

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XIX CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

MODELACIÓN FÍSICA PARA EL CIERRE DE LOS RÍOS BAKER Y PASCUA EN EL SUR DE CHILE.

RICARDO GONZÁLEZ V.¹(*)
RODRIGO CIENFUEGOS C.²(*)
BONIFACIO FERNANDEZ L.³
JORGE BRAVO S.⁴
CARLOS COSTAS L.⁵
OCTAVIO GARCÉS V.⁶

RESUMEN

El proyecto hidroeléctrico Aysén (PHA) considera la construcción de 5 centrales en el sur de Chile, específicamente en los ríos Baker y Pascua. Ambos ríos en la zona de proyecto presentan valles estrechos, altas pendientes (0.1% - 2%) y caudales medios altos de unos 600 a 800 m³/s incluso en el periodo de estiaje. Lo anterior, sumado a las condiciones climáticas imperantes, lleva a que la maniobra de desvío del río sea un interesante desafío desde el punto de vista de la ingeniería. Consecuentemente, y como apoyo a los estudios de ingeniería básica, se construyeron dos modelos hidráulicos a escala (1:70 para el río Baker (central Baker 1) y 1:60 para el río Pascua (central Pascua 2.2)) en los cuales se experimentó la desviación de los ríos, las soluciones planteadas consideraron el uso de elementos prefabricados tipo tetracubos, gaviones y tetrápodos adicionando material de relleno granular para impermeabilizar. Este trabajo presenta un resumen de las experiencias realizadas y entrega los resultados obtenidos para la solución adoptada, la cual considera el uso de tetrápodos de 30 t y material de relleno granular.

¹ Ingeniero de proyectos, Proyecto Hidroeléctrico Aysén. . Ingendesa S.A. rjgv@ingendesa.cl

² Profesor. Dpto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile. racienfu@ing.puc.cl

³ Profesor. Dpto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Católica de Chile. bfernand@ing.puc.cl

⁴ Jefe de proyecto Centrales Río Baker. Ingendesa S.A. jbs@ingendesa.cl

⁵ Jefe de proyecto Centrales Río Pascua. Ingendesa S.A. ccl@ingendesa.cl

⁶ Subgerente de proyecto Especiales. hidroAysén S.A. ogv@hidroaysen.cl

(*): Autores Principales.

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto hidroeléctrico Aysén (en adelante PHA) se ubica en el sur de Chile (ver Figura 1) y contempla la construcción de 5 centrales hidroeléctricas, dos en el río Baker y tres en el río Pascua, cuyas características principales se presentan en la Tabla 1. El embalse de la central Baker 1 lo formaría una presa gravitacional de gravas con pantalla impermeable de hormigón (CFGD) de unos 100 m de altura, en tanto que, la presa de la central Baker 2 sería de hormigón convencional de 40 m de altura. Para las centrales Pascua 1, 2.1 y 2.2, el embalse lo formarían presas de hormigón compactado con rodillo (HCR), de altura variable entre 70 m y 115 m.

Tabla 1: Características Principales. Centrales consideradas en el PHA.

Variable	Unidad	Baker 1	Baker 2	Pascua 1	Pascua 2.1	Pascua 2.2	Total
Volumen Embalse	hm ³	173	380	192	200	25	-
Área de Embalse	km ²	7,1	36,0	5,0	9,9	1,1	59,1
Fluctuación Máxima	m	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Caudal de Diseño	m ³ /s	927	1.275	880	980	980	-
Caudal Medio Anual	m ³ /s	642	948	622	689	692	-
Potencia Instalada	MW	660	360	460	770	500	2.750
Potencia Inst. / Área de Emb.	MW / km ²	93,0	10,0	92,0	77,8	454,5	46,5
Energía Generable	Gwh / año	4.420	2.530	3.020	5.110	3.350	18.430
En. Generable / Área de Emb.	Gwh / km ²	623	70	604	516	3.045	312
Tipo Presa	-	CFGD	Concreto	HCR	HCR	HCR	-
Altura de Presa	m	105	40	69	114	79	-
Tipo Casa de Máquinas	-	Subt.	Sup.	Subt.	Subt.	Subt.	-

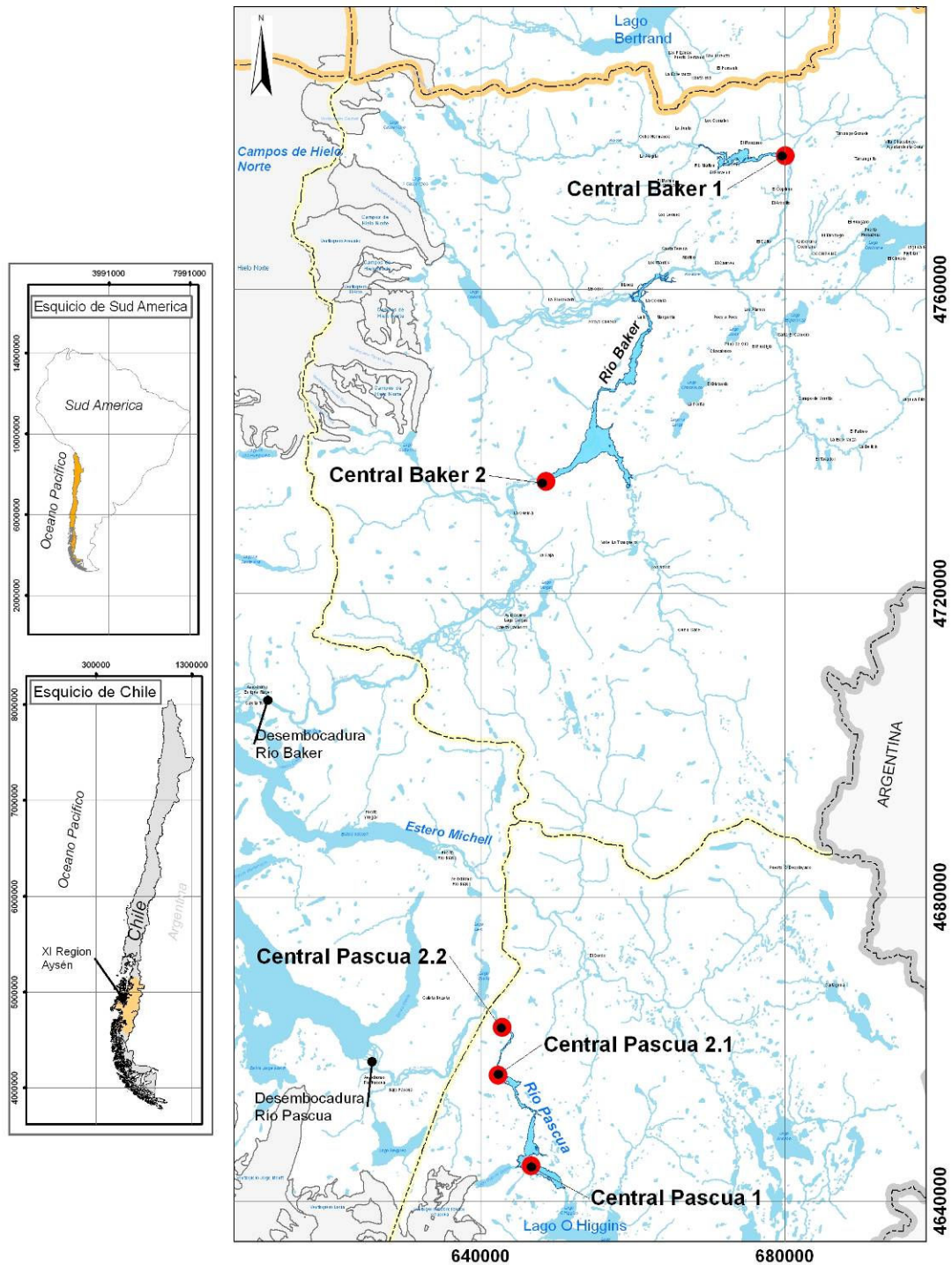
Según el cronograma de construcción del PHA, la primera central en construirse sería la central Baker 1 seguida de la central Pascua 2.2. En atención a lo anterior, y como complemento a los estudios de ingeniería básica, se construyeron modelos físicos de ambos ríos en el Laboratorio de Hidráulica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, en los cuales se estudió, entre otras cosas, el funcionamiento de las obras de desviación y se ensayaron distintos procesos de cierre del río.

Este trabajo presenta los principales resultados obtenidos en relación al desempeño de las obras de desviación y el proceso de cierre de ambos ríos, en la primera parte se describen los modelos físicos construidos, para luego abordar el funcionamiento de las obras de desviación, las distintas alternativas de desvío analizadas y la solución finalmente adoptada.

2 MODELOS HIDRÁULICOS.

Ambos modelos fueron construidos a escala geométrica sin distorsiones, con semejanza de Froude, en base a la topografía escala 1:1.000, perfiles batimétricos de ambos ríos y planos e informes del diseño de anteproyecto de las obras. Previo a cualquier análisis, ambos modelos, fueron debidamente calibrados para ajustar los niveles de escurrimiento medidos durante la ejecución de los perfiles batimétricos.

Figura 1: Ubicación General Centrales Hidroeléctricas PHA. Ríos Baker y Pascua.



En la Tabla 2 se indican las principales dimensiones de las obras modeladas y las escalas adoptadas en cada caso para resolver con precisión los problemas planteados. La rugosidad equivalente de Manning y las pérdidas singulares en ambos ríos fueron ajustadas mediante un proceso de calibración que consideró la comparación de los ejes hidráulicos medidos y los ejes hidráulicos simulados en los modelos.

Las obras de desviación para Baker 1 y Pascua 2.2 consideran el uso de una sección de túnel tipo herradura de fondo plano, con revestimiento de hormigón en el fondo y shotcrete en las paredes. Para representar la rugosidad compuesta equivalente, calculada mediante el método de Einstein y Banks (1951), en los modelos hidráulicos, se utilizaron cintas de acrílico, cuyas dimensiones y espaciamiento fueron adoptados según las recomendaciones de Knight y Macdonald (1979). Las rugosidades equivalentes obtenidas fueron validadas mediante la comparación del ajuste teórico y experimental del eje hidráulico medido en ambos modelos para condiciones de flujo uniforme.

Las principales dimensiones y características de los modelos hidráulicos se resumen en la Tabla 2, en tanto que, en las Figuras 2 y 3 se presentan a modo referencial fotos de terreno y de los modelos hidráulicos para los ríos Baker y Pascua respectivamente.

Figura 2: Zona del Proyecto y Modelos Hidráulicos Río Baker



Figura 3: Zona del Proyecto y Modelos Hidráulicos Río Pascua.



Tabla 2: Dimensiones Principales. Modelos Hidráulicos Baker y Pascua.

Parámetros	Unidades	Modelo Baker		Modelo Pascua	
		Prototipo	1:70	Prototipo	1:60
Dimensiones Principales					
Diferencia de cota total	m	70	1	60	1
Largo zona representada	m	1400	20	800	13,3
Ancho máximo valle	m	300	4,3	350	5,8
Q máximo a ensayar	m ³ /s	3370	0,082	1600	0,057
Túneles de desviación					
Número	un	2	2	2	2
Longitud c/u	m	830	11,9	360	6,0
Diámetro	m	12,5	0,18	11	0,18
Caudal de diseño máximo	m ³ /s	2280	0,056	1600	0,057

3 DESEMPEÑO DE LAS OBRAS DE DESVIACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS CONSIDERADAS PARA LA DESVIACIÓN DEL RÍO.

3.1 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LAS OBRAS DE DESVIACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS OBRAS DE ANTEPROYECTO.

Las principales características de las obras de desviación definidas en el anteproyecto se presentan a modo de resumen en la Tabla 3. Cabe señalar, que la diferencia en el periodo de retorno adoptado considera el tipo de presa, que en el caso de Baker 1 corresponde a un presa de gravas con pantalla de concreto (CFGD: concrete face gravel dam) y para Pascua 2.2 a una presa de hormigón compactado con rodillo (HCR).

Tabla 3: Principales Características de los Túneles de Desviación.
Ríos Baker y Pascua.

Ítem	Baker 1	Pascua 2.2
Número de Túneles	2	2
Longitud túneles (c/u) [m]	830	360
Pendiente [-]	0,0024	0,0052
Diámetro [m]	12,5	11,0
T [años]	50	10
Caudal de Diseño. Túneles de desvío [m ³ /s]	2.280	1.600

A modo referencia, cabe señalar que el desempeño de los túneles de desviación, en términos, del porcentaje de caudal desviado por estos una vez que han sido abiertos (sin ataguía) fue de entre un 35% a 45% del caudal total para el río baker y entre un 20% a 30% para el río Pascua.

Como parte de las experiencias realizadas en los modelos hidráulicos, una vez analizado el desempeño de las obras de desviación definidas en el anteproyecto, fue posible mejorar su geometría optimizando su funcionamiento.

En el caso de las obras de desviación de Baker 1, los mejoramientos realizados fueron los siguientes: se bajó en 2,0 m el umbral de entrada, el nivel de fondo de los túneles y la sección de salida, manteniendo la pendiente de fondo de los túneles; se modificó la posición de los portales de entrada y salida en función de nuevos antecedentes geológico-geotécnicos recopilados en terreno. Un esquema de las modificaciones implementadas se presenta en la Figura 4.

En el caso de Pascua 2.2, las optimizaciones implementadas consideraron un cambio en la alineación y orientación del canalón de entrada que conecta el río con los túneles sin modificar su nivel de fondo, tal como se presenta en la Figura 5.

Para ambos modelos, cabe señalar que los mejoramientos implementados a las obras de desviación, corresponden a ajustes de su geometría que no alteran la posición ni las dimensiones principales de las obras consideradas.

Figura 4: Disposición original y modificada de la obra de entrada a los túneles de desvío. Planta y perfil longitudinal. Modelo Baker 1.

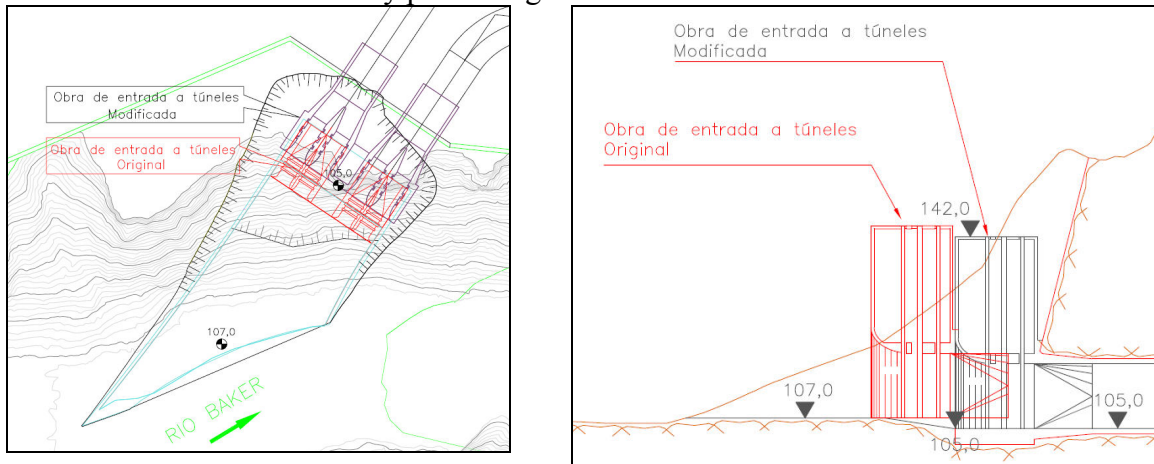
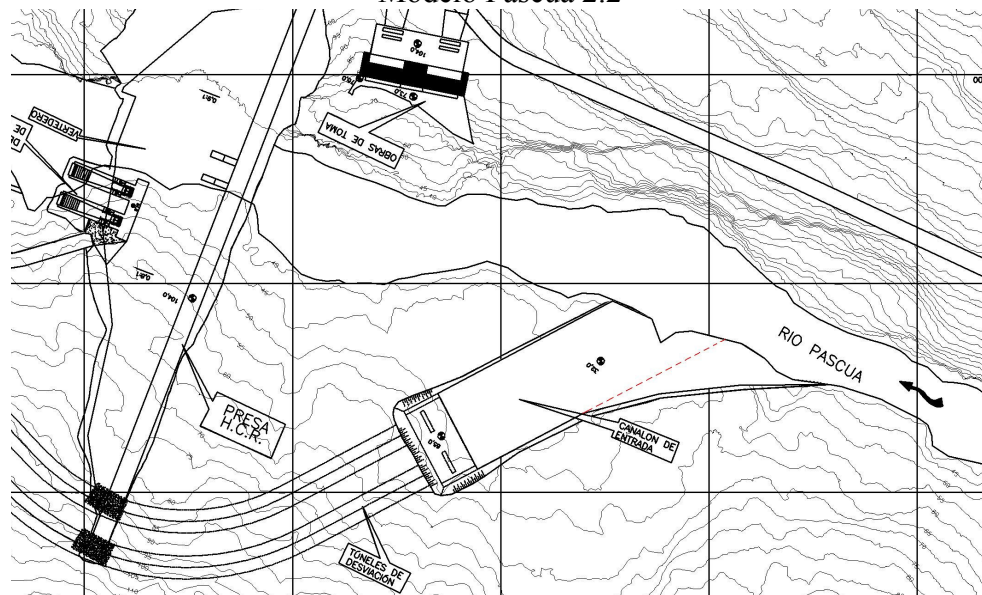


Figura 5: Plano con las Adecuaciones realizadas en el Canalón de Entrada. Modelo Pascua 2.2



Para el caso del río Baker, en la Tabla 4, el porcentaje del caudal desviado una vez que los túneles fueron conectados se encontró entre un 54% y un 59%, que resulta superior al del anteproyecto que se encontraba entre el 38% y 47%.

Tabla 4: Porcentajes del caudal total desviado hacia los túneles de desvío. Baker 1.

Caudal referencia (m ³ /s)	Caudal que sigue por el río (m ³ /s)	Caudal desviado hacia los túneles (m ³ /s)	Caudal desviado hacia los túneles (%)
350	148,4	202,9	57,8
500	221,8	280,1	55,8
800	327,9	470,8	59,0
1100	496,0	601,0	54,8

Para el caso del río Pascua, se estima que en las condiciones de cierre, en las cuales el caudal escurriendo por el río estaría comprendido entre 600 y 800 m³/s, el porcentaje desviado sería cercano al 50%, tal como se presenta en la Tabla 5. La situación recién descrita, es una mejora sustancial respecto de la situación planteada en el anteproyecto, en donde el porcentaje desviado estaba más bien en torno al 30%.

Tabla 5: Porcentajes del caudal total desviado hacia los túneles de desvío. Pascua 2.2.

Caudal referencia (m ³ /s)	Caudal que sigue por el río (m ³ /s)	Caudal desviado hacia los túneles (m ³ /s)	Caudal desviado hacia los túneles (%)
400	229,2	170,8	42,7
600	299,4	300,6	50,1
800	388,0	412	51,5

El mejoramiento y optimización de las obras de desviación constituye un gran aporte para lograr que la maniobra de desvío sea un interesante desafío ingenieril, ya que el caudal que se deriva a los túneles mediante la construcción de la preatagüa sería menor que el esperado en primera instancia.

3.2 DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS CONSIDERADAS PARA LA DESVIACIÓN DEL RÍO.

Las condiciones naturales de ambos ríos en la zona de cierre presentan las siguientes características:

- Altas pendientes, mayores al 1% - 2%.
- Altas velocidades de escurrimiento mayores incluso a 5 m/s
- Profundidades de escurrimiento superiores a 5 m.
- Caudales importantes incluso en los meses de estiaje (ver Tabla 6).
- Baja disponibilidad de material del tamaño y peso adecuado para ser utilizado en el cierre del río.

Los factores recién indicados llevan a que la maniobra de desviación del río sea un interesante desafío desde el punto de vista ingenieril y por tanto se decidió experimentar en los modelos hidráulicos las posibles soluciones para efectuar el cierre del río.

Tabla 6: Caudales medios mensuales. Rangos mínimos y máximos en el Periodo de estiaje (Jul.-Nov.). Condición promedio y máximo histórico (m³/s)

Condición	Río Baker		Río Pascua	
	Q Mínimo	Q Máximo	Q Mínimo	Q Máximo
Promedio	470	560	450	570
Máximo	640	850	600	820

En atención a las razones expuestas se decidió efectuar el cierre del río mediante el uso de elementos prefabricados como tetracubos, gaviones y tetrápodos, una fotografía de los cuales se presentan en la Figura 6, adicionalmente se utilizó material de relleno para impermeabilizar la

preatagüa. Al inicio de los ensayos realizados, el porcentaje de caudal derivado hacia los túneles de desvío sin construir la preatagüa fue del orden de un 40% - 45% para Baker y entre 25% - 30% para Pascua. Es importante destacar que los resultados que se presentan para ambos modelos corresponden a ensayos preliminares de cierre y consideraron la configuración original de las obras de anteproyecto.

Figura 6: Elementos prefabricados considerados en el cierre del río. Modelo Baker.

a) Tetracubos de 25 ton, b) gaviones de 25 ton y c) tetrápodos de 30 ton.



Las pruebas preliminares efectuadas mostraron que los gaviones son poco estables y tienden a rodar bajo el efecto del escurrimiento. Luego, los ensayos realizados sólo consideraron el uso de tetracubos, tetrápodos y material de relleno de las dimensiones que se indican en la Tabla 7. Cabe señalar que el diseño estructural de los elementos prefabricados considerará que la forma de colocación de estos corresponde a un lanzamiento desde una cierta altura cercana a nivel de escurrimiento. Lo recién mencionado cobra importancia, al considerar, que el uso convencional de dichos elementos exige una cuidadosa colocación de los mismos.

Tabla 7: Dimensión principal y peso. Elementos prefabricados y material de relleno. Modelo Baker y Pascua.

Elemento	Baker				Pascua			
	Dimensión principal [m]		Peso [ton]		Dimensión principal [m]		Peso [ton]	
	Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo	Prototipo	Modelo
Tetracubos	1,4	0,02	25,2	0,074	1,4	0,023	25,2	0,117
Tetrapodos	3,6	0,051	30,0	0,088	3,4	0,057	25,3	0,117
Material fino. D _{min}	0,44	0,0063	0,12	0,0004	0,45	0,008	0,13	0,0006
Material fino. D _{máx}	0,02	0,0003	1,13E-05	3,30E-08	0,02	0,000	1,13E-05	5,24E-08

(1): Correspondencia dimensión principal. Tetracubo : lado cubo, tetrapodo: altura y material fino : diámetro

Los ensayos del proceso de cierre de los ríos se probaron para varios caudales y diversas combinaciones de los elementos disponibles considerando tres repeticiones para cada ensayo, debido al carácter aleatorio que tiene la colocación de los elementos.

Cada ensayo consideró la formación de un muro estable de material prefabricado a lo ancho de la sección de cierre, avanzando desde una orilla y dejando caer desde un cable (cable riel o grúa torre en la práctica) los elementos de a uno hasta que se asoman en la superficie. No se consideró un ritmo constante de colocación, pero sólo se colocó el siguiente elemento sólo una vez estabilizado el anterior,

La colocación del material de relleno fue simulada mediante camionadas de 20 ton para Pascua y de 24 ton para Baker, formando una plataforma de aproximadamente 6 m de ancho para permitir el tránsito de maquinaria sobre el coronamiento de la preatagüa.

La secuencia de los ensayos preliminares realizados en cada modelo fue la siguiente:

Ensayo Tipo 1: uso de tricubos (valor referencial)

Ensayo Tipo 2: uso de tricubos y material de relleno.

Ensayo Tipo 3: uso de tricubos, tetrápodos y material de relleno.

En las Tablas 8 y 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en cada modelo y para distintos caudales, en tanto que, en la Figura 7 se muestran los ensayos realizados en el río Baker.

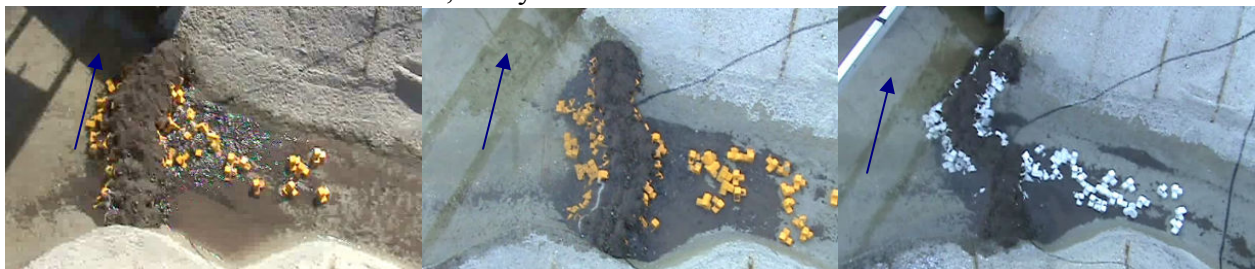
Tabla 8: Resumen resultados pruebas efectuadas.
Elementos prefabricados y material de Relleno. Modelo Baker.

Ensayo	Q total (m ³ /s)	Situación inicial		Elementos empleados				Situación final	
		Q por túneles (m ³ /s)	% Q Desviado	Tetrápodos	Tetracubos 33 ton	Tetracubos 24 ton	Material de Relleno (ton)	Q por túneles (m ³ /s)	% Q Desviado
Tricubos Simple	350	165	47,2	0	0	85	0	250	71,5
Tricubos con Relleno	350	159	45,5	0	0	150	5160	278	79,3
Tetrápodos y Tricubos con Relleno	350	159	45,5	50	0	90	9840	325	92,7
Tricubos Simple	500	224	44,9	0	0	108	0	381	76,2
Tricubos con Relleno	500	213	42,7	0	0	169	4680	444	88,8
Tetrápodos y Tricubos con Relleno	650	245	37,6	79	0	122	12480	640	98,5
Tricubos Simple	800	304	38,1	0	0	170	0	589	73,6
Tricubos con Relleno	800	304	38,1	0	224	0	7440	718	89,8

Tabla 9: Resumen resultados pruebas efectuadas.
Elementos prefabricados y material de relleno. Modelo Pascua.

Ensayo	Q total (m ³ /s)	Situación inicial		Elementos empleados				Situación final	
		Q por túneles (m ³ /s)	% Q Desviado	Tetrápodos	Tetracubos 21 ton	Tetracubos 14 ton	Material de Relleno (ton)	Q por túneles (m ³ /s)	% Q Desviado
Tricubos Simple	400	97	24,3	0	126	0	0	270	67,5
Tricubos con Relleno	400	95	23,8	0	185	0	2600	282	70,5
Tetrápodos y Tricubos con Relleno	400	104	26	25	129	0	2700	295	73,8
Tricubos Simple	600	144	24	0	190	0	0	413	68,8
Tricubos con Relleno	600	137	22,8	0	225	0	2600	436	72,7
Tetrápodos y Tricubos con Relleno	600	137	22,8	55	156	0	3800	462	76,9
Tricubos Simple	800	202	25,3	0	190	0	0	542	67,7
Tricubos con Relleno	800	171	21,4	0	275	0	5400	618	77,2
Tetrápodos y Tricubos con Relleno	800	182	22,7	85	213	170	6260	670	83,8

Figura 7: Preatagüa formadas por tricubos y material de relleno con caudales de 350, 500 y 800 m³/s. Modelo Baker.



Cabe señalar que, en ninguno de los ensayos realizados se logró cerrar totalmente el río, incluso en los ensayos tipo 3 sólo se logró desviar entre un 90% - 95% del caudal total hacía los túneles de desvío, lo cual para fines prácticos no constituye un cierre exitoso del río.

Desde el punto de vista de los elementos utilizados, en los ensayos realizados se obtuvieron muros relativamente desordenados y permeables, en donde el material de relleno era difícil de retener. Según se apreció en el modelo este comportamiento se asocia fundamentalmente al uso de tetracubos, luego, para la solución recomendada se adoptó el uso de tetrápodos.

4 SOLUCIÓN ADOPTADA PARA EL DESVIO DEL RÍO.

En base a los ensayos realizados, observaciones de ingenieros y asesores de Ingendesa e hidroAysén y del asesor internacional Sr. Nelson Pinto durante su visita a los modelos, se propuso un nuevo proceso de cierre del río que considera la colocación de una estructura compuesta de elementos estables y de material de relleno para impermeabilizar la preatagüa por la cara de aguas arriba.

Para la formación de la estructura estable se consideró el uso de tetrápodos de 30 t, ya que en los ensayos preliminares se observó que los tetracubos forman una estructura desordenada y permeable dificultando la impermeabilización de la preatagüa. Por otra parte, los tetrápodos, forman una barrera estable y ordenada aunque igualmente permeable, luego, se requiere disponer material de relleno para lograr un cierre total. La colocación de material de relleno consideró dos capas, siguiendo la teoría del filtro graduado, según se indica a continuación:

- i) Relleno grueso a colocar entre estructura de tetrápodos y la capa de material fino. En los ensayos se utilizó dos granulometrías distintas para evaluar su comportamiento (ver Tabla 10).
- ii) Relleno fino a disponer aguas arriba del relleno grueso para lograr la impermeabilización total de la preatagüa.

Es importante señalar que los tamaños mínimos considerados en la experimentación, aseguran que los sedimentos en el modelo se mantengan en el rango de material no-cohesivo. En la Figura 8 se presenta el esquema de la preatagüa propuesta para ambos modelos.

Figura 8: Esquema Preatagüa propuesta. Modelos Baker y Pascua.

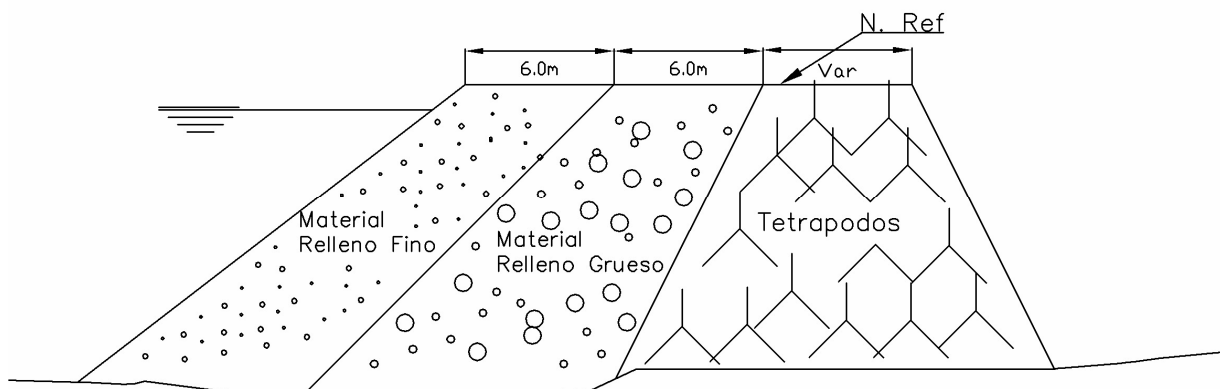


Tabla 10: Granulometría Material Grueso. Ambos modelos.

Modelo	Material Grueso	
	N° 1	N° 2
Baker	0,17 m – 0,33 m	0,33 m – 0,7 m
Pascua	0,15 m – 0,3 m	0,3 m – 0,6 m

En las Tabla 11 y 12 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos realizados para distintos caudales, tipo de granulometría gruesa, cantidad de tetrápodos y cantidad de material de relleno grueso y la cantidad de relleno fino. Cabe señalar que los resultados que se presentan en este numeral, para ambos modelos, consideraron la configuración optimizada de las obras de desviación (ver numeral 3.1).

Del análisis de la información disponible se desprende que para todos los caudales considerados la granulometría gruesa N° 2 permite reducir el número de tetrápodos totales y perdidos, la cantidad requerida de relleno grueso y fino. Luego, es claro que para fines de efectuar el cierre del río la primera capa a colocar debe considerar la granulometría más gruesa posible, que en este caso corresponde a material cuyo tamaño está comprendido entre 0,3 m y 0,7 m. aproximadamente.

Tabla 11: Elementos y material utilizados en ensayo de construcción preatagüa en función del caudal por el río y tipo de material grueso depositado. Baker

Elemento	Q [m³/s]	600 m³/s		800 m³/s	
	Mat. Grueso	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2
Tetrápodos 30 ton totales (unid.)		131	92	137	111
Tetrápodos 30 ton perdidos (unid.)		16	8	25	21
Relleno grueso (camionadas 24 ton)		370	263	883	363
Relleno fino (camionadas 24 ton)		284	230	288	289

Tabla 12: Elementos y material utilizados en ensayo de construcción preatagüa en función del caudal por el río y tipo de material grueso. Pascua.

Elemento	Q [m³/s]	600 m³/s		800 m³/s	
	Mat. Grueso	N° 1	N° 2	N° 1	N° 2
Tetrápodos 30 ton totales (unid.)		114	114	-	125
Tetrápodos 30 ton perdidos (unid.)		26	9	-	35
Relleno grueso (camionadas 20 ton)		440	335	-	390
Relleno fino (camionadas 20 ton)		161	135	-	185

En las Figuras 9 y 10 se presentan fotografías que muestran el estado final del cierre de ambos ríos luego de ejecutadas las etapas consideradas (tetrápodos + material de relleno).

Figura 9: Vistas superior y desde aguas arriba de la preataguía en su situación final.
 $Q = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ y material de relleno grueso N° 2. Modelo Baker.



Figura 10: Vistas superior y lateral de la preataguía en su situación final.
 $Q = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ y material de relleno grueso N° 2. Modelo Pascua.



5 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Los ensayos realizados, en ambos modelos, permitieron analizar el comportamiento del cierre propuesto para ambos ríos en base a la colocación en serie de elementos de gran peso (30 t) y material de relleno para impermeabilizar, siguiendo un proceso constructivo predeterminado. Los ensayos realizados permiten concluir lo siguiente:

- El esquema propuesto permite efectuar un cierre prácticamente impermeable en todas las condiciones ensayadas.
- La cantidad de tetrapodos necesarios, así como los que se pierden para el proceso de cierre, es razonable, aunque aumenta con el caudal de cierre. Para caudales comprendidos entre 600 y $800 \text{ m}^3/\text{s}$, en números aproximados se requieren menos de 150 elementos y se pierden como máximo 20 al efectuar el cierre completo.

- La colocación de los tetrápodos desde un sólo cable resulta factible, pero colocar los tetrápodos desde dos o más cables, permite asegurar el orden y la colocación de la barrera minimizando la pérdida de elementos y asegurando su estabilidad.
- La cantidad de agua desviada crece de manera importante con la formación de la barrera de tetrápodos, después sólo aumenta ligeramente con la colocación del material grueso y se logra la impermeabilización total sólo al final de la colocación del material fino.
- El relleno con material grueso resulta adecuado para formar el filtro de respaldo sobre los tetrápodos. Para un caudal de 800 m³/s en ambos ríos, se emplearían aproximadamente unas 350 a 400 camionadas de material grueso y entre 250 y 400 camionadas de material fino.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo agradecen a hidroAysén, la instancia generada que posibilitó llevar a cabo la construcción y explotación de los modelos hidráulicos de las centrales Baker 1 y Pascua 2.2. Las experiencias realizadas en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Católica permitieron la verificación y mejoramiento de las obras diseñadas por Ingendesa en el anteproyecto y la recomendación de la solución definitiva para efectuar el cierre de ambos ríos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. González, R., Cienfuegos, R., Fernández, B., Bravo, J., Costas, C. y Garcés, O. 2009. Physical Modeling of Diversión Works for the Baker and Pascua Rivers. 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) Biennial Congress. Vancouver, Canada.
2. Dictuc S.A para hidroAysén. 2008. Modelos Hidráulicos de Desviación del Río y del Vertedero. Proyecto Baker y Pascua". División Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2008.
3. Einstein, H.A. and Banks, R.B. (1951). Fluid resistance of composite roughness. Trans.Amer. Geophysical Union 31, n° 4:603-610.
4. Ingendesa para hidroAysén. 2007. Proyecto Hidroeléctrico Aysén. Estudio de Anteproyecto. Informe N° 2. Complemento del Anteproyecto.
5. Knight, D.W. and Macdonald, J.A. 1979. Hydraulic resistance of strip roughness. J.Hydraulic Div., 106(HY6):675-690.
6. Pinto, Nelson L. de S. Pinto para hidroAysén. 2008. Report: Several Aspects related with Pascua 2.2 and Baker 1 Hydroelectric Projects.