

Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica



ISSN 0716-3746 Volumen 21 Número 1 Diciembre 2006

*REVISTA DE LA
SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA*

SOCHID

Sede Instituto de Ingenieros de Chile - San Martín 352 - Fono 6984028 - Santiago CHILE

**Revista de la
Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica**

ISS 0716-3746
Volumen 21, Número 1
Diciembre 2006

DIRECTORIO
Presidente
Ludwig Stowhas

DIRECTORES
Raúl Demangel
Alejandro Dussaillant
Luis Estellé
Julio Aguirre
Ximena Vargas

DIRECTORES HONORARIOS
Ernesto Brown
Bonifacio Fernández
Horacio Mery
Humberto Peña
Sergio Radrigán
Eduardo Varas
Jorge Bravo

EDITOR DE LA REVISTA
Ximena Vargas

COMITÉ REVISOR
Yarko Niño

DOMICILIO
San Martín 352 (Sede del Instituto de Ingenieros de Chile)
Santiago
698 40 28 / 696 86 47
www.sochid.cl

FOTO PORTADA
Salto Grande, Lago Pehoe, Parque Nacional
Torres del Paine, XII Región de Magallanes.

Asesoría Periodística:
Macarena Figueroa P.

Diseño:
Paulo Flores E.

Impresión:
EPS Ediciones Promociones y
Servicios.

*Se permite el uso y reproducción del contenido de la Revista, con fines no comerciales,
siempre que se cite su origen.*

EDITORIAL	5
LAS CUATRO DÉCADAS DEL INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA	7
ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE SUMIDROS DE AGUAS LLUVIAS CASO: INCORPORACIÓN DE UNA ZONA DE INFLUENCIA (Enrique Kaliski Kriguer, Ricardo Cortez Contreras)	10
EXPERIENCIA EN EL USO COOPERATIVO DE UN MODELO NUMÉRICO Y UN MODELO FÍSICO (Jorge Astudillo Cornejo, Ricardo Cortez Contreras)	23
TITULADOS 2006 Universidad de Chile	37

En este número de la revista se quiere poner de relevancia la investigación que realiza el Instituto Nacional de Hidráulica, que en nuestro medio conocemos como INH. La razón de ello es que en el año 2007 se celebra el 40° Aniversario de su creación como entidad autónoma.

Mis recuerdos del INH se remontan al año 1975 cuando antes de titularme estuve trabajando en las instalaciones de Peñaflor, cuando era el ingeniero Sr. Salvador Tarodo su Director Ejecutivo. De los investigadores de esa época, Luis Neira, Luis Estellé, José Miguel Pascual (Q.E.P.D.) sólo permanece en la institución el ingeniero Jorge Molina, actual Jefe de la División Estudios, pues los demás emprendieron nuevos rumbos profesionales. No han cambiado significativamente las instalaciones del INH, sin embargo, hoy en día su quehacer se ha extendido, tal como puede apreciarse de lo que se describe en su página Web www.inh.cl.

Felicito a su actual Director Ejecutivo, ingeniero Sr. Alejandro López, por los logros alcanzados por el Instituto Nacional de Hidráulica durante estos 40 años como institución consultora, asesora y referente del sector público y privado en las áreas de uso del recurso hídrico y desarrollo de infraestructura hidráulica, principalmente en el área de hidráulica marítima, y por su contribución a mejorar la calidad de vida y la preservación del medio ambiente en nuestro país.

Ximena Vargas M.
Directora SOCHID

LAS CUATRO DÉCADAS DE INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA

Todo comenzó en 1953. La Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas de Chile había decidido instalar un laboratorio en Peñaflor para efectuar investigaciones y estudios a escala reducida, en temas relacionados con la construcción y el mejoramiento de puertos nacionales. Para esto se contaría con la asesoría técnica del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia.

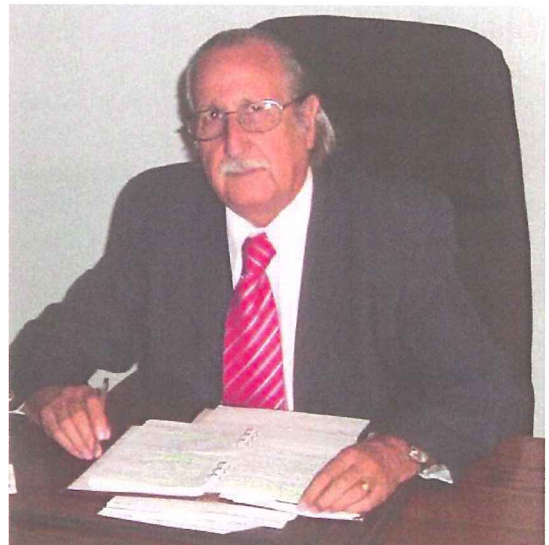
Durante diez años el laboratorio funcionó bien, hasta que en 1964 extendió sus funciones hacia las obras de Regadío, ingeniería sanitaria y otras áreas relacionadas con el problema del agua. De esta manera quedó en condiciones de prestar servicios a otras instituciones, estatales, privadas y universitarias.



Calibración de instrumentos de medición

Finalmente, el 14 de noviembre de 1967 se creó definitivamente el **Instituto Nacional de Hidráulica (INH)** como entidad autónoma, con participación del Ministerio de Obras Públicas y Transportes. "La visión de los fundadores era que el Estado tuviese un organismo que apoyara la ejecución de los proyectos hidráulicos. Lo que hacemos nosotros es participar en el mejoramiento de los diferentes proyectos marítimos, obras fluviales, de regadío, entre otros", explica Alejandro López, Director Ejecutivo del Instituto Nacional de Hidráulica.

En los tiempos que se creó en INH, a fines de los '60, había una importante participación del Estado en todas las áreas de producción y desarrollo del país. El Estado se encargaba de la ejecución de todos los planes y proyectos hidráulicos, y la mayoría de las empresas portuarias



Alejandro López Alvarado
Director Ejecutivo del Instituto Nacional de Hidráulica.

eran estatales. Con el cambio a la economía de libre mercado, esos roles se fueron ampliando a privados, universidades y empresas extranjeras. Eso planteó un escenario nuevo, aumentó la competencia para el INH, lo que lo obligó a mejorar su infraestructura y la calidad intelectual de sus profesionales.

Actualmente, el INH es una corporación autónoma en su organización, actividades y patrimonio, que busca desarrollar actividades de investigación y estudios en materias hídricas y mecánica de fluidos. Mediante la ejecución de proyectos y apoyo académico, busca responder a las demandas en el campo de las obras hidráulicas, marítimas, sanitarias y de protección ambiental. Dentro de su plan de acción, dedica esfuerzos a establecer importantes vínculos de mutua cooperación con universidades y centros tecnológicos, tanto en el país como en el extranjero.

Entre las distintas actividades y servicios que presta se encuentran las asesorías especializadas, calibrar instrumentos y sumideros de aguas lluvias, y **realizar mediciones en terreno y ensayos en modelos**. También actuar como árbitros o peritos en materias relacionadas con la hidráulica, colaborar con la docencia e investigación universitarias y difundir sus estudios e investigaciones a través de medios de difusión especializado a nivel nacional e internacional. En Chile, no existe otra institución que realice modelos físicos marítimos, puesto que la infraestructura, equipos y experiencia del INH son únicos en el país, por lo que la competencia en estos ámbitos la encuentra en organismos extranjeros de investigación.

Con el fin de posicionarse en el extranjero, el INH participó como fundador

y gestor en la creación de la Red de Institutos Hidráulicos de Iberoamérica, en el 2005. Esta red, que tiene sede en México, tiene como fin establecer una colaboración mutua y facilitar la movilidad de gente, intercambios de conocimiento, reducir gastos y potenciar inversiones entre los diferentes países que participan.

Para el futuro, el INH se plantea establecer o sugerir al Estado su participación en áreas hasta ahora poco exploradas donde se debe investigar con más fuerza, como la extracción de áridos en los cauces. El instituto propone hacer un seguimiento de esos problemas y tener una participación en ese aspecto, facultades que otras instituciones no tienen ni el tiempo ni la capacidad para realizar.



Descarga del Zanjón de la Aguada.



Modelo Hidráulico en escala reducida.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FUNCIONAMIENTO DE SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS. CASO: INCORPORACIÓN DE UNA ZONA DE INFLUENCIA

Enrique Kaliski Kriguer, Ricardo Cortez Contreras
Instituto Nacional de Hidráulica, Chile. ekaliski@inh.cl rcortez@inh.cl

RESUMEN

Este estudio experimental, realizado en el Banco de Pruebas de Sumideros de Aguas Lluvias del Instituto Nacional de Hidráulica de Chile (INH), consideró zonas de influencia o de encauzamiento del flujo hacia el sumidero, consistente en una depresión de 7 cm. de la reja con respecto al nivel del pavimento, en un área de influencia de 2,00 m de longitud y 1,00 m de ancho.

La experimentación incluyó combinaciones de pendientes longitudinales (0,1%, 1,0% y 3,0%) y transversales (1,0%, 2,0% y 3,0%) de la calle, caudales entre 20 y 180 lt/s y seis variaciones de la geometría de la zona de influencia.

Se concluyó que el caudal captado con la zona de influencia es mayor, en todos los casos experimentados, al caudal captado en una calle no intervenida o normal.

ABSTRACT

This experimental study, done in the full-size road surface drainage rig of the Instituto Nacional de Hidráulica de Chile (INH), considered zones of influence or channeling the flow towards the inlet, consisting in a 7 cm depression respect to the pavement level, into a 2.00 m. length and 1.00 m. wide area.

The experimentation included longitudinal slope combinations (0.1%, 1.0% and 3.0%) and cross-fall slope (1.0%, 2.0% and 3.0%) of the street, flows between 20 and 180 lt/s and six variations in the zone of influence's geometry.

The principal conclusion was that the flow caught with the zone of influence is greater, in all the experienced cases, than the flow caught in a street without intervention or normal street.

PALABRAS CLAVES: Sumidero, aguas lluvias, experimental

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Origen del estudio y experimentación anterior

En el contexto de la elaboración de los Planes Maestros de Aguas Lluvias de las principales ciudades de Chile y proyectos de sus redes primarias y secundarias, de la construcción de colectores y de otras obras similares, se ha verificado que una parte importante de los problemas de inundación de las calles se debe a la mala captación de las aguas en los sumideros.

En este contexto, el Instituto Nacional de Hidráulica de Chile (INH), en conjunto con la Dirección de Obras Hidráulicas y el Centro de Innovación Tecnológica, todas instituciones ligadas al Ministerio de Obras Públicas de Chile, realizó entre los años 2003 y 2004 un estudio experimental de funcionamiento de los sumideros de aguas lluvias, que se orientó a determinar el comportamiento hidráulico de cinco sumideros y establecer las mejores condiciones de funcionamiento, para diferentes características técnicas habituales.

Los principales logros de dicho estudio fueron: (a) Diseño y construcción de un Banco de Pruebas de Sumideros de Aguas Lluvias, actualmente en operación en el INH; y (b) la experimentación de cinco sumideros y diagnóstico de su funcionamiento, para las condiciones de pendientes de la calle más frecuentes y caudales de hasta 120 lt/s.

Los resultados obtenidos de la experimentación realizada (INH, 2004 y Kaliski K. y Cortez, 2005) indicaron que la eficiencia de captación de los sumideros (Caudal capta-

do / Caudal total de la calle) es baja y varía entre 25 y 50%, lo cual explica en gran medida los caudales excedentes hacia aguas abajo y las inundaciones en las avenidas principales o sectores más bajos.

1.2 Objetivos

En consideración a los resultados obtenidos en la experimentación anteriormente indicada, se planteó el desarrollo de un segundo estudio, que se sintetiza en la presente publicación, cuyo objetivo principal fue identificar y experimentar alternativas de sumideros que demuestren una mayor eficiencia de captación.

Los objetivos específicos del estudio fueron los siguientes:

- a) Estudiar el comportamiento hidráulico de diferentes alternativas de intervención de la calle, con una depresión hacia el sumidero, analizando específicamente el ancho de la zona de influencia, la longitud de la ventana lateral y la geometría de la zona de influencia.
- b) Comparar la captación de caudal y funcionamiento de cada alternativa, con respecto a la calle sin intervención o "calle normal".

2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS DE SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS DEL INH

El Banco de Pruebas, que se ilustra en la Figura 1 siguiente, es una instalación de tipo permanente, que comprende básicamente un circuito hidráulico y una plataforma que representa una calle, en escala real (1:1), en la cual es posible modificar

su pendiente longitudinal, (hasta 10%) y transversal (hasta 5%), el tipo y características del sumidero y los caudales que conduce la calle. El caudal máximo de experimentación es de 240 lt/s y sus dimensiones más relevantes son: longitud total de 14 metros, ancho de 3,5 metros y peso aproximado de 18 toneladas.



Figura 1.- Vista General del Banco de Pruebas de Sumideros de Aguas Lluvias del INH.

Esta instalación experimental comprende las siguientes partes principales:

- Sector de alimentación y control hidráulico con un grupo de bombas centrífugas que entregan el caudal a un aforador triangular.
- Estanque aquietador, para traspasar el flujo uniforme a la plataforma de ensayo.
- Plataforma experimental de pendientes variables.
- Zona de sumideros. Permite la instalación de sumideros sobre la calle o vereda, con zonas de influencia o de acercamiento del flujo al sumidero.
- Obra de recepción y registro del caudal no captado (Pasante) por los sumideros y retorno del agua.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA ESTUDIADA

Instalación Básica: En la Figura 2 siguiente se observa la instalación básica o inicial utilizada, que comprende: (i) una reja de dimensiones 0,70 x 1,00 metros ubicada 7 centímetros más bajo que el nivel del pavimento de la calle; (ii) pendiente de 7% hacia el sumidero y contra pendiente, en el sentido del escurrimiento, con ancho 1,00 m; (iii) pendiente de 14%, hacia el sumidero, en el sentido perpendicular al escurrimiento, con ancho de 0,50 m; (iv) Una ventana lateral “normal” de 1,00 metro de longitud; y (v) Una ventana lateral adicional de 1,14 metros de longitud, en la zona de la contra pendiente.

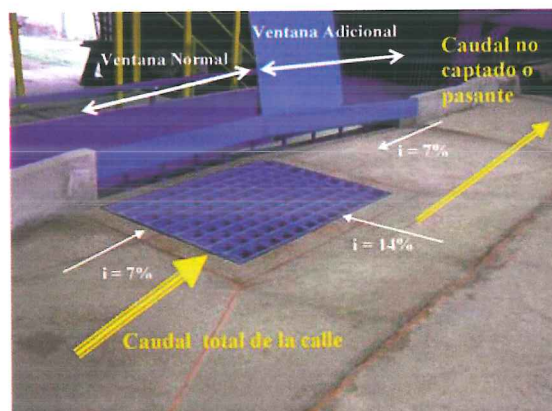


Figura 2.- Vista general de la instalación del sumidero en zona con depresión. Se observa la ventana lateral de mayor longitud, ampliada hacia aguas abajo de la ventana normal.



Figura 3.- Ventana lateral sellada.



Figura 4.- Reja sellada.

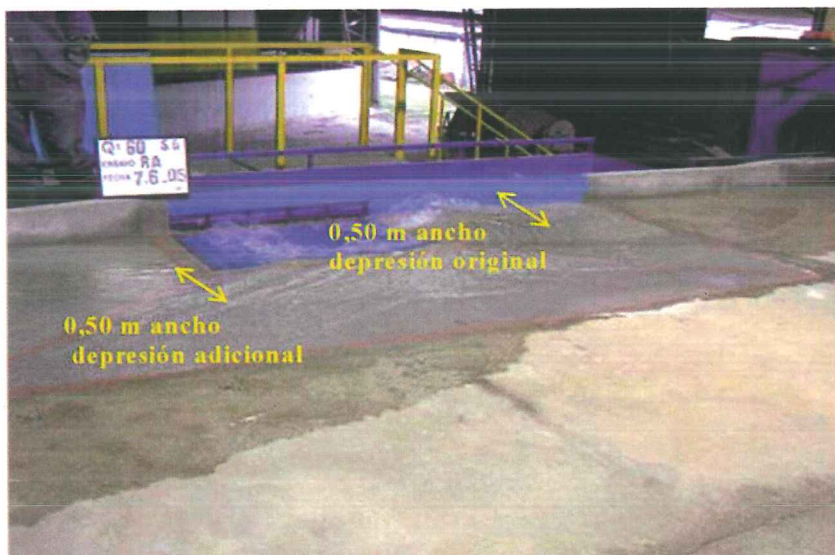


Figura 5.- Con ancho adicional de la zona de depresión, de 0,50 m.



Figura 6.- Variación del desnivel original de 7 cm. a 3 y 5 cm.

4.EXPERIMENTACIÓN REALIZADA

Se realizó la experimentación con la reja que se indica en la Figura 2 anterior, que tiene las siguientes características: ancho 0,70 m. longitud 1,00 m., ventana Lateral de 0,10 m de altura, con barrotes separados cada 0,10 m.

En cada serie de ensayos - definida por el tipo de sumidero, pendiente longitudinal y transversal - se controló los siguientes aspectos: Pendientes de la plataforma, Caudal de Alimentación, Niveles de agua en 11 puntos de la plataforma y el caudal de salida o pasante.

Se realizaron experiencias en el Banco de Pruebas de Sumideros de Aguas Lluvias del INH, para las instalaciones siguientes:

- E-1: Instalación Básica. (Figura 2)
- E-2: Ampliación del área de influencia, en el sentido transversal al flujo, en 0,50 metros. (Figura 5)
- E-3: Variación del desnivel de la zona de influencia (Figura 6), con desnivel de 5 cm. (Pendientes de 5% y 10%)
- E-4: Variación del desnivel de la zona de influencia (Figura 6), con desnivel 3 cm. (Pendientes de 3% y 6%)
- E-5: Ventana lateral sellada, en que toda la captación es por la reja. (Figura 3)
- E-6: Reja sellada, en que la captación es por una ventana lateral. (Figura 4)
- E-7: Ventana lateral de mayor longitud (2 ventanas laterales), ampliándola hacia aguas abajo de la actual, según se aprecia en la Figura 2 anterior, y operando con la reja sellada.

En la Tabla 1 siguiente se indican los resultados obtenidos con cada instalación experimental, para una de las condiciones más representativas de las calles en la ciudad de Santiago de Chile, que corresponde a un caudal de 120 lt/s y pendiente transversal de 2,0%.

Tabla 1.-Eficiencias de Captación
(Caudal total de la calle: 120 lt/s y Pendiente Transversal 2,0 %)

INSTALACION	PENDIENTES LONGITUDINALES		
	BAJA (0,1 %)	MEDIA (1,0 %)	ALTA (3,0%)
Calle Normal	49,7	48,5	57,2
E-1: Instalación Básica.	79,4	68,1	58,6
E-2: Ampliación del área de influencia en 0,50 m.	83,4	63,0	49,6
E-3: Desnivel de la zona de influencia de 5 cm.	74,5	58,4	52,0
E-4: Desnivel de la zona de influencia de 3 cm.	64,1	49,2	47,6
E-5: Ventana lateral sellada,	80,6	66,1	59,0
E-6: Reja sellada	62,0	36,9	17,3
E-7: Dos Ventanas laterales y reja sellada	81,0	-	-

Para la Instalación Básica, en los gráficos del Anexo N° 1 se ha ilustrado los resultados de la eficiencia de captación en función del caudal total de la calle, para pendientes longitudinales bajas (0,1%), intermedias (1,0%) y altas (3,0%). Para cada pendiente longitudinal, se ensayó con las pendientes transversales de 1,0%, 2,0% y 3,0%.

Por su parte, en el anexo N° 2 se detallan los valores de las Eficiencias de Captación obtenidas, para cada una de las instalaciones indicadas, incluyéndose también los valores correspondientes a la calle normal del estudio anterior (INH, 2004).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados experimentales obtenidos, se puede expresar lo siguiente:

El funcionamiento hidráulico general del sumidero con zona de influencia o depresión, sigue un comportamiento general similar al sumidero normal, en cuanto a la importancia de las variables involucradas, tales como la pendiente longitudinal, la pendiente transversal, el caudal en la calle, ancho frontal al flujo, entre otras. Esto se verifica en las mismas formas de las curvas de eficiencia de captación del sumidero, en función del caudal de la calle y en la observación de las mediciones de las experiencias realizadas.

En la depresión, se produce un aceleramiento del flujo en el talud de aguas arriba que escurre sobre la reja, formándose un resalto sobre el talud de aguas abajo de la zona de depresión, variando su posición según pendientes y caudal.

Producto de lo anterior, una parte del remanso del resalto retorna al sumidero y es captada, lo que explica porque para pendientes longitudinales más bajas es más eficiente este sumidero, debido a que el resalto queda más confinado en la zona de influencia. Para pendientes mayores, parte del resalto es rechazado hacia aguas abajo, fuera del área de influencia.

Para la instalación básica (E-1), la eficiencia de captación del sumidero, con la zona de influencia experimentada, demuestra ser mayor en todos los casos, a su similar normal o en la calle, para las mismas

condiciones de pendientes y caudales de la calle. En efecto, para las pendientes longitudinales de 0,1%, 1,0% y 3,0%, el aumento de la eficiencia de captación es del orden de un 30%, 25% y 10%, respectivamente. Lo anterior demuestra que el mejoramiento de la captación del sumidero es posible de lograr mediante una zona de influencia como la experimentada.

En la instalación E-2 (0,50 m más ancha), para pendientes longitudinales bajas (0,1%), se obtiene una eficiencia de captación similar a la instalación básica. Sin embargo, para pendientes longitudinales intermedias y altas, la eficiencia de captación disminuye, siendo en algunos casos menores a la calle normal. Por lo tanto, se concluye que no resulta atractiva este tipo de instalación como complemento de la instalación básica, ya que disminuye la eficiencia de captación.

En la variación del desnivel de la zona de influencia, (instalaciones E-3 y E-4) los resultados obtenidos indicaron que, en prácticamente todos los casos, la eficiencia de captación es menor que en la Instalación Básica (E-1) y disminuye cuando es menor el desnivel de la zona de influencia.

En la instalación E-5 (sin ventana lateral), se verificó que, al estar sólo la reja del sumidero abierta, prácticamente no hay diferencia en la eficiencia de captación, con respecto a la instalación Básica (E-1), lo cual indica que la ventana lateral no contribuye sensiblemente en la captación.

Para la instalación E-6 (reja sellada), para pendientes longitudinales bajas, el sumidero con zona de influencia es más eficiente utilizando sólo la ventana lateral,

siendo en este caso mayor que en la calle normal. Para la pendiente longitudinal de 1,0%, la eficiencia de captación es del mismo orden, en tanto que para pendientes longitudinales mayores, ésta se reduce sustantivamente.

Finalmente, en la instalación E-7 (Dos ventanas laterales y reja sellada) se concluyó que al estar la reja del sumidero cerrada, aumenta sensiblemente la captación por la presencia de la segunda ventana, siendo incluso siempre mayor que la captación del sumidero en calle normal (sin depresión o zona de influencia). De esto, se concluye que la segunda ventana lateral, en general, permite mejorar la eficiencia de captación del sumidero.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y financiamiento otorgado para este proyecto, a la Dirección de Obras Hidráulicas y al Centro de Innovación Tecnológica, ambas instituciones vinculadas al Ministerio de Obras Públicas de Chile.

REFERENCIAS

Gómez Manuel, Martínez Pablo y González Javier, (2000). "Análisis del comportamiento hidráulico de rejillas sumideros". XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica.

Instituto Nacional de Hidráulica, INH, (2004). "Estudio experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias". Dirección de Obras Hidráulicas e Innovación Tecnológica – MOP. Resumen Ejecutivo disponible en formato pdf, en el sitio web www.inh.cl

Instituto Nacional de Hidráulica, INH, (2004). "Análisis de zonas de influencia para sumideros de aguas lluvias – primera parte"

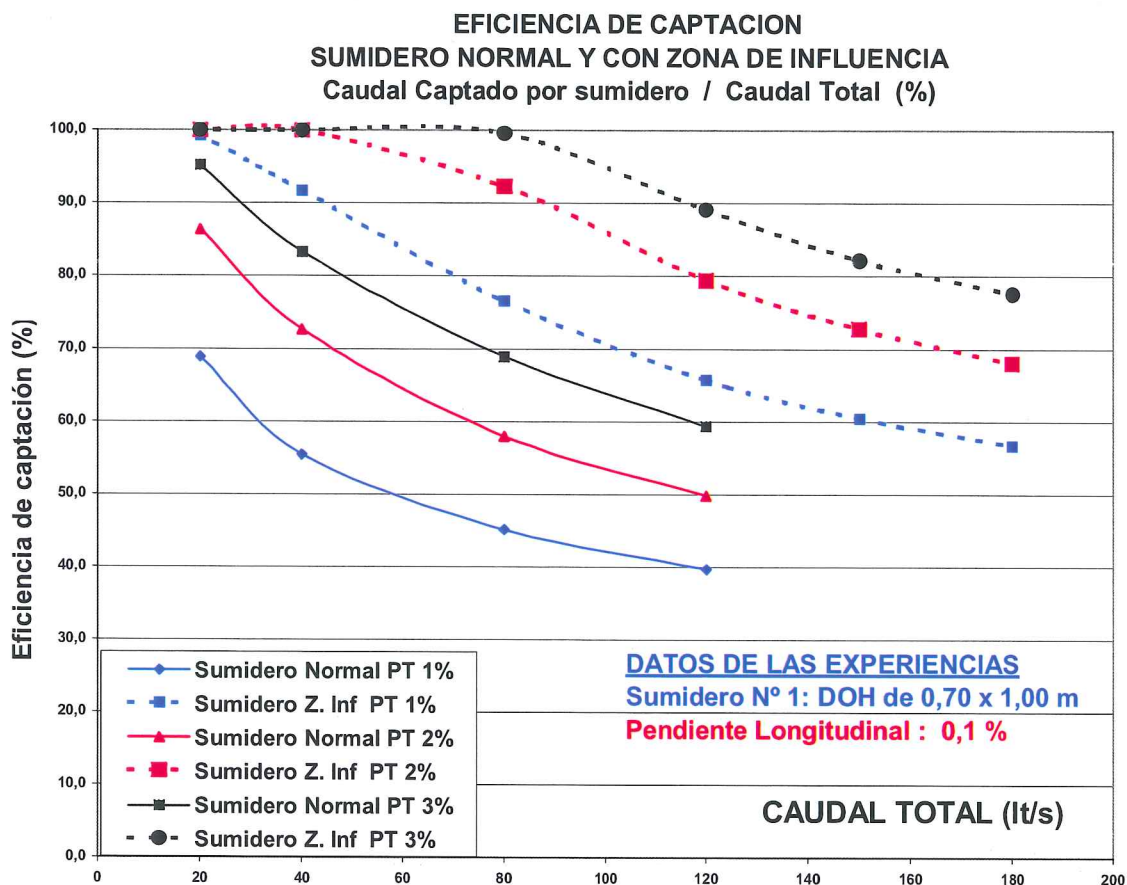
Instituto Nacional de Hidráulica, INH, (2005). "Estudio experimental para mejorar la captación de sumideros de aguas lluvias - Etapa I" Dirección de Obras Hidráulicas e Innovación Tecnológica – MOP.

Kaliski Enrique y Cortez Ricardo, (2004). "Plataforma de pendientes variables para la experimentación de sumideros de aguas lluvias" XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.

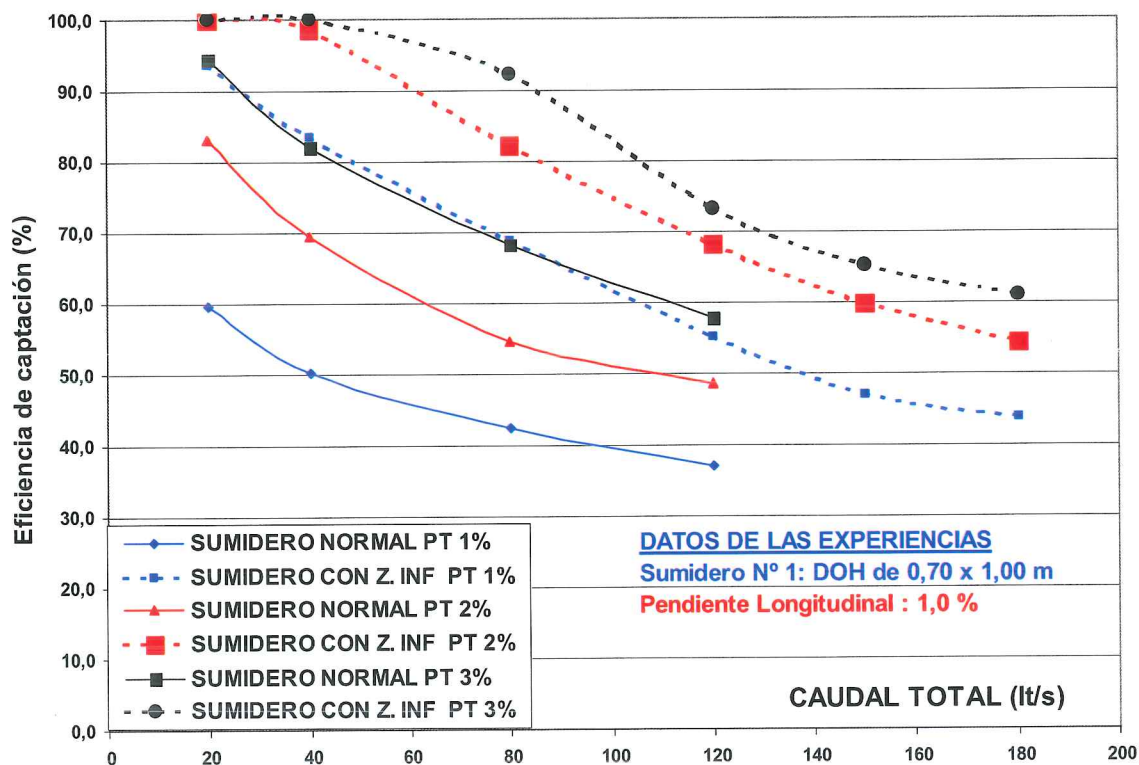
Kaliski Enrique y Cortez Ricardo, (2005). "Estudio experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias". XVII Congreso Chileno de Hidráulica, Valparaíso, Chile.

ANEXO N° 1

Gráficos de Eficiencia de Captación Sumidero Normal (Línea Llena) y con Zona de Influencia (línea punteada), para pendientes longitudinales bajas, intermedias y altas y pendientes transversales (PT) de 1% (línea azul), 2% (línea roja) y 3% (Línea negra).

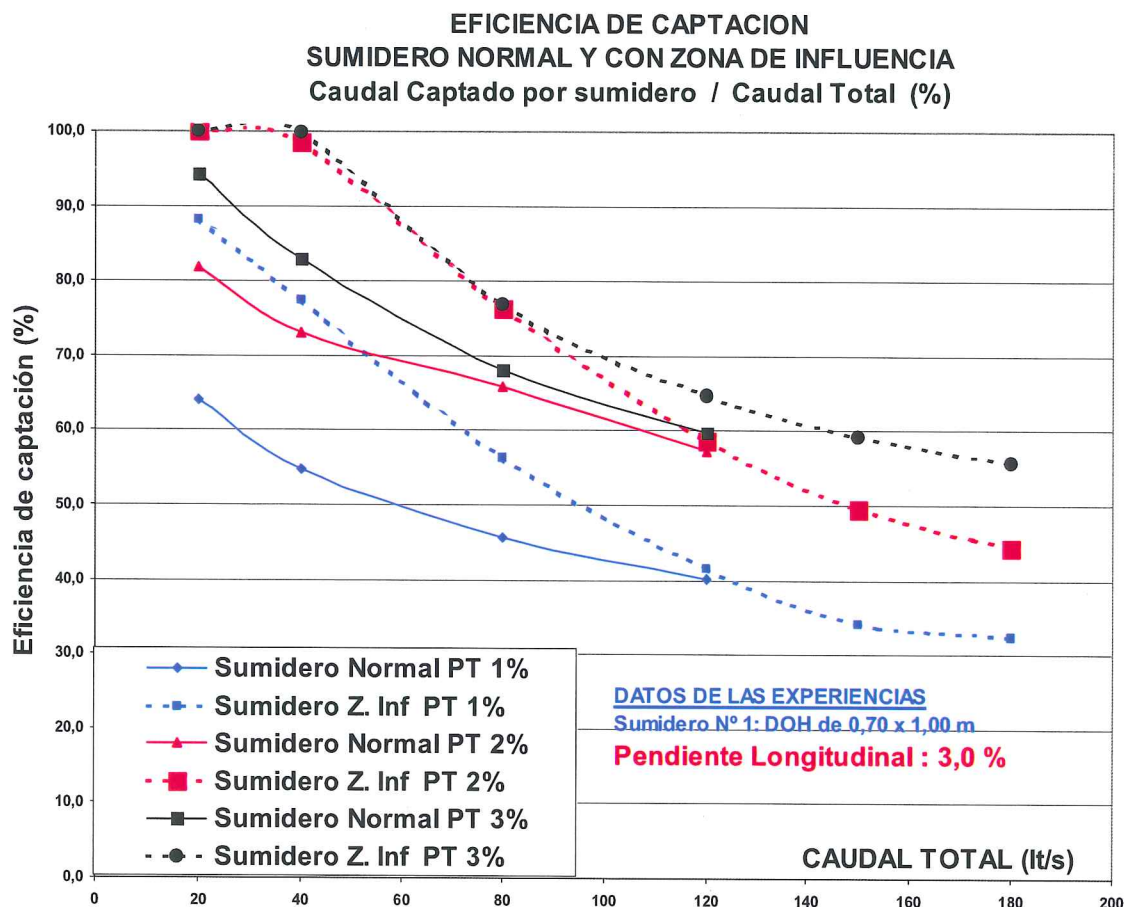


EFICIENCIA DE CAPTACION SUMIDERO NORMAL Y CON ZONA DE INFLUENCIA Caudal Captado por sumidero / Caudal Total (%)



ANEXO N° 1 (Continuación)

Gráficos de Eficiencia de Captación Sumidero Normal (Línea Llena) y con Zona de Influencia (línea punteada), para pendientes longitudinales bajas, intermedias y altas y pendientes transversales (PT) de 1% (línea azul), 2% (línea roja) y 3% (Línea negra).



ANEXO Nº 2

EFICIENCIAS DE CAPTACIÓN OBTENIDAS (%)

PL (%)	PT (%)	Q (lt/s)	Calle Normal (*)	E-1 Instalación Básica	E-2 0,50 m. más ancha	E-3 Depresión 5 cm.	E-4 Depresión 3 cm.	E-5 Sin Ventana Lateral	E-6 Reja Sellada y una ventana lateral	E-7 Dos Ventanas Laterales y Reja Sellada
0,10	1,0	60			93,1	80,9	70,7			
0,10	1,0	80	45,1	76,5		72,2	61,5			
0,10	1,0	120	39,7	65,7	71,0	61,4	50,5	65,6	52,1	
0,10	1,0	180		56,7	52,7	48,0	38,2	57,5	39,5	
0,10	2,0	60			100,0	96,2	86,2		88,9	96,6
0,10	2,0	80	57,9	92,2		87,6	76,0			
0,10	2,0	120	49,7	79,4	83,4	74,5	64,1	80,6	62,0	81,0
0,10	2,0	180		68,0	65,1	57,7	48,3	68,4	46,2	68,2
0,10	3,0	60			100,0	100,0	93,1			
0,10	3,0	80	68,8	99,5		95,8	84,3			
0,10	3,0	120	59,3	89,1	89,0	82,9	72,0	89,1	66,6	
0,10	3,0	180		77,5	72,5	66,5	58,3	77,8	53,9	
1,0	1,0	60			79,9	68,4	54,5		53,7	73,8
1,0	1,0	80	42,3	68,9		58,5	46,6			
1,0	1,0	120	37,0	55,3	52,3	47,0	38,4	54,6	30,5	56,6
1,0	1,0	180		43,8	36,0	33,5	28,2	44,5	24,2	45,9
1,0	2,0	60			86,8	78,9	63,4			
1,0	2,0	80	54,6	82,2	75,6	68,8	55,9			
1,0	2,0	120	48,5	68,1	63,0	58,4	49,2	66,1	36,9	
1,0	2,0	180		54,5	45,9	44,4	38,7	54,7	29,7	
1,0	3,0	60			93,2	93,0	78,0			
1,0	3,0	80	68,2	92,1		78,1	64,9			
1,0	3,0	120	57,8	73,1	66,6	60,9	52,8			
1,0	3,0	180		61,1	50,9	48,6	44,1			
3,0	1,0	60			54,1	54,5	45,7			
3,0	1,0	80	45,6	56,3	44,1	43,7	39,3			
3,0	1,0	120	40,1	41,4	33,5	35,3	32,3			
3,0	1,0	180		32,2	22,1	25,3	23,5			
3,0	2,0	60			67,6	72,0	62,1			
3,0	2,0	80	65,7	76,3	61,7	62,7	56,5			
3,0	2,0	120	57,2	58,6	49,6	52,0	47,6	59,0	17,3	
3,0	2,0	180		44,4	33,3	38,1	34,1	45,2	13,8	
3,0	3,0	60			67,9	71,3	63,4			
3,0	3,0	80	68,1	76,8	59,4	63,2	58,5			
3,0	3,0	120	59,6	64,7	53,4	56,7	54,7			
3,0	3,0	180		55,6	43,4	50,2	47,4			

(*) Fuente: INH (2004).

EXPERIENCIA EN EL USO COOPERATIVO DE UN MODELO NUMÉRICO Y UN MODELO FÍSICO

Jorge Astudillo Cornejo, Ricardo Cortez Contreras
Instituto Nacional de Hidráulica, Chile, jastudillo@inh.cl, rcortez@inh.cl

RESUMEN:

El presente trabajo expone la metodología utilizada y la experiencia obtenida del desarrollo de un estudio para evaluar el funcionamiento de las obras hidráulicas en un cauce. En este estudio la forma óptima y factible de abordarlo fue mediante el uso combinado de un modelo físico y un modelo numérico (Hec-Ras) reduciendo la duración y los costos del estudio.

ABSTRACT:

The present work describes the used methodology and the win experience obtained in a study of the hydraulics performance of structures in a urban river. This work consider the used of combined physical and numerical models and results confiability in a reduced time and cost.

PALABRAS CLAVES: técnicas de laboratorio, métodos computacionales, obras hidráulicas.

INTRODUCCIÓN

La modelación física es, sin duda, la mejor herramienta para estudiar la mayoría de los problemas hidráulicos que se puedan enfrentar. Mediante una correcta definición de las leyes de semejanza, las relaciones de escalas y de los parámetros físicos, es posible representar fenómenos muy complejos, con características tridimensionales, dinámicos, una multitud de variables físicas interrelacionadas, y entregando un resultado viviente e inigualable con otras técnicas de estudios.

Sin embargo, la modelación numérica está resultando ser una competidora fuerte, debido a la incesante aparición de complejos y poderosos computadores y robustos software que permiten simular numéricamente la mayoría de los problemas físicos que se estudian a diario, pudiendo considerar zonas de estudios tan extensas como la capacidad del computador lo permita. Luego, la principal ventaja de los modelos numéricos, en contraste con los modelos físicos, es que entregan resultados rápidos y de muy bajo costo, sin importar la extensión de la aplicación.

Una alternativa interesante, que el Instituto Nacional de Hidráulica (INH) llevó a cabo en uno de sus estudios, es la modelación paralela y cooperativa de un modelo físico con un modelo numérico. Permitiendo concentrar en el modelo físico la zona de mayor interés, mientras que en el modelo numérico se puede ampliar la zona de estudio hasta donde se estime conveniente.

De esta forma, en el presente trabajo se expone la metodología usada y la experiencia obtenida en un estudio denomina-

do "Modelo Físico-Hidráulico de la Obra de Entrada a la Bóveda del Zanjón de la Aguada, Región Metropolitana", encargado por el Ministerio de Obras Públicas. En este estudio la forma óptima y factible de abordarlo fue mediante el uso combinado de un modelo físico y un modelo numérico (Hec-Ras) reduciendo la duración y los costos del estudio.

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVO DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

El Zanjón de la Aguada constituye uno de los principales cauces de drenaje de aguas lluvias de la ciudad de Santiago de Chile. Este cauce abierto, en su desarrollo urbano, presenta un tramo abovedado, de 3200 metros de largo, que restringe su capacidad de evacuación con el consiguiente riesgo de desbordes e inundaciones en el sector céntrico de la capital.

El anteproyecto del Parque La Aguada, de la Subdirección de Caudales y Drenaje Urbano de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, considera derivar el caudal de exceso, no evacuado por la bóveda del zanjón, a un parque aledaño diseñado hidráulicamente para que se inunde y escurran las aguas hasta el otro extremo de la bóveda, funcionando de by-pass y, a la vez que se entrega un parque a la comunidad, se resuelve los problemas de desbordes, inundaciones y seguridad ciudadana.

Luego, el objetivo del estudio en cuestión, es evaluar el mejoramiento hidráulico de la geometría de entrada a la bóveda y, si es posible, mejorar la capacidad hidráulica de ésta. Además, se deben diseñar las obras

necesarias para que, aguas arriba de dicha entrada, se pueda verter, sin problemas, el exceso de agua al denominado Parque La Aguada.

Por su parte, la bóveda del zanjón tienen una sección cerrada de hormigón, de base triangular y parte superior de forma aproximadamente parabólica. Posee un murete central que recorre toda su longitud y coeficiente de Manning cercano a 0.016. Este tramo es una importante fuente de pérdidas de carga y ejerce un control determinante en el eje hidráulico desarrollado aguas arriba de ésta. En cuanto al cauce abierto, los primeros 200 metros desde la bóveda hacia aguas arriba, el zanjón presenta un cauce de hormigón y trapecial con la presencia de dos gradas con cubetas de sedimentación y un aliviadero lateral que descarga a las calles. Este vertedero, desde el punto de vista hidráulico, actualmente no funciona pues el zanjón desborda por otras zonas. Justo aguas arriba de la entrada a la bóveda cruza parcialmente una viga de acero, de una calle adyacente, que interviene con los eventos más extremos. Aguas arriba de este tramo trapecial, se encuentra un puente en desuso, lo que da paso a una transición de la sección trapecial a rectangular, conservándose esta última sección por varios cientos de metros hacia aguas arriba con pendiente fuerte, y por lo tanto, con régimen de supercrítico. La Figura 2 muestra la planta original del sistema, que corresponde a la descripción anterior.

Lo difícil de este estudio está en que el escenario espacial que se requiere considerar debe incluir los 3200 metros de bóveda y aproximadamente 400 a 500 metros del canal abierto aguas arriba de la entrada a

la bóveda. Sin embargo, el escenario anterior fue modelado con Hec-Ras y de esta forma se determinaron las condiciones de borde para el área de interés del modelo físico, que se ha definido con 250 metros del canal abierto del zanjón de aguas arriba, incluyendo el puente en desuso y unos 50 metros de canal rectangular y 100 metros de la bóveda.

En este esquema, se debe analizar los caudales con período de retorno de 2, 10 y 100 años considerando las obras del Parque La Aguada, que contempla lagunas de control aguas arriba de la zona de estudio, con lo que resulta que los caudales para los períodos de retorno anteriores son 115 m³/s, 192 m³/s y 208 m³/s. Los dos últimos caudales son muy semejantes debido a la acción de las lagunas de control mencionadas. Finalmente, se debe diseñar un muro longitudinal que divida el cauce en dos de manera de separar el caudal en aguas lluvias (denominado cauce principal) y aguas contaminadas descargadas por un colector unitario (cauce secundario), y obligar a que estas últimas entren por la bóveda y que las aguas que sean evacuadas por el vertedero lateral sean aguas limpias para no afectar el parque. En este diseño los caudales para el canal principal son 83, 154 y 169 m³/s para cada período de retorno, y para el canal secundario 32, 39 y 39 m³/s respectivamente.

Paralelamente, se debe considerar dos escenarios para la bóveda, uno que considere un coeficiente de Manning de 0.016 (que corresponde al actual) y otro que incluya las mejoras proyectadas para el interior, que considera eliminar el murete central, y reducir el coeficiente de Manning a 0.015.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO HEC-RAS

El modelo numérico Hec-Ras (U.S.A.C.E.), desarrollado por el Hydrologic Engineering Center, es un software que permite realizar trabajos en una dimensión de flujos permanentes e impermanentes. El módulo para eje hidráulico en régimen permanente, de interés en este trabajo, permite determinar longitudinalmente las cotas de la superficie del agua y la velocidad media en cada sección para flujo permanente gradualmente variado. Es capaz de simular régimen subcrítico, supercrítico y mixtos.

El esquema de cálculo se basa en la solución de la ecuación de energía para una di-

mensión (Ec. [1]). Las pérdidas friccionales de carga son calculadas mediante el coeficiente de Manning, y para la contracción o expansión de flujo por un coeficiente asociado que multiplica los cambios de altura de velocidad. La ecuación de momento se usa en dónde el flujo se torna rápidamente variado, como un resalto hidráulico, una confluencia o el cálculo de la hidráulica en un puente o alcantarilla.

$$B_j = Z_j + \frac{v_j^2}{2g} + h_j = Z_i + \frac{v_i^2}{2g} + h_i + \text{pérdidas} = B_i + \text{pérdidas} \quad [1]$$

Cabe hacer notar que en el cálculo de un resalto hidráulico o una crisis, el desarrollo de estas unidades tienen una longitud nula, lo que no permite evaluar la posición exacta o la interacción de estas singularidades con la geometría del cauce.

APLICACIÓN CON HEC-RAS

La aplicación en Hec-Ras representó en conjunto la interacción de los 500 metros del canal de aguas arriba y toda la bóveda. La bóveda se representó con secciones transversales cerradas, incluyendo el muro central, permitiendo discriminar si la bóveda entra en presión o funciona como acueducto, según corresponda a cada condición simulada. La entrada a la bóveda se simuló como una singularidad de alcantarilla. El coeficiente de Manning para la bóveda se definió como 0.0159 y para el canal como 0.016 (hormigón) y 0.018 (adoquín). Además, las condiciones de borde, tanto de aguas arriba como aguas abajo, se establecieron como la altura normal correspondiente.

De esta forma, se puede extraer las alturas de escurrimiento en la sección de aguas arriba del modelo físico, y las alturas piezométricas a 100 metros de la entrada a la bóveda, para distintas condiciones de caudales, construyendo una ley de operación del modelo físico a partir de los datos del modelo numérico Hec-Ras.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO

Para la determinación de la escala del modelo físico se conservó la razón de fuerzas gravitacionales preservando el número de Froude [2]. En el canal abierto, las fuerzas friccionales no son tan importantes como las pérdidas singulares, debido a que los 250 metros de canal considerado contienen muchas singularidades que son las que dominan en la definición del flujo, es decir, lo más importante es representar fielmente la geometría de las unidades geométricas que la componen. Sin embar-

go, se buscó representar los más cercanos posible las pérdidas friccionales (Ec. [3]). Al respecto, en el prototipo, el flujo presenta régimen hidrodinámicamente rugoso, con un coeficiente de Manning entre 0.016 y 0.018. La escala finalmente seleccionada fue 1:20, representando el hormigón del canal con un mortero liso. Aún cuando en el modelo se verifica un régimen hidrodinámicamente liso, el coeficiente de Manning real representado en esta condición es aproximadamente 0.017, lo cual está dentro del intervalo anterior, y debe tomarse en cuenta que su incidencia se limita a la mitad de aguas arriba del canal. La bóveda se construyó en acrílico de manera de representar el menor Manning de la situación mejorada (0.015) y además, para aprovechar la transparencia del material en la visualización del flujo. Este tramo también se presenta con régimen hidrodinámicamente liso, en contraste con el prototipo, sin embargo, sólo se representan 100 de los 3200 metros de la bóveda, siendo más importante el cálculo de la condición de borde de aguas abajo, que incluye las pérdidas de toda la bóveda. En la práctica, las pérdidas de los 100 metros de bóveda del modelo físico son despreciables, y no influirán visiblemente en las alturas del canal y menos si se considera la escala reducida del modelo.

$$Fr^2 = \frac{v^2 B}{gA} \quad [2]$$

$$\frac{Q \cdot n}{\sqrt{i}} = A \cdot R^{2/3} \quad [3]$$

CALIBRACIÓN DE AMBOS MODELOS

Los datos disponibles de terreno no fueron suficientes para asegurar una correcta calibración. Luego, el procedimiento realizado fue calibrar el modelo numérico con los pocos datos de terreno y ensayar el modelo físico con las condiciones de borde así calculadas con Hec-Ras. De esta forma se obtenía la respuesta del modelo físico a diferentes situaciones ensayadas. Estos datos de modelo complementaron la información de terreno para calibrar nuevamente el modelo numérico.

Asimismo, las características expuestas de la aplicación en Hec-Ras se determinaron después de varios análisis y comparaciones con datos de terreno y con el modelo físico, buscando representar en Hec-Ras las condiciones más cercanas a la realidad. La Figura 1 muestra algunas curvas de descarga determinadas con ambos modelos y los datos de crecidas o de estudios anteriores disponibles.

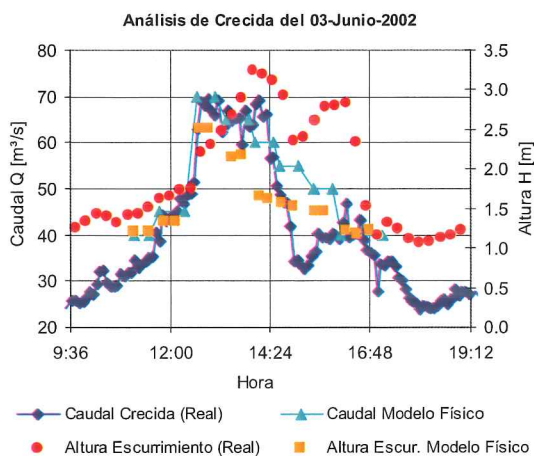
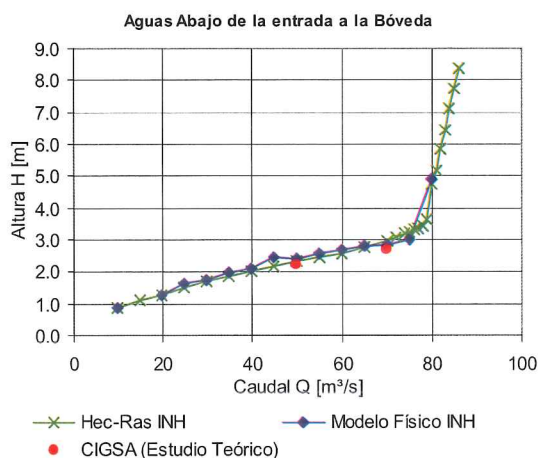


Figura 1.- Gráficos de Calibración y Validación

Además, en Hec-Ras se observaron tres situaciones generales para esta zona del zanjón. La primera situación muestra escurrimiento mixto en el canal sin sumergimiento de la entrada a la bóveda y régimen cercano al crítico en el interior de ésta. En la segunda situación, y con el aumento de los caudales, se observa un sumergimiento de la entrada, pero verificando una contracción importante del flujo y desarrollando un escurrimiento libre al interior. La tercera situación muestra que, con el aumento de los caudales, la condición de borde de aguas abajo es importante y la influencia es clara, a diferencia de los casos anteriores, tornando el flujo en presión y aumentando considerablemente las pérdidas con un pequeño aumento del caudal. Estas situaciones fueron corroboradas experimentalmente con el modelo físico.

Una vez calibrados ambos modelos, se calculó también las condiciones de borde para la situación mejorada de la bóveda, que considera la eliminación del murete central y una reducción del coeficiente de Manning mediante una rectificación de la sección (0.015). Al final de este proceso se obtuvo, tres condiciones de borde:

- Condición de borde de aguas abajo para una situación de bóveda sin modificaciones (situación actual con manning 0.016, Caso Base)
- Condición de borde de aguas abajo para una situación con mejoras en el interior de la bóveda (situación bóveda mejorada con Manning 0.015, Caso Bóveda Mejorada)
- Condición de aguas arriba en la frontera del modelo (válido para ambos casos).

Con el proceso anterior, en adelante se puede ensayar el modelo físico y estudiar en detalle los fenómenos más complejos en él, como la interacción del flujo con las gradas y cubetas, el vertedero lateral, la influencia de la viga de la calle aledaña, las transiciones de secciones, el puente de aguas arriba, la geometría de entrada a la bóveda, entre otras cosas. Todos estos son fenómenos complejos y de naturaleza tridimensional y, como veremos más adelante, algunos con características dinámicas estacionarias. En la Figura 2 se muestra una fotografía general del modelo físico reducido del Zanjón de la Aguada. En ella se puede apreciar las modificaciones que se realizaron en la entrada a la bóveda y se indican las unidades que componen al sistema de estudio. La Figura 3 muestra una vista equivalente entre el prototipo y modelo (PLANTA ORIGINAL y PLANTA MODIFICADA).

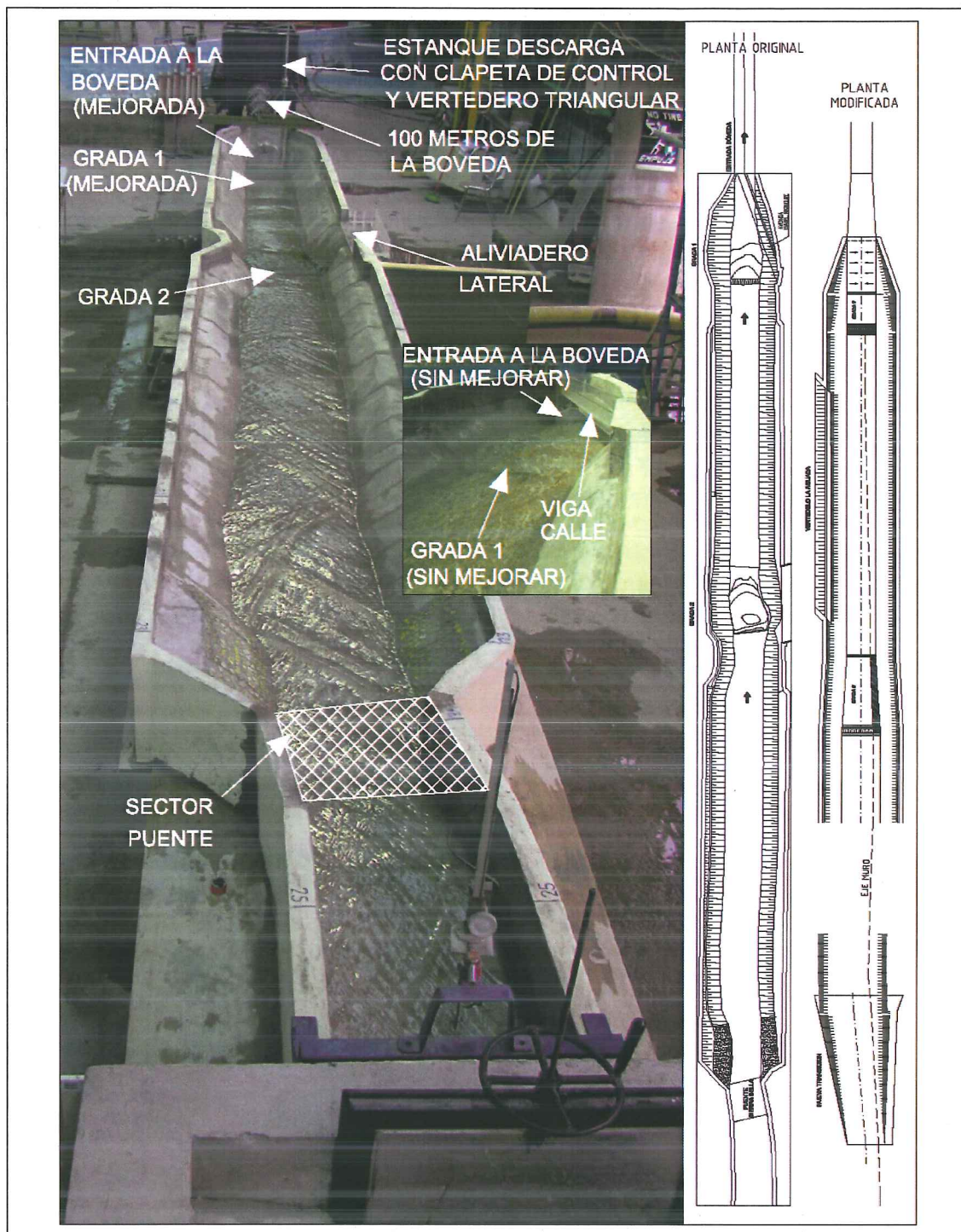


Figura 2.- Modelo Físico Reducido. Descripción General.



Figura 3. Comparación Naturaleza (izq) y Modelo Físico Reducido (der)

Por otro lado, cabe hacer notar que cuando se alcanza la cota umbral de un vertedero, y se permite el vertimiento de caudal, la condición de borde de aguas abajo debe establecerse de acuerdo al caudal que escurre en la bóveda, y no al caudal total entrante al sistema. De esta forma, se debe equilibrar el modelo de forma iterativa, haciendo coincidir el caudal asociado a la condición de borde con el valor medido del vertedero triangular de aguas abajo, ya que con la variación de la clapeta varía el nivel del agua en el canal, con lo que varía el caudal vertido y por ende, el caudal en la bóveda.

MEJORAS EN LA ENTRADA A LA BÓVEDA

En adelante, los ensayos realizados se orientaron a la determinación de mejoras hidráulicas en torno a la entrada de la bóveda, implementadas con un cambio de geometría.

Se diseñó, entonces, y de acuerdo con los requerimientos del estudio, una geometría de entrada con el objeto de ordenar la entrada del flujo a la bóveda, reducir la importante contracción del flujo en ese lugar y, sobretodo, independizar el cauce de las obras viales (viga calle aledaña), por la interferencia observada de la calle adyacente. Para ello, se consideró una prolongación hacia aguas arriba de la bóveda con un paulatino aumento de la sección de escurrimiento, eliminando, además, las aristas en la entrada incorporando redondeamientos de éstos en la entrada. Además, se rediseñó la primera grada, que cumple la función de disipar energía y capturar, en su cubeta, sedimentos antes de la entrada a la bóveda. En la Figura 2 se muestran las situaciones antes y después del diseño junto con un esquema de las modificaciones propuestas.

Con esta nueva geometría se realizó una serie de ensayos usando la condición de borde del caso base (definiéndose el caso 2) y la condición de borde bóveda mejorada (definiéndose el caso 3). Los resultados de los ensayos fueron de acuerdo a lo esperado. Las mejoras producto de la nueva geometría sólo afectan a los caudales menores, y las mejoras friccionales de la bóveda son importantes para los caudales máximos, influyendo en la capacidad máxima de porteo. Lo anterior se puede apreciar de la curva de descarga en la entrada de la bóveda que se muestra en el Figura 4.

De las experiencias, y visualizando las curvas de descarga, se puede apreciar tres tramos característicos. El primero están entre los 0 y 55 m^3/s aproximadamente, donde la geometría de entrada ni las mejoras al interior de la bóveda influyen en la capacidad del zanjón, debido a que el control, como se indicó, lo realiza la geometría de entrada, con pérdidas singulares muy pequeñas para ambas configuraciones. El segundo tramo está entre los 55 y 80 m^3/s , donde se puede apreciar que el control del flujo de la geometría de entrada es apreciable. Finalmente, el tercer tramo es para caudales mayores a 80 m^3/s , donde el control de aguas abajo, definido por las pérdidas friccionales de la bóveda, es determinante en la capacidad máxima de porteo de ésta.

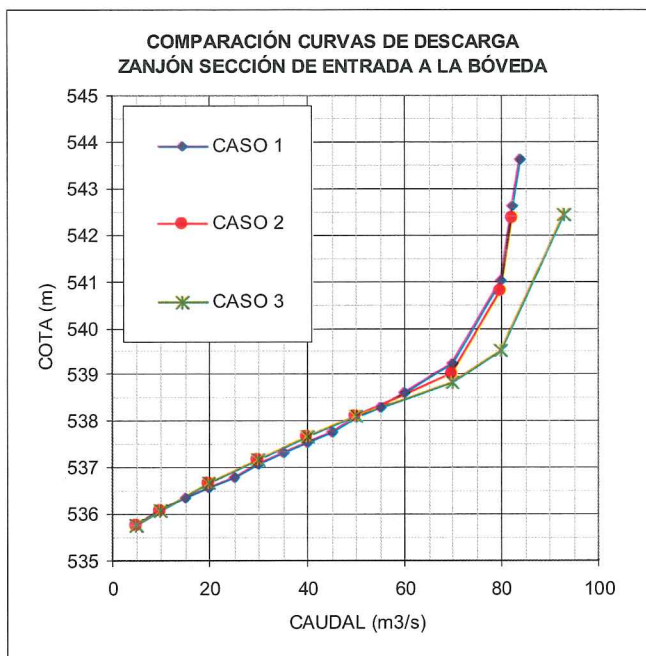


Figura 4. Curvas de Descarga

En resumen, la capacidad hidráulica máxima del Caso Base (Caso 1) es de 80 m³/s. Esto no mejora sólo con las modificaciones de la entrada de la bóveda (Caso 2), sino que requiere además eliminar el murete central y reducir el coeficiente de Manning a 0.015 (Caso 3) para aumentar su capacidad de porteo a 90m³/s.

DISEÑO DEL VERTEDERO LA AGUADA

El primer diseño teórico para el Vertedero La Aguada contempla eliminar el actual aliviadero lateral y construir uno nuevo en la ribera opuesta, con 60 metros de largo y una cota umbral de 540,6 msnm, ubicado aguas arriba de ambas gradas que fueron reposicionadas para distribuir el espacio disponible. Este diseño no resultó como se esperaba, poniendo en evidencia la importancia de la modelación física de una obra antes de su construcción y puesta en marcha. En los ensayos se desarrolló un torrente aguas arriba del vertedero que rechazó el resalto haciendo que el flujo pasara prácticamente por debajo del umbral del vertedero. Luego, como la capacidad de la bóveda es limitada, se acumuló el agua frente a la entrada hasta que la altura fuera suficiente para hacer retroceder el resalto hasta la zona de vertimiento y evacuar el exceso de agua. Sucediendo esto, el nivel de agua frente a la bóveda disminuye dando pie nuevamente a que el torrente rechace el resalto, generándose una oscilación de masas muy regular, con un período menor a 1.5 minutos (naturaleza) y amplitudes de hasta 3 metros. Debido a la su naturaleza dinámica y estacionaria del fenómeno, con Hec-Ras se calculó un estado de equilibrio estacionario, pero no era posible prever el resultado final.

Se probaron varias alternativas de vertedero, largos de entre 50 y 60 metros, distintas ubicaciones de dicha obra y de las gradas, distintas alturas de vertimiento y geometrías, obteniéndose el diseño final que se describe a continuación.

El vertedero lateral se ubica entre la nueva posición de ambas gradas (Figura 2). La cota umbral del vertedero se establece en 541.0 m y la longitud se conserva en los 60 m. Por otro lado, el sector del puente presentaba complicaciones para los caudales de período de retorno 10 y 100 años y, dado que dicho puente está en desuso y clausurado, el nuevo diseño contempla su eliminación y modificación de la transición existente por una más gradual de 35 metros de longitud y del tipo "broken back". Este nuevo diseño permite incorporar al sistema 208 m³/s de los cuales 93 m³/s ingresan a la bóveda y el resto, 115 m³/s, son evacuados por el vertedero lateral hacia el Parque La Aguada, con una cota máxima en el agua de alrededor de la 542.5 msnm. El umbral del vertedero en la cota 541 permite comenzar el vertimiento de agua a partir de los 90 m³/s, es decir, sólo cuando la bóveda comienza a ser superada en capacidad, lo que optimiza el uso de la bóveda y del parque a sólo cuando es necesario. El nuevo ensanche en el sector del puente trabaja respetando las alturas máximas para los caudales de diseño y el resalto queda atrapado en la cubeta de la grada 2, de aguas arriba, permitiendo al vertedero trabajar de manera más adecuada. Sin embargo, además de las obras proyectadas,

es necesario elevar como medida de seguridad, por lo menos un metro, los muros del canal en aquellas zonas que verificaron una altura máxima cercana al máximo de 542.5 msnm.

MURO LONGITUDINAL DIVISOR

Como se indicó, el estudio incluye el diseño y ensayo de un muro longitudinal que dividiera el cauce en dos, separando las aguas contaminadas de las aguas lluvias. La idea de esta obra es que el caudal de aguas servidas no sea vertido al Parque La Aguada y entre directamente a la bóveda.



Figura 5. Diseño Final Obras Parque La Aguada, con muro longitudinal.

A partir de la aplicación de Hec-Ras ya calibrada y complementada con los datos de los ensayos del nuevo vertedero, se realizó una aplicación que permitió simular la presencia del muro y determinar cuál es la posición más favorable. En el proceso se determinó que la zona útil para ubicar el muro es angosta, considerando que se debe mantener las alturas del agua por debajo de los máximos admitidos por el cauce y las obras presentes. Es así como, mediante esta aplicación, se obtuvo el diseño final y se ensayó en el modelo físico resultando un buen funcionamiento. El cauce principal sólo comienza a verter para caudales totales mayores a $90 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que es óptima para el uso de las distintas obras implicadas. El cauce secundario, mientras exista algún caudal no nulo llegando a la entrada de la bóveda desde el cauce principal, no se verifican flujos inversos en ninguna capa que puedan eventualmente hacer verter aguas contaminadas del cauce secundario al parque La Aguada. Lo anterior era una condición necesaria para el éxito del proyecto. Por otro lado, se evaluó la posible obstrucción de la bóveda, impo-

niendo una condición de borde de aguas abajo que permitiera portear sólo 40 m³/s. En este caso el vertedero funcionó adecuadamente a los requerimientos y no se evidenció vertimiento de aguas contaminadas del cauce secundario (39 m³/s para un período de retorno de 10 y 100 años). Al respecto, sólo podrían producirse desbordes marginales debido a salpicaduras u oscilaciones por turbulencia de la superficie del agua, por lo que se recomienda considerar un metro de revancha en la cota máxima de los muros del canal en las zonas que lo requieran. La Figura 5 muestra el diseño final en el modelo físico. En la entrada a la bóveda se puede apreciar que las aguas contaminadas (entintadas en morado) no cruzan al canal principal ni al vertedero.

CONCLUSIONES

El estudio anterior podría haber sido realizado sólo con la modelación con Hec-Ras, pero la calibración hubiera sido más dificultoso e imprecisa y, sobre todo, no se hubiera podido probar en detalle las diferentes obras diseñadas con confiabilidad, ya que la mayoría de ellas respondían a características tridimensionales y pérdidas singulares.

Más aún, la oscilación estacionaria de masa de agua experimentada con uno de los diseños de vertedero no fue prevista con Hec-Ras y difícilmente hubiera sido prevista con otro modelo numérico si no se implementa, a priori, para que simule dicho fenómeno.

En cuanto al modelo físico, éste no hubiera podido realizarse si no se reduce la zona de interés, para disminuir los costos y tiempos de experimentación. Además, con la ayuda de Hec-Ras, el diseño de las nuevas obras siempre se mantuvo un pie adelante, reduciendo los ensayos de diseños fallidos y por ende, nuevamente reduciendo los costos y el tiempo de realización del estudio.

Además, el modelo físico resultó ser un sistema complicado debido la gran interacción del sistema con las condiciones de borde y lo frágil de los resultados a los cambios geométricos y condiciones de ensayos. Por otro lado, la interacción del modelo con presencia del vertedero lateral, obligaba a estabilizar el modelo a través de un proceso iterativo que coordinara los caudales de salidas, medidos con el vertedero de aguas abajo y controlado con la clapeta del estanque de descarga, con las condiciones de borde de aguas abajo que también dependen de la clapeta y definen las alturas de carga frente al vertedero, y por ende, el caudal vertido. Lo anterior demandó mayores tiempos que lo usual para la estabilización del modelo en una situación requerida, pero a la vez, enriqueció los resultados y las experiencias de laboratorio.

La dependencia cooperativa que el modelo físico tuvo con los resultados de Hec-Ras lo hacen una metodología interesante, más aún cuando sus ventajas se traducen en confiabilidad, tiempo y dinero.

REFERENCIAS

- Chanson, H. (1999)**, The Hydraulics of Open Channel Flow, Arnold, Londres.
- CIGSA (2004)**, "Anteproyecto Alternativas de Mejoramiento del Tramo Abovedado del Zanjón de La Aguada, Región Metropolitana", DOH, Santiago, Chile.
- HEC-RAS (2002)**, User Manual & Reference Manual, US Copr Army of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- INH (2006)**, "Modelo Físico-Hidráulico de la Obra de Entrada a la Bóveda del Zanjón de la Aguada, Región Metropolitana", Instituto Nacional de Hidráulica, DOH, Chile.
- Mery, H. (1972)**. Mecánica de Fluidos I, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Obras Civiles, Santiago, Chile.

TITULADOS 2006

INGENIERÍA CIVIL, MENCIÓN INGENIERÍA HIDRÁULICA, SANITARIA Y AMBIENTAL FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE

Alumno: CARO HERNANDEZ, MIGUEL ANGEL
Fecha: 05-enero-2006
Tema: "MODELACION HIDROLOGICA DE CUENCAS PLUVIALES HOYA HIDROGRAFICA DEL RIO MAULE."
Profesor Guía: BROWN FERNANDEZ, ERNESTO ROBERTO

Alumno: GONZALEZ SANDOVAL, JAVIER EUGENIO
Fecha: 27-enero-2006
Tema: "SEDIMENTACION EN EMBALSES CONSIDERANDO EL EFECTO DE CORRIENTES DE TURBIDEZ. DESARROLLO E IMPLEMENTACION DE UN MODELO MATEMATICO Y NUMERICO"
Profesor Guía: TAMBURRINO TAVANTZIS, ALDO JORGE

Alumno: HIDALGO GUAJARDO, JUAN PAULO
Fecha: 20-enero-2006
Tema: "SELECCION DE MODELOS HIDRAULICOS PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE."
Profesor Guía: CONCA BENITO, MARIA LETICIA

Alumno: MORICE LEON, PILAR FRANCISCA
Fecha: 09-enero-2006
Tema: "ESTUDIO DE PLANTAS PILOTOS DE AGUAS SERVIDAS BASADAS EN LOMBRIFILTRACION Y RHIZOFILTRACION."
Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: ARANDA GOMEZ, RODRIGO ANDRES
Fecha: 24-marzo-2006
Tema: "ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL EFECTO DEL VIENTO EN LA CINEMATICA DE LA SUPERFICIE LIBRE"
Profesor Guía: TAMBURRINO TAVANTZIS, ALDO JORGE

Alumno: HERRERA SANAGUAS, RODRIGO ALEJANDRO
Fecha: 13-marzo-2006
Tema: "METODOLOGIAS DE EVALUACION DE RIESGO PARA SITIOS CONTAMINADOS POR HIDROCARBUROS."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: MELLA ROBLES, CARLOS ANDRES
Fecha: 13-marzo-2006
Tema: "GESTION INTEGRAL DE RESIDUOS INDUSTRIALES LIQUIDOS CON PRESENCIA DE ISOTOPOS RADIOACTIVOS"
Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: ARAVENA NOEMI, HERNAN PATRICIO
Fecha: 24-abril-2006
Tema: "DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACION DE RECUPERACION DE COBRE DESDE DEPOSITOS DE LASTRES Y DEL TRATAMIENTO DE SUS EFLUENTES."
Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: MOLINA LOPEZ, MARIA EUGENIA
Fecha: 27-abril-2006
Tema: "PROGRAMA DE ESTUDIO DE INTRUSION SALINA EN ACUIFEROS COSTEROS."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: ROMERO CASTILLO, SERGIO EDUARDO
Fecha: 25-mayo-2006
Tema: "METODOLOGÍA PARA DETERMINACIÓN DE APOORTE DE CARGA ORGÁNICA POR INFILTRACIÓN Y AGUAS LLUVIA EN SISTEMAS DE ALCANTARILLADOS."
Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: CALDERON BUENO, NATALIA DEL CARMEN
Fecha: 14-junio-2006
Tema: "ESTUDIO DE FACTORES ASOCIADOS A LA PRODUCCIÓN DE BULKING EN EL TRATAMIENTO DE LODOS ACTIVADOS."
Profesor Guía: CASTILLO MORALES, GABRIELA DEL CARMEN

Alumno: RIQUELME RIOS, EDUARDO ANDRES
Fecha: 13-junio-2006
Tema: "ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN UNA
COMPAÑÍA MINERA."

Profesor Guía: CABRERA FAJARDO, GUILLERMO

Alumno: ESPINOZA ESTRADA, JOSE MIGUEL
Fecha: 18-julio-2006
Tema: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA DESEMBOCADURA
DEL RIO MAIPO."

Profesor Guía: NIÑO CAMPOS, YARKO IVAN

Alumno: GARRIDO MARQUEZ, ALEJANDRO ALFONSO
Fecha: 24-julio-2006
Tema: "OLORES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS."

Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: LAGOS SAN MARTIN, PABLO ENRIQUE
Fecha: 31-julio-2006
Tema: "CRITERIOS DE SEGURIDAD HIDROLÓGICOS EN SISTEMAS DE
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE"

Profesor Guía: BROWN FERNANDEZ, ERNESTO ROBERTO

Alumno: MUÑOZ MONARI, MIGUEL ANGEL
Fecha: 12-julio-2006
Tema: "ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INTERACCIÓN ENTRE TRANS-
PORTE DE SEDIMENTO EN SUSPENSIÓN Y CUÑA SALINA."

Profesor Guía: NIÑO CAMPOS, YARKO IVAN

Alumno: CARRASCO CISTERNAS, PABLO ANDRES
Fecha: 09-agosto-2006
Tema: "VALIDACIÓN DE UN SISTEMA DE EVACUACIÓN DE AGUAS LLUVIAS,
BAJO CRITERIOS DE SEVERIDAD DE TORMENTA Y DISTRIBUCIÓN
ESPACIAL DE LA LLUVIA."

Profesor Guía: VARGAS MESA, HAYDÉE XIMENA

Alumno: GALLARDO PEÑA, VICTOR ALEJANDRO
Fecha: 09-agosto-2006
Tema: "EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y ECONÓMICO DE LA
APLICACIÓN DEL REGLAMENTO DE MANEJO DE LODOS EN PLAN-
TAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS"

Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: LARA TEUBER, FRANCISCO JOSE
Fecha: 18-agosto-2006
Tema: "MODELACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE UN SITIO CONTAMINADO.
IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS CRÍTICOS."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: MUÑOZ VALENZUELA, PAMELA KARINA
Fecha: 25-agosto-2006
Tema: "ESTUDIO DE CAMBIOS EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE
UN SISTEMA DE LODOS ACTIVADOS RELACIONADO CON LA PRO-
DUCCIÓN DE BULKING."
Profesor Guía: CASTILLO MORALES, GABRIELA DEL CARMEN

Alumno: PROVOSTE BARRIENTOS, JOEL ANGEL SERAFIN
Fecha: 02-agosto-2006
Tema: "METODOLOGÍAS ALTERNATIVAS PARA EVALUAR LA INTERFEREN-
CIA RÍO-ACUIFERO."
Profesor Guía: BARRA ORTEGA, LEONEL ARTURO

Alumno: VALDES PIZARRO, DANIEL IGNACIO
Fecha: 17-agosto-2006
Tema: "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULOS DOCENTES ASOCIA-
DOS A HIDROGEOLOGIA."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: MUÑOZ TORO, RUBEN MAURICIO
Fecha: 28-septiembre-2006
Tema: "ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE ESCALAMIENTO ESPACIAL DE VARIA-
BLES METEOROLÓGICAS EN CUENCAS NIVO-PLUVIALES UTILIZAN-
DO EL MODELO SACRAMENTO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA"
Profesor Guía: VARGAS MESA, HAYDEE XIMENA

Alumno: STARCK FAJARDO, NICOLAS ANDRES
Fecha: 22-septiembre-2006
Tema: "ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL APROVECHAMIENTO DE AGUAS SUB-
TERRÁNEAS MEDIANTE POZOS DE GRAN DIÁMETRO."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: MENA ROJAS, CARLA ANTONIETA
Fecha: 30-octubre-2006
Tema: "BORO EN AGUAS: EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE Y TÉCNICAS DE ABATIMIENTO."
Profesor Guía: SANCHA FERNANDEZ, ANA MARIA

Alumno: ORREGO SALINAS, RODRIGO ANDRES
Fecha: 27-diciembre-2006
Tema: "APLICACIÓN DEL PROGRAMA RISK BASED CORRECTIVE ACTION (RBCA) PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGO EN SITIOS CONTAMINADOS EN CHILE."
Profesor Guía: ESPINOZA CONTRERAS, CARLOS ALBERTO

Alumno: ROJAS ALCAYAGA, NESTOR ANTONIO
Fecha: 07-diciembre-2006
Tema: "REMOCIÓN BIOLÓGICA DE NUTRIENTES EN SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS"
Profesor Guía: MENA PATRI, MARIA PIA

Alumno: VALLADARES PERALTA, MACARENA DE LOS ANGELES
Fecha: 07-diciembre-2006
Tema: "ESTUDIO DE METODOS ALTERNATIVOS DE LAVADO DE FILTROS GRANULARES."
Profesor Guía: HIDALGO TAPIA, FERNANDO MARCIAL ANICETO

