



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

**ANÁLISIS DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES REALIZADOS
POR EL INSTITUTO NACIONAL DE HIDRAULICA, CHILE, SOBRE
SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

RODERICK VICTOR MORALES RODRIGUEZ

PROFESOR GUIA:
ENRIQUE KALISKI KRIGUER

MIEMBROS DE LA COMISION:
YARKO NIÑO CAMPOS
ALEJANDRO LOPEZ ALVARADO

SANTIAGO DE CHILE
2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
CIVIL.**

POR: RODERICK MORALES R

FECHA: 07/06/2016

PROF. GUÍA: Sr. ENRIQUE KALISKI K.

**ANÁLISIS DE ESTUDIOS EXPERIMENTALES REALIZADOS POR EL
INSTITUTO NACIONAL DE HIDRAULICA, CHILE, SOBRE SUMIDEROS DE AGUAS
LLUVIAS**

En esta memoria se presenta un análisis del comportamiento hidráulico de siete sumideros de aguas lluvias, basados en las experiencias realizadas por el Instituto Nacional de Hidráulica entre los años 2004 y 2006, en una plataforma de ensayo en escala 1:1. Para esta memoria se estudiaron 5 sumideros de reja, un sumidero de reja fuera de la calzada y un sumidero de reja en desnivel en relación a la calzada.

El objetivo principal es analizar los datos experimentales obtenidos y compararlos con los resultados entregados por diferentes modelos teóricos. Con lo anterior, se obtuvo rangos de validez de los modelos además de proponer una nueva formulación para determinar la eficiencia de captación. Para llevar a cabo lo anterior, se analizaron 6 modelos teóricos existentes en la literatura que permitieron determinar la eficiencia de captación y se compararon con los resultados experimentales. Junto con lo anterior, se realizó un análisis dimensional del fenómeno que busca determinar una relación entre la eficiencia de captación y las demás variables que definen el fenómeno.

Finalmente, se pudo concluir qué modelos se adaptan mejor a cada sumidero estudiado, además de determinar los rangos en los cuales son válidos los resultados, encontrándose que el modelo recomendado en la “Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU)”, es el que entrega los mejores resultados. Además, del análisis dimensional, se propone una nueva relación de tipo potencial de la eficiencia de captación en función del cociente entre la altura de escurrimiento y el ancho del sumidero.

Tabla de Contenido

Capítulo 1	1
Antecedentes Generales.....	1
1.1 Introducción y Motivación.....	1
1.2 Objetivos y Alcances	3
1.3 Organización del informe	3
Capítulo 2	5
Definiciones y Descripción de Elementos Experimentales.....	5
2.1 Conceptos Generales.....	5
2.1.1 Generalidades.....	5
2.1.2 Sumideros de Solera	7
2.1.3 Sumidero con Rejilla	7
2.1.4 Sumideros Combinados	8
2.1.5 Sumideros Múltiples	8
2.2 Características de la Plataforma de Ensayos.....	8
2.3 Características de los Sumideros Estudiados por el INH	10
2.4 Descripción del Fenómeno Hidráulico en la Plataforma	13
Capítulo 3	14
Revisión Bibliográfica.....	14
3.1 Dimensionamiento de Sumideros de Soleras.....	14
3.1.1 Método de la Universidad Johns Hopkins	14
3.1.2 Municipal Stormwater Management (1992).....	17
3.1.3 Street Hydraulics and Inlet. Water Resources Publications, Guo, J.C.Y. (2001).20	
3.1.4 Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).....	21
3.2 Dimensionamiento de Sumidero de rejillas y Combinados.....	21
3.2.1 Método de la Universidad Johns Hopkins	21
3.2.2 Street Hydraulics and Inlet. Water Resources Publications, Guo, J.C.Y. (2001).25	
3.2.3 United States Corps of Engineers	27
3.2.4 Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).....	29
3.3 Modelos de Ajuste de la Eficiencia de Captación para Sumideros de Reja	30
3.3.1 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación	30

3.3.2	Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación	31
3.4	Curvas de Eficiencia de Captación Sumideros SERVIU.....	32
3.5	Caudal captado por un vertedero lateral	34
3.6	Cálculo del Coeficiente de Desagüe de las Rejas	35
3.7	Conclusiones de la Revisión Bibliográfica	35
Capítulo 4	.....	37
Análisis de Modelos Teóricos	.....	37
4.1	Ajuste Potencial del Comportamiento de Sumideros con Rejillas	38
4.1.1	Sumidero N°1	39
4.1.2	Sumidero N°2	42
4.1.3	Sumidero N°3	45
4.1.4	Sumidero N°4	48
4.1.5	Sumidero N°5.....	51
4.2	Ajuste Parabólico-Hiperbólico del Comportamiento de sumideros con Rejillas	54
4.2.1	Sumidero N°1	55
4.2.2	Sumidero N°2	57
4.2.3	Sumidero N°3	59
4.2.4	Sumidero N°4	61
4.2.5	Sumidero N°5	63
4.3	Método de la Universidad Johns Hopkins	65
4.3.1	Sumidero N°1	65
4.3.2	Sumidero N°2	68
4.3.3	Sumidero N°3	71
4.3.4	Sumidero N°4	74
4.3.5	Sumidero N°5	77
4.4	Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).....	81
4.4.1	Sumidero N°1	81
4.4.2	Sumidero N°2	84
4.4.3	Sumidero N°3.....	88
4.4.4	Sumidero N°4.....	90
4.4.5	Sumidero N°5	94
4.5	Análisis de Sumideros con Depresión (Rejas de Sumidero N°1).....	97
4.5.1	Sumidero con depresión $\Delta= 3$ cm.....	99
4.5.2	Sumidero con depresión $\Delta= 5$ cm.....	101
4.6	Sumideros fuera de la calzada (Vertedero lateral con reja Sumidero N°1)....	103

4.6.1	Sumidero Lateral $L_v=2.4$ [m]	103
4.6.2	Sumidero Lateral $L_v=3.2$ [m]	104
4.7	Coefficiente de Desagüe de las Rejas (C_d)	105
4.8	Curvas Características de Sumideros con Rejas	107
4.9	Análisis Dimensional del Fenómeno Sumideros con Rejas	111
4.9.1	Sumidero N°1	114
4.9.2	Sumidero N°2	117
4.9.3	Sumidero N°3	119
4.9.4	Sumidero N°4	122
4.9.5	Sumidero N°5	125
4.9.6	Sumidero con Depresión.....	128
4.9.6.1	Sumidero con Depresión en la calle $\Delta=3$ cm.....	128
4.9.6.2	Sumidero con Depresión en la calle $\Delta=5$ cm.....	131
Capítulo 5	.....	135
Resumen de Resultados	.....	135
5.1	Ajuste Potencial del Comportamiento de las Rejas	135
5.2	Ajuste Parabólico – Hiperbólico del Comportamiento de las Rejas.....	137
5.3	Análisis del Método propuesto por la Universidad John Hopkins	140
5.4	Análisis del Método recomendado por SERVIU.....	142
5.5	Cálculo del Coeficiente de Desagüe de la Reja.	144
5.6	Análisis de Sumideros con Depresión (Rejas de Sumidero N°1).....	145
5.7	Sumideros fuera de la calzada (Vertedero lateral con Reja Sumidero N°1)...	146
5.8	Curvas Características de Sumideros con Rejas	148
5.9	Análisis Dimensional del Fenómeno Sumideros con Rejas	151
Capítulo 6	.....	156
Conclusiones y Recomendaciones	.....	156
6.1	Conclusiones Generales	156
6.2	Resultados Obtenidos	157
6.3	Análisis Dimensional	158
6.4	Recomendaciones	159
Capítulo 7	.....	160
Bibliografía	.....	160
Anexo I	.....	162

Capítulo 1

Antecedentes Generales

1.1 Introducción y Motivación

El Instituto Nacional de Hidráulica – Chile (INH), cuenta con un Banco de Pruebas para experimentación de sumideros de aguas lluvias. Este consiste en una instalación de tipo permanente que comprende básicamente un circuito hidráulico y una plataforma que representa una calle en escala real (1:1). En esta plataforma, es posible modificar tanto la pendiente longitudinal (hasta 10%) y transversal (hasta 5%). Con lo anterior, es posible probar el comportamiento hidráulico de un determinado sumidero de aguas lluvias para diferentes caudales en la calle (INH, 2004).

Debido a los numerosos cambios que ha experimentado este tipo de obras y sus correspondientes características de diseño, se estimó aconsejable abordar un estudio actualizado en esta materia, que posibilite a los proyectistas lograr soluciones más seguras y optimizar los diseños. A lo anterior se agrega que en Chile en los últimos años se ha verificado que en muchos casos, uno de los problemas de aguas lluvias habituales resulta ser la falta de capacidad de captación o mal funcionamiento de los sumideros (INH, 2004).

En efecto, durante el desarrollo de los Planes Maestros de Aguas Lluvias, redes primarias y redes secundarias, construcción de colectores y 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 agua de los sumideros actuales (INH, 2004).

Por lo anterior, resulta necesario realizar un análisis detallado de cada una de las experiencias realizadas por el INH de manera de optimizar el funcionamiento de los sumideros y asegurar su funcionalidad como obra de captación.

Referente a los datos requeridos por los modelos de aguas lluvias tales como es SWMM-EPA, Watercad o MOUSE, de manera de obtener el caudal que es capaz de captar un cierto sumidero, el caudal que escurre en la calle es sin duda el dato hidrológico más importante y junto

con las pendientes de las calles, son los únicos antecedentes que conocemos al momento de diseñar los sumideros. Este parámetro, puede ser estimado mediante una gran gama de modelos hidrológicos que relacionan la precipitación con la escorrentía superficial, lo que permite asegurar un grado de validez considerable. Sin embargo para cada uno de los modelos revisados y desde un punto de vista hidráulico, la altura de escurrimiento es el parámetro más significativo y relevante.

Frente a esto es importante destacar que la altura de escurrimiento en la calle, inmediatamente antes del sumidero, no es un parámetro conocido al momento de diseñar, por lo cual se vuelve necesario realizar estimaciones de las alturas. Para esto la literatura técnica ofrece una gran gama de fórmulas matemáticas que permiten estimar la altura de escurrimiento en base a datos como: el caudal que escurre, pendientes de las calles, rugosidad, ancho del escurrimiento, etc. Lo anterior trae como consecuencia plantear una variedad de hipótesis y supuestos que idealizan el escurrimiento en la calle, lo que a la larga no refleja la realidad del fenómeno, lo que conlleva a estimar erróneamente la capacidad real de los sumideros.

Por lo tanto, el problema que aborda la presente memoria es verificar los rangos de validez de los modelos utilizados actualmente para el diseño de sumideros de aguas lluvias.

Para el desarrollo en la solución, en esta memoria se realiza un análisis detallado de los modelos teóricos aplicados actualmente para el diseño de sumideros de aguas lluvias, basados en los datos experimentales obtenidos por el INH, de esta forma se obtiene un rango de validez de los resultados que entregan y el error que se comete al utilizar cada uno de estos métodos de estimación de las capacidades de los sumideros.

Este rango de validez permite escoger el que más se adecue al tipo de sumidero y a las condiciones de pendiente y caudal en la calle. Con lo anterior, finalmente se logra una mejora al momento de diseñar estas obras, lo que se traduce en que al momento de ser instalados cumplan la función de captar el agua lluvia hacia los colectores.

1.2 Objetivos y Alcances

El objetivo principal es realizar un análisis y síntesis de la información experimental efectuada por el INH, entre los años 2004 y 2006, a diferentes tipos de sumideros y su comparación con diferentes métodos teóricos de cálculo, estableciendo en cada caso los límites de validez y precisión.. Los objetivos específicos de este trabajo comprenden los siguientes aspectos:

- Determinar qué condiciones de funcionamiento hidráulico de los sumideros se puede modelar mejor con los métodos de cálculo teórico.
- Estudiar la posibilidad de proponer una nueva formulación analítica para determinar el caudal captado, basado en la información experimental y los análisis realizados.
- Obtener rangos de validez de cada una de las formulaciones analíticas analizadas y bajo qué condiciones son capaces de representar de mejor manera el funcionamiento real que tendrán los sumideros.

1.3 Organización del informe

En el Capítulo 1 “Antecedentes Generales”, se detalla un pequeño resumen de lo realizado y se presenta la motivación para llevar a cabo esta memoria y los objetivos principales de ella.

En el Capítulo 2 “Definiciones y Descripción de Elementos Experimentales”, se definen conceptos referentes a la clasificación de cada de sumidero según su tipo o según su ubicación en la solera. También se hace mención a las características de la plataforma donde fueron llevados a cabo los experimentos y se entregan las características geométricas de cada uno de los sumideros estudiados.

En el Capítulo 3 “Análisis Bibliográfico”, se muestra en detalle los diferentes modelos teóricos presentes en la literatura técnica y que son atingentes a este tipo de estudios.

En el Capítulo 4 “Análisis de Modelos Teóricos”, se muestra en detalle los resultados obtenidos al analizar cada uno de los sumideros mediante diferentes modelos teóricos presentes en la literatura técnica, como además una análisis dimensional del fenómeno.

En el Capítulo 5 “Resumen de Resultados”, se detallan las principales resultados obtenidas del análisis hecho en el Capítulo 4, como además una serie de comentarios referente a cada uno de los modelos utilizados y en qué casos es conveniente su uso en el diseño de sumideros.

En el Capítulo 6 “Conclusiones y Recomendaciones”, se detallan las principales conclusiones obtenidas del análisis efectuado.

Capítulo 2

Definiciones y Descripción de Elementos Experimentales

2.1 Conceptos Generales

2.1.1 Generalidades

Los sumideros son dispositivos especiales que tienen por finalidad captar las aguas lluvias que escurren por cunetas, para conducirlos a colectores o tuberías subterráneas. Básicamente pueden ser clasificados en cuatro tipos, según se ilustra en la Figura 2.1:

- Sumidero de Solera.
- Sumidero de Rejilla.
- Sumidero Combinado.
- Sumidero Múltiple.

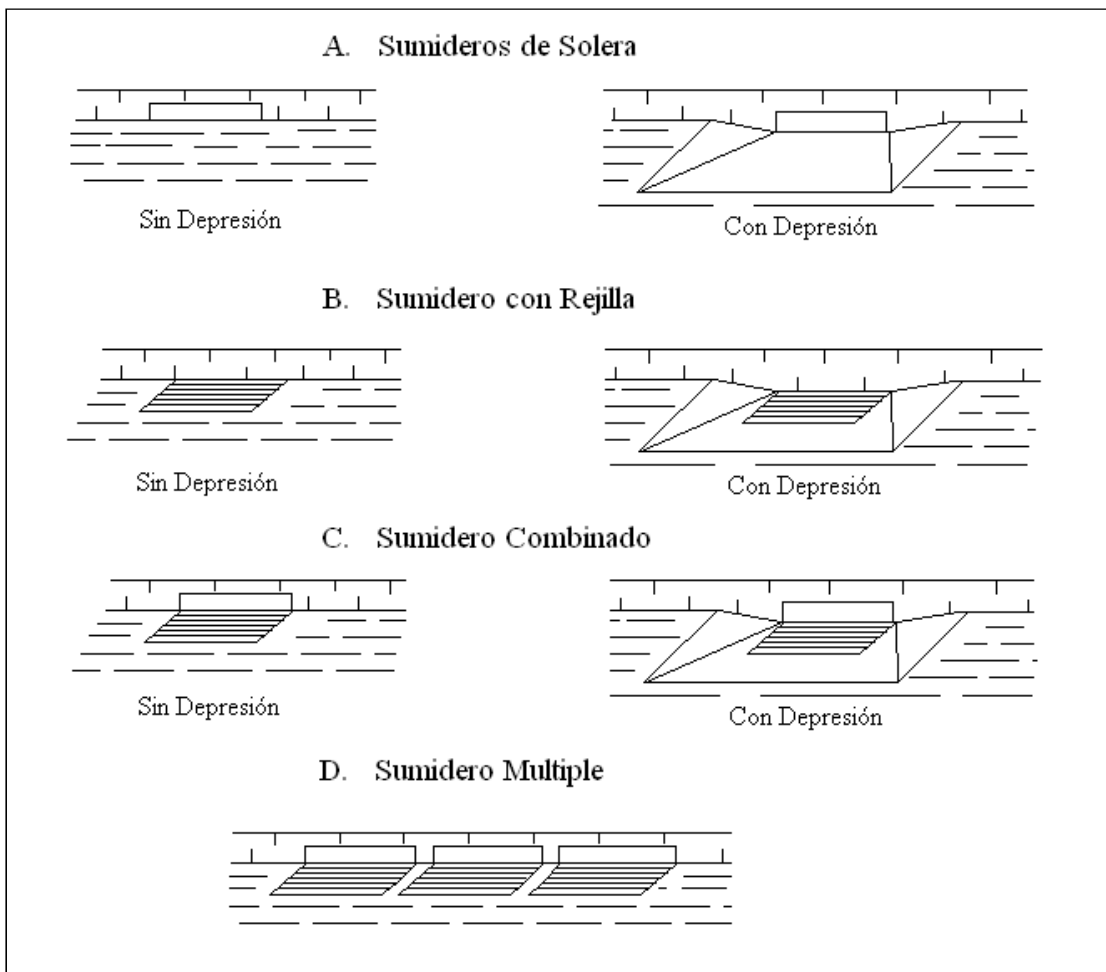


Figura 2.1 Principales tipos de sumideros.
 (Fuente: *Hydraulic Engineering Circular No. 22, Third Edition*)

También pueden ser clasificados según su ubicación:

- Sumideros situados en puntos intermedios de las cunetas.
- Sumideros situados en puntos bajos de las cunetas.

En el primer caso, el sumidero se ubica en tramos continuos y de pendiente constante de la cuneta. La entrada de aguas lluvias es por una de las extremidades del sumidero. En el segundo caso, el sumidero se localiza en puntos bajos de las cunetas; en cambios de pendiente de la vía (de negativa a positiva), o junto a la curvatura de las soleras; en cruzamientos de vías. La entrada de aguas lluvias es por las dos extremidades del sumidero (Muñoz, 1986).

2.1.2 Sumideros de Solera

Usualmente, utilizados en proyectos de drenaje urbano, especialmente, en los puntos bajos de las cunetas; está constituido por una abertura vertical en la solera, la cual permite la entrada de aguas lluvias que escurre sobre la cuneta.

La capacidad de captación depende principalmente de la altura de escurrimiento en la abertura en la solera y como cambie de dirección el flujo hacia la solera. Por lo anterior, aumentando la pendiente transversal, por ejemplo mediante una depresión en la cuneta junto a la cara de la solera, la capacidad de captación del sumidero será aumentada.

La principal ventaja de los sumideros de solera es que las obstrucciones por residuos sólidos son menos frecuentes por tener aberturas mayores comparadas con las de otro tipo de sumideros. La desventaja principal es la baja eficiencia cuando son usados en cunetas con pendientes longitudinales acentuadas (Muñoz, 1986).

2.1.3 Sumidero con Rejilla

Es un tipo de sumidero que posee una abertura cubierta con barras metálicas ya sean longitudinales, transversales, diagonales o una combinación de las anteriores; las cuales forman una rejilla. La principal desventaja de las rejillas es la posibilidad que estas se obstruyan con residuos sólidos transportados por el escurrimiento, produciendo una reducción sustancial en la capacidad de captación de las mismas, tornándose en algunos casos completamente inútiles. Cuando se trata de rejillas en puntos bajos de las cunetas, la probabilidad de obstrucción aumenta.

Para aumentar la capacidad de las rejillas pueden construirse con depresión, pero en muchas ocasiones, esta solución no es recomendable por los problemas que causan en el tráfico vehicular (Muñoz, 1986).

2.1.4 Sumideros Combinados

Se trata de una asociación entre sumidero de solera y de rejilla, y que funciona como un conjunto único. Puede construirse con o sin depresión y puede localizarse tanto en puntos intermedios de las cunetas como en puntos bajos. Normalmente, la reja es instalada frente a la abertura de la solera, pero también puede ser colocada aguas arriba o aguas abajo de la abertura. Ensayos de laboratorio, revelaron que el sumidero combinado, sin obstrucción de la rejilla, la abertura de la solera poco influye en su capacidad (Muñoz, 1986).

2.1.5 Sumideros Múltiples

Se trata de varios sumideros, instalados en serie, funcionando como un conjunto único. Cualquiera de los tipos ya mencionados puede ser usado, y todas las particularidades discutidas para cada tipo son válidas para los sumideros múltiples (Muñoz, 1986).

2.2 Características de la Plataforma de Ensayos

El Instituto Nacional de Hidráulica – Chile (INH), cuenta con un Banco de Pruebas para experimentación de sumideros de aguas lluvias. Éste consiste en 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 de modificar su pendiente longitudinal (hasta 10%) y transversal (hasta 5%). La plataforma tiene una longitud de 14 [m] y un ancho de 3.5 [m] (INH, 2004).

En este circuito es posible medir las pendientes, tanto longitudinal como transversal, los caudales de entrada y salida del sistema como además las alturas de escurrimiento en diferentes puntos de la plataforma.

Los caudales son medidos mediante vertederos triangulares que se ubican a la entrada y salida del sistema. Por lo anterior, es posible determinar el caudal captado como la diferencia entre el flujo de entrada y salida.

Las pendientes en la plataforma son medidas mediante el control de cotas en cuatro vértices (V1 a V4) ubicados en los extremos de la plataforma. De manera similar se realizaron mediciones de las alturas de escurrimiento en siete diferentes puntos en la plataforma.

De esta forma, es posible probar el comportamiento hidráulico de un determinado sumidero de aguas lluvias en dicha plataforma, para diferentes caudales en la calle, así como para diferentes valores de pendientes. En la Figura 2.2 se ilustra una vista general de la plataforma de ensayo.



Figura 2.2 Vista General de la Plataforma de Experimentación
(Fuente: Kaliski, E., Cortéz, R. (2004))

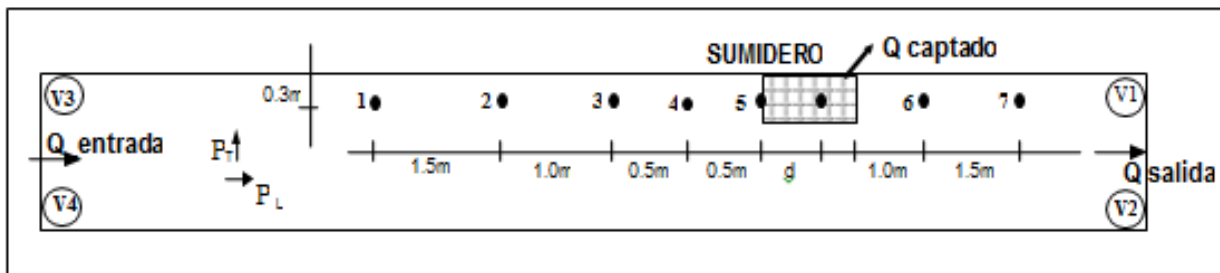


Figura 2.3 Disposición en Planta de Puntos Característicos de Mediciones en la Plataforma Sumideros 1 al 5. (Fuente: Kaliski, E., Cortéz, R. (2005))

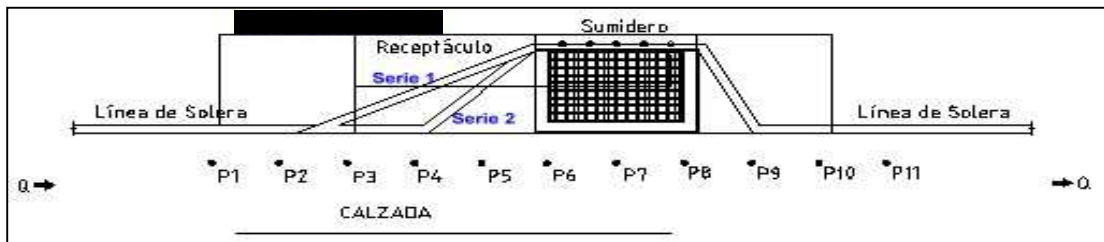


Figura 2.4 Disposición en Planta de Puntos Característicos de Mediciones en la Plataforma Sumideros en Vereda. (Fuente: Kaliski, E., Cortéz, R. (2006)).

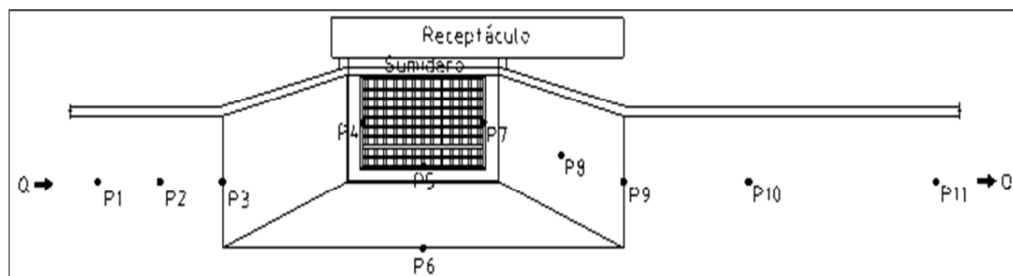


Figura 2.5 Disposición en Planta de Puntos Característicos de Mediciones en la Plataforma Sumideros con área de influencia. (Fuente: Kaliski, E., Cortéz, R. (2008))

2.3 Características de los Sumideros Estudiados por el INH

Para esta memoria, se utilizó la información correspondiente a un total de siete sumideros, cuyas principales características se indican en los cuadros 2.3-1 y 2.3-2. Los sumideros 1 a 4 están conformados por rejas de acero longitudinales y barras transversales. En cambio, la reja del sumidero 5 es de acero macizo. Para las experiencias realizadas en los sumideros seis y siete, la reja utilizada corresponde a un sumidero tipo 1.

Tabla 2.1 Principales características de los sumideros estudiados por el I.N.H.
 (Fuente: Kaliski, E., Cortéz, R. (2005))



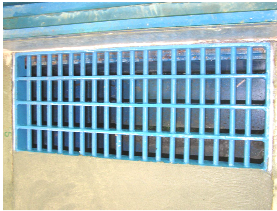

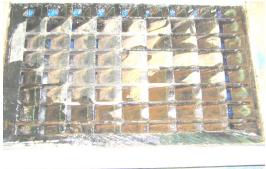


Nº	Fotografía	Ancho [m]	Largo [m]	Perímetro Útil [m]	Área Útil [m ²]	Proveedor	Obs.
1		0.7	1.0	2.4	0.524	DOH	Con ventana lateral
2		0.7	2.0	3.4	1.048	DOH	2 sumideros tipo 1
3		0.4	1.0	1.8	0.32	SERVIU	
4		0.5	1.4	2.4	0.448	I. Municipalidad de Las Condes	
5		0.8	1.0	2.6	0.33	DOH	Acero macizo

Tabla 2.2 Principales características de los sumideros estudiados por el INH

Nº	Fotografía	Ancho [m]	Largo [m]	Perímetro Útil [m]	Área Útil [m ²]	Proveedor	Obs.
6		0.7	1.0	2.4	0.524	DOH	Sumidero en Vereda con ventana lateral
7		0.7	1.0	2.4	0.524	DOH	Sumidero con área de influencia

2.4 Descripción del Fenómeno Hidráulico en la Plataforma

El escurrimiento aguas arriba del sumidero, corresponde a un torrente de baja altura, turbulento, tridimensional en régimen permanente y rápidamente variado a lo largo de la plataforma de ensayo.

Por lo anterior, es necesario realizar supuestos respecto del flujo, de manera que sean válidos los modelos de cálculo de captación de los sumideros de aguas lluvias.

Se aceptará la hipótesis que se trata de un flujo unidimensional, en régimen permanente y uniforme, donde la cuneta se verá como un canal de sección triangular con una pendiente transversal S_x .

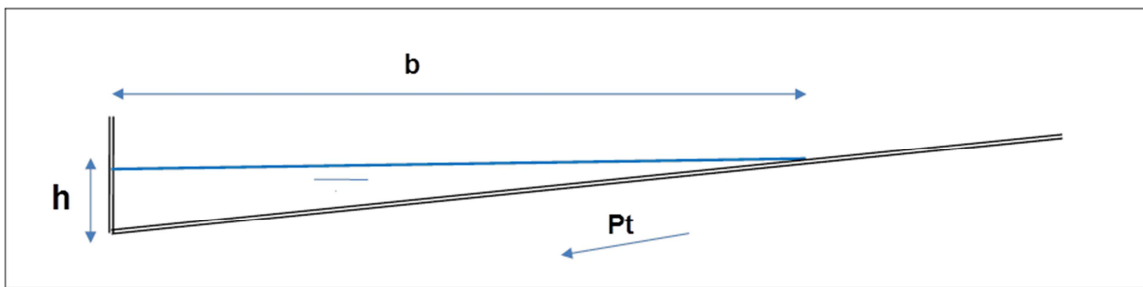


Figura 2.6 Esquema supuesto de flujo en la plataforma.

Capítulo 3

Revisión Bibliográfica

A continuación se detallan diversos métodos de cálculo recopilados de la literatura técnica actual, los cuales permiten estimar la eficiencia de captación de los sumideros.

3.1 Dimensionamiento de Sumideros de Soleras

Este sumidero puede funcionar básicamente de dos formas:

- Ecurrimiento Libre, en el cual el sumidero funciona como vertedero.
- Ecurrimiento ahogado, en el cual el sumidero funciona como orificio.

3.1.1 Método de la Universidad Johns Hopkins

Este método se basa en The Design of Stormwater inlets, Report of the Storm Drainage Community, de Johns Hopkins University (1956). La Figura 3.1 muestra esquemáticamente, las características de un sumidero de solera con cuneta en depresión, e instalada en trechos intermedios.

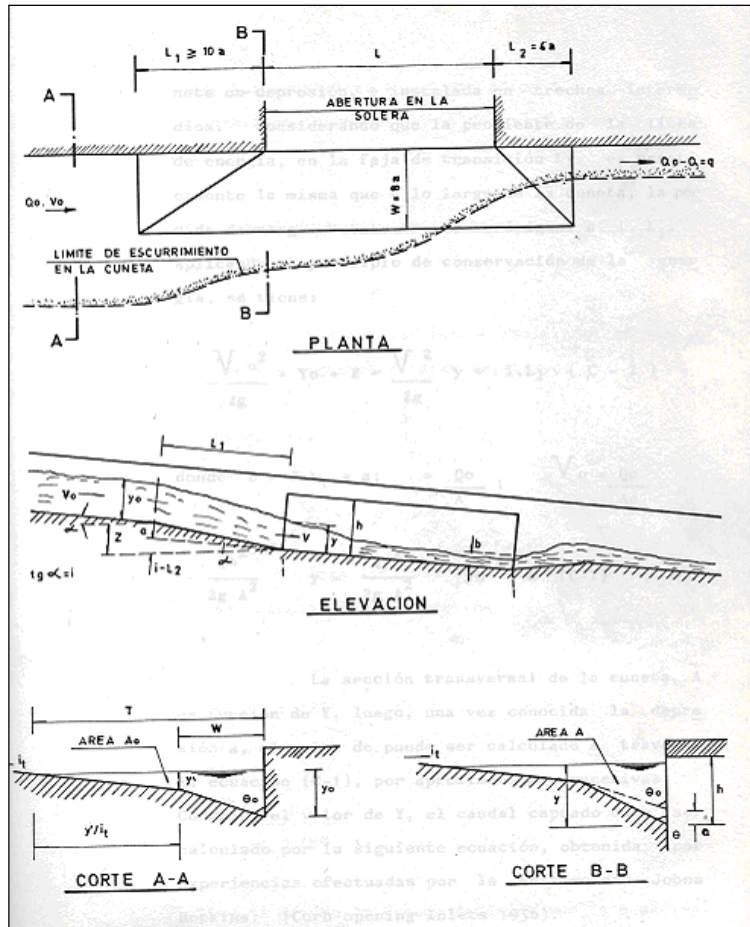


Figura 3.1 Sumidero de Solera en Puntos Intermedios de las Cunetas.
 (Fuente: Muñoz, P. (1986))

Considerando que la pendiente de la línea de energía, en la faja de transición L_1 , es prácticamente la misma que a lo largo de la cuneta, la pérdida de carga en este trecho será igual a $i \cdot L_1$. Aplicando el principio de conservación de la energía se tiene:

$$\frac{v_0^2}{2g} + Y_0 + z = \frac{v^2}{2g} + y + i \cdot L_1 \quad (3.1)$$

donde;

- $z = i \cdot L_1 + a$
- $v_0 = \frac{Q_0}{A}$

$$\frac{Q_0^2}{2gA^2} + y = \frac{Q_0^2}{2gA_0^2} + Y_0 + a \quad (3.2)$$

La sección transversal de la cuneta A es función de y, luego, una vez conocida la depresión a, el valor de y puede ser calculado a través de la ecuación 3.2, por aproximaciones sucesivas.

Conocido el valor de y, el caudal captado debe ser calculado con la ecuación obtenida por experiencias efectuadas por la Universidad Johns Hopkins:

$$\frac{Q}{L} = (k + C) \cdot y \cdot \sqrt{g \cdot y} \quad (3.3)$$

donde C y k son constantes adimensionales determinadas experimentalmente. En caso de soleras simples con depresión, el valor de $k=0,23$ y C se determina mediante la expresión:

$$C = \frac{0,45}{1,12^{xFrd^2}} \quad (3.4)$$

en qué:

$$X = \frac{L}{a} S_x \quad (3.5)$$

donde;

Frd: Corresponde al número de Froude.

L: Longitud de la abertura [m].

a: Abertura de la cuneta [m].

Sx: Pendiente transversal en la calle.

En el caso en que no exista depresión la solución es más simple puesto que $C=0$, $y=Y_0$, con lo cual la ecuación queda:

$$\frac{Q}{L} = k \cdot Y_0 \cdot \sqrt{g \cdot Y_0} \quad (3.6)$$

3.1.2 Municipal Stormwater Management (1992).

Según lo publicado en el texto “Municipal Stormwater Management”, la longitud mínima requerida para un sumidero de solera de manera de interceptar la totalidad del flujo que escurre por la cuneta, se determina gráficamente mediante la Figura 3.2 La eficiencia para un sumidero de una longitud menor a la requerida para una interceptación del 100% se determina utilizando la Figura 3.3.

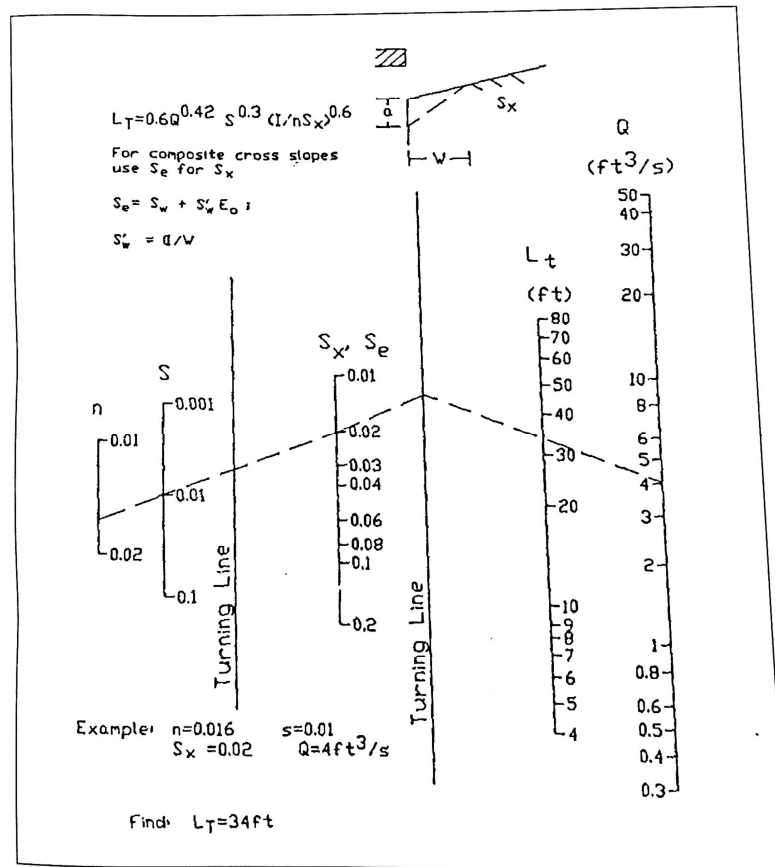


Figura 3.2 Longitud de Sumideros de Solera para una Intercepción Total del Flujo (Fuente: Thomas, N., Reese, A. (1992)).

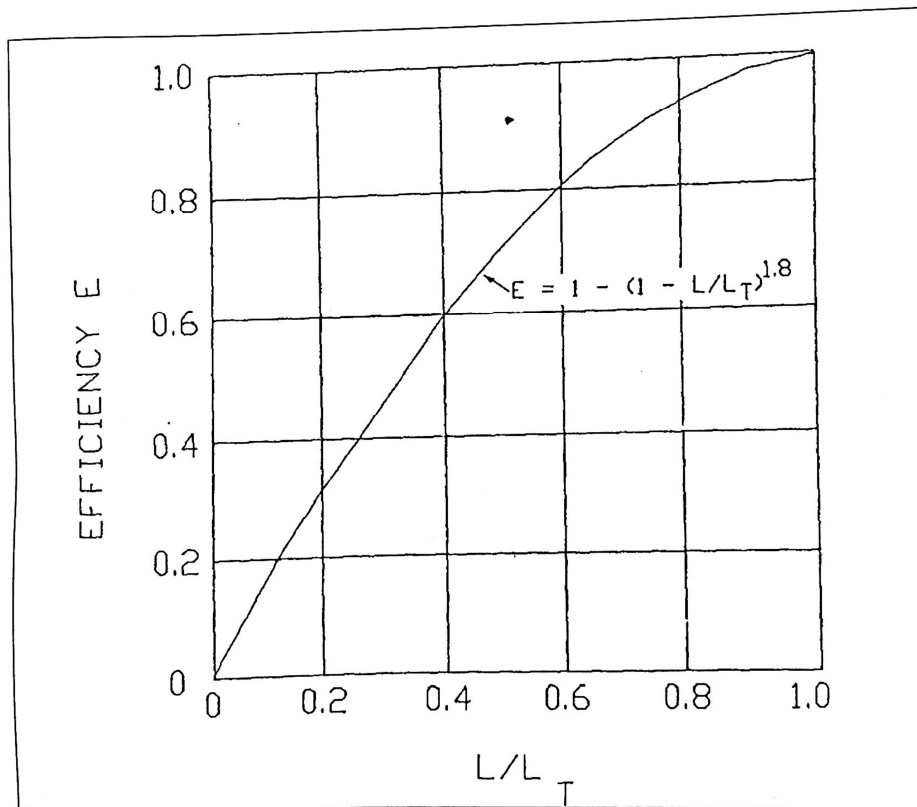


Figura 3.3 Eficiencia de Sumidero de Solera
(Fuente: Thomas, N., Reese, A. (1992)).

Para el caso particular que exista una depresión local o una depresión continua a lo largo de la cuneta, se requiere estimar un valor equivalente para la pendiente transversal:

$$S_e = S_x + S'_w E_o \quad (3.7)$$

donde;

S'_w : Pendiente transversal en el sumidero medida desde la pendiente transversal del pavimento,

S_x [m/m].

E_o : Fracción del flujo frontal, del total del flujo en la cuneta aguas arriba del sumidero.

$$E_o = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67} \quad (3.8)$$

donde;

W: Ancho de la depresión en la cuneta [m].

T: Ancho total del flujo en la calle [m].

Los pasos a seguir para utilizar las Figuras 3.2 y 3.3 en el diseño de sumideros de solera se detallan a continuación:

1. Determinar los siguientes parámetros de entrada:
 - a. Pendiente Transversal de la calle: S_x [m/m].
 - b. Caudal total en la calle; Q [cfs].
 - c. Ancho total del escurrimiento: T [ft].
 - d. Pendiente Longitudinal en la calle: S [m/m].
 - e. Coeficiente de Manning: n .
2. Entre a la Figura 3.2, utilizando las dos líneas verticales del lado izquierdo. Localice el valor del coeficiente de Manning y la pendiente longitudinal, luego dibuje una línea conectando los puntos en cuestión. Extienda esta línea hasta la primera línea marcada como Turning Line.
3. Localice el valor de la pendiente transversal (o su valor equivalente S_e), dibuje una línea desde el punto marcado en la primera Turning Line y el valor de la pendiente transversal. Extienda esta línea hasta la segunda línea marcada como Turning Line.
4. Utilizando la última línea vertical del costado derecho de la Figura 3.2, marque el valor del caudal total en la calle, dibuje una línea desde el punto marcado en la segunda línea Turning Line y el valor del caudal en la calle. Lea la longitud requerida en la línea vertical marcada como L_T .
5. Si la longitud del sumidero es menor a la obtenida en el paso 4, utilice la Figura 3.2, donde se obtiene el valor de la eficiencia de captación directamente conocida la longitud real del sumidero y el valor L_T .

3.1.3 Street Hydraulics and Inlet. Water Resources Publications, Guo, J.C.Y. (2001).

Según esta publicación, la longitud mínima de metros requerida para un sumidero de solera que permite interceptar la totalidad del flujo que escurre por la cuneta, puede ser determinada por la siguiente fórmula empírica:

$$L_T = 0,817 \cdot Q^{0,42} \cdot S_y^{0,3} \cdot \left(\frac{1}{n \cdot S_x} \right)^{0,6} \quad (3.9)$$

donde;

Q: Caudal total que escurre en la cuneta [m³/s]

S_y: Pendiente longitudinal en la calle [m/m].

S_x: Pendiente transversal en la calle [m/m].

n: Coeficiente de Rugosidad de Manning.

Para el caso particular que exista una depresión local o una depresión continua a lo largo de la cuneta, se requiere estimar un valor equivalente para la pendiente transversal. Estos valores se estiman utilizando las ecuaciones 3.7 y 3.8.

La eficiencia de captación E, para un sumidero de solera con una longitud L_C, menor a la longitud L_T, puede ser aproximadamente a la expresión:

$$E = 1 - \left(1 - \frac{L_C}{L_T} \right)^{1,8} \quad (3.10)$$

3.1.4 Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).

Otra forma de realizar las estimaciones de los caudales captados por sumideros de solera es el que recomienda el “Instructivo para la Revisión de Proyectos de Urbanización”, por parte del SERVIU Metropolitano desarrollado por académicos de la Universidad Católica.

Un sumidero lateral de largo L (a lo largo de la cuneta, en metros), y altura de abertura a (vertical, en metros), puede evacuar como máximo:

$$Q = 1,27 \cdot L \cdot Y^{1,5} \quad - \text{ si funciona como vertedero: } h < a \quad (3.11)$$

$$Q = 2,66 \cdot L \cdot a \cdot Y^{0,5} \quad - \text{ si funciona como orificio: } h \geq a \quad (3.12)$$

donde Y es altura de agua del escurrimiento en la calle frente al sumidero, medida en metros.

3.2 Dimensionamiento de Sumidero de rejillas y Combinados

Los criterios de dimensionamiento que se presentan, se basan en la hipótesis de que las rejillas están perfectamente limpias, exentas de cualquier obstrucción y que operan con máxima eficiencia.

3.2.1 Método de la Universidad Johns Hopkins

Este método se basa en el estudio de la universidad Johns Hopkins, que estudia el comportamiento de sumideros de rejillas. La Figura 3.4, muestra un esquema general de sumidero de rejilla con depresión.

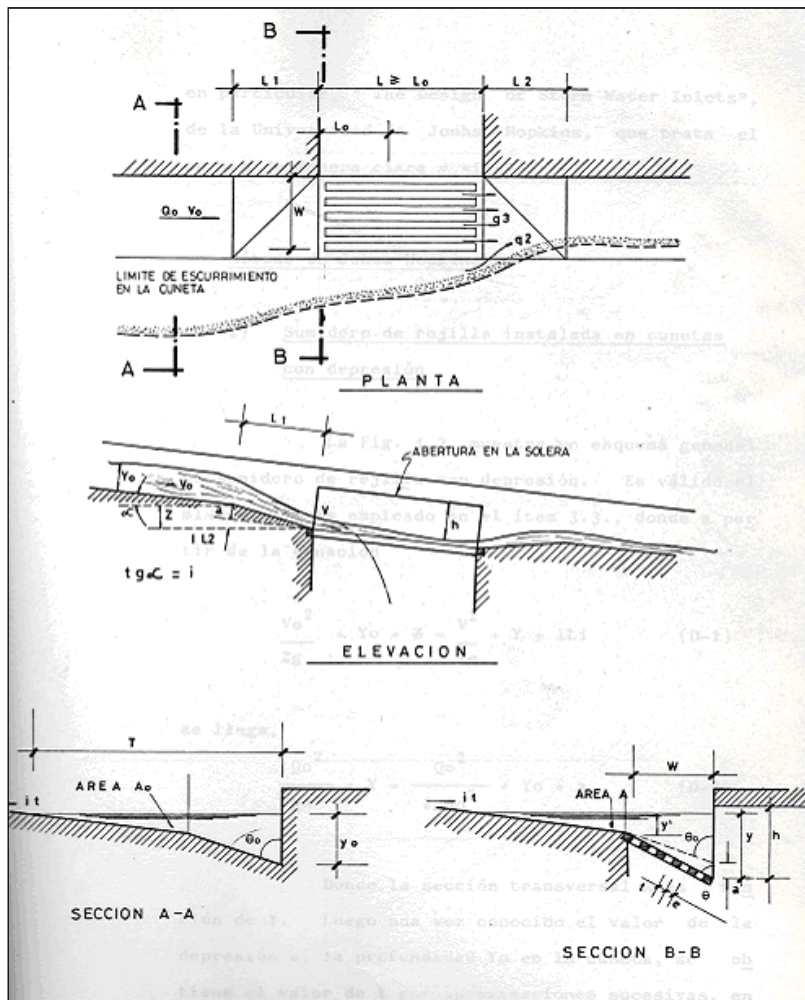


Figura 3.4 Sumidero Combinados en Puntos Intermedios de las Cunetas.
 (Fuente: Muñoz, P. (1986)).

Para que toda el agua sea captada longitudinalmente y lateralmente como se muestra en la Figura 3.5, la rejilla deberá poseer una longitud mínima L' , la cual se determina como:

$$L' = 1.2 \cdot v \cdot \operatorname{tg}(\theta') \cdot \sqrt{\frac{Y'}{g}} \quad (3.13)$$

donde;

$$Y' = Y - \frac{w}{\operatorname{tg}(\theta)} \quad (3.14)$$

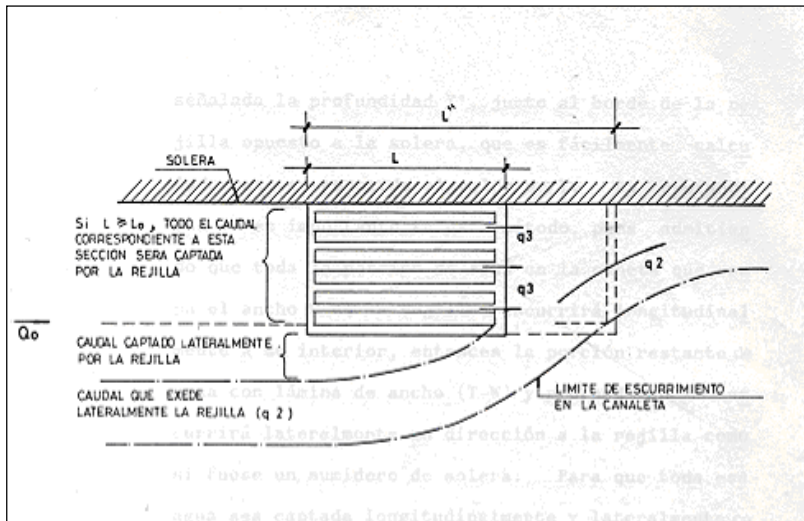


Figura 3.5 Rejillas con indicadores de los límites de Escurrimiento.
(Fuente: Muñoz, P. (1986)).

Si se adoptara un valor de $L < L'$, existirá un caudal excedente que no será captada por la rejilla:

$$q_2 = 0.25 \cdot (L' - L) \cdot \sqrt{g} \cdot Y^{1.5} \quad (3.15)$$

Por otro lado, el largo de la rejilla debe ser mayor que L_0 de manera que todo el escurrimiento longitudinal en la cuneta dentro de la faja W de la rejilla sea captado. Si $L < L_0$ las aguas lluvias no captadas traspasarán la rejilla.

$$L_0 = m \cdot v \cdot \sqrt{\frac{Y}{g}} \quad (3.16)$$

El valor de m de manera experimental y se encuentra tabulado para diversos tipos de sumideros.

Tabla 3.1 Valores de coeficiente m de los sumideros de rejillas
(Fuente: Johns Hopkins University (1956))

Sumidero Combinado	Valor de m
Rejilla con algunas barras transversales	3.3
Rejilla con diversas barras transversales	6.6
Sumidero de rejilla	Valor de m
Rejilla con algunas barras transversales	4.0
Rejilla con diversas barras transversales	8.0

Si el valor de $L < L_0$, existirá un caudal que excede la rejilla, el cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_3 = Q_0 \cdot \left(1 - \frac{L^2}{L_0^2}\right)^2 \quad (3.17)$$

Luego el caudal total que excede la rejilla es:

$$q = q_2 + q_3 \quad (3.18)$$

Finalmente, el caudal captado por la rejilla es:

$$Q = Q_0 - q \quad (3.19)$$

Para el caso que no exista depresión, el cálculo se torna más sencillo dado que conocemos el valor de Y que corresponde al mismo valor de Y_0 . Luego la expresión que determina el largo mínimo de la rejilla para captar lateral y longitudinalmente L' es:

$$L' = 1.2 \cdot v_0 \cdot \operatorname{tg}(\theta') \cdot \sqrt{\frac{Y'}{g}} \quad (3.20)$$

$$Y' = Y_0 - \frac{w}{\operatorname{tg}(\theta_0)} \quad (3.21)$$

Además;

$$L_0 = m \cdot v_0 \cdot \sqrt{\frac{Y_0}{g}} \quad (3.22)$$

Luego utilizando las mismas expresiones anteriores, se determina el valor del caudal captado por la rejilla como;

$$Q_{\text{captado}} = Q_0 - (q_2 + q_3) = Q_0 - q \quad (3.23)$$

3.2.2 Street Hydraulics and Inlet. Water Resources Publications, Guo, J.C.Y. (2001).

Según esta publicación, la eficiencia de captación de los sumideros de reja depende de la capacidad de estos de capturar el flujo frontal y lateral que escurre en la cuneta.

Para esto primero se estima la fracción del flujo que es captado frontalmente del total del flujo en la cuneta R_f . Este valor se estima como:

$$R_f = 1 - 0,295 \cdot (V - V_0) \quad (3.24)$$

donde;

V: Velocidad del flujo en la cuneta [m/s].

V_0 : Velocidad splash-over del sumidero [m/s].

La velocidad **splash-over**, corresponde a la mínima velocidad del flujo en la cuneta capaz de inducir momentum a cierta parte del flujo el cual salta sobre la reja y es llevado aguas abajo de la misma. Esta velocidad es función del tipo de reja que conforma el sumidero y la longitud.

Regresiones realizadas por la Hydrologic Engineering Center (Apéndice-A del Manual de la HEC-22), basadas en datos de laboratorio con diferentes tipos de rejas, resultan en la siguiente fórmula empírica que permite estimar el valor de la velocidad de splash-over:

$$V_0 = p + q \cdot L - r \cdot L^2 + s \cdot L^3 \quad (3.25)$$

donde L corresponde la longitud de la reja [ft].

La Tabla 3.2, muestra los valores de los parámetros estimados experimentalmente para los diferentes tipos de rejas.

Tabla 3.2 Coeficientes Empíricos para Varios Tipos de Rejas.
(Fuente: Guo, J.C.Y. (2001))

Tipo de Reja	p	q	R	s
Bar P-1-7/8	2,22	4,03	0,65	0,06
Bar P-1-1/8	1,76	3,12	0,45	0,03
Vane Grande	0,3	4,85	1,31	0,15
45° Bar	0,99	2,64	0,36	0,03
Bar P-1-7/8-4	0,74	2,44	0,27	0,02
30° Bar	0,51	2,34	0,2	0,01
Reticuline	0,28	2,28	0,18	0,01

En caso que la velocidad del flujo en la cuneta sea menor a la velocidad de splash-over, todo el flujo frontal es interceptado y el valor de R_f es 1,0.

La fracción del flujo lateral que es capaz de interceptar la reja se determina con la expresión:

$$R_s = \left(1 + \frac{0,0828 \cdot V^{1,8}}{S_x \cdot L^{2,3}} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

Luego, para determinar la fracción del flujo frontal del total del flujo en la cuneta aguas arriba del sumidero:

$$E_0 = 1 - \left(1 - \frac{W}{T} \right)^{2,67} \quad (3.27)$$

donde;

W: Ancho de la depresión en la cuneta [m].

T: Ancho total del flujo en la calle [m].

Finalmente la eficiencia de captación del sumidero queda expresada como:

$$E = R_f \cdot E_0 + R_s \cdot (1 - E_0) \quad (3.28)$$

3.2.3 United States Corps of Engineers

Según las experiencias efectuadas por el “United States Corps of Engineers”, permiten constatar que el sumidero de rejilla tiene un funcionamiento análogo al de un vertedero de napa libre, para profundidades de la lámina de agua de hasta 12 [cm]. La rejilla pasa a funcionar como orificio, solamente para láminas de agua superiores a 42 [cm], y entre 12 y 42 [cm] tiene un funcionamiento indefinido.

La Figura 3.6, muestra un esquema general de las rejas estudiadas, las cuales se muestran de largo a1 ancho a2 y un ancho de captación entre barras e, todos medidos en metros.



Figura 3.6 Modelo de rejillas estudiadas por United States Corps of Engineers.

Como rejilla libre bajo las cunetas:

- $Y < 12$ [cm]

$$\frac{Q}{p} = 1,655 \cdot Y^{1,5} \quad (3.29)$$

donde;

- Q : Caudal captado [m^3/s]
- p : Perímetro de la rejilla [m]

Ahogado en punto bajo la cuneta:

- $Y > 42$ [cm]

$$\frac{Q}{Au} = 2,91 \cdot Y^{0,5} \quad (3.30)$$

donde;

- Q: Caudal captado [m³/s]
- Au : Área útil [m²]
- n: Numero de espaciamentos
- p = 2·(a1+ a2)
- Au=n·a1·e

3.2.4 Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).

Según esta publicación, la capacidad de los sumideros depende del tipo, tamaño y diseño de la rejilla, características de la cuneta y la calle donde se ubica y condiciones de operación. Su capacidad hidráulica se puede estimar suponiendo que funcionan como vertederos para pequeñas alturas de agua y como orificios para alturas de agua mayores. Colocados en una calle con pendiente no siempre logran captar toda el agua que viene por ellas aunque teóricamente dispongan de capacidad para ello.

Un sumidero horizontal de largo L (a lo largo de la cuneta, en metros) y ancho b (transversal a la calle, en metros), con una rejilla de área de aberturas A, en metros cuadrados, puede evacuar como máximo un caudal en m³/s:

$$Q = 1,66 \cdot (L + 2b) \cdot Y^{1,5} \quad - \text{ si funciona como vertedero: } Y < 1,6 \frac{A}{L + b} \quad (3.31)$$

$$Q = 2,66 \cdot A \cdot Y^{0,5} \quad - \text{ si funciona como orificio: } Y \geq 1,6 \frac{A}{L + b} \quad (3.32)$$

donde Y es la altura del escurrimiento en la calle frente al sumidero medida en metros.

3.3 Modelos de Ajuste de la Eficiencia de Captación para Sumideros de Reja

Estas metodologías se basan en los estudios presentador por Gómez et al. (2000).

3.3.1 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación

Este ajuste corresponde a un mejoramiento del estudio realizado por Departamento de Hidráulica de la E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, presentado en el Congreso Latinoamericano de Oaxaca. Al graficar la eficiencia-altura (E-Y) de cada reja, se diferencia en el hecho de que los puntos de un mismo caudal circulante se agrupan mejor en torno a una *ecuación parabólica* y no a una recta. Del mismo modo que las pendientes de las rectas dependían exclusivamente y en una forma hiperbólica del caudal circulante.

$$E = A \cdot Y^2 + B \cdot Y \quad (\text{Ecuación 3.33})$$

$$A = -\left(\frac{c^2}{Q-a} + b\right)$$

$$B = -\left(\frac{c'^2}{Q-a'} + b'\right)$$

donde;

E: Eficiencia de la reja, determinado como caudal captado sobre caudal circulante.

Y: Altura de agua sobre la reja [mm].

Q: Caudal circulante por la calle [l/s].

a,b,c,a',b'.c': parámetros que dependen del tipo de reja.

Se destaca que los parámetros A y B que componen el modelo, no son adimensionales, por lo que para que el modelo tenga sentido A debe tener unidades de [l/mm²] y B unidades de [l/mm].

3.3.2 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación

En el estudio, se propone un ajuste del comportamiento de las rejillas ensayadas mediante una función potencial del tipo:

$$E = A \left(\frac{Q}{Y} \right)^{-B} \quad (\text{Ecuación 3.34})$$

donde;

E: Eficiencia de captación de la rejilla.

Q: Caudal circulante por la rejilla [l/s].

Y: Altura de agua inmediatamente antes de la rejilla [mm].

A y B: Parámetros de ajuste.

Se destaca que el parámetro A que compone este modelo no es adimensional. Las dimensiones que se le debe dar este parámetro están sujetas directamente a las dimensiones del caudal y la altura de escurrimiento.

Se propone también la relación que hay entre los parámetros A y B del ajuste potencial, con las características geométricas de las rejillas.

$$A = \frac{0,39}{A_g^{-0,35} \cdot p^{-0,13}} \cdot (n_t + 1)^{0,01} \cdot (n_l + 1)^{0,01} \cdot (n_d + 1)^{0,03} \quad (3.35)$$

$$B = 0,36 \cdot \frac{long}{anch} \quad (3.36)$$

donde;

A_g : Área que engloba todos los huecos.

A_H : Área útil de la reja.

p : % de área de huecos respecto al área que los engloba a todos. $p = \frac{A_H}{A_g} \cdot 100$.

n_t : número de barras transversales.

n_l : número de barras longitudinales.

n_d : número de barras diagonales.

long: Longitud de la reja.

anch: Ancho de la reja.

3.4 Curvas de Eficiencia de Captación Sumideros SERVIU

Para los sumideros tipo S1, S2, S3, S4 del Serviú, así como también para sumideros especiales que posee el Serviú, correspondientes a baterías de sumideros de mayor longitud con rejilla horizontal, las capacidades máximas se muestran en la Figura 3.7.

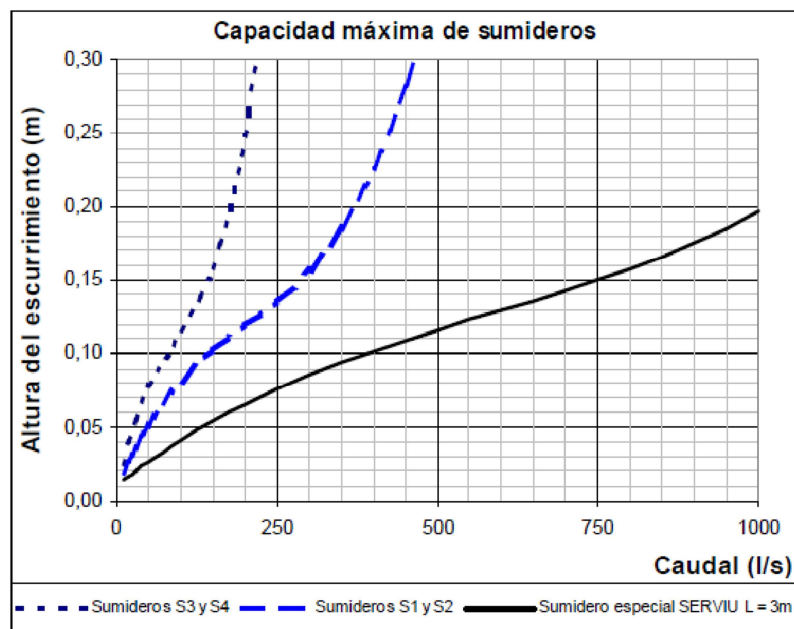


Figura 3.7 Capacidad máxima de los sumideros
(Fuente: Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU))

Para los sumideros tipo S1, S2, S3, S4 y especiales del Serviu las características y eficiencias de captación son las siguientes:

Tabla 3.3 Funciones de captación corregidas sumideros tipo Serviu
(Fuente: Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU))

h esc (m)	Q max (l/s) Según Tipo Sumidero SERVIU		
	Sum S1 y S2	Sum S3 y S4	Especial
0	0,00	0,00	0,00
0,03	10,96	5,34	47,33
0,05	22,50	10,62	96,27
0,07	45,00	16,48	166,65
0,1	65,57	33,09	295,47
0,12	90,00	42,80	396,82
0,14	118,91	52,88	514,41
0,15	129,24	57,38	562,50
0,17	145,58	63,32	655,09
0,2	165,26	70,97	
0,25	190,96	80,00	
0,29	205,18	85,82	

La Tabla 3.3, muestra las características de captación para sumideros utilizados por el Serviu metropolitano, lo cual permite obtener una función característica de captación que relaciona la altura de escurrimiento y el caudal captado.

Esta información se utiliza comúnmente como un parámetro característico de nudos en modelos numéricos como el EPA-SWMM/Watercad/MOUSE y otros.

3.5 Caudal captado por un vertedero lateral

Para los experimentos desarrollados con el sumidero ubicado en la acera fuera de la calzada, se asumirá un comportamiento similar al de un vertedero lateral para un canal de sección constante.

Con lo anterior, la ecuación general que describe el caudal lateral captado se puede escribir como:

$$Q = C_Q \cdot L_v \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h_v^{3/2} \quad (3.37)$$

donde;

Q: Caudal captado [m³/s]

C_Q: Coeficiente de desagüe (factor a determinar)

h_v: altura de escurrimiento [m].

L_v: Longitud del Vertedero [m].

Dado que la altura del escurrimiento varia a lo largo del sumidero, se sumirá una aproximación considerando la carga media sobre el umbral, tal como se menciona en *Mery*, (2013).

3.6 Cálculo del Coeficiente de Desagüe de las Rejas

De acuerdo con estudios hechos de Moskow expuestos en Subramanya aproximar el caudal captado por una reja mediante la ecuación unidimensional de orificio:

$$Q = C_d \cdot \varepsilon \cdot A_T \sqrt{2 \cdot g \cdot E} \quad (3.38)$$

donde;

Q: Caudal captado [m³/s].

ε : Fracción de huecos en la reja.

A_T: Área total de la reja [m²].

E: Energía del flujo circulante [m].

C_d: Coeficiente de desagüe.

3.7 Conclusiones de la Revisión Bibliográfica

De los métodos mostrados anteriormente se puede extraer lo siguiente:

- Para cada uno de los métodos de cálculo señalados, se concluye que los parámetros más relevantes son las características geométricas del sumidero (ancho y longitud), así como la altura de escurrimiento inmediatamente aguas arriba del sumidero, las pendientes de la calle y el caudal total circulante.
- Respecto a la altura de escurrimiento, en la práctica no es un dato que se maneje a priori, por lo cual es necesario utilizar alguna fórmula empírica para determinarla.
- De trabajo publicado por el Instituto Nacional de Hidráulica, se muestra que a medida que se aumenta el caudal total que escurre en la calle disminuye la eficiencia de captación del sumidero. Del mismo modo, se mostró que a medida que aumenta el valor de la pendiente transversal, aumenta la eficiencia de captación. Lo anterior se utilizará como un criterio base para analizar cada uno de los resultados entregados por los modelos empíricos, de

manera que si se encontrara que un método entregase resultados contrarios a lo expuesto anteriormente, los resultados se considerarán erróneos y que el método bajo esas condiciones no logra modelar el funcionamiento del sumidero.

- En la elección de los modelos a estudiar, se optó por desarrollar los modelos de ajuste Potencial y ajuste Parabólico-Hiperbólico, mostrados en los Congresos de Hidráulica de Córdoba 2000 y Oxaca 1998, respectivamente. Además, se analizarán los modelos de la Universidad Jonh Hopkins y el método recomendado por SERVIU Metropolitano, el cual ha sido ampliamente difundido en los planes maestros de aguas lluvias para colectores secundarios. Adicionalmente, se determinarán las curvas características de cada uno de los sumideros estudiados, basados en la metodología utilizada por Serviu metropolitano.
- Basado en la publicación difundida en el Congreso de Hidráulica de Córdoba 2000, se busca determinar los coeficientes para cada una de las rejas estudiadas.
- Para el caso de los estudios realizados con sumideros fuera de la calzada, se asume un comportamiento similar al de un vertedero lateral en un canal de sección constante, (*Mery, 2013*).

Capítulo 4

Análisis de Modelos Teóricos

A lo largo de este capítulo, se muestran los resultados obtenidos de cada uno de los modelos teóricos aplicados. En particular, al comparar los resultados con los valores experimentales obtenidos de las experiencias realizadas por el INH, se obtienen los rangos en los cuales estas aproximaciones son válidas.

Las principales conclusiones obtenidas de los diversos experimentos desarrollados entre los años 2004 y 2006 por el INH se presentan a continuación y serán consideradas como hipótesis básicas a lo largo del estudio.

- La eficiencia de captación disminuye al aumentar el caudal y la pendiente longitudinal de la calle (INH, 2004).
- La eficiencia de captación aumenta al incrementar la pendiente transversal de la calle (INH, 2004).
- Es posible aumentar la eficiencia de captación de sumideros en la calle incorporando áreas de influencia que encaucen el flujo hacia la reja, particularmente para pendiente longitudinal baja (Kaliski y Cortez, 2008).
- La eficiencia de captación aumenta con el desnivel del área de influencia, para el caso de sumideros con desnivel en la calle (Kaliski y Cortez, 2008).
- Ubicando el sumidero fuera de la calle, es posible conseguir eficiencias hidráulicas de captación comparables, e incluso mayores en algunos casos, que un sumidero similar ubicado en la calle (Kaliski y Cortez, 2006).

4.1 Ajuste Potencial del Comportamiento de Sumideros con Rejillas

Se propone un ajuste de la eficiencia de captación del tipo:

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B} \quad (4.1)$$

donde:

E: Eficiencia de captación de la reja.

Q: Caudal circulante por la calle [l/s].

Y: Altura de agua inmediatamente antes de la reja [mm].

A y B: Parámetros no adimensionales de ajuste.

Considerando que la pendiente transversal es un parámetro importante en la eficiencia de captación de los sumideros, se adoptaron modelos de ajustes para cada una de las pendientes ensayadas.

Como se menciona en el Capítulo 3, el parámetro A del ajuste potencial no corresponde a un valor adimensional y depende de las unidades del caudal total en la calle [l/s] y de la altura de escurrimiento [mm].

Adicionalmente se determinó la diferencia existente entre la eficiencia de captación medida experimentalmente y la estimada empíricamente como un $\Delta \eta = |\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{teor}}|$.

4.1.1 Sumidero N°1

Aplicando el modelo potencial se obtienen los siguientes parámetros de ajuste mostrados en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Valores de parámetros de ajuste Potencial para Sumidero N°1.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.6159	0.4821	7.59	2.59
2%	0.7235	0.4590	7.23	2.90
3%	0.7723	0.4007	6.72	2.85
5%	0.8201	0.3087	13.46	4.18

Adicionalmente al ajuste realizado a los datos experimentales, se determinaron valores de los coeficientes del modelo en base a una expresión analítica basada en las características geométricas de la reja (Capítulo 3 ecuaciones 3.3 y 3.4).

Con lo anterior se pudo obtener una nueva expresión para determinar la capacidad de captación de la reja y así poder compararla con los valores reales medidos en el laboratorio. Los parámetros A y B del ajuste obtenidos según las características geométricas de la reja se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros del Modelo estimados según características geométricas.

N° de Sumidero	A	B
Sumidero N°1	0.4334	0.5143

En las Figuras 4.1 a la 4.4 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.1 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°1 para Pendiente Transversal del 1%.

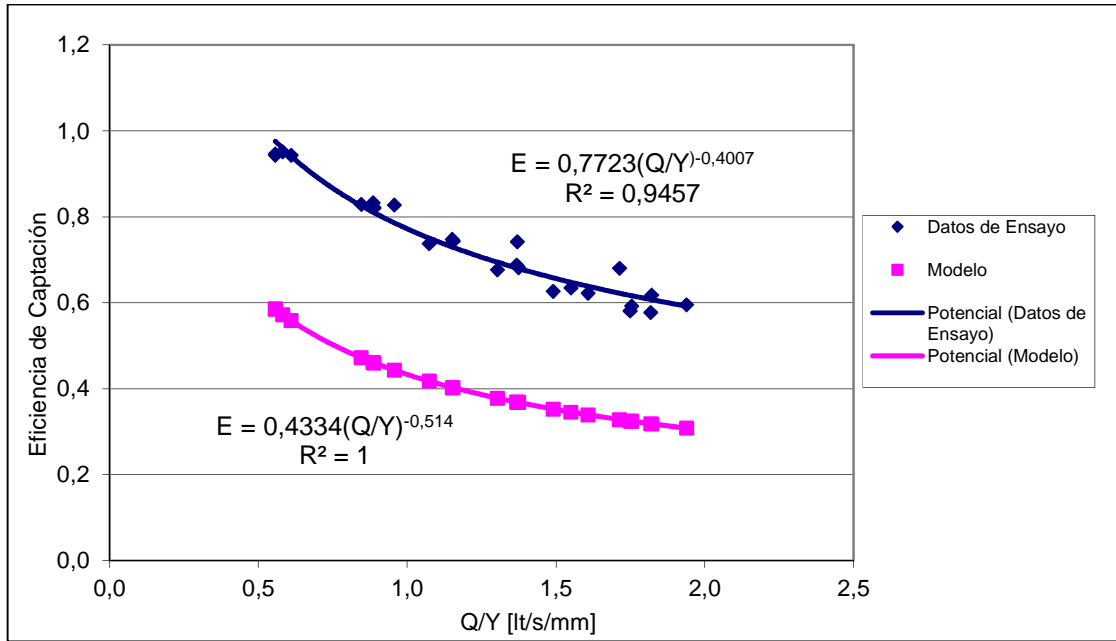


Figura 4.2 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°1 para Pendiente Transversal del 2%.

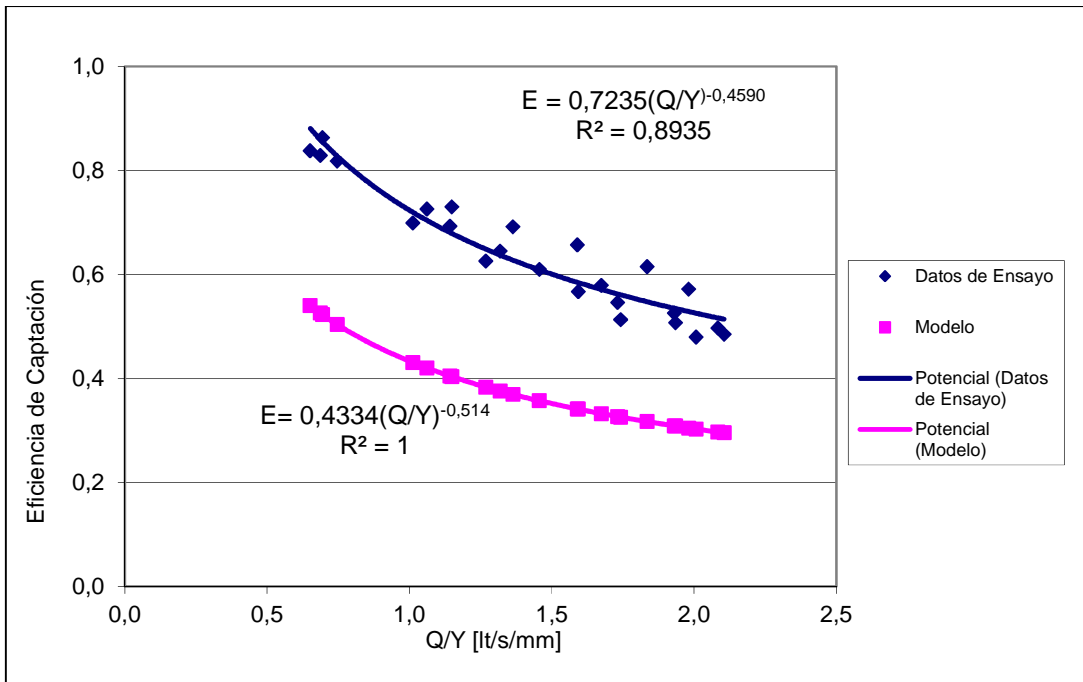


Figura 4.3 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°1 para Pendiente Transversal del 3%.

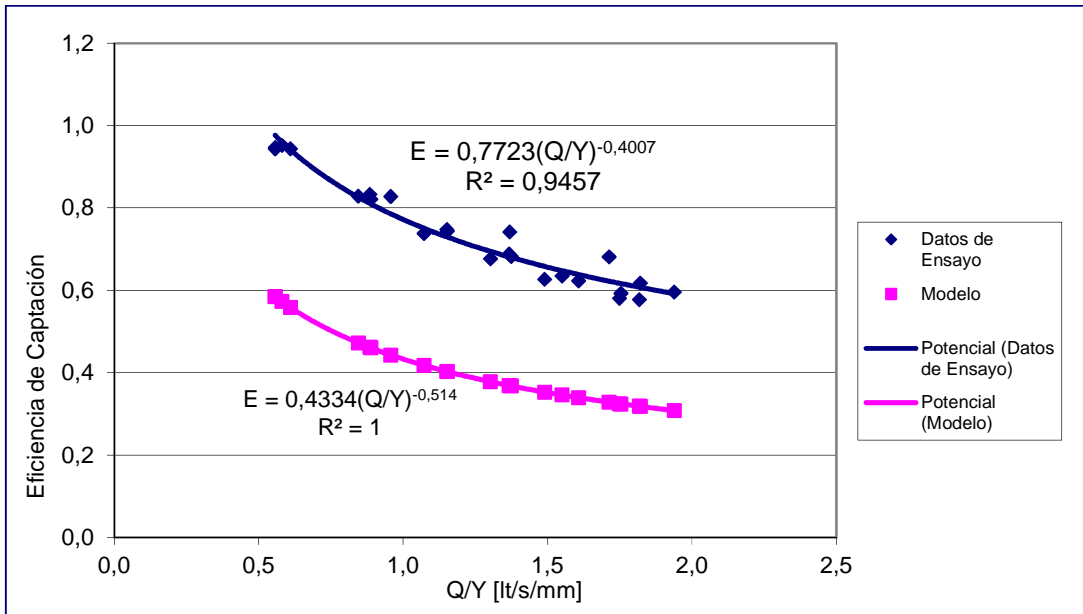
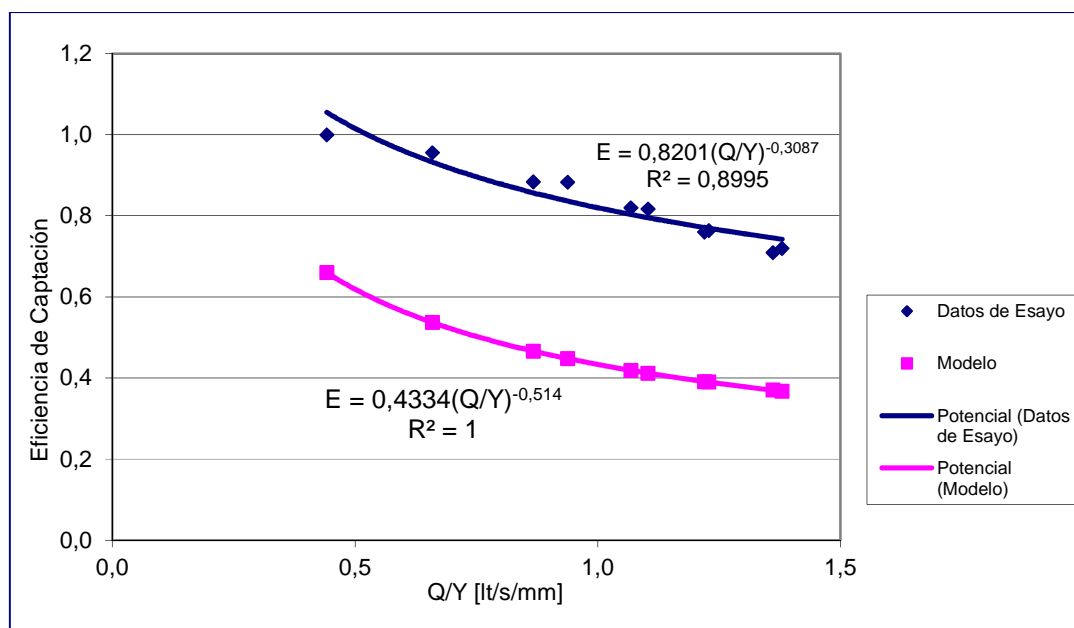


Figura 4.4 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°1 para Pendiente Transversal del 3%.



4.1.2 Sumidero N°2

Aplicando el modelo potencial, se obtienen los siguientes parámetros de ajuste para las diferentes pendientes estudiadas. Los resultados se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Valores de parámetros de ajuste Potencial para Sumidero N°2.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.5417	0.1445	9.04	3.05
2%	0.7001	0.1543	10.17	3.58
3%	0.9154	0.4905	2.53	0.87
5%	0.9660	0.3385	1.97	1.15

En la Tabla 4.4, se muestran los valores para el modelo Potencial basados en las características geométricas de la reja.

Tabla 4.4 Parámetros del Modelo estimados según características geométricas.

N° de Sumidero	A	B
Sumidero N°2	0.5561	1.0286

En las Figuras 4.5 a la 4.8 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.5 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°2 para Pendiente Transversal del 1%.

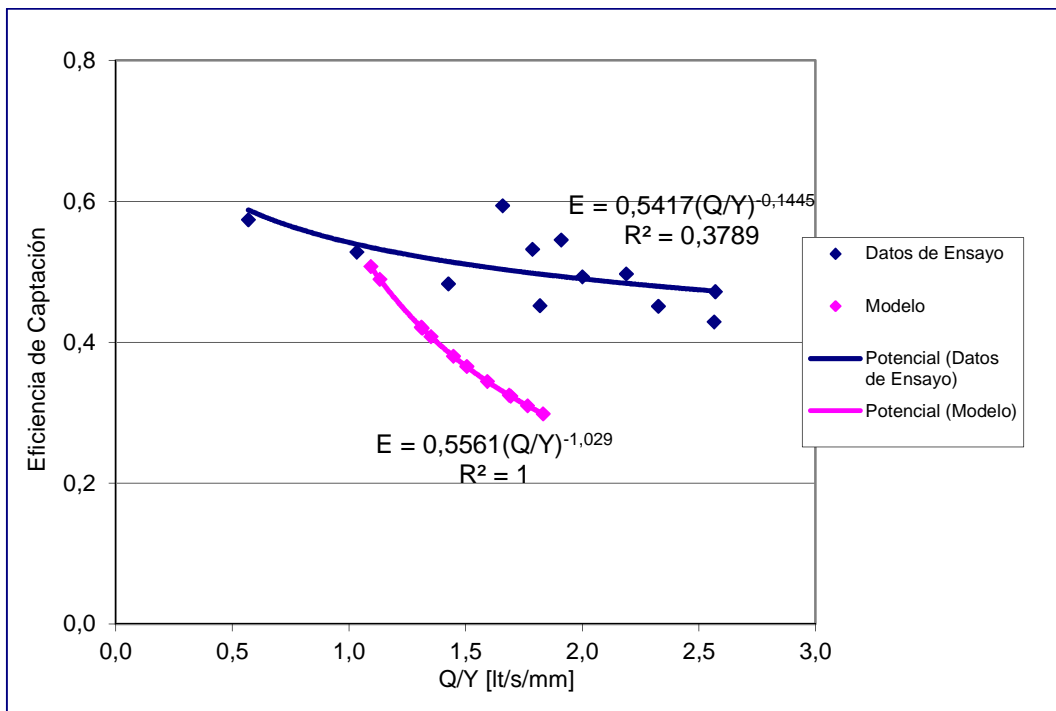


Figura 4.6 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°2 para Pendiente Transversal del 2%.

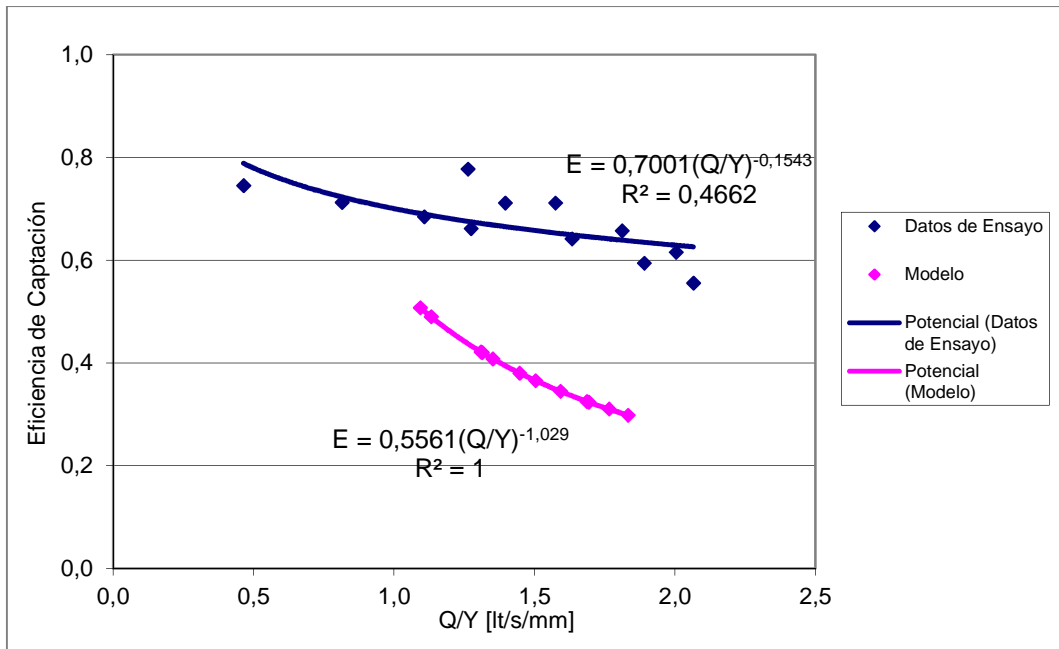


Figura 4.7 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°2 para Pendiente Transversal del 3%.

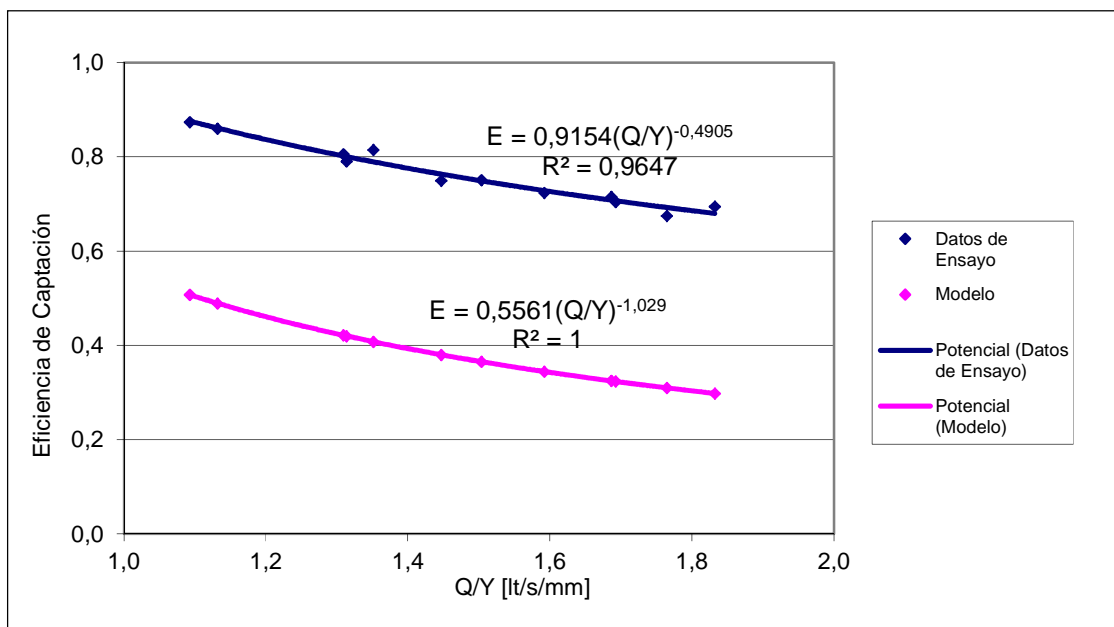
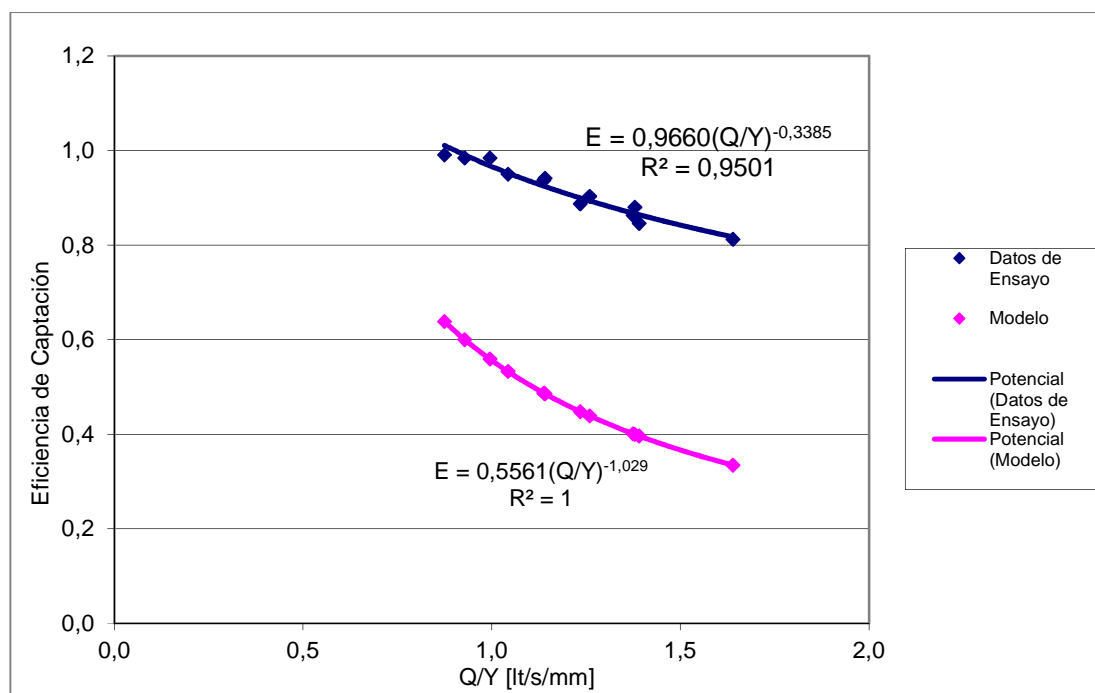


Figura 4.8 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°2 para Pendiente Transversal del 5%.



4.1.3 Sumidero N°3

Los resultados que se muestran en la Tabla 4.3, corresponden a los parámetros de ajuste para las diferentes pendientes estudiadas.

Tabla 4.5 Valores de parámetros de ajuste Potencial para Sumidero N°3.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.4567	0.5859	5.0	2.0
2%	0.5364	0.5663	5.8	2.8
3%	0.5729	0.5259	4.2	2.1

En la Tabla 4.6, se muestran los valores para el modelo Potencial basados en las características geométricas de la reja.

Tabla 4.6 Parámetros del Modelo estimados según características geométricas.

Nº de Sumidero	A	B
Sumidero Nº3	0.6786	0.90

En las Figuras 4.9 a la 4.11 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.9 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero Nº3 para Pendiente Transversal del 1%.

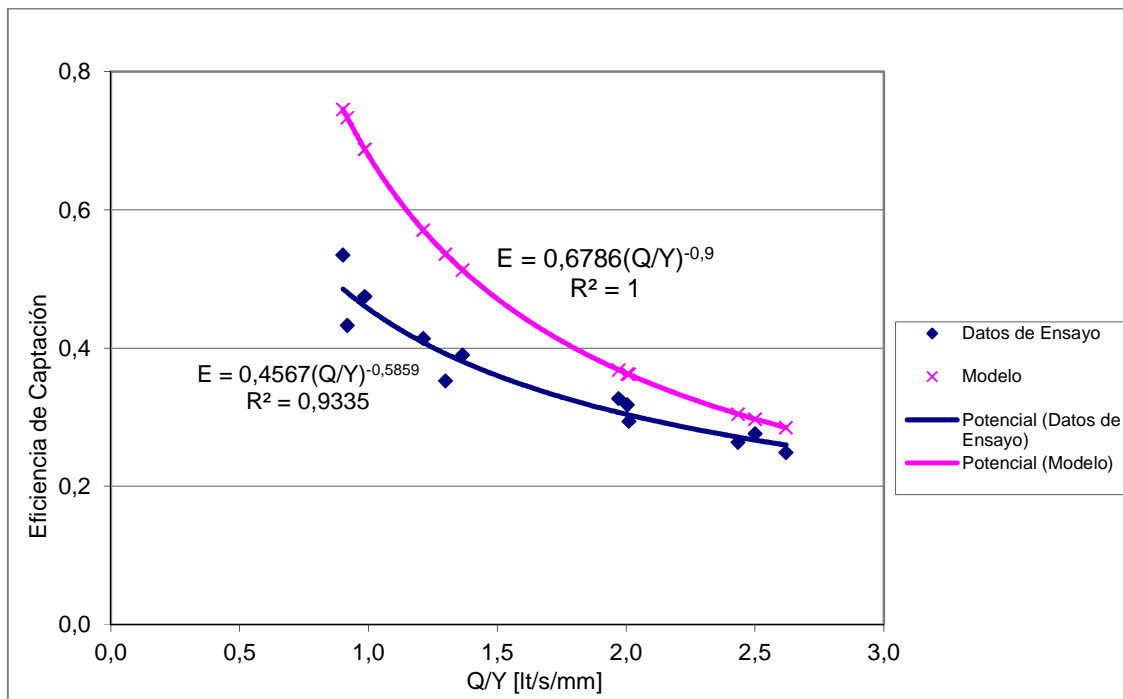


Figura 4.10 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°3 para Pendiente Transversal del 2%.

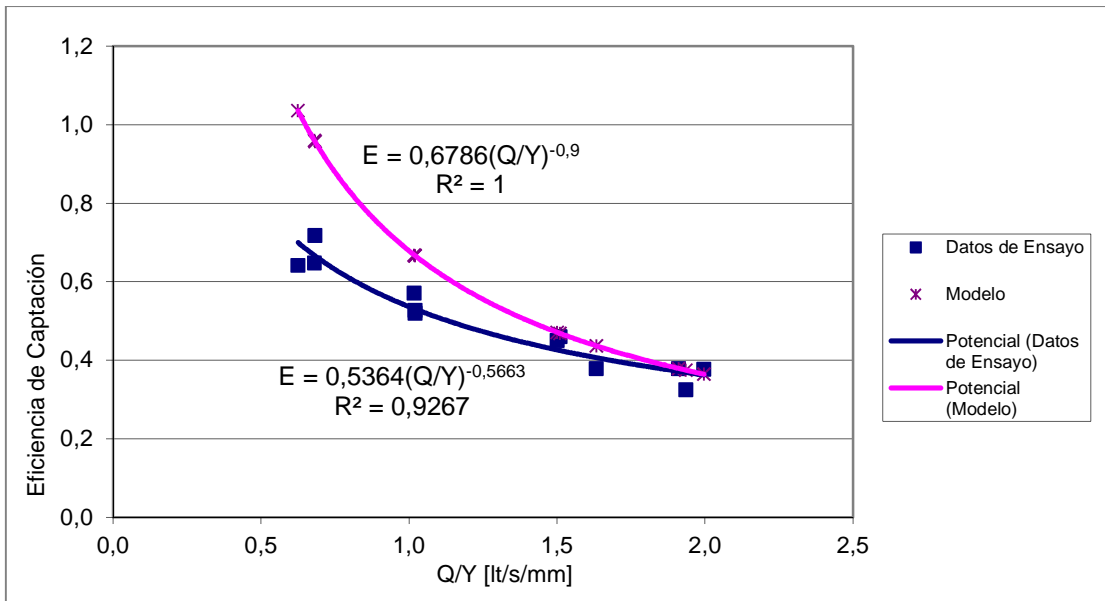
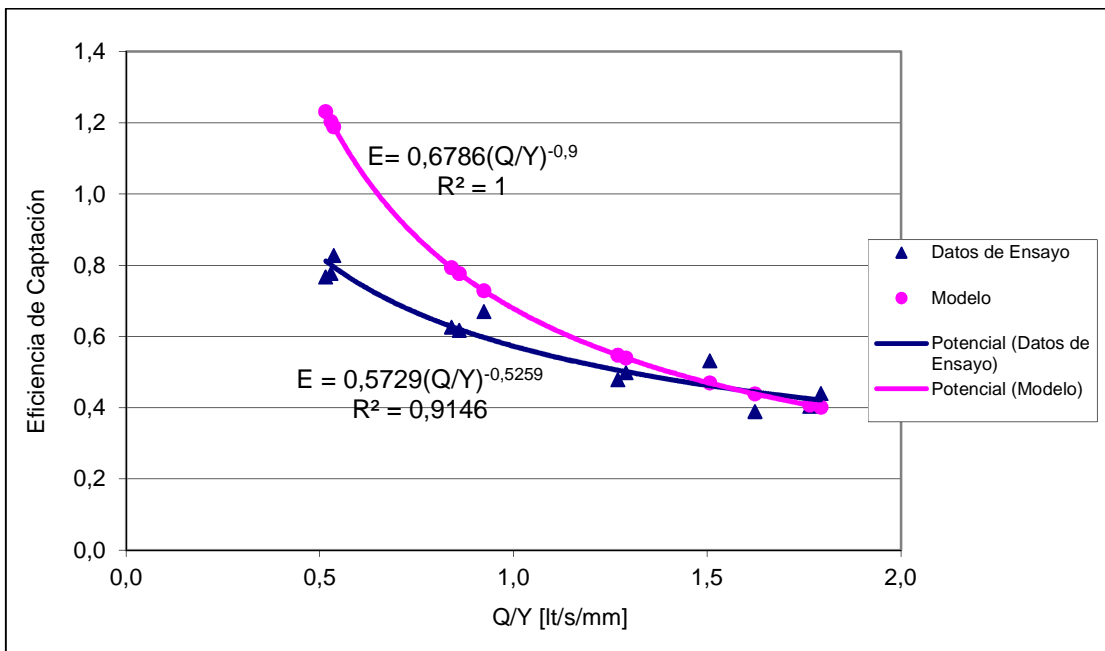


Figura 4.11 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°3 para Pendiente Transversal del 3%.



4.1.4 Sumidero N°4

Los resultados que se muestran en la Tabla 4.7, corresponden a los parámetros de ajuste para las diferentes pendientes estudiadas.

Tabla 4.7 Valores de parámetros de ajuste Potencial para Sumidero N°4.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.5278	0.5144	5.5	2.7
2%	0.6357	0.4838	5.6	2.8
3%	0.6853	0.4976	5.3	2.0
5%	0.7428	0.4331	6.1	3.7

En la Tabla 4.8, se muestran los valores para el modelo Potencial basados en las características geométricas de la reja.

Tabla 4.8 Parámetros del Modelo estimados según características geométricas.

N° de Sumidero	A	B
Sumidero N°4	0.8019	1.008

En las Figuras 4.12 a la 4.15 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.12 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°4 para Pendiente Transversal del 1%.

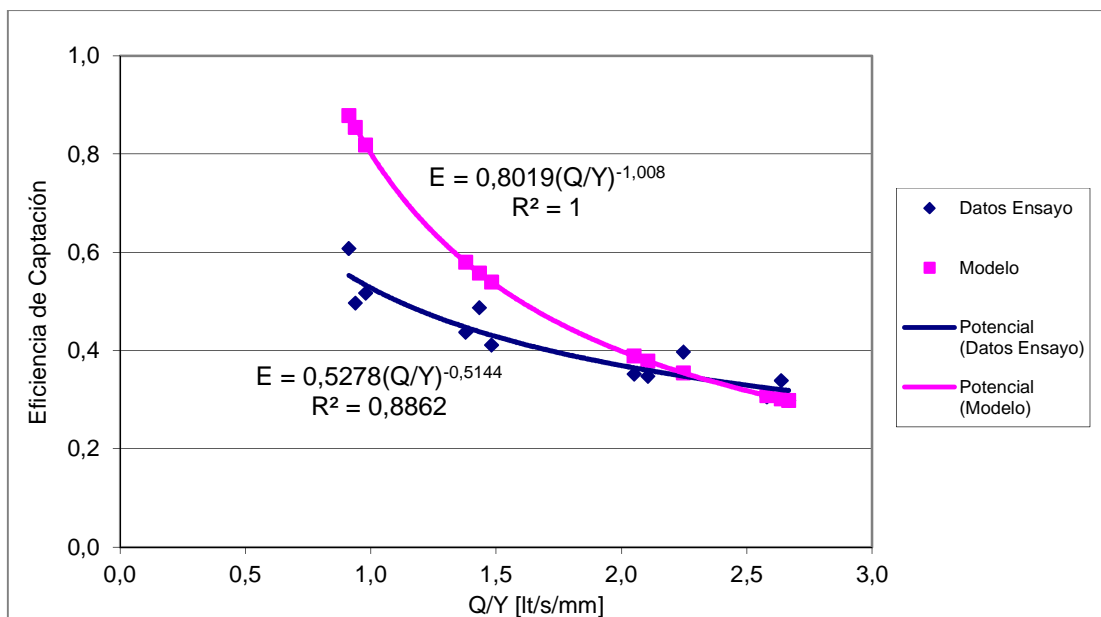


Figura 4.13 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°4 para Pendiente Transversal del 2%.

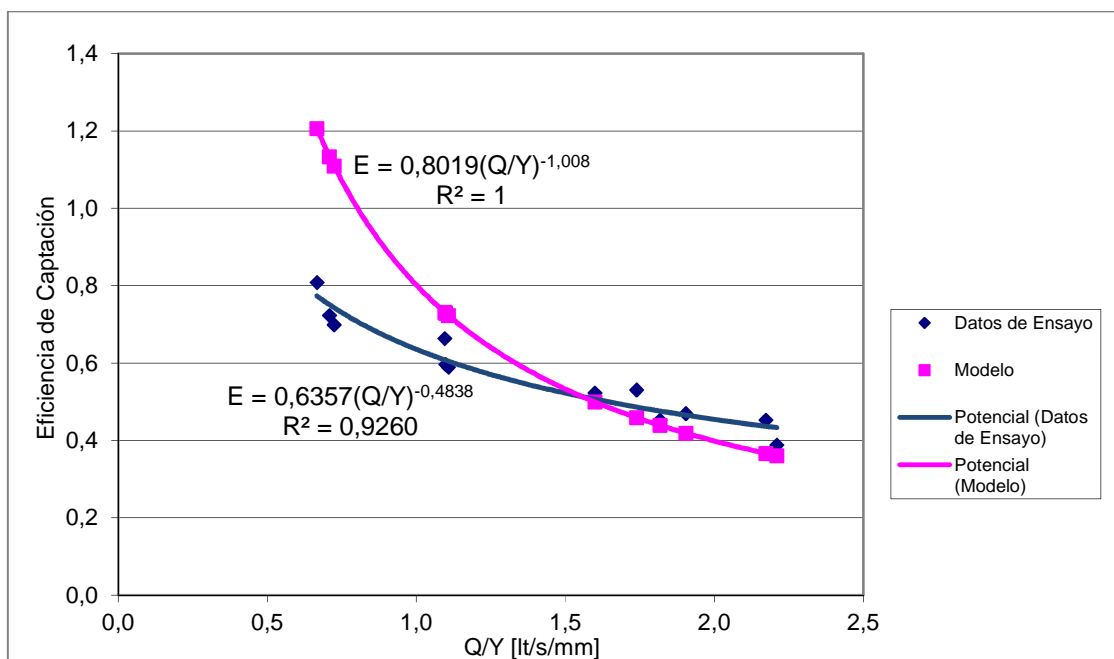


Figura 4.14 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°4 para Pendiente Transversal del 3%.

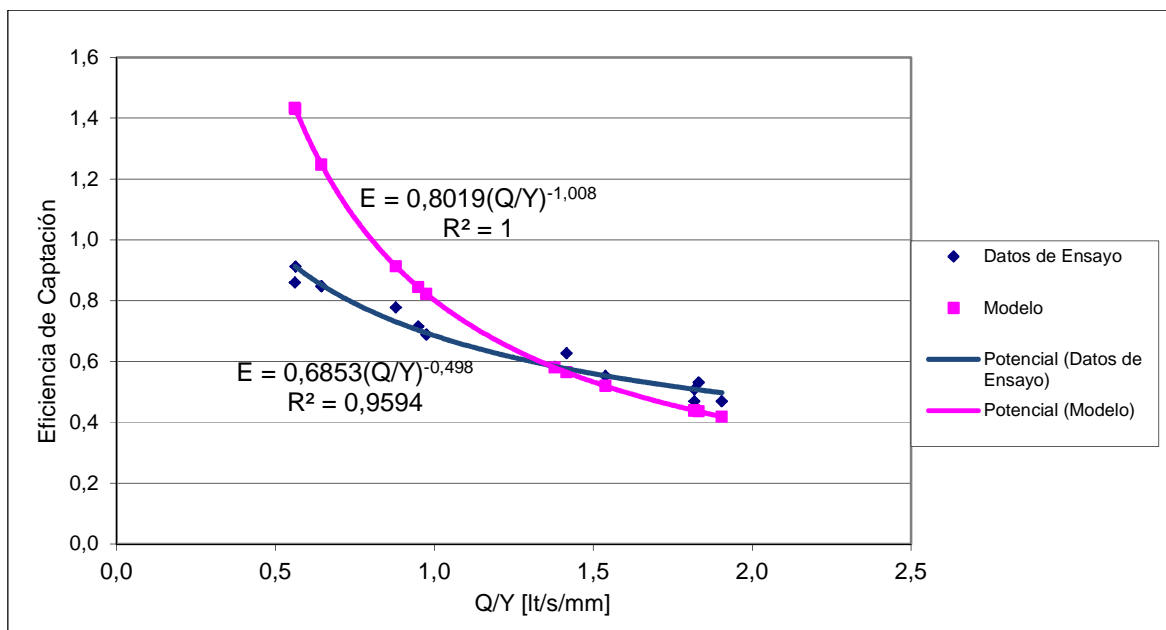
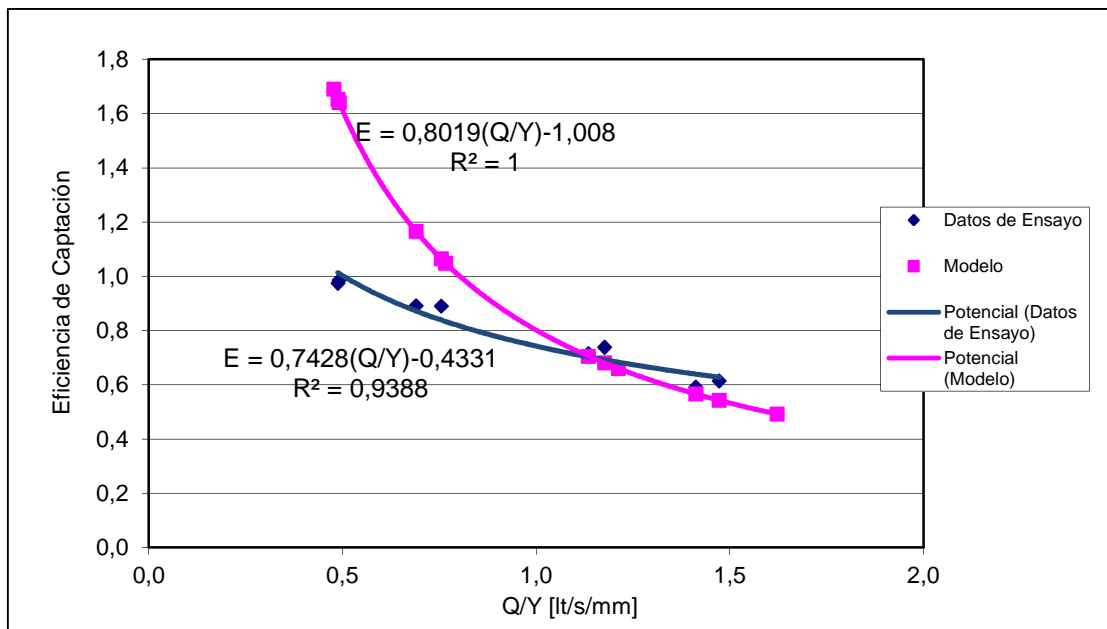


Figura 4.15 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°4 para Pendiente Transversal del 5%.



4.1.5 Sumidero N°5

Los resultados que se muestran en la Tabla 4.9, corresponden a los parámetros de ajuste para las diferentes pendientes estudiadas.

Tabla 4.9 Valores de parámetros de ajuste Potencial para Sumidero N°5.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.5893	0.4187	12.0	4.4
2%	0.7061	0.3621	15.7	7.3
3%	0.7770	0.3778	12.4	6.5
5%	0.8458	0.2646	7.5	3.6

En la Tabla 4.10, se muestran los valores para el modelo Potencial basados en las características geométricas de la reja.

Tabla 4.10 Parámetros del Modelo estimados según características geométricas.

N° de Sumidero	A	B
Sumidero N°5	0.7528	0.45

En las Figuras 4.16 a la 4.19 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.16 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°5 para Pendiente Transversal del 1%.

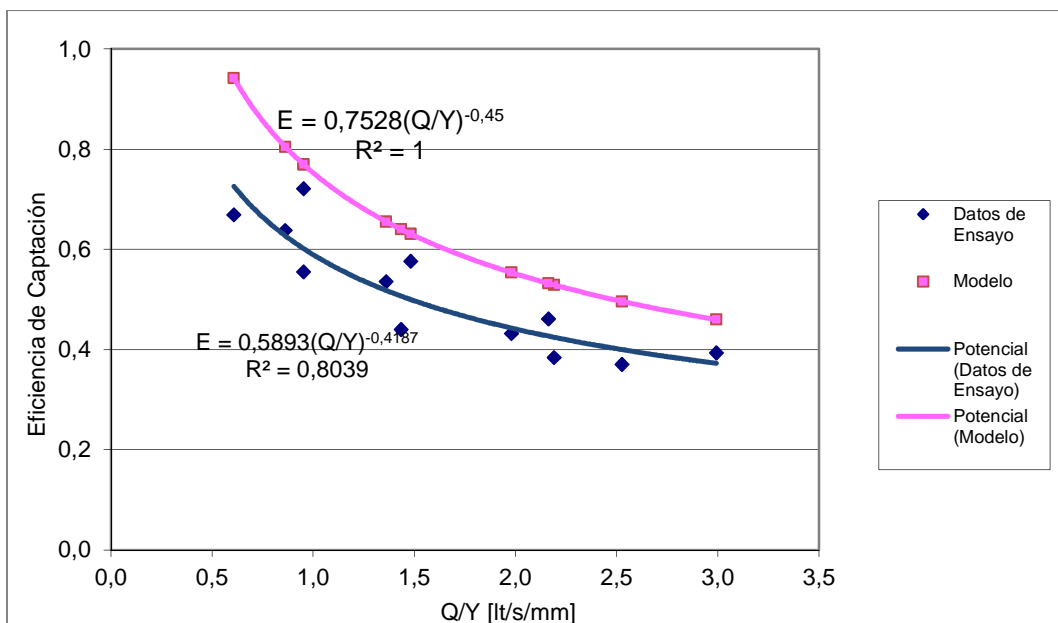


Figura 4.17 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°5 para Pendiente Transversal del 2%.

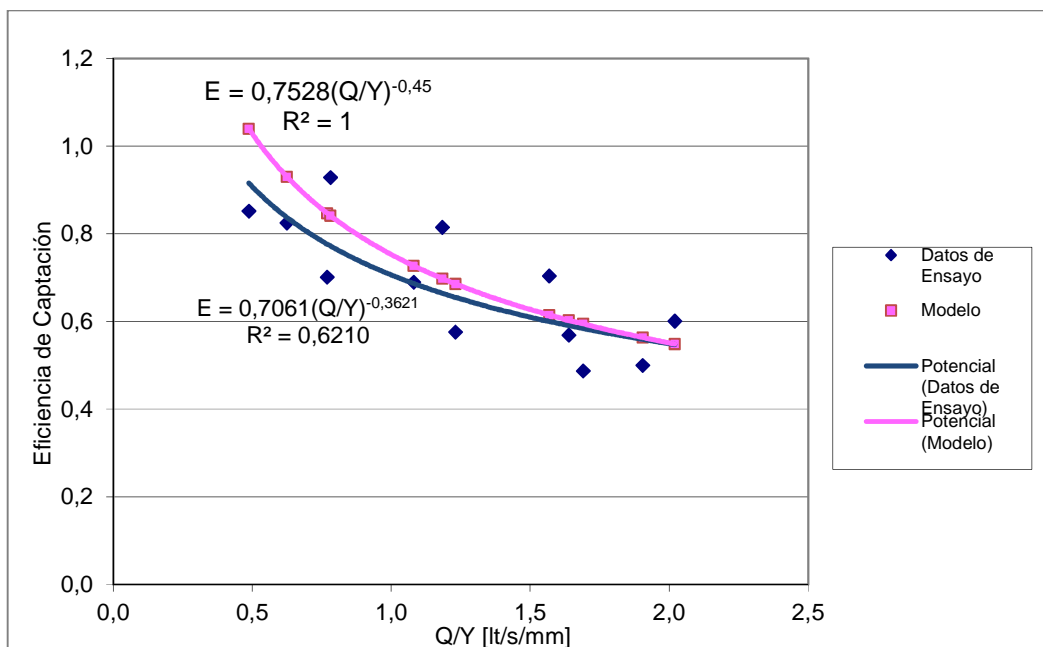


Figura 4.18 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°5 para Pendiente Transversal del 3%.

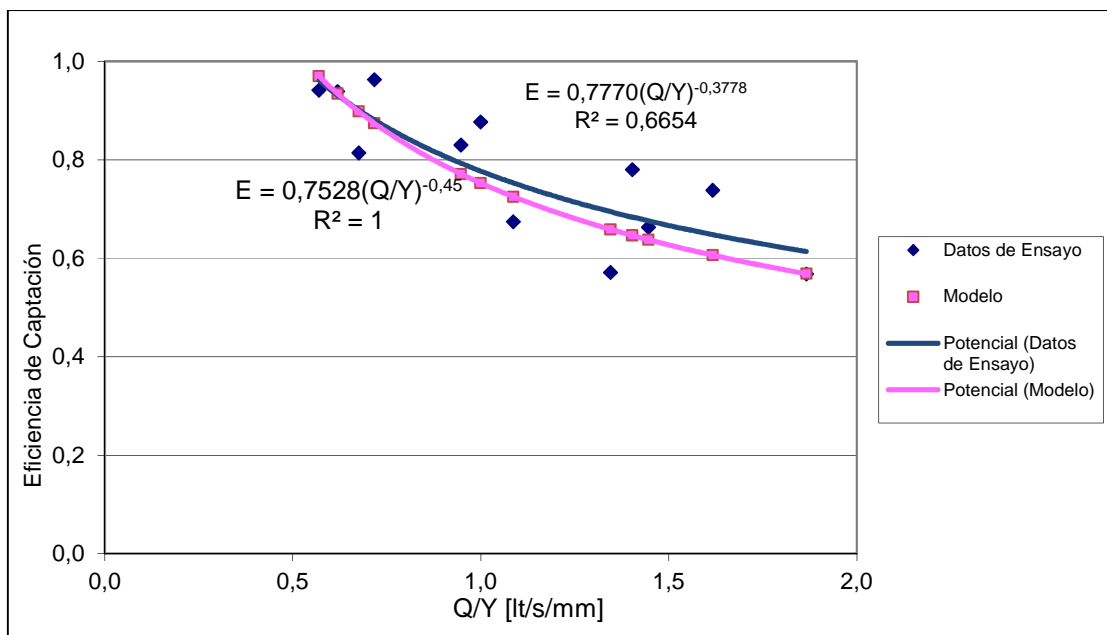
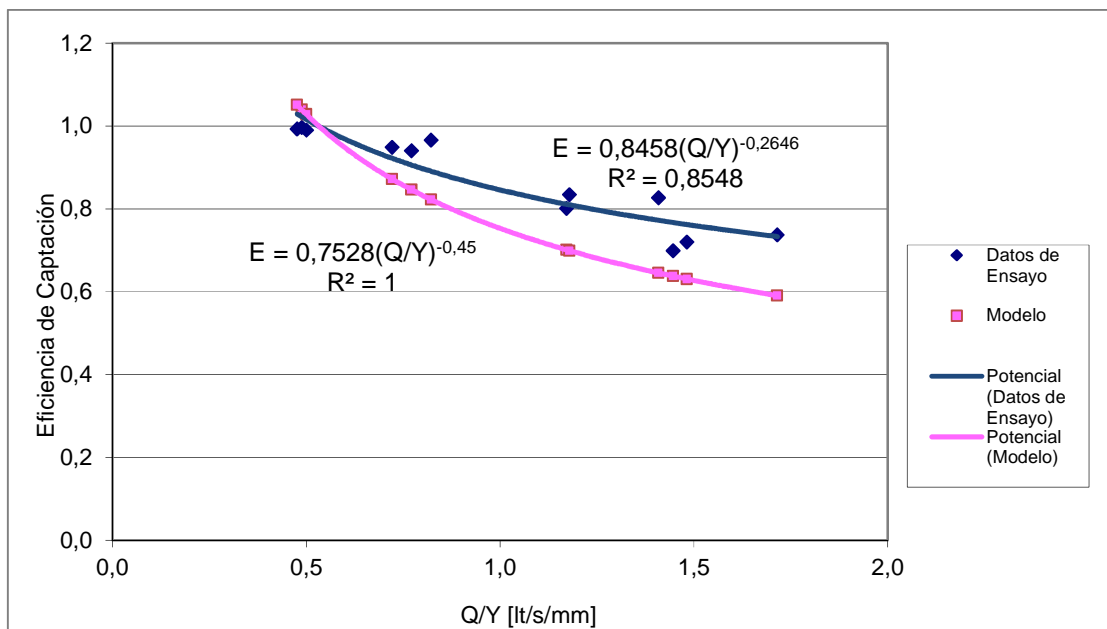


Figura 4.19 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°5 para Pendiente Transversal del 5%.



4.2 Ajuste Parabólico-Hiperbólico del Comportamiento de sumideros con Rejillas

Se propone un ajuste de la eficiencia de captación del tipo:

$$E = A \cdot Y^2 + B \cdot Y \quad (4.2)$$

De los ensayos realizados se conoce el valor de Y, altura de escurrimiento antes del sumidero y E, eficiencia de captación. Para este caso el parámetro esencial es el caudal que escurre en la plataforma, por lo cual se realizó un ajuste para cada uno de los diferentes caudales ensayados.

Se determinó la diferencia existente entre la eficiencia medida y la estimada empíricamente como un $\Delta \eta = |\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{teor}}|$.

Se destaca que los parámetros A y B que componen este modelo no son adimensionales, por lo cual para que el modelo tenga sentido A debe tener unidades de [l/mm²] y B unidades de [l/mm].

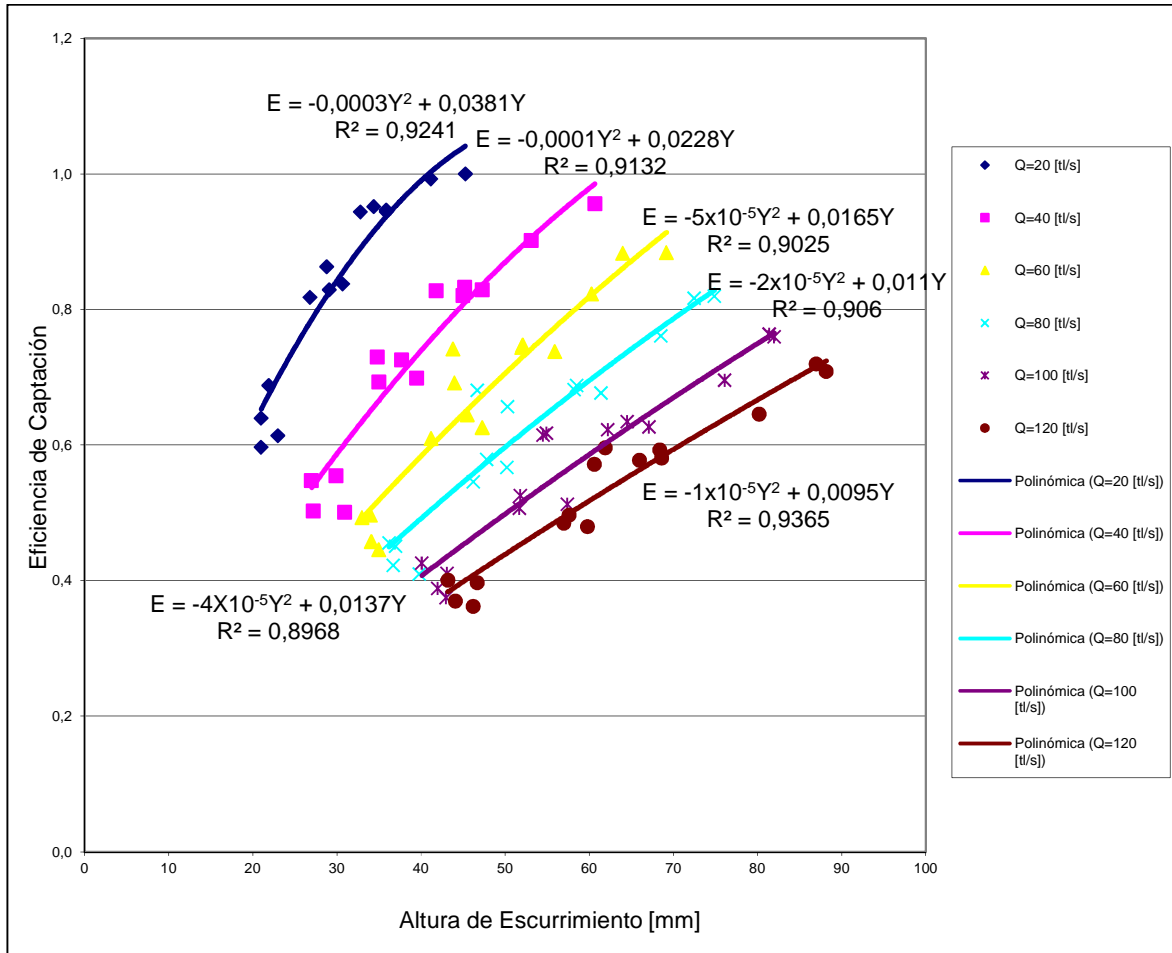
4.2.1 Sumidero N°1

En la Tabla 4.11, se muestran los valores de los parámetros de ajuste aplicando el modelo Parabólico-Hiperbólico. En la Figura 4.20 se muestran gráficamente los resultados de eficiencia de captación en función de la altura de escurrimiento Y [mm].

Tabla 4.11 Valores de parámetros de ajuste Parabólico Hiperbólico para Sumidero N°1.

Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
20	-0.0003	0.0381	11.1	4.11
40	-0.0001	0.0228	10.8	3.53
60	-5×10^{-5}	0.0165	23.36	10.59
80	-4×10^{-5}	0.0137	18.34	9.76
100	-2×10^{-5}	0.011	12.94	7.20
120	-1×10^{-5}	0.0095	12.09	5.75

Figura 4.20 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°1.



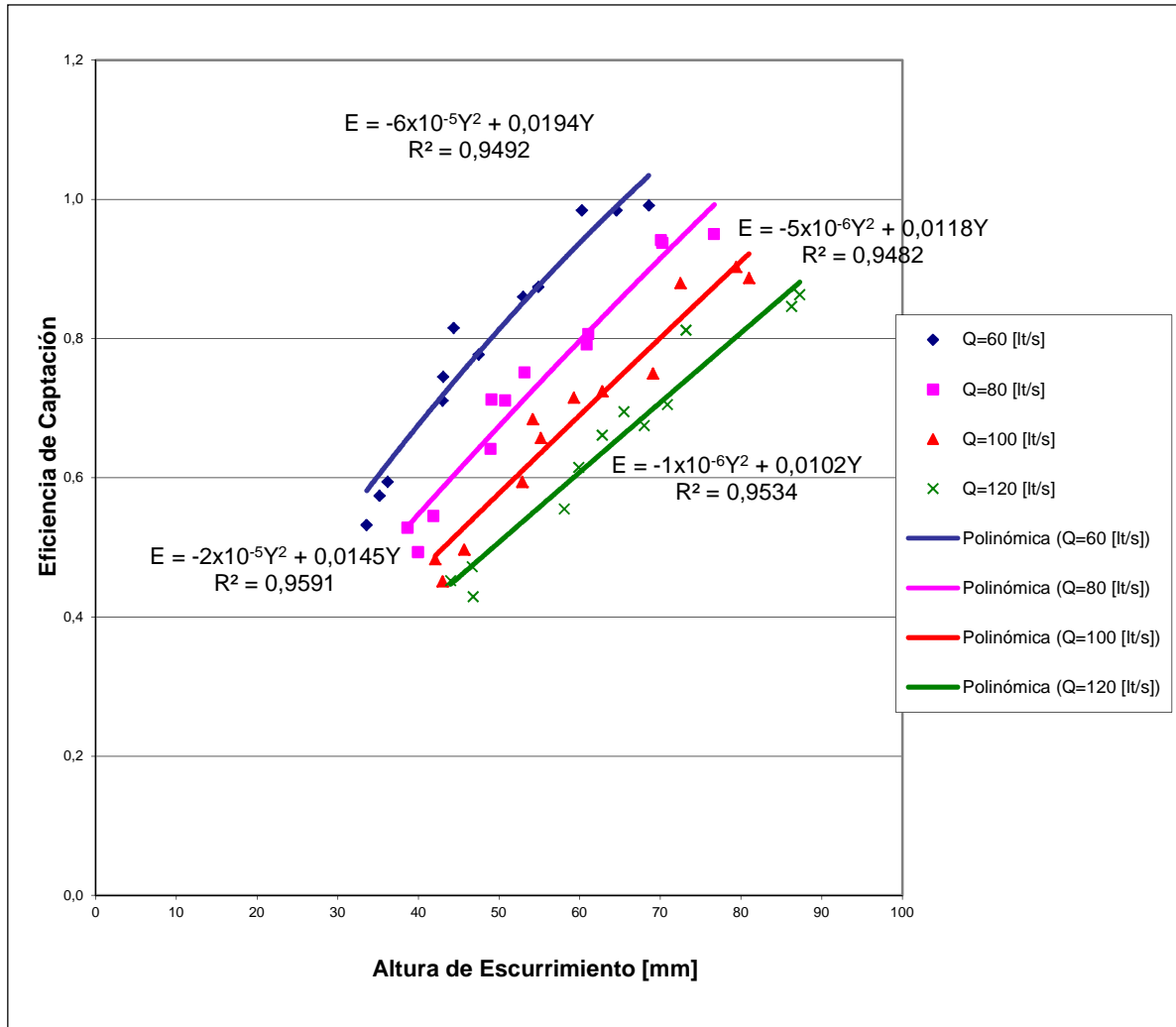
4.2.2 Sumidero N°2

En la Tabla 4.12, se muestran los valores de los parámetros de ajuste aplicando el modelo Parabólico-Hiperbólico. En la Figura 4.21 se muestran gráficamente los resultados de eficiencia de captación en función de la altura de escurrimiento Y [mm].

Tabla 4.12 Valores de parámetros de ajuste Parabólico Hiperbólico para Sumidero N°2.

Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
60	-6×10^{-5}	0.0194	7.2	2.91
80	-2×10^{-5}	0.0145	5.5	2.71
100	-5×10^{-6}	0.0118	5.91	2.88
120	-1×10^{-6}	0.0102	7.09	2.46

Figura 4.21 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°2.



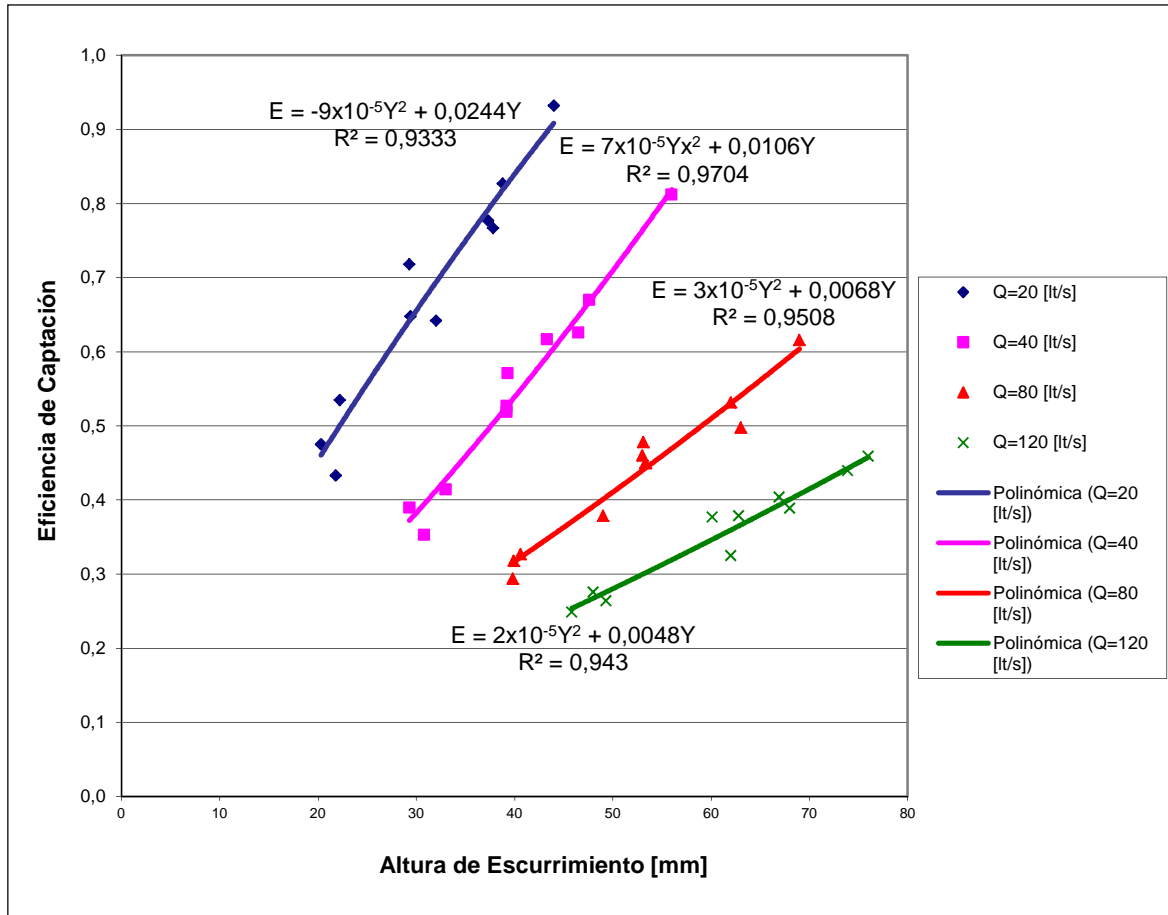
4.2.3 Sumidero N°3

En la Tabla 4.13, se muestran los valores de los parámetros de ajuste aplicando el modelo Parabólico-Hiperbólico. En la Figura 4.22 se muestran gráficamente los resultados de eficiencia de captación en función de la altura de escurrimiento Y [mm].

Tabla 4.13 Valores de parámetros de ajuste Parabólico Hiperbólico para Sumidero N°3.

Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
20	-9×10^{-5}	0.0244	8.04	3.29
40	7×10^{-5}	0.0106	4.63	1.78
80	3×10^{-5}	0.0068	4.94	1.61
120	2×10^{-5}	0.0048	4.95	1.83

Figura 4.22 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°3.



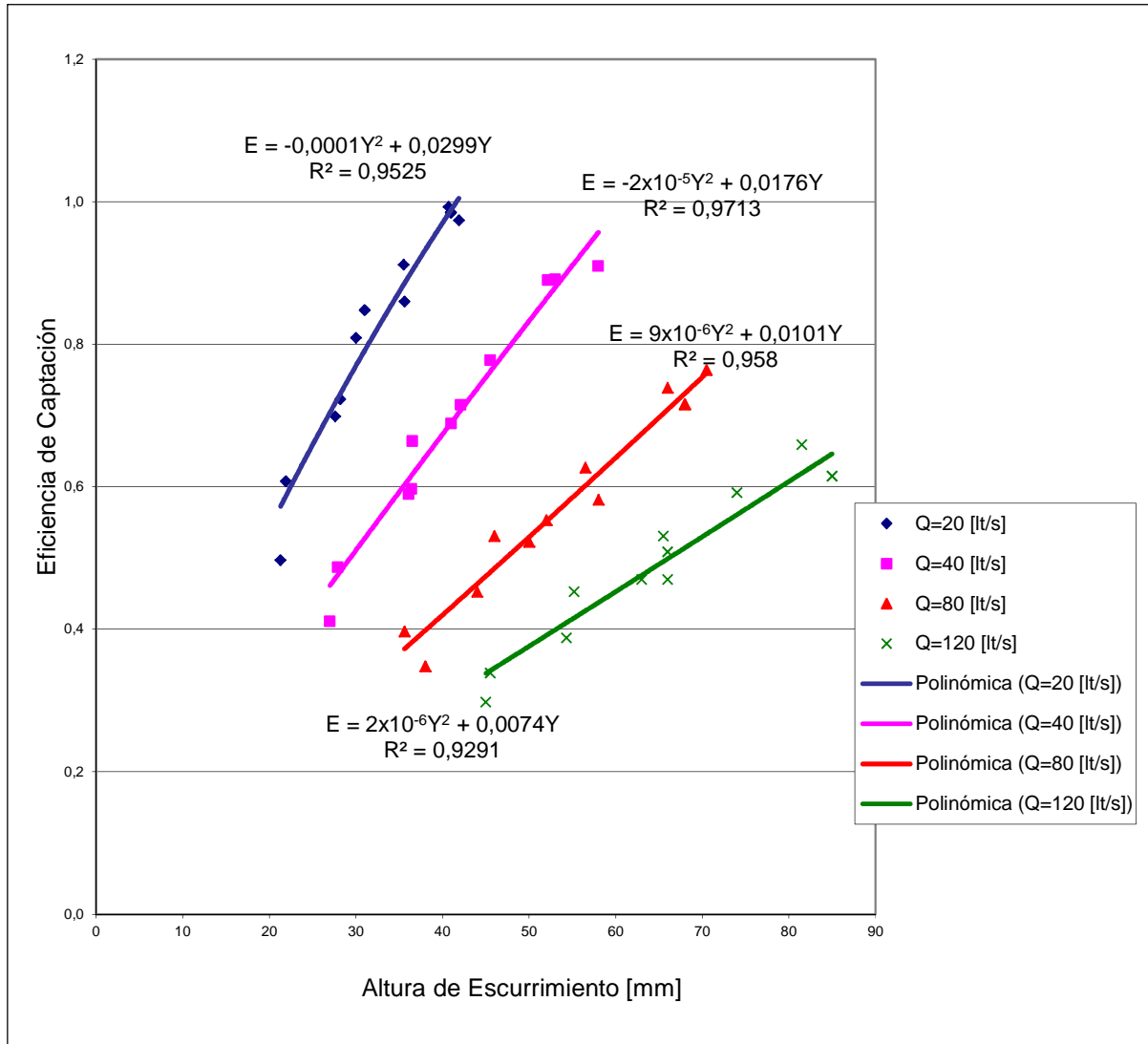
4.2.4 Sumidero N°4

En la Tabla 4.14, se muestran los valores de los parámetros de ajuste aplicando el modelo Parabólico-Hiperbólico. En la Figura 4.23 se muestran gráficamente los resultados de eficiencia de captación en función de la altura de escurrimiento Y [mm].

Tabla 4.14 Valores de parámetros de ajuste Parabólico Hiperbólico para Sumidero N°4.

Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
20	-1×10^{-4}	0.0299	10.28	5.1
40	-2×10^{-5}	0.0176	4.96	2.28
80	9×10^{-6}	0.0101	4.88	2.22
120	2×10^{-6}	0.0074	4.28	2.61

Figura 4.23 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°4.



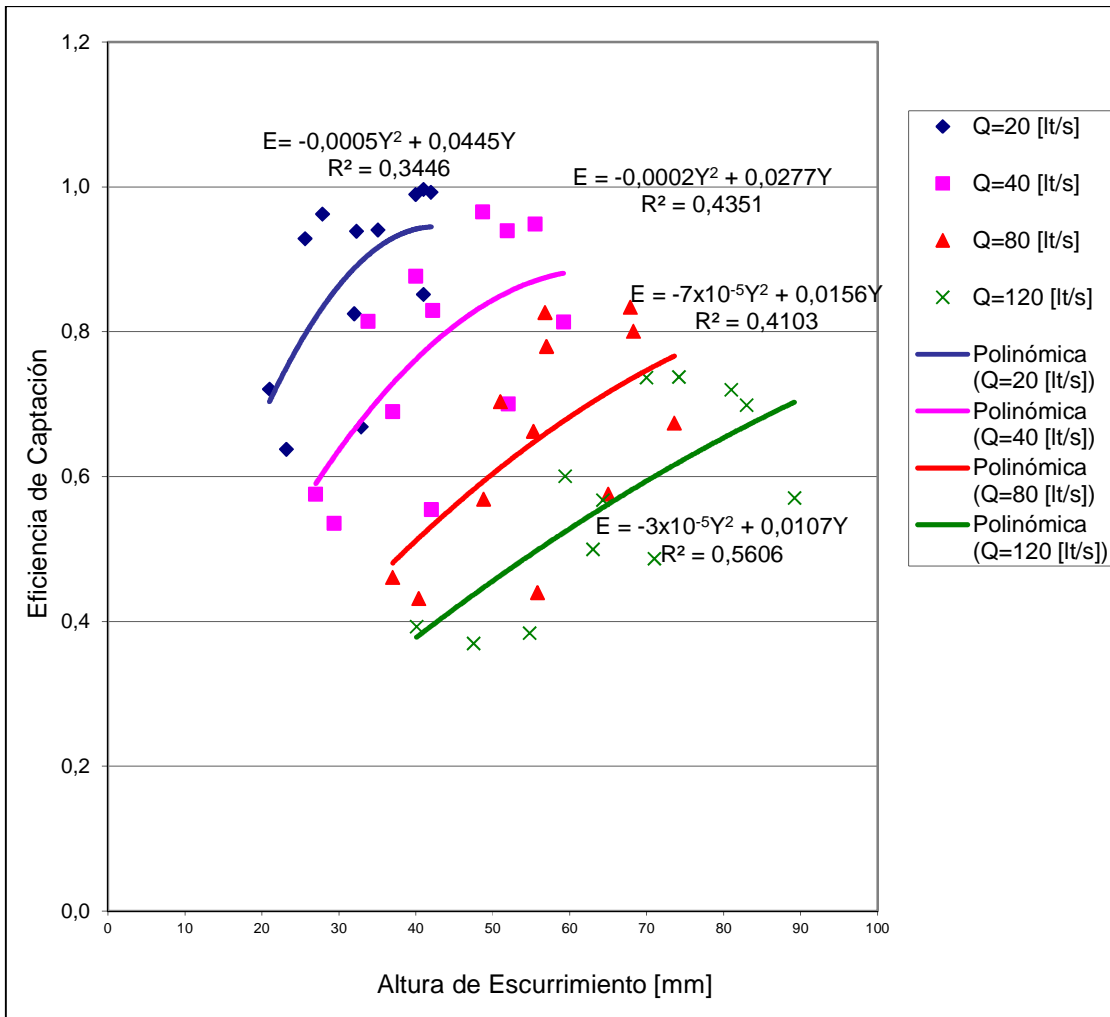
4.2.5 Sumidero N°5

En la Tabla 4.15, se muestran los valores de los parámetros de ajuste aplicando el modelo Parabólico-Hiperbólico. En la Figura 4.24 se muestran gráficamente los resultados de eficiencia de captación en función de la altura de escurrimiento Y [mm].

Tabla 4.15 Valores de parámetros de ajuste Parabólico Hiperbólico para Sumidero N°5.

Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
20	-0.0005	0.0445	25.38	7.42
40	-0.0002	0.0277	25.56	9.55
80	-7×10^{-5}	0.0156	21.25	9.41
120	-3×10^{-5}	0.0107	14.47	7.53

Figura 4.24 Ajuste Parabólico Hiperbólico de la Eficiencia de Captación para el Sumidero N°5.



4.3 Método de la Universidad Johns Hopkins

A continuación se detallan los principales cálculos y análisis realizados al aplicar el método de la Universidad Johns Hopkins (1956) para el diseño de sumideros con rejillas.

4.3.1 Sumidero N°1

En las Figuras 4.25 a la 4.29, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.25 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo U. Johns Hopkins).

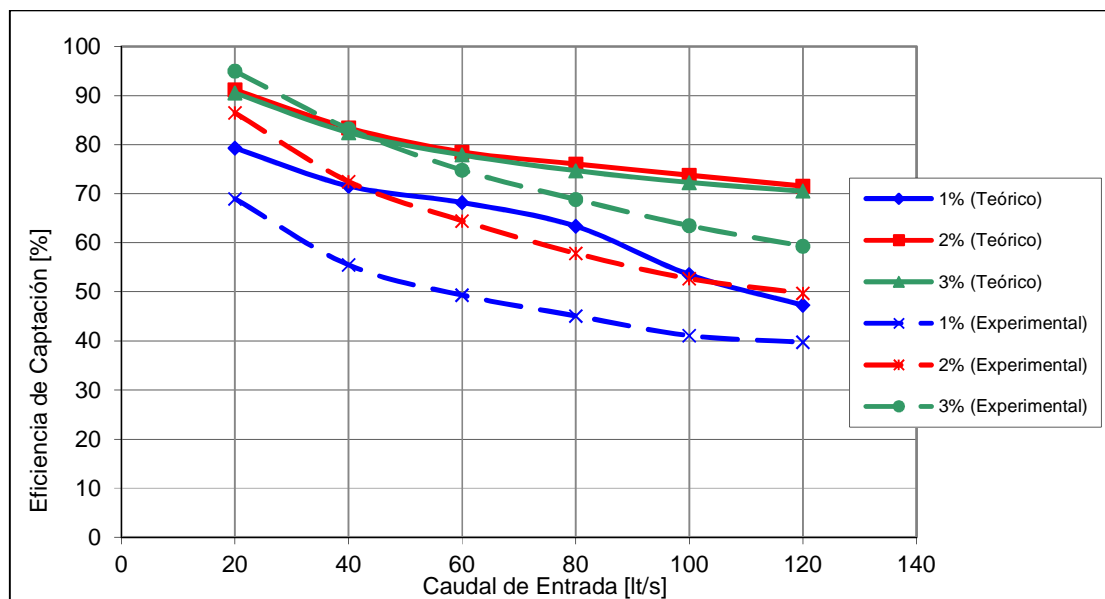


Figura 4.26 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,5% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

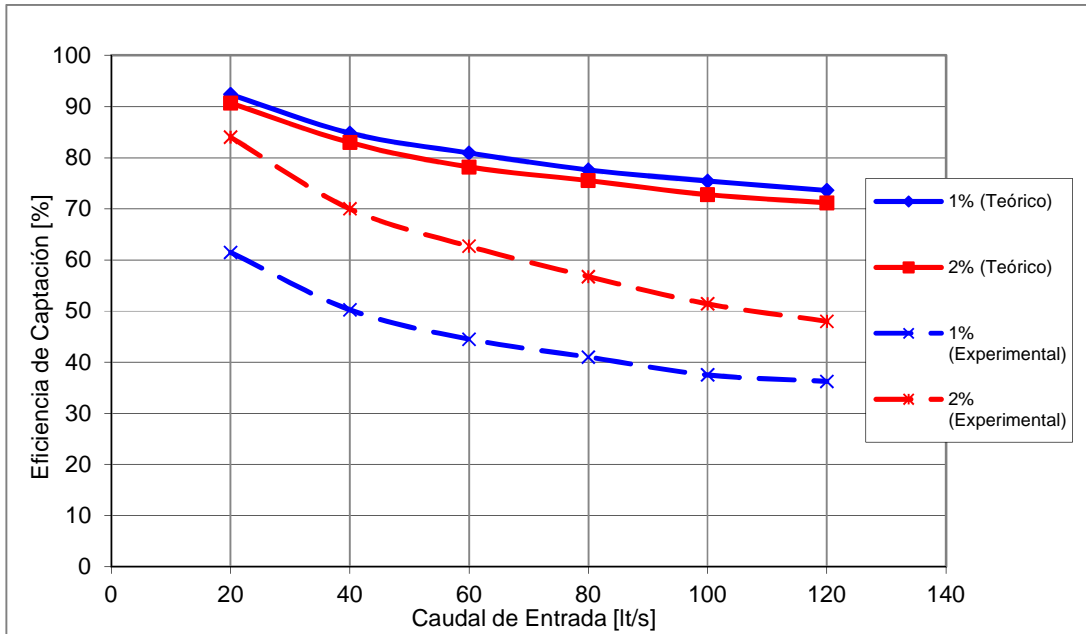


Figura 4.27 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,5% y Pendiente Transversal del 3% 4% y 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

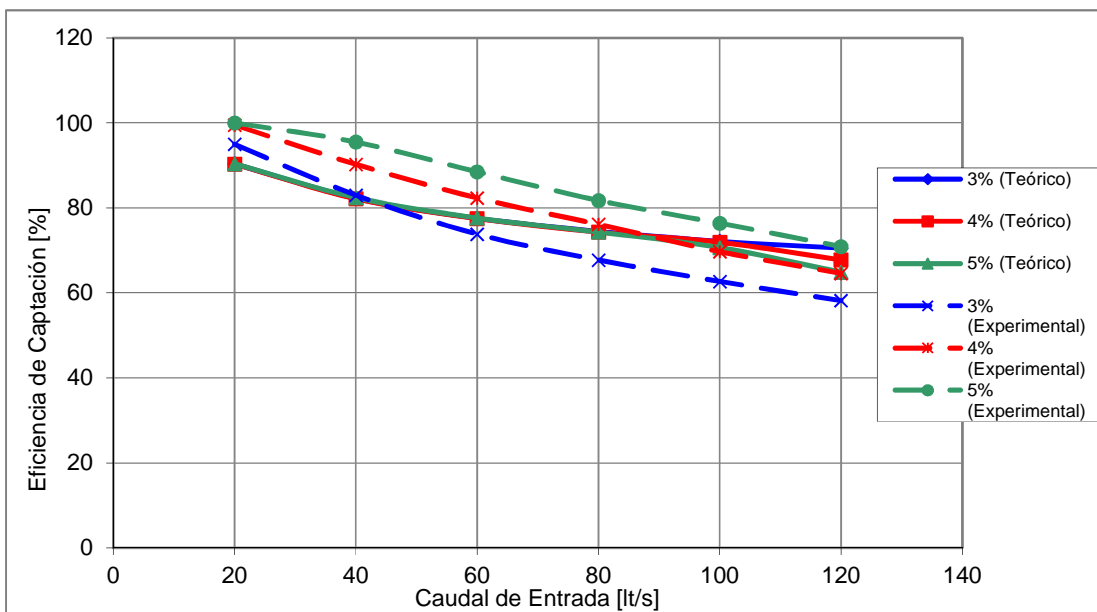


Figura 4.28 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,5% y Pendiente Transversal del 3% 4% y 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

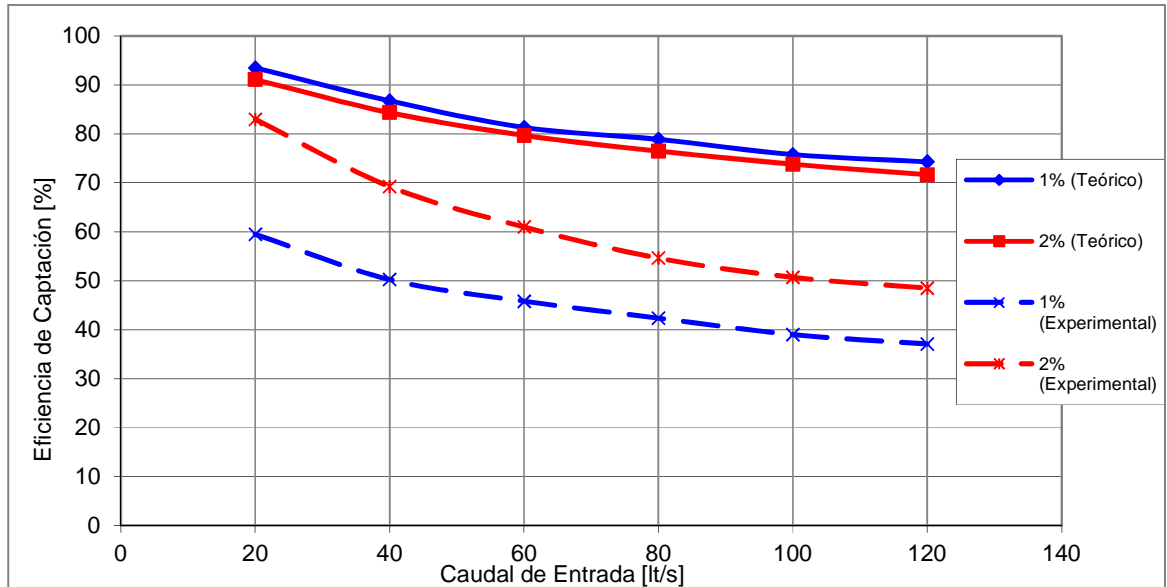
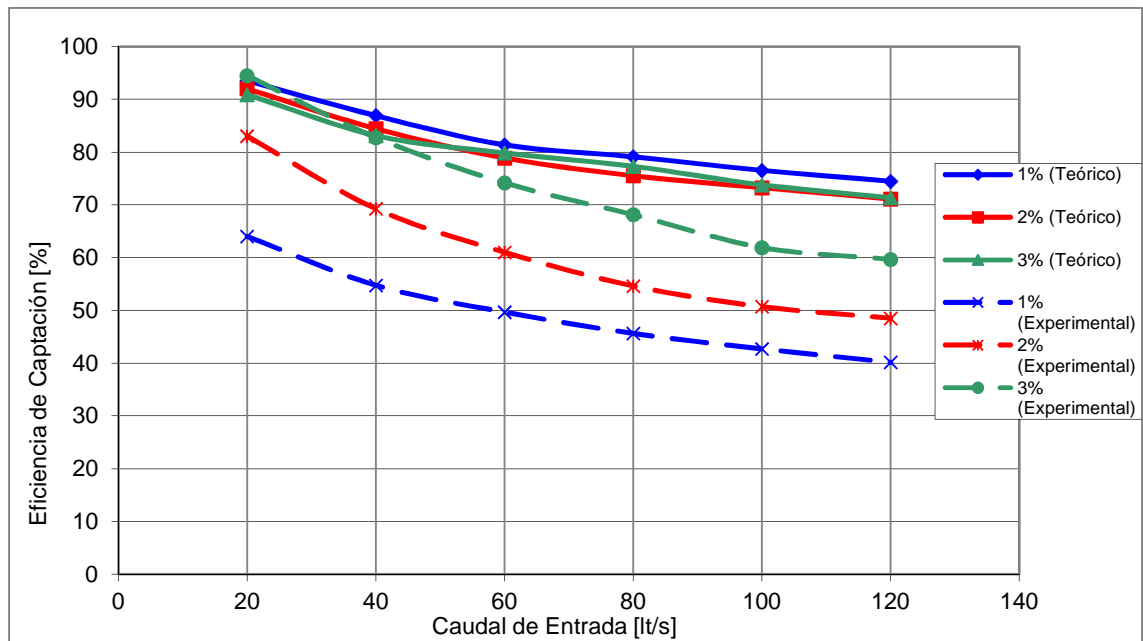


Figura 4.29 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo U. Johns Hopkins).



4.3.2 Sumidero N°2

En las Figuras 4.30 a la 4.35, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.30 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

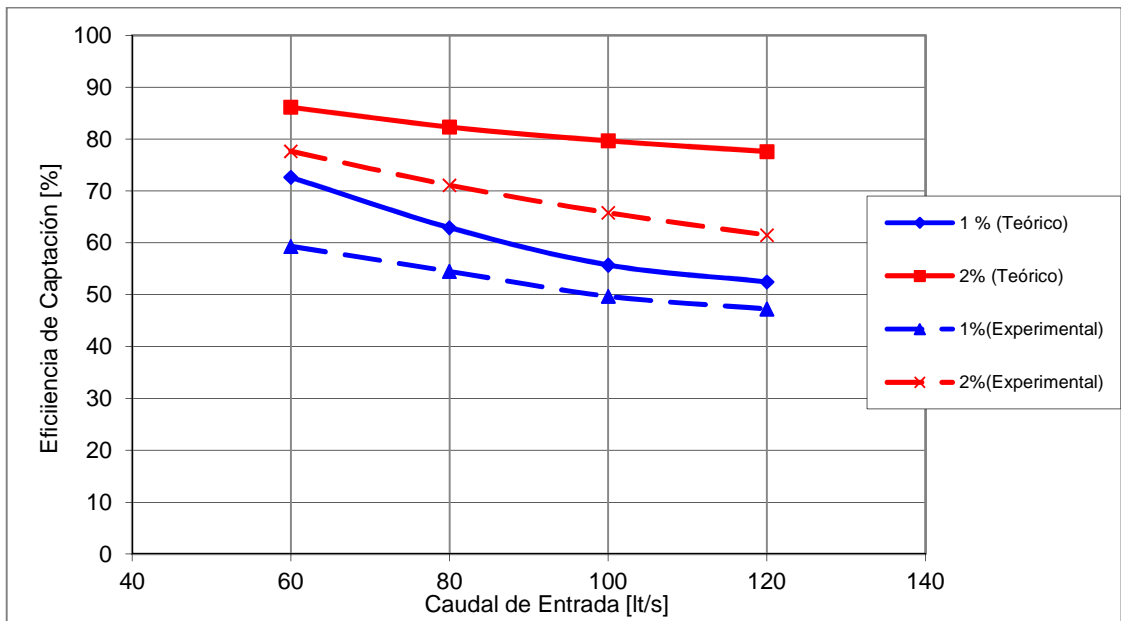


Figura 4.31 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

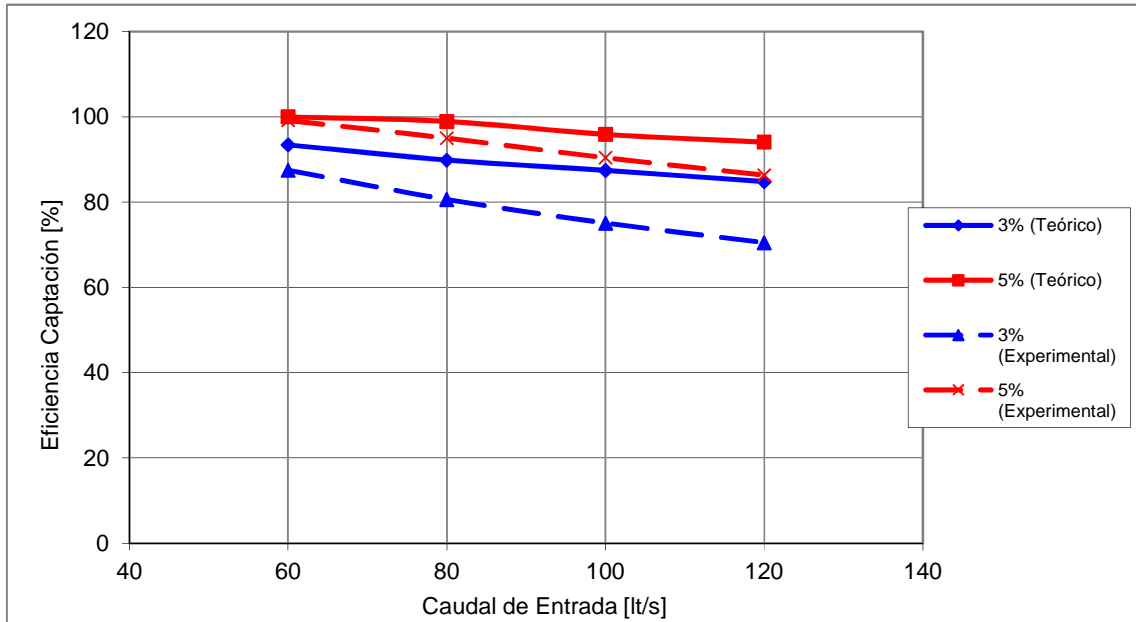


Figura 4.32 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

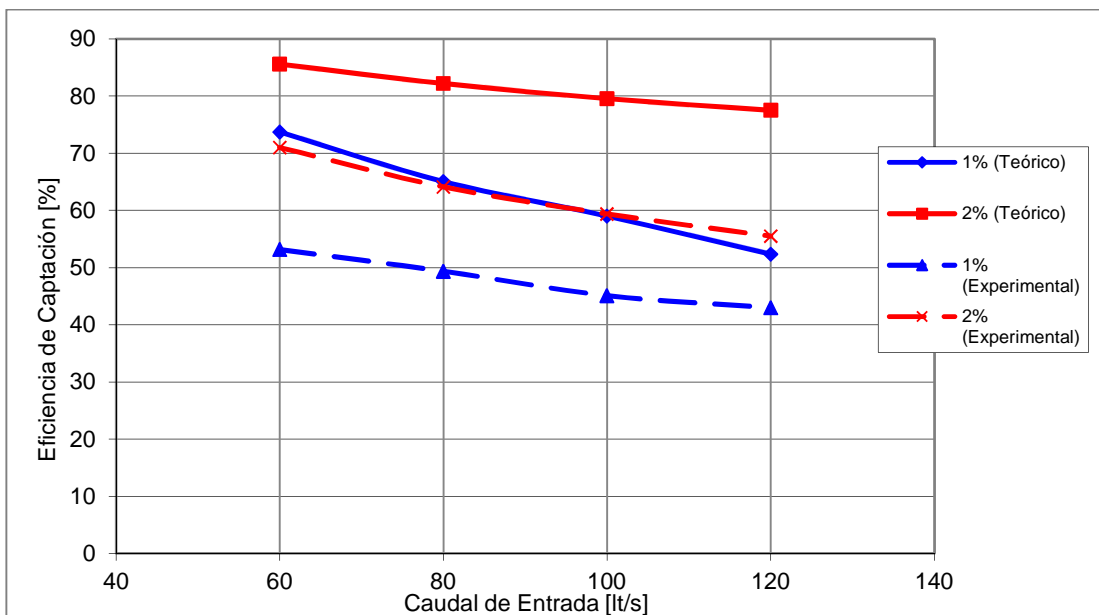


Figura 4.33 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

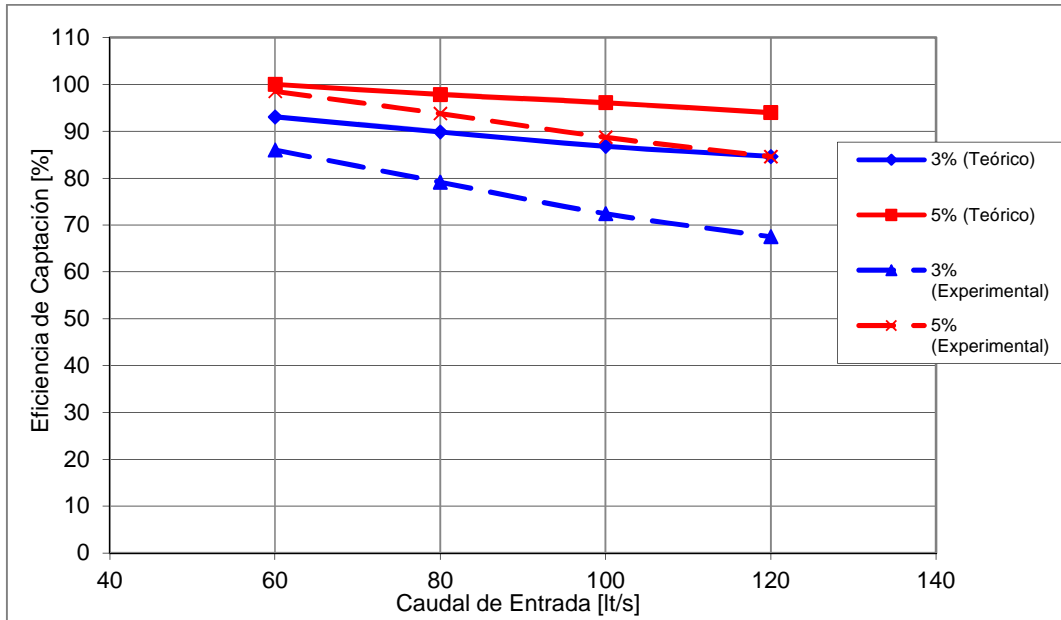


Figura 4.34 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

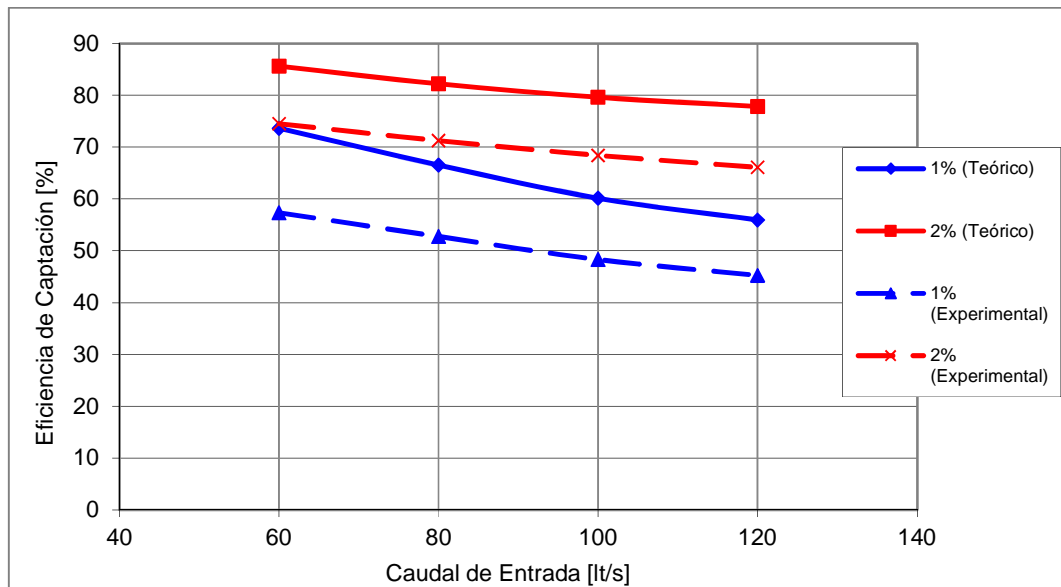
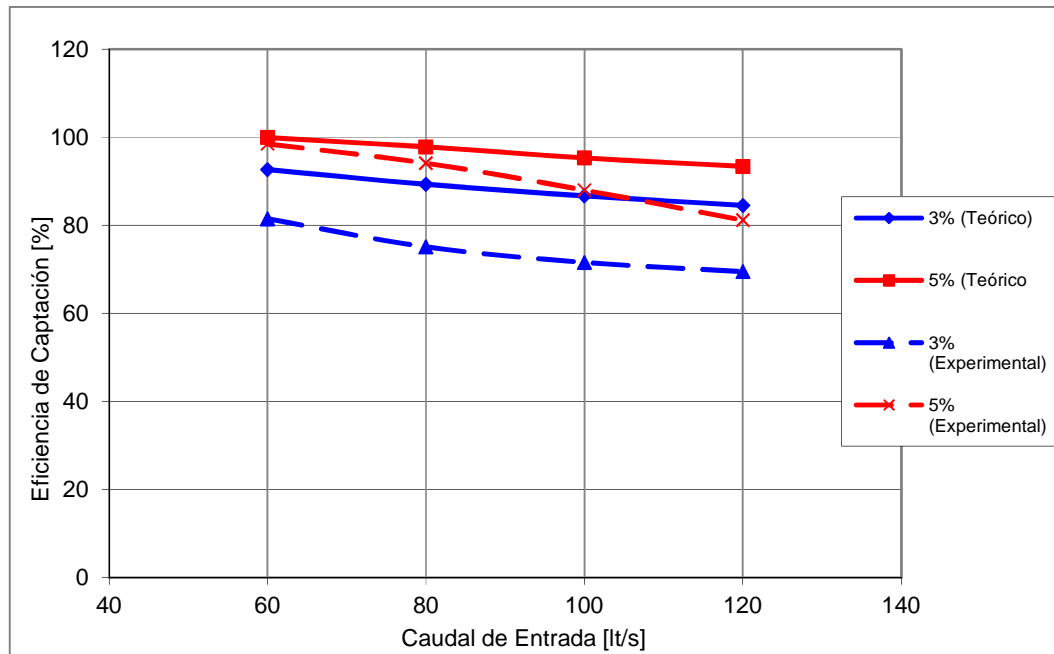


Figura 4.35 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).



4.3.3 Sumidero N°3

En las Figuras 4.36 a la 4.39, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.36 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo U. Johns Hopkins).

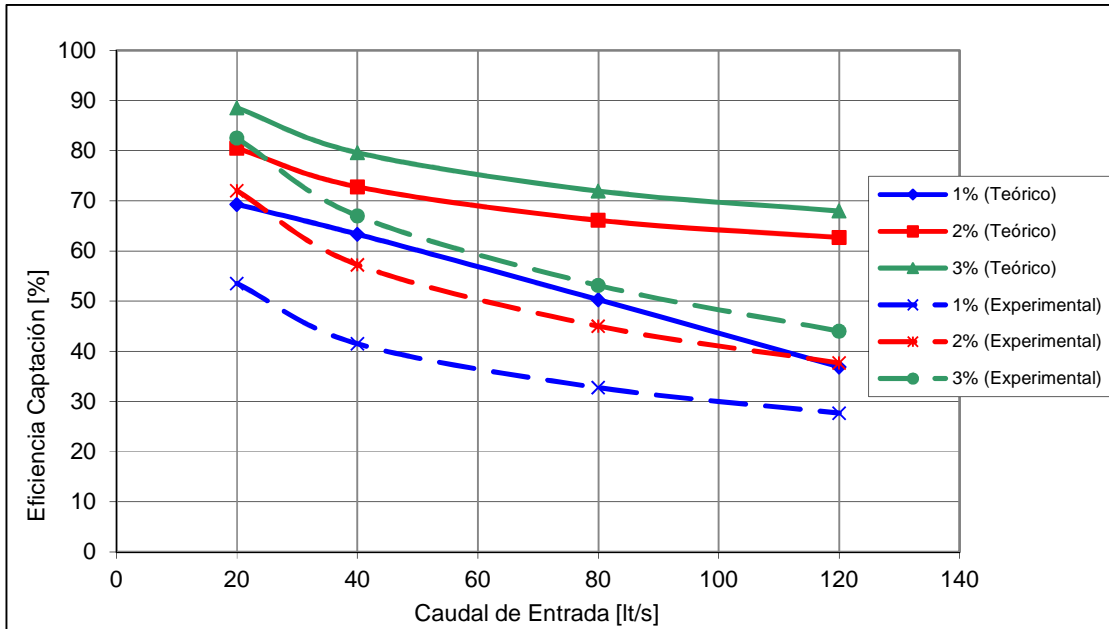


Figura 4.37 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo U. Johns Hopkins).

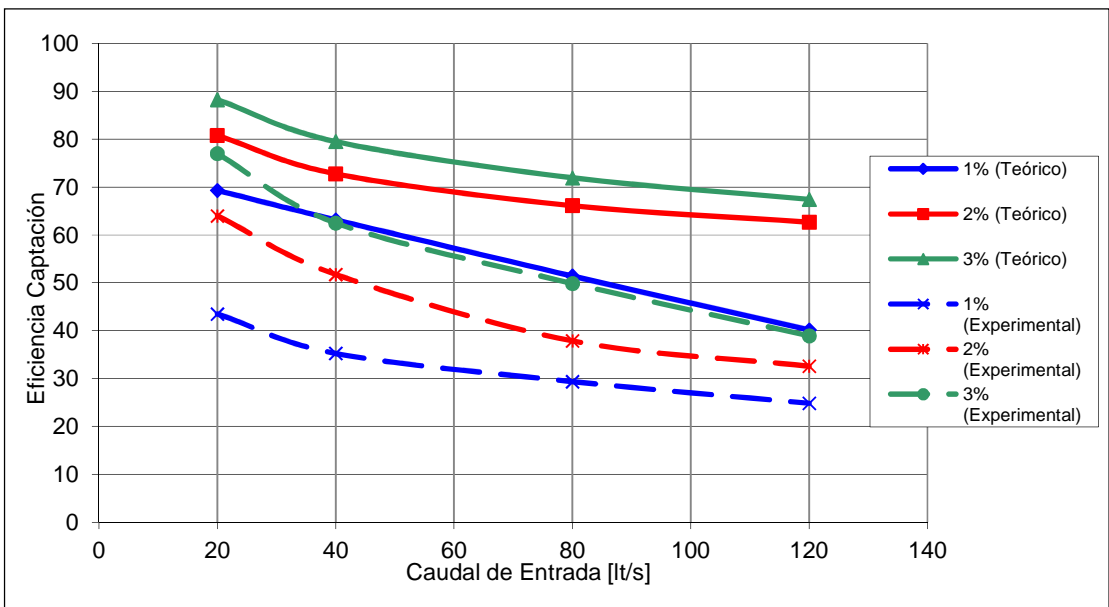


Figura 4.38 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

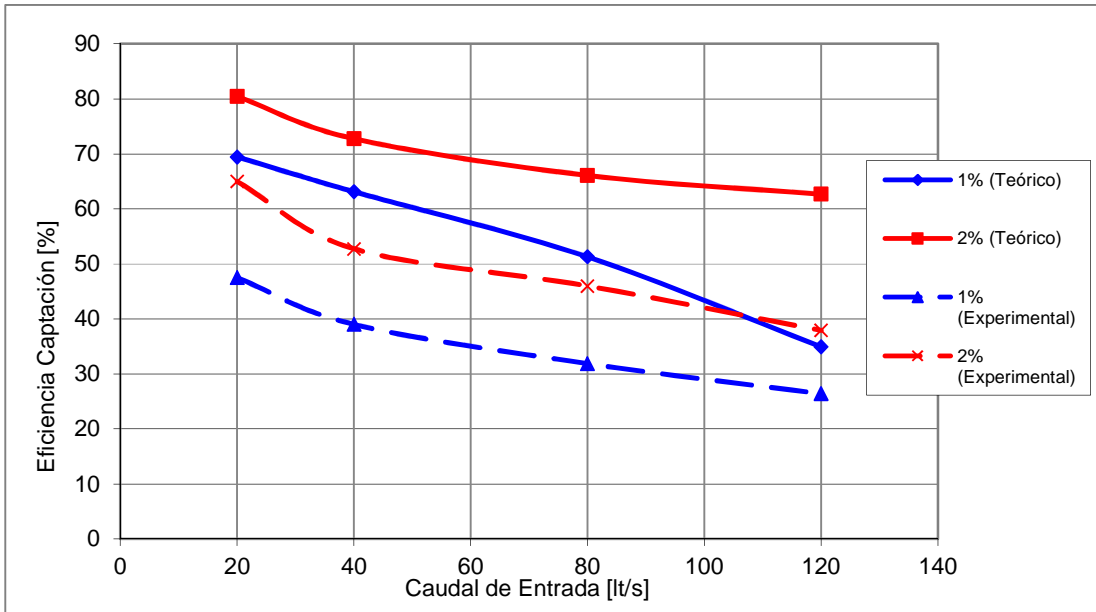
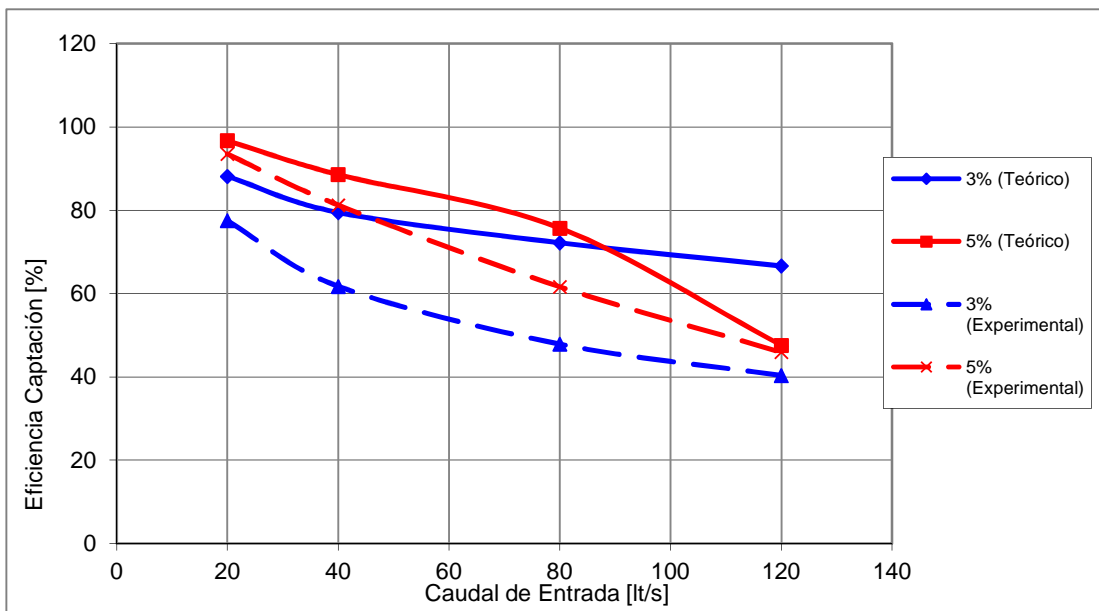


Figura 4.39 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).



4.3.4 Sumidero N°4

En las Figuras 4.40 a la 4.45, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.40 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

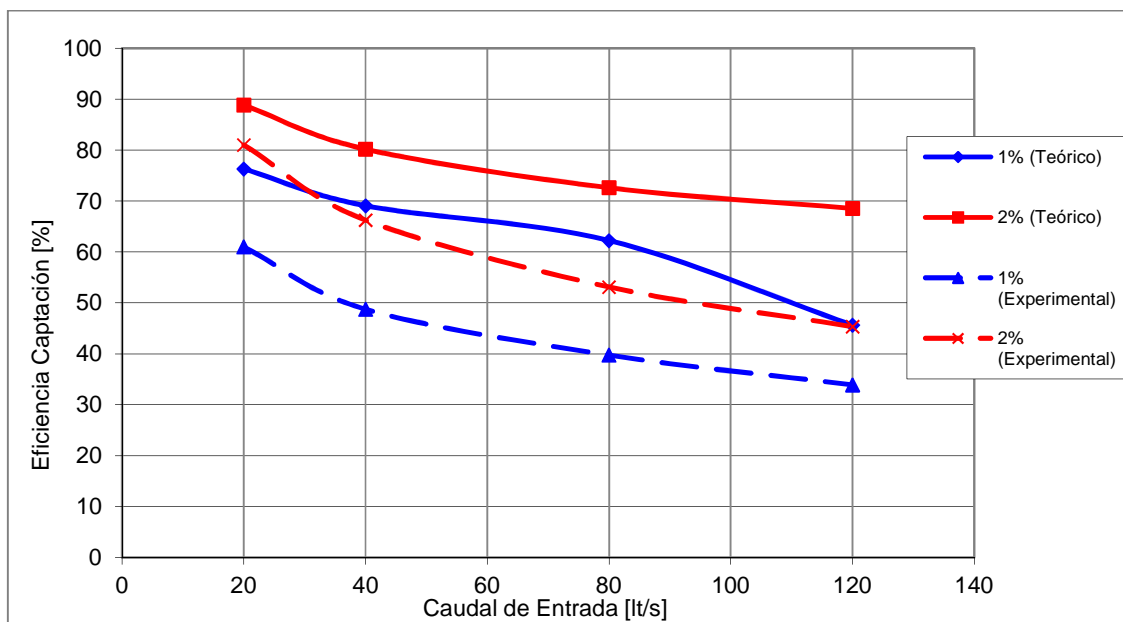


Figura 4.41 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

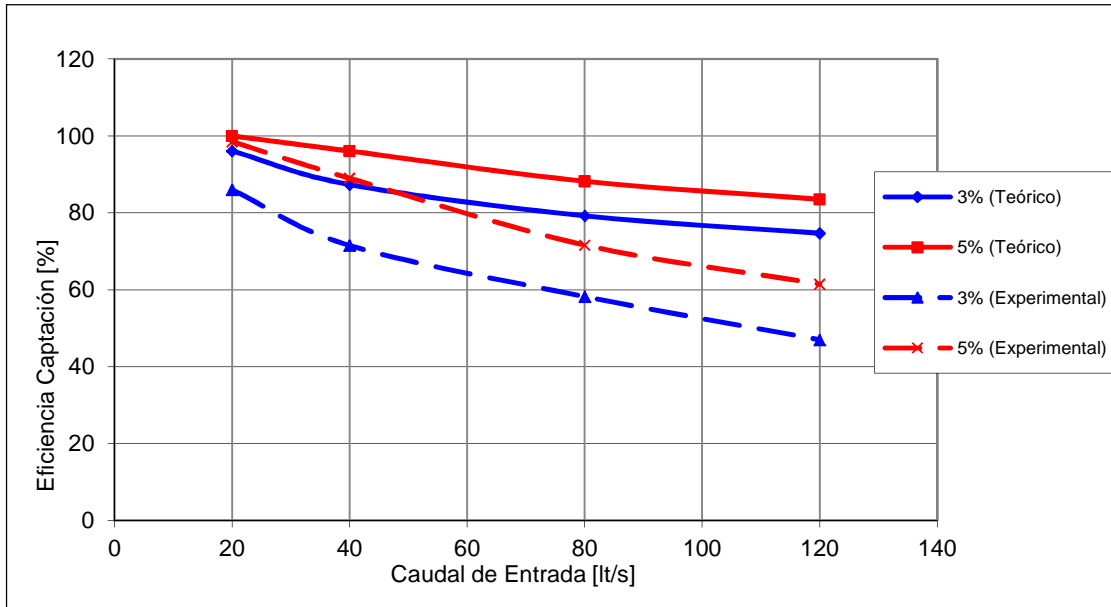


Figura 4.42 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

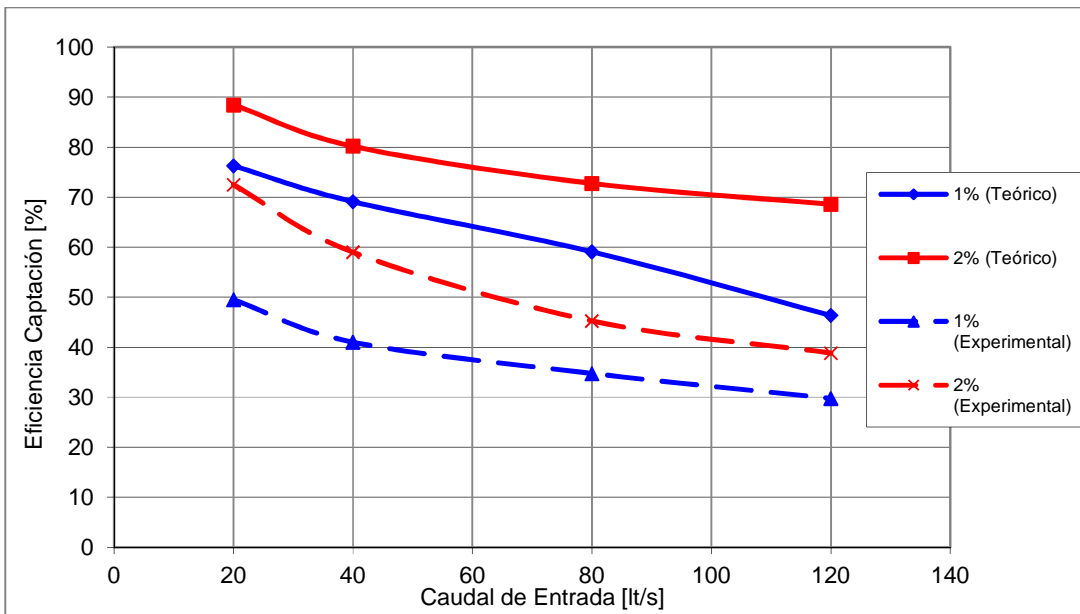


Figura 4.43 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

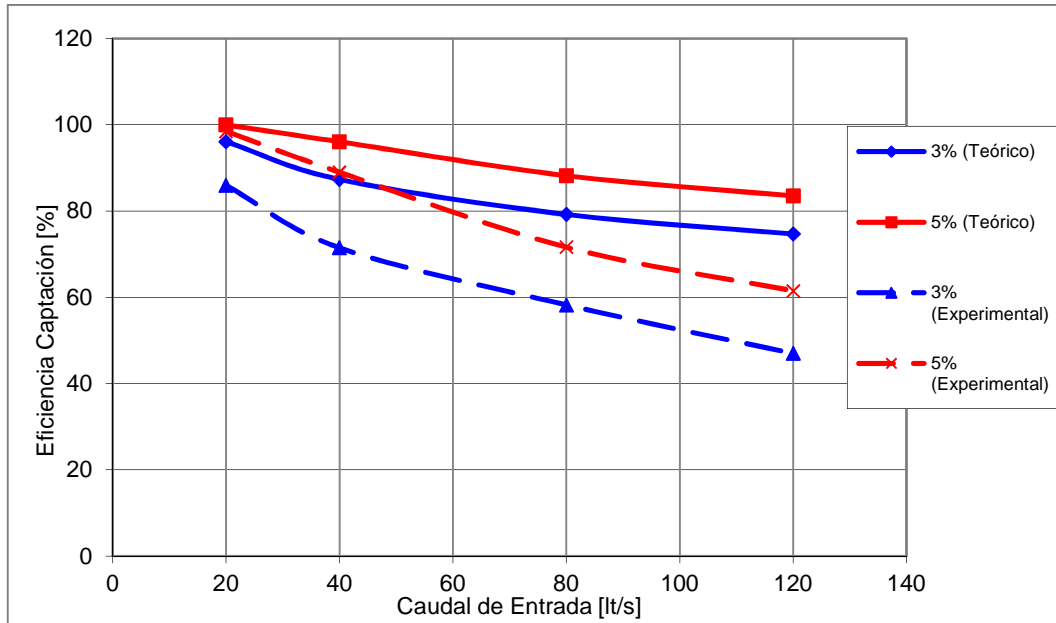


Figura 4.44 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

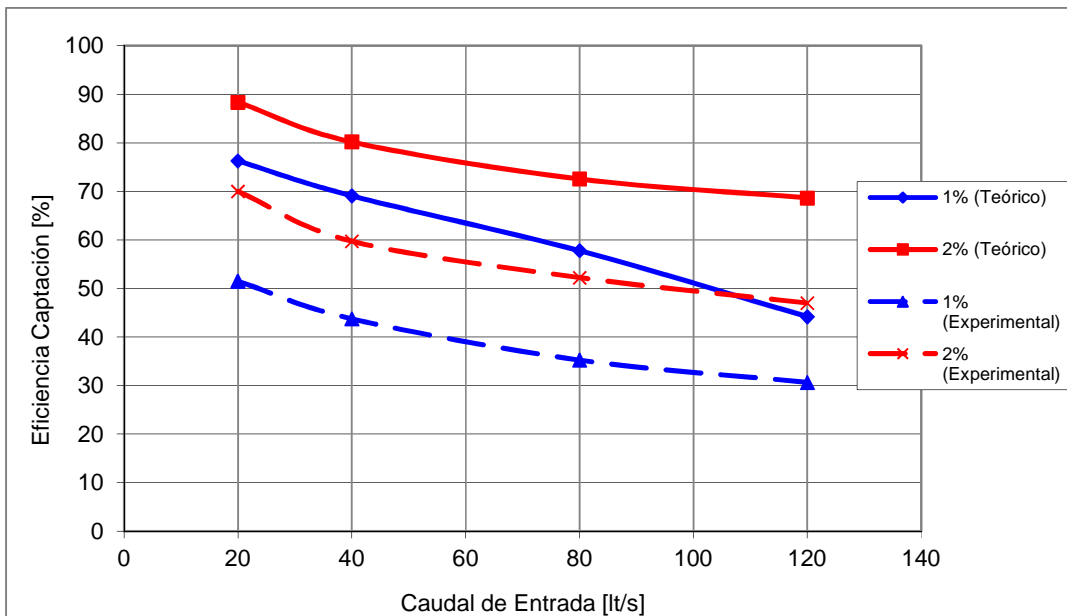
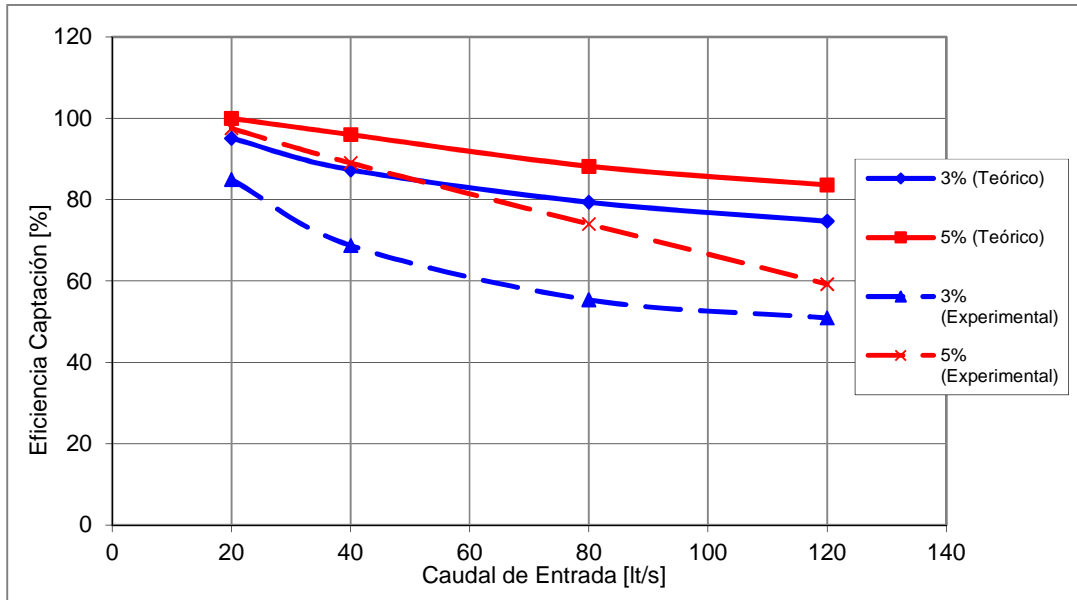


Figura 4.45 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).



4.3.5 Sumidero N°5

En las Figuras 4.46 a la 4.51, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.46 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

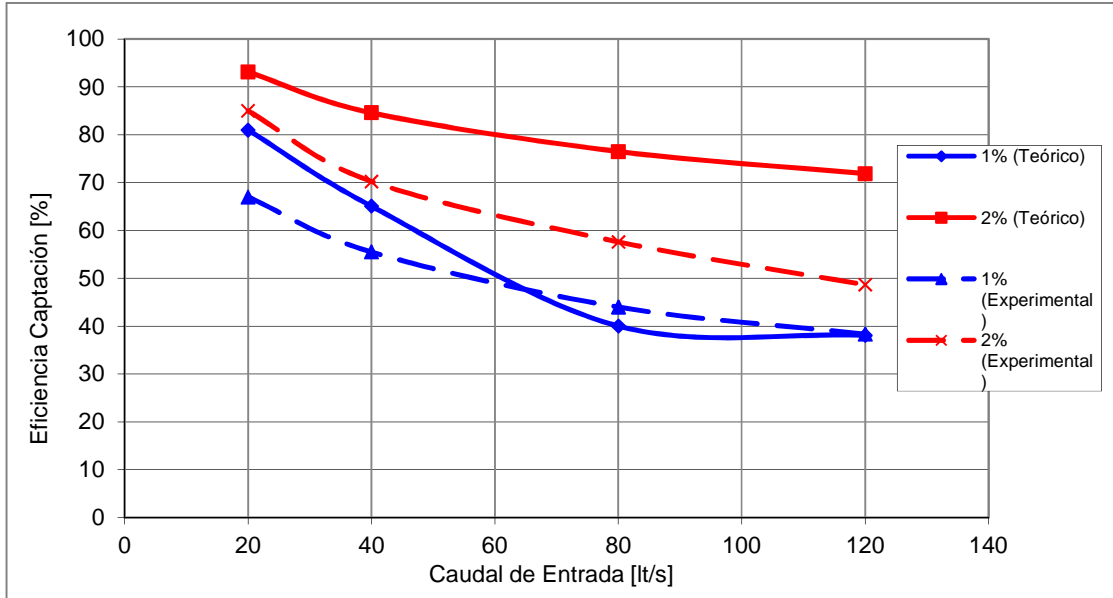


Figura 4.47 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

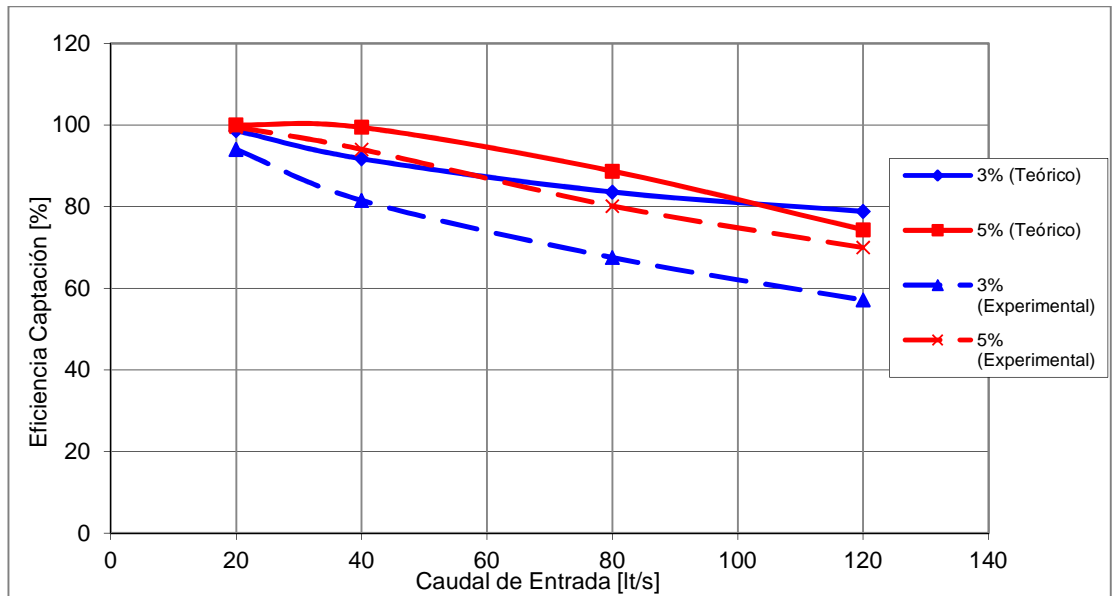


Figura 4.48 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

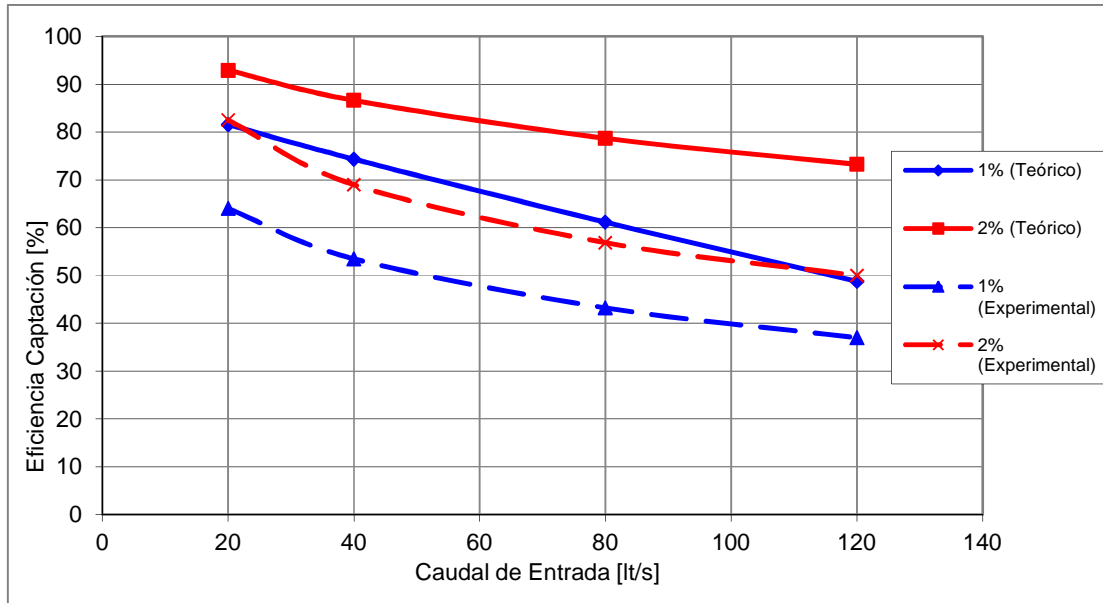


Figura 4.49 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).

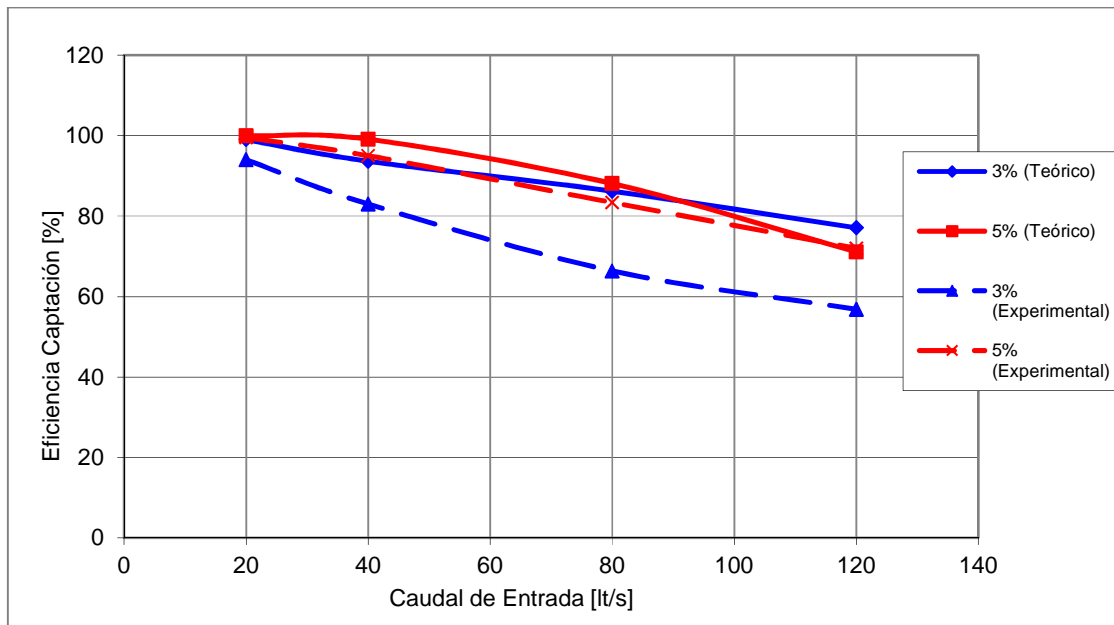


Figura 4.50 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo U. Johns Hopkins).

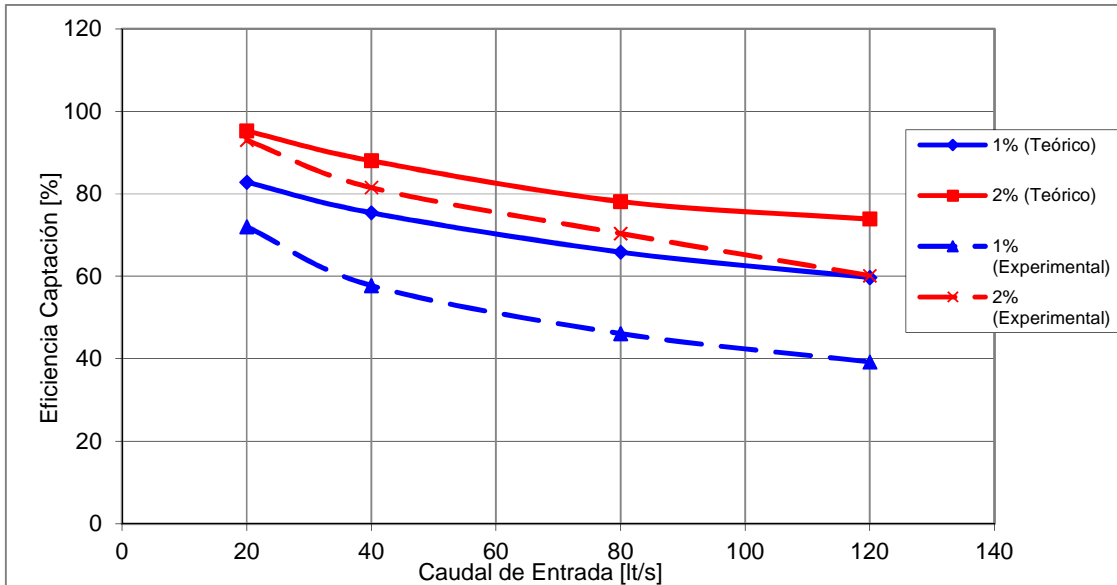
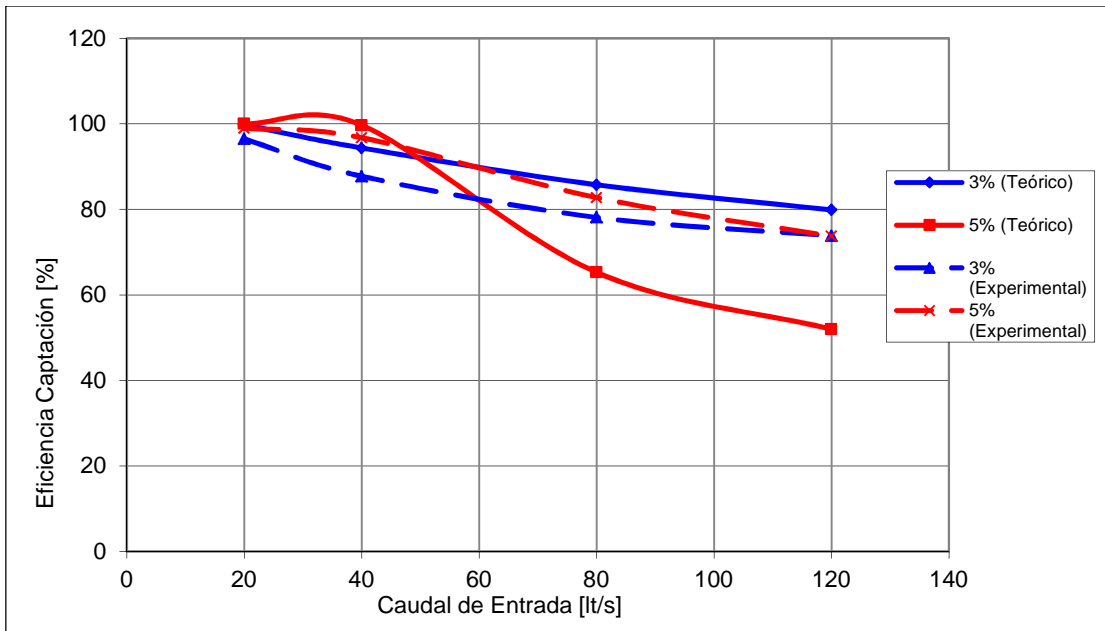


Figura 4.51 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo U. Johns Hopkins).



4.4 Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias.
Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).

A continuación se detallan los principales cálculos y análisis realizados al aplicar el método recomendado por SERVIU para el diseño de sumideros con rejillas.

4.4.1 Sumidero N°1

En las Figuras 4.52 a la 4.57, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.52 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo Recomendado por SERVIU).

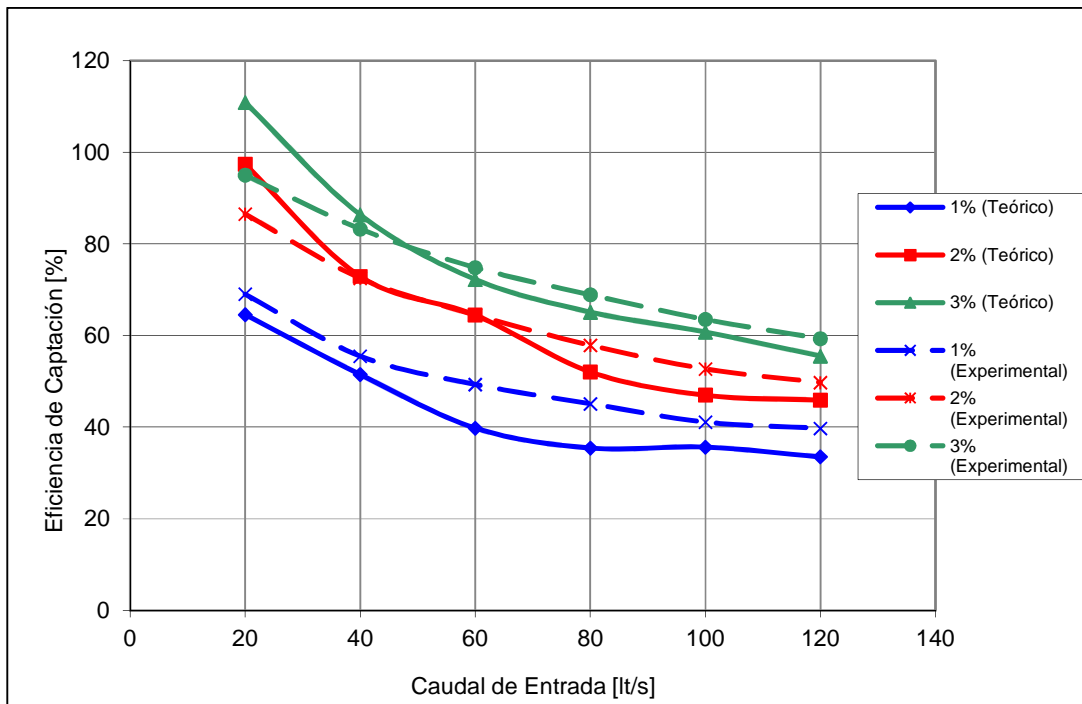


Figura 4.53 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,5% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

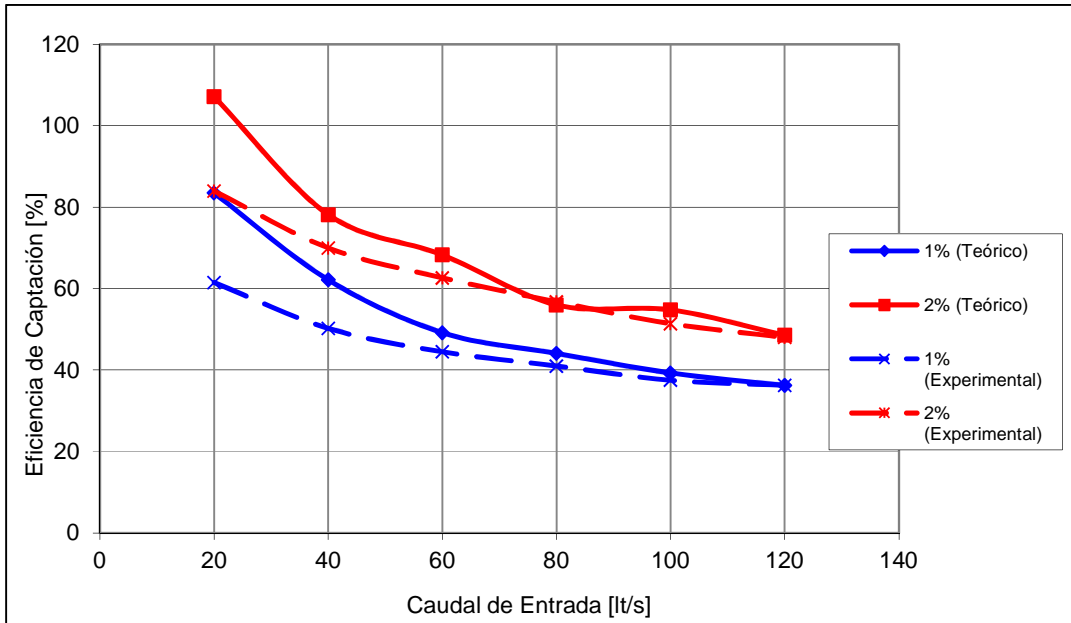


Figura 4.54 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 0,5% y Pendiente Transversal del 3% 4% y 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

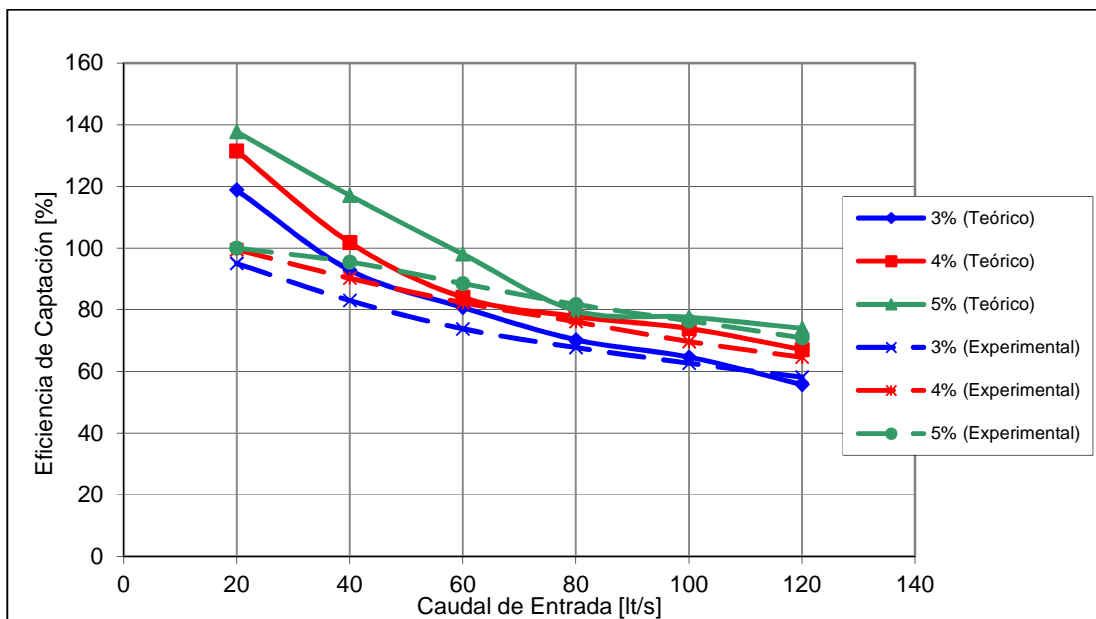


Figura 4.55 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

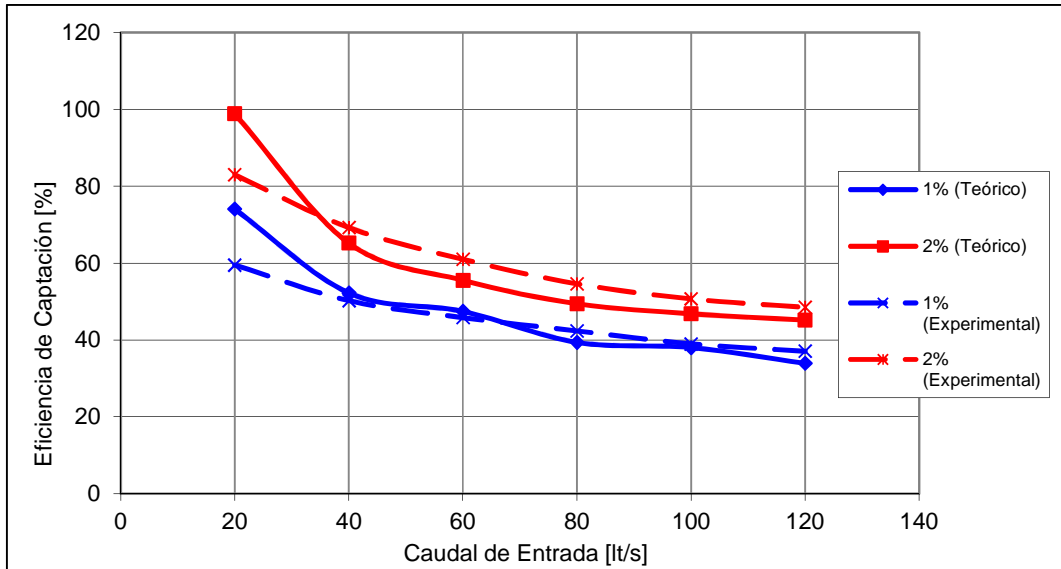


Figura 4.56 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

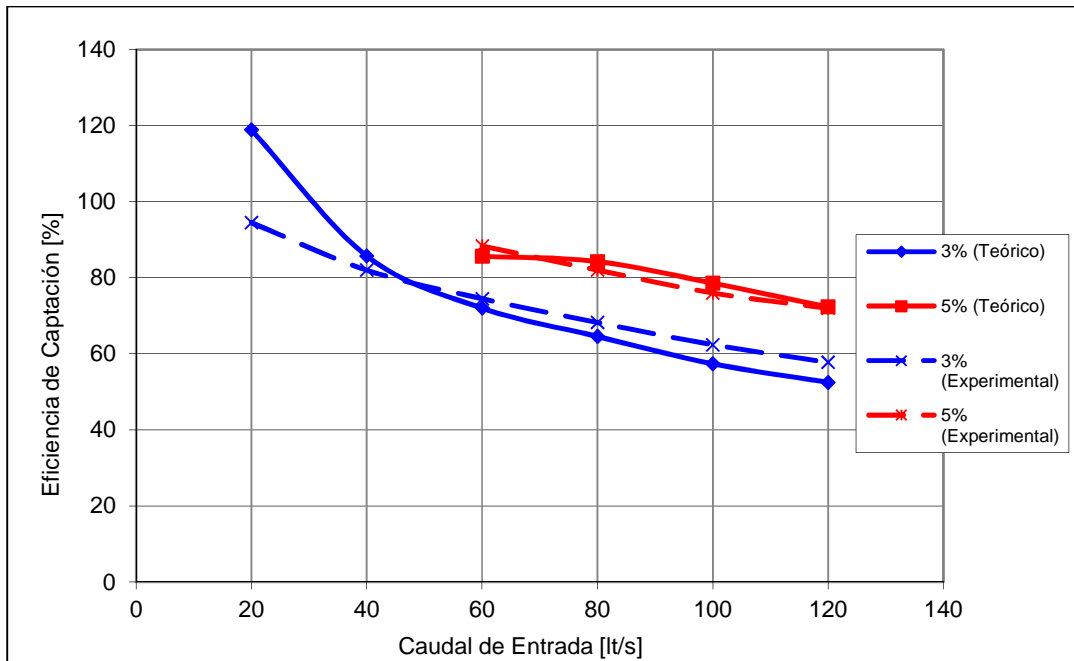
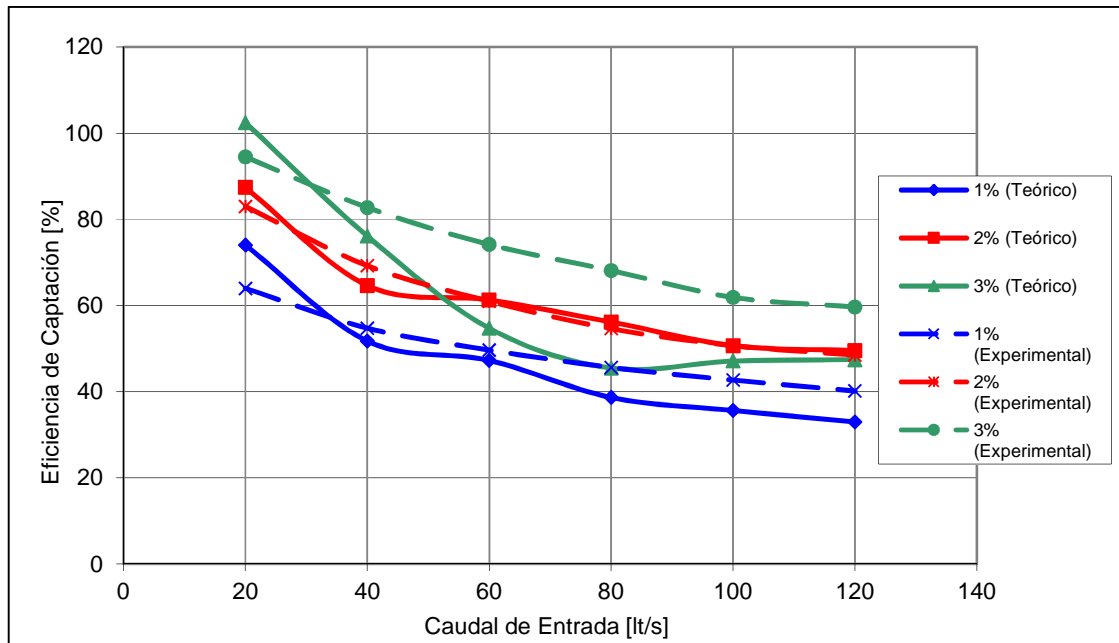


Figura 4.57 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°1 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo Recomendado por SERVIU).



4.4.2 Sumidero N°2

En las Figuras 4.58 a la 4.63, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.58 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

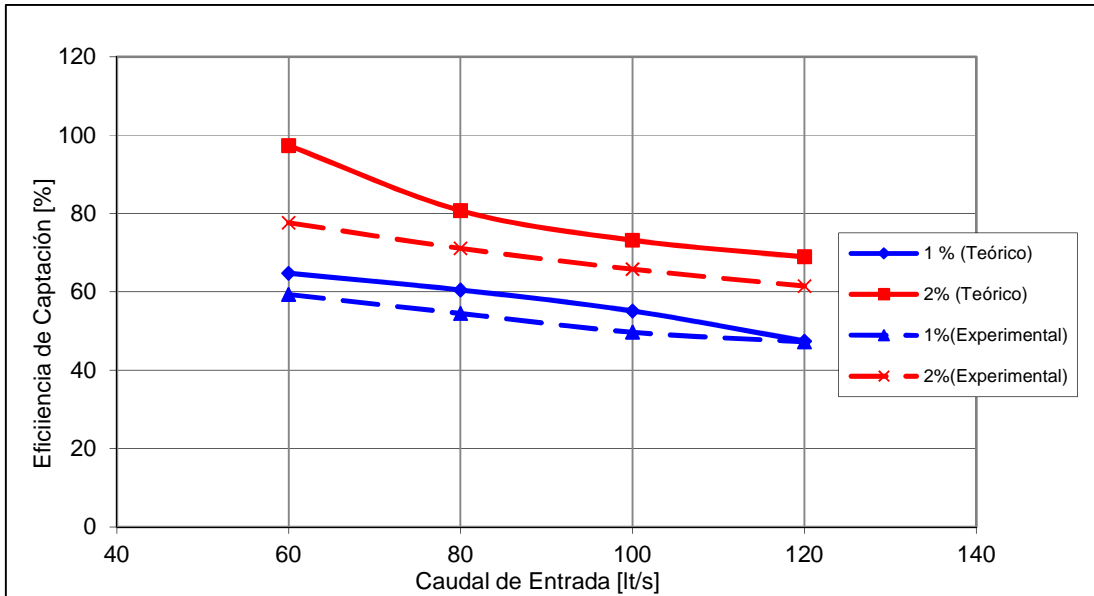


Figura 4.59 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

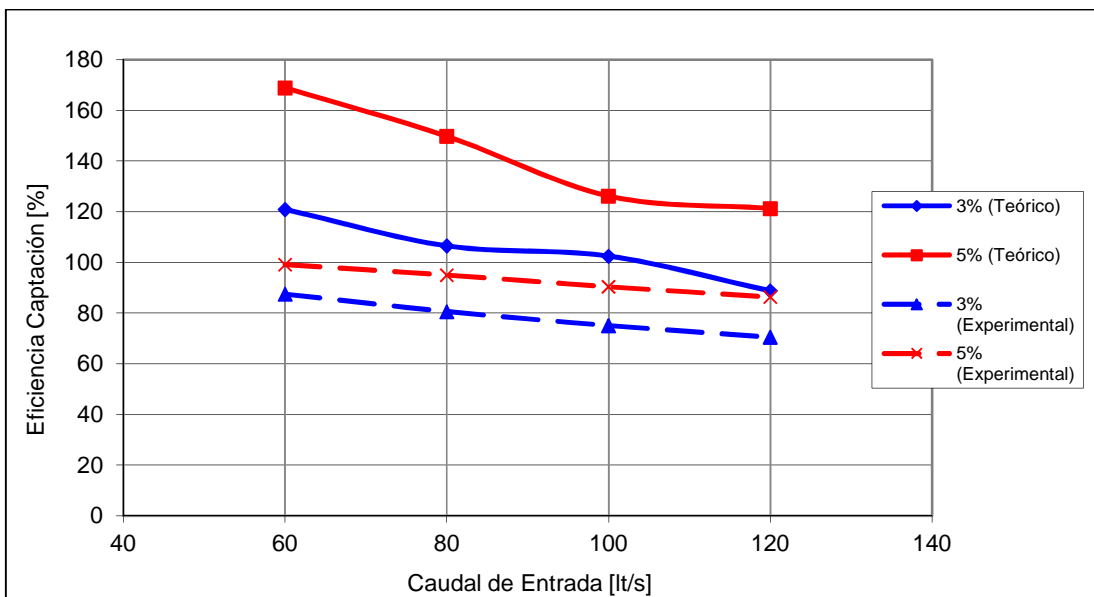


Figura 4.60 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

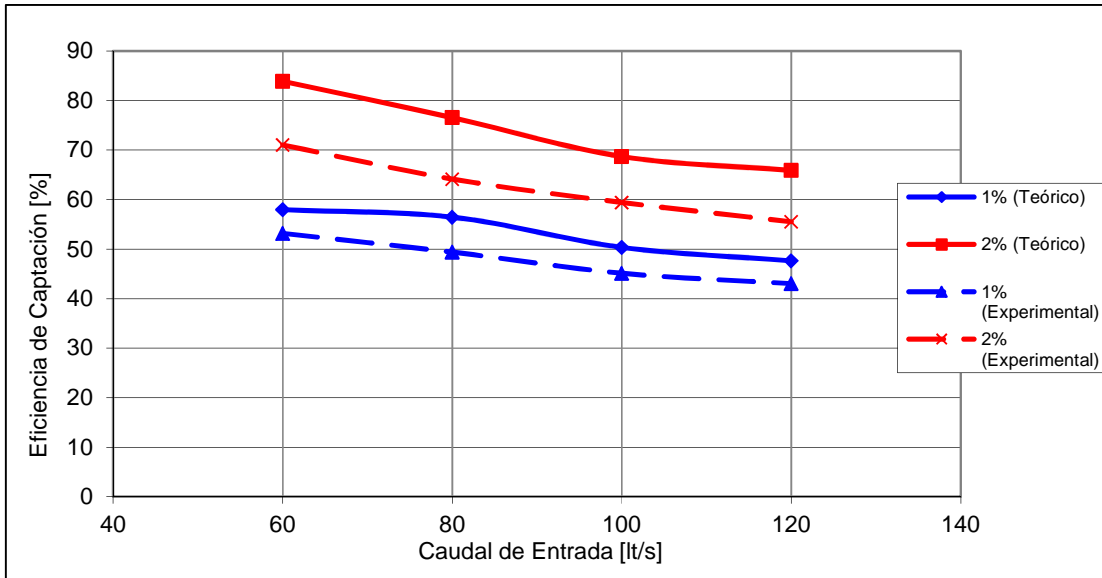


Figura 4.61 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

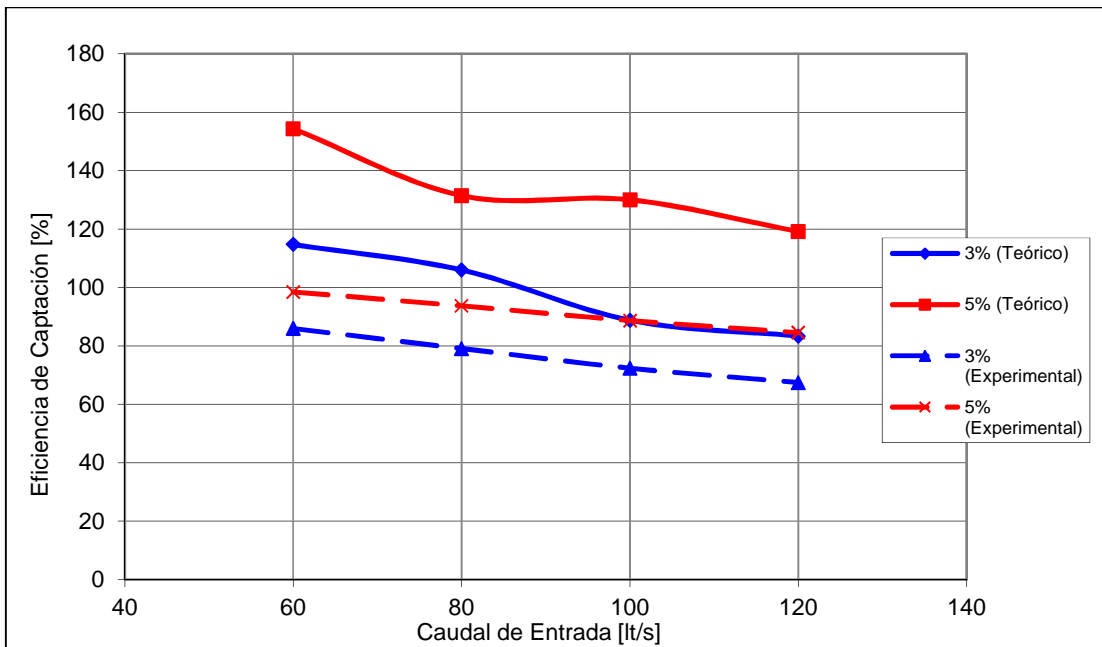


Figura 4.62 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

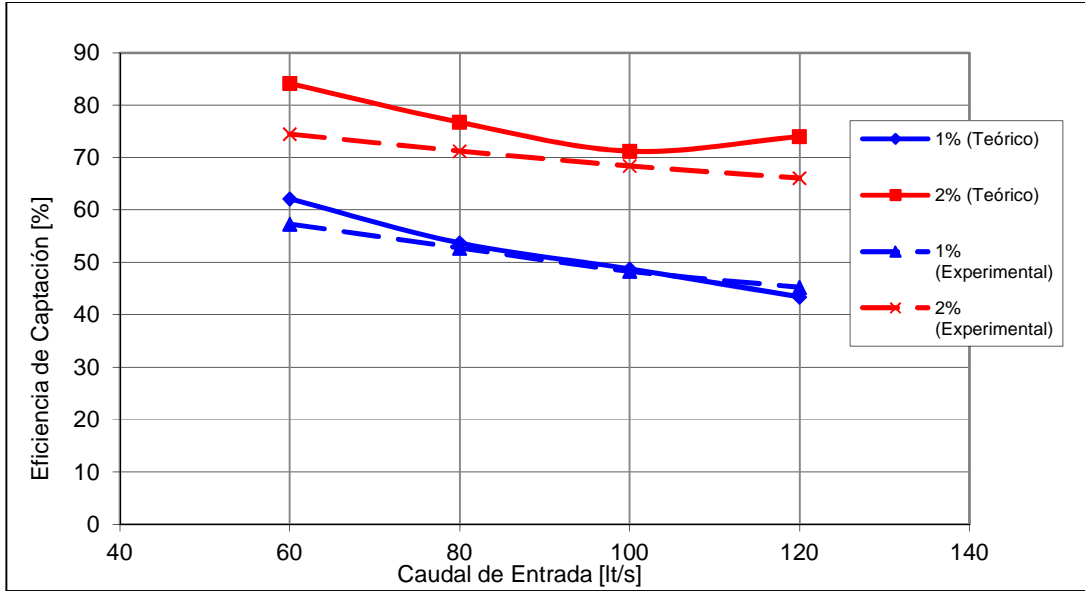
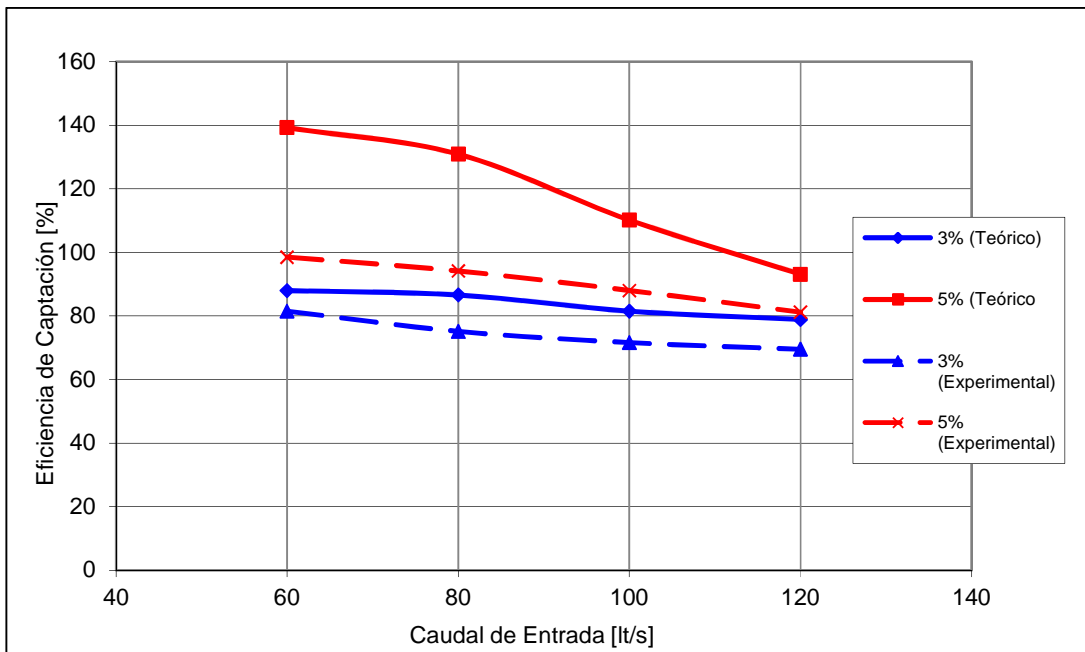


Figura 4.63 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°2 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).



4.4.3 Sumidero N°3

En las Figuras 4.64 a la 4.67, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.64 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo Recomendado por SERVIU).

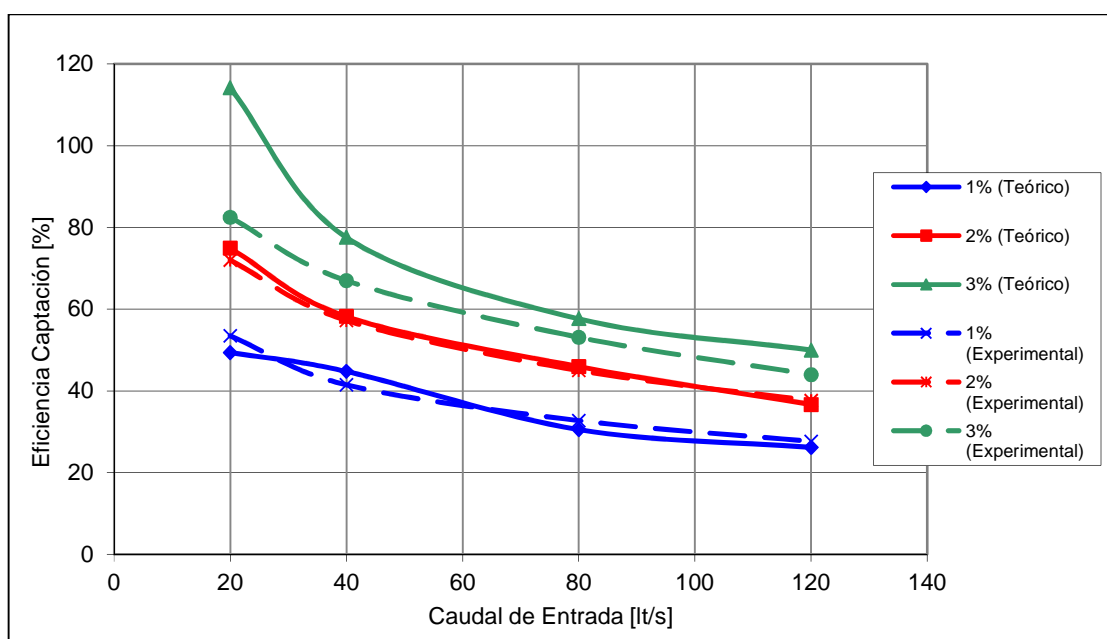


Figura 4.65 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% y 3% (Modelo Recomendado por SERVIU).

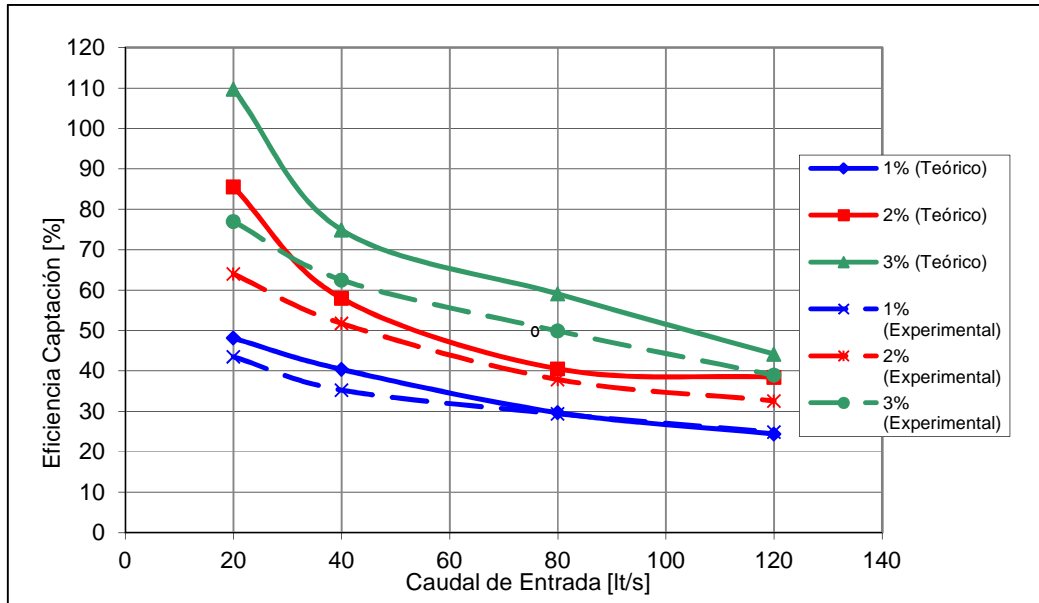


Figura 4.66 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

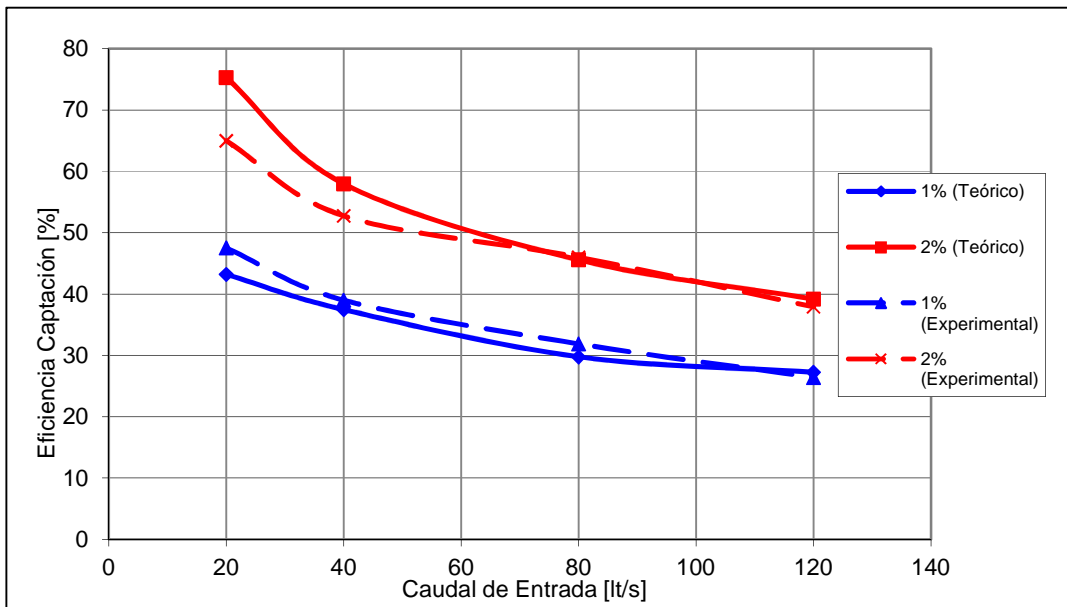
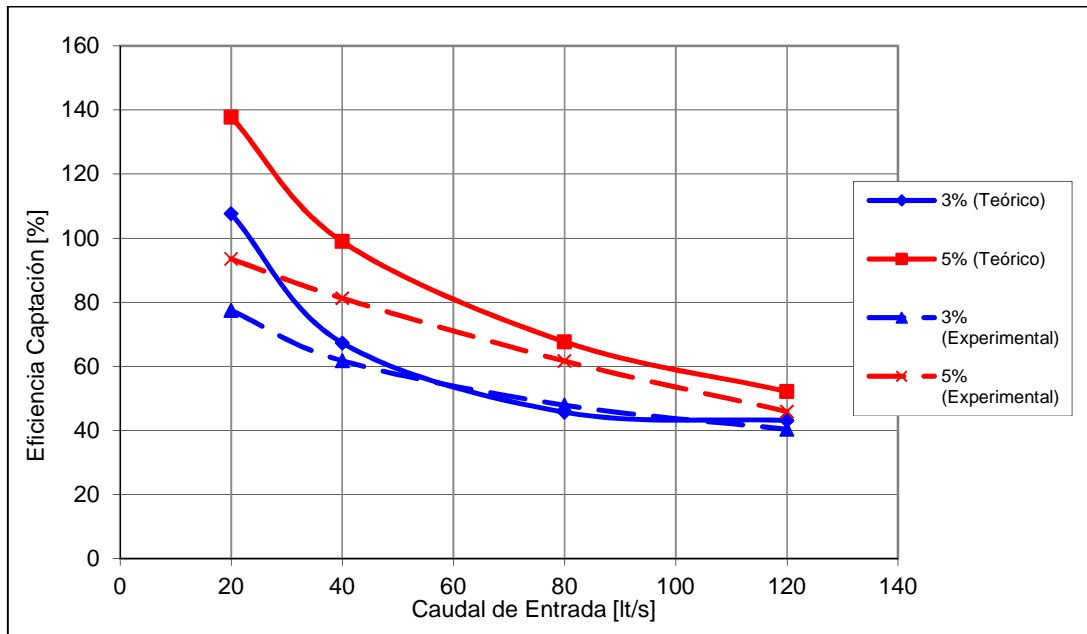


Figura 4.67 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°3 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).



4.4.4 Sumidero N°4

En las Figuras 4.68 a la 4.73, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.68 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

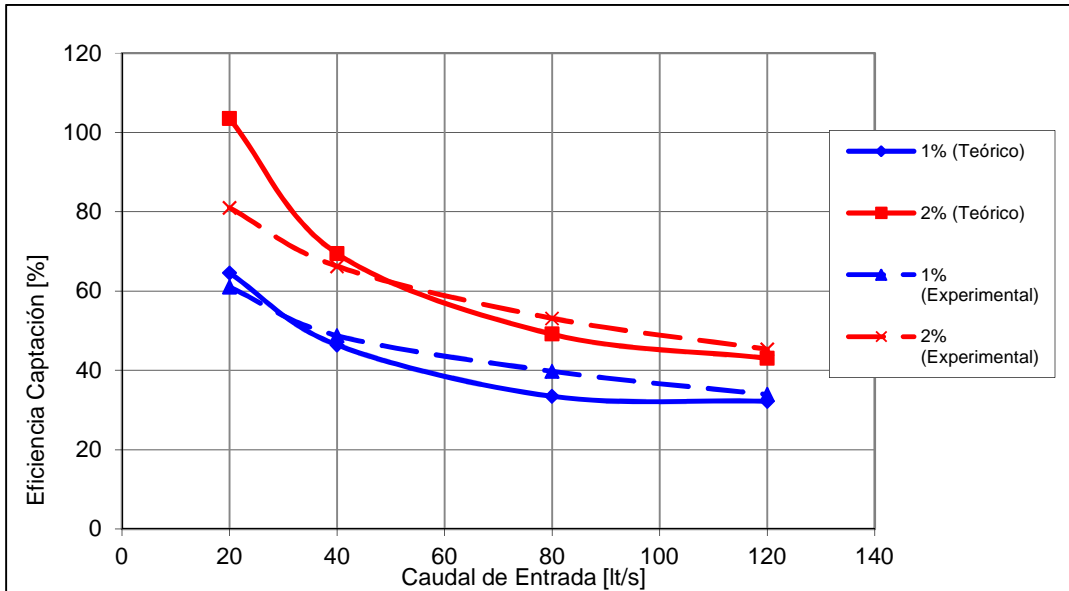


Figura 4.69 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

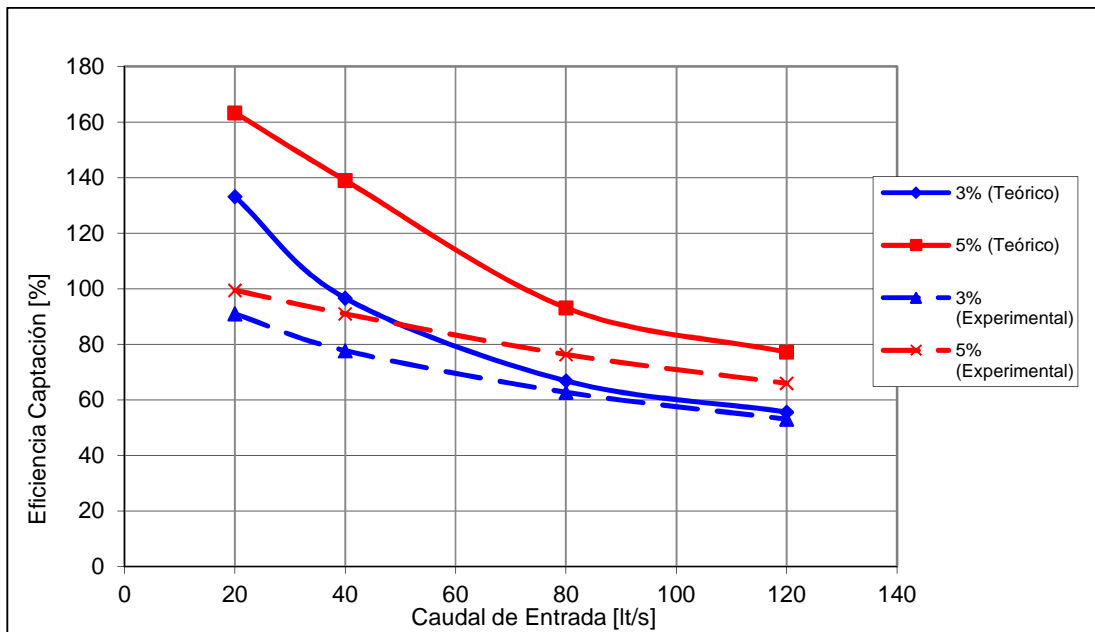


Figura 4.70 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

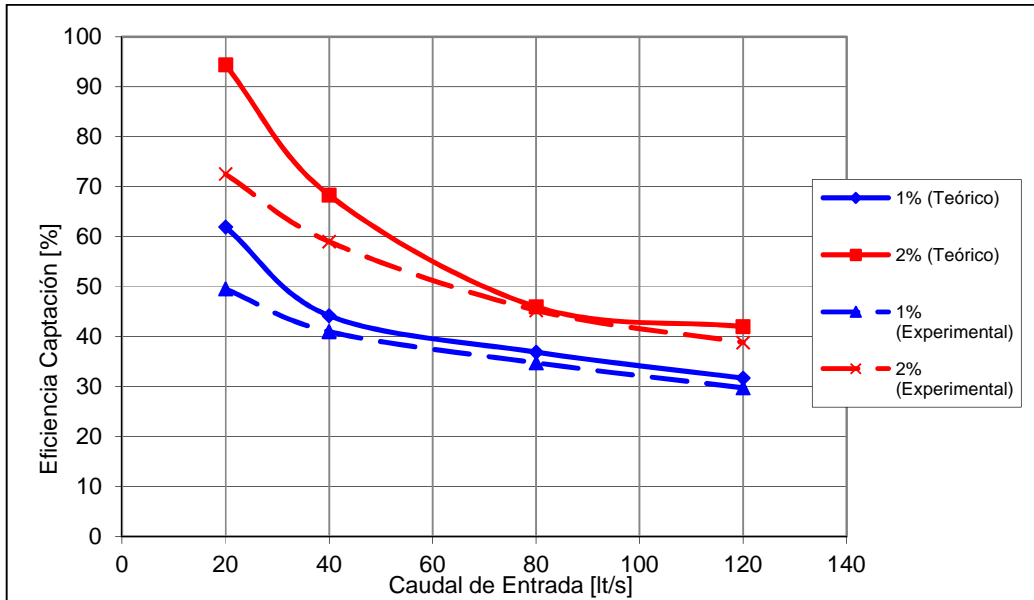


Figura 4.71 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

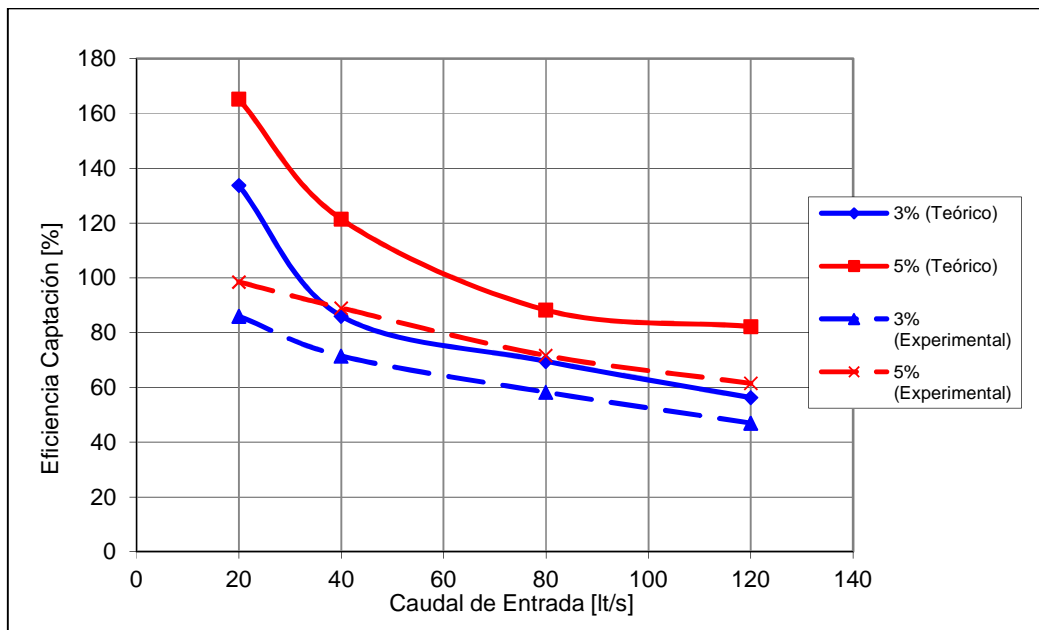


Figura 4.72 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

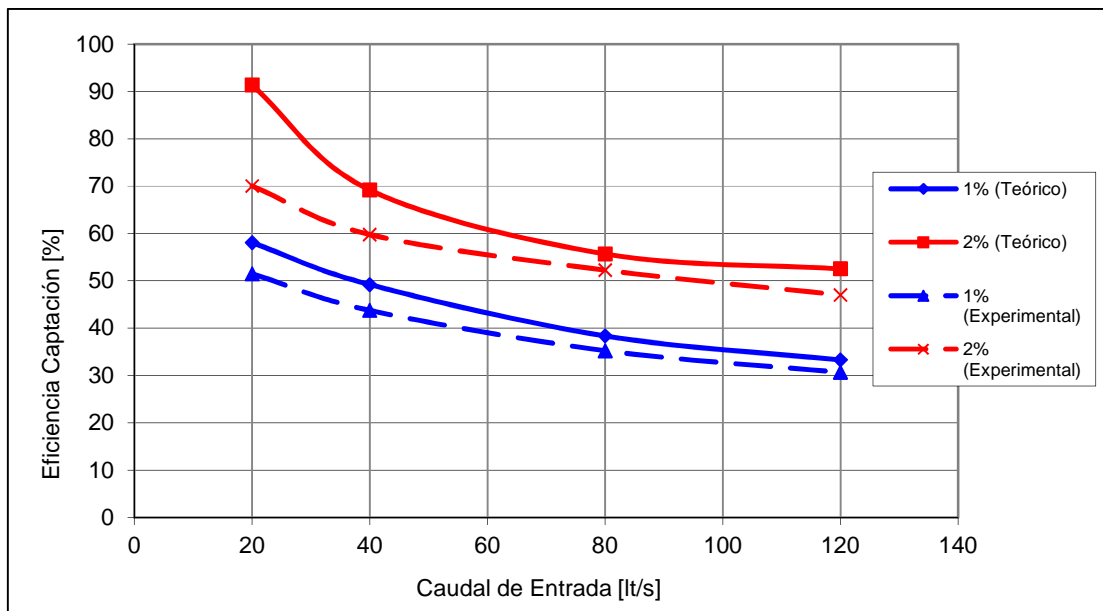
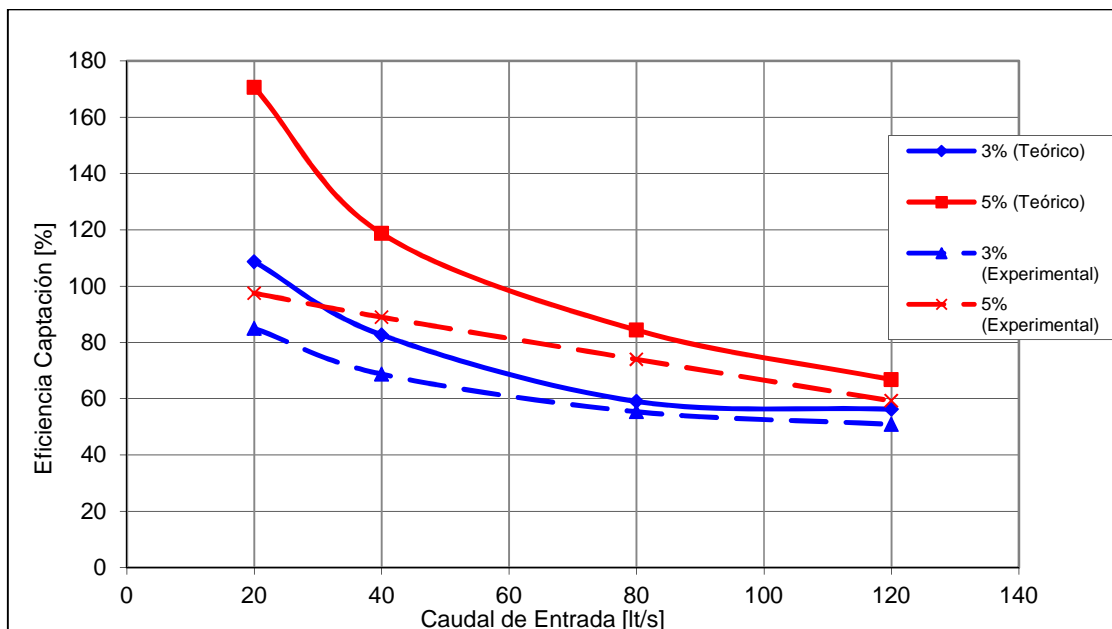


Figura 4.73 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°4 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).



4.4.5 Sumidero N°5

En las Figuras 4.74 a la 4.79, se muestran los resultados gráficos de aplicar el modelo para las diferentes pendientes longitudinales y transversales de la plataforma de estudio.

Figura 4.74 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

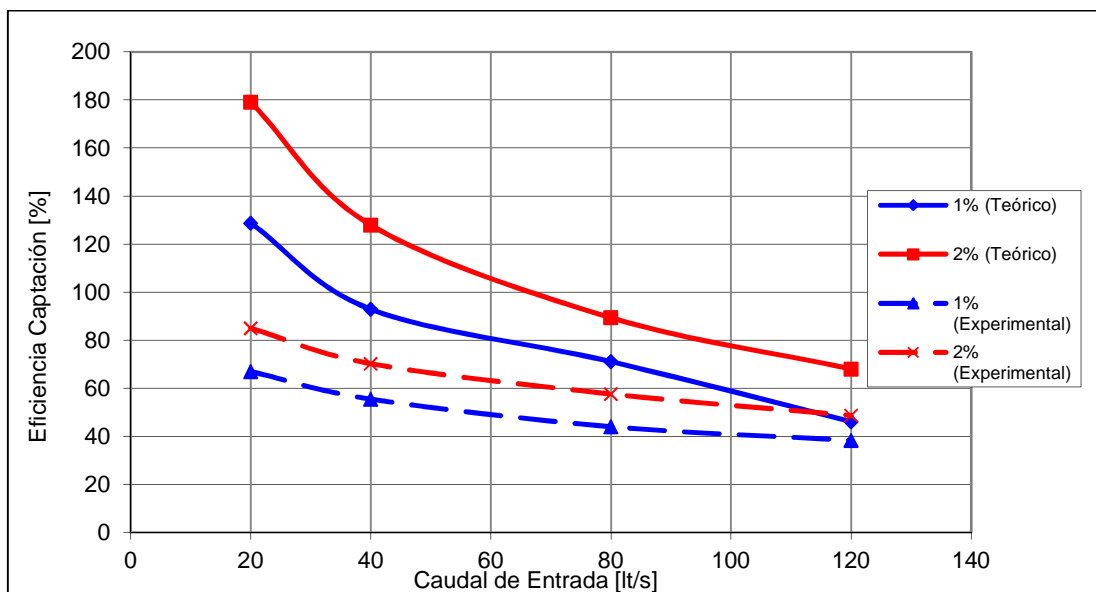


Figura 4.75 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 0,1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

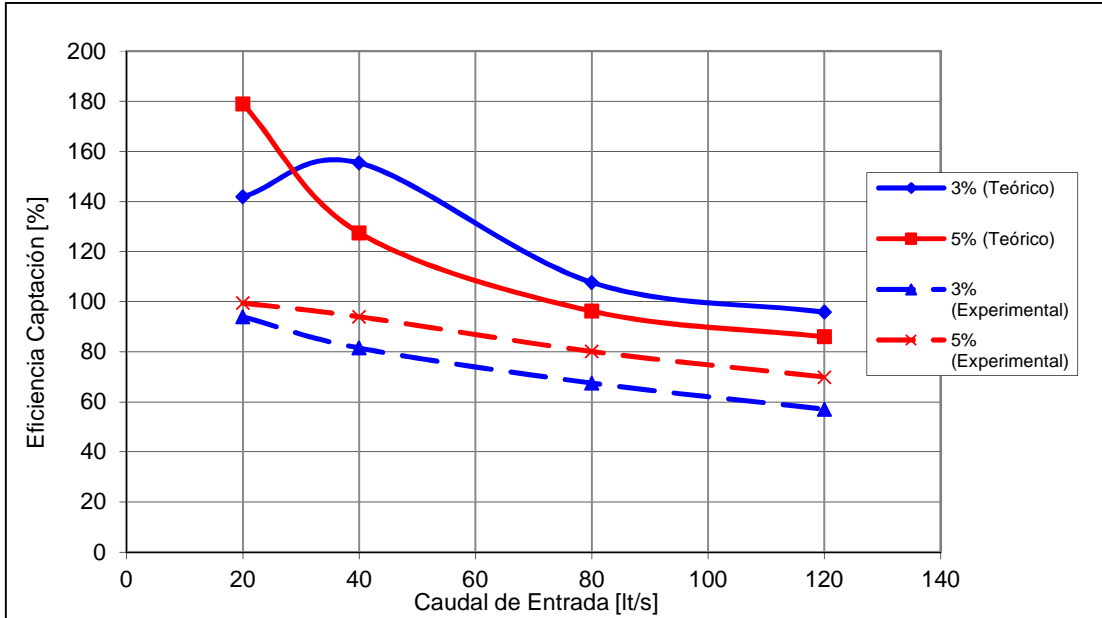


Figura 4.76 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

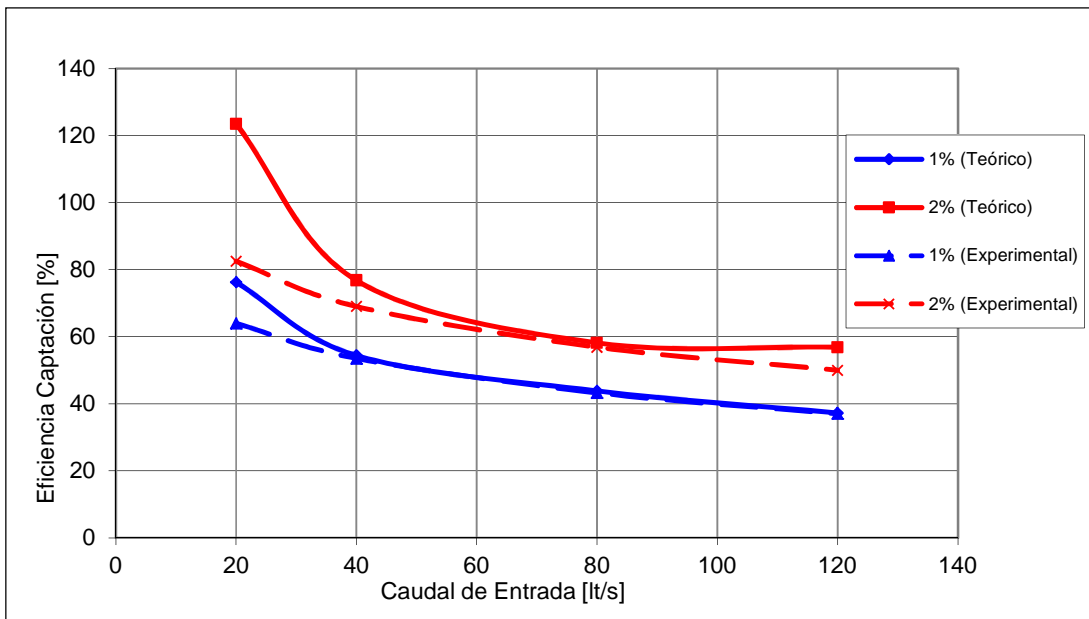


Figura 4.77 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 1% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).

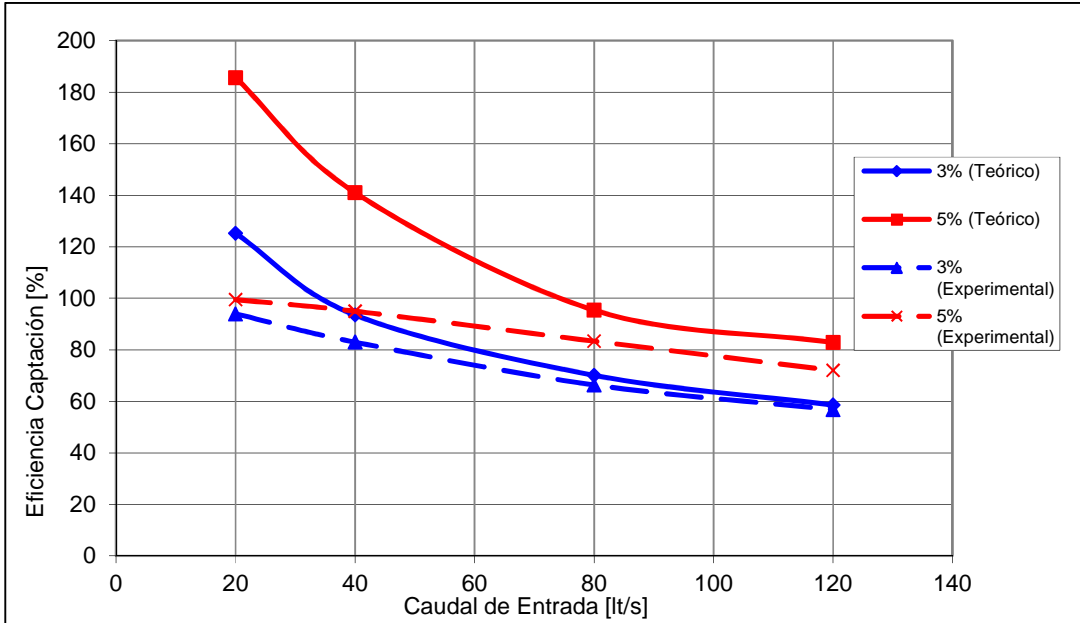


Figura 4.78 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 1% 2% (Modelo Recomendado por SERVIU).

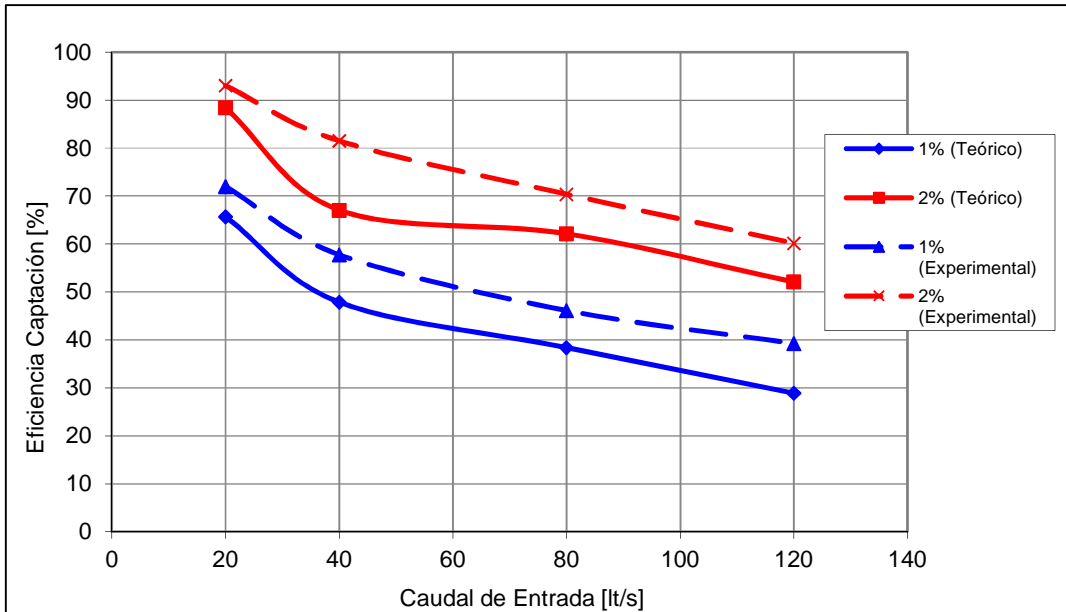
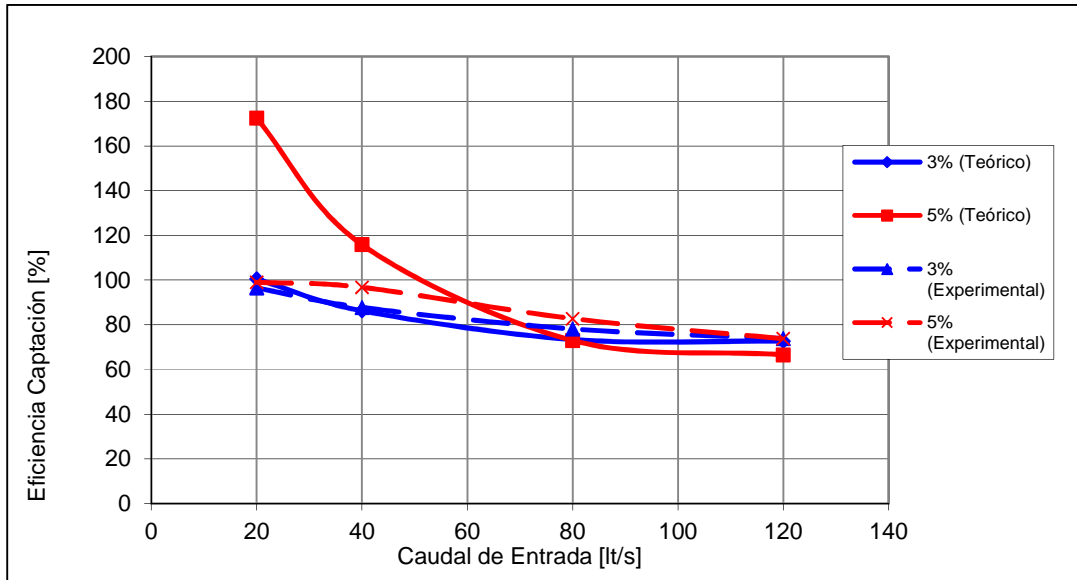


Figura 4.79 Eficiencia de Captación en función del Caudal en la calle para el Sumidero N°5 para pendiente Longitudinal del 3% y Pendiente Transversal del 3% 5% (Modelo Recomendado por SERVIU).



4.5 Análisis de Sumideros con Depresión (Rejas de Sumidero N°1)

Para los casos de sumideros con depresión, se opta en base a los resultados anteriores, verificar el ajuste potencial de la eficiencia de captación. Lo anterior se sustenta en la simplicidad en la aplicación del método y la buena correlación obtenida para el Sumidero N°1.

Para estos casos particulares, dado que los parámetros de ajuste teóricos de los coeficientes no consideran el efecto de la existencia de una depresión en calle y solamente considera las características de la reja, los valores obtenidos son idénticos a los mostrados en la Tabla 4.2.

Con lo anterior, se propone un ajuste de la eficiencia de captación del tipo:

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y} \right)^{-B} \quad (4.3)$$

donde;

E: Eficiencia de captación de la reja.

Q: Caudal circulante por la calle [l/s].

Y: Altura de agua inmediatamente antes de la reja [mm].

A y B: Parámetros de ajuste.

Considerando que la pendiente transversal es un parámetro importante en la eficiencia de captación de los sumideros, se adoptaron modelos de ajustes para cada una de las pendientes ensayadas.

Como se menciona en el Capítulo 3, el parámetro A del ajuste potencial no corresponde a un valor adimensional y depende de las unidades del caudal total en la calle [l/s] y de la altura de escurrimiento [mm].

Adicionalmente se determinó la diferencia existente entre la eficiencia de captación medida experimentalmente y la estimada empíricamente como un $\Delta \eta = |\eta_{\text{exp}} - \eta_{\text{teor}}|$.

4.5.1 Sumidero con depresión $\Delta= 3$ cm

Aplicando el modelo potencial se obtienen los siguientes parámetros de ajuste mostrados en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16 Valores de parámetros de ajuste Potencial.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0.8712	0.9916	7.5	3.4
2%	0.8022	0.8647	10.9	4.6
3%	0.8288	0.8751	7.6	3.8

En las Figuras 4.80 a la 4.82 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.80 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 1%

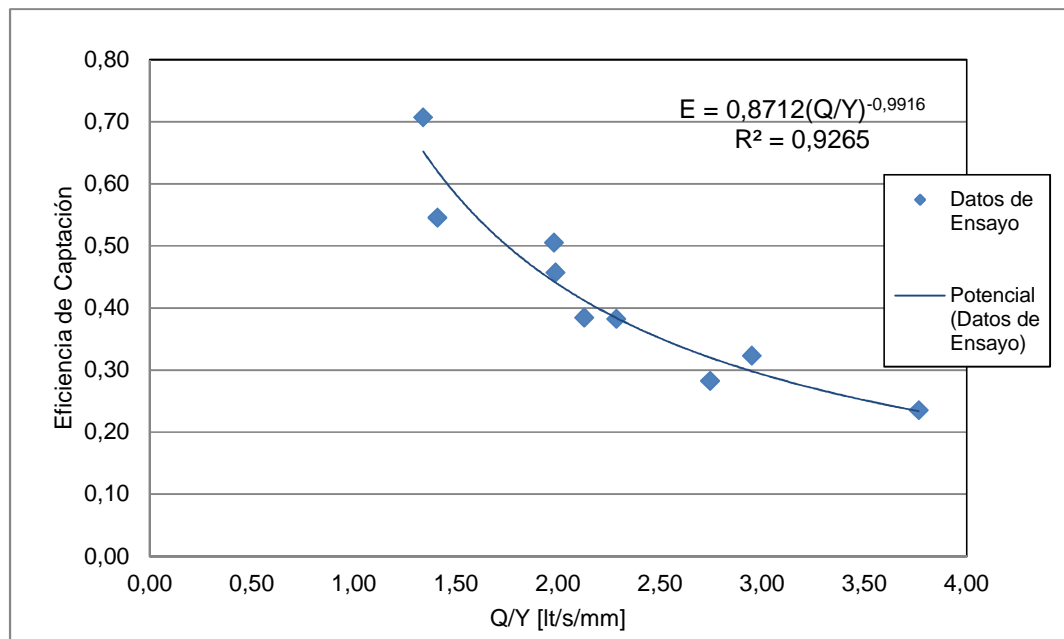


Figura 4.81 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 2%

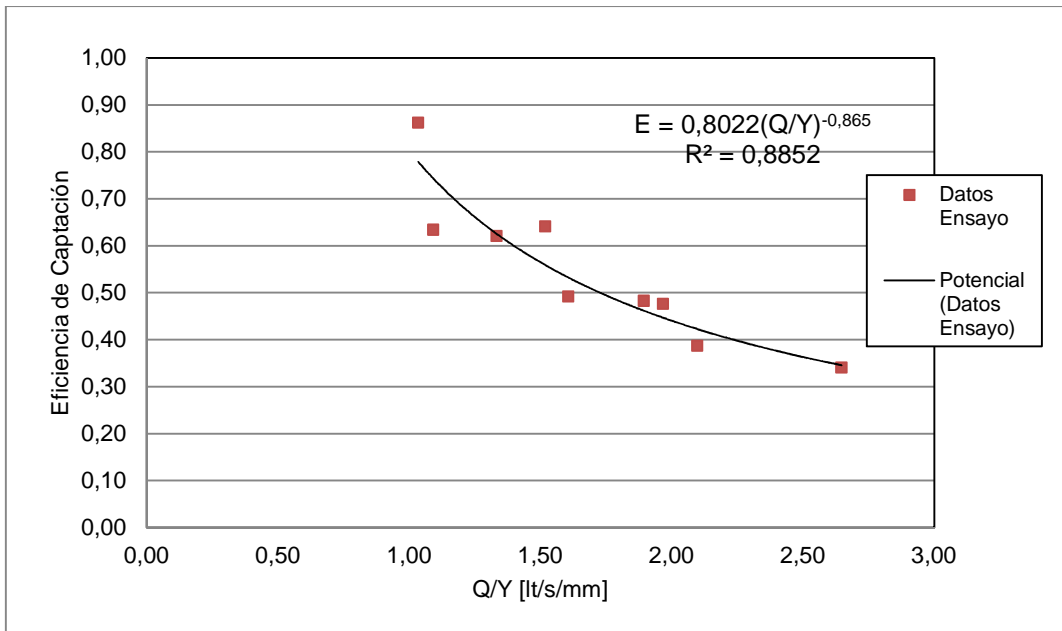
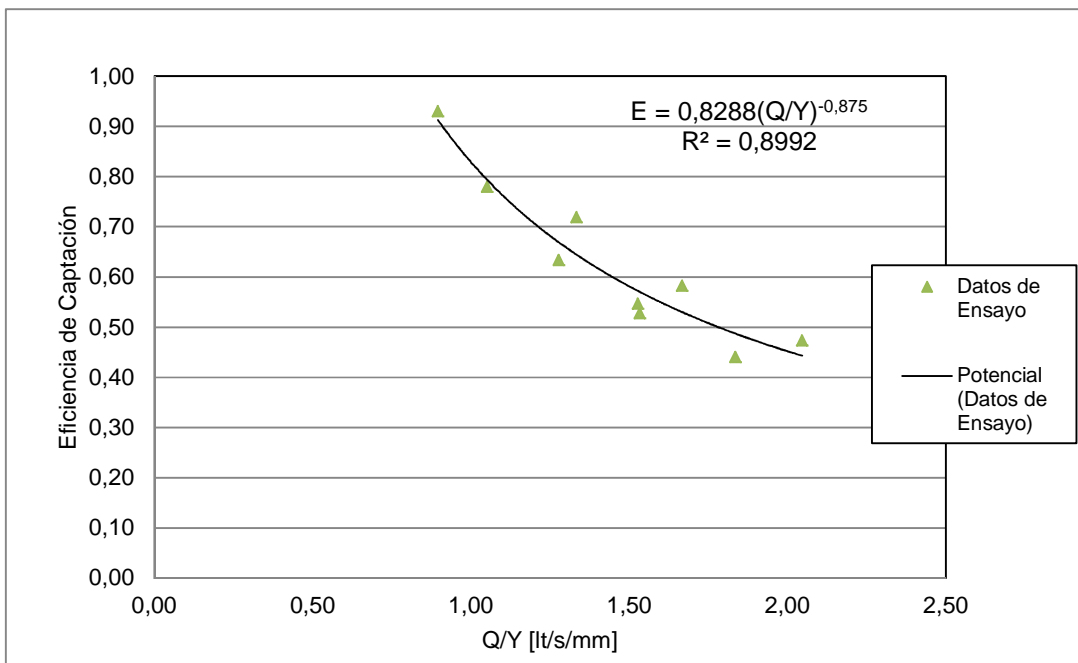


Figura 4.82 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 3%



4.5.2 Sumidero con depresión $\Delta = 5$ cm

Los resultados que se muestran en la Tabla 4.17, corresponden a los parámetros de ajuste para las diferentes pendientes estudiadas.

Tabla 4.17 Valores de parámetros de ajuste Potencial.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	1.107	1.0953	7.5	3.2
2%	0.8916	0.8779	3.1	1.5
3%	0.9332	0.8802	13.3	5.6

En las Figuras 4.83 a la 4.85 se muestran gráficamente los valores de la eficiencia de captación (E) como ajuste potencial de (Q/Y) para las diferentes pendientes estudiadas.

Figura 4.83 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 1%

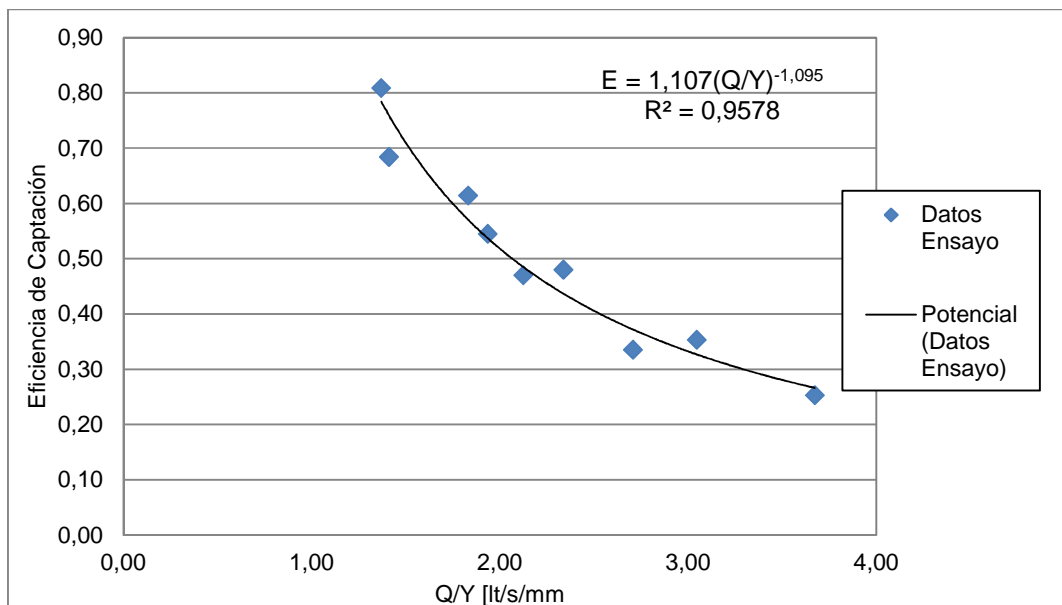


Figura 4.84 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 2%

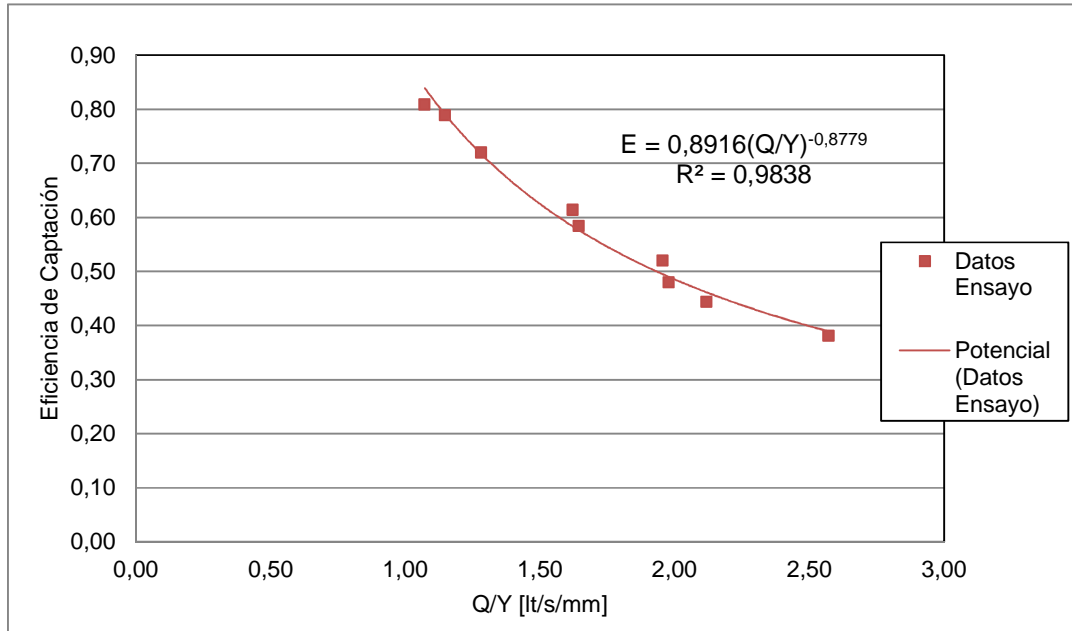
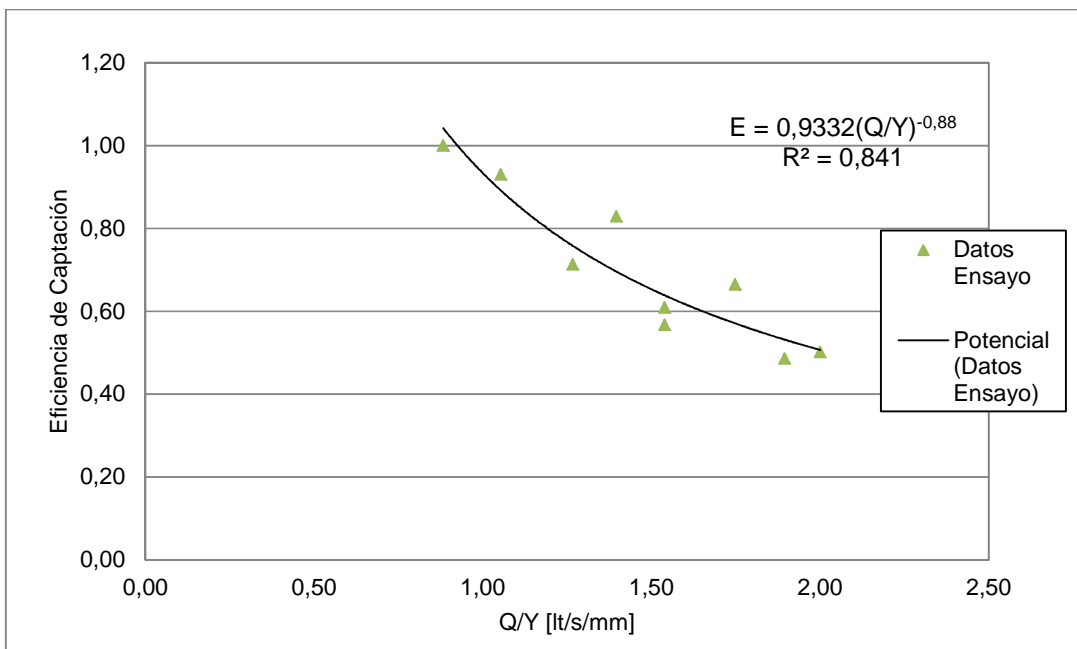


Figura 4.85 Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación para Pendiente Transversal del 3%



4.6 Sumideros fuera de la calzada (Vertedero lateral con reja Sumidero N°1)

A partir de los datos de ensayo, se dispone para cada reja de los valores de Q , caudal captado, L_v longitud total del sumidero, altura de escurrimiento en la plataforma (aguas arriba y aguas abajo del vertedero) h_v , luego podemos calcular el coeficiente de desagüe (C_Q), para cada combinación geométrica de pendientes en la calle.

De la revisión bibliografía efectuada, la publicación de Mery (2013), considera la variación de la altura de escurrimiento a lo largo del vertedero asumiendo una variación lineal del eje hidráulico lo que permite obtener la relación siguiente para determinar el caudal captado.

$$Q = C_Q \cdot L_v \sqrt{2g} \frac{2}{5} \left(\frac{h_{v2}^{5/2} - h_{v1}^{5/2}}{h_{v2} - h_{v1}} \right) \quad (4.4)$$

Para la expresión anterior se conoce la altura de escurrimiento aguas arriba del vertedero (h_{v1}) y aguas abajo del sumidero (h_{v2}), de la relación anterior es posible despejar el valor del coeficiente de desagüe de los vertederos.

4.6.1 Sumidero Lateral $L_v=2.4$ [m]

De la ecuación 4.4, es posible obtener los coeficientes de desagüe para cada combinación de pendientes en la calle. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.18 Valores de Coeficiente de Desagüe Sumidero en Acera.

Caudal Captado [l/s]	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	C _Q
24,66	0,1%	1%	0,280
37,20		1%	0,296
45,36		1%	0,243
38,88	0,1%	3%	0,437
61,56		3%	0,439
75,42		3%	0,303
14,28	1%	1%	0,294
24,36		1%	0,340
27,00		1%	0,286
28,08	1%	3%	0,417
39,36		3%	0,408
47,52		3%	0,348
12,00	3%	1%	0,303
19,32		1%	0,310
20,16		1%	0,256
19,68	3%	3%	0,360
34,68		3%	0,339
47,16		3%	0,305

4.6.2 Sumidero Lateral Lv=3.2 [m]

De manera análoga a lo anterior, se pueden obtener coeficientes de desagüe para cada combinación de pendientes en la calle. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19 Valores de Coeficiente de Desagüe Sumidero en Acera.

Caudal Captado [l/s]	Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	C _Q
31,74	0,1%	1%	0,282
47,64		1%	0,286
57,24		1%	0,200
47,52	0,1%	3%	0,458
78,60		3%	0,400
97,56		3%	0,292
20,40	1%	1%	0,303
32,76		1%	0,307
39,06		1%	0,285
36,36	1%	3%	0,423
52,44		3%	0,363
66,42		3%	0,328
15,78	3%	1%	0,265
25,32		1%	0,284
26,82		1%	0,219
26,52	3%	3%	0,353
48,84		3%	0,319
64,44		3%	0,300

4.7 Coeficiente de Desagüe de las Rejas (C_d)

A partir de los datos de ensayo, se dispone para cada reja de los valores de Q, caudal captado, ε fracción de huecos, A_T área total de la reja y E, energía del flujo circulante, luego podemos calcular el coeficiente de desagüe (C_d), para cada reja y cada combinación geométrica de pendientes en la calle:

$$Q = C_d \cdot \varepsilon \cdot A_T \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot E} \quad (4.5)$$

Con lo anterior, se realiza un ranking de las rejas, de mayor a peor capacidad de captación.

Un aspecto importante es ver cómo influye la pendiente transversal y el caudal en la calle en el valor de C_d y bajo qué condiciones es realmente aplicable este método de evaluación de las rejas. A continuación se muestran partes de los valores obtenidos para el coeficiente C_d , el resto de los resultados obtenidos se encuentran en el Anexo I.

Figura 4.86 Valores del Coeficiente de Desagüe (C_d) en función del Caudal para los diferentes sumideros ensayados y pendiente Longitudinal del 1% y Transversal del 2%.

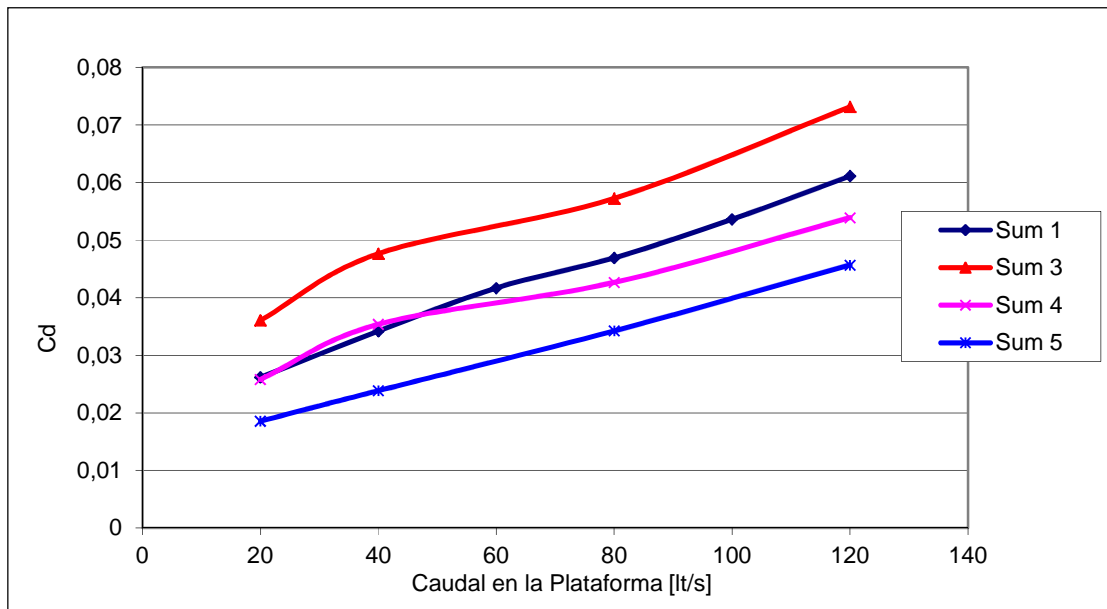
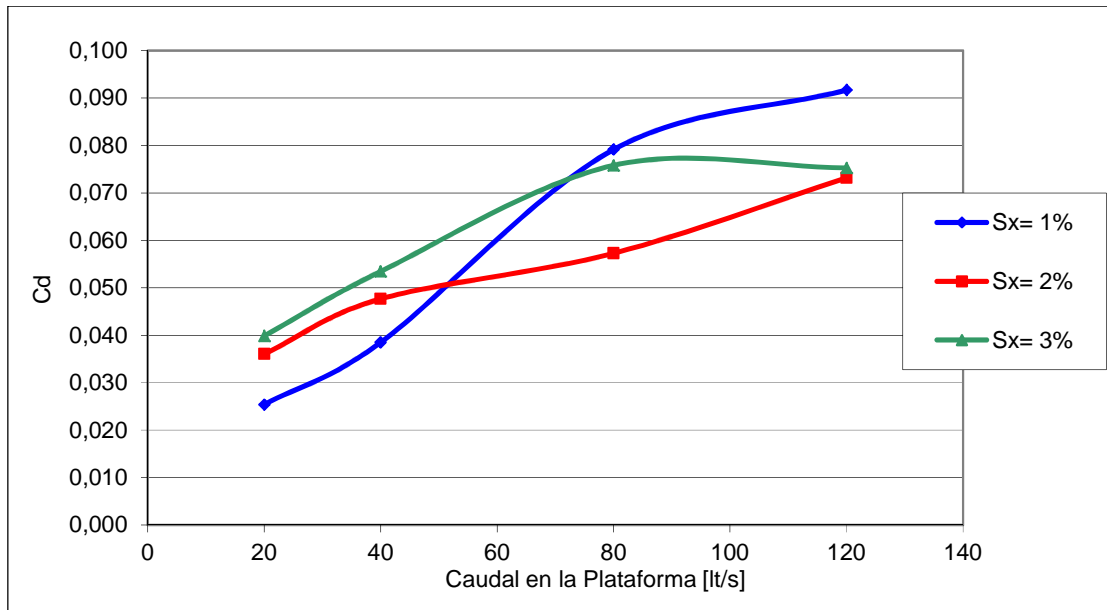


Figura 4.87 Valores del Coeficiente de Desagüe (C_d) en función del Caudal para diferentes Pendientes Transversales (Sumidero N°3).



4.8 Curvas Características de Sumideros con Rejas

De la literatura actual, se verifica que para la modelación numérica de sistemas de aguas lluvias comúnmente se utiliza como un dato en modelos numéricos las curvas características de descarga de sumideros, que relacionan el caudal captado (caudal que sale del sistema) con la altura de escurrimiento.

Con lo anterior y en base a los datos experimentales, se graficaron estos parámetros de manera de buscar una relación numérica entre ellos.

Los resultados obtenidos para los siete sumideros de reja estudiados (incluyendo los sumideros con depresiones en la calle), se muestran en las Figuras 4.87 a la 4.89.

Figura 4.87 Valores de las Curvas Características Sumidero N°1; Sumidero N°2 y Sumidero N°3.

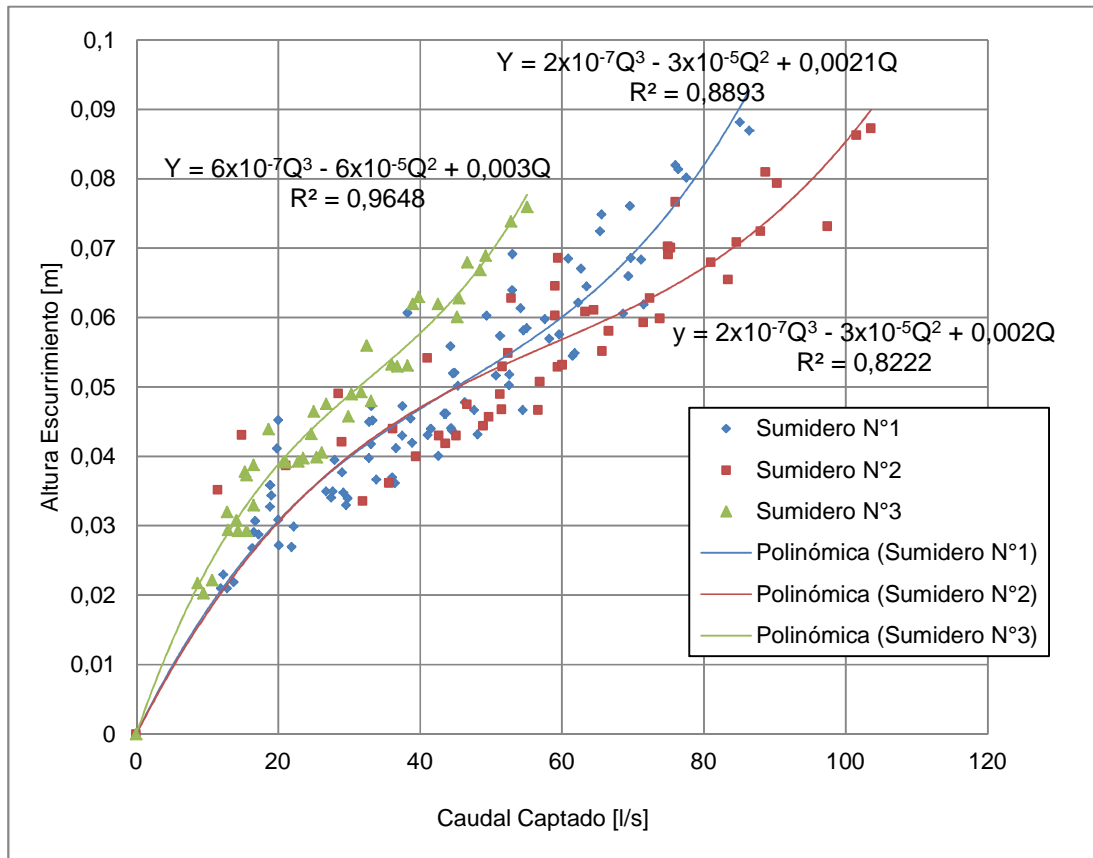


Figura 4.88 Valores del Curvas Características Sumidero N°4 y Sumidero N°5.

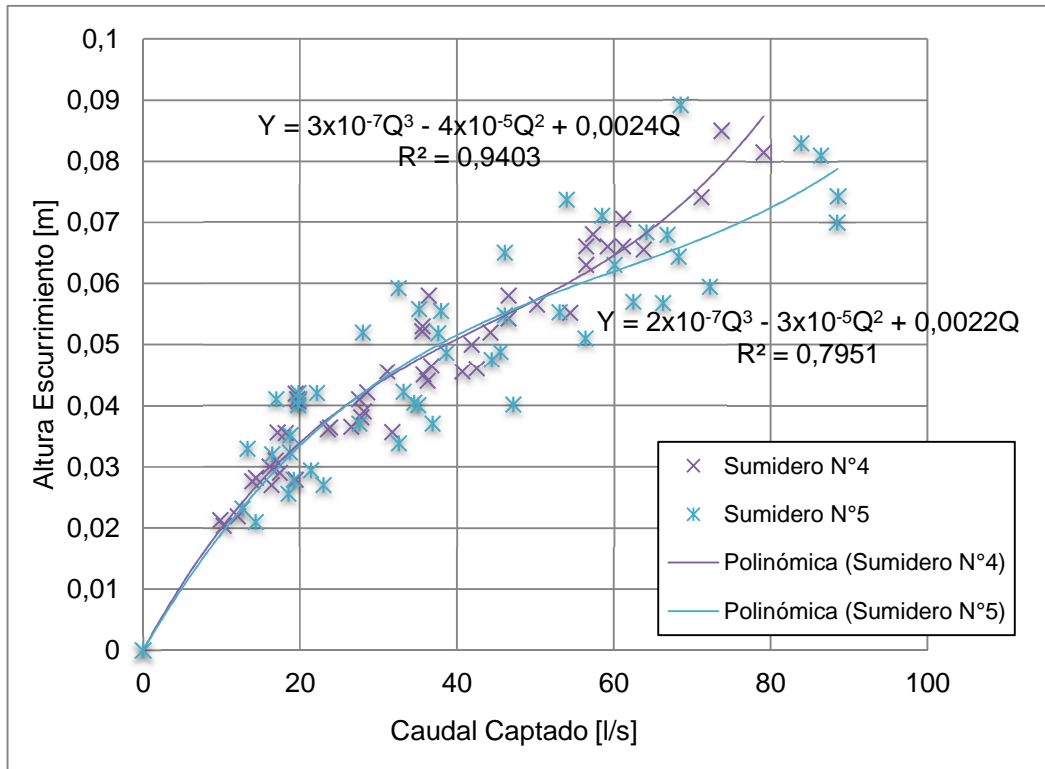
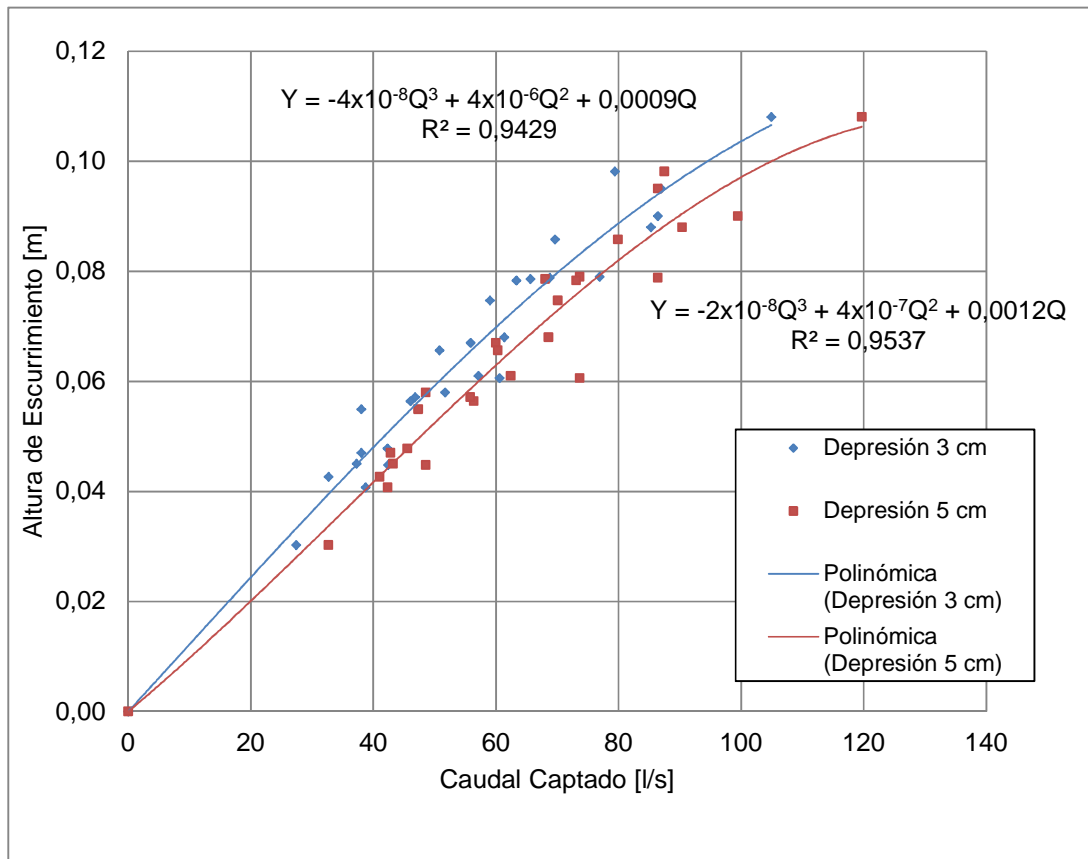
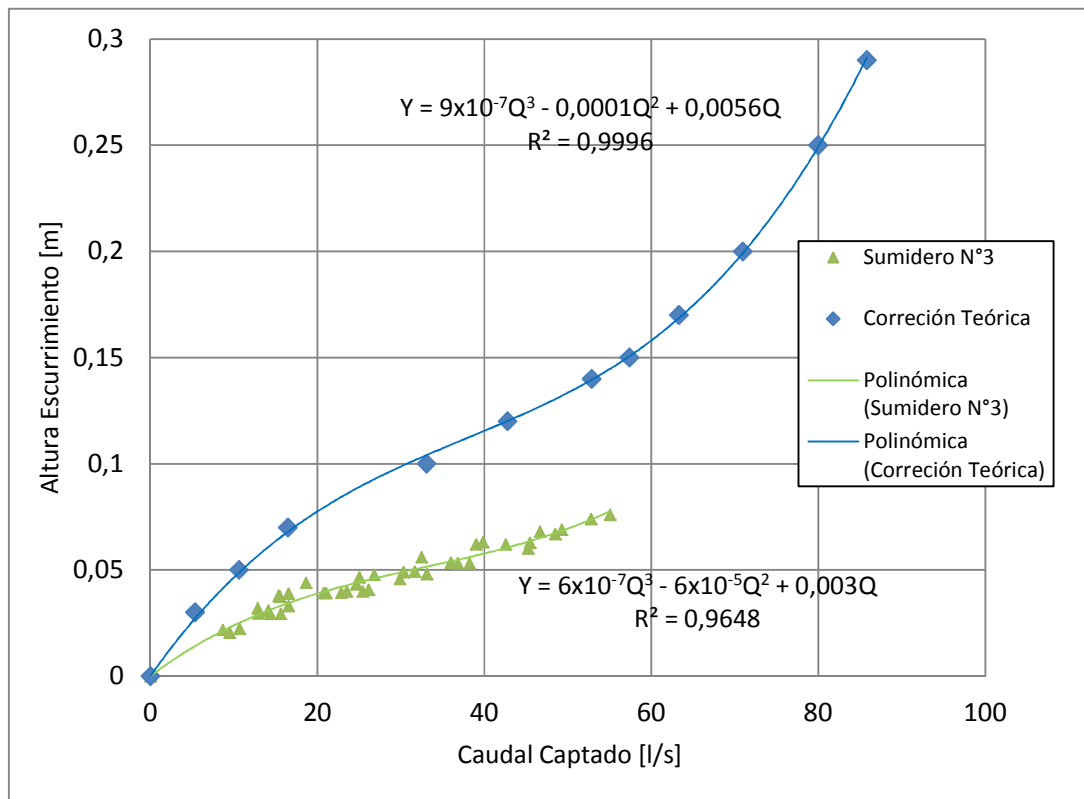


Figura 4.89 Valores del Curvas Características Sumidero con depresión en la calle para $\Delta 3\text{cm}$ y $\Delta 5\text{ cm}$.



A continuación, en la Figura 4.90, se muestra una comparación entre la curva característica mostrada en la literatura para el Sumidero N°3 de Serviu y los valores reales obtenidos de los ensayos experimentales.

Figura 4.90 Comparación Valores del Curvas Características Sumidero N°3



4.9 Análisis Dimensional del Fenómeno Sumideros con Rejas

El Análisis Dimensional propuesto, nos permite determinar variables adimensionales que componen el fenómeno y así de una manera simple, verificar como estas variables se relacionan con la eficiencia de captación de los sumideros.

Para realizar el Análisis Dimensional, en primer lugar debemos determinar el número de variables involucradas. Estas variables se detallan a continuación:

- Q_T : Caudal total en la calle [l/s].
- Q_C : Caudal captado por el sumidero [l/s].
- S_y : Pendiente longitudinal de la calle [m/m].
- S_x : Pendiente transversal de la calle [m/m].
- L : Longitud del sumidero [m].
- B : Ancho del sumidero [m].
- A_u : Área útil de captación del sumidero [m²].
- Y : Altura del escurrimiento antes del sumidero [m].
- W_x : Desnivel desde la calle al sumidero [m].
- g : Aceleración de gravedad [m/s²].
- ν : Viscosidad cinemática del agua [m²/s].
-

Con lo anterior se logran identificar $n=11$ variables que describen el fenómeno, del mismo modo se logra extraer la existencia de $r=2$ unidades contenidas [L] y [T]. Por lo tanto, existen $(n-r)$ parámetros adimensionales a formar $(n-r) = (11-2) = 9$ parámetros adimensionales.

Tomando una base de $r=2$ elementos, se tiene una base $e=(Q_T, Y)$, se pueden formar los siguientes parámetros adimensionales:

$$[\pi_1] = \frac{Q_C}{Q_T} = E: \text{Eficiencia de Captación.}$$

$$[\pi_2] = S_y$$

$$[\pi_3] = S_x$$

$$[\pi_4] = \frac{Q_T^2}{g * Y^5} = F_r: \text{Número de Froude.}$$

$$[\pi_5] = \frac{Q_T}{\nu * Y} = F_r: \text{Número de Reynolds.}$$

$$[\pi_6] = \frac{L}{Y}$$

$$[\pi_7] = \frac{Y}{B}$$

$$[\pi_8] = \frac{W_x}{Y}$$

$$[\pi_{10}] = \frac{A_u}{Y^2}$$

Como se trata de un flujo turbulento, el Reynolds no influye en el fenómeno. Con lo anterior, la función adimensional queda compuesta de la siguiente manera:

$$\phi \left(E; F_r; S_x; S_y; \frac{L}{Y}; \frac{Y}{B}; \frac{W_x}{Y}; \frac{A_u}{Y^2} \right) = 0 \quad (4.6)$$

Adicionalmente, del estudio de *Kaliski y Cortéz, R. (2004)*, se concluyó que la pendiente longitudinal no influye en mayor grado con la eficiencia de captación de los sumideros:

$$\phi \left(E; F_r; S_x; \frac{L}{Y}; \frac{Y}{B}; \frac{W_x}{Y}; \frac{A_u}{Y^2} \right) = 0 \quad (4.7)$$

Despejando la variable de interés correspondiente a la eficiencia de captación se obtiene:

$$E = \phi \left(F_r; S_x; \frac{L}{Y}; \frac{Y}{B}; \frac{W_x}{Y}; \frac{A_u}{Y^2} \right) \quad (4.8)$$

Con lo anterior, se graficó la eficiencia de captación en función de cada uno de los demás números adimensionales y para cada uno de los sumideros de reja estudiados. En particular en los cinco primeros sumideros no existe desnivel en la calle, por lo que particularmente la ecuación aplicada queda como:

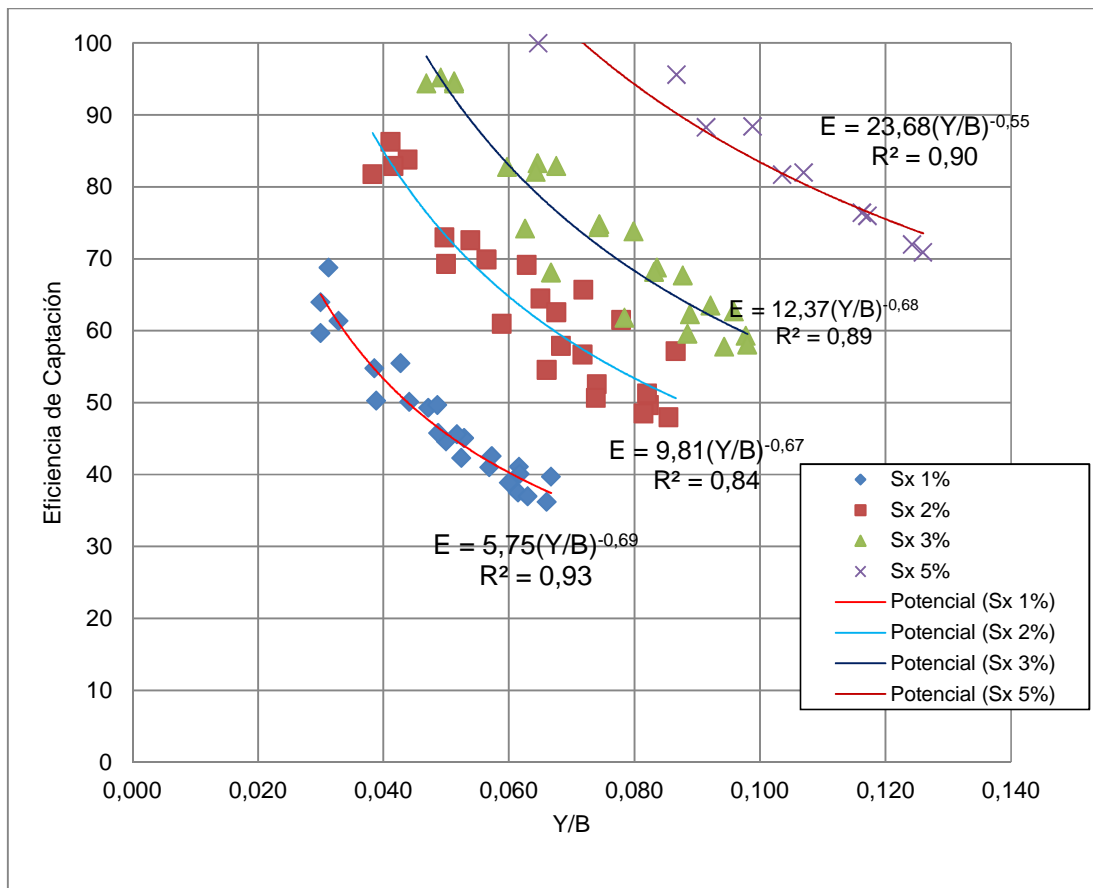
$$E = \phi \left(F_r; S_x; \frac{L}{Y}; \frac{Y}{B}; \frac{A_u}{Y^2} \right) \quad (4.9)$$

A continuación se muestra los principales resultados obtenidos para cada uno de los sumideros estudiados.

4.9.1 Sumidero N°1

Para este sumidero al graficar la eficiencia de captación en función de los demás números adimensionales, se pudo apreciar la existencia de una tendencia de tipo potencial entre la eficiencia de captación y el parámetro $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$, lo cual se muestra en la Figura N°4.91.

Figura 4.91 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.



Con lo anterior, al aplicar una tendencia para cada una de las pendientes transversales, fue posible obtener una curva representativa de la eficiencia de captación del sumidero.

En las Figuras 4.92 a la 4.94 se muestra la relación entre la eficiencia y los demás números adimensionales. Para estos casos no se encontró una tendencia clara que los relacione.

Figura 4.92 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.

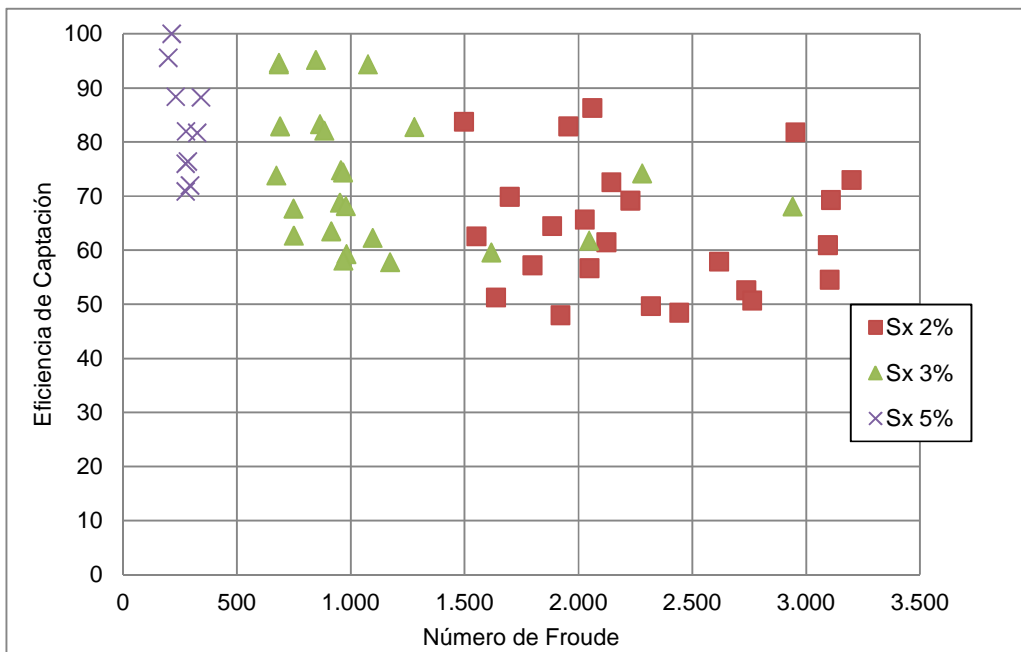


Figura 4.93 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

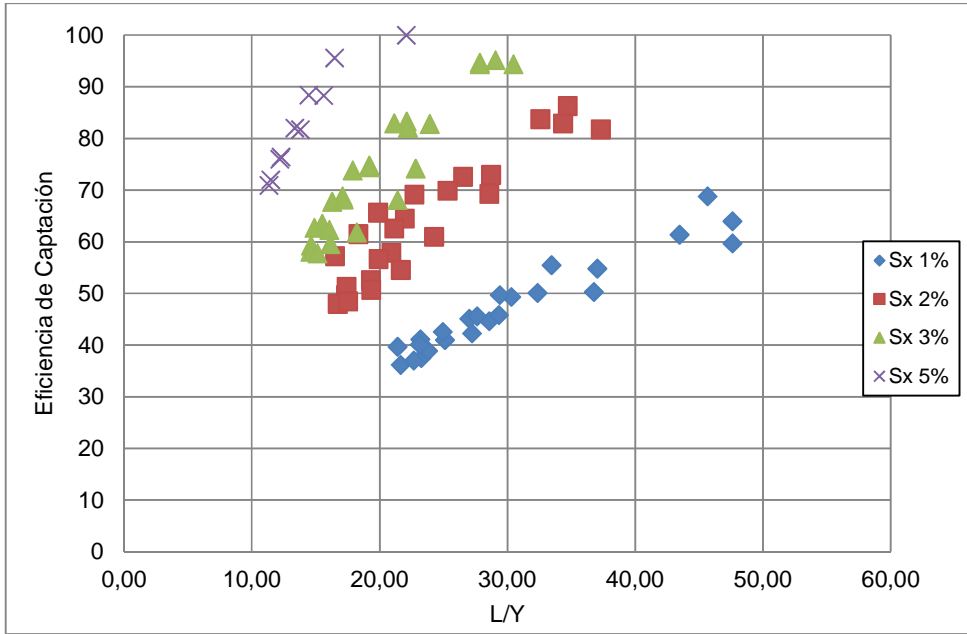
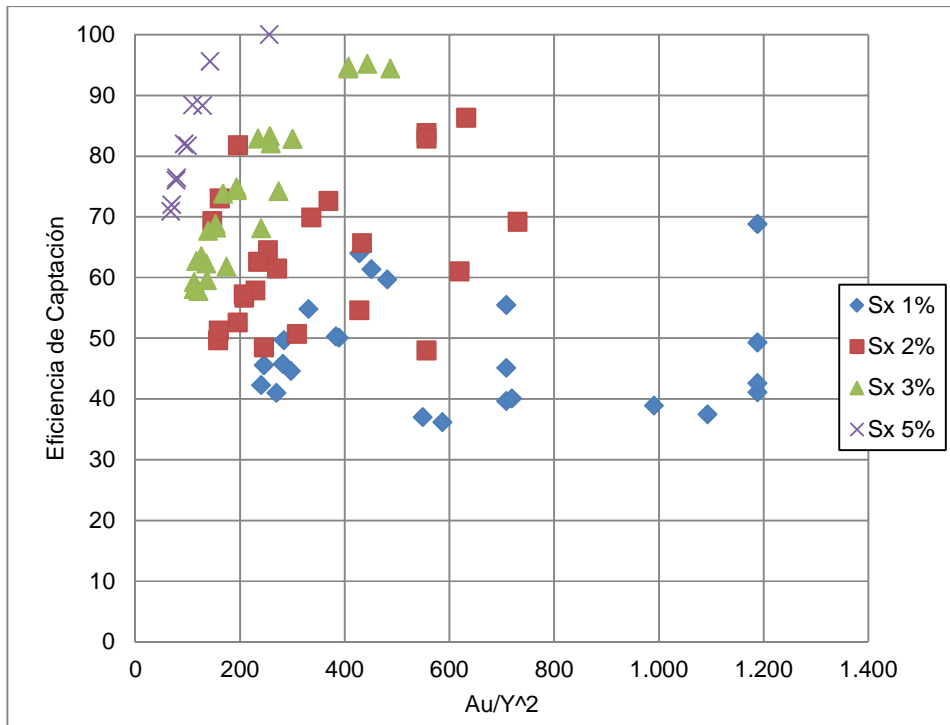


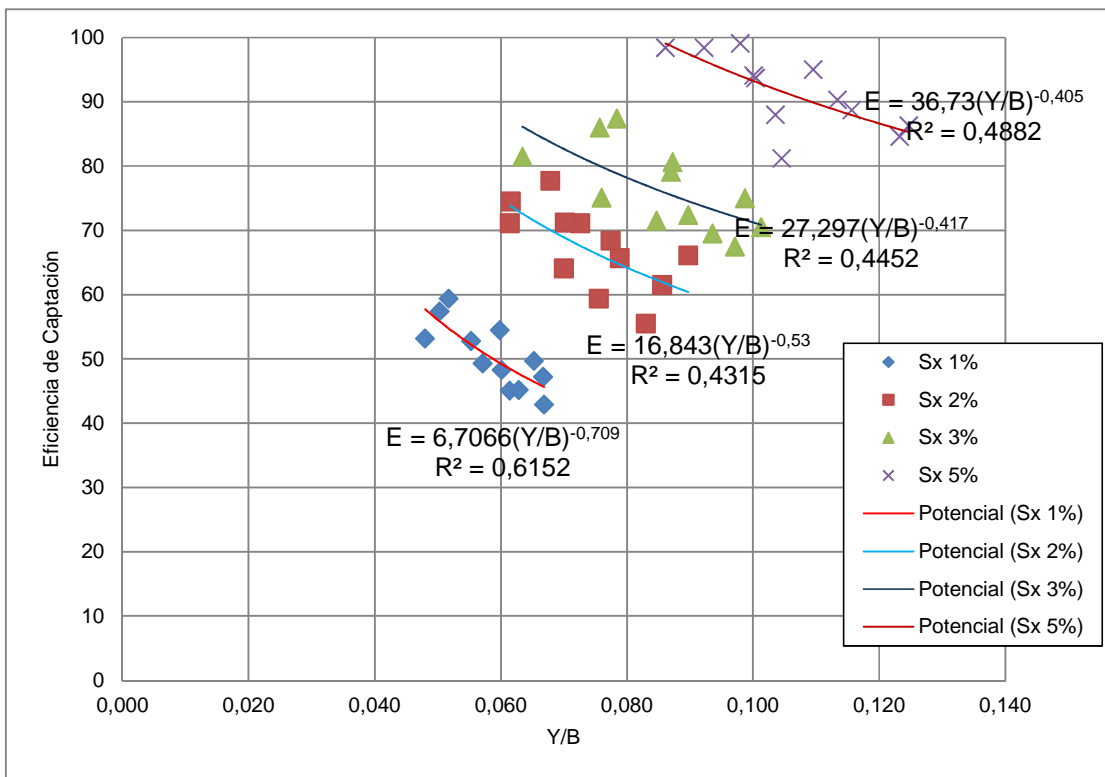
Figura 4.94 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y^2 .



4.9.2 Sumidero N°2

Para este sumidero al graficar la eficiencia de captación en función de los demás números adimensionales, se pudo apreciar al igual que el caso anterior, la existencia de una tendencia de tipo potencial entre la eficiencia de captación y el parámetro $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$, lo cual se muestra en la Figura 4.95.

Figura 4.95 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.



Con lo anterior, al aplicar una tendencia para cada una de las pendientes transversales, fue posible obtener una curva representativa de la eficiencia de captación del sumidero.

En las Figuras 4.96 a la 4.98 se muestra la relación entre la eficiencia y los demás números adimensionales. Para estos casos, no se encontró una tendencia clara que los relacione.

Figura 4.96 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.

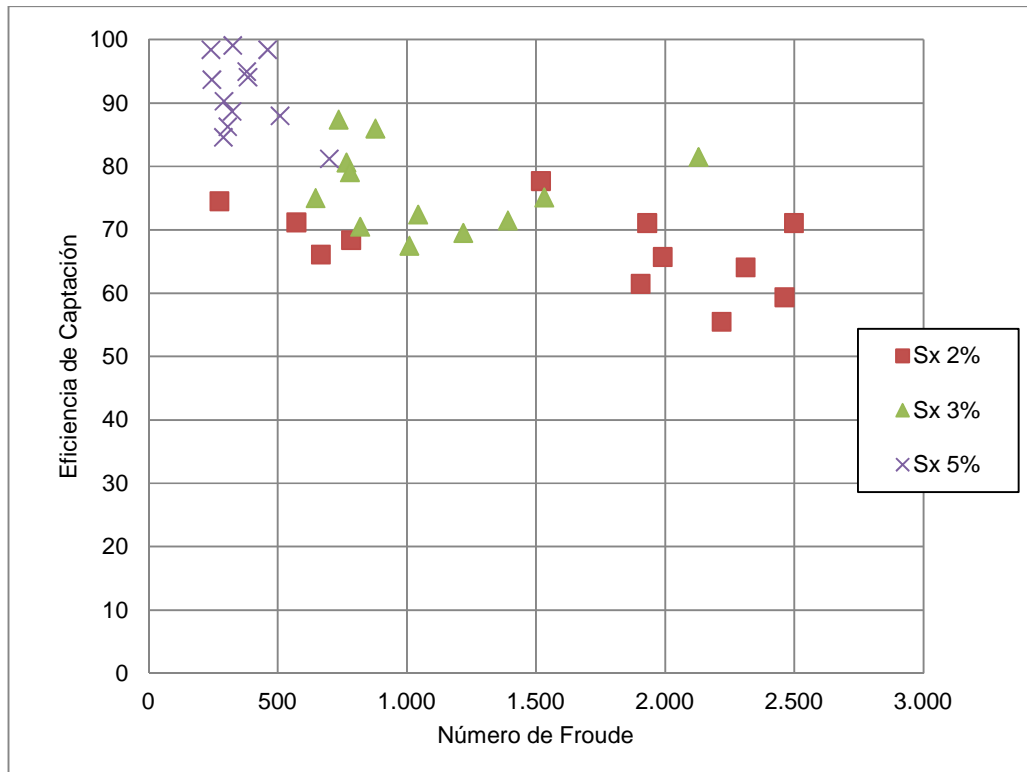


Figura 4.97 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

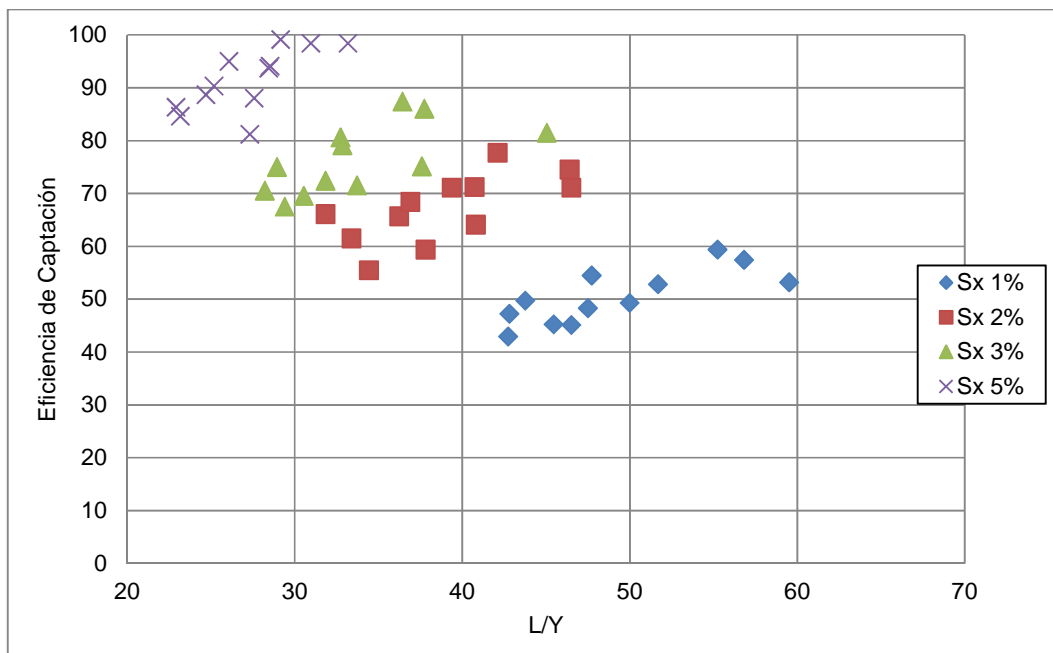
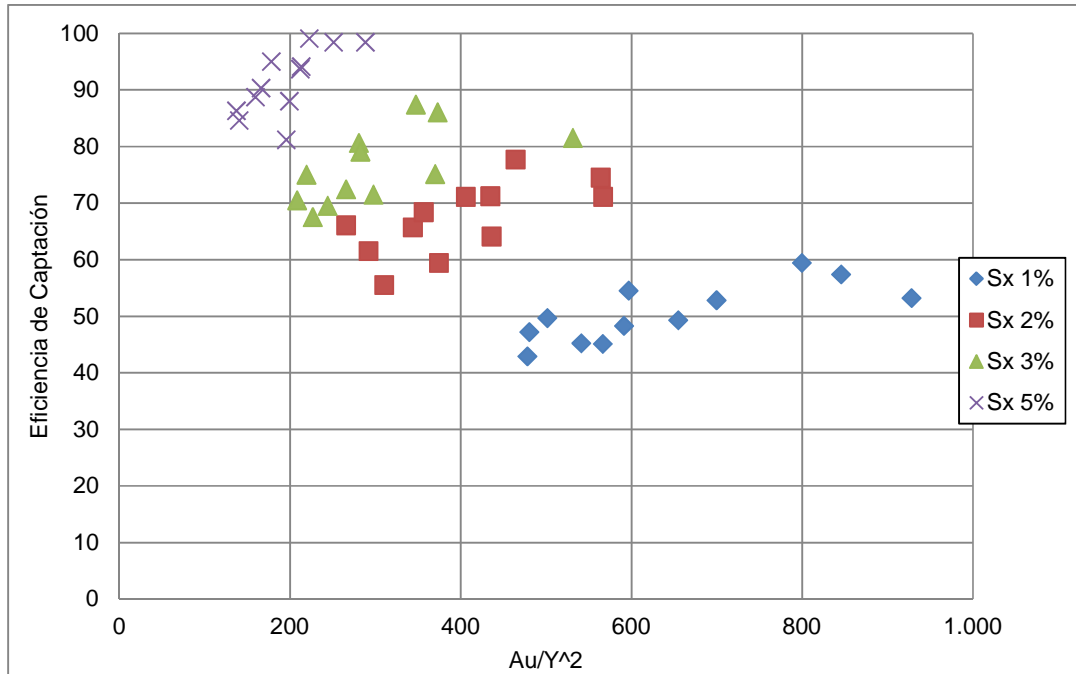


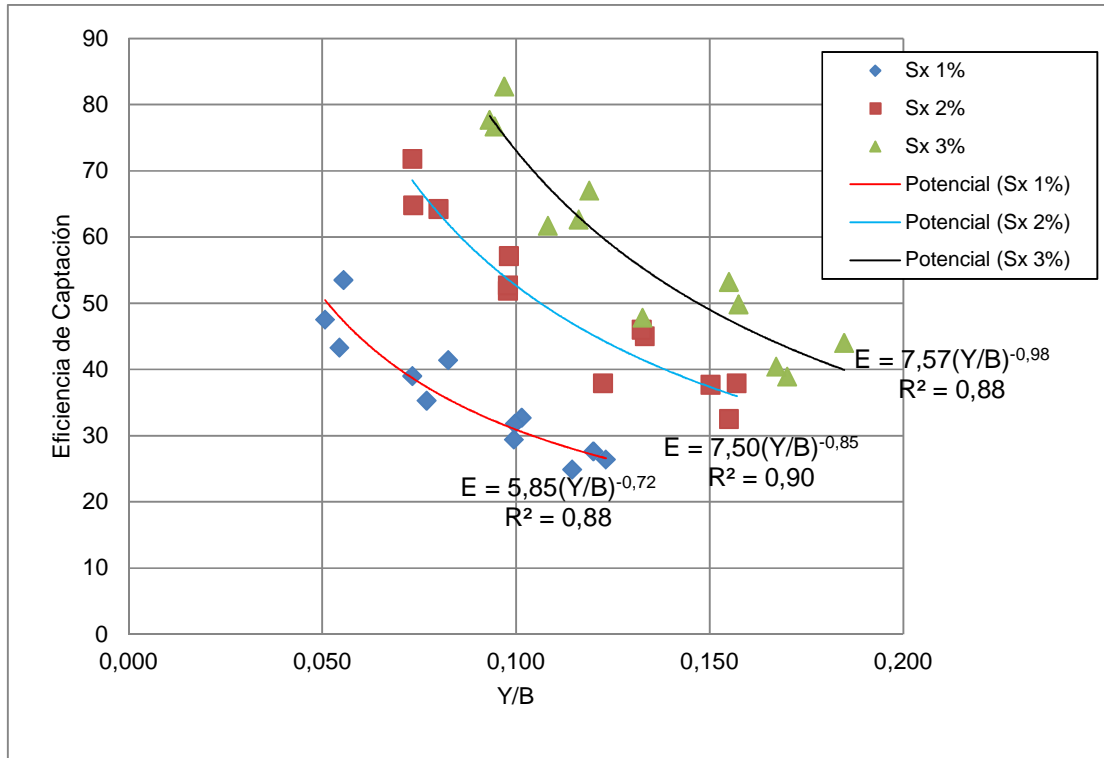
Figura 4.98 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y^2 .



4.9.3 Sumidero N°3

Para este sumidero al graficar la eficiencia de captación en función de los demás números adimensionales, se pudo apreciar al igual que el caso anterior, la existencia de una tendencia de tipo potencial entre la eficiencia de captación y el parámetro $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$, lo que se muestra en la Figura 4.99.

Figura 4.99 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.



Con lo anterior, al aplicar una tendencia para cada una de las pendientes transversales, fue posible obtener una curva representativa de la eficiencia de captación del sumidero.

En las Figuras 4.100 a la 4.102 se muestra la relación entre la eficiencia y los demás números adimensionales. Para estos casos no se encontró una tendencia clara que los relacione con la eficiencia de captación.

Figura 4.100 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.

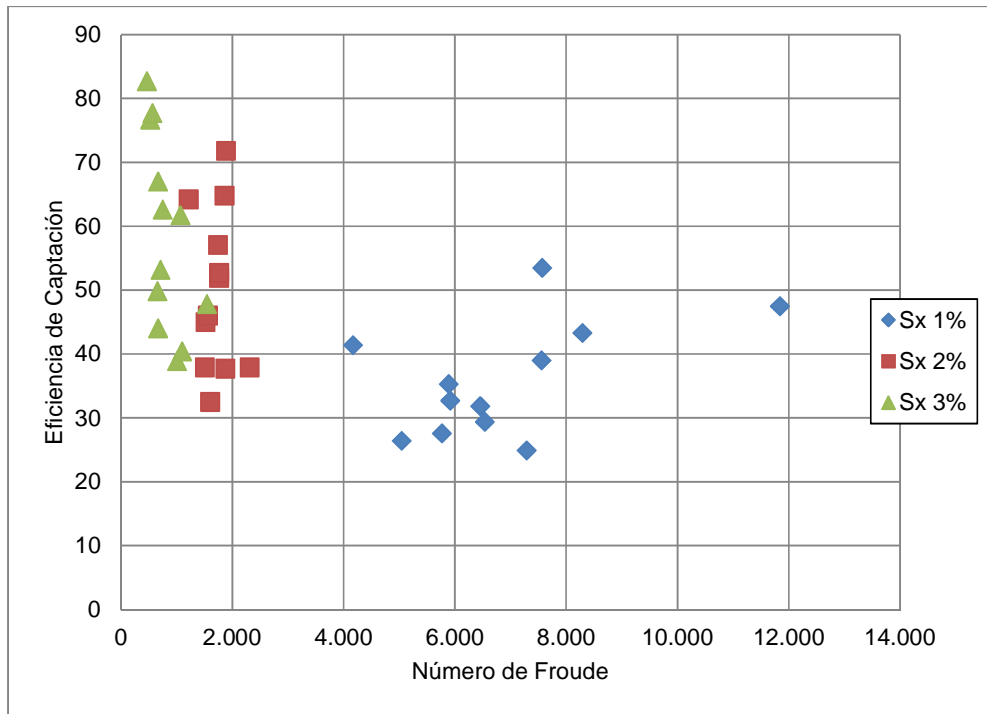


Figura 4.101 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

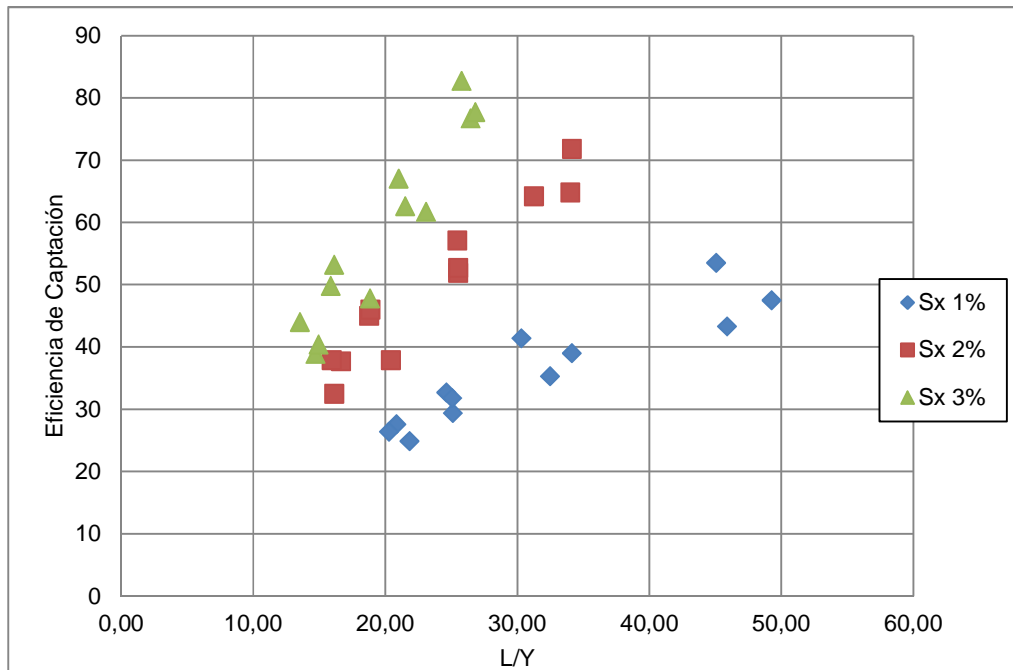
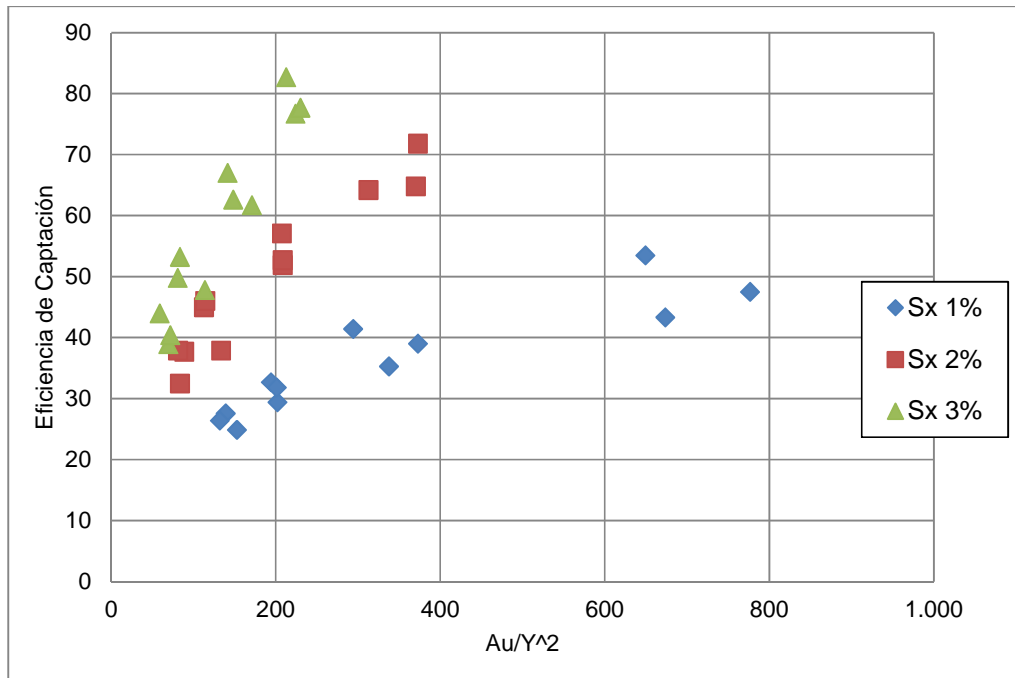


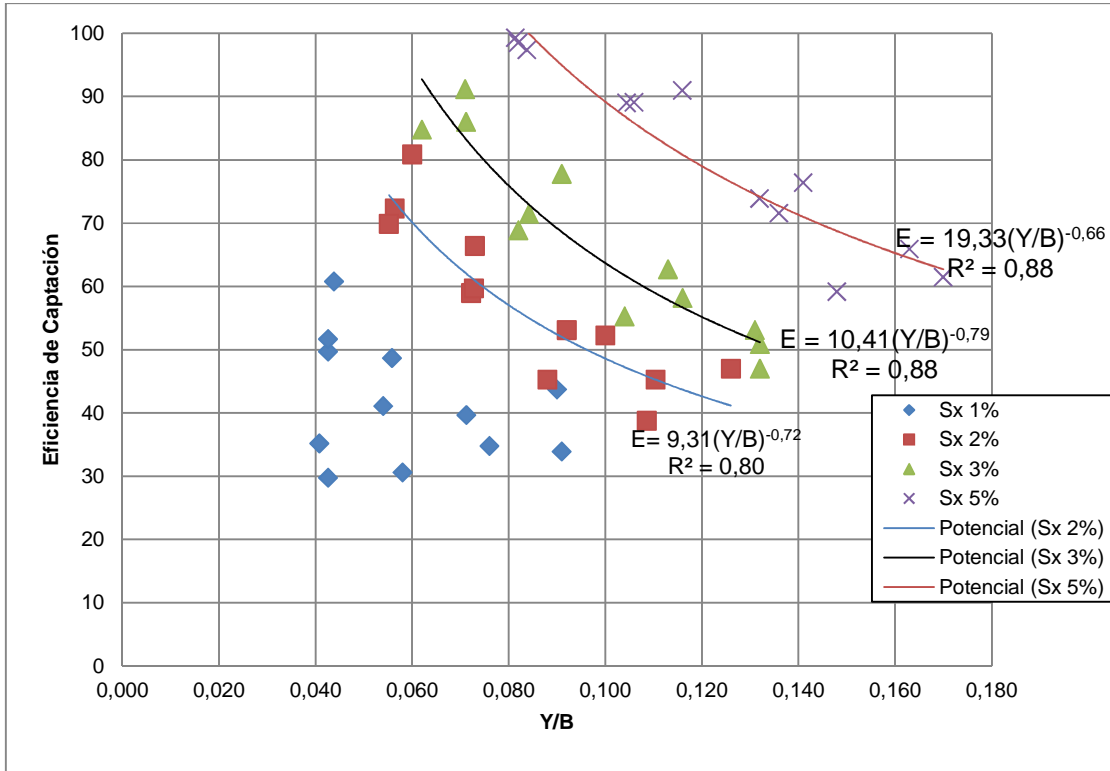
Figura 4.102 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y^2 .



4.9.4 Sumidero N°4

Para este sumidero al graficar la eficiencia de captación en función de los demás números adimensionales, se pudo apreciar al igual que el caso anterior, la existencia de una tendencia de tipo potencial entre la eficiencia de captación y el parámetro $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$, con excepción de los valores para pendiente transversal del 1%. Lo anterior se puede apreciar en la Figura 4.103.

Figura 4.103 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.



En las Figuras 4.104 a la 4.106 se muestra la relación entre la eficiencia y los demás números adimensionales. Para estos casos no se encontró una tendencia clara que los relacione con la eficiencia de captación.

Figura 4.104 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.

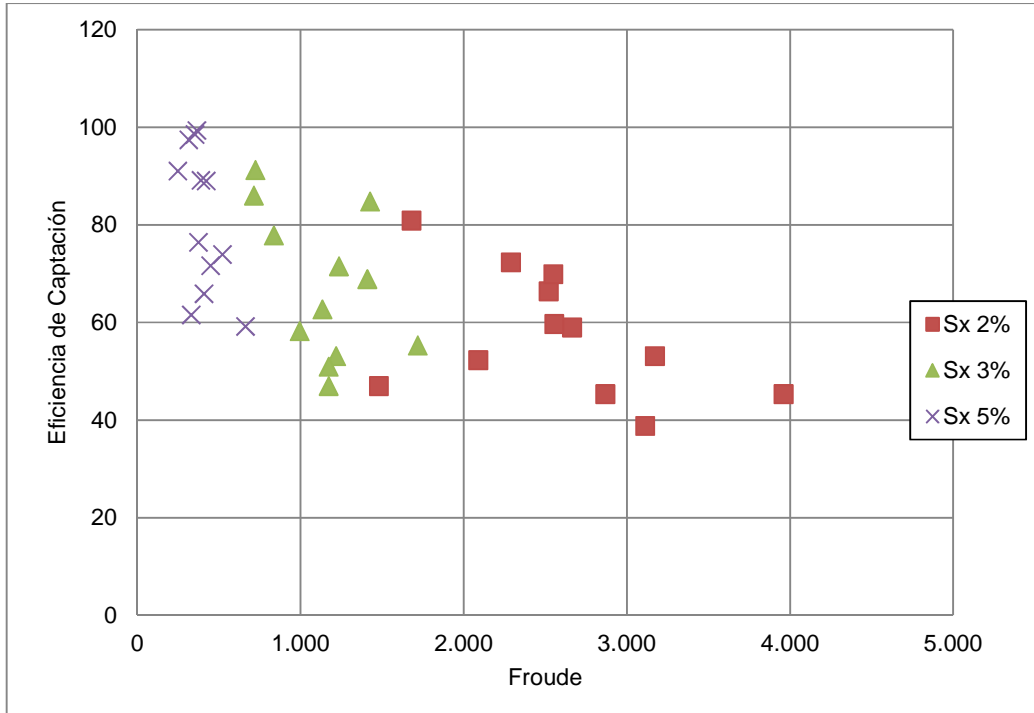


Figura 4.105 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

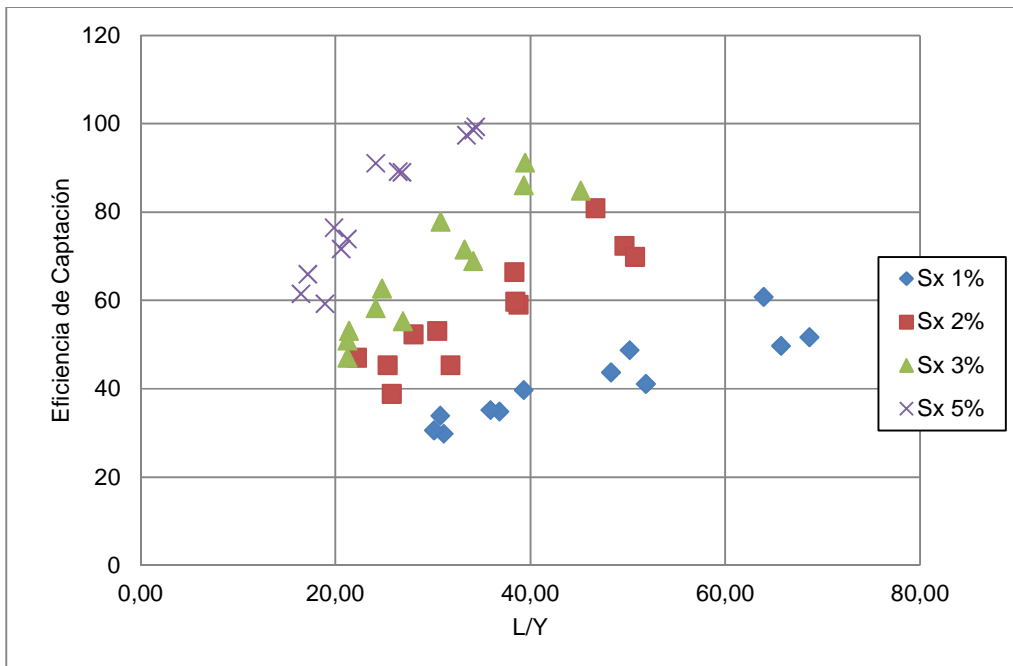
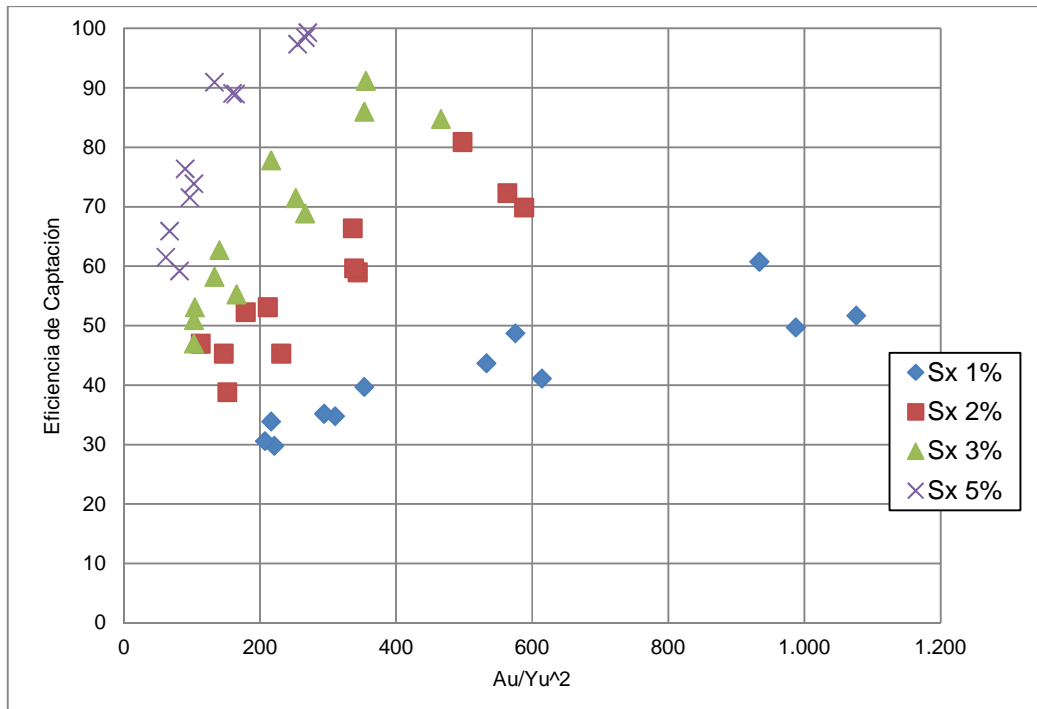


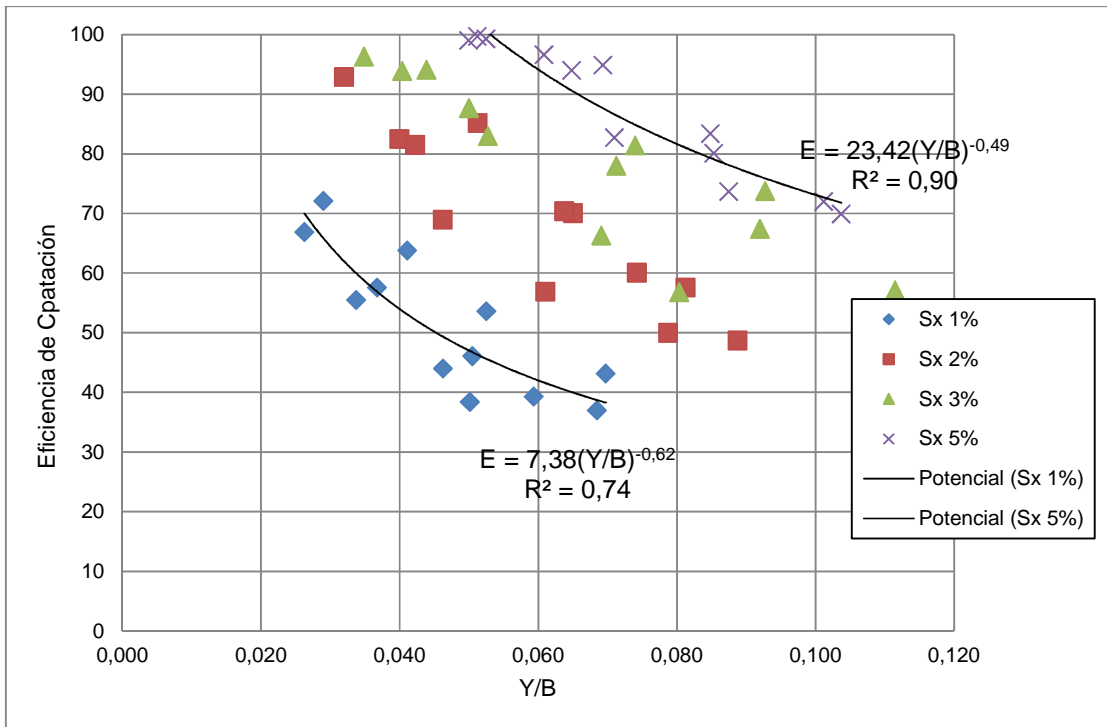
Figura 4.106 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y^2 .



4.9.5 Sumidero N°5

Para este sumidero al graficar la eficiencia de captación en función de los demás números adimensionales, la existencia de una tendencia de tipo potencial entre la eficiencia de captación y el parámetro $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$ para las pendientes transversales de un 1% y 5%. Lo anterior se muestra en la Figura 4.107.

Figura 4.107 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.



En las Figuras 4.108 a la 4.109 se muestra la relación entre la eficiencia y los demás números adimensionales. Para estos casos no se encontró una tendencia clara que los relacione con la eficiencia de captación.

Figura 4.108 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.

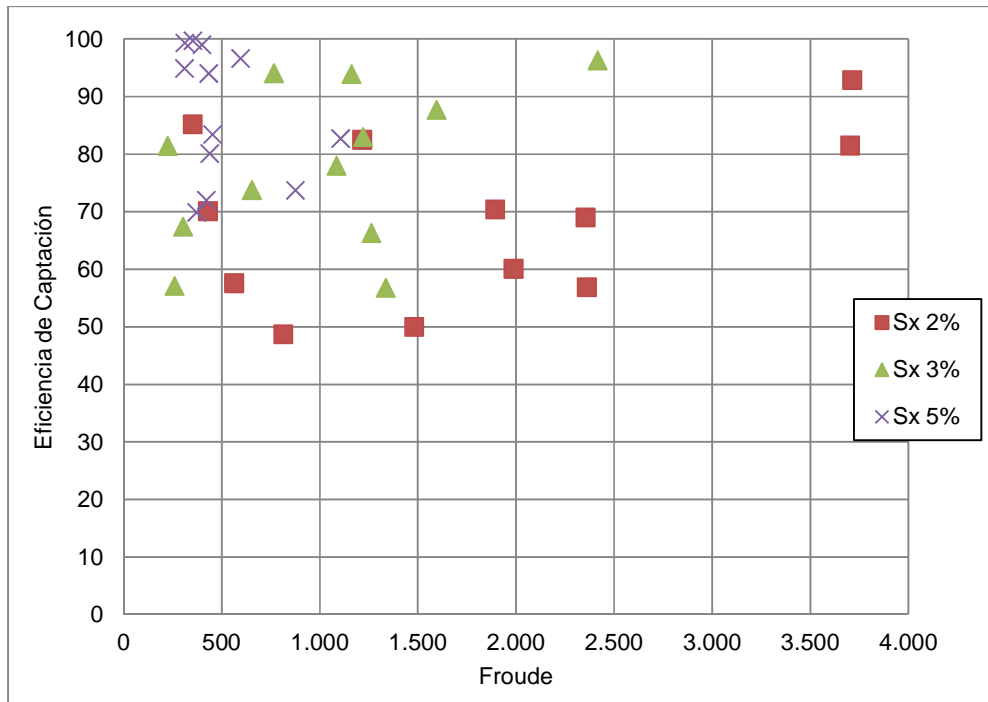


Figura 4.109 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

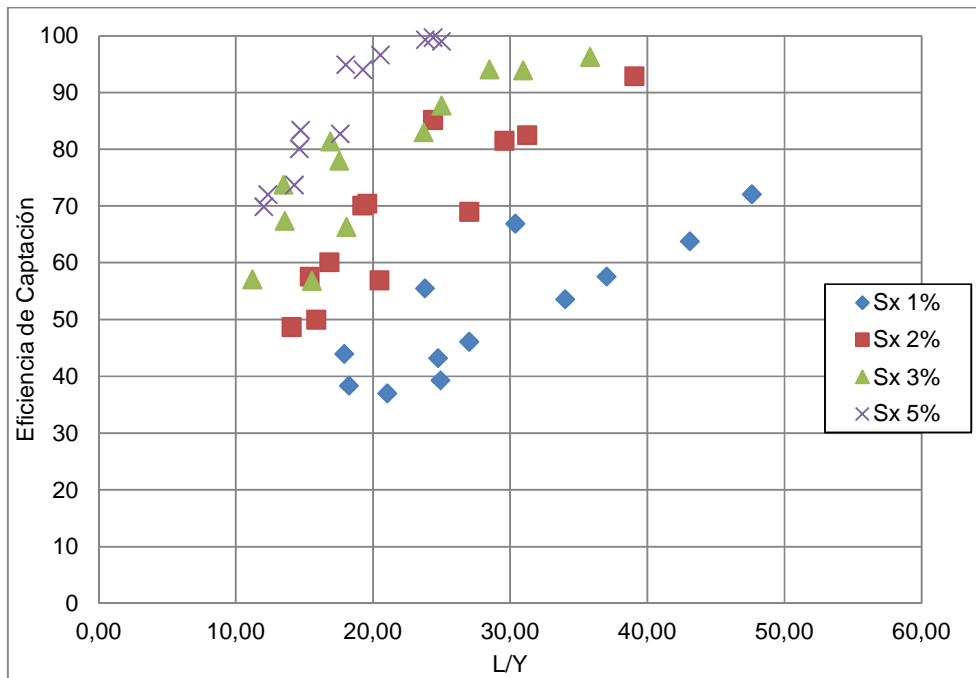
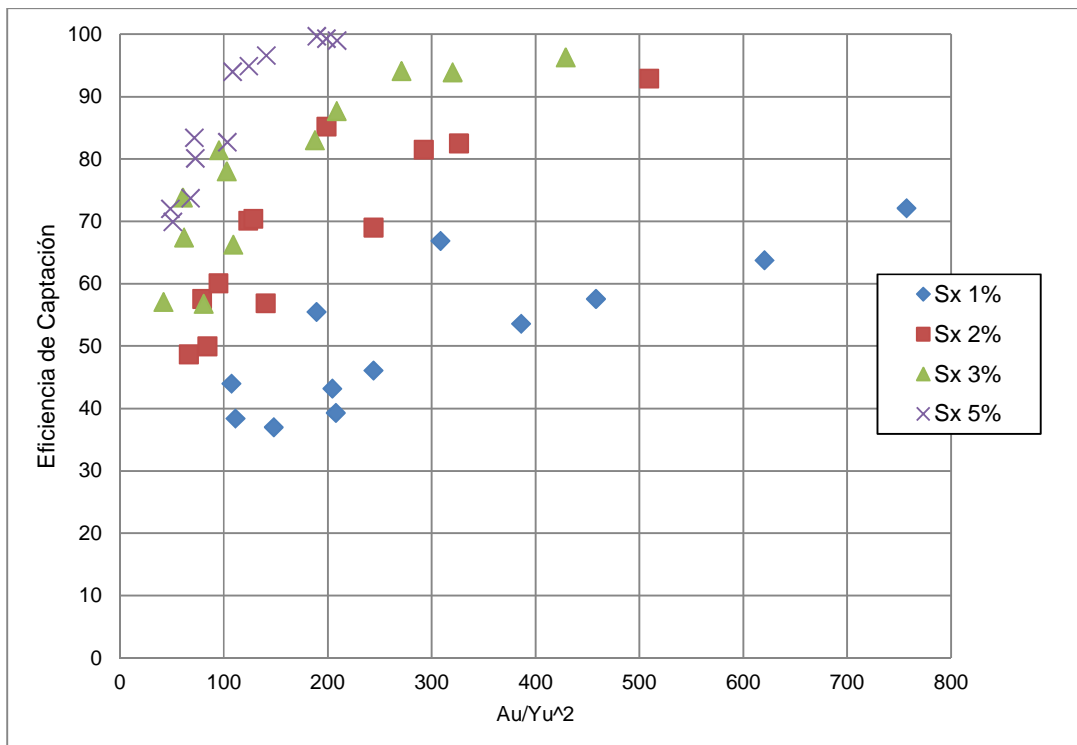


Figura 4.110 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y^2 .



4.9.6 Sumidero con Depresión

Para estos caso particulares se incorpora un nuevo parámetro adimensional que corresponde a la depresión en la calle en función de la altura de escurrimiento, $[\pi_8] = \frac{W_x}{Y}$.

4.9.6.1 Sumidero con Depresión en la calle $\Delta=3$ cm

Se graficó la eficiencia de captación en función de los demás parámetros adimensionales no encontrándose en estos casos una tendencia clara entre los parámetros. Los resultados se muestran en las Tablas 4.111 a la 4.115.

Figura 4.111 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.

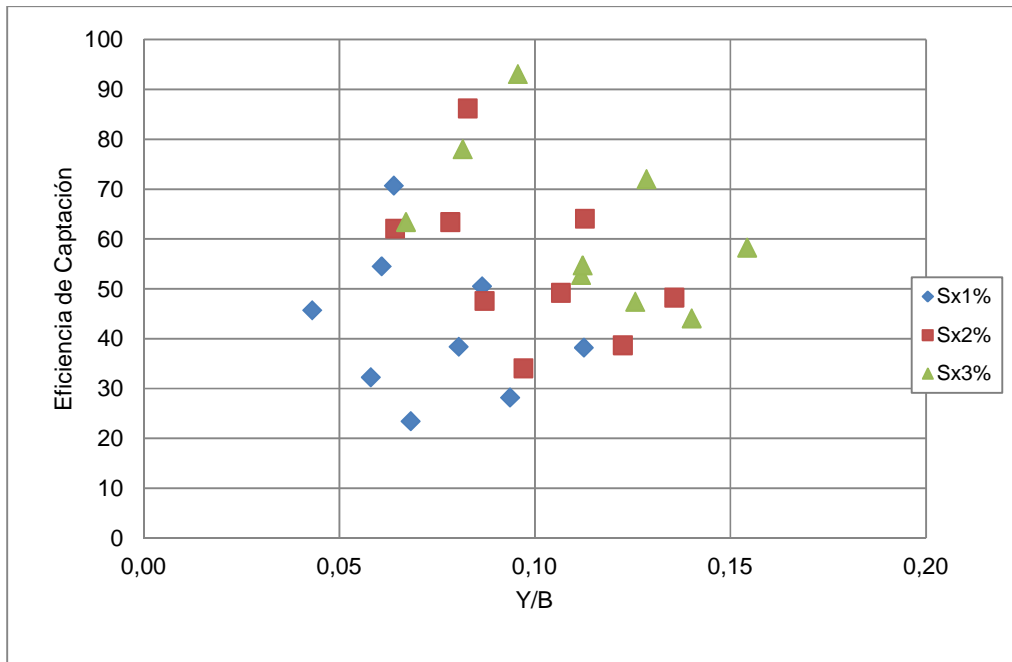


Figura 4.112 Eficiencia de captación en función de parámetro Wx/Y.

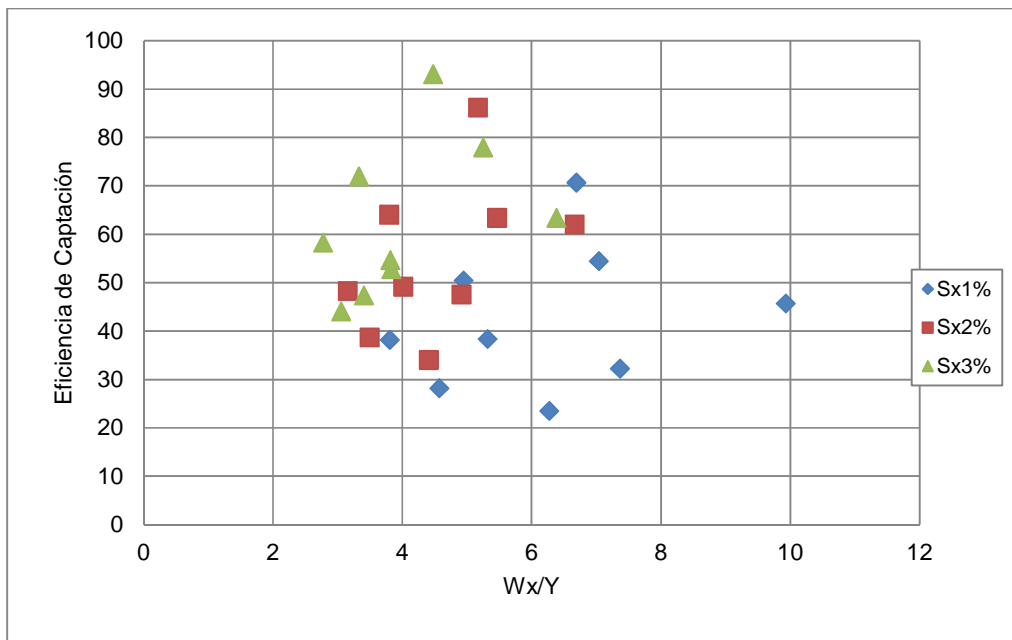


Figura 4.113 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

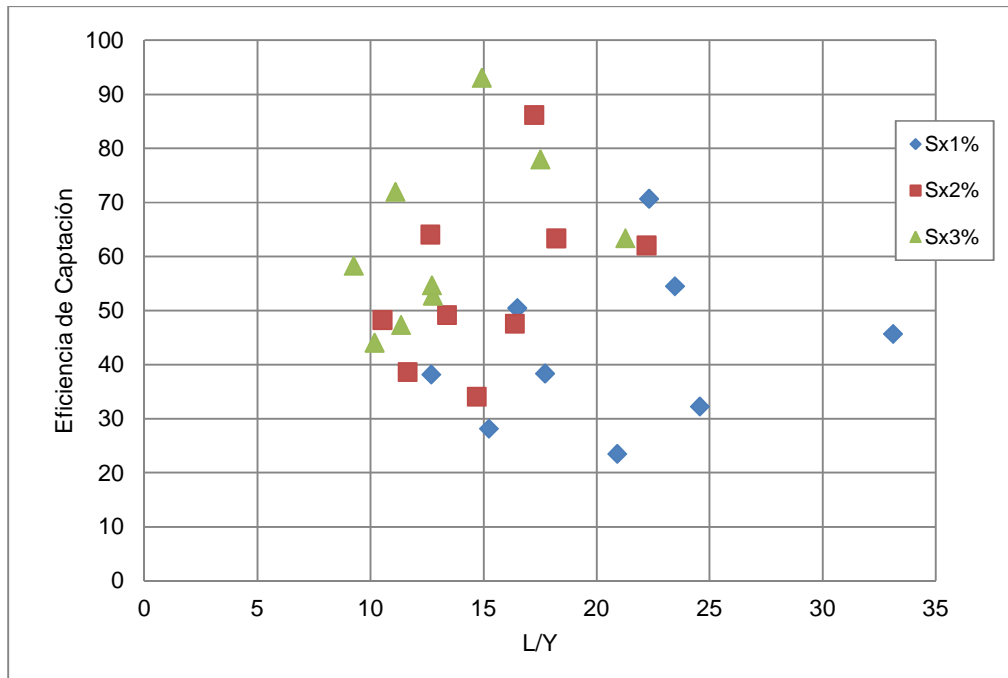


Figura 4.114 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y².

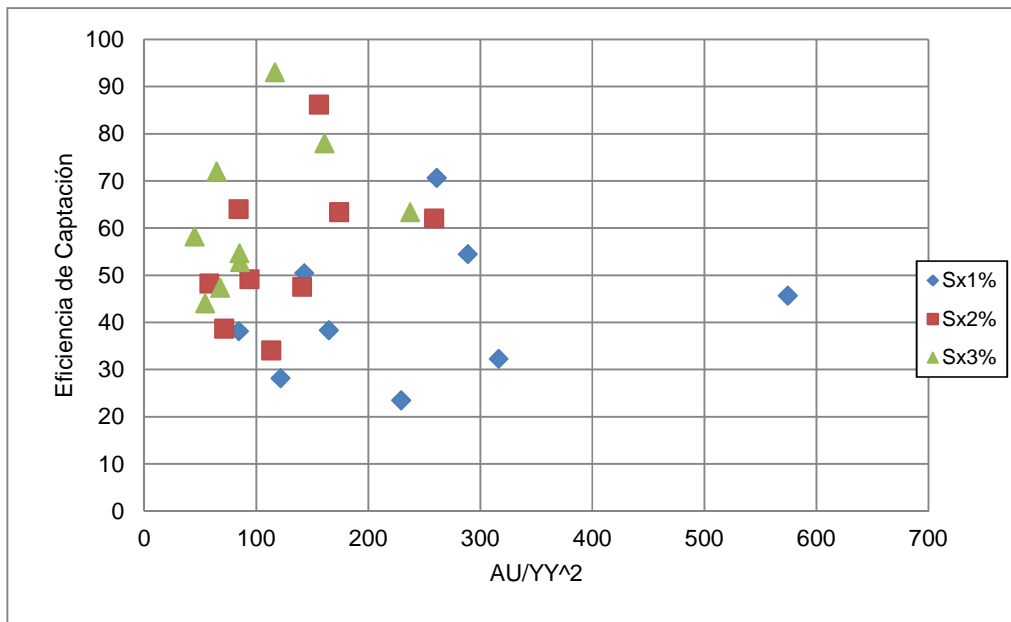
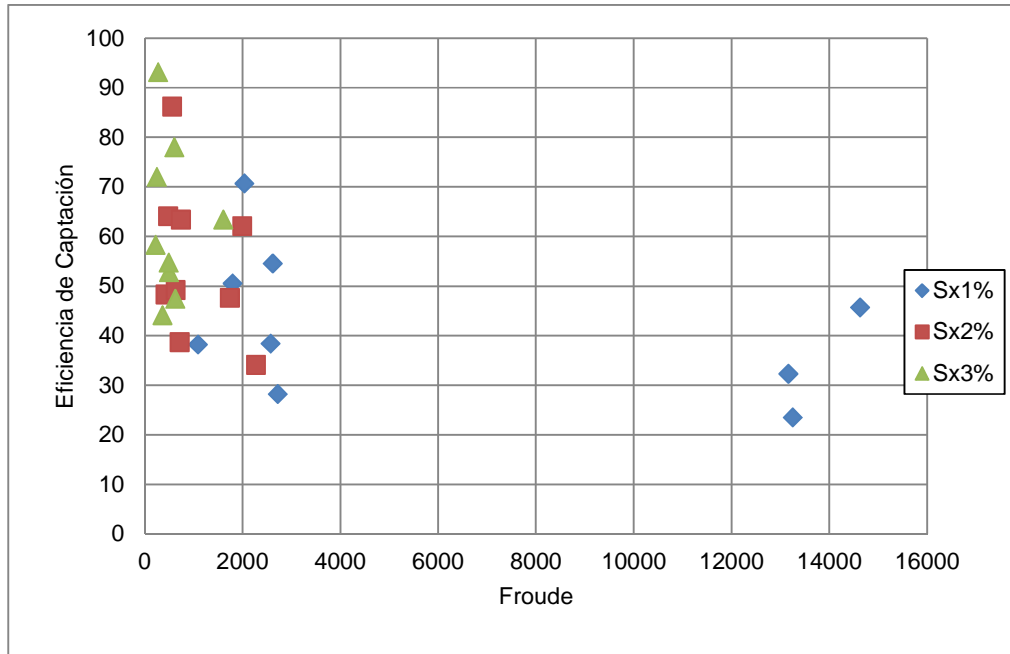


Figura 4.115 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.



4.9.6.2 Sumidero con Depresión en la calle $\Delta=5$ cm

Se graficó la eficiencia de captación en función de los demás parámetros adimensionales no encontrándose en estos casos una tendencia clara entre los parámetros. Los resultados se muestran en las Tablas 4.116 a la 4.120.

Figura 4.116 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B.

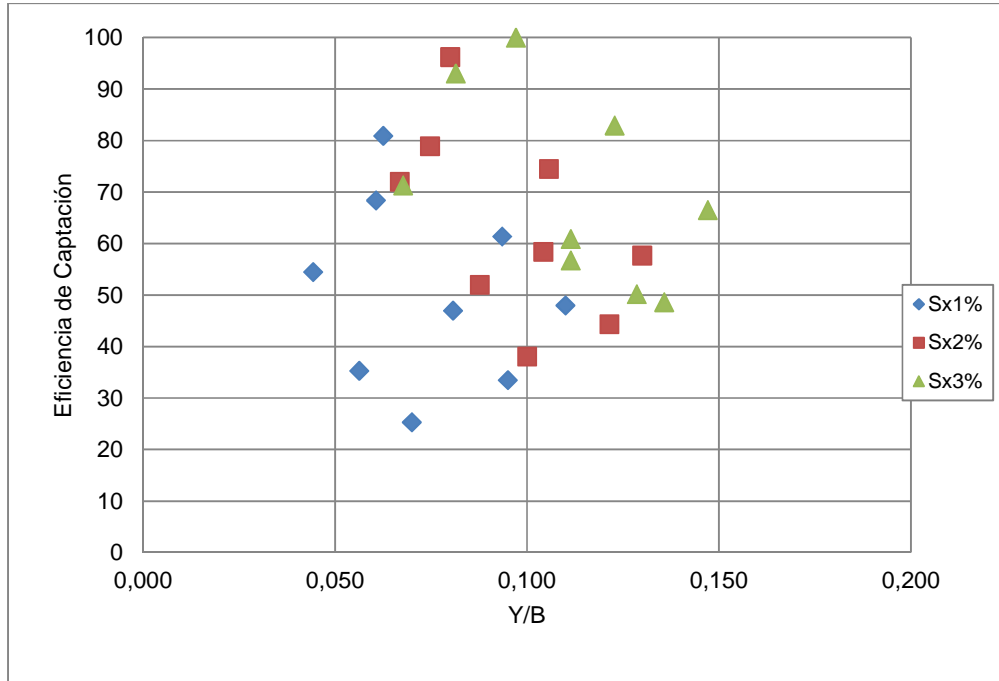


Grafico 4.117 Eficiencia de captación en función de parámetro Wx/Y.

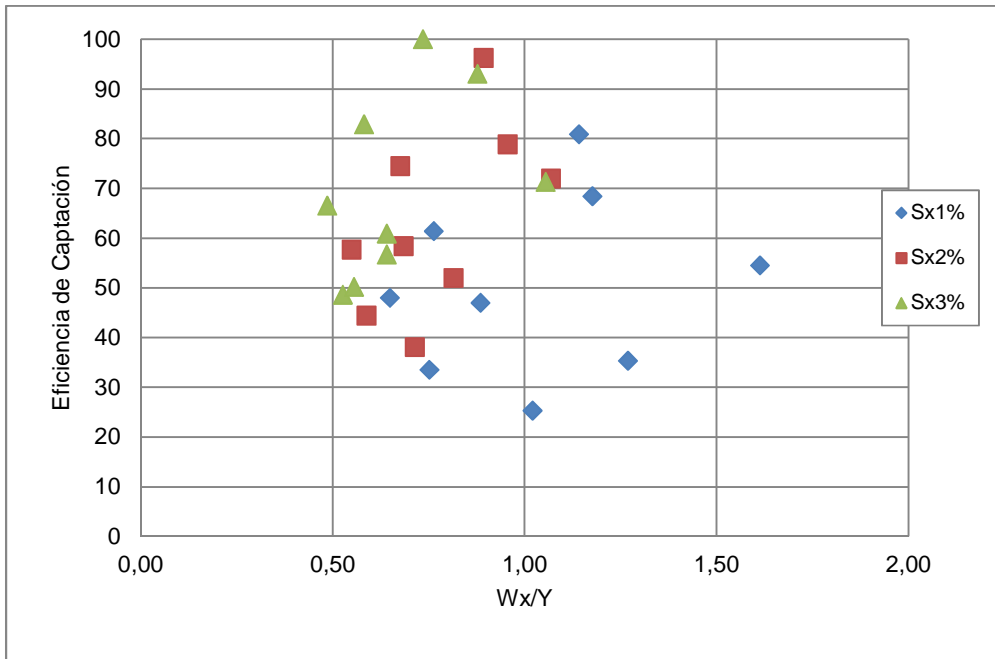


Figura 4.118 Eficiencia de captación en función de parámetro L/Y.

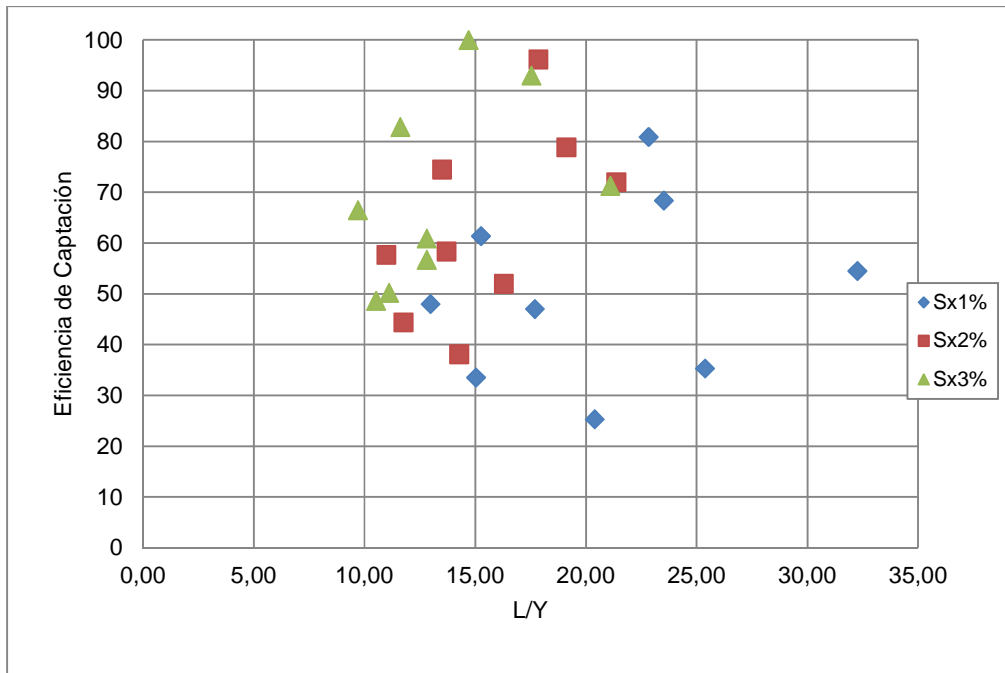


Figura 4.119 Eficiencia de captación en función de parámetro Au/Y².

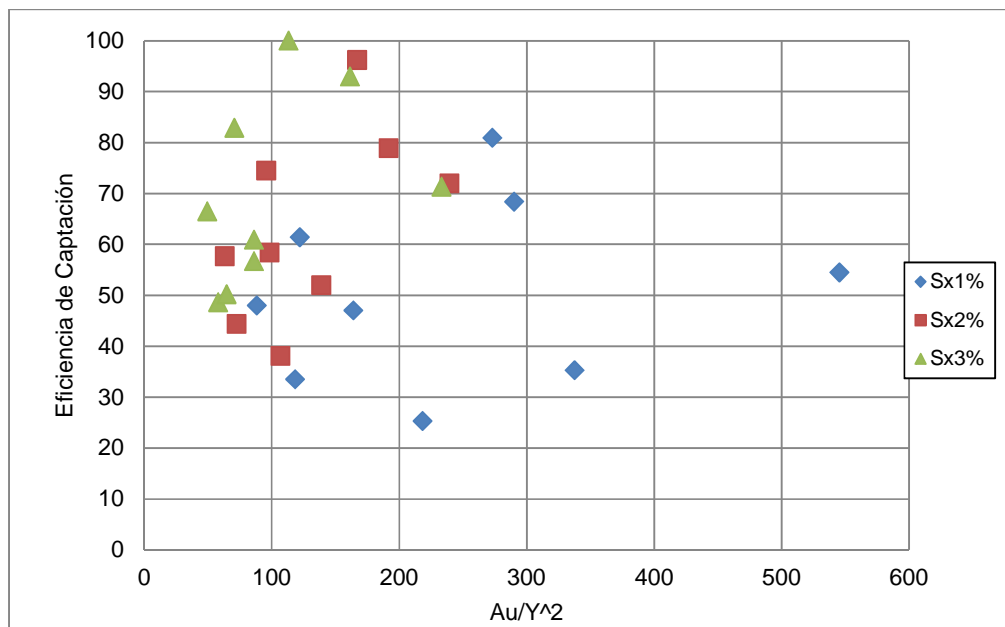
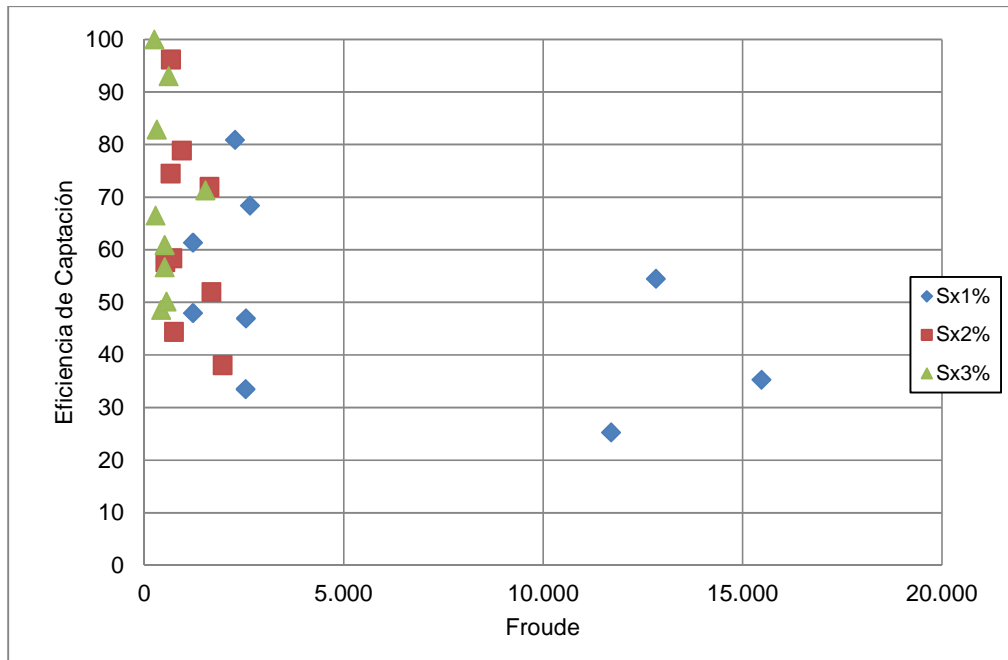


Figura 4.120 Eficiencia de captación en función de parámetro Froude.



Capítulo 5

Resumen de Resultados

A continuación se detallan las principales resultados de analizar cada uno de los métodos de cálculo frente a los datos reales obtenidos mediante la experimentación en la plataforma de ensayos.

5.1 Ajuste Potencial del Comportamiento de las Rejas

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los casos donde fue posible realizar un ajuste potencial de la eficiencia de captación para sumideros de rejillas.

Tabla 5.1 Resumen de Sumideros a los que se les practico un Ajuste Potencial de la Eficiencia de Captación.

Sumidero	Ajuste Potencial
S1	Si
S2	Si*
S3	Si
S4	Si
S5	No

Adicionalmente se comprobó la factibilidad de utilizar una expresión que relaciona los parámetros del ajuste potencial con las características geométricas de las rejillas, de manera de no limitar el método solo a las rejillas ensayadas, sino que extenderlo a otro tipo de rejillas que no han sido ensayadas previamente. Los resultados entregados nos indican que la relación entre los parámetros del ajuste potencial y las características de la rejilla no modela el comportamiento de éstas, entregando valores que no se asemejan a los obtenidos en los ensayos de laboratorio.

* Valores de parámetros de ajuste encontrados para pendientes transversales de un 3% y 5%.

En la Tabla 5.2, se muestran los valores de los parámetros de ajuste potencial obtenidos para los sumideros estudiados para las diferentes pendientes transversales en la plataforma.

Tabla 5.2 Valores de parámetros de ajuste Potencial.

Tipo de Sumidero	Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
Sumidero N°1	1%	0.6159	0.4821	7.59	2.59
	2%	0.7235	0.4590	7.23	2.90
	3%	0.7723	0.4007	6.72	2.85
	5%	0.8201	0.3087	13.46	4.18
Sumidero N°2	1%	0.5417	0.1445	9.04	3.05
	2%	0.7001	0.1543	10.17	3.58
	3%	0.9154	0.4905	2.53	0.87
	5%	0.9660	0.3385	1.97	1.15
Sumidero N°3	1%	0.4567	0.5859	5.0	2.0
	2%	0.5364	0.5663	5.8	2.8
	3%	0.5729	0.5259	4.2	2.1
Sumidero N°4	1%	0.5278	0.5144	5.5	2.7
	2%	0.6357	0.4838	5.6	2.8
	3%	0.6853	0.4976	5.3	2.0
	5%	0.7428	0.4331	6.1	3.7
Sumidero N°5	1%	0.5893	0.4187	12.0	4.4
	2%	0.7061	0.3621	15.7	7.3
	3%	0.7770	0.3778	12.4	6.5
	5%	0.8458	0.2646	7.5	3.6

En la Tabla 5.2, se aprecia que para los Sumideros 1, 3 y 4 el error medio del ajuste se encuentra entre un 2% y 3%. Esto resta validez al ajuste realizado debido a que el error de medición de los datos experimentales corresponde a un 1%, con lo cual para que el ajuste sea completamente valido el error debería encontrarse cercano a ese valor.

Por el contrario para el sumidero 2 se observa que el modelo si alcanza un alto grado de validez, arrojando un error del orden del 1% para ambas pendientes analizadas, lo cual indica que este modelo puede ser utilizado para estimar la eficiencia de captación de sumideros de este tipo o de características similares.

5.2 Ajuste Parabólico – Hiperbólico del Comportamiento de las Rejas

En la Tabla 5.3 se muestra un resumen de los casos donde fue posible realizar un ajuste parabólico de la eficiencia de captación para sumideros de rejás.

Cuadro 5.3 Resumen de Sumideros a los que se les practico un Ajuste Parabólico de la Eficiencia de Captación.

Sumidero	Ajuste Parabólico
S1	No
S2	Si
S3	Si
S4	Si
S5	No

Cabe destacar que para cada una de las rejás, se realizó un ajuste para los diferentes caudales circulantes en la plataforma, dado que en este modelo se considera al caudal como el parámetro más significativo para determinar la eficiencia de captación. En la Tabla 5.4, se muestran los valores de los parámetros de ajuste parabólico obtenidos para los sumideros estudiados para las diferentes caudales en la plataforma.

Cuadro 5.4 Valores de parámetros de ajuste Parabólico-Hiperbólico.

Tipo de Sumidero	Caudal en la Plataforma [lt/s]	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
Sumidero N°1	20	-0.0003	0.0381	11.1	4.11
	40	-0.0001	0.0228	10.8	3.53
	60	-5.00×10^{-05}	0.0165	23.36	10.59
	80	-4.00×10^{-05}	0.0137	18.34	9.76
	100	-2.00×10^{-05}	0.011	12.94	7.20
	120	-1.00×10^{-05}	0.0095	12.09	5.75
Sumidero N°2	60	-6.00×10^{-05}	0.0194	7.2	2.91
	80	-2.00×10^{-05}	0.0145	5.5	2.71
	100	-5.00×10^{-06}	0.0118	5.91	2.88
	120	-1.00×10^{-06}	0.0102	7.09	2.46
Sumidero N°3	20	-9.00×10^{-05}	0.0244	8.04	3.29
	40	7.00×10^{-05}	0.0106	4.63	1.78
	80	3.00×10^{-05}	0.0068	4.94	1.61
	120	2.00×10^{-05}	0.0048	4.95	1.83
Sumidero N°4	20	-1.00×10^{-04}	0.0299	10.28	5.1
	40	-2.00×10^{-05}	0.0176	4.96	2.28
	80	9.00×10^{-06}	0.0101	4.88	2.22
	120	2.00×10^{-06}	0.0074	4.28	2.61
Sumidero N°5	20	-0.0005	0.0445	25.38	7.42
	40	-0.0002	0.0277	25.56	9.55
	80	-7.00×10^{-05}	0.0156	21.25	9.41
	120	-3.00×10^{-05}	0.0107	14.47	7.53

De esta manera se procedió a ajustar los parámetros A y B, encontrados del ajuste parabólico de la eficiencia, asumiendo que dependen exclusivamente del caudal circulante y en forma hiperbólica.

Con lo anterior se procedió a estimar los coeficientes característicos para cada una de las rejjas. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Parámetros característicos de las rejjas para Ajuste Hiperbólico de los parámetros de la Parábola.

	a	b	c	a'	b'	c'
Sumidero 2	25.45	-0.000006	0.019	-18.182	0.003945	0.7836
Sumidero 4	6.718	-0.000033	0.0421	-6.316	0.001416	0.86579

Al tratar de realizar un ajuste hiperbólico de los parámetros de la parábola que modelan la eficiencia para el sumidero 3, se encontró que no existían valores reales que representaran este ajuste para los coeficientes mencionados.

De los cuadros anteriores, al verificar la real validez del modelo comparando los errores de los ajustes con el error de medición correspondiente a un 1%, se observa que para todos los sumideros el error medio cometido en el ajuste bordea entre un 2% y 3%.

Por lo anterior, este método presenta tres grandes desventajas. Primero, no resulta conveniente por el hecho de que tengamos que realizar dos ajustes, parabólico para la eficiencia e hiperbólico para los coeficientes de la parábola, lo que lo convierte en un ajuste largo y complejo. Segundo, el método no garantiza el hecho de dado que obtenemos un ajuste parabólico exitoso, seamos capaces de ajustar correctamente los coeficientes de la hipérbola (como queda demostrado en el ejemplo del sumidero 3), los cuales, son los parámetros representativos de cada reja estudiada. Tercero el valor del error medio del ajuste, superior al error de medición, y el orden de los parámetros de ajuste, hacen dudar de la real validez de los resultados encontrados mediante este modelo.

Por todo lo anterior, no es recomendable hacer uso de este modelo para estimar la eficiencia de captación de sumideros bajo ninguna condición de caudal o pendientes.

5.3 Análisis del Método propuesto por la Universidad John Hopkins

Para cada uno de los sumideros analizados se comprueba que este método entrega valores de la eficiencia superiores a la capacidad real estimada experimentalmente.

Este método logro sus mejores resultados al ser aplicado los sumideros 4 y sumidero 5 y para condiciones de pendientes transversales de un 3% y 5%.

Para el caso del sumidero 1 no es recomendable aplicar este método debido a que, de los cálculos realizados se obtiene que a medida que se aumenta la pendiente transversal en la calle disminuye el valor de la eficiencia de captación, lo cual va en contra de lo observado experimentalmente.

Para el caso del sumidero 3 no es recomendable aplicar este método debido a que la diferencia entre los valores teóricos y experimentales aumenta a medida que aumenta el valor del caudal en la calle, lo que va en contra de la tendencia observada para los otros sumideros.

En la Tabla 5.6 se muestran los rangos de pendientes y caudales para los cuales es recomendable aplicar este método, como además parámetros de corrección de la eficiencia para ciertas condiciones de pendientes, que permiten que el modelo sea válido.

Tabla 5.6 Rangos de mayor precisión de método de Universidad Johns Hopkins.

Sumidero	Pendiente Longitudinal [%]	Pendiente Transversal [%]	Caudal Total [l/s]	Observaciones
1	-	-	-	No aplicable
2	0,1	3	60 a 120	Corrección C=0,84
		5	60 a 120	
	1	3	60 a 120	Corrección C=0,83
		5	60 a 120	
	3	3	60 a 120	Corrección C=0,83
		5	60 a 120	
3	-	-	-	No aplicable
4	0,1	3	20 a 40	
		5	20 a 80	Corrección C=0,84
	1	5	20 a 80	Corrección C=0,83
	3	5	20 a 80	Corrección C=0,84
5	0,1	5		
	1	5		
	3	2		
		3		

5.4 Análisis del Método recomendado por SERVIU

Este método, entrega valores de la eficiencia superiores a la capacidad real estimada experimentalmente. En particular no es recomendable para pendientes transversales superiores a un 3%.

Respecto de la calidad del método, este representó de manera apropiada el funcionamiento de todos los sumideros para condiciones de pendientes transversales bajas y exceptuando condiciones puntuales, puede simular con un alto grado de precisión el comportamiento hidráulico de los sumideros de este estudio.

Los mejores resultados se obtuvieron al aplicar el método al sumidero 3 y 4. Para el caso del sumidero 5 no es recomendable para una pendiente longitudinal de un 0,1% debido a las fluctuaciones en los valores de las eficiencias encontradas.

Tabla 5.7 Rangos de mayor precisión de método recomendado por Serviu.

Sumidero	Pendiente Longitudinal [%]	Pendiente Transversal [%]	Caudal Total [l/s]	Observaciones
1	0,1	1-2	20 a 120	
		3	40 a 120	
	0,5	1-2	40 a 120	
		3-4	40 a 120	
		5	80 a 120	
	1	1-2-3	40 a 120	
		5	60 a 120	
3	1-2	20 a 120		
2	0,1	1	60 a 120	
		2	60 a 120	Corrección C=0,87
	1	1	60 a 120	
		2	60 a 120	Corrección C=0,85
	3	1-2	60 a 120	
		3	60 a 120	Corrección C=0,87
3	0,1	1-2	20 a 120	
		3	40 a 120	
	1	1	20 a 120	
		2	40 a 120	
		3	40 a 120	Corrección C=0,85
	3	1	20 a 120	
		2	20 a 120	
		3	40 a 120	
		5	40 a 120	Corrección C=0,82
4	0,1	1	20 a 120	
		2-3	40 a 120	
	1	1-2-3	40 a 120	
	3	1	20 a 120	
		2	40 a 120	
		3	40 a 120	
		5	80 a 120	
5	1	1-2-3	40 a 120	
		5	80 a 120	Corrección C=0,87
	3	1-2-3	20 a 120	
		5	80 a 120	

En la Tabla 5.7 se muestran los rangos de pendientes y caudales para los cuales es recomendable aplicar este método, como además parámetros de corrección de la eficiencia para ciertas condiciones de pendientes, que permiten que el modelo sea válido.

5.5 Cálculo del Coeficiente de Desagüe de la Reja.

Asumiendo un flujo 1D espacialmente variado sobre la reja, y calculando el coeficiente de desagüe correspondiente, observamos que el citado C_d no varía prácticamente con la pendiente longitudinal. En cambio, depende del caudal circulante en la plataforma y de la pendiente transversal, encontrándose que este C_d es creciente a medida que aumentan estos parámetros.

Adicionalmente, este parámetro nos permite realizar una clasificación de mejor a peor tipo de reja estudiada. En este análisis, no se consideró la reja del sumidero 2, esto debido a que la reja se compone de dos rejillas de sumidero 1 puestas en serie, por lo cual el análisis de este caso sería redundante. Finalmente el ranking de las rejillas es el mostrado en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Ranking de las Rejas en Base a su capacidad Hidráulica de Captación.

		Cd	Observaciones
1 ^a	Reja 3	0,057	Los valores de Cd corresponden a un caudal de 80 [l/s] y Sx del 2%.
2 ^a	Reja 1	0,047	
3 ^a	Reja 4	0,043	
4 ^a	Reja 5	0,034	

Respecto al efecto de la pendiente transversal, se aprecia que el coeficiente de desagüe C_d , crece a medida que se aumenta el valor de la pendiente de la calle. Sin embargo se observa que para pendientes transversales bajas ($\leq 1\%$) los resultados no son tan evidentes, dado que en este caso la realidad del flujo hace muy difícil mantener el supuesto de flujo unidimensional.

5.6 Análisis de Sumideros con Depresión (Rejas de Sumidero N°1)

De las Tablas 5.9 y 5.10, se aprecia que para ambos casos el error medio del ajuste se encuentra entre un 2% y 5%, esto resta validez al ajuste realizado debido a que el error de medición de los datos experimentales se corresponde a un 1%, con lo cual para que el ajuste sea completamente válido el error debería encontrarse cercano a ese valor.

Solamente para una condición de pendiente transversal de 2% y una depresión de 5 cm, el valor del error estuvo muy cercano al error de medición de los datos experimentales.

Cuadro 5.9 Valores de parámetros de ajuste Potencial Δ 3cm.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	0,8712	0,9916	7,5	3,4
2%	0,8022	0,8647	10,9	4,6
3%	0,8288	0,8751	7,6	3,8

Cuadro 5.10 Valores de parámetros de ajuste Potencial Δ 5cm.

Pendiente Transversal	A	B	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1%	1,107	1,0953	7,5	3,2
2%	0,8916	0,8779	3,1	1,5
3%	0,9332	0,8802	13,3	5,6

5.7 Sumideros fuera de la calzada (Vertedero lateral con Reja Sumidero N°1)

Como se muestra en el Capítulo 4, para estos casos se determinaron los coeficientes de desagüe bajo distintas condiciones de pendientes en la calle y caudal de entrada. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.11.

Es importante destacar en estos casos que los valores de coeficiente de desagüe y por tanto los valores de caudal captado de forma lateral, no consideran el efecto de la reja de captación instalada. Con lo anterior, para poder validar mayores rangos de precisión de estos coeficientes, se requeriría estudiar bajo las mismas condiciones de caudal y pendiente el mismo sumidero pero sin reja de fondo, de manera de determinar de forma efectiva solamente el caudal de captación lateral.

Al comparar los resultados obtenidos entre cada uno de los sumideros, se logra apreciar que para las mismas condiciones de pendiente en la calle, los valores de los coeficientes son similares, lo que era de esperar al considerar que la única diferencia geométrica entre los sumideros era la longitud de la ventana lateral.

Tabla 5.11 Valores de Coeficiente de Desagüe Sumidero en Acera Ventana.

Pendiente Longitudinal	Pendiente Transversal	Lv 2,4 m		Lv 3,2 m	
		Caudal Captado [l/s]	C _Q L _v 2,4 [m]	Caudal Captado [l/s]	C _Q L _v 3,2 [m]
0,1%	1%	24,66	0,280	31,74	0,282
	1%	37,20	0,296	47,64	0,286
	1%	45,36	0,243	57,24	0,200
0,1%	3%	38,88	0,437	47,52	0,458
	3%	61,56	0,439	78,60	0,400
	3%	75,42	0,303	97,56	0,292
1%	1%	14,28	0,294	20,40	0,303
	1%	24,36	0,340	32,76	0,307
	1%	27,00	0,286	39,06	0,285
1%	3%	28,08	0,417	36,36	0,423
	3%	39,36	0,408	52,44	0,363
	3%	47,52	0,348	66,42	0,328
3%	1%	12,00	0,303	15,78	0,265
	1%	19,32	0,310	25,32	0,284
	1%	20,16	0,256	26,82	0,219
3%	3%	19,68	0,360	26,52	0,353
	3%	34,68	0,339	48,84	0,319
	3%	47,16	0,305	64,44	0,300

5.8 Curvas Características de Sumideros con Rejas

Para este análisis, el objetivo era buscar si era factible la existencia de una relación entre la altura de escurrimiento y caudal captado basados en los parámetros recomendados por el Serviu Metropolitano para 5 tipos de sumideros utilizados por ellos.

Como se mostró en el Capítulo 4, fue factible encontrar una relación entre estos conceptos para los 7 sumideros de reja estudiados. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5.1 a la 5.3.

Figura 5.1 Valores del Curvas Características Sumidero N°1; Sumidero N°2 y Sumidero N°3.

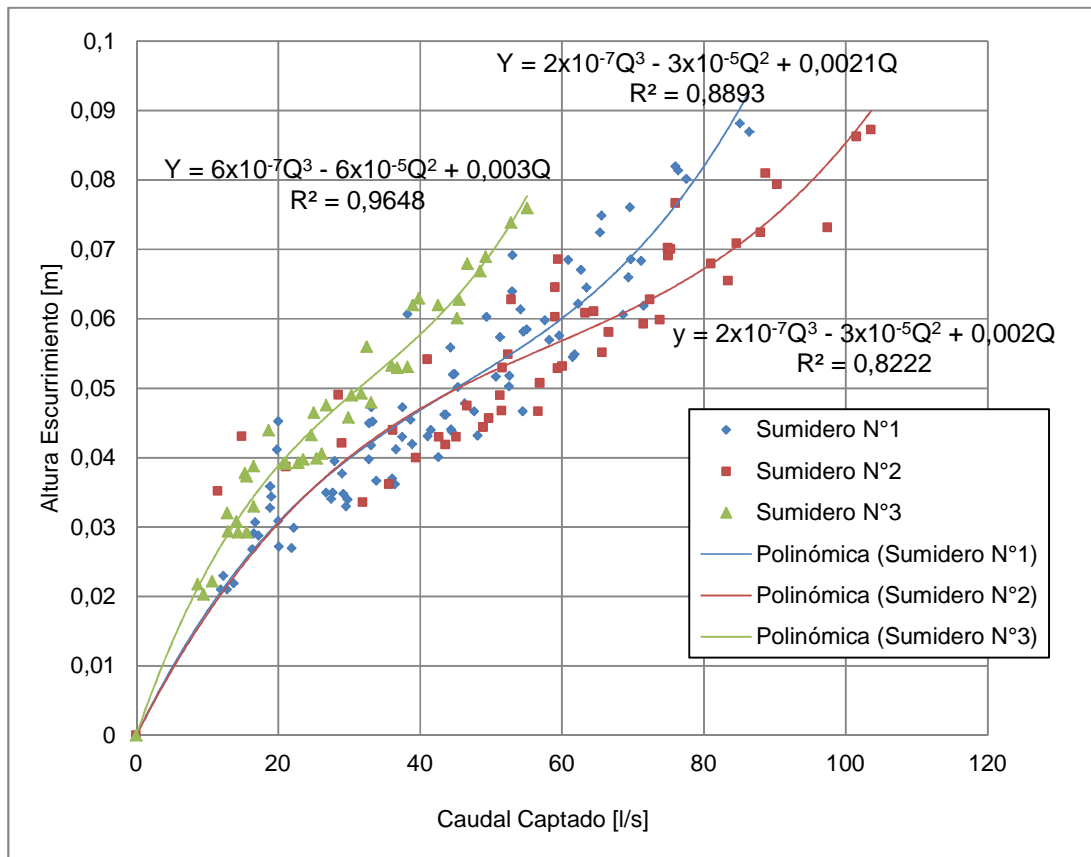


Figura 5.2 Valores del Curvas Características Sumidero N°4 y Sumidero N°5.

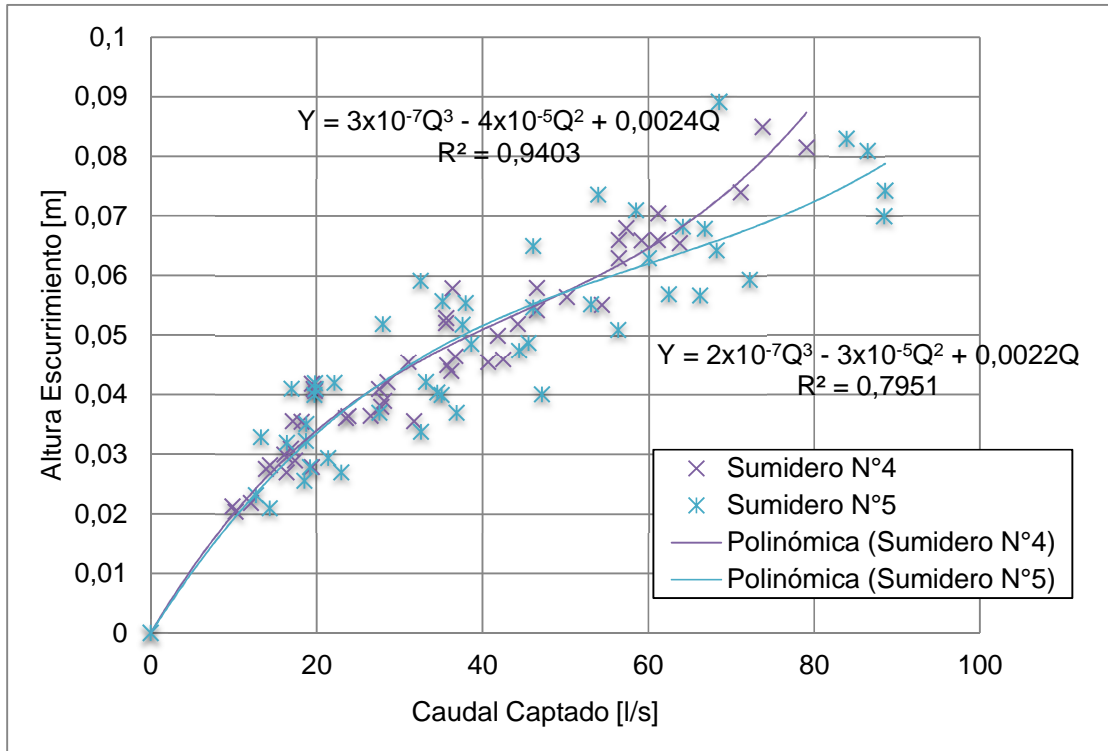
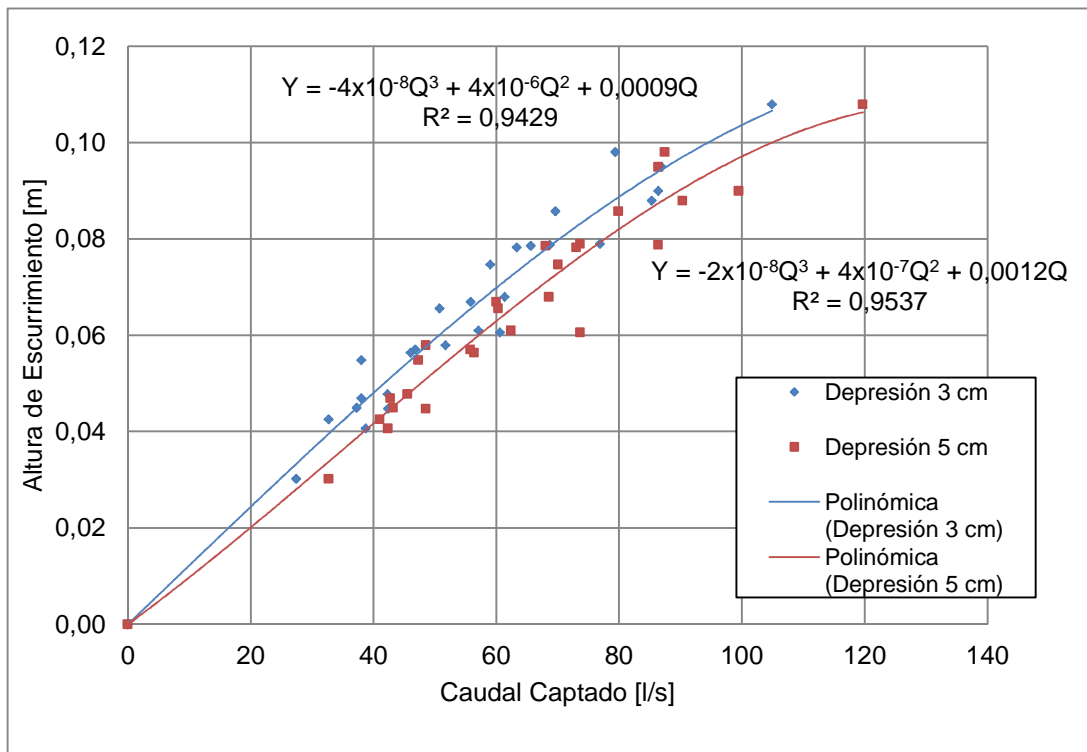


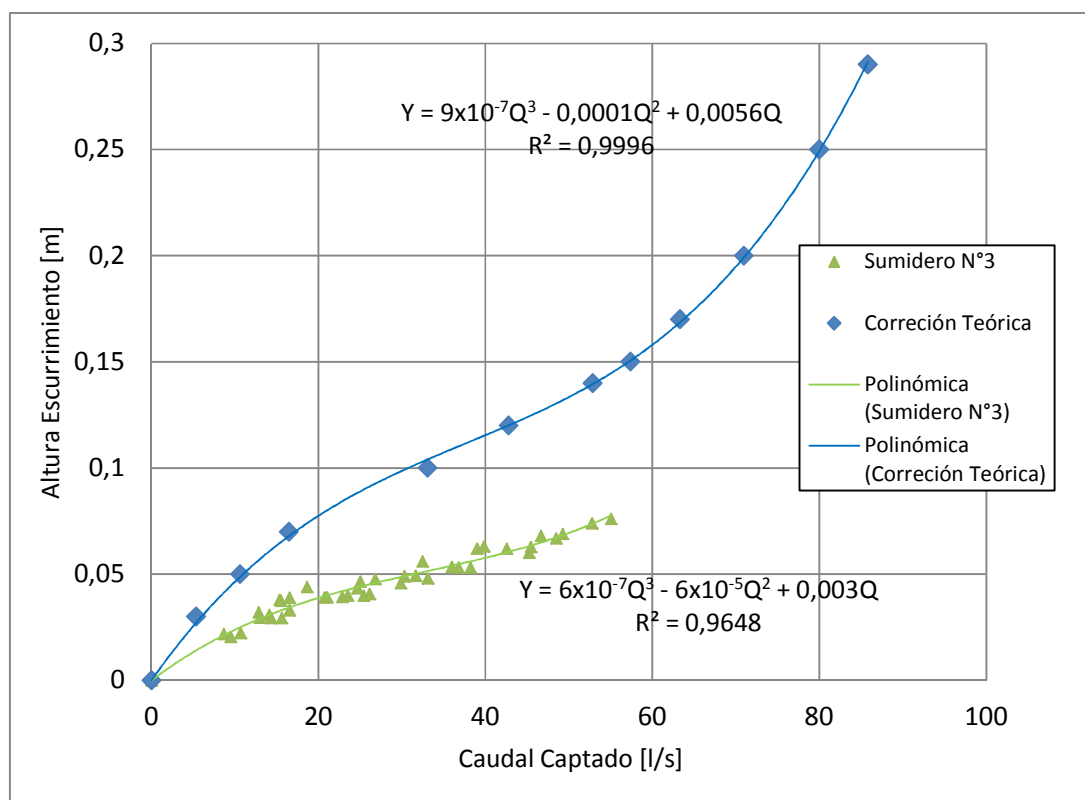
Figura 5.3 Valores del Curvas Características Sumidero con depresión en la calle para $\Delta 3\text{cm}$ y $\Delta 5\text{ cm}$.



En la Figura 5.4, se puede observar que al comparar los valores reales con los valores recomendados por Serviu para el sumidero N°3 se observó una gran diferencia entre los valores reales y las curvas ajustadas. Estas curvas son comúnmente utilizadas en modelos numéricos para modelar el agua saliente de un sistema de red de aguas lluvias, lo cual indica que utilizando las curvas teóricas se está subestimando el caudal que sale del sistema y por tanto se está subestimando las capacidades de las redes de colectores.

Para verificar lo anterior, se recomienda comparar la modelación de un sistema de red de aguas lluvias y verificar los valores obtenidos con cada una de las curvas propuestas.

Figura 5.4 Comparación Valores del Curvas Características Sumidero N°3



5.9 Análisis Dimensional del Fenómeno Sumideros con Rejas

Producto del análisis dimensional efectuado para cada uno de los sumideros, se logró obtener una relación numérica entre la eficiencia de captación; el ancho de la reja del sumidero y la altura de escurrimiento $[\pi_7] = \frac{Y}{B}$, lo anterior se muestra en las Figuras 5.5 a la 5.9.

Figura 5.5 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B (Sumidero N°1).

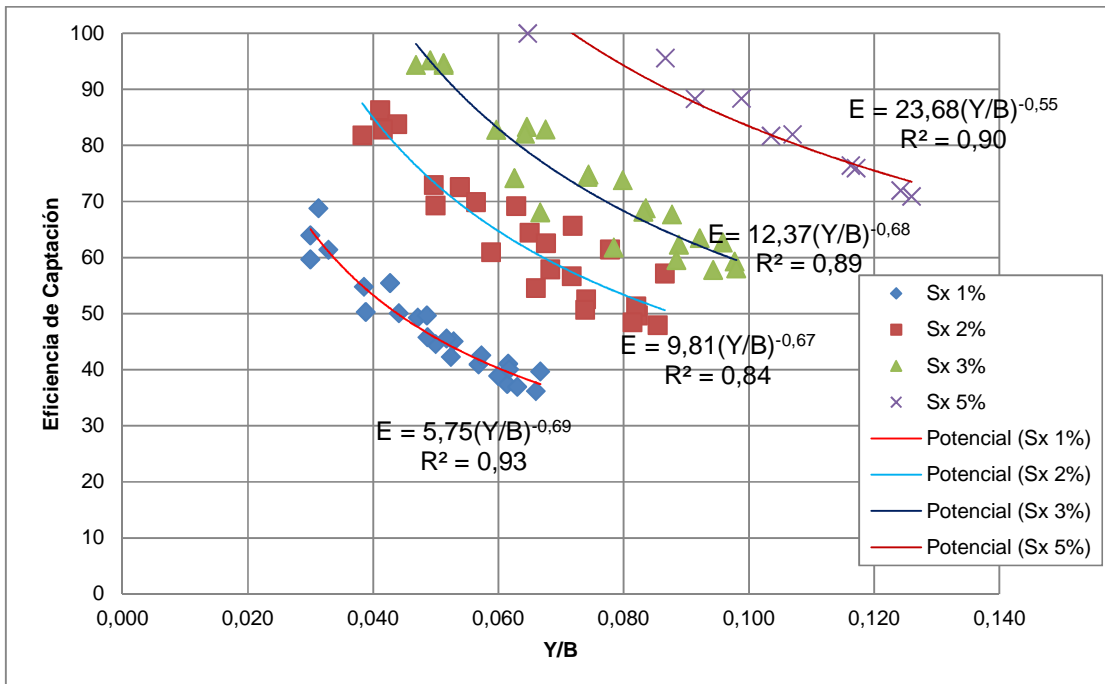


Figura 5.6 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B (Sumidero N°2).

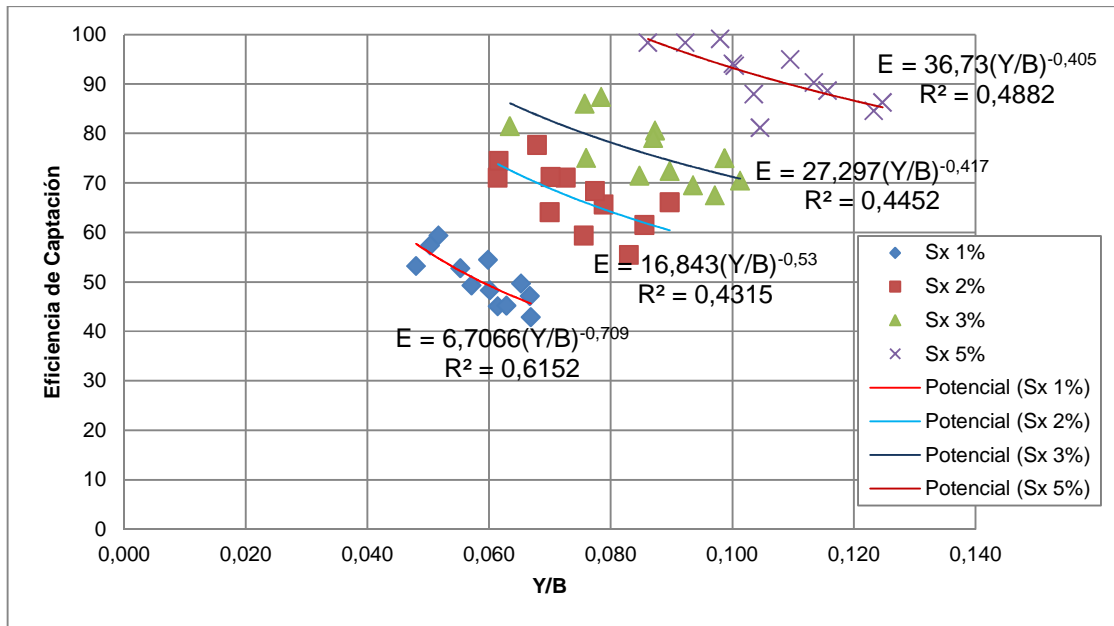


Figura 5.7 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B (Sumidero N°3).

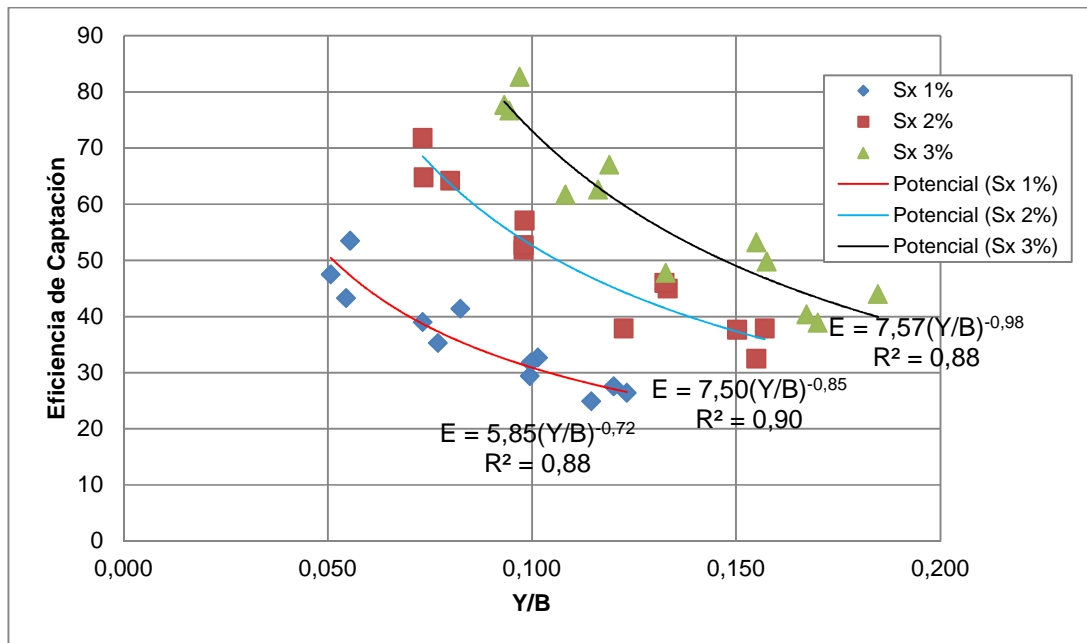


Figura 5.8 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B (Sumidero N°4).

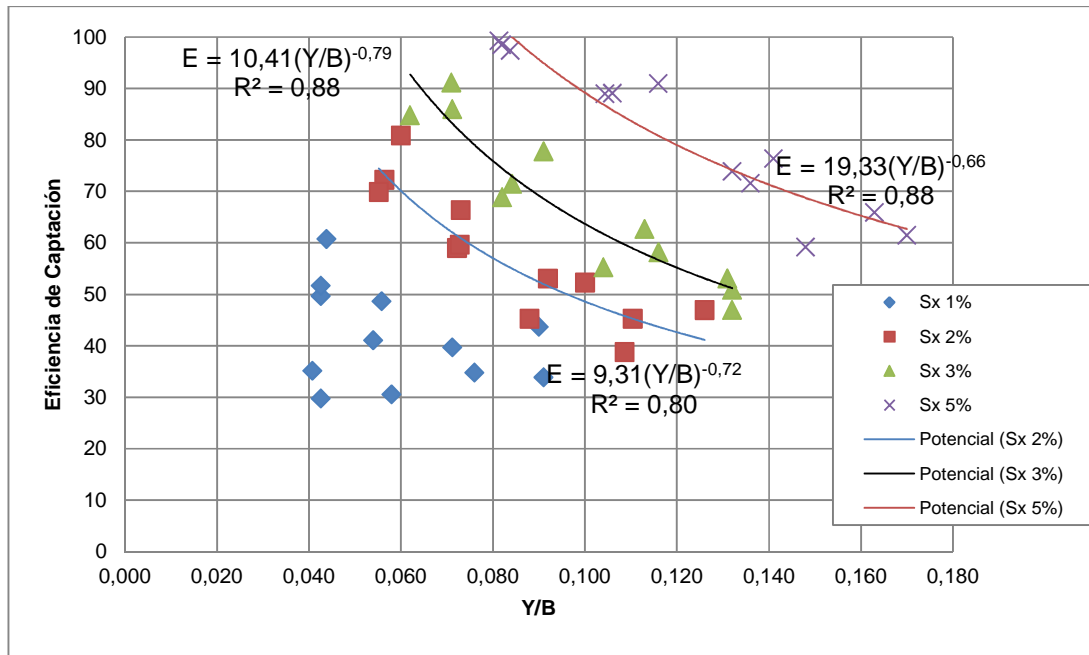
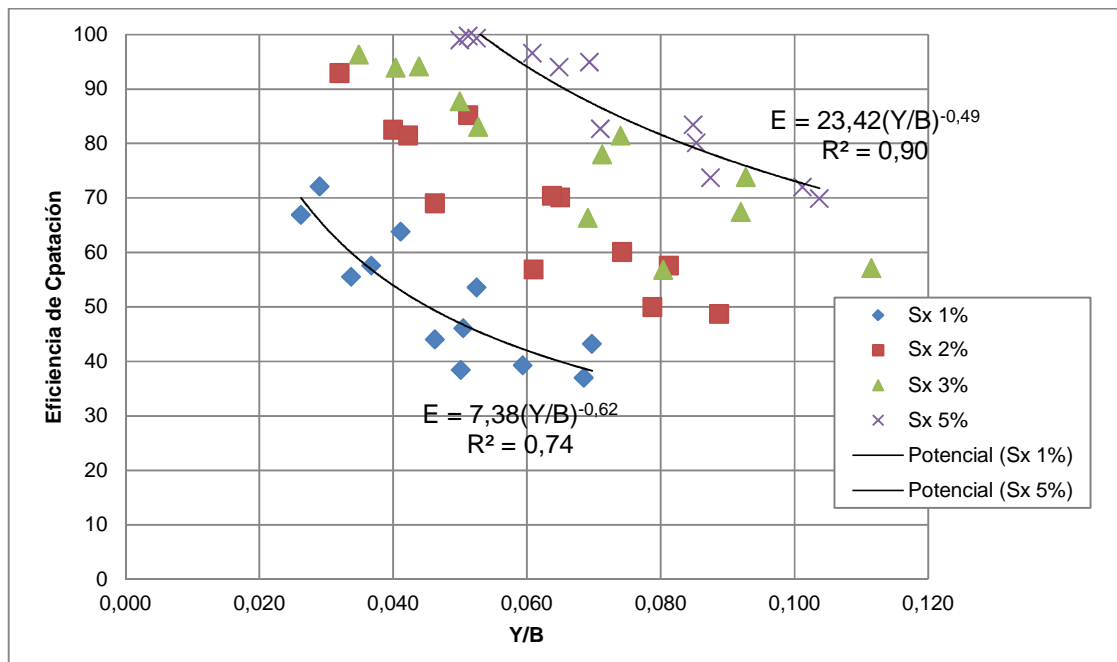


Grafico 5.9 Eficiencia de captación en función de parámetro Y/B (Sumidero N°5).



Finalmente se puede proponer una relación del tipo:

$$E = \lambda \left(\frac{Y}{B} \right)^C \quad (5.1)$$

donde;

$$\lambda = \phi \left(F_r; \frac{L}{Y}; \frac{A_u}{Y^2} \right) \quad (5.2)$$

Cabe destacar que en este caso los parámetros propuestos en el ajuste de tipo potencial. Estos parámetros solamente son válidos para las condiciones de pendiente y del tipo de sumidero estudiado.

Con lo anterior los parámetros propuestos para cada uno de los sumideros corresponderían a lo indicado en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Valores de parámetros de relación de eficiencia de captación altura de escurrimiento y ancho del sumidero.

Sumidero	Pendiente Transversal [%]	λ	C	$\Delta\eta$ Máximo [%]	$\Delta\eta$ Medio [%]
1	1	5,75	-0,69	6,01	1,91
	2	9,81	-0,67	8,44	3,76
	3	12,37	-0,68	9,87	3,20
	5	23,68	-0,55	6,77	2,47
2	No aplica				
3	1	5,85	-0,72	6,59	2,52
	2	7,5	-0,85	6,78	2,81
	3	7,57	-0,98	8,21	4,05
4	2	9,31	-0,72	10,32	4,37
	3	10,41	-0,79	8,85	4,48
	5	19,33	-0,66	10,87	3,55
5	No aplica				

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones Generales

Se efectuó el análisis de la información experimental efectuada por el INH, entre los años 2004 y 2006, a diferentes tipos de sumideros y comparándolos con diferentes métodos cálculo. Adicionalmente para los modelos de SERVIU de la Universidad John Hopkins, se proponen parámetros de ajuste a la modelación.

Para los modelos estudiados, se proponen los rangos en los cuales son válidos, lo anterior en base al error entre la modelación teórica y los datos experimentales.

Del análisis dimensional, se propone una expresión para determinar la eficiencia de captación en función de parámetros característicos relevantes como son la altura de escurrimiento y el ancho del sumidero que enfrenta el flujo.

Se determinaron valores de coeficientes de desagüe de las rejas (C_d) y el valor de los coeficientes de desagüe de un vertedero lateral (C_Q). Estos parámetros, permiten mejorar la modelación de sumideros bajo condiciones específicas de diseño.

Con los datos experimentales, se proponen curvas características de los sumideros, las cuales relacionan la altura de escurrimiento con el caudal captado. Estas curvas son ampliamente utilizadas en modelaciones numéricas de sistemas de recolección de aguas lluvias.

Finalmente del análisis de los sumideros estudiados, se comprobó que estos funcionan como vertederos en las condiciones de pendiente y caudal que forman parte de este estudio.

6.2 Resultados Obtenidos

En la Tabla 6.1, se muestra un resumen de los modelos estudiados para los sumideros de reja e indica si fue factible lograr una modelación en base a los resultados reales.

Tabla 6.1-1 Resumen de modelos aplicados a cada sumidero.

Tipo	Ajuste Potencial	Ajuste Parabólico	Universidad John Hopkins	SERVIU
Sumidero N°1	Si	No	No	Si
Sumidero N°2	Si	Si	Si	Si
Sumidero N°3	Si	Si	No	Si
Sumidero N°4	Si	Si	Si	Si
Sumidero N°5	No	No	Si	Si

En general para estas modelaciones los modelos que lograron los mejores resultados corresponden al modelo potencial y al modelo propuesto por SERVIU Metropolitano. No obstante, para el caso del modelo potencial, los valores de error estimados son superiores al error de medición de los datos experimentales que corresponde a un 1%, solamente los valores de error alcanzaron estos rangos al estudiar el Sumidero N°2, lo cual indica que este modelo puede ser utilizado para estimar la eficiencia de captación de sumideros de este tipo o de características similares.

Para el caso del modelo recomendado por SERVIU, éste logró buenos resultados para todos los sumideros estudiados, por lo cual es altamente recomendable su utilización en el diseño obras de captación de aguas lluvias. En particular, se comprueba de los datos experimentales que los sumideros se encuentran bajo la condición de funcionamiento de vertedero, no encontrándose alguna condición de pendiente o caudal, un funcionamiento como orificio.

Para los demás modelos estudiados, estos no son recomendables, dada la poca exactitud de los resultados obtenidos, como además la obtención de resultados contrarios a lo indicado durante el desarrollo de los experimentos. Particularmente, el modelo de la Universidad John Hopkins se encontró que la eficiencia de captación no aumentaba al aumentar la pendiente transversal, lo cual es totalmente contradictorio a las experiencias realizadas.

Para el caso del ajuste Parabólico –Hiperbólico, al efectuar el primer ajuste de tipo parabólico, se observa que los parámetros correspondientes al cuadrado de la altura de escurrimiento son prácticamente cero. Por lo anterior, para este caso se asume una relación lineal entre la altura de escurrimiento y la eficiencia de captación, lo cual contradice la publicación presentada en el XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica por Gómez et al., (2000).

Para el caso de sumideros con depresión, los resultados obtenidos de la modelación numérica no son concluyentes.

6.3 Análisis Dimensional

Para el análisis dimensional desarrollado para los sumideros de rejillas sin depresión y con depresión, se consiguió verificar la existencia de una correlación entre la eficiencia de captación, la altura de escurrimiento y ancho del sumidero.

Lo anterior es relevante dado que de los estudios experimentales, se determinó que tanto la altura de escurrimiento como el ancho de la rejilla que enfrenta el flujo, son parámetros que influyen de manera directa en el caudal captado por el sumidero.

6.4 Recomendaciones

Como recomendación para estudios de interés se propone:

- Desarrollo de aplicación de un modelo en 2 o 3 dimensiones.
- Incorporar los resultados obtenidos en modelos de aguas lluvias como EPA-SWMM (licencia gratuita) y efectuar una comparación de los resultados con los modelos actualmente utilizados.
- Para los casos de sumideros fuera de la calzada, realizar nuevas experiencias con diferentes tipos de rejas e incorporar una experiencia sin reja, de manera de determinar la capacidad hidráulica del vertedero sin la influencia del tipo de reja en el caudal captado.
- Realizar nuevas experiencias incorporando aguas con sedimentos en suspensión y arrastre.

Capítulo 7

Bibliografía

- Clavero, J. (2003). Diseño vial para urbanización de viviendas sociales. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2005). Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructuras de aguas lluvias. Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU).
- Gómez, M., Martínez P., González J. (2000). Análisis del comportamiento hidráulico de rejillas y sumideros. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina.
- Gómez, M., González J. y otros (1998). Una metodología de sumideros y de cálculo del caudal captado en viales urbanos. XVIII Congreso latinoamericano de Hidráulica, Oaxaca, México.
- Guo, J.C.Y. (2001). Street Hydraulics and Inlet. Water Resources Publications, LLC, 29-47.
- Hydraulic Engineering Circular No. 22 (2009). Urban Drainage Design Manual. National Highway Institute.
- John Hopkins University (1956). The Design of Stormwater inlets, Report of the Storm Drainage Community.
- Kaliski, E., Cortéz, R. (2004). Plataforma de Pendientes Variables para la experimentación de sumideros de aguas lluvias. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Paulo, Brasil.
- Kaliski, E., Cortéz, R. (2005). Estudio Experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias. XVII Congreso Chileno de Hidráulica, Valparaíso, Chile.
- Kaliski, E., Cortéz, R. (2006). Estudio Experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias; Caso: Sumidero ubicado fuera de la calle. XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Ciudad Guayana, Venezuela.

- Kaliski, E., Cortéz, R. (2008). Estudio Experimental del funcionamiento de sumideros de aguas lluvias; Caso: Incorporación de Zona de Influencia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia.
- Mery, H., (2013). Hidráulica Aplicada al Diseño de Obras, 189-192. Ril Editores.
- Mosqueira, C. (2010). Diseño Especializado de Sumideros. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Diego Portales.
- Muñoz, P. (1986). Proposición de una normativa técnica para el diseño de sistemas de desagües de aguas lluvias urbanas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Subramanya, K. (1982). Flow in Open Channels. Tata McGraw-Hill.
- Thomas, N., Reese, A. (1992). Municipal Stormwater Management. Lewis Publishers. p1135.

Anexo I

Tabla I.1 Valores de Cd Sumidero N°1 para pendiente longitudinal Sy 0,1 % y 0,5%.

Caudal	Sy 0.1%			Sy 0.5%				
	Cd			Cd				
[lt/s]	Sx 1%	Sx 2%	Sx 3%	Sx 1%	Sx 2%	Sx 3%	Sx 4%	Sx 5%
20	0,025	0,027	0,028	0,023	0,028	0,029	0,029	0,028
40	0,036	0,039	0,042	0,033	0,039	0,044	0,045	0,047
60	0,041	0,049	0,051	0,040	0,050	0,054	0,055	0,059
80	0,076	0,052	0,060	0,067	0,054	0,061	0,065	0,065
100	0,080	0,056	0,066	0,073	0,061	0,068	0,072	0,074
120	0,089	0,063	0,071	0,081	0,064	0,069	0,076	0,080

Tabla I.2 Valores de Cd Sumidero N°1 para pendiente longitudinal Sy 1 % y 3%.

Caudal	Sy 1%				Sy 3%		
	Cd				Cd		
[lt/s]	Sx 1%	Sx 2%	Sx 3%	Sx 5%	Sx 1%	Sx 2%	Sx 3%
20	0,021	0,026	0,029	-	0,022	0,023	0,026
40	0,029	0,034	0,041	-	0,032	0,036	0,038
60	0,040	0,042	0,051	0,055	0,043	0,051	0,041
80	0,071	0,047	0,059	0,067	0,077	0,062	0,043
100	0,077	0,054	0,062	0,074	0,085	0,069	0,053
120	0,084	0,061	0,066	0,080	0,092	0,077	0,063

Tabla I.3 Valores de Cd Sumidero N°2 para pendiente longitudinal Sy 0,1 % y 0,5%.

Caudal	Sy 0.1%				Sy 1%			
	Cd				Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%	1%	2%	3%	5%
60	0,039	0,031	0,032	0,033	0,023	0,026	0,030	0,031
80	0,044	0,034	0,036	0,040	0,040	0,030	0,036	0,036
100	0,048	0,037	0,042	0,043	0,044	0,032	0,037	0,043
120	0,053	0,041	0,044	0,048	0,048	0,036	0,040	0,047

Tabla I.4 Valores de Cd Sumidero N°2 para pendiente longitudinal Sy 3%.

Caudal	Sy 3%			
	Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%
60	0,013	0,014	0,023	0,028
80	0,023	0,023	0,029	0,036
100	0,030	0,030	0,034	0,037
120	0,036	0,037	0,039	0,037

Tabla I.5 Valores de Cd Sumidero N°3 para pendiente longitudinal Sy 0,1 % y 0,5%.

Caudal	Sy 0.1%			Sy 1%		
	Cd			Cd		
[lt/s]	1%	2%	3%	1%	2%	3%
20	0,032	0,037	0,044	0,025	0,036	0,040
40	0,048	0,053	0,058	0,038	0,048	0,053
80	0,087	0,074	0,080	0,079	0,057	0,076
120	0,100	0,082	0,092	0,092	0,073	0,075

Tabla I.6 Valores de Cd Sumidero N°3 para pendiente longitudinal Sy 3%.

Caudal	Sy 3%			
	Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%
20	0,026	0,034	0,040	0,042
40	0,041	0,048	0,049	0,061
80	0,086	0,075	0,060	0,075
120	0,095	0,086	0,077	0,071

Tabla I.7 Valores de Cd Sumidero N°4 para pendiente longitudinal Sy 0,1 % y 0,5%.

Caudal	Sy 0.1%				Sy 1%			
	Cd				Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%	1%	2%	3%	5%
20	0,026	0,031	0,032	0,030	0,020	0,026	0,030	0,030
40	0,034	0,040	0,046	0,051	0,028	0,035	0,039	0,045
80	0,079	0,053	0,061	0,068	0,068	0,043	0,058	0,061
120	0,089	0,064	0,070	0,080	0,079	0,054	0,063	0,078

Tabla I.8 Valores de Cd Sumidero N°4 para pendiente longitudinal Sy 3%.

Caudal	Sy 3%			
	Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%
20	0,020	0,024	0,026	0,030
40	0,032	0,036	0,036	0,045
80	0,068	0,058	0,048	0,061
120	0,080	0,077	0,068	0,063

Tabla I.9 Valores de Cd Sumidero N°5 para pendiente longitudinal Sy 0,1 % y 0,5%.

Caudal	Sy 0.1%				Sy 1%			
	Cd				Cd			
[lt/s]	1%	2%	3%	5%	1%	2%	3%	5%
20	0,019	0,021	0,018	0,017	0,016	0,019	0,017	0,017
40	0,030	0,030	0,032	0,026	0,022	0,024	0,026	0,029
80	0,041	0,042	0,045	0,039	0,046	0,034	0,035	0,040
120	0,053	0,061	0,053	0,049	0,054	0,046	0,041	0,049

Tabla I.10 Valores de Cd Sumidero N°5 para pendiente longitudinal Sy 3%.

Sy 3%			
Cd			
1%	2%	3%	5%
0,016	0,016	0,014	0,016
0,022	0,025	0,025	0,025
0,051	0,044	0,043	0,031
0,060	0,052	0,062	0,041