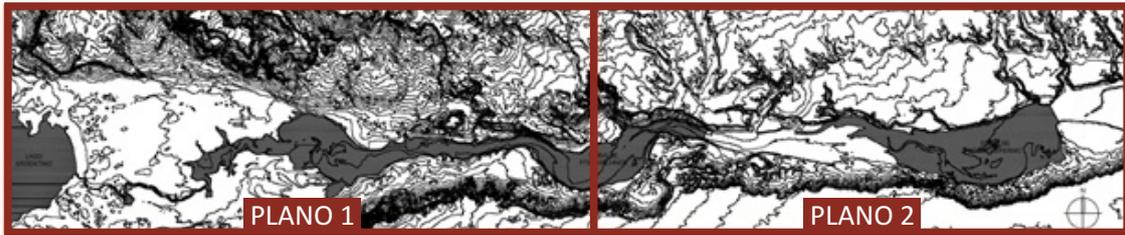


FIGURA 8 – Restitución aerofotogramétrica, SRTM.

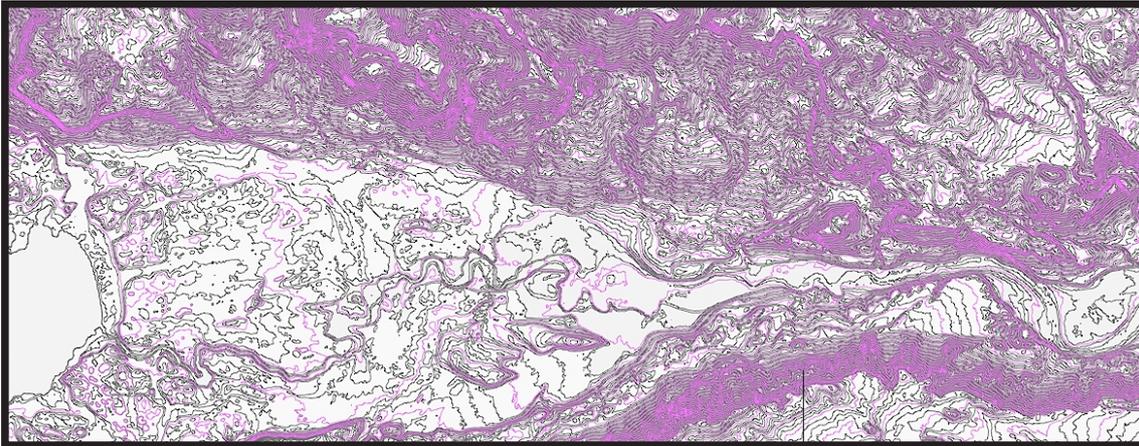


FIGURA 9 – Curvas de nivel generadas con SRTM (PLANO 1).

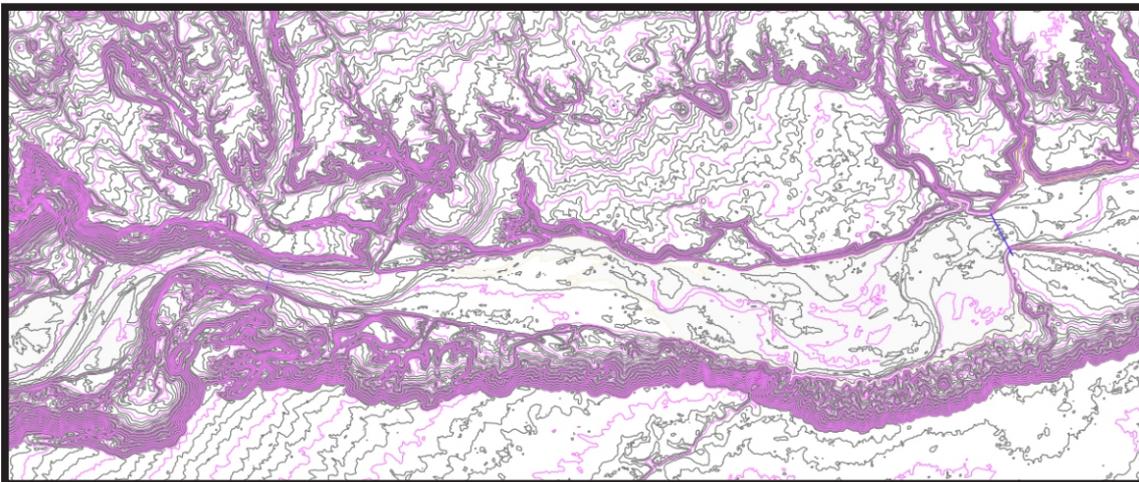


FIGURA 10 – Curvas de nivel generadas con SRTM (PLANO 2).

El SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado, montado en un transbordador. Para adquirir los datos de elevación topográfica estereoscópica la SRTM llevaba dos reflectores de antenas de radar. Cada reflector-antena estaba separado del otro 60 metros gracias a un mástil que extendía la anchura del transbordador en el espacio.



## 2.3 ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS

Los estudios hidrológicos realizados previamente, contaban con curvas H-Q y curvas de área-volumen de embalse de la presa, incluyendo el vaso de la misma y el aporte generado por el Lago Argentino.

### 2.3.1 Hidrología de pliego

La información brindada en el pliego licitatorio, implicaba una recolección de antecedentes de registros hidrométricos parcialmente procesados en los anteproyectos elaborados en los años '50 y '78. Dichos registros comprendían: niveles del Lago Argentino, niveles y aforos en la estación Charles Fuhr sobre el río Santa Cruz, a la salida del Lago Argentino.

La estación Charles Fuhr se encuentra a 10 km aguas abajo del nacimiento del Río Santa Cruz en el Lago Argentino. Está ubicada en Latitud: 50°16'09" Longitud: 71°53'07" (ver figura 11), con una Altitud (msnm): 206m y un caudal medio  $Q_{medio} = 696.80 \text{ m}^3/\text{s}$ . (1955 – 2003).



FIGURA 11 – Ubicación de la estación Charles Fuhr y de la estación Calafate.

Los análisis que se realizaron en el pliego sobre las series de registros de caudales medios mensuales de la estación Charles Fuhr, coincidieron con el modelo hidrológico que lo definía como de origen glaciar, admitiéndose una corrección por la contribución de la precipitación extra-glaciar.

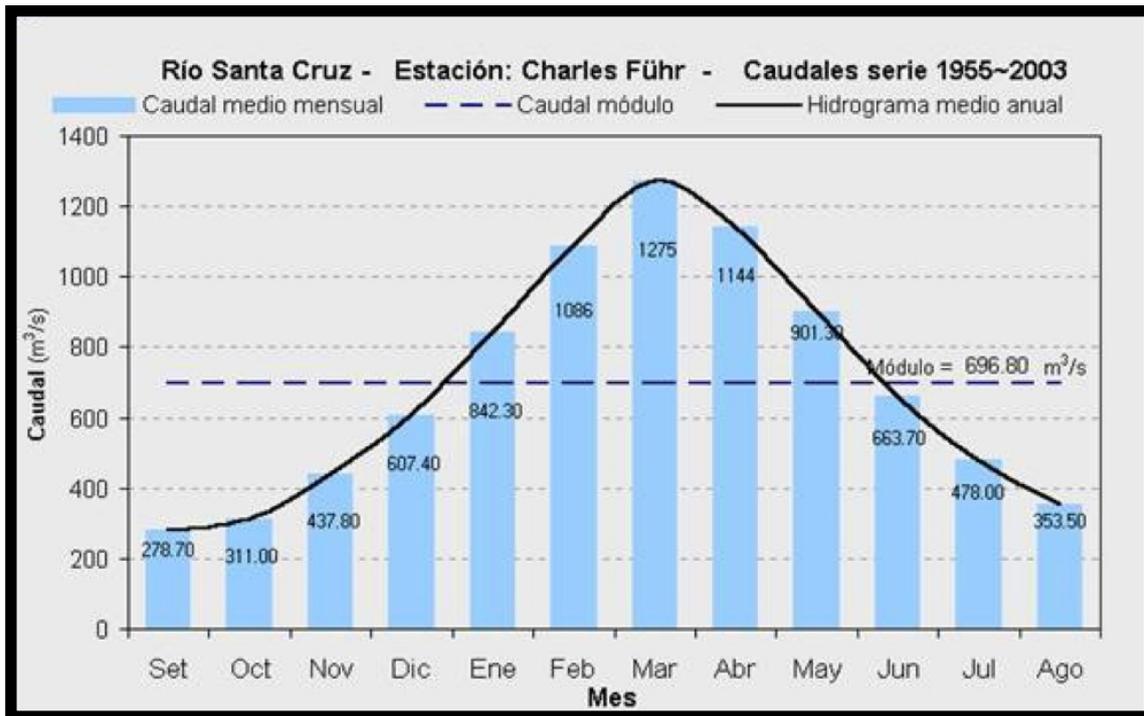


FIGURA 12 – Caudales medios mensuales, módulo e hidrograma medio anual estación Charles Fuhr.

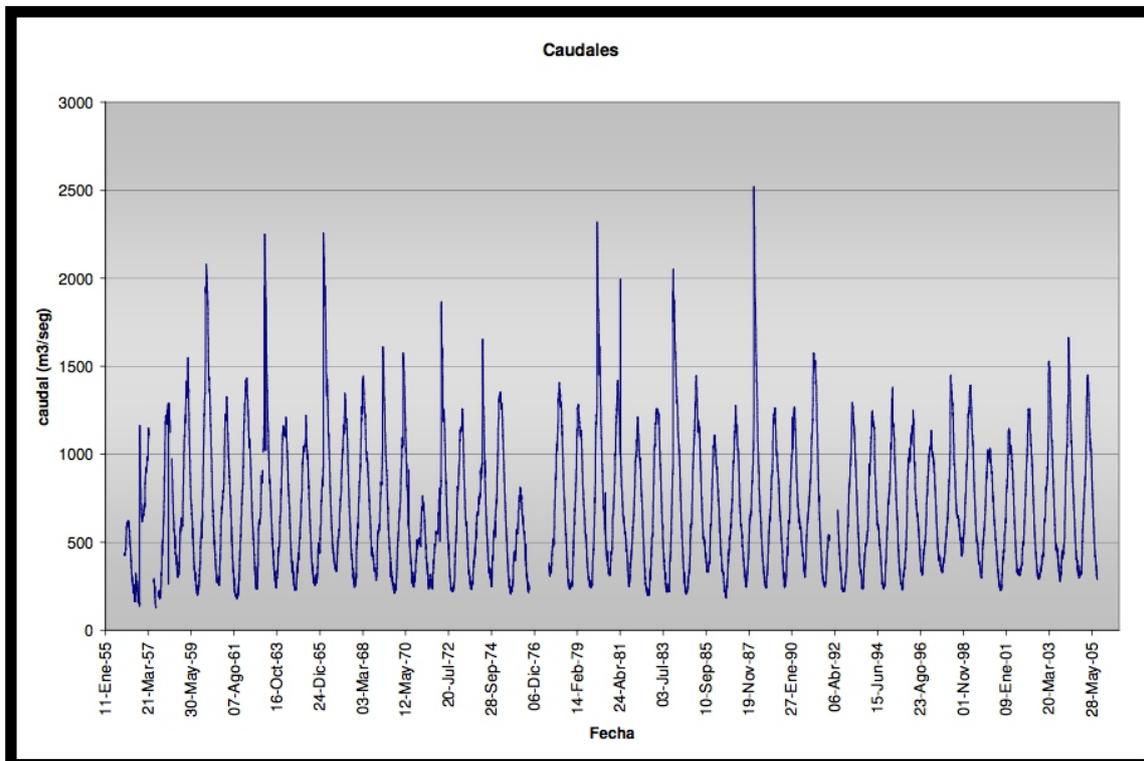


FIGURA 13 - Serie de datos de caudales diarios de la estación Charles Führ 1955-2007 (fuente: SSRH)



Características de la serie de datos de caudales:

- El escurrimiento del río se puede definir como de origen glaciar.
- La serie muestra un régimen de elevada regularidad con máximos a fines del verano y mínimos en invierno (con excepción del pico registrado en octubre de 1956 provocado por una rotura del glaciar).
- El caudal medio en el periodo observado (1955 - 2003) es 696,80 m<sup>3</sup>/s.
- El caudal diario máximo observado corresponde al día 18 de febrero de 1988, con un valor de 2519,9 m<sup>3</sup>/s.
- La serie histórica no muestra tendencias estadísticamente significativas.
- La serie de registros de caudales diarios analizados por año hidrológico responde a modelos autorregresivos de medias móviles (ARMA(1,1)).

### **2.3.2 Estudios de volúmenes generados por HIDROCUYO S.A.**

El estudio realizado por HIDROCUYO se basó en las recomendaciones que brinda el Comité Mundial de Presas, con respecto a los Desagües de fondo de los embalses de grandes presas. El objetivo de este era lograr dimensionar los descargadores para lograr vaciar el embalse totalmente o hasta una cierta altura mínima sobre el lecho del río.

Este vaciamiento se debería poder realizar en un cierto tiempo para evitar cualquier tipo de falla, si se llegase a detectar un comportamiento peligroso de la presa o de sus laderas naturales.

Para lograr este cometido, en el estudio realizado se debieron analizar tres aspectos fundamentales:

- La ley o curva de áreas y volúmenes del embalse.
- Los aportes al embalse durante el periodo de estiaje.
- La capacidad de los órganos de evacuación de que se disponen.

Para nuestros estudios nos fueron de gran utilidad los datos obtenidos en el estudio de la curva áreas y volúmenes del embalse.



DE PRESA NK A VERTEDERO NATURAL LAGO ARGENTINO			LAGO ARGENTINO SOLAMENTE		DE PRESA NK INCLUENDO LAGO ARGENTINO	
Niveles [m]	Áreas [Ha]	Volumen [Hm <sup>3</sup> ]	Áreas [Ha]	Volumen [Hm <sup>3</sup> ]	Áreas [Ha]	Volumen [Hm <sup>3</sup> ]
167	13.500	4.200			13.500	4.200
168	14.400	4.340			14.400	4.340
169	15.300	4.488			15.300	4.488
170	16.200	4.646			16.200	4.646
171	17.100	4.812			17.100	4.812
172	18.000	4.988			18.000	4.988
173	18.900	5.172			18.900	5.172
174	19.800	5.366			19.800	5.366
175	20.700	5.568			20.700	5.568
176	21.600	5.780			21.600	5.780
177	22.500	6.000	162.500	0	185.000	6.000
178	23.400	6.230	163.933	1.632	187.333	7.862
179	24.300	6.468	165.367	3.279	189.667	9.747
180	25.200	6.716	166.800	4.939	192.000	11.655
181	26.100	6.972	168.233	6.615	194.333	13.587
181,66	26.700	7.146	169.189	7.729	195.889	14.875
182	27.000	7.238	169.667	8.304	196.667	15.542
183	27.900	7.512	171.100	10.008	199.000	17.520
184	28.800	7.796	172.533	11.726	201.333	19.522
185	29.700	8.088	173.967	13.459	203.667	21.547
186	30.600	8.390	175.400	15.205	206.000	23.595
187	31.500	8.700	176.833	16.967	208.333	25.667
188	32.400	9.020	178.267	18.747	210.667	27.767
189	33.300	9.348	179.700	20.532	213.000	29.880
190	34.200	9.686	181.133	22.336	215.333	32.022
191	35.100	10.032	182.567	24.155	217.667	34.187

TABLA 1 – Áreas y Volúmenes calculados por HIDROCUYO S.A.

Para el cálculo de estos volúmenes HIDROCUYO baso sus estudios en las mediciones tomadas en la estación de El Calafate (ver imagen 11), el cual le brindó información sobre las cotas del lago a lo largo del tiempo.

# **CAPÍTULO III**

## **Elaboración De Los Modelos Computacionales**



### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se describe paso a paso como se elaboró el modelo computacional del río Santa Cruz, que incluye la información topográfica del cause como de su hidrología y hidráulica. Para su realización se utilizaron programas computacionales disponibles como el AUTO CAD, CIVIL CAD, EXCEL y HEC-RAS. Cada programa se utilizó en las distintas etapas de la creación del modelo computacional, proporcionando cada uno una herramienta para poder representar de manera correcta la realidad.

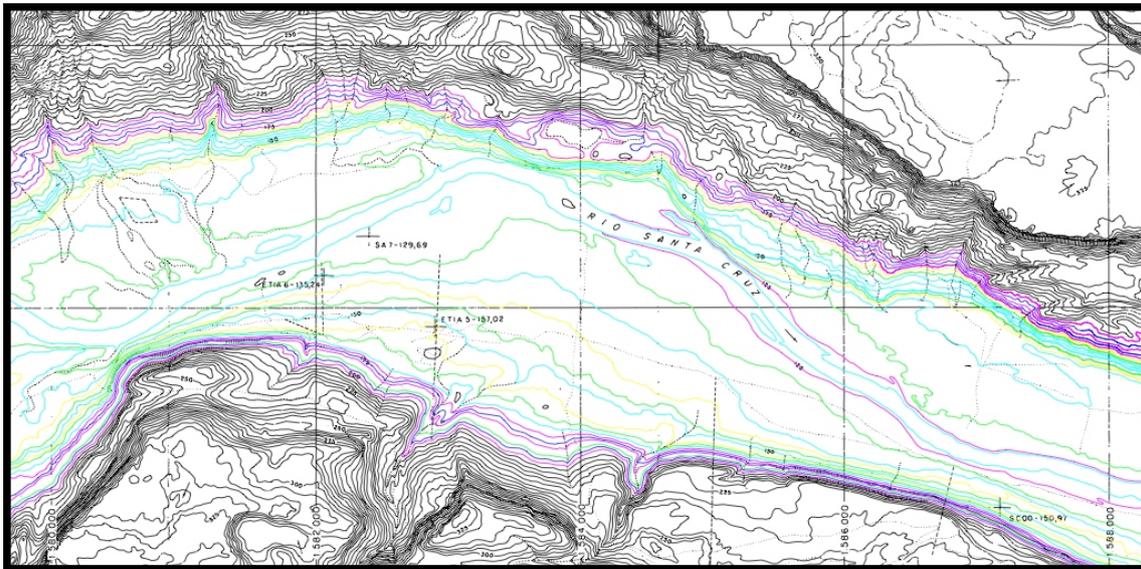
Para cumplir con los objetivos se debieron generar dos imágenes 3D: una desarrollada a partir de los relevamientos Aerofotogramétricos para trabajar con el vaso de la presa y otra con la altimetría obtenida de CONSULAR para poder desarrollar el modelo informático del cauce del río. Esto se debió a que la topografía entregada por CONSULAR poseía la batimetría y no se lograron combinar ambas topografías ya que presentaban algunas diferencias.

### **3.2 ELABORACIÓN DE LA IMAGEN 3D DEL ÁREA DE ESTUDIO**

#### **3.2.1 Restitución del relevamiento aerofotogramétrico**

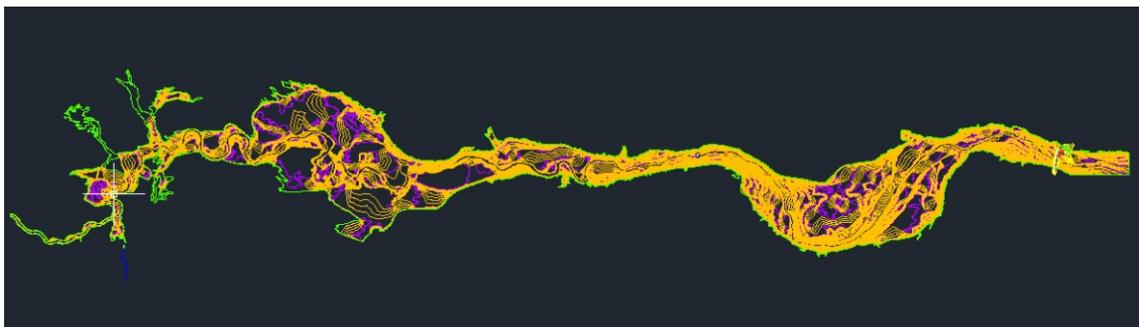
Se trabajó con el relevamiento Aerofotogramétrico que fue brindado en el pliego de la obra. Este fue originalmente creado en soporte papel, y posterior mente digitalizado y transformado en archivos dwg, con los que se podía trabajar. Para los estudios realizados sobre el embalse de la presa se utilizo los estudios realizados por Agua y Energía Eléctrica en 1976 – 1978 (ver figura 14).

Estas tenían simples líneas cortadas e intersectadas entre si que representaban las curvas de nivel. Debido a esto, se tuvo que reemplazar todas estas líneas por polilíneas que tuvieran como nivel en Z la cota que representaban altimétricamente.



**FIGURA 14** – Uno de los planos del relevamiento Aerofotogramétrico con las curvas de nivel cada 5 m, las que se utilizaron son las curvas marcadas y reemplazadas por polilíneas.

Cuando se modificaron todas las líneas por las polilíneas se debieron unificar todos los archivos separados (uno por cada carta) con los que se disponía para generar un solo plano de altimetría del terreno completo. Este plano unificó todas las curvas de nivel, generando un solo plano que contenía toda la información junta. Para unificar todos los archivos se debieron unir y hacer coincidir todas las polilíneas de los distintos planos (ver figura 15).



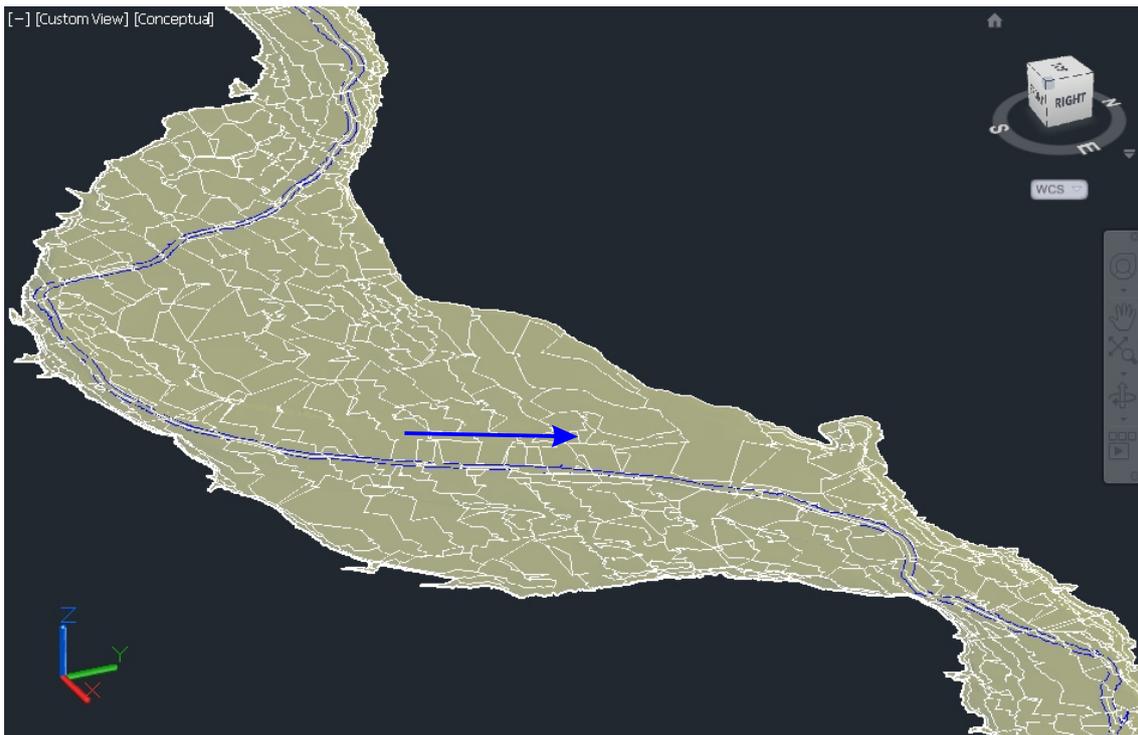
**FIGURA 15** – Altimetría completa del vaso de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner.

### 3.2.2 Elaboración de la imagen 3D del vaso de la presa en civilcad

Para elaborar la imagen 3D se debieron importar a CIVIL CAD las polilíneas generadas en AUTO CAD con las planos del relevamiento Aerofotogramétrico, las cuales representaban las distintas curvas de nivel, cada uno con la correspondiente cota representada. Una vez que se importaron las curvas al CIVIL CAD, con una función del programa se generó una



función del programa se generó una imagen 3D con las polilíneas (ver imagen ), la cual estaba delimitada por la curva de nivel de cota 190 msnm, ya que como el coronamiento de la presa tiene una elevación de 187 msnm, el volumen del vaso que buscado era el encerrado por debajo esta cota (se utilizó la cota 190 en lugar de 187 debido que las curvas de nivel de los planos eran cada intervalos de 5 m).



**FIGURA 16** – Imagen 3D del vaso de la presa generada con CIVIL CAD.

Una vez que se generó la imagen 3D, se le incorporó una geometría similar a la de la presa para poder determinar la superficie del espejo de agua a los distintos niveles ver (ver figura 17). Esto se realizó generando una superficie plana, la cual representaba el coronamiento de la presa, por lo que se encontraba a la altura de 187 msnm; desde la que se proyectaron planos con la inclinación de los taludes de la presa. A los mismos se los hizo intersectar con la superficie del terreno. Se determinó que el intervalo entre estas superficies fuera de 1 m ya que con este se alcanzaba la precisión deseada, sin realizar una cantidad innecesaria de cálculos.

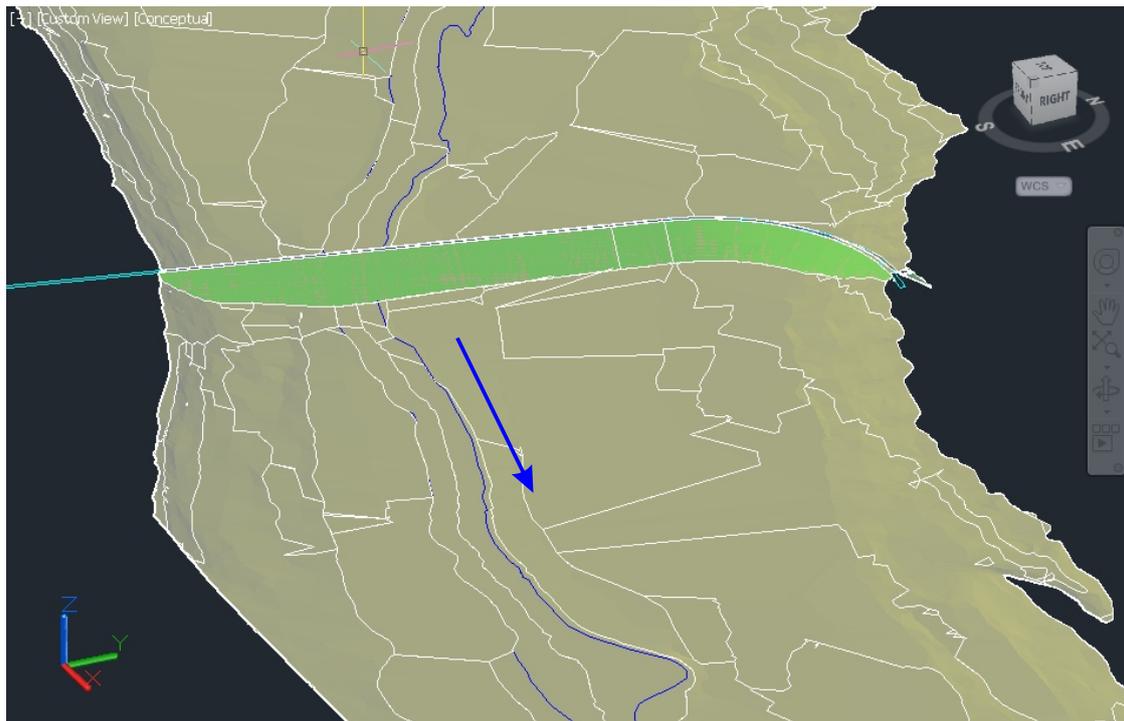


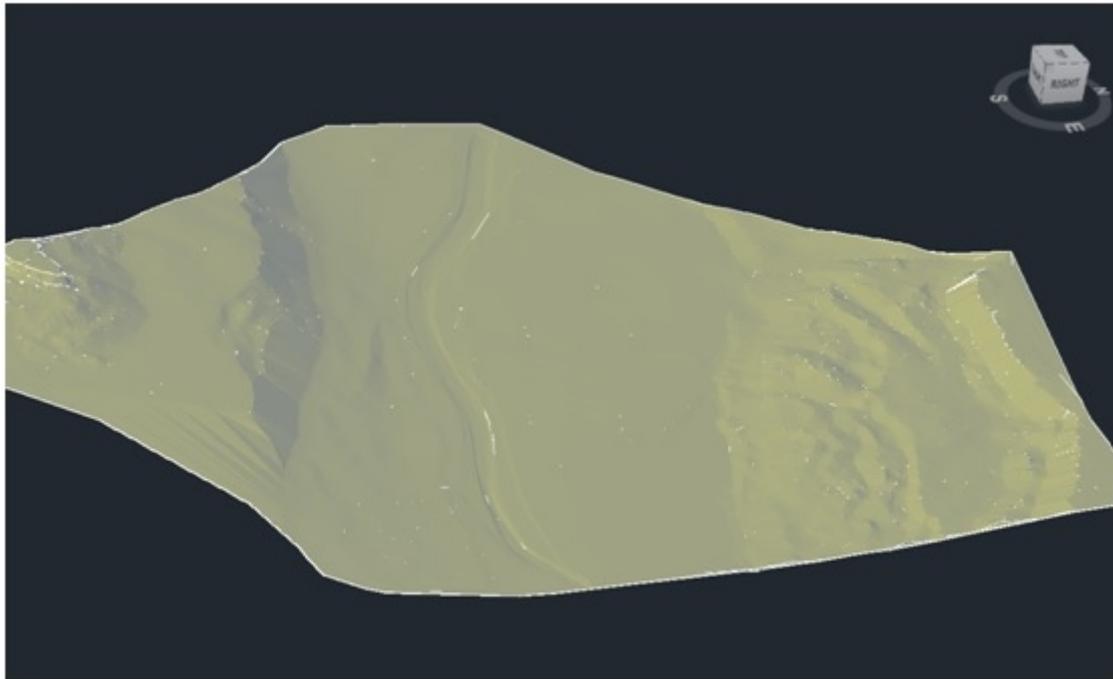
FIGURA 17 – Presa de geometría simplificada incorporada en la imagen 3D.

### 3.2.3 Modelo hidráulico en HEC-RAS

El HEC-RAS es un programa gratuito creado por el instituto militar estadounidense, que permite crear modelos hidráulicos de flujos de agua de ríos naturales o cualquier tipo de canal. Este crea modelos unidimensionales, lo que significa que no hay modelado directo del efecto hidráulico de cambios en la forma de la sección transversa, curvas, y otros aspectos de dos y tres dimensiones de flujo.

Los datos geométricos fundamentales son diversas secciones transversales a lo largo del cauce o cauces considerados. Dichas secciones se introducen mediante la cota de varios puntos, de este modo, mediante la cota de dos secciones contiguas separadas por una distancia conocida, el modelo calcula la pendiente de ese tramo.

Para generar el modelo hidraulico unidimensional en HEC-RAS se debió hacer otra imagen en CIVIL CAD, pero con la topografía de CONSULAR. Esto fue a causa de que la topografía utilizada para realizar la imagen del vaso de la presa no incluía una batimetría y si combinábamos la batimetría con esta topografía estas no coincidía debido a que utilizaban distintos sistemas de referencia. Además esta topografía contaba con una mayor precisión, y no fue necesario realizar interpolaciones como en la topografía generada por la restitución aerofotogramétrica (ver imagen 18).



**FIGURA 18** – Imagen 3D del sector de la presa generada con CIVIL CAD, utilizando la topografía de CONSULAR

Una vez que se realizó la imagen 3D en CIVIL CAD (se realizó el mismo proceso que en la imagen de vaso de la presa) se utilizaron las herramientas del programa para generar una alineación en el eje del río, y mediante esta generar los perfiles transversales del mismo. Los perfiles se crearon cada 100 metros y con un ancho variable dependiendo del perfil. Una vez que con el programa se generó los perfiles transversales del río se pasaron los puntos en X y la altura a un archivo de EXCEL (ver tabla 2).

Una vez que elaboraron los perfiles en EXCEL, es decir, los puntos con sus coordenadas; estos debieron ser discretizados ya que el CIVIL CAD provee muchos más puntos de los que el HEC-RAS puede trabajar. Para realizar la discretización se debieron eliminar puntos que no fueran necesarios, ya que la tabla de puntos que generaba el programa brindaba puntos con la misma cota uno al lado del otro, por lo que no modificaba el perfil si estos eran eliminados, permitiendo disminuir la cantidad de puntos a cargar en el HEC- RAS. Una vez que se contaba con los puntos discretizados con una cantidad aceptable, se comenzó a trabajar en HEC-RAS.



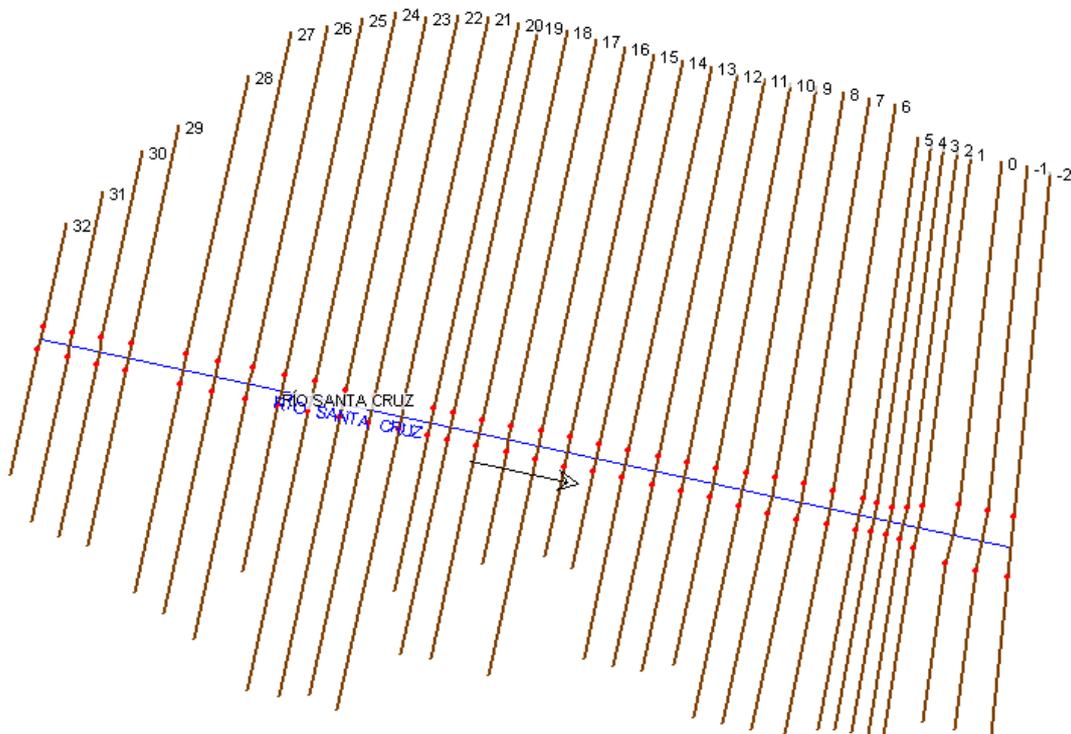
Progresiva longitudinal 0+200 m								
No.	Progresiva trans. [m]	Elevación						
1	-324,31	119,5	52	43,06	115,25	105	200,89	122,06
2	-312,16	119,53	53	43,08	115,26	106	201,48	122,1
3	-298,41	119,4	54	43,13	115,26	107	209,26	122,49
4	-273,93	119,17	55	43,68	115,3	108	214,44	122,73
5	-273,29	119,16	56	45,77	115,45	109	219,21	122,9
6	-266,87	119,1	57	53,38	116	110	226,86	123,18
7	-259,42	119,03	58	66,79	117,02	111	227,62	123,21
8	-240,83	118,85	59	71,29	117,37	112	232,78	123,41
9	-213,78	118,59	60	71,84	117,41	113	240,07	123,7
10	-196,48	118,42	61	75,08	117,65	114	241,23	123,75
11	-191,5	118,38	62	80,08	118	115	242,22	123,79
12	-186,22	118,33	63	104,71	119,42	116	247,07	124
13	-159,78	118,08	64	104,97	119,43	117	255,57	124,61
14	-151,99	118	65	105,54	119,45	118	266,1	125,11
15	-151,55	118	66	117,84	119,97	119	273,53	125,51
16	-151,43	118	67	118,66	119,98	120	282,46	126
17	-151,33	118	68	119,6	119,99	121	282,71	126
18	-112,05	117,19	69	119,78	119,99	122	282,72	126
19	-88,35	116,71	70	120,83	120	123	282,74	126
20	-57,19	116,05	71	120,94	120	124	282,75	126
21	-54,82	116	72	120,94	120	125	282,76	126
22	-54,55	116	73	121,08	120	126	282,77	126
23	-53,29	116	74	121,11	120	127	282,78	126
24	-39,8	115,37	75	122,37	120,03	128	282,85	126
25	-38,62	115,32	76	122,99	120,05	129	282,91	126
26	-37,94	115,29	77	123	120,05	130	283,19	126
27	-37,61	115,28	78	123,67	120,06	131	284,29	126
28	-36,71	115,24	79	124,23	120,08	132	284,3	126
29	-36,17	115,15	80	125,12	120,1	133	285,19	126
30	-29,15	114	81	125,31	120,11	134	285,83	126
31	-24,6	113,07	82	139,9	120,48	135	285,87	126
32	-24,23	113	83	147,55	120,67	136	287,06	126
33	-15,23	112,2	84	153,51	120,82	137	287,12	126
34	-12,94	112	85	153,94	120,83	138	288,38	126
35	-12,83	112	86	159,76	120,98	139	290,01	126,01
36	-12,61	112	87	166,18	121,14	140	290,13	126,01
37	-8,77	111,98	88	175,19	121,37	141	291,85	126,01
38	0	111,95	89	187,48	121,69	142	292,43	126,01
39	7,39	111,92	90	188	121,71	143	297,93	126,01
40	19,46	111,97	91	198,97	122	144	301,65	126,02
41	27,65	112	92	199,01	122	145	348,65	126,06
42	31,07	112,44	93	199,02	122	146	375,25	126,04
43	35,53	113	94	199,03	122	147	380,1	126,04
44	39,34	113,71	95	199,18	122	148	380,12	126,04
45	40,94	114	96	199,28	122	149	381,85	126,04
46	42,83	115,21	97	199,53	122	150	384,83	126,04
47	42,86	115,24	98	199,62	122	151	384,85	126,04
48	42,93	115,24	99	199,62	122	152	385,33	126,04
49	42,96	115,25	100	199,63	122	153	386,19	126,04
50	42,99	115,25	101	199,63	122	154	388,07	126,04
			102	199,64	122	155	390,09	126,04
			103	200,23	122,03	156	461,26	127,55
			104	200,88	122,06	157	474,13	127,81

TABLA 2 – Puntos de un perfil transversal de una sección del río generada en EXCEL.



### 3.2.3.1 Carga de datos en HEC-RAS

Lo primero que se realizó en el programa fue cargar la geometría del río, para esto se incorporaron todos los perfiles, definiendo no solo los puntos con sus coordenadas, sino también la distancia entre los perfiles, el n de Manning, el punto del pelo de agua en ambos márgenes del río, etc (ver imagen 19 y 20).



**FIGURA 19** - Geometría del río Santa Cruz en HEC-RAS.

Una vez que se terminó de cargar toda la geometría del río se incorporaron los distintos caudales de los cuales interesaba su comportamiento hidráulico, el cual fue evaluado. Los caudales utilizados fueron el caudal medio anual ( $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el caudal máximo medio del mes de Marzo ( $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y un caudal con una recurrencia de 25 años ( $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el cual fue utilizado para el diseño del puente provisorio. (ver imágenes 21, 22 y 23). No se utilizó en el modelo el caudal de la década milenaria (como se incluye en pliego) ya que este se utilizaría sólo para dimensionar el vertedero de la presa.

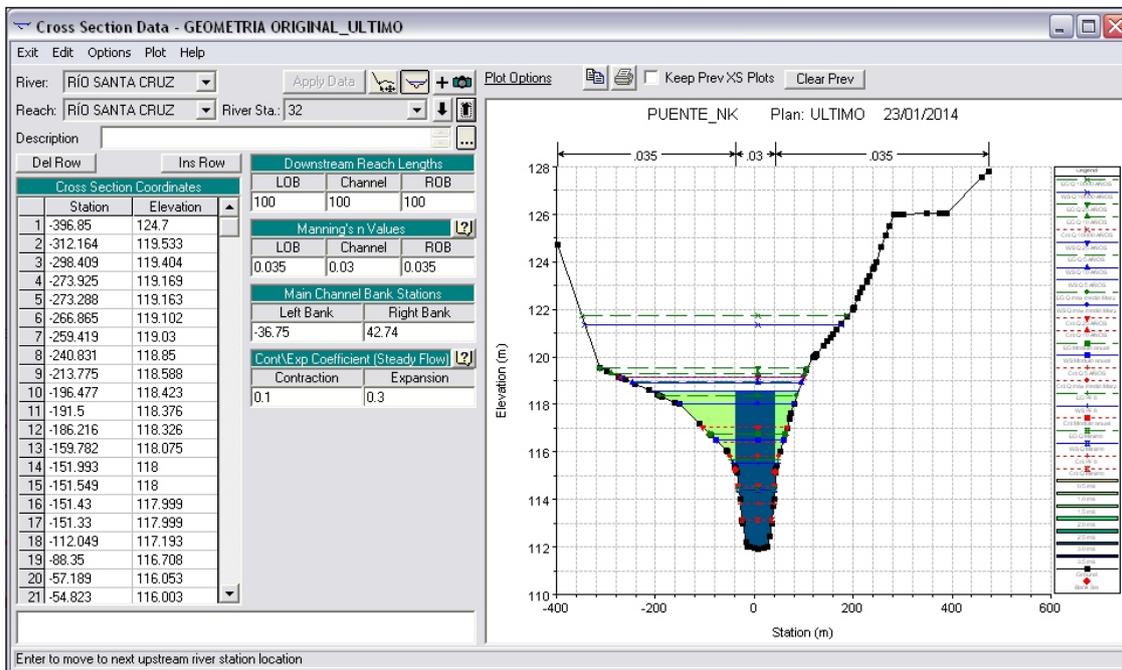


FIGURA 20 – Ventana de HEC-RAS de un perfil del río.

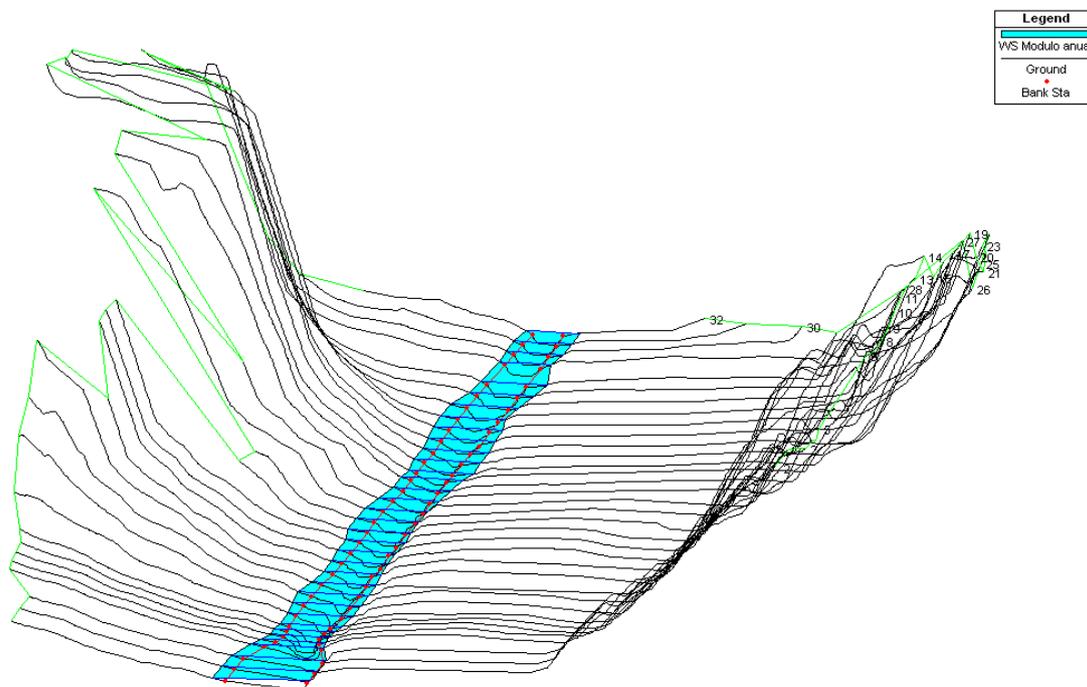
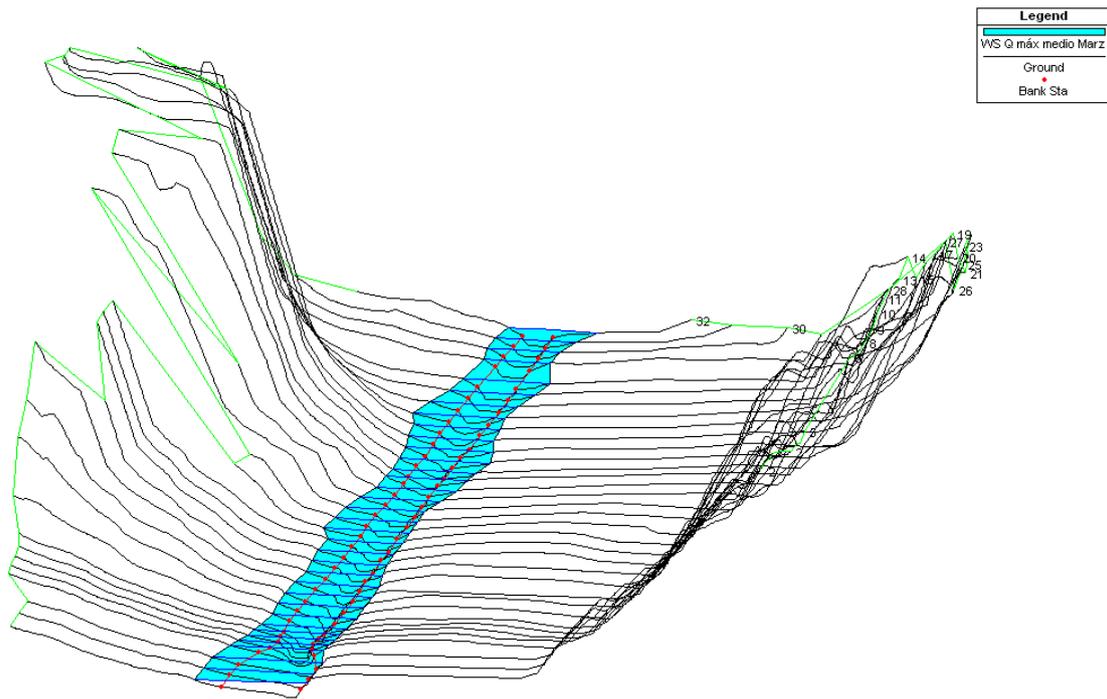
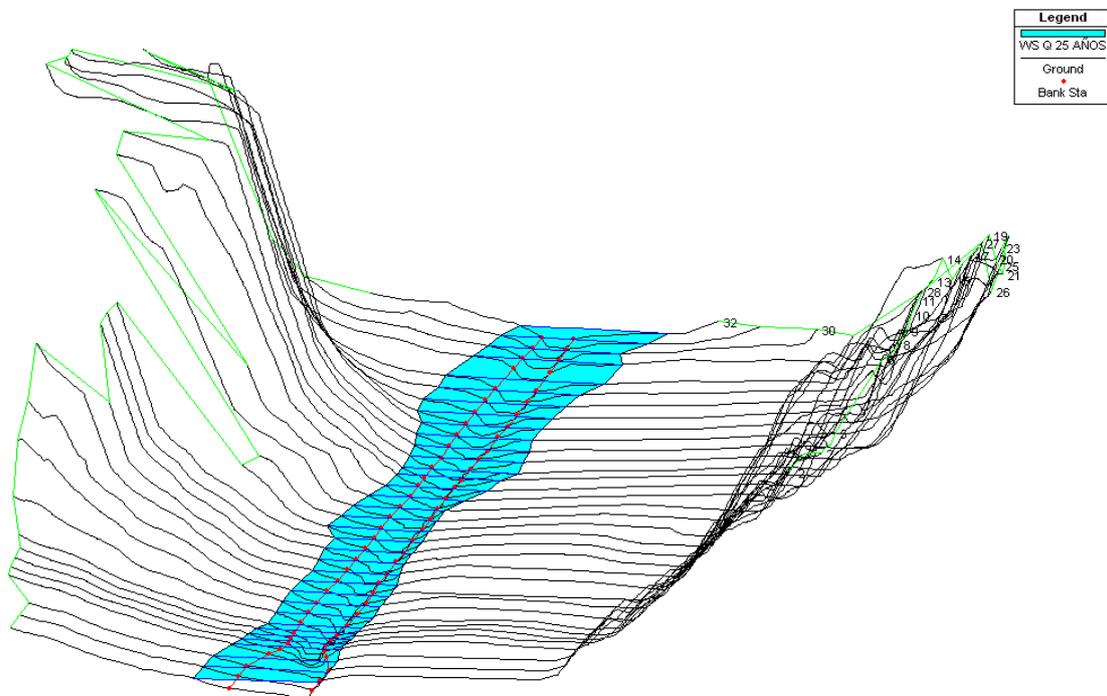


FIGURA 21 – Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal medio anual (  $700 \text{ m}^3/\text{s}$  ).



**FIGURA 22** – Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal máximo anual ( $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



**FIGURA 23** – Imagen 3D del río Santa Cruz en el tramo de la presa para el caudal de recurrencia de 25 años ( $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



Con los caudales ya cargados en el programa, se controló que el modelo contrastara favorablemente con la realidad. Para esto se compararon los tirantes de las secciones de control definidas previamente, con los tirantes obtenidos en el modelo. Estas secciones de control se obtuvieron tomando medidas de campo de los tirantes de agua en dichas secciones.

Para calibrar el modelo, es decir, lograr que los tirantes obtenidos por el modelo en las secciones de control sean iguales a los tirantes obtenidos en campo en las mismas secciones, se modificaron los valores del n de maning hasta que se logro que los valores fueran similares. Los tirantes de las distintas secciones se obtuvieron del perfil longitudinal del río sobre el eje del mismo (ver figura 24).

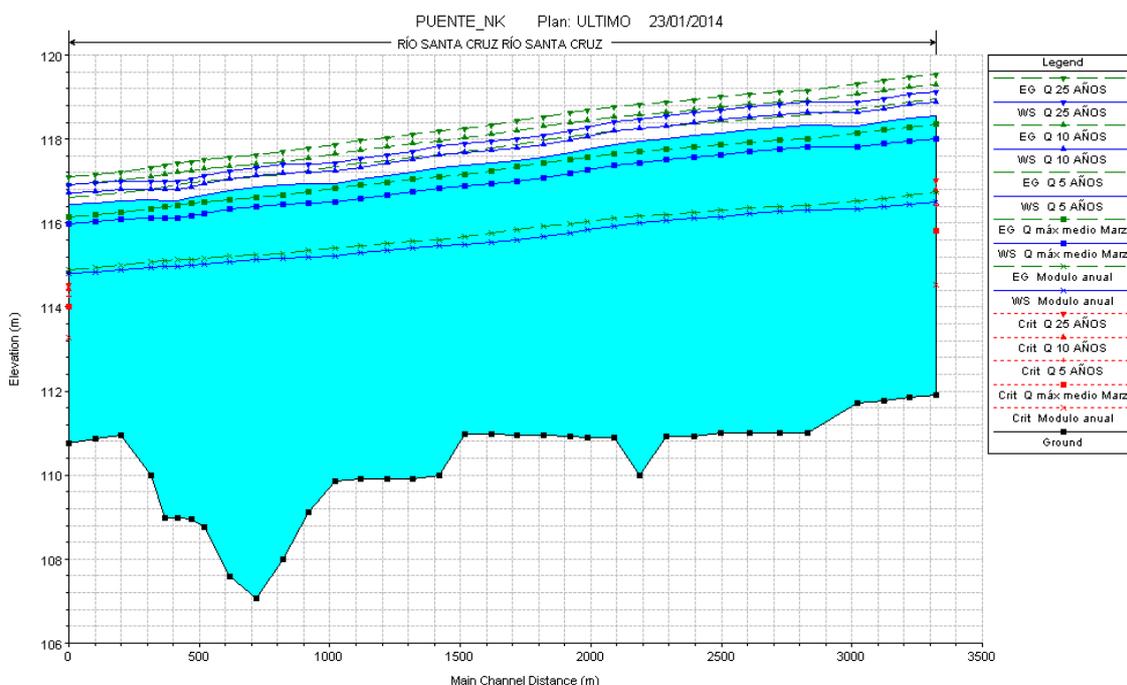


FIGURA 24 – Perfil longitudinal del río Santa Cruz en el tramo de la presa.

Las curvas H-Q obtenidas fueron verificadas y utilizadas por dos reconocidos profesionales de la República Argentina, Héctor Daniel Farías y Daniel Bacchiega. Se obtuvieron varias curvas H-Q de distintas secciones del río las cuales eran necesarias para el desarrollo del proyecto. Entre estas secciones se cuenta con: la sección de la presa, secciones aguas arriba y aguas debajo de la misma, la sección tentativa de la ubicación del puente provisorio, etc (ver figuras 25, 26, 27 y 28).

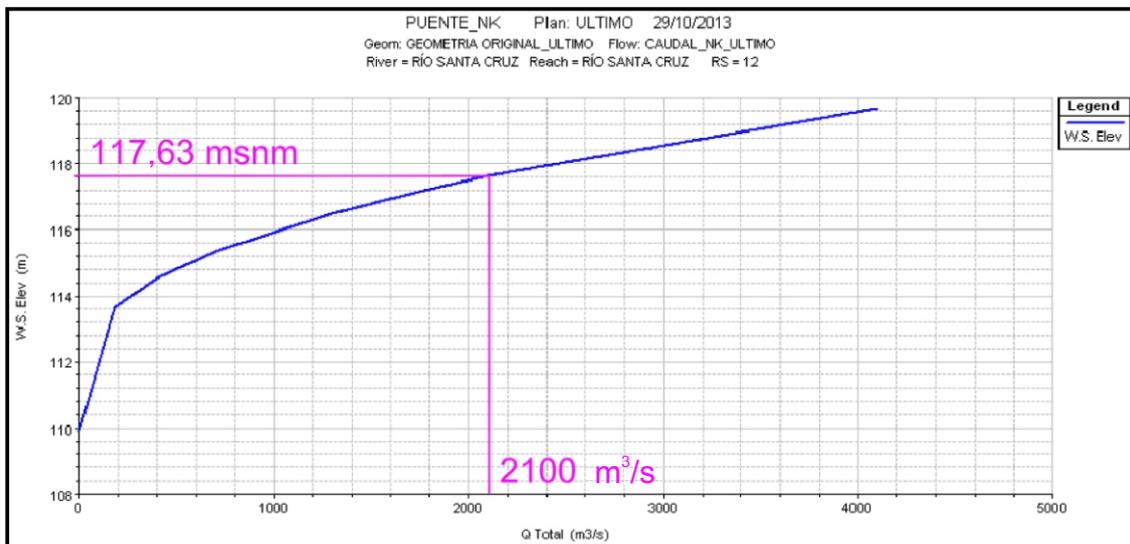


FIGURA 25 – Curva H–Q de una sección localizada a 870 m aguas abajo del eje de la presa.

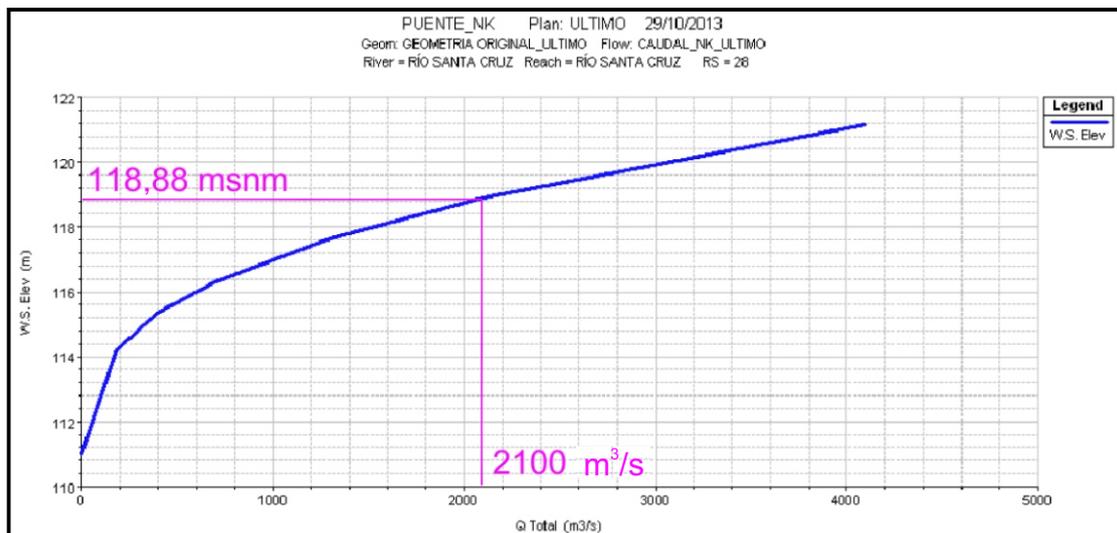


FIGURA 26 – Curva H–Q de una sección localizada a 750 m aguas arriba del eje de la presa.

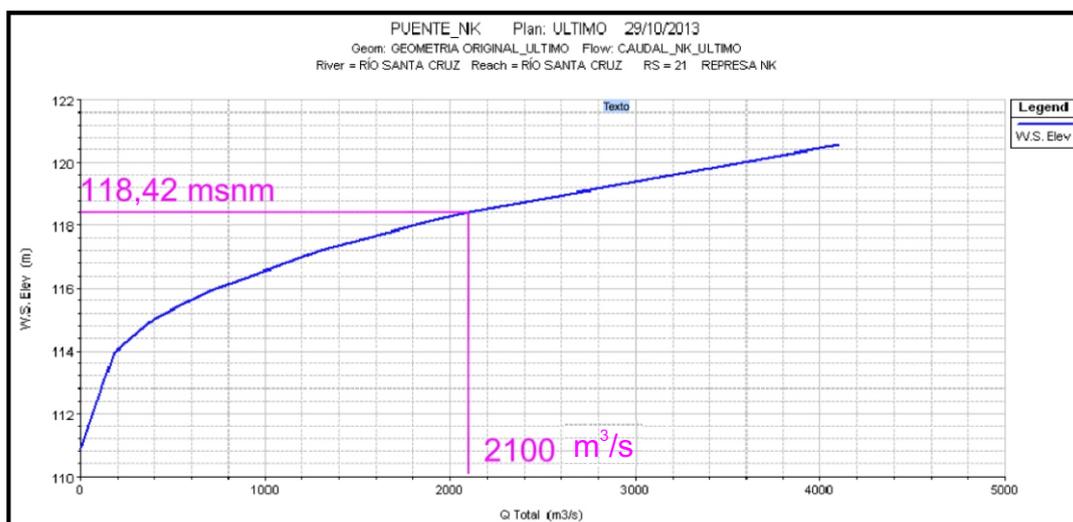
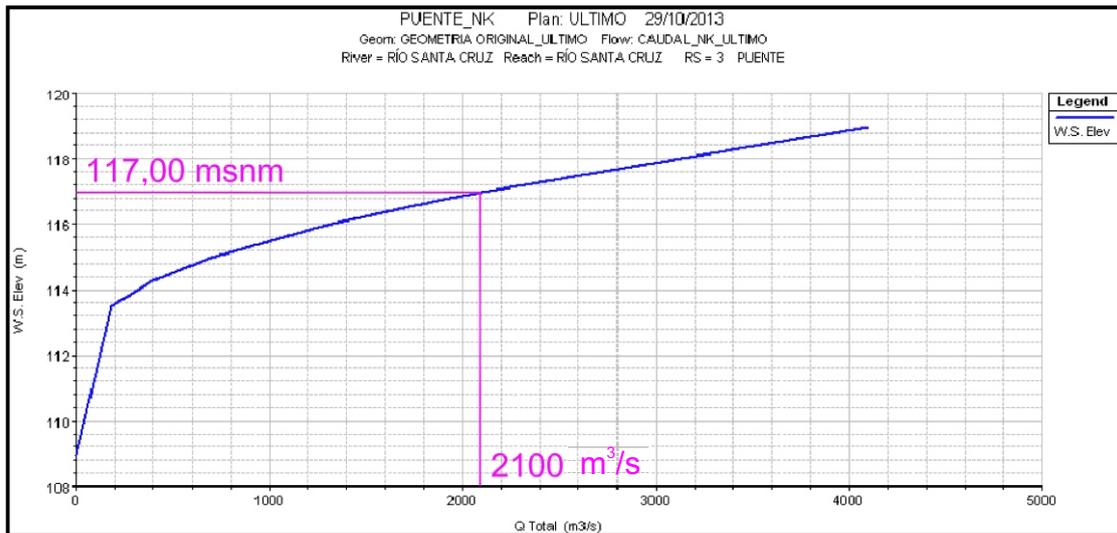


FIGURA 27 – Curva H–Q de una sección localizada en el eje de la presa.



**FIGURA 28** – Curva H-Q de una sección localizada a 1667 m aguas abajo del eje de la presa, sección propuesta para el puente provisorio.

# **CAPÍTULO IV**

## **Cálculo De Los Volúmenes Del Vaso De La Presa**



## 4.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto requiere completar la curva de almacenamiento de la presa, mediante el cálculo del volumen de agua que albergaría el vaso de la misma, desde la cota de coronamiento máximo hasta el punto mas bajo de la misma, y los volúmenes de agua a las distintas cotas de llenado. Esto era indispensable ya que permitiría determinar los tiempos de llenado, y mediante estos poder estimar los tiempos de la obra, y realizar los cálculos de las ataguías .

Para el cálculo de los volúmenes que la presa podrá albergar a los distintos niveles se utilizaron dos metodologías:

- a. El calculo de las superficies cada 1 m y se interpolaron las superficies generando volúmenes;
- b. Mediante una función del programa CIVIL CAD la cual permitía calcular volúmenes de manera automática, utilizando el método del cono;

## 4.2 INTERPOLACIÓN DE LAS ÁREAS DEL ESPEJO DE AGUA CADA 1 M

### 4.2.1 Cálculo de las áreas de los distintos niveles de pelo de agua

Para calcular el área del espejo de agua del embalse a los distintos niveles se utilizó la imagen 3D generada en CIVIL CAD con las cartas IGM. Lo primero que se realizó fue generar sobre esta imagen curvas de nivel cada 1 m, ya que la imagen creada originalmente tenía las curvas separadas cada 5 m. Para esto simplemente se modificó las características de la superficie en el programa, para generar con curvas de nivel cada 1 m.

Una vez que las curvas de nivel cada 1 m estaban disponibles lo que se realizó fue exportar solamente las curvas de nivel (sin la superficie) a AUTO CAD, donde se transformaron estas en polilíneas cerradas, ya que este programa permite calcular el área interna de estas polilíneas. Lo que se debió realizar fue restar a estas áreas de las poli líneas el área de las pequeñas islas que se generan en el vaso de la presa. La tabla 3 muestra para cada cota, las áreas de inundadas.



VASO EMBALSE PRESA NESTOR KIRCHNER			
COTA PLANO [m]	COTA IGM [m]	AREA [m <sup>2</sup> ]	AREA [ha]
123	116	390738	39,07
124	117	540923	54,09
125	118	686758	68,68
126	119	910292	91,03
127	120	1105230	110,52
128	121	2274420	227,44
129	122	3682669	368,27
130	123	5230638	523,06
131	124	6621504	662,15
132	125	7557151	755,72
133	126	9483242	948,32
134	127	10637000	1063,7
135	128	12267449	1226,74
136	129	14843544	1484,35
137	130	16607517	1660,75
138	131	18897800	1889,78
139	132	20861202	2086,12
140	133	24285141	2428,51
141	134	26619298	2661,93
142	135	28009856	2800,99
143	136	31387514	3138,75
144	137	33827015	3382,7
145	138	36646521	3664,65
146	139	40121572	4012,16
147	140	42563564	4256,36
148	141	47506870	4750,69
149	142	50685674	5068,57
150	143	54817600	5481,76
151	144	58702444	5870,24
152	145	61036637	6103,66
153	146	65151071	6515,11
154	147	69306667	6930,67
155	148	73575877	7357,59
156	149	79182241	7918,22
157	150	82854570	8285,46
158	151	88539090	8853,91
159	152	92863452	9286,35
160	153	104102489	10410,25
161	154	116911456	11691,15
162	155	119915574	11991,56
163	156	124618419	12461,84
164	157	127935149	12793,51
165	158	133641885	13364,19
166	159	140782515	14078,25
167	160	144860118	14486,01
168	161	150303932	15030,39
169	162	155272432	15527,24
170	163	164213602	16421,36
171	164	174581863	17458,19
172	165	178793493	17879,35
173	166	184037753	18403,78
174	167	189945784	18994,58
175	168	200911669	20091,17
176	169	210175675	21017,57
177	170	214255675	21425,57
178	171	218260042	21826
179	172	222220098	22222,01
180	173	230691924	23069,19
181	174	238980006	23898
182	175	242295251	24229,53
183	176	245611838	24561,18
184	177	248939748	24893,97

TABLA 3 – Áreas de los distintos niveles del vaso de la presa Néstor Kirchner.

#### 4.2.2 Cálculo de los volúmenes

Una vez que se contaba con las áreas inundadas el cálculo del volumen fue simple. Se generó una planilla de EXCEL en la cual se cargaron todas las cotas desde el nivel del fondo de la presa hasta el nivel del coronamiento, con sus correspondientes áreas ya calculadas. A partir de este informe se calculó el volumen entre dos planos consecutivos como:

$$Vol = \frac{a_i + a_{i+1}}{2} \times \Delta h \quad [1]$$



Siendo:

$a$  - el área inundada para distintos niveles de pelo de agua

$\Delta h$  - la diferencia de niveles entre las áreas (en este caso fueron todos 1m)

Con estos volúmenes calculados se generó la curva de volúmenes acumulados desde el nivel mas bajo de la presa hasta el nivel de coronamiento. Estos valores se incluyen en la tabla 4.

COTA PLANO [m]	COTA IGM [m]	Cumulative volume Hm <sup>3</sup>			
123	116	0	154	147	768,42
124	117	0,47	155	148	839,86
125	118	1,08	156	149	916,24
126	119	1,88	157	150	997,26
127	120	2,89	158	151	1082,95
128	121	4,58	159	152	1173,65
129	122	7,55	160	153	1272,14
130	123	12,01	161	154	1382,64
131	124	17,94	162	155	1501,06
132	125	25,03	163	156	1623,32
133	126	33,55	164	157	1749,6
134	127	43,61	165	158	1880,39
135	128	55,06	166	159	2017,6
136	129	68,61	167	160	2160,42
137	130	84,34	168	161	2308
138	131	102,09	169	162	2460,79
139	132	121,97	170	163	2620,54
140	133	144,55	171	164	2789,93
141	134	170	172	165	2966,62
142	135	197,31	173	166	3148,04
143	136	227,01	174	167	3335,03
144	137	259,62	175	168	3530,46
145	138	294,85	176	169	3736
146	139	333,24	177	170	3948,22
147	140	374,58	178	171	4164,47
148	141	419,62	179	172	4384,71
149	142	468,71	180	173	4611,17
150	143	521,46	181	174	4846,01
151	144	578,22	182	175	5086,64
152	145	638,09	183	176	5330,6
153	146	701,19	184	177	5577,87

**TABLA 4** – Volúmenes acumulados del vaso de la presa.

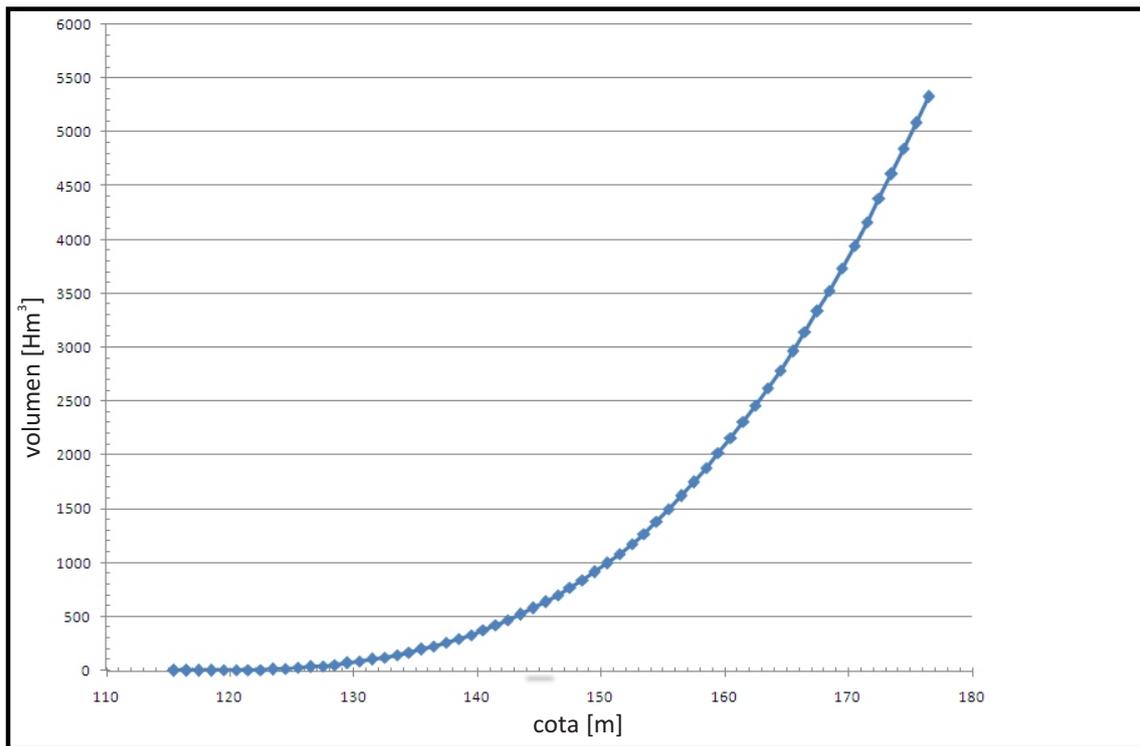


FIGURA 29 – Curva H-Vol del vaso de la presa.

Esta curva se verificó comparando con las curvas generadas por AyE (Agua y Energía) y por IECI S.A, los cuales solo brindaban volúmenes desde la cota 167 msnm. Esta comparación se muestra en la figura 30.

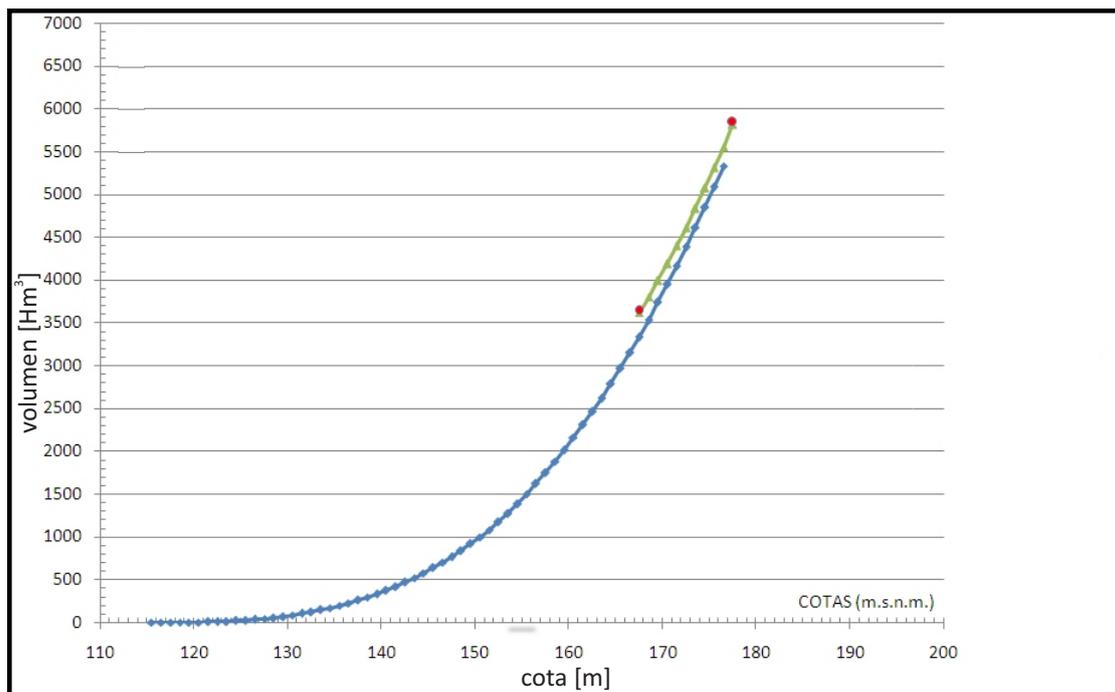


FIGURA 30 – Curva H-Vol del vaso de la presa comparando con los datos obtenidos por IECI y Agua y Energía.



### 4.3 INFLUENCIA DEL LAGO ARGENTINO

Lo que se analizó con respecto al Lago Argentino fue la influencia que tendrá este en los volúmenes del vaso de la presa. Esto se debe a que el nivel del lago se encuentra a 178 msnm, por lo que si el nivel del embalse de la presa supera esa cota cambiaría de manera considerable el incremento de los volúmenes.

Se debió realizar el calculo de los volúmenes hasta la cota 193 para considerar este incremento de volúmenes (ver tabla 5 y figura 31), ya que fue pedido por la empresa asociada que realizará los estudios energéticos de las presas. Este pedido se debió a que estas empresas deberán modelar la presa y se deberá considerar en sus análisis los volúmenes aportados por el Lago Argentino.

Cotas	Volumen	Volumen
	[Hm <sup>3</sup> ]	[Hm <sup>3</sup> ]
[m]	Lago Argentino	Lago Argentino Presa Néstor Kirchner
177	0	5577,87
178	1632	7862
179	3279	9747
180	4939	11655
181	6615	13587
182	7729	14875
183	8304	15542
184	10008	17520
185	11726	19522
186	13459	21547
187	15205	23595
188	16967	25667
189	18747	27762
190	20532	29880
191	22336	32022
192	24155	34187
193	25987	36375

**TABLA 5** – Volúmenes aportados por el lago Argentino al vaso de la presa.

Los volúmenes que aporta el Lago Argentino fueron brindados en pliego, los cuales fueron calculados por HIDROCUYO S.A. Con estos volúmenes se pudo completar la curva hasta la cota solicitada por el socio (ver figura 31).

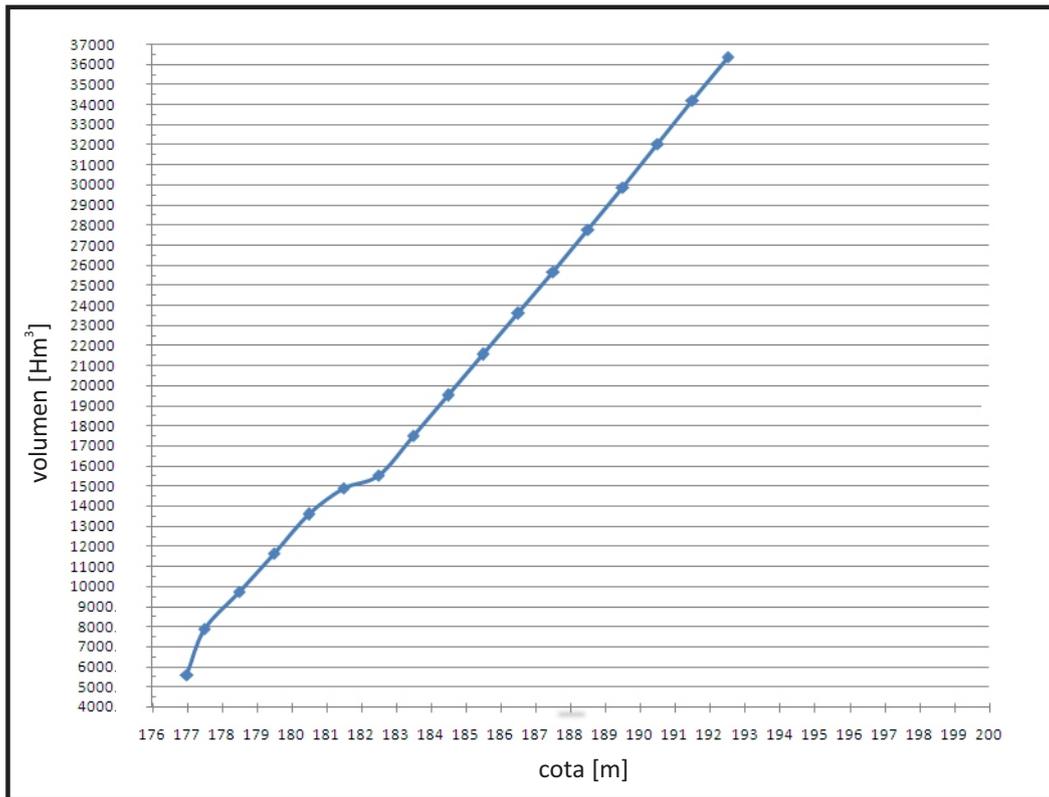


FIGURA 31 – Curva Cota-VOL de la presa que aportaría el lago.

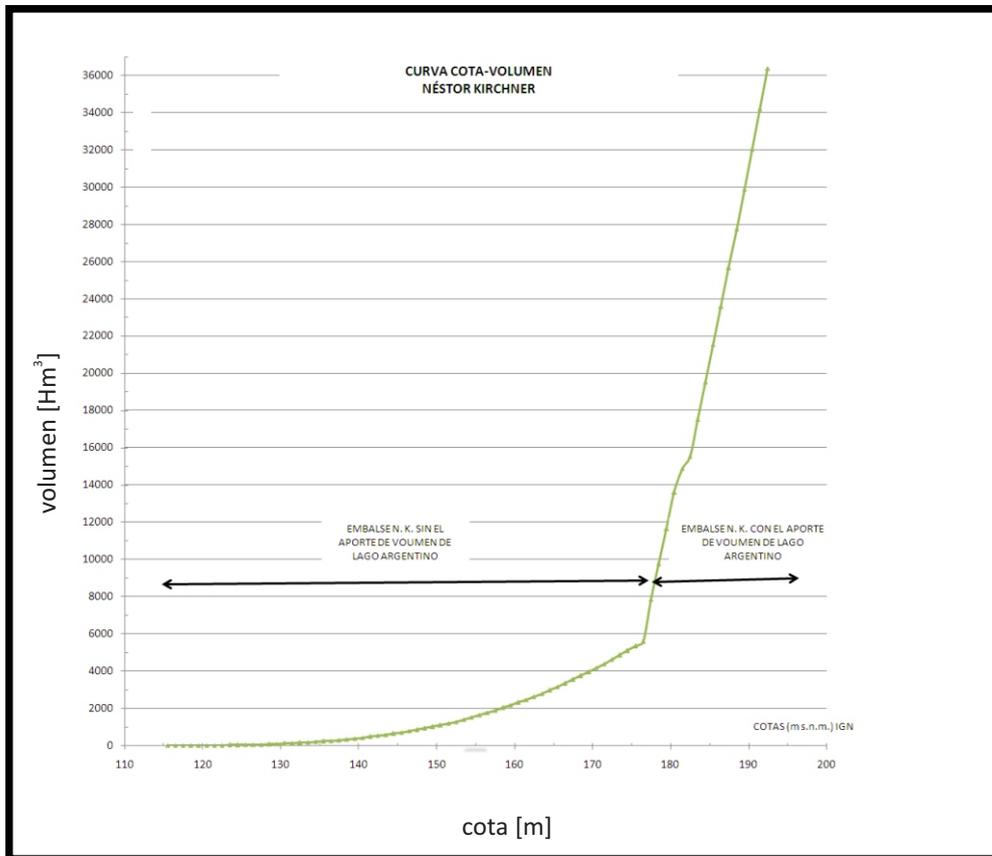


FIGURA 32 – Curva Cota-Vol completa que incluye los volúmenes aportados por el lago Argentino.

# **CAPÍTULO IV**

## **Cálculo De Los Volúmenes Del Vaso De La Presa**



## 5.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se analizará las posibles erosiones que se podrán generar en el cauce del río Santa Cruz a causa de la inclusión del puente provisorio aguas abajo del cierre propuesto.

Para este análisis se utilizaron fórmulas empíricas y se realizó una planilla en Excel.

En este análisis se calculan las erosiones de las distintas geometrías posibles, para un caudal de recurrencia de 25 años ( $2100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y el caudal máximo anual ( $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Y luego se comparan estas situaciones para obtener la menos desfavorable.

En las distintas geometrías analizadas se evalúan cuatro longitudes posibles de tablero, las cuales una tendrá dos posibilidades de disposición de pilas. Lo que intentamos con estas distintas disposiciones de pilas (ver tabla 6) es evitar ubicar una pila en el centro del cauce, donde las velocidades son mayores y se generarían erosiones mucho mayores.

Longitud tablero del puente (m)	Cantidad de Vanos	Luces libres (m)
210	5	4 de 38.80 + 1 central de 48.80
160	5	3 de 38.80 + 2 extremas de 18.80
120	3	3 de 38.80
120	3	2 de 33.80 + 1 central de 48.80
140	3	2 de 43.80 + 1 central de 48.80

TABLA 6 – Distintas geometrías ensayadas de los puentes provisorios

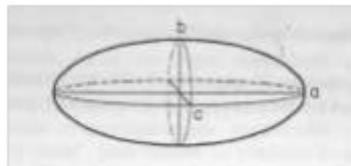
## 5.2 CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE EROSIONES FLUVIALES

Los materiales que componen los lechos de los ríos pueden ser granulares o cohesivos. Las modificaciones del cauce de estos últimos son más lentas debido a la mayor resistencia a la erosión. Tras una erosión del fondo, un lecho cohesivo puede restablecer su cota original, pero ya como material granular. La hidráulica fluvial relativa a lechos cohesivos requiere mayor investigación que para lechos granulares. En este estudio se trabaja con materiales granulares.



Una de las propiedades de mayor relevancia de las partículas de un lecho granular es el peso. En general, los cauces naturales están formados por partículas de rocas y minerales cuya densidad “ $\rho_s$ ” tiene poca variación. Un valor medio adoptado es  $\rho_s = 2,65$  o también la densidad relativa (respecto del agua)  $\rho_s/\rho = 2,65$ . La densidad relativa sumergida “ $\Delta$ ” es una relación de gran uso en la Mecánica del Transporte de Sedimentos y responde a la siguiente expresión:

$$\Delta = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \cong 1,65 \quad [2]$$



**FIGURA 33** – Dimensiones de una partícula aleatoria del lecho del río.

Debido a esta relación aproximadamente constante de los cauces naturales, la propiedad de mas importancia pasa a ser el tamaño, como representación del volumen de la partícula. Existen diferentes definiciones para establecer el tamaño de una partícula tales como: diámetro de sedimentación, de tamiz, nominal, de caída, etc. (Weber, 2000).

De las dimensiones triaxiales de una partícula ideal mostradas en la figura 33 (siendo  $a > b > c$ ) la medida “ $b$ ” es la dimensión decisiva para que un grano pase o sea retenido por un tamiz.

Un lecho granular sometido a la acción de una corriente de agua, observará que en algún momento una partícula es desplazada por la fuerza de arrastre del agua. Conocer en que condiciones ocurre este fenómeno, es el problema denominado Inicio o Umbral del Movimiento del fondo, el cual permite establecer el comienzo y la finalización del flujo bifásico.

La acción del agua sobre el lecho puede caracterizarse por una tensión cortante sobre el fondo  $\tau_0$ . La resistencia de la partícula a ser movida puede relacionarse con su peso sumergido, el cual es función del peso específico sumergido ( $\gamma_s - \gamma$ ) y el diámetro  $D$  que caracteriza el volumen de la partícula. Con estas tres variable puede formarse el parámetro adimensional  $t$  o tensión de corte adimensional.



$$\bar{\tau}_o = \frac{\tau_o}{(\gamma_s - \gamma)} [3]$$

Esta relación compara la fuerza que tiende a producir el movimiento (acción de arrastre proporcional a  $\tau_o D$ , ver figura 34) con la fuerza que procura estabilizarlo o mantenerlo en reposo (acción del peso proporcional a  $(\gamma_s - \gamma) D^3$ ).

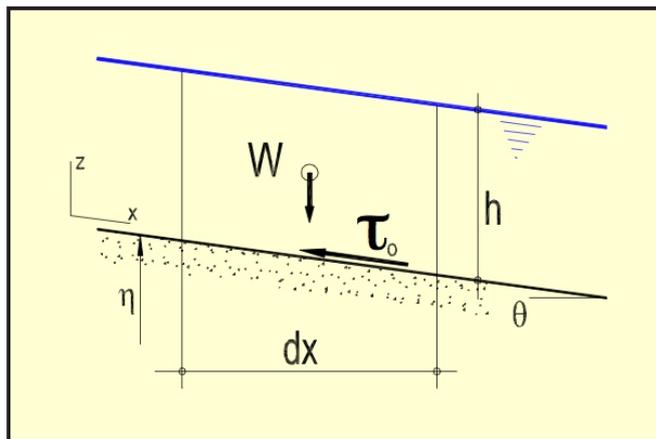


FIGURA 34 – Corte longitudinal esquemático de un cauce.

### 5.2.1 Erosión general

Se denomina erosión general, al descenso general del lecho debido a un aumento de la capacidad de transporte de una corriente debido a cambios de condición de escurrimiento, pendientes, etc. Afecta a tramos largos del cauce y sería la única erosión en un cauce recto, prismático y sin ninguna singularidad (a diferencia de erosión local). Puede analizarse como el transporte diferencial de sedimentos entre dos secciones para igual caudal líquido como muestra la figura 35.

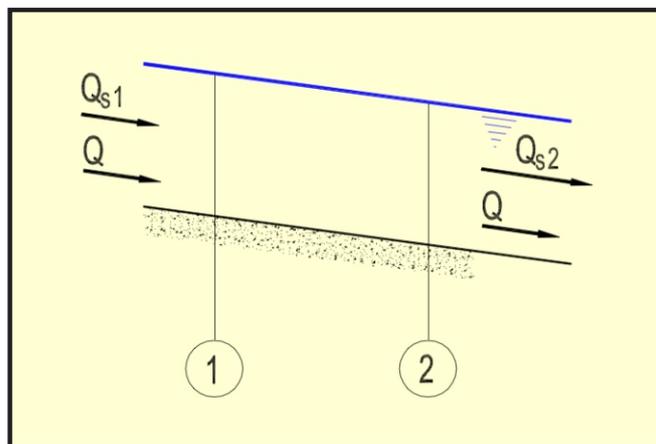


FIGURA 35 - Erosión General ( $Q_{s2} > Q_{s1}$ ) entre dos secciones del río dadas, Q si es caudal de sedimentos transportados.



La magnitud de la erosión general se puede calcular, por ejemplo, a partir del criterio de inicio de movimiento ante una corriente permanente. Una vez establecida la posición de la superficie libre (para cierto caudal), el cálculo se realiza manteniendo fijo el nivel del agua y se desciende el nivel del lecho, aumentando de esta manera el área y disminuyendo la velocidad, hasta que la velocidad sea incapaz de mover las partículas.

### 5.2.2 Erosión por estrechamiento

Este tipo de erosión en las aproximaciones a distintas obras, como por ejemplo a puentes, encauzamientos, etc. Al reducirse el ancho de la sección, la corriente aumenta su velocidad y por ende aumenta el transporte de sedimentos, el tirante aumenta y puede variar la pendiente del fondo a partir de la contracción. Este proceso se detiene cuando alcanza la situación de equilibrio para todo el tramo  $t_0 \approx t$  y el  $Q_{s1} \approx Q_{s2}$ .

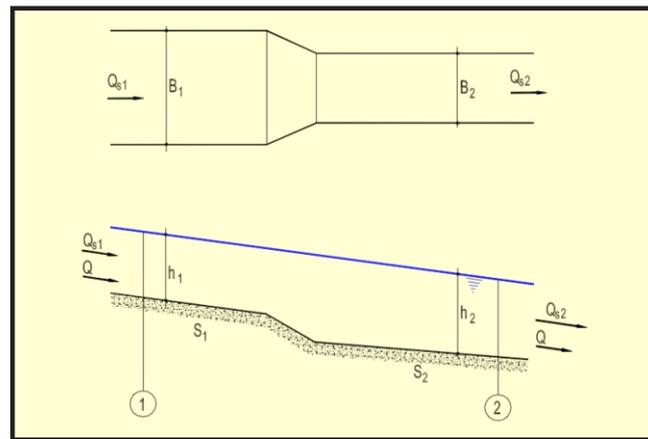


FIGURA 36 - Erosión por Estrechamiento.

El grado de estrechamiento es considerado por la relación de contracción  $\beta$ :

$$\beta = \frac{B_1}{B_2} \quad [4]$$

Donde  $B_1$  y  $B_2$  son los anchos de las dos secciones del río analizadas.

### 5.2.3 Erosión local

La erosión local se explica por la acción de un flujo complejo que requiere consideraciones bi o tridimensionales de las velocidades. Se presenta asociada a singularidades u obstáculos y no afecta a las condiciones generales del flujo. El flujo que genera estas erosiones posee fuerte turbulencia y puede desarrollar grandes vórtices.



En las erosiones locales, el flujo bifásico resulta acelerado o retardado en forma brusca por causas de las fluctuaciones de presión y de las variaciones en los esfuerzos de corte.

Las erosiones locales resultan función de:

- las características del escurrimiento;
- del material que conforma el lecho;
- material transportado;
- hidrograma de crecida y eventos anteriores;
- dirección del flujo;
- acumulación de material arrastrado (troncos, etc);
- acumulación de hielo;
- características de la obra de ingeniería.

Algunas de las erosiones locales más frecuentes se enuncian a continuación:

- i. en estribos de puentes;
- ii. en espigones;
- iii. en pilas de puentes;
- iv. aguas abajo de una presa;
- v. a la salida de obras de descarga;
- vi. erosión debajo de conducciones;

El presente trabajo se enfoca al análisis de los fenómenos de erosión local en pilas y estribos de puentes.

#### **5.2.4 Generadas por las pilas de un puente**

Físicamente, el fenómeno consiste en que alrededor de la pila se dan velocidades localmente mayores que las medias de la corriente. Estas altas velocidades son producto del efecto de obstáculo que se originan por la presencia de la pila y son los responsables de la socavación.

Existen dos modalidades distintas de erosión local:

1. la corriente no es capaz de poner en movimiento el material del lecho del río, pero los vórtices pueden llevar a cabo la socavación (agua limpia). La erosión local comienza con una velocidad de aproximadamente la mitad de la velocidad umbral para el lecho en general.



2. normalmente en las crecidas de un río existe un transporte general de sedimentos en el lecho al mismo tiempo que la erosión local (lecho vivo).

Los elementos que aparecen en la erosión local en pilas (ver figura 24) son los siguientes:

- a. Flujo descendente aguas arriba (downflow);
- b. Vórtice en herradura (horseshoe);
- c. Vórtice en estela aguas abajo (wake); arrastra el sedimento erosionado.
- d. Sobreelevación de la superficie del agua con pequeños remolinos (roller).

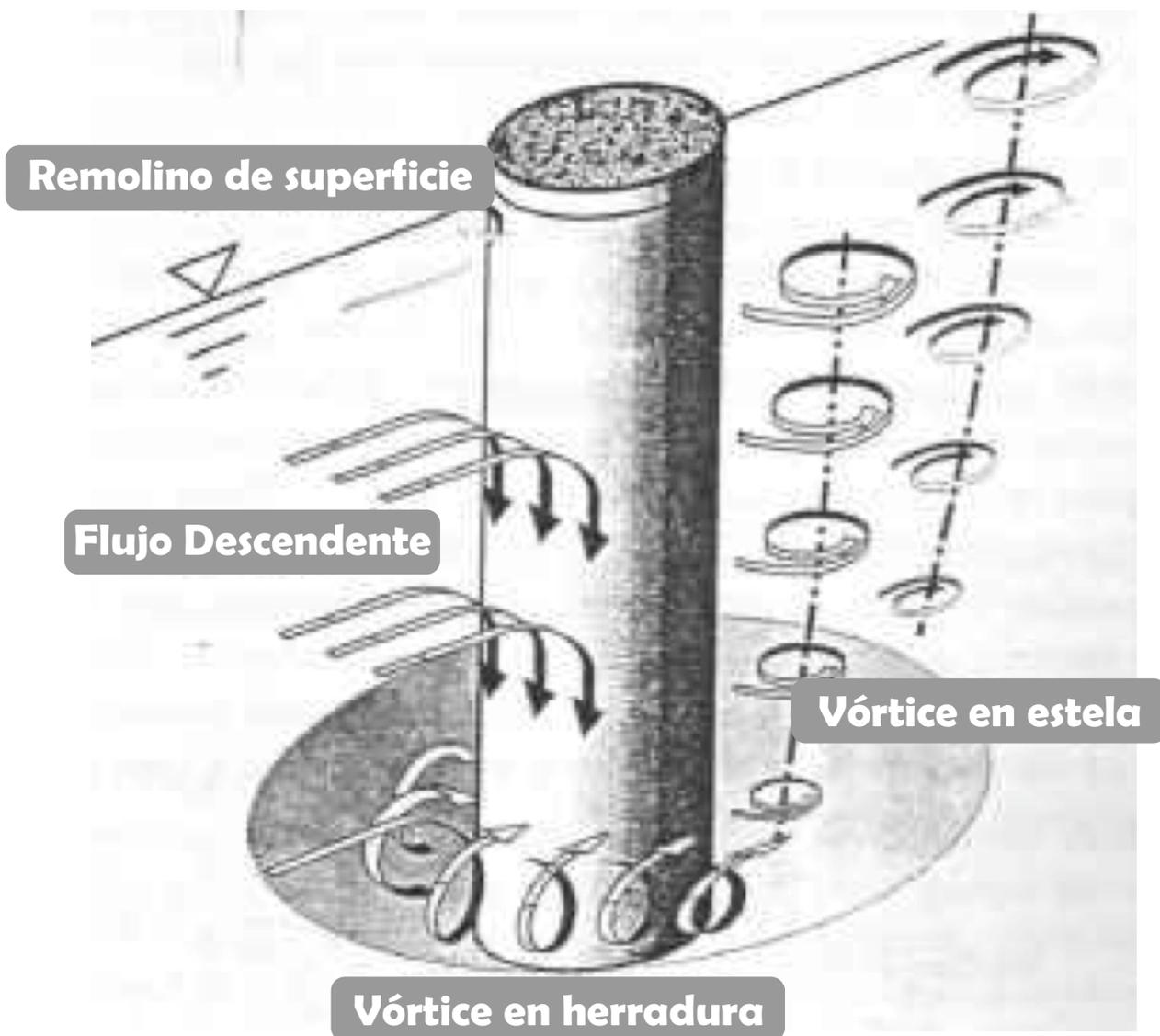


FIGURA 37 – Distintas turbulencias generadas por una pila de puente en el flujo del río.



### 5.2.5 Generado por los estribos del puente

Tienen un proceso similar al de erosión en pilas. Algunos autores han testeado esta analogía comparando profundidades de erosión en pilas circulares y estribos con bordes semicirculares del mismo diámetro arribando a resultados del mismo orden de magnitud para pilas y estribos.

Lo que sí cambia el patrón de erosión es la longitud del estribo y su correspondiente obstrucción al flujo. Para estribos cortos el proceso puede observarse con claridad en la figura 38 donde se advierte la analogía entre en vórtice principal y el vórtice en herradura mostrado en la figura 39 de la erosión en pilas.

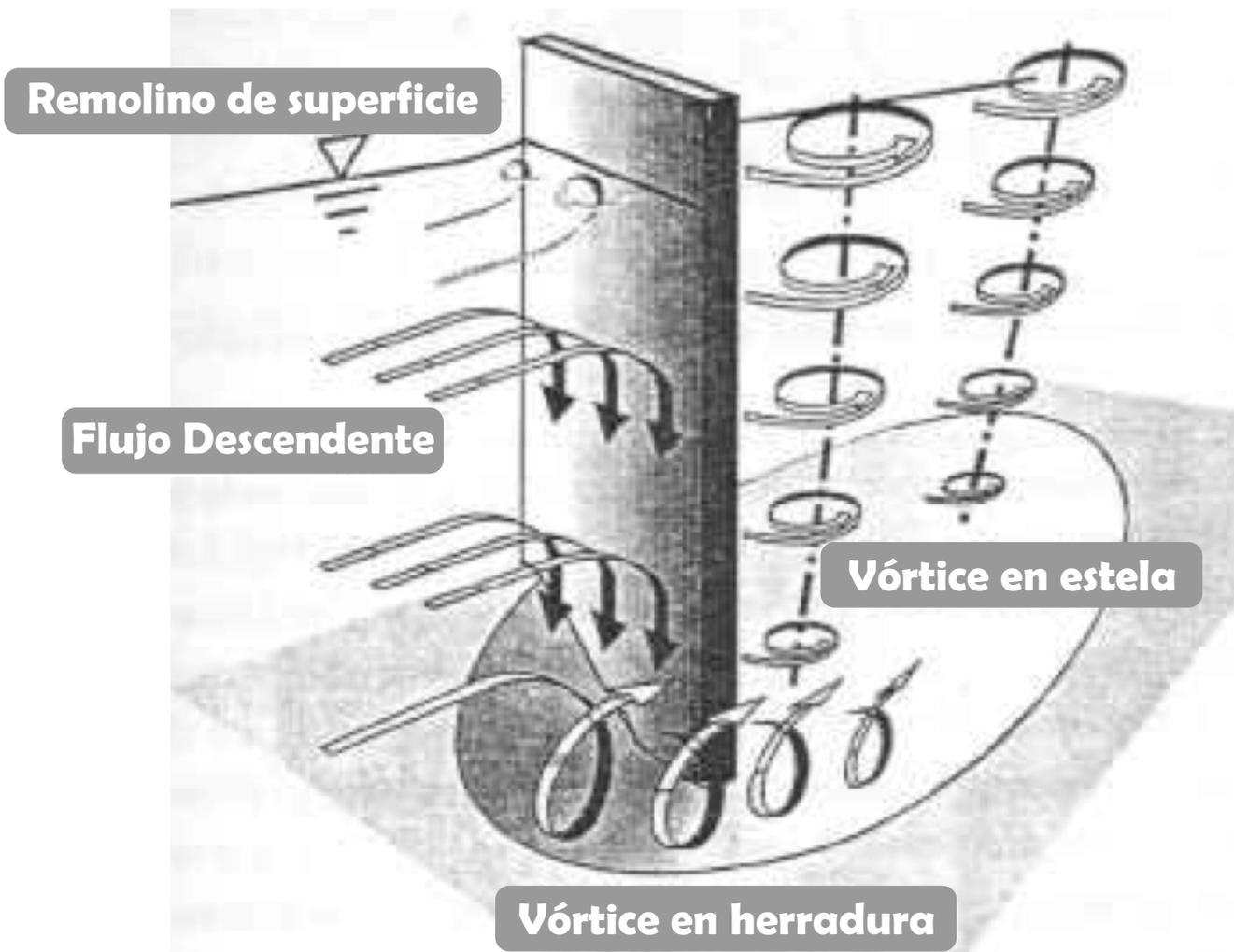


FIGURA 38 - Patrones de flujo y erosión en un estribo corto.



En estribos largos (ver figura 39), la estructura del flujo y la geometría del foso de erosión son similares a la de estribos cortos, excepto la componente del flujo descendente es menos significativa y se generan fuertes recirculaciones o remolinos adelante del estribo y cerca de la pared o borde del canal. Debido a la profundidad del flujo en el foso de erosión existe un flujo bidimensional aguas abajo. La actividad erosiva es mayor cerca del borde del estribo donde el vórtice principal es más concentrado.

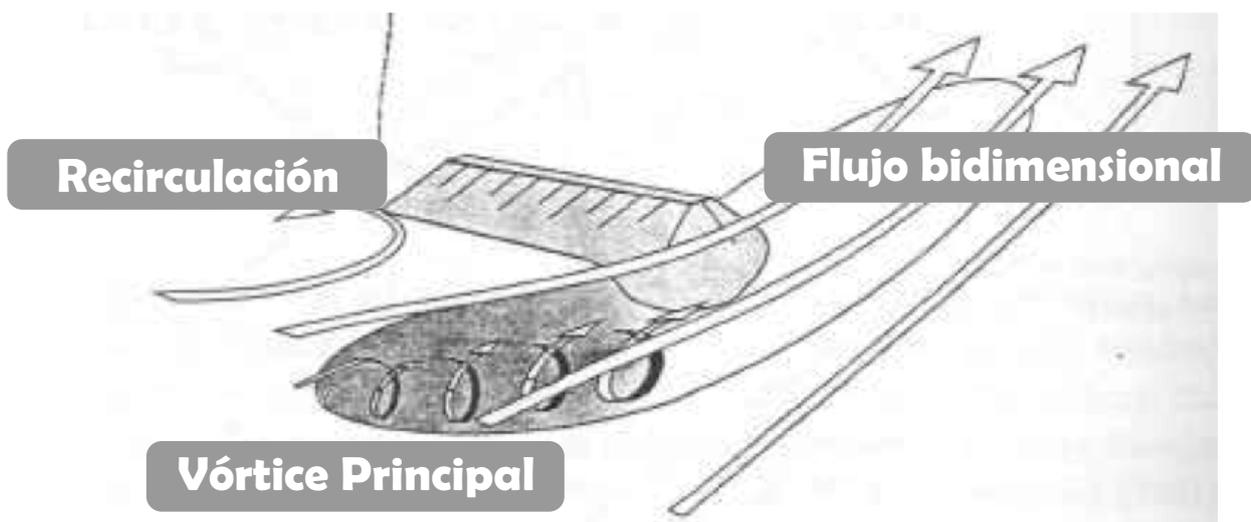


FIGURA 39 - Patrones de flujo y erosión en un estribo largo.

Para la estimación de la profundidad de erosión local en estribos Melville et al (2000), al igual que la erosión local en pilas, plantean la necesidad de analizar relaciones entre distintos parámetros y sus correspondientes efectos.

### 5.3 CÁLCULO DE LAS EROSIONES

#### 5.3.1 Cálculo del $D_{50}$

Para calcular las erosiones primero se debe calcular el parámetro  $D_{50}$ , el cual representa el tamaño medio del sedimento, medido desde su granulometría. Es decir el  $D_{50}$  es el diámetro en mm del tamiz a en el cual queda retenido el 50% de la muestra.

Debido a la falta de estudios del lecho del río, para poder caracterizar el material del río debimos utilizar la curva granulométrica de un yacimiento que se encuentra cerca del sector de emplazamiento de la presa (ver figura 40).

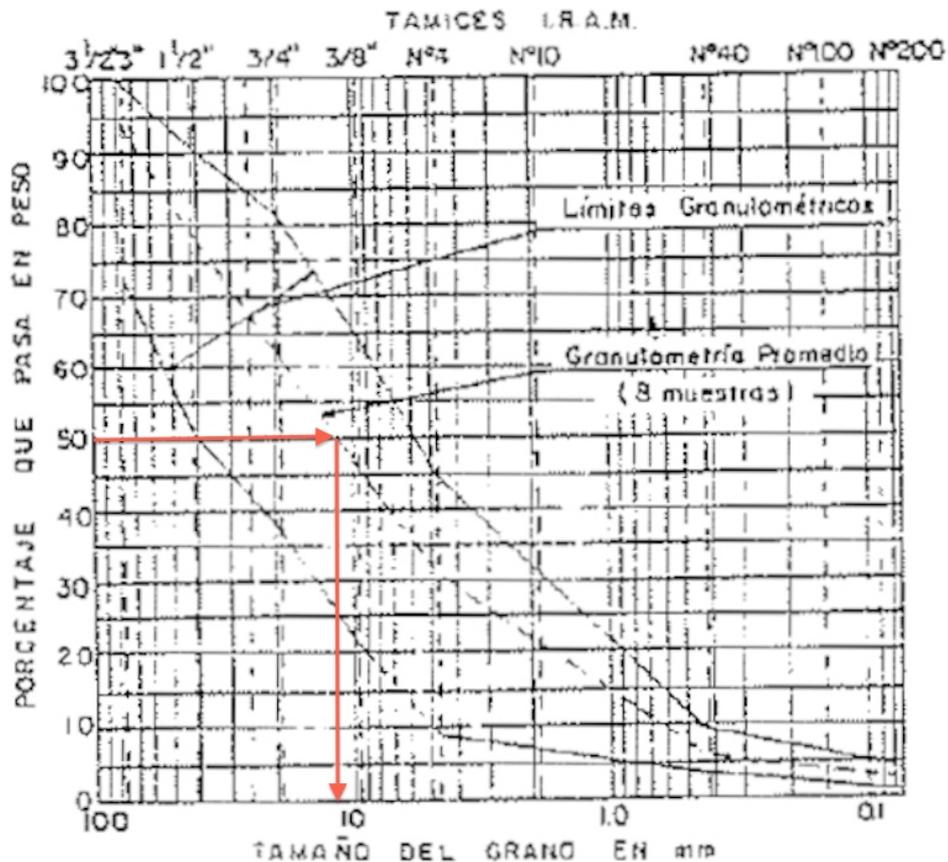


FIGURA 40 – Curva granulométrica del yacimiento cercano al sector de emplazamiento de la presa.

De la curva obtuvimos un valor de  $D_{50} = 11,5$  mm, lo que muestra q se esta trabajando con materiales granulares.

### 5.3.2 Erosiones generales

Para el cálculo de las erosiones generales se utilizó la metodología de Blench (año)la cual parte de la teoría del régimen. Se plantea que durante las crecidas se alcanza el tirante dado por las ecuaciones de régimen.

Para arenas de  $0.06 < D_{50} \text{ (mm)} < 2$

$$y_m = 1,20 \left( \frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/6}} \right) [5]$$



Para gravas con  $d_{50} \text{ (mm)} > 2$

$$y_m = 1,23 \left( \frac{q^{2/3}}{d_{50}^{1/12}} \right) \quad [6]$$

Donde:  $y_m$  tirante de erosión medio [m] (desde la superficie libre hasta el fondo del lecho erosionado),  $q$  caudal por unidad de ancho [ $m^3/s \text{ m}$ ], el diámetro medio  $d_{50}$  [mm].

Como se tiene un  $d_{50}$  superior a 2 mm (11,5 mm) utilizaremos la segunda expresión. Los resultados se detallan en la tabla 6.

Cálculo	EROSIÓN GENERALIZADA - BLENCH									
	PUENTE 210 m		PUENTE 160 m		PUENTE 120 m		PUENTE 120 m		PUENTE 140 m	
Q [ $m^3/s$ ]	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400
B [m]	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95
y [m]	8,04	7,14	8,09	7,16	8,17	7,19	8,17	7,19	8,14	7,18
v [m/s]	2,7	2,3	3,05	2,5	3,68	2,87	3,67	2,85	3,37	2,69
q [ $m^3/m.s$ ]	21,708	16,422	24,675	17,9	30,066	20,635	29,984	20,492	27,432	19,314
ym [m]	7,65	6,363	8,325	6,736	9,485	7,399	9,468	7,365	8,928	7,083
k	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
ymk [m]	9,56	7,95	10,41	8,42	11,86	9,25	11,84	9,21	11,16	8,85
h [m]	1,91	1,59	2,08	1,68	2,37	1,85	2,37	1,84	2,23	1,77

TABLA 7 – Cálculos de erosiones generales mediante el método de Blench

### 5.3.3 Erosiones locales generadas por las pilas

La ecuación más utilizada es la ecuación de la Universidad de Colorado, recomendada en el documento HEC-18 (1993) del Departamento de Transportes de los EEUU, también conocida como ecuación de Richardson:

$$\delta_s = 2 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times a^{0.65} \times h_1^{0.35} \times F^{0.43} \quad [7]$$

Donde  $\delta_s$  es la profundidad de erosión;  $y$ , el calado;  $K_1$ , el factor corrector de forma de la pila;  $K_2$ , el factor corrector según el ángulo de ataque;  $K_3$ , el factor corrector para las condiciones del lecho;  $K_4$ , factor corrector debido al acorazamiento del material del lecho;  $b$ , la anchura de la pila y  $F$ , el número de Froude. Los resultados de aplicar esta ecuación don: (22.8) fue desarrollada a partir de datos de laboratorio y se recomienda tanto para condiciones de aguas claras como de lecho móvil. En el HEC-18 se recomienda que el valor límite de  $ds/y$  sea 2.4 para  $F < 0.8$  y 3.0 para  $F > 0.8$ .

Cálculo	EROSIÓN LOCAL POR PILA - CSU									
	PUENTE 210 m		PUENTE 160 m		PUENTE 120 m		PUENTE 120 m		PUENTE 140 m	
Q (m <sup>3</sup> /s)	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400
Vr (m/s)	2,7	2,3	3,05	2,5	3,68	2,87	3,67	2,85	3,37	2,69
Fr	0,41	0,37	0,44	0,38	0,48	0,4	0,47	0,4	0,47	0,39
K1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
K3	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
K4	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
a (m)	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
h1 (m)	8,04	7,14	8,09	7,16	8,17	7,19	8,17	7,19	8,14	7,18
hs (m)	3,15	2,89	3,26	2,93	3,39	3	3,36	3	3,36	2,96

**TABLA 8** – Cálculos de erosiones locales generadas por las pilas del puente, por la ecuación de Richardson.

### 5.3.4 Erosiones locales generadas por los estribos

#### Método de Artamanov

$$\frac{h_s}{h_1} = K_a \cdot K_k \cdot K_q \quad [8]$$

Donde:  $K_a$  coeficiente que depende del ángulo  $\alpha$  que forma el eje del estribo con la corriente,  $K_k$  coeficiente que depende del talud del estribo, y  $K_q$  coeficiente en función de la relación de caudal interceptado por el estribo y el caudal total de diseño.

$$K_a = 0,782 \cdot e^{0,0028 \cdot \alpha} \quad [9]$$

$$K_k = 1,028 \cdot e^{-0,24 k \alpha} \quad [9]$$

$$K_q = 4,429 + 1,063 \operatorname{Ln} \left( \frac{Q_i}{Q} \right) \quad [11]$$

Donde:  $\alpha$  ángulo entre estribo y corriente [radianes]; k talud del estribo (k:1; horizontal: vertical);  $Q_i$  caudal [m/seg] que intercepta el estribo (i depende de la margen analizada); Q caudal total de diseño [m/seg].

$\alpha$	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
k	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
h1	8,17	7,19	8,17	7,19	8,14	7,18	8,09	7,16	8,04	7,14
Qi (m.der.) m3/s	135,96	46,72	136,27	46,88	177,16	59,18	135,94	55,19	151,97	55,55
Qi (m.izq.) m3/s	178,72	59,52	179,15	59,72	134,84	46,45	83,15	38,04	153,77	63,13
Qi (cauce) m3/s	1785,3	1293,8	1784,6	1293,4	1788	1294,4	1880,9	1306,8	1794,3	1281,3
Q diseño - m3/s	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400	2100	1400
Estructura	Puente: 120 m		Puente: 120 m		Puente: 140 m		Puente: 160 m		Puente: 210 m	
Ka	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785	0,785
Kk	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809	0,809
Kq Derecha	1,14	0,436	1,142	0,439	1,064	0,329	0,782	0,255	0,664	0,025
Kq Izquierda	1,073	0,335	1,076	0,339	0,774	0,072	0	0	0	0
hs Derecha	5,92	1,99	5,93	2,01	5,5	1,5	4,02	1,16	3,39	0,11
hs Izquierda	5,57	1,53	5,58	1,55	4	1	0	0	0	0

**TABLA 9** – Cálculos de erosiones locales generadas por los estribos, de margen derecha a izquierda por el método de Artamanov.

# **CAPÍTULO VI**

## **Determinación De Los Saltos Para La Central Hidroeléctrica**



## 6.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se determinan con exactitud los saltos que tendremos para los distintos niveles de pelo de agua en la presa, y para los distintos caudales. Es necesario determinar con exactitud los saltos debido a que estos afectaran de manera directa la potencia de la planta hidroeléctrica. Para esto se utilizo los datos obtenidos del modelo computacional generado en HEC-RAS, y se debió generar un nuevo modelo para el canal de salida de la sala de maquinas.

Para este nuevo canal se utilizaron como condiciones de borde los datos obtenidos del modelo generado en HEC-RAS del río Santa Cruz en la sección de la presa. También se utilizaron la pendiente del canal que era conocida de pliego.

## 6.2 DESCRIPCIÓN DEL CANAL DE RESTITUCIÓN

El canal de restitución aguas abajo de la casa de máquinas de la presa Néstor Kirchner se compone de una sección trapezoidal de ancho 150 m, de longitud 900 m, taludes (mi-md) de 1.50 (V) : 1 (H) y una pendiente casi nula a cota 112.50 m.

## 6.3 MODELO DEL CANAL EN HEC-RAS

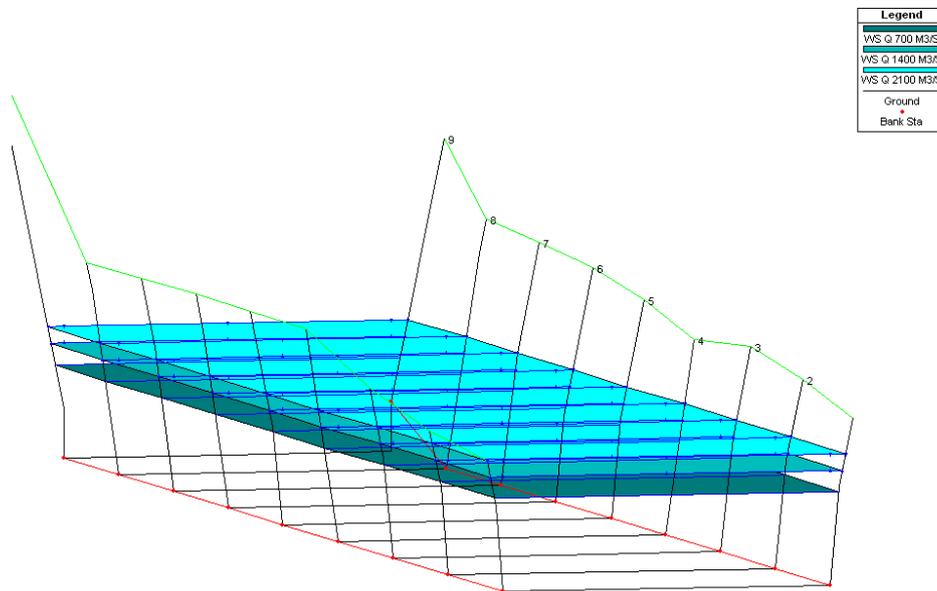
Para la realización del modelo computacional del canal de salida de la central hidroeléctrica se dimensiono un canal de sección constante. Las cotas ya definidas por pliego de la sección del canal inmediatamente después de la central, y la sección aguas abajo antes de que el canal desemboque en el río nuevamente.

Se utilizo la misma metodología que en el modelo del río Santa Cruz en el tramo de la presa. Esta consto con una elaboración inicial de una imagen 3D del canal generada en CIVIL CAD. Con esta se construyeron los perfiles transversales del canal, de los cuales no fue necesario incluir gran cantidad de estos ya que el canal consta de una sección constante en toda su longitud.

Una vez que se cargaron los perfiles transversales del canal, se debió comenzar con la incorporación de los caudales con los cuales se correrá el modelo. Los caudales que incorporamos en el modelo del canal fueron:



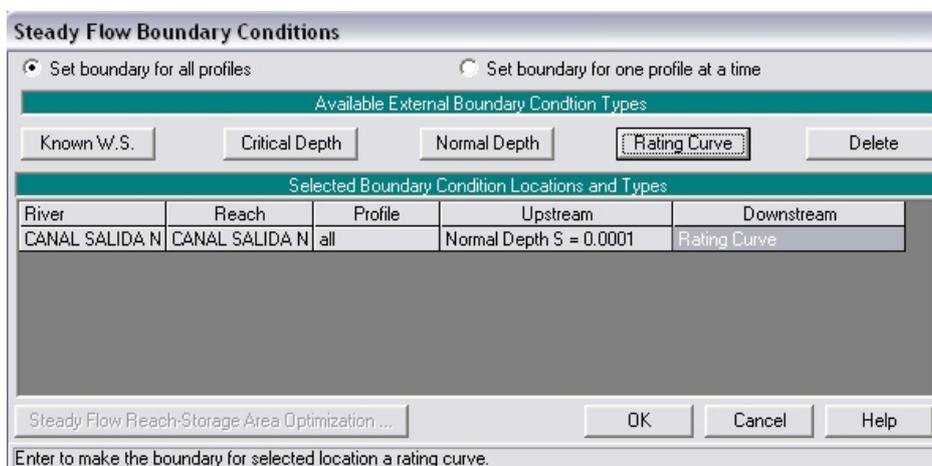
- El modulo anual de 700 m<sup>3</sup>/s;
- El máximo anual del mes de marzo de 1400 m<sup>3</sup>/s;
- Un caudal con una recurrencia de 25 años de 2100 m<sup>3</sup>/s;



**FIGURA 41** – Modelo computacional generado en HEC-RAS del canal de restitución a la salida de la sala de maquinas.

Luego de cargar los caudales en el modelo se incorporaron las condiciones de borde. Estas fueron la curva de restitución en la sección de salida aguas abajo del canal, y la geometría misma del canal con su pendiente de fondo.

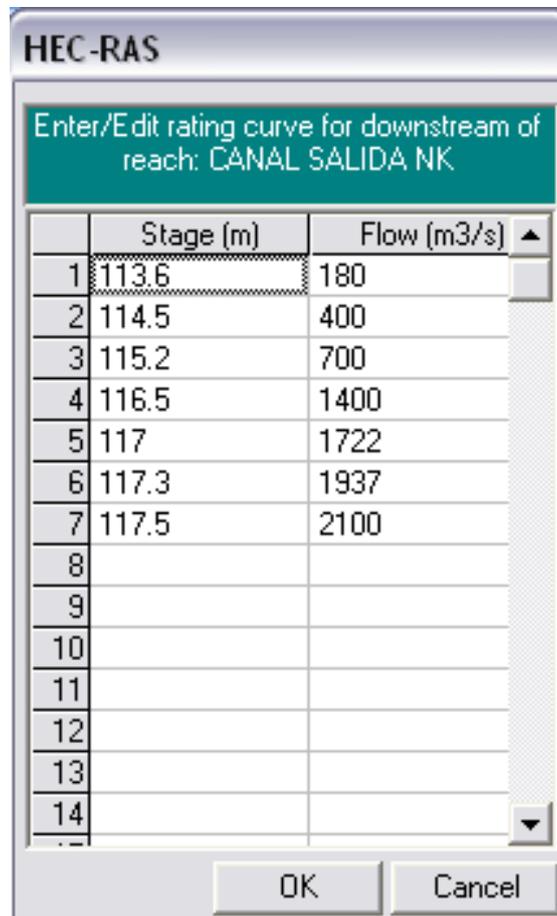
La curva de restitución utilizada como condición de borde se obtuvo en el modelo de HEC-RAS del tramo de la presa generado con anterioridad. Esta se incorporo como condición de borde aguas abajo, y aguas arriba se utilizo la pendiente de fondo.



**FIGURA 42** – Ventana del HEC-RAS donde se cargaron las condiciones de borde.



Y luego de que se definió las cuales serian las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo se incorporo la curva de restitución de la sección aguas abajo del canal.



**FIGURA 43** – Ventana del HEC-RAS en la que se ingresan los datos de la curva H-Q de la sección que se utilizara como condición de borde.

Una vez que se contaba con el modelo completamente armado se incorporo el n de Maning, esto se debió a que había dos posibilidades de elaboración del canal, con hormigón armado o con piedra.

Con el modelo finalizado se obtuvo una curva para cada canal, y estas se compararon con una curva antecedente generada por IATASA.

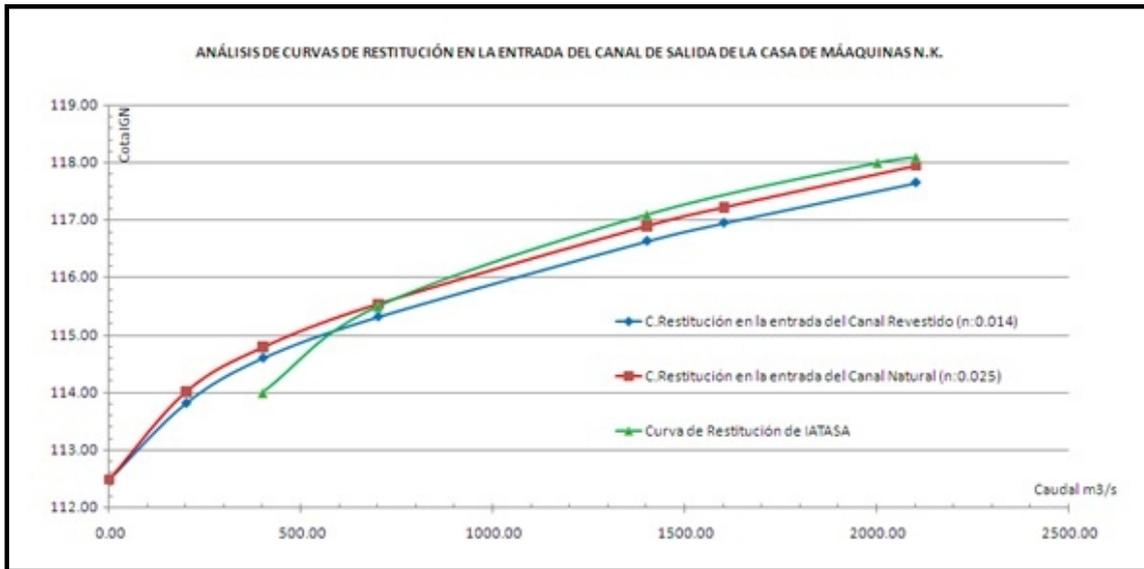


FIGURA 44 – Curvas en la sección aguas arriba del canal y curva de IATASA.

Manning de 0.014 HºAº	
Sección en inicio de Canal	
x	y
0.00	112.50
200.00	113.82
400.00	114.61
700.00	115.33
1400.00	116.64
1600.00	116.95
2100.00	117.65

Manning de 0.014 HºAº	
Sección en salida de Canal	
x	y
0.00	112.50
200.00	113.68
400.00	114.50
700.00	115.20
1400.00	116.50
1600.00	116.81
2100.00	117.50

Antecedente	
Curva de IATASA	
CAUDAL m3/s	COTA IGN
400.0	114.0
700.0	115.5
1400.0	117.1
2000.0	118.0
2100.0	118.1

Manning de 0.025 ROCA	
Sección en inicio de Canal	
x	y
0.00	112.50
200.00	114.02
400.00	114.79
700.00	115.55
1400.00	116.90
1600.00	117.22
2100.00	117.94

Manning de 0.025 ROCA	
Sección en salida de Canal	
x	y
0.00	112.50
200.00	113.68
400.00	114.50
700.00	115.20
1400.00	116.50
1600.00	116.81
2100.00	117.50

TABLA 10 – Curvas H-Q del canales de restitución en la sección a la salida de la sala de maquinas.



Como se pudo observar el canal que mas se ajusto a la curva realizada por IATASA fue el canal natura (realizado con piedras). Aparte de esto otra consideración que se tuvo en el momento de analizar el canal fue el costo de realizar un canal de 900 m de longitud revestido con hormigón armado.

Con estas curvas se pudo determinar con exactitud los saltos que tendrá para los distintos caudales del río. El cual será utilizado para determinar la potencia real de la planta hidroeléctrica. Estos saltos se verán influenciados por el nivel del embalse aguas arriba de la presa y el nivel en la sección del canal a la salida de la sala de maquinas.

# **CAPÍTULO VII**

## **Conclusiones**



## 7.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS

- Se consideró exitosa la labor del grupo de trabajo, ya que se lograron realizar toda la recopilación de antecedentes, y el análisis de los mismos en los tiempos estipulados. Y se pudieron adecuar estos antecedentes para lograr que nos fueran útiles para nuestros requisitos. Tanto los antecedentes topográficos los cuales se modificaron para poder ser utilizados, como los hidrológicos a los cuales se trabajó sobre las series de caudales o volúmenes con que se contaba para así obtener la información que requerida. Gracias a este trabajo sobre los antecedentes se conformo una base fiable sobre la cual basar el resto de los estudios del proyecto.
- Se lograron crear las imágenes 3D que representaran la realidad del terreno de manera exacta, las cuales luego fueron utilizadas para la elaboración de los modelos computacionales en HEC-RAS. Estas fueron verificadas cuando se compararon los volúmenes del vaso de la presa con los obtenidos en estudios anteriores realizados por consultoras. A su vez estas imágenes 3D fueron utilizadas como se menciona por dos reconocidos profesionales quienes las avalaron. Así de esta manera se consideraron validas las imágenes 3D generadas, y se utilizaron en los cálculos de caudales del proyecto.
- Con respecto a la curva de Cota-Vol esta fue completada, ya que originalmente solo disponíamos los valores desde el vertedero. Con la curva completa se estimaron los tiempos de llenado del embalse, para con estos planificar las obras en el tiempo. También se logro incorporar al análisis de estas curvas la influencia que tendrá el lago Argentino en los volúmenes del embalse, desde cierta cota.
- Fueron estimadas las erosiones que generarían las distintas geometrías ensayadas mediante distintas formulas, utilizando las que se consideraron que mejor se adecuaron al cauce del río. Todas las erosiones calculadas fueron verificadas por los mismos dos profesionales que corroboraron los volúmenes del embalse. Con las erosiones calculadas se determino cual seria la geometría ensayada mas favorable para la construcción del puente.
- En cuanto a los saltos que tendrá la estación hidroeléctrica se generó una curva de restitución en la sección e la salida de la sala de máquinas. Esta se brindo a los especialistas encargados de la generación de energía hidroeléctrica, y junto con los niveles del embalse para los distintos volúmenes de agua, determinaron la potencia brindada por las 6 turbinas Francis que se colocaran en la sala de maquinas de la Presa Presidente Dr. Néstor Kirchner.



## 7.2 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

- Esta práctica supervisada no es una tarea individual, sino que resulto del trabajo en conjunto con todo el equipo de Electro Ingeniería y docentes de la universidad quienes colaboraron en la formación de la misma. La interacción constante con el equipo de trabajo permitió la realización de los estudios y análisis que nos permitieron cumplir los objetivos que se habían planteado al inicio de la práctica.
- Pude tener un panorama de cómo es la vida laboral de un ingeniero, ya sean los tiempos con los que se cuenta, las presiones con las que se trabaja, la información disponible, etc. Recalcando la dificultad del trabajo debido a los cortos tiempos con los que se cuenta, y la presión de obtener resultados basándonos en datos que no son los que realmente son necesarios para ese tipo de estudio. Por ejemplo al momento de trabajar sobre el terreno de la presa, no se contaba con una topografía fiable de todo el terreno estudiado, siendo un proyecto de tal envergadura. Estudios básicos como estos que se deberían contar desde el principio del proyecto no se disponen hasta que este ya esta realizado.
- Forme parte del equipo de trabajo encargado de la elaboración de una de las obras más grandes realizadas en la Argentina en los últimos años. Esto me brindo una gran experiencia en el hecho de poder tener una noción de las obras que los ingenieros realizan, y entender cómo se trabaja en proyectos de tal magnitud.



## REFERENCIAS

- HOBRAS FLUVIALES – Catedra de Obras Hidráulicas.
- TURBOMÁQUINAS HIDRÁULICAS (1976) – Manuel Polo Encinas – Primera edición.
- APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRISCOS DEL RÍO SANTA CRUZ – Pliego licitatorio - Titulo I, Memoria descriptiva.
- APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRISCOS DEL RÍO SANTA CRUZ – Pliego licitatorio - Titulo V, Capitulo I – Hidrología.
- APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRISCOS DEL RÍO SANTA CRUZ – Pliego licitatorio - Titulo V, Capitulo IV – Topografía.
- APROVECHAMIENTOS HIDROELECTRISCOS DEL RÍO SANTA CRUZ – Informe generado por HIDROCUYO S.A.