



MEMORIA DE CÁLCULO

PROYECTO PALMUCHO

CAVERNA DE MÁQUINAS

EXCAVACIÓN

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOSTENIMIENTO

04420-03-20-IICR-MCA-001 V1

MAYO 2005



DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación



MEMORIA DE CÁLCULO

PROYECTO : CENTRAL PALMUCHO
OBRA : CAVERNA DE MÁQUINAS
PARTE DE OBRA : EXCAVACION
TITULO : DISEÑO ESTRUCTURAL DEL
SOSTENIMIENTO

APROBADO

Res: 856 de 15.6.05
Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

FECHA DE EDICIÓN : MAYO 2005

DOCUMENTO	04420-03-20-IICR-MCA-001 Versión 1	
EJECUTÓ	Leonardo Bustamante V.	
REVISÓ	Gonzalo Chamorro S.	
APROBÓ	Gonzalo Chamorro S.	

MEMORIA DE CÁLCULO
04420-03-20-IICR-MCA-001-V1

CENTRAL PALMUCHO

CAVERNA DE MÁQUINAS
EXCAVACION

DISEÑO ESTRUCTURAL DEL SOSTENIMIENTO

1 IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La central hidroeléctrica Palmucho es una obra que aprovecha los caudales que se restituyen desde el embalse Ralco al cauce natural del río Bío-Bío, entre la presa y la caverna de máquinas, para mantener el caudal ecológico de 27,1 m³/s. La energía generada por la central Palmucho se entregará al Sistema Interconectado Central de Chile (SIC).

2 IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA CALCULADA

En la presente memoria se detallan las bases de diseño y los cálculos correspondientes al sostenimiento de la excavación de la caverna de máquinas de la Central Palmucho.

3 ANTECEDENTES

Se ocupan como antecedentes del presente diseño los siguientes documentos:

- Memoria de cálculo "C. Palmucho. Caverna de Máquinas. Sostenimiento de la Roca" del año 1998, correspondiente a la etapa de diseño básico, cuyo autor fue el ingeniero Sr. Patricio Rodríguez V.
- Informe "Proyecto Central Ralco Zona de Presa. Cartografiado geológico y geotécnico de la galería de reconocimiento GRN-11" del año 1994, preparado por el geólogo Sr. Claudio Aránguiz W.

APROBADO
Res. DAE Ex 656 2005
Dir. de Recursos Hídricos
SECRETARÍA GENERAL DE AGUAS

- Informe 420-03-11-IICR-ITE-001 V1 "Reconocimiento Geológico Geotécnico complementario del macizo rocoso de implantación de la Caverna de Máquinas" de enero del 2005.
- El libro "Engineering Rock Mass Classifications" edición de 1989 del autor Z.T. Bieniawski
- Planos del diseño básico de la Central Palmucho.

4 BASES DE DISEÑO

4.1 Geometría de la excavación

El diseño de la Caverna de Máquinas se ha hecho de manera tal de optimizar la forma general así como las dimensiones óptimas de las secciones transversales y longitudinales típicas que permitan alojar los equipos de generación, teniendo presente las consideraciones que permitan su explotación adecuada.

La sección transversal de la caverna será de forma ovoidal, ya que es la geometría óptima para este tipo de excavaciones, debido a que con ello se logra reducir las tensiones que se producen en el macizo rocoso en el entorno a la excavación.

Las dimensiones globales principales de excavación de la caverna son las siguientes:

- Ancho máximo = 18,00 m
- Altura entre el nivel del piso de turbinas y la clave = 24,47 m
- Altura máxima = 32,87 m
- Largo total = 40,60 m
- Área sección transversal típica = 381,70 m²
- Cobertura aproximada de roca sobre la clave = 226 m

La geometría de la sección típica se muestra en la figura 1.

APROBADO

Res: DGA Ex 856 7005

Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

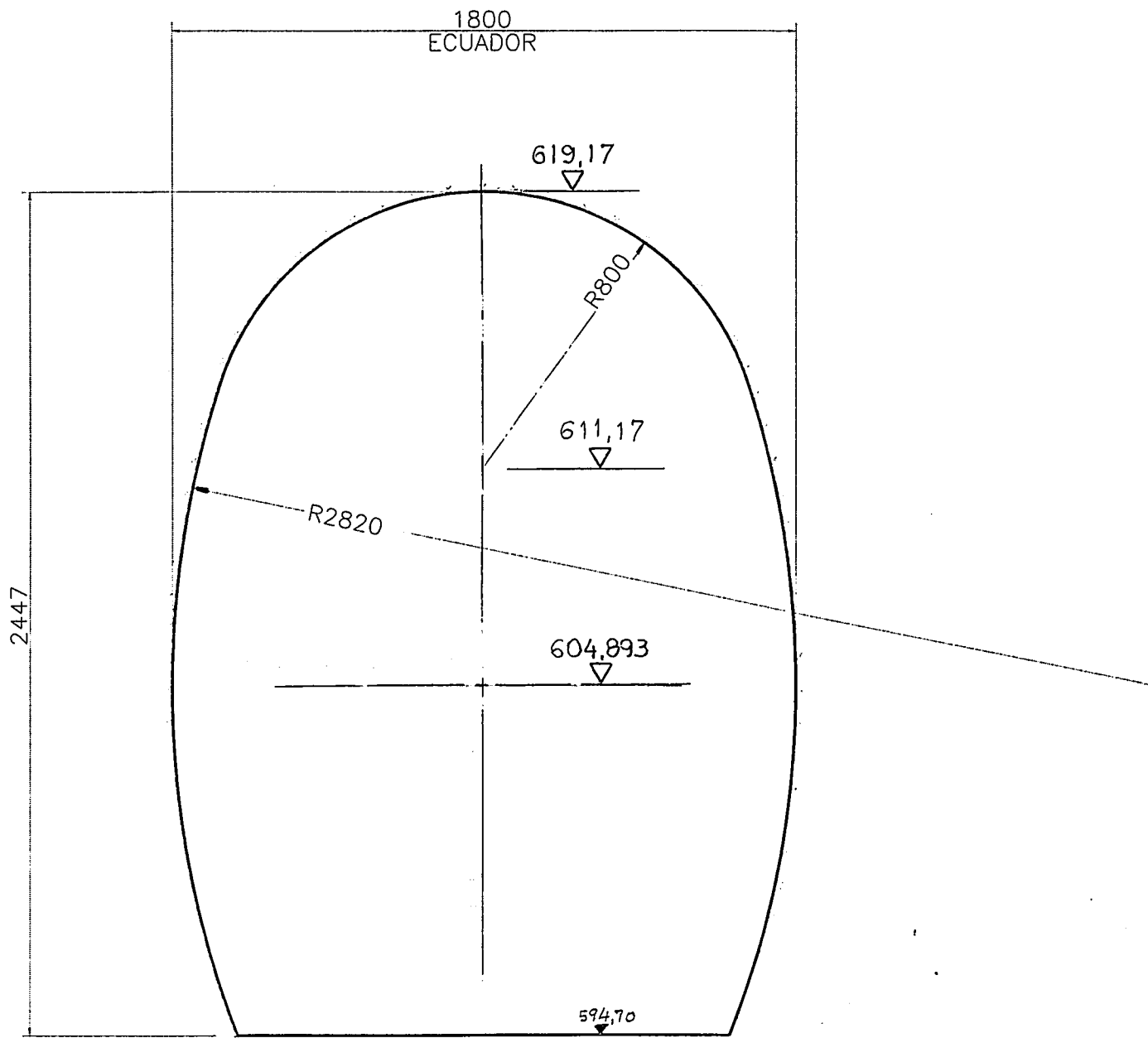


Figura 1. Sección típica de excavación.

APROBADO
Res: DCA ex 816 2005
Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

4.2 Geología

Del informe geológico “Reconocimiento Geológico Geotécnico complementario del macizo rocoso de implantación de la Caverna de Máquinas” de enero del 2005, se tiene lo siguiente:

- **Litología:**

El macizo rocoso corresponde a un stock intrusivo granodiorítico diabásico, de un plutón datado del Terciario medio, el cual, presenta gradaciones a diorita y a monzonita. Submacroscópicamente, presenta plagioclasas y máficos (piroxenos), con menor cantidad de cuarzo. Se destaca eventualmente, la existencia de motas de 1 a 2 cm, compuestas por agrupaciones de plagioclasa y cuarzo, ambos minerales claros. Su textura es holocristalina, fanerítica y de grano medio a grueso.

- **Estructuras: (diaclasas y fracturas)**

Las estructuras están representadas por fallas, diaclasa y eventuales diques.

La concentración de estructuras de primer orden en la red hemisférica, que pertenecen a la mayor concentración se han denominado F1, las de segundo orden F2, las de tercer F3 y así sucesivamente

El diagrama de todas las estructuras integradas muestra que las familias detectadas en esta zona son las siguientes:

<i>Orden Polo</i>	<i>Plano</i>	<i>Manteo/rumbo</i>
F1: 38/325 (manteo/dirección del manteo)	38/165	38/055SE
F2: 85/165 (manteo/dirección del manteo)	85/345	85/075 NW
F3: 35/093 (manteo/dirección del manteo)	36/273	35/183 NW

Se observa que dos de las familias mantean hacia el NW y la otra hacia el SE.

La distribución de los rumbos de todas las estructuras, según el diagrama de rosa, indica el predominio del pétalo correspondiente al azimut de 70° - 80°.

APROBADO

DATE: DCA EX 056 2001
INSTRUMENTAL DE RECURSOS HÍDRICOS
COMISIÓN GENERAL DE AGUAS

El eje de la caverna de máquinas tiene una orientación de 151° . De lo anterior se colige que las estructuras 38/325 y 85/165 tendrán rumbos subperpendiculares al eje de la caverna. En cambio las estructuras 35/093 tendrán sus rumbos oblicuos con respecto al eje.

En todo caso se debe destacar que las estructuras 38/325 y 85/165 tenderán a formar un "techo de dos aguas" en la bóveda de la caverna, lo cual podría ser absorbido por la forma de herradura de ésta.

- **RQD**

El RQD promedio es de 75%

- **Resistencia uniaxial**

La resistencia se estimó en 100 Mpa.

- **Grado de meteorización**

El macizo rocoso en general presenta un bajo grado de meteorización en la zona investigada.

- **Filtraciones**

Sólo goteo moderado y humedades.

- **Clasificación geomecánica según sistema Q (Barton)**

El valor más probable calculado para Q es de 4,4. Esto implica una roca de calidad Media.

- **Clasificación geomecánica RMR (Bieniawski)**

El valor del "Rock Mass Rating" (RMR) más probable calculado para el RMR es de 60 a 61, valor correspondiente al límite entre las categorías II y III, es decir, entre calidad Buena y Media.

- **Peso específico**

El peso específico es de 2.7 T/m³.

APROBADO

Res: DEA EX 856 700.I
Adm. de Recursos Hídricos
SECRETARÍA DE AGUAS

4.3 Materiales

Los materiales de construcción considerados en los cálculos son los siguientes:

- Pernos para roca
 - Diámetros \varnothing 28 mm, \varnothing 25 mm y \varnothing 22 mm.
 - Calidad de acero de los pernos A63-42H o equivalente.
- Mallas electrosoldadas
 - Dimensiones 150x150x7 mm y 150x150x6 mm.
 - Calidad de acero AT56-50H.
- Hormigón Proyectado
 - Calidad Grado H30 con resistencia, según probeta cilíndrica, a los 28 días $f'c = 250 \text{ Kg/cm}^2$.

4.4 Recubrimientos Mínimos

Se considerarán los siguientes recubrimientos mínimos para las mallas de acero de refuerzo del hormigón proyectado:

- Contra roca 5 cm.
- Hacia el interior de la excavación 3 cm.

4.5 Armaduras Mínimas

Para las losas la armadura mínima se consideró un 0,18 % según ACI318.

5 DISEÑO DEL SOSTENIMIENTO

En la etapa de diseño básico se definió el eje de la caverna perpendicular al eje del túnel de desviación de modo de minimizar el ancho de la caverna y enlazar adecuadamente los túneles de aducción y evacuación con el túnel de derivación. Ello hace que el eje de la Caverna coincida con el sistema principal de diaclasas y no con la bisectriz de este sistema y el secundario, como sería el óptimo desde el punto de vista estricto de la excavación de la Caverna.

APROBADO

Res: DGA EX 856 2008
Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

A continuación se determinará el largo de los pernos, espesor del hormigón proyectado y la presión de soporte para la bóveda y para las paredes según los criterios de Barton, Bieniawski y Cording et Al.

Hay que señalar que el sostenimiento que se ubica desde el nivel del piso principal hacia arriba es de acción permanente; desde el nivel del piso principal hacia abajo es de acción temporal, ya que después sobre el sostenimiento se construirán los muros perimetrales de los niveles de generadores, turbinas, válvulas y difusores.

5.1 Según Barton

- Cálculo en la bóveda

Datos:

$$Q = 4,4$$

$$B = 18,0 \text{ m}$$

$$ESR = 1.$$

$$L = (2 + 0,15 * B) / ESR$$

$$L = 4,7 \text{ m}$$

Parámetro Q de Barton.

Ancho de la excavación.

Parámetro que depende del uso y el nivel de seguridad de la estructura.

Largo de los pernos.

Según las recomendaciones del método Q los pernos deben ser sistemáticos distribuidos cada 1,0 a 1,5 m de distancia, el espesor de hormigón proyectado debe ser de 5 a 10 cm.

- Cálculo en las paredes

Paredes por sobre el nivel del piso principal

Para el sostenimiento permanente en las paredes el método señala que el parámetro Q se puede amplificar por 2,5

Datos:

$$Q = 16 * 2,5 = 40$$

$$H = 25,5 \text{ m}$$

$$ESR = 1,0$$

$$L = (2 + 0,15 * H) / ESR$$

$$L = 5,8 \text{ m}$$

Parámetro Q de Barton.

Altura de la excavación.

Parámetro que depende del uso y el nivel de seguridad de la estructura.

Largo de los pernos.

APROBADO

Según las recomendaciones del método Q los pernos deben ser sistemáticos distribuidos cada 1,0 a 1,5 m de distancia, el espesor de hormigón proyectado debe ser de 5 a 10 cm.

Paredes por bajo el nivel del piso principal

Para el sostenimiento temporal en las paredes el método señala que el parámetro Q se puede amplificar por 5 y el ESR por 1,5

Datos:

$$Q = 16 * 5 = 80$$

$$H = 25,5 \text{ m}$$

$$ESR = 1,5$$

Parámetro Q de Barton.

Altura de la excavación.

Parámetro que depende del uso y el nivel de seguridad de la estructura.

$$L = (2 + 0,15 * H) / ESR$$

$$L = 3,9 \text{ m}$$

Largo de los pernos.

Según las recomendaciones del método Q los pernos deben ser sistemáticos distribuidos cada 1,5 a 2,0 m de distancia, no se requiere hormigón proyectado sistemático.

5.2 Según Bieniawski

- Presión de soporte

Datos:

$$RMR = 60$$

$$\gamma = 2,7 \text{ T/m}^3$$

$$B = 18,0 \text{ m}$$

Indice de calidad Rock Mass Rating

Densidad de la roca

Ancho de la excavación.

$$P = (100 - RMR) / 100 * \gamma * B$$

$$P = 19,4 \text{ T/m}^2$$

Presión de soporte aproximada

- Espesor del hormigón proyectado

Datos:

$$R = 10 \text{ m}$$

$$t = P * R * FM / \sigma_c$$

Radio promedio

Donde :

t : espesor del sostenimiento.

P : Presión de soporte.

R : Radio medio.

σ_c : Resistencia a compresión del sostenimiento.

FM: Factor de mayoración de las cargas.

$$t = 19,4 * 10,0 * 1,7 / 2500$$

$$t = 0,13 \text{ (m)}$$

$$t = 13 \text{ (cm)} \quad \text{se usará 15 cm de espesor.}$$

5.3 Según Cording et al.

- Cálculo en la bóveda

- Cálculo largo de los pernos

$$P_v = n * B * \gamma \quad \text{Presión de soporte aproximada}$$

$$n = 0,25 \quad \text{(i)} \quad \text{Parámetro de Cording et al.}$$

$$B = 16,5 \quad \text{(ii)} \quad \text{Ancho excavación.}$$

$$\gamma = 2,7 \text{ T/m}^3 \quad \text{Densidad de la roca}$$

(i) El parámetro $n = 0,25$ fue recomendado de Don Deere en la visita que hizo para la asesoría del proyecto Pangue.

(ii) Debido a la forma ovoidal de la caverna se adopta un ancho de excavación de 16,5 m.

$$P_v = 0,25 * 16,5 * 2,7 = 11,1 \text{ T/m}^2$$

De la figura 10 del documento de Cording et al. Se tiene que:

$$L/B = 0,25$$

Por lo tanto:

$$L = 0,25 * B$$

$$L = 0,25 * 16,5 = 4,1 \text{ m} \quad (1)$$

Altura de un bloque de roca = $n * B$

$$n * B = 0,25 * 16,5 = 4,1 \text{ m}$$

Longitud de adherencia perno ($\phi = 28 \text{ mm}$, $F_y = 4,2 \text{ T/m}^2$) = 1,8 m.

$$L_{min} = 4,1 + 1,8 = 5.9 \text{ m (2)}$$

Para cumplir con (1) y (2) se usarán pernos de $L = 6,0 \text{ m}$.

- Cálculo separación entre pernos (a)

Sea:

$\phi = 28 \text{ mm}$ Diámetro de los pernos
 $F_y = 4,2 \text{ T/m}^2$ Tensión de fluencia del acero
 $\gamma_p = 1,5$ Factor de seguridad de los pernos

$$T_o = 0,9 \cdot A_s \cdot F_y / \gamma_p \quad \text{Fuerza en la barra}$$

$$T_o = 0,9 \cdot 6,16 \cdot 4,2 / 1,5 = 15,5 \text{ T (1)}$$

$$T_o = a^2 \cdot P_v$$

$$a = (T_o / P_v)^{(1/2)}$$

$$a = (15,5 / 11,1)^{(1/2)} = 1,2 \text{ m}$$

Se usará $a = 1,20 \text{ m}$

- Cálculo en las paredes

- Cálculo largo de los pernos

$Ph = m \cdot H \cdot \gamma$ Presión de soporte aproximada
 $m = 0,12$ (i) Parámetro de Cording et al.
 $H = 24,5$ Alto excavación.
 $\gamma = 2,7 \text{ T/m}^3$ Densidad de la roca

- (i) El parámetro $m = 0,12$ fue recomendado de Don Deere en la visita que hizo para la asesoría del proyecto Pangue.

$$Ph = 0,12 \cdot 24,5 \cdot 2,7 = 7,9 \text{ T/m}^2$$

De la figura 11 del documento de Cording et al. Se tiene que:

$$L/H = 0,25$$

Por lo tanto:

$$L = 0,25 \cdot B$$

$$L = 0,25 \cdot 24,5 = 6,1 \text{ m}$$

- Cálculo separación entre pernos (a)

- Zona piso principal hacia arriba

Sea:

$\phi = 28$ mm Diámetro de los pernos

$F_y = 4,2$ T/m² Tensión de fluencia del acero

$\gamma_p = 1,5$ Factor de seguridad de los pernos

$T_o = 0,9 \cdot A_s \cdot F_y / \gamma_p$ Fuerza en la barra

$$T_o = 0,9 \cdot 6,16 \cdot 4,2 / 1,5 = 15,5 \text{ T (1)}$$

$T_o = a^2 \cdot P_v$

$$a = (T_o / P_v)^{(1/2)}$$

$$a = (15,5 / 7,9)^{(1/2)} = 1,40 \text{ m}$$

Se usará $a = 1,40$ m

- Zona piso principal hacia abajo

Sea:

$\phi = 25$ mm Diámetro de los pernos

$F_y = 4,2$ T/m² Tensión de fluencia del acero

$\gamma_p = 1,2$ Factor de seguridad de los pernos

$T_o = 0,9 \cdot A_s \cdot F_y / \gamma_p$ Fuerza en la barra

$$T_o = 0,9 \cdot 4,91 \cdot 4,2 / 1,2 = 15,5 \text{ T (1)}$$

$T_o = a^2 \cdot P_v$

$$a = (T_o / P_v)^{(1/2)}$$

$$a = (15,5 / 7,9)^{(1/2)} = 1,4 \text{ m}$$

Se usará $a = 1,40$ m

6 CONCLUSIONES

Como resultado del análisis anterior, en donde se determinó el largo de los pernos, espesor del hormigón proyectado y la presión de soporte para la bóveda y para las paredes según los criterios de Barton, Bieniawski y Cording et al, se usará el sostenimiento que cumpla con todos los criterios definidos por cada uno de los métodos.

APROBADO
Res: DGA EX 856 2005
Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

En resumen se tiene:

- **Sostenimiento Bóveda**

Pernos sistemáticos $\phi = 28$ mm, largo $L = 6,0$ m cada $1,2 \times 1,2$ m. Hormigón proyectado $e = 15$ cm reforzado con malla ACMA 150x150x7 mm

- **Sostenimiento en paredes sobre el piso principal**

Pernos sistemáticos $\phi = 28$ mm, largo $L = 6,0$ m cada $1,4 \times 1,4$ m. Hormigón proyectado $e = 15$ cm reforzado con malla ACMA 150x150x7 mm

- **Sostenimiento en paredes bajo el piso principal**

Pernos sistemáticos $\phi = 25$ mm, largo $L = 6,0$ m cada $1,4 \times 1,4$ m. Hormigón proyectado $e = 10$ cm reforzado con malla ACMA 150x150x6 mm

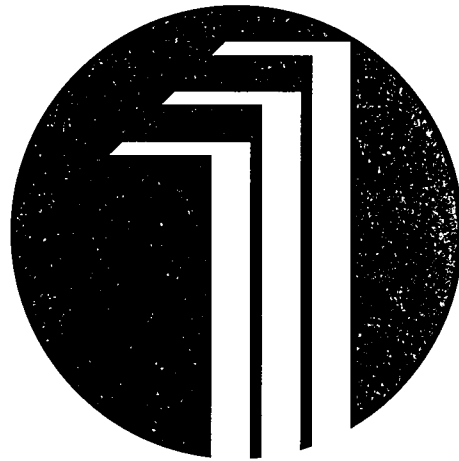
El detalle del sostenimiento se muestra en el plano Ld-50d-201 "Caverna de Maquinas. Sección Transversal (tip.). Excavaciones y Sostenimientos".

APROBADO
Res: *DA Ex 056 MDS*
Depto. Adm. de Recursos Hídricos
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00006 6191



EMPRESA DE INGENIERIA INGENDESA S.A.

SANTA ROSA N° 76
FONO: (56-2) 630 8000
FAX: (56-2) 635 4070
Santiago - CHILE