

No max
66638

T
P901e
2014



UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Estudio Comparativo entre Diversas Metodologías
para el Cálculo de la Capacidad de Captación en
Sumideros en Chile.

Por

Carolina Andrea Pulgar Navarrete

Trabajo de Título para optar al Grado de Licenciado en
Ciencias de la Ingeniería y Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Rodrigo Concha Jopia

Diciembre, 2014

- Sumideros
- CIENCIAS URBANO
- CIENCIAS

R. 16842

Dedicatorias

En primer lugar quisiera dedicar mi memoria a mi familia, que son un pilar importante en mi vida. Mi mamá, Victoria, gracias por todo el apoyo incondicional durante todo lo que duró mi carrera, aunque hubo malos momentos, siempre estuviste ahí. Mi papá, Carlos, gracias por todos los consejos y dedicación conmigo. Mis hermanos, Nicole y Carlitos, gracias por todo el amor y soportarme en momentos de difíciles durante este proceso. Los amo.

Mis abuelitos, que siempre se preocuparon por mí y me aconsejaban durante todo este tiempo.

Susana, mi segunda mamá, gracias por todo el amor, aunque estemos a distancia. Te amo.

A mis amigos de la vida, Mariela, Sihomara, Valeria, Susan, Paulina y Mauricio, gracias por todos los buenos ratos, porque siempre estuvieron presente ante los momentos de flaqueza durante el transcurso de la carrera. Los quiero mucho.

Mi segunda familia, Evener, los conozco desde mi inicio de la Universidad, fueron una pieza importante en esta etapa, ya que en momentos de estrés siempre eran los amigos que me sacaban una sonrisa. Gracias por todo los buenos y malos momentos, porque de cada uno se aprende para ser mejor persona. Los quiero y adoro chicos.

Agradecimientos

Para la realización de este Trabajo de Título agradezco principalmente a mi profesor guía, Rodrigo Concha Jopia, por toda la buena disposición y consejos académicos para llevar a cabo este tema; ante cualquier duda siempre pude contar con él durante todo el proceso de la elaboración de mi memoria. Muchas gracias profesor, de todo corazón.

Agradezco también a todos los docentes de la Universidad de Valparaíso que fueron parte de mi formación académica, gracias por todo el conocimiento entregado.

Lista de Abreviaturas y Siglas

- DOH = Dirección de Obras Hidráulicas
FHWA = Federal Highway Administration
HR = Hydraulics Research
INH = Instituto Nacional de Hidráulica
JHU = John Hopkins University
SERVIU = Servicio de Vivienda y Urbanismo
UDFCD = Urban Drainage an Flood Control District
UK = United Kingdom
UPC = Universidad Politécnica de Cataluña

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de mecanismo de captación de sumidero.....	18
Figura 2.2 - Elementos que conforman un sumidero [1].....	19
Figura 2.3 - Sumidero horizontal.....	20
Figura 2.4 - Sumidero Lateral.....	20
Figura 2.5 - Sumidero Mixto.....	21
Figura 2.6 - Plataforma ensayo UPC.....	22
Figura 2.7 - Tipos de sumideros UPC del 1 al 9.....	23
Figura 2.8 - Tipos de sumideros UPC 10 y 11.....	23
Figura 2.9 - Curva de ajuste sumidero tipo 8.....	24
Figura 2.10 - rango de validez para las ecuaciones 2.5, 2.4, 2.3.....	25
Figura 2.11 - Parámetros para el coeficiente k	26
Figura 2.12 - Plataforma ensayo FHWA.....	27
Figura 2.13 - Corte esquemático plataforma FHWA.....	28
Figura 2.14 - Rejilla P-50.....	29
Figura 2.15 - Rejilla P-50x100.....	29
Figura 2.16 - Rejilla P-30.....	30
Figura 2.17 - Rejilla Curved Vane.....	31
Figura 2.18 - Rejillas 45°-83, 45°-60.....	32
Figura 2.19 - Rejilla 30°-85.....	33
Figura 2.20 - Rejilla reticulada.....	33
Figura 2.21 - vista en planta y elevación del comportamiento del flujo en la calle.....	34
Figura 2.22 - Grafico de la velocidad de salpicadura [5].....	35
Figura 2.23 - Plataforma ensayo UDFCD.....	37
Figura 2.24 - Rejilla tipo 13.....	38
Figura 2.25 - Rejilla tipo 16.....	38
Figura 2.26 - Rejilla tipo R.....	39
Figura 3.1 - Vista esquemática plataforma ensayo INH.....	43
Figura 3.2 - Detalle rejilla DOH simple.....	45
Figura 3.3 - Detalle rejilla DOH doble.....	45
Figura 3.4 - Detalle rejilla SERVIU S1.....	46
Figura 3.5 - Detalle rejilla Las Condes.....	46
Figura 3.6 - Detalle rejilla DOH especial.....	47
Figura 4.1 - Esquema del corte de la calle.....	52
Figura 4.2 - Ejemplo de obtención de A_0 en sumidero SERVIU S1.....	53
Figura 4.3 - Corte esquema calle de ancho 3,5 metros.....	54
Figura 4.4 - comparación sumideros DOH simple, DOH doble y SERVIU S1 con P-50x100.....	57
Figura 4.5 - Comparación sumidero Las Condes con P-50.....	57
Figura 4.6 - Comparación sumidero DOH especial con 30°-85.....	58
Figura 4.7 - V_0 para el sumidero DOH simple.....	58
Figura 4.8 - V_0 para el sumidero DOH doble.....	59
Figura 4.9 - V_0 para el sumidero SERVIU S1.....	60
Figura 4.10 - V_0 para el sumidero Las Condes.....	61
Figura 4.11 - V_0 para el sumidero DOH especial.....	62
Figura 4.12 - Comparación sumidero DOH simple, DOH doble, SERVIU y Las Condes con Single N°13.....	66
Figura 4.13 - Comparación sumidero DOH especial con Single N°16.....	67
Figura 4.14 - Número de huecos sumidero DOH simple.....	69
Figura 4.15 - Número de huecos sumidero DOH doble.....	70
Figura 4.16 - Número de huecos sumidero SERVIU S1.....	70
Figura 4.17 - Número de huecos sumidero Las Condes.....	71
Figura 4.18 - Número de huecos sumidero DOH especial.....	71

Figura 4.19 - Comparación eficiencias UPC v/s INH	75
Figura 4.20 - Comparación eficiencias FHWA v/s INH	75
Figura 4.21 - Comparación eficiencias JHU v/s INH	76
Figura 4.22 - Comparación eficiencias UDFCD v/s INH	76
Figura 4.23 - Comparación eficiencias Wallingford v/s INH	77
Figura 4.24 - Curva potencial de la velocidad característica, sumidero DOH simple [1]	78
Figura 4.25 - Curva potencial de la velocidad característica, sumidero DOH doble [1]	79
Figura 4.26 - Curva potencial de la velocidad característica, sumidero SERVIU S1 [1]	79
Figura 4.27 - Comparación Q captado v/s Q total, DOH simple	84
Figura 4.28 - Comparación Q captado v/s Q total, SERVIU S1	84
Figura 4.29 - SERVIU S2	85
Figura 4.30 - SERVIU S3	86
Figura 4.31 - Rejilla tipo 9	86
Figura 4.32 - Rejilla P-30	87
Figura 4.33 - Comparación rejilla tipo 9 con reticulada	89
Figura 4.34 - Comparación sumidero SERVIU S2 y S3 con P-30	89
Figura 4.35 - V_o para el sumidero Tipo 9	90
Figura 4.36 - V_o para el sumidero SERVIU S2	91
Figura 4.37 - V_o para el sumidero SERVIU S3	92
Figura 4.38 - V_o para la rejilla P-30	93
Figura 4.39 - Comparación sumidero P-30, Tipo 9, SERVIU S2 y S3 con Single N°13	96
Figura 4.40 - Número de huecos sumidero SERVIU S2	98
Figura 4.41 - Número de huecos sumidero SERVIU S3	99
Figura 4.42 - Número de huecos sumidero tipo 9	99
Figura 4.43 - Número de huecos sumidero P-30	100
Figura 4.44 - Comparación eficiencia tipo 9, Manual v/s UPC	103
Figura 4.45 - Comparación eficiencia P-30, Manual v/s FHWA	104
Figura 4.46 - Comparación eficiencia SERVIU S2, UDFCD v/s Manual	104
Figura 4.47 - Comparación eficiencia SERVIU S3, Wallingford v/s Manual	105
Figura 5.1 - Vista mapa sector Santa Rosa	107
Figura 5.2 - Modelación SWMM 5, sector Santa Rosa	108
Figura 5.3 - Sumidero representado en SWMM 5	108
Figura 5.4 - Hietograma, T = 2 años con duración de 2 horas	111
Figura 5.5 - Datos de intensidad para SWMM 5	112
Figura 5.6 - Hietograma por SWMM 5, T = 2 años con duración 2 horas.	112
Figura 5.7 - Perfil transversal calzada izquierda Av. Costanera	113
Figura 5.8 - Perfil transversal calzada derecha Av. Costanera	113
Figura 5.9 - Perfil transversal calles secundarias	114
Figura 5.10 - Perfil transversal calle Tegualda	114
Figura 5.11 - Pendientes longitudinales	115
Figura 5.12 - Sumidero SERVIU S1 sector Av. Costanera	116
Figura 5.13 - Sumidero SERVIU S2 embancado	117
Figura 5.14 - Sumidero SERVIU S3, buen estado	117
Figura 5.15 - Datos de altura y caudal captado en SWMM 5	120
Figura 5.16 - Curva de altura y caudal captado en SWMM 5	120
Figura 5.17 - Datos de altura y caudal captado en SWMM 5 para sumidero embancado	121
Figura 5.18 - Curva de altura y caudal captado en SWMM 5 para sumidero embancado	121
Figura 5.19 - Niveles de Peligrosidad por Inundación [1]	122
Figura 5.20 - Modelación SWMM 5, alturas de escurrimiento T = 2 años con duración 12 horas	125
Figura 5.21 - Modelación SWMM 5, velocidades T = 2 años con duración 12 horas	126
Figura 5.22 - Modelación SWMM 5, alturas de escurrimiento T = 100 años con duración 12 horas	129
Figura 5.23 - Modelación SWMM 5, velocidades T = 100 años con duración 12 horas	130
Figura 5.24 - Niveles de peligrosidad por inundación, T = 2 años con duración 12 horas	131
Figura 5.25 - Niveles de peligrosidad por inundación, T = 100 años con duración 12 horas	132

Índice de Tablas

Tabla 2.1 - Características geométricas sumideros ensayados por la UPC	23
Tabla 2.2 - Características geométricas sumideros ensayados por FHWA	28
Tabla 2.3 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras.....	42
Tabla 3.1 - Principales características de los sumideros ensayados INH	44
Tabla 3.2 - Resumen de número de experiencias realizadas por INH	47
Tabla 3.3 - Eficiencias de captación de sumideros ensayados	48
Tabla 4.1 - Valores A y B para sumideros chilenos	53
Tabla 4.2 - Eficiencias por método UPC para sumidero SERVIU S1.....	55
Tabla 4.3 - Características Sumideros INH.....	63
Tabla 4.4 - Eficiencias por método FHWA para los sumideros DOH simple, SERVIU S1 y DOH especial	63
Tabla 4.5 - Eficiencias por método JHU para los sumideros chilenos.....	65
Tabla 4.6 - Parámetros a,b,c y d para sumideros chilenos.....	68
Tabla 4.7 - Resumen Eficiencias metodología UDFCD.....	68
Tabla 4.8 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras.....	69
Tabla 4.9 - Valores de C_b para sumideros chilenos	72
Tabla 4.10 - Eficiencia SERVIU S1 por metodología Wallingford	73
Tabla 4.11 - Diferencias entre las metodologías (S_L : 0,1%; S_T : 1%).....	73
Tabla 4.12 - Diferencias de eficiencias entre las metodologías	74
Tabla 4.13 - Parámetros a y b para la velocidad característica	80
Tabla 4.14 - Velocidad característica para sumideros DOH simple, doble y SERVIU S1.....	80
Tabla 4.15 - Eficiencia según Manual de Drenaje Urbano.....	81
Tabla 4.16 - Eficiencia por método UPC para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones	81
Tabla 4.17 - Eficiencia por método FHWA para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones	82
Tabla 4.18 - Eficiencia por método JHU para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones	82
Tabla 4.19 - Eficiencia por método UDFCD para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones	82
Tabla 4.20 - Eficiencia por método Wallingford para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones	83
Tabla 4.21 - Características geométricas, SERVIU S2.....	85
Tabla 4.22 - Características geométricas, SERVIU S3	86
Tabla 4.23 - Características geométricas, tipo 9	86
Tabla 4.24 - Características geométricas, P-30.....	87
Tabla 4.25 - Valores A y B para sumideros no ensayados.....	88
Tabla 4.26 - Eficiencias por método UPC para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3... 88	88
Tabla 4.27 - Eficiencias por método FHWA para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3. 94	94
Tabla 4.28 - Eficiencias por método JHU para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3 95	95
Tabla 4.29 - Parámetros UDFCD para sumideros no ensayados	97
Tabla 4.30 - Eficiencias por método UDFCD para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3	97
Tabla 4.31 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras.....	98
Tabla 4.32 - Valores C_b para sumideros no ensayados.....	100
Tabla 4.33 - Eficiencias por método Wallingford para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3.....	101
Tabla 4.34 - Eficiencias del Manual de Drenaje Urbano para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3.....	102
Tabla 5.1 - Intensidad Media (mm/hr) para la ciudad de Temuco	109
Tabla 5.2 - Método bloques alternados, T = 2 años con duración de 2 horas.....	110

Tabla 5.3 – Pendientes transversales y longitudinales	116
Tabla 5.4 – Eficiencias método SERVIU sumidero S2	119
Tabla 5.5 - Eficiencias método SERVIU sumidero S3	119
Tabla 5.6 - Condiciones máximas de inundación para tormentas menores en calles urbanas	123
Tabla 5.7 - Condiciones máximas de inundación para tormentas mayores en calles urbanas.....	123
Tabla 5.8 – Alturas de escurrimiento, T = 2 años con duración 12 horas	124
Tabla 5.9 – Velocidades para T = 2 años con duración de 12 horas.	125
Tabla 5.10 - Alturas de escurrimiento, T = 100 años con duración 12 horas	127
Tabla 5.11 - Velocidades para T = 100 años con duración de 12 horas.	130

Índice

Ítem	pág.
Lista de Abreviaturas y Siglas	4
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	7
Resumen	11
CAPÍTULO 1: Antecedentes Generales	12
1.1 Introducción	12
1.2 Planteamiento del Problema	14
1.3 Objetivos de la investigación	14
1.3.1 Objetivo general	14
1.3.2 Objetivos específicos	14
1.4 Alcances del trabajo	15
1.5 Metodología de Trabajo	16
1.5.1 Recopilación de datos	16
1.5.2 Análisis de parámetros	16
1.5.3 Aplicación de Programas	16
1.5.4 Interpretación de Resultados y conclusiones	17
CAPÍTULO 2: Marco Teórico	18
2.1 Generalidades	18
2.2 Sistema de Captación superficial	18
2.3 Mecanismo de captación de un sumidero	18
2.4 Elemento de captación superficial: Sumidero	19
2.5 Eficiencia de captación	21
2.6 Metodologías de estudio a nivel mundial	21
2.6.1 Método de la Universidad Politécnica de Cataluña, España [Gómez y Russo, 2009]	22
2.6.2 Método de la Federal Highway Administration, EEUU (FHWA)	27
2.6.3 Método de la Johns Hopkins University, EEUU [Li, 1956]	36
2.6.4 Método Colorado State University para el UDFCD EEUU [Comport et ál., 2009]	37
2.6.5 Método del HR Wallingford (UK)	40
CAPÍTULO 3: Desarrollo del estudio comparativo	43
3.1 Recopilación de datos	43
3.2 Estudio Experimental del Funcionamiento de sumideros de Aguas Lluvias [Kaliski y Cortez, 2004]	43
Descripción del Banco de pruebas	43
Sumideros ensayados	44
Experiencias realizadas	47
Resultados obtenidos de eficiencias	48

CAPITULO 4: Obtención y Análisis de las eficiencias	51
4.1 Generalidades	51
4.2 Eficiencias ante los mismos sumideros y condiciones ensayadas por INH por las distintas metodologías.....	51
4.2.1 Eficiencia: Método Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).....	52
4.2.2 Eficiencia: Método Federal Highway Administration (FHWA).....	55
4.2.3 Eficiencia: Método Johns Hopkins University (FHU)	64
4.2.4 Eficiencia: Colorado State University (UDFCD).....	65
4.2.5 Eficiencia: Wallingford (UK)	68
4.2.6 Análisis y Comparación de eficiencias entre INH y las distintas metodologías.....	73
4.3 Mismos sumideros INH, diferentes condiciones.	77
4.3.1 Eficiencia: Manual de Drenaje	80
4.3.2 Eficiencia: Distintas Metodologías	81
4.3.3 Análisis y Comparación de Eficiencias	83
4.4 Diferentes sumideros, mismas condiciones.....	85
4.4.1 Eficiencia: Método Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).....	87
4.4.2 Eficiencia: Método Federal Highway Administration (FHWA).....	89
4.4.3 Eficiencia: Método Johns Hopkins University (FHU)	94
4.4.4 Eficiencia: Colorado State University (UDFCD).....	96
4.4.5 Eficiencia: Wallingford (UK)	98
4.4.6 Eficiencia: Manual de Drenaje Urbano.....	102
4.4.7 Análisis y Comparación de eficiencias.....	103
CAPITULO 5: Cálculo hidráulico en una cuenca urbana.....	106
5.1 Generalidades	106
5.2 Descripción de la zona a analizar	106
5.3 Modelación en SWMM 5.....	107
5.3.1 Precipitación.....	109
5.3.2 Pendientes transversales y longitudinales de las calles	112
5.3.3 Tipos de sumideros	116
5.3.4 Datos de eficiencia	117
5.3.5 Análisis de Resultados	122
CAPITULO 6: Conclusiones.....	133
Referencias bibliográficas.	135

Resumen

En el diseño o análisis de sistemas de transporte de escorrentía pluvial en medio urbano (drenaje urbano), los elementos de captación superficial de la escorrentía (sumideros) juegan un papel clave en la potencial inundación o anegamiento que se produce sobre los centros urbanos cuando lluvias de mediana o alta intensidad caen sobre la superficie de las ciudades.

En el Trabajo de Título se realizará un estudio comparativo entre los distintos métodos para el cálculo de la eficiencia de captación, mencionados en el Manual de Drenaje Urbano (Universidad Politécnica de Cataluña, Federal Highway Administration, John Hopkins University, Colorado State University para el UDFCD y HR Wallingford), con las eficiencias de captación realizadas por el Laboratorio Nacional de Hidráulica con sumideros propios de Chile ensayado bajo distintas condiciones de caudal de aproximación, pendientes transversales y longitudinales de la calle. También se contrastará los métodos ya mencionados con lo que indica el Manual de Drenaje Urbano bajo nuevas condiciones utilizando los mismos sumideros ensayados y en un caso para nuevos sumideros no ensayados.

Al tener ya evaluadas estas eficiencias en los métodos mencionados, en distintas condiciones, se llevará a cabo un análisis hidráulico enfocado en una zona de la ciudad de Temuco mediante el programa SWMM 5, tomando en cuenta los criterios de riesgo (velocidad y altura máxima de escurrimiento) según el Manual de Drenaje Urbano.

Palabras claves: sumideros, eficiencia, capacidad de captación, drenaje urbano.

CAPÍTULO 1: Antecedentes Generales

1.1 Introducción

En el medio urbano, la escorrentía que se produce bajo precipitaciones de distintas intensidades puede generar graves problemas de inundación para la ciudadanía e infraestructura, con lo cual el sistema de drenaje urbano deriva por lo general toda esta escorrentía que proviene desde las casas, techos, calles y distintas áreas de la ciudad, a una red de alcantarillado para poder así evacuarla de forma satisfactoria y que no genere un mayor riesgo para las personas y su entorno.

El sistema de drenaje urbano en Chile, está dividido en redes domiciliarias, secundarias, primarias y naturales con lo cual cada una está asignada a distintos entes institucionales para una mejor planificación y mantenimiento, cada red tiene su propio elemento de drenaje que es evacuado a la red de alcantarillado. La red secundaria es la que recibe las aguas de la urbanización o zonas urbanas, que es llevada a la red primaria u otra red secundaria, el ente institucional encargado de esta red, para su adecuada planificación, es el Ministerio de Vivienda y Urbanismo a través del Servicio de Viviendas y Urbanismo. El elemento de captación superficial de esta red son los sumideros, los cuales se encuentran, por lo general, en las calles, derivando las aguas lluvias hacia el colector que están conectados a la red de alcantarillado. Así, un objetivo principal de un sistema de sumideros es evitar que la escorrentía superficial que viene directo desde las casas, tejados, etc no se acumule descontroladamente en las calles, generando problemas de anegamiento e inundaciones.

La capacidad de captación de los sumideros se evalúa a través de su eficiencia hidráulica: el caudal de aproximación en la calle, es interceptado parcialmente por el sumidero, dirigiendo éste a su respectivo colector. Esto generará una cierta eficiencia de captación del sumidero. Diferentes investigaciones a nivel mundial se han realizado para cuantificar la capacidad de captación que tienen los sumideros, las cuales a través de ensayos de laboratorios, bajo distintas condiciones, se han obtenido formulaciones para la eficiencia de los sumideros ensayados. En Chile, en el año 2002, el Ministerio de Obras Públicas, a través del Laboratorio Nacional de Hidráulica, realizó una serie de ensayos de laboratorio para determinar la capacidad de captación de 5 tipos de sumideros que se utilizan en Chile [10]. De este estudio se obtuvieron curvas de captación para ciertas combinaciones de pendientes longitudinales, transversales y caudales de circulación en las cunetas pero no se obtuvo una formulación concreta para la capacidad de captación de los sumideros. Sin embargo, frente a nuevos posibles sumideros (áreas de huecos, longitud, ancho, disposición de las barras) o combinaciones de variables geométricas de la calle (pendientes transversales y longitudinales) o hidráulicas (caudales de circulación en las cunetas), estas curvas no serían útiles para determinar la capacidad de captación de estos sumideros.

En el 2005, el Servicio de Vivienda y Urbanismo, creó una Guía de Diseño y Especificaciones de Elementos Urbanos de Infraestructura de Aguas Lluvias, la que contemplaba, entre otros aspectos, el diseño de los sumideros como también la capacidad de captación de estos. En el 2013, el Ministerio de Obras Públicas lanzó el Manual de Drenaje Urbano y en este se indican diferentes metodologías de cálculo de la capacidad de captación de los sumideros. Por otro lado, en el manual no se identifica la relación entre el espaciamiento longitudinal requerido entre sumideros y los criterios de riesgo adoptados para el flujo en la calle (altura máxima de escurrimiento, velocidad máxima de escurrimiento, etc.).

El presente Trabajo de Título realiza un estudio comparativo entre las diversas metodologías propuestas en el Manual de Drenaje Urbano (Universidad Politécnica de Cataluña, Federal Highway Administration, John Hopkins University, Colorado State University para el UDFCD y HR Wallingford) para el cálculo de capacidad de captación en sumideros, con lo cual las

eficiencias de captación obtenidas serán contrastadas con aquellas determinadas por el Laboratorio Nacional de Hidráulica con los sumideros ya estudiados bajo distintas condiciones (caudales de aproximación, pendientes transversales y longitudinales de la calle). Además para los mismos sumideros ensayados se obtendrá la eficiencia con los métodos ensayados pero en condiciones no ensayadas en el laboratorio. Y también para sumideros nuevos, no ensayados se evaluará la eficiencia con los métodos; bajo todos estos nuevos escenarios se contrastará con lo que se menciona en el *Manual de Drenaje Urbano para el cálculo de capacidad de sumideros*.

Ya obtenido un mayor juicio de las eficiencias y comparaciones de los distintos métodos mencionados bajo diferentes criterios, se aplicarán las metodologías en un cálculo hidráulico de cuencas urbanas en una zona de Temuco, utilizando el programa SWMM 5. Se contará con un catastro de los sumideros ubicados en el sector Santa Rosa, evaluando las eficiencias por los distintos métodos, pero a su vez tomando en cuenta los criterios de riesgo (velocidad y altura máxima de escurrimiento). Los cuales no pueden ser muy elevados ya que generarán en si problemas de inundación y anegamiento en el medio urbano.

1.2 Planteamiento del Problema

Este estudio pretende comparar la eficiencia de captación de los sumideros, obtenidos del laboratorio del Instituto Nacional Hidráulica con los métodos mencionados en el Manual de Drenaje Urbano, bajo distintas condiciones (caudales de aproximación, pendientes transversales y longitudinales de la calle).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar y analizar las diversas metodologías que aparecen referenciadas en el Manual de Drenaje Urbano chileno, respecto al cálculo de la capacidad de captación de los sumideros, tanto en el caso de sumideros ensayados en Chile como en el caso de no ensayados. También, se busca estudiar, a través de un caso real, las relaciones entre las capacidades de captación y los criterios de riesgo adoptados en Chile.

1.3.2 Objetivos específicos

Comparar los diversos métodos para el cálculo hidráulico de sumideros que aparecen en el Manual de Drenaje Urbano de Chile, respecto a los sumideros ensayados en Chile.

Comparar los métodos de la capacidad de captación para condiciones y sumideros no ensayados que se mencionan en el Manual de Drenaje Urbano.

Analizar la relación entre la eficiencia de captación y los criterios de riesgo en el análisis hidráulico de la superficie de una cuenca

1.4 Alcances del trabajo

El estudio comparativo se realizará entre los resultados obtenidos en Chile por el Instituto Nacional Hidráulica, en conjunto con la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP, respecto a 5 metodologías internacionales sobre capacidad hidráulica de captación de sumideros, las cuales son:

- Método de la Universidad Politécnica de Cataluña (España)
- Método de la Federal Highway Administration (EEUU)
- Método de la John Hopkins University (EEUU)
- Método de la Colorado State University para el UDFCD (EEUU)
- Método del HR Wallingford (UK)

Para la realización del estudio comparativo sólo se tomará en cuenta los sumideros sin depresión y no se cuantifica la capacidad de captación de la ventana lateral.

Los sumideros no ensayados que se tomarán en cuenta serán el "type 9" del método de la Universidad Politécnica de Cataluña y el sumidero "P-30" del método de la Federal Highway Administration. También se consideraran los sumideros chilenos SERVIU S2 y S3.

En relación a los parámetros para la aplicación del programa SWMM 5, se seleccionarán las propiedades hidrológicas (precipitaciones, curvas IDF, etc) referente a la Ciudad de Temuco, indicadas en el Manual de Drenaje Urbano.

1.5 Metodología de Trabajo

Este es un estudio comparativo, con la cual se compara e indaga dos o más métodos analizando sus resultados referentes a un mismo tema o situación, obteniendo las similitudes y en que difieren entre ellas. De esta manera se plantea el objetivo principal de este estudio, contrastar los métodos mencionados en el Manual de Drenaje urbano con el estudio realizado por el Instituto Nacional Hidráulica para la capacidad de captación de sumideros.

1.5.1 Recopilación de datos

Se recopila la información necesaria del estudio de capacidad hidráulica de captación de sumideros del Instituto Nacional Hidráulica y así mismo los datos de las distintas metodologías a nivel mundial (Universidad Politécnica de Cataluña, Federal Highway Administration, John Hopkins University, Colorado State University para el UDFCD y HR Wallingford) y sus distintos documentos de investigación para contrarrestarlo.

1.5.2 Análisis de parámetros

Se analiza la eficiencia hidráulica de captación, aplicando las distintas metodologías a los sumideros ensayados en Chile del Instituto Nacional Hidráulica y se comparan entre ellas. Además, se aplican las metodologías antes vistas en el caso de los 5 sumideros ensayados, pero en condiciones no ensayadas (caudales mayores, pendientes diferentes, etc.) con lo cual se obtendrán caudales captados y no captados por el sumidero, alturas de escurrimientos, velocidades de escurrimiento, etc., así también se realizarán curvas de comparación entre las distintos métodos bajo distintas condiciones.

También se estudian 4 sumideros, uno español que fue ensayado por la Universidad Politécnica de Cataluña el cual es nombrado como sumidero "type 9", uno norteamericano, por la Federal Highway Administration que es el sumidero tipo "P-30" y 2 chilenos que son SERVIU S2 y S3, para obtener sus eficiencias a través de las 5 metodologías y contrastar entre ellos estos valores.

1.5.3 Aplicación de Programas

Ya obtenidos todas las eficiencias y comparadas por los distintos métodos bajo múltiples condiciones se evaluará un caso real en la ciudad de Temuco con el programa SWMM 5 el cual con los sumideros ya definidos en terreno y condiciones dadas se obtendrá las eficiencias de estos pero utilizando las formulaciones de los métodos mencionados en el Manual de Drenaje cumpliendo así el mejor resultado para alturas y velocidades de escurrimientos óptimas para una zona urbana en Chile.

1.5.4 Interpretación de Resultados y conclusiones

Finalmente se podrá llegar al cumplimiento de los objetivos planteados al inicio de este Trabajo de Título y así con los análisis obtenidos de eficiencia de captación, y con los criterios de riesgos adoptados se podrá llegar a una mejor interpretación de la relación entre estos dos aspectos.

2.2 Sistema de Captación superficial

El sistema de captación superficial es un sistema de captación que permite captar el agua superficial que fluye en la superficie del terreno. Este sistema de captación se utiliza para captar el agua superficial que fluye en la superficie del terreno y se utiliza para captar el agua superficial que fluye en la superficie del terreno.

2.3 Mecanismo de captación de un sumidero

El mecanismo de captación de un sumidero es un mecanismo de captación que permite captar el agua que fluye en la superficie del terreno y se utiliza para captar el agua que fluye en la superficie del terreno.

Este mecanismo de captación de un sumidero es un mecanismo de captación que permite captar el agua que fluye en la superficie del terreno y se utiliza para captar el agua que fluye en la superficie del terreno.

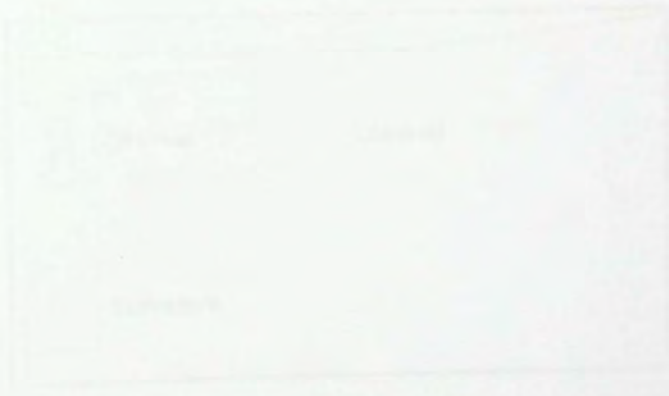


Figura 2.3 Mecanismo de captación de un sumidero

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Generalidades

Para el estudio de la capacidad hidráulica de captación superficial del sistema de drenaje urbano es fundamental tener claro algunos conceptos y métodos los cuales se enfocará el desarrollo de la memoria y se tendrán un mayor entendimiento de ésta.

2.2 Sistema de Captación superficial

Como de la misma forma hay un sistema de colectores, que son todos los conductos de la red enterrados, debemos considerar también un nuevo elemento del sistema de drenaje, como aquel constituido por todos los sumideros dispuestos en la superficie de la ciudad. Todos ellos formaran nuestro sistema de captación superficial y serán responsables de introducir en la red el agua de escorrentía que es capaz de interceptar, dejando en superficie a una parte que no puede captar y definir los caudales que de manera real y efectiva, entran en la red.

2.3 Mecanismo de captación de un sumidero

Si disponemos un sumidero en una calle concreta, de ancho y pendientes transversales y longitudinales dadas, podemos preguntarnos cuales son los mecanismos hidráulicos de funcionamiento de ese sumidero. La observación de los mismos durante un suceso de lluvia en condiciones reales o en condiciones de laboratorio, en una instalación de ensayos, muestra diversos patrones.

Se le asignará al caudal frontal, aquel que baja por la calle cercana de la solera, asociado a un ancho igual al de la reja, y se llamará caudal lateral, al resto de caudal que baja por la calle (figura 2.1), Así:

$$Q_{total} = Q_{frontal} + Q_{lateral} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

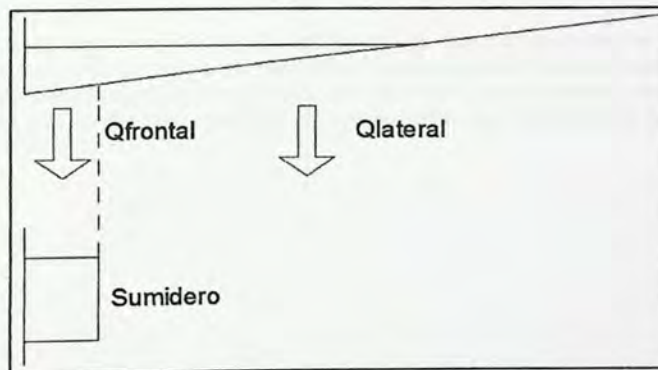


Figura 2.1 - Esquema de mecanismo de captación de sumidero

2.4 Elemento de captación superficial: Sumidero

Es un elemento de captación superficial de aguas lluvias del drenaje urbano el cual capta parte del flujo que circula por las calles u otra superficie, fruto de las precipitaciones, y de esta forma evita inundaciones o velocidades excesivas de caudales en las calles o vías donde transitan vehículos y personas. Los sumideros constan de una pieza metálica (rejilla) con una área de huecos de los que se introduce el agua en la red (varía según el tipo o modelo de sumidero), estanque, conexión y cámara (figura 2.2).

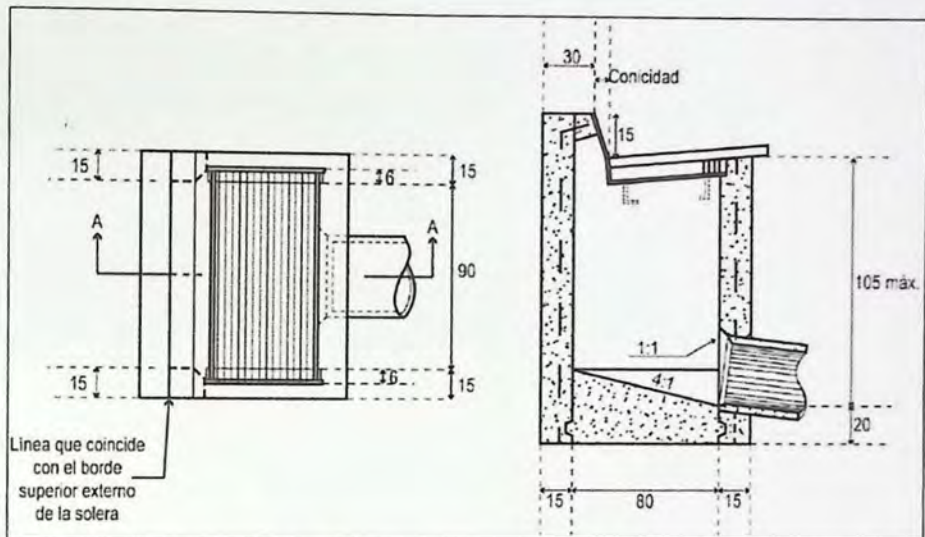


Figura 2.2 - Elementos que conforman un sumidero [1]

Existen 3 tipos de sumideros que son mencionados en el Manual de Drenaje urbano 2013, cuya utilización dependerá de la geometría de la calle, cuanto caudal puede captar y la seguridad hacia peatones.

- a) Sumideros horizontales: Son lo más utilizados, los cuales consta de una rejilla pegada a la cuneta. Se pueden emplear para diferentes pendientes tanto transversales y longitudinales de la calle aunque pueden generar grandes molestias para ciclistas y peatones. Tienden a obstruirse con escombros y basuras constantemente. En Chile son los tipos SENDOS S3, SENDOS S4 y DOH-S1.

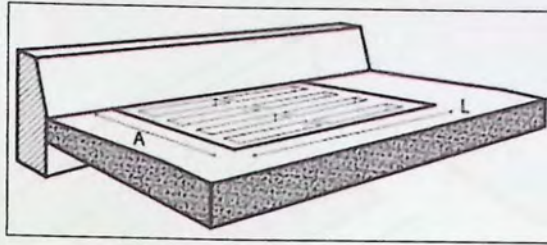


Figura 2.3 - Sumidero horizontal

- b) Sumideros Laterales: Tienen una abertura lateral en la solera, pueden admitir escombros y basuras sin obstruirse tan fácilmente. Tiende a disminuir su capacidad de captación al estar ubicadas en calles con pendientes longitudinales mayores al 3% con lo cual es preferible para mejorar su rendimiento utilizarlas en sectores con pendientes transversales mayores.

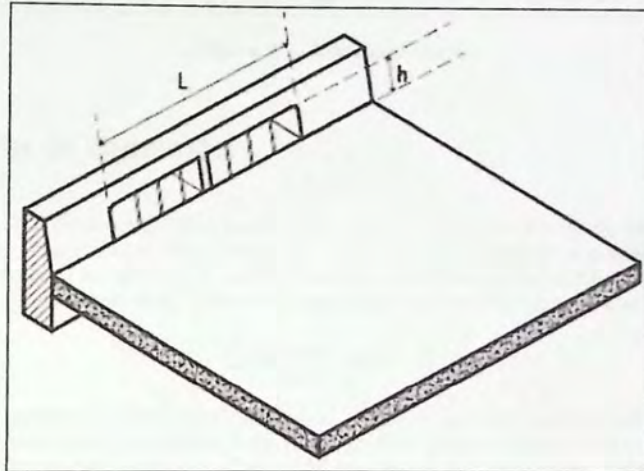


Figura 2.4 - Sumidero Lateral

- c) Sumideros Mixtos: Tienen una abertura lateral en la solera y una rejilla pegada al cuneta, se puede utilizar para distintas condiciones. La abertura lateral no ayuda en forma alta en lo que respecta a la capacidad de captación aunque en el caso de escombros o colmatación de la rejilla ahí podría jugar un papel importante del caudal que se capta.

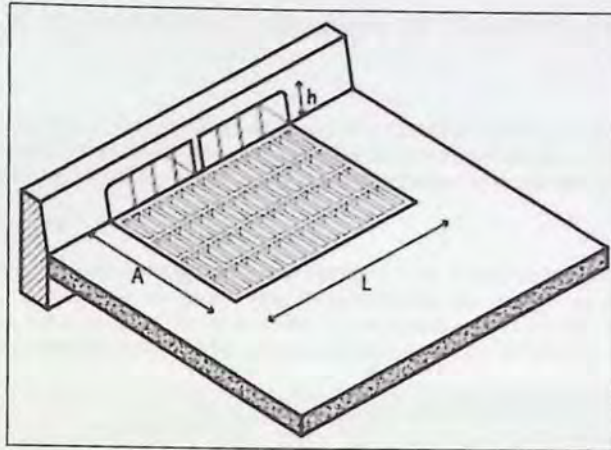


Figura 2.5 - Sumidero Mixto

2.5 Eficiencia de captación

Podemos introducir este concepto que puede ser de gran utilidad a la hora de estudiar la captación de escorrentía por un sumidero. Se suele llamar eficiencia de captación al cociente entre el caudal captado por el sumidero en relación al caudal que hay en la calle. Este cociente se encuentra entre 0% y 100%, y da una medida de la fracción de agua que un sumidero puede captar.

$$E = \frac{Q_{\text{captado}}}{Q_{\text{calle}}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Normalmente los valores de eficiencia cercanos a 100% suelen ser para caudales circulantes por la calle relativamente bajos, de pocos litros por segundo y de reducido ancho superficial que no son mayores al ancho del sumidero. Casi todo el caudal captado es la suma del denominado caudal frontal y lateral. Cuando la eficiencia disminuye es porque para un mismo caudal la geometría de la calle varía, aumentando las pendientes longitudinales y en otro caso de que pueda generarse caudales excesivamente grandes con lo cual la velocidad de escurrimiento sea tal que el sumidero capte lo mínimo de caudal y con esto su eficiencia será mucho menor.

2.6 Metodologías de estudio a nivel mundial

En distintos países se han realizados varios estudios para determinar la capacidad de captación de sumideros, donde, al igual que el estudio realizado por el Instituto Nacional de Hidráulica, se construye una plataforma y se ensaya varios tipos de sumideros que son característicos del país en cuestión, obteniendo la eficiencia bajo distintas condiciones. Estos estudios no tan solo llegan a los resultados en sí, sino que también generan formulaciones, las cuales pueden ser utilizadas bajo otras condiciones no ensayadas y para sumideros no ensayados. Aunque hay que tomar en cuenta que estas formulaciones serán más certeras si se aplican bajo las mismas condiciones con las que se ensayaron.

2.6.1 Método de la Universidad Politécnica de Cataluña, España [Gómez y Russo, 2009]

La Universidad Politécnica de Cataluña en conjunto con CLABSA (Clavegueram de Barcelona S.A) los cuales son los encargados del sistema de alcantarillado de Barcelona, realizaron una serie de ensayos con los típicos sumideros de Barcelona para obtención de la eficiencia de estos [2].

Descripción del ensayo

El ensayo consta de una plataforma metálica a escala 1:1 de 3 metros de ancho y 5.5 metros de largo. (Figura 2.6). El rango de las pendientes longitudinales de ensayo va desde el 0 al 10% y para las pendientes transversales de un 0 a 4%. El laboratorio dispone de un grupo de bombeo capaz de impulsar un caudal hasta 250 l/s, los caudales ensayados estuvieron desde 20 a 200 l/s.



Figura 2.6 - Plataforma ensayo UPC

Tipos de sumideros

En la tabla 2.1 se puede ver las distintas características geométricas y en la figura 2.7, 2.8 se pueden visualizar tipos de sumideros utilizados en Barcelona. Los sumideros del 1 al 10 fueron los elegidos para desarrollar la metodología, en cuanto a los 10 y 11 se utilizaron para validarla.

Tabla 2.1 - Características geométricas sumideros ensayados por la UPC

Grate	Length (L): cm	Width (W): cm	Area including void area (A_2): m^2	Void area (A_{11}): m^2	Number of longitudinal bars (n_l)	Number of transversal bars (n_t)	Number of diagonal bars (n_d)
Type 1	78	36.4	0.2114	0.1214	5	1	0
Type 2	78	34.1	0.1850	0.0873	1	17	0
Type 3	64	30	0.1647	0.0693	1	0	12
Type 4	77.6	34.5	0.2250	0.1050	2	13	0
Type 5	97.5	47.5	0.3431	0.1400	3	7	0
Type 6	80	30	0.1622	0.0736	0	15	0
Type 7	60.2	31.5	0.1807	0.0881	2	1	10
Type 8	74.5	26	0.1540	0.0852	1	0	11
Type 9	100	50	0.5000	0.2012	1	3	21
Type 10	60.2	31.5	0.1807	0.0865	2	0	8
Type 11	99.9	50	0.4940	0.1760	1	3	28

Fuente: Adaptado de [2]

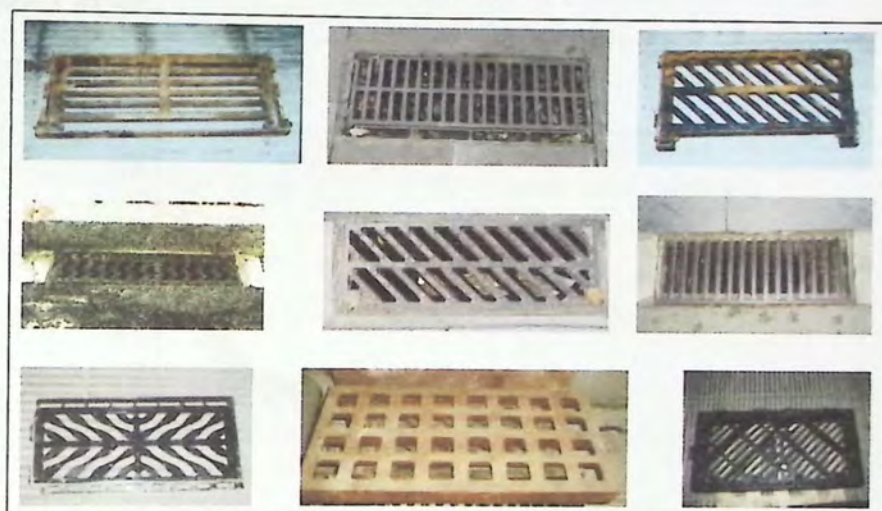


Figura 2.7 - Tipos de sumideros UPC del 1 al 9

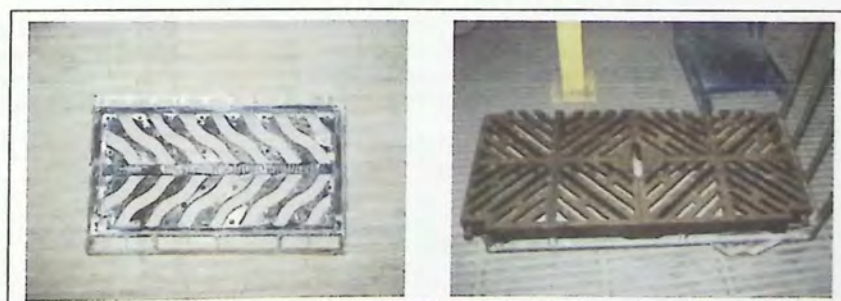


Figura 2.8 - Tipos de sumideros UPC 10 y 11

Mediante varios ensayos se obtuvieron diferentes curvas que relacionaban las variables de E (Eficiencia) y Q/y (caudal aportante y altura de escurrimiento antes de la rejilla), lo cual se propone una relación de ajuste potencial del tipo:

$$E = A \cdot \left(\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Dónde:

E = Eficiencia de captación de la reja

Q = caudal total que circula por un ancho de 3 metros (m^3/s)

y = Altura de escurrimiento del agua inmediatamente antes de la reja (m)

A y B = parámetros de ajuste

En la figura 2.9 se puede ver un ejemplo de la curva de ajuste de la reja tipo 8, relacionando las variables E v/s Q/y

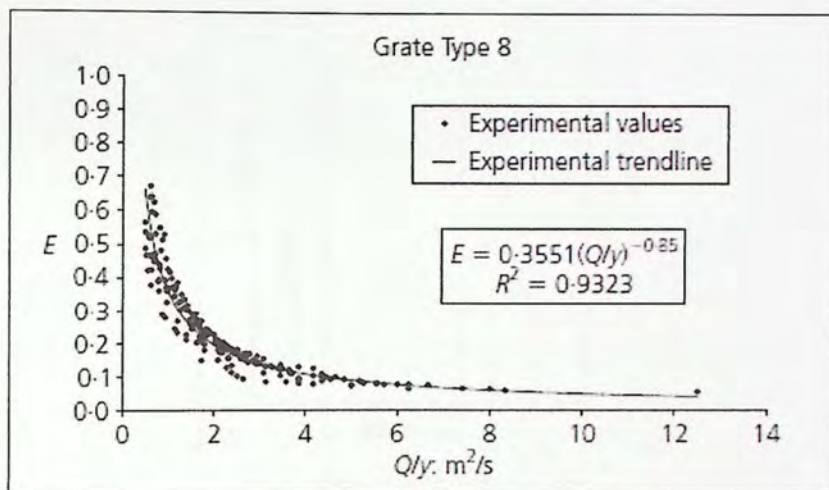


Figura 2.9 - Curva de ajuste sumidero tipo 8

Para la fórmula anterior (Ec. 2.3), los parámetros A y B se obtuvieron con estas curvas de ajuste para los sumideros ensayados (tipo 1 al 9), con lo cual se encontró una correlación entre estos 2 parámetros, en base del ajuste potencial. Después de varios intentos y ensayos se hallaron las ecuaciones funcionales (Ec. 2.4 y 2.5) para la obtención de A y B de forma teórica.

$$A = \frac{1.988 \cdot A_g^{0.403}}{p^{0.190} \cdot (n_t + 1)^{0.088} \cdot (n_l + 1)^{0.012} \cdot (n_d + 1)^{0.082}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$B = 1.346 \cdot \frac{L^{0.179}}{W^{0.394}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Dónde:

A_g = área del mínimo rectángulo que engloba todos los huecos (m^2)

p = porcentaje de área de huecos respecto al área que los engloba a todos ($p = A_{\text{huecos}}/A_g$)

n_t = número de barras transversales

n_l = número de barras longitudinales

n_t = número de barras transversales

L = largo de la reja (cm)

W = ancho de la reja (cm)

Estas ecuaciones serán válidas para un sumidero de longitud de 59 cm hasta un máximo de 100 cm, y un ancho entre 26 cm a 50 cm. (figura 2.10)

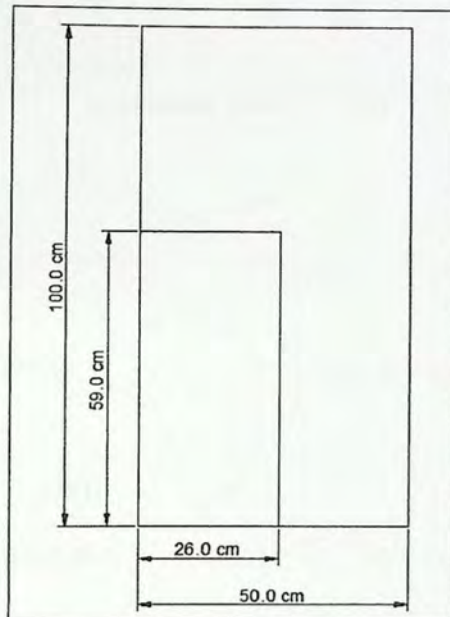


Figura 2.10 - rango de validez para las ecuaciones 2.5, 2.4, 2.3

Esta función de ajuste considera tan solo el caudal que circula por un ancho de 3 metros referente a media calzada junto a la rejilla. En caso de que este ancho sea mayor, la ecuación 2.6 generaliza el cálculo de la eficiencia para cualquier tipo de sección geométrica de calzada haciendo que aparezca el caudal real de paso por la mitad de la calle, considerando una distribución uniforme de velocidad.

$$E = A \left(k \cdot \frac{Q}{y} \right)^{-B} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde k es un coeficiente que relaciona las condiciones geométricas de la calle y la altura de escurrimiento y , en las siguientes ecuaciones se puede observar las distintas condiciones de este coeficiente.

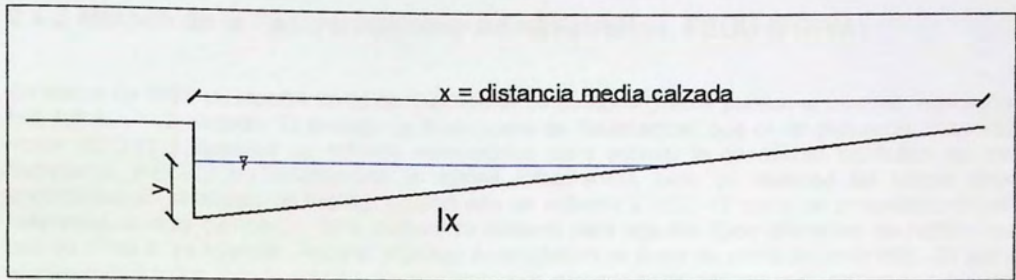


Figura 2.11 - Parámetros para el coeficiente k

Si $x = 3 \text{ mt}$

$$y = \text{cualquier valor} \quad k = 1$$

Si $x < 3 \text{ mt}$

$$y \leq x \cdot l_x \quad k = 1$$

$$x \cdot l_x \leq y \leq 3 \cdot l_x \quad k = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

$$y \geq 3 \cdot l_x \quad k = \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Si $x > 3 \text{ mt}$

$$y \leq 3 \cdot l_x \quad k = 1$$

$$3 \cdot l_x \leq y \leq x \cdot l_x \quad k = 1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$y \geq x \cdot l_x \quad k = \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

y = altura de escurrimiento al lado de la solera

x = ancho de la media calzada

l_x = pendiente transversal de la calle

2.6.2 Método de la Federal Highway Administration, EEUU (FHWA)

En marzo de 1984 el Departamento de Transporte de Estados Unidos publicó la Circular Ingeniería Hidráulica n° 12, titulado "El drenaje de la carretera de Pavimentos" que es ampliamente conocido como HEC-12 y describe un método semi-teórico para estimar la capacidad hidráulica en los sumideros. HEC-22 ha incorporado la misma información, pero en realidad los textos más importantes en el campo de drenaje urbano aún se refieren a HEC-12 como un procedimiento de referencia en este campo [3]. Este método se elaboró para algunos tipos diferentes de rejilla y su uso se limita a las mismas. Federal Highway Administration se basa en procedimiento HEC-22 para el cálculo hidráulico, con lo cual ha proporcionado un número estandarizados de rejillas que fueron ensayadas bajo distintas condiciones obteniendo sus eficiencias correspondientes [4].

Descripción del ensayo

El ensayo se realizó en una plataforma a escala 1:1 de 18,28 metros de largo y 1,83 metros de ancho (figura 2.12, 2.13). Su pendiente longitudinal variaba desde 0,5 a 13% y la pendiente transversal de 1 a 6,25%. El máximo caudal de entrada del ensayo es 158 l/s.



Figura 2.12 - Plataforma ensayo FHWA

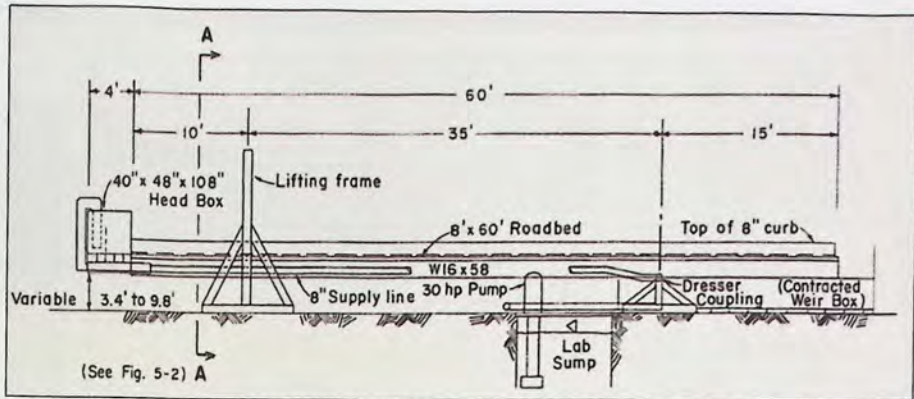


Figura 2.13 - Corte esquemático plataforma FHWA

Tipos de sumideros

En el ensayo se utilizaron sumideros estandarizados, los cuales se pueden visualizar en la tabla 2.2 con sus respectivas características geométricas.

Tabla 2.2 - Características geométricas sumideros ensayados por FHWA

tipos de sumideros	características geométricas
P-50	una rejilla de barras paralelas con 48 mm de espacio entre barras en el centro
P-50X100	una rejilla de barras paralelas con 48 mm de espacio entre barras en el centro y 10 mm de diámetro varillas laterales espaciados a 103 mm en el centro
P-30	una rejilla de barras paralelas con 29 mm de espacio entre barras en el centro
Curved Vane	rejilla paleta curva con barra longitudinal 83 mm y 108 mm de espacio entre barras transversales en el centro
45°-60 Tilt Bar	45° de inclinación, con barra longitudinal de 57 mm y 102 mm de espacio entre barras transversales en el centro
45°-85 Tilt Bar	45° de inclinación, con barra longitudinal de 83 mm y 102 mm de espacio entre barras transversales en el centro
30°-85 Tilt Bar	30° de inclinación, con barra longitudinal de 83 mm y 102 mm de espacio entre barras transversales en el centro
Reticulada	patrón de panel de barras laterales y barras de apoyo longitudinales

Fuente: Adaptado de [5]

También de la figura 2.14 a la figura 2.20, se puede observar un esquema de cada rejilla.

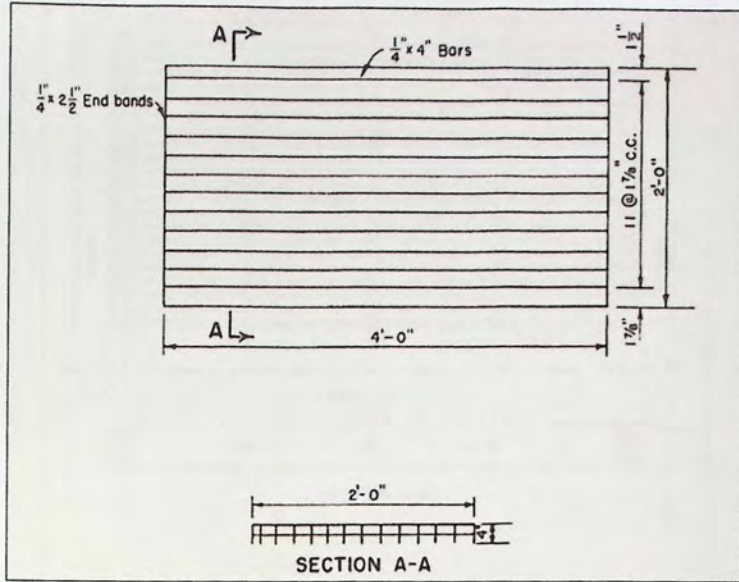


Figura 2.14 - Rejilla P-50

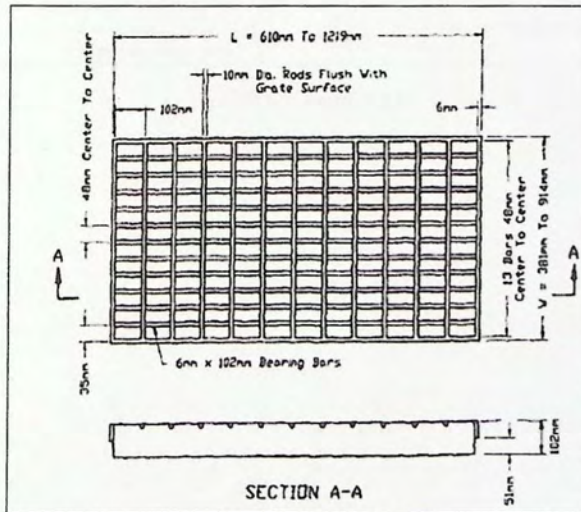


Figura 2.15 - Rejilla P-50x100

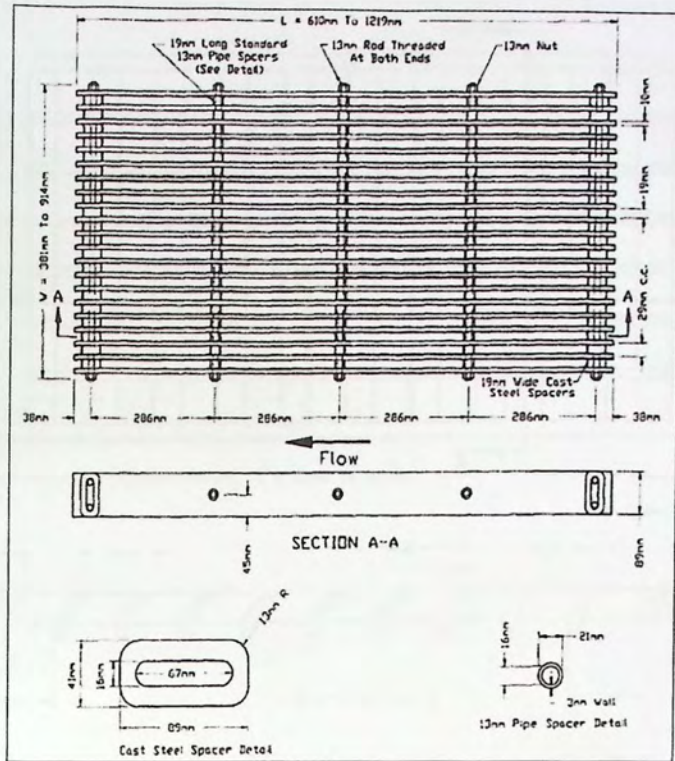


Figura 2.16 - Rejilla P-30

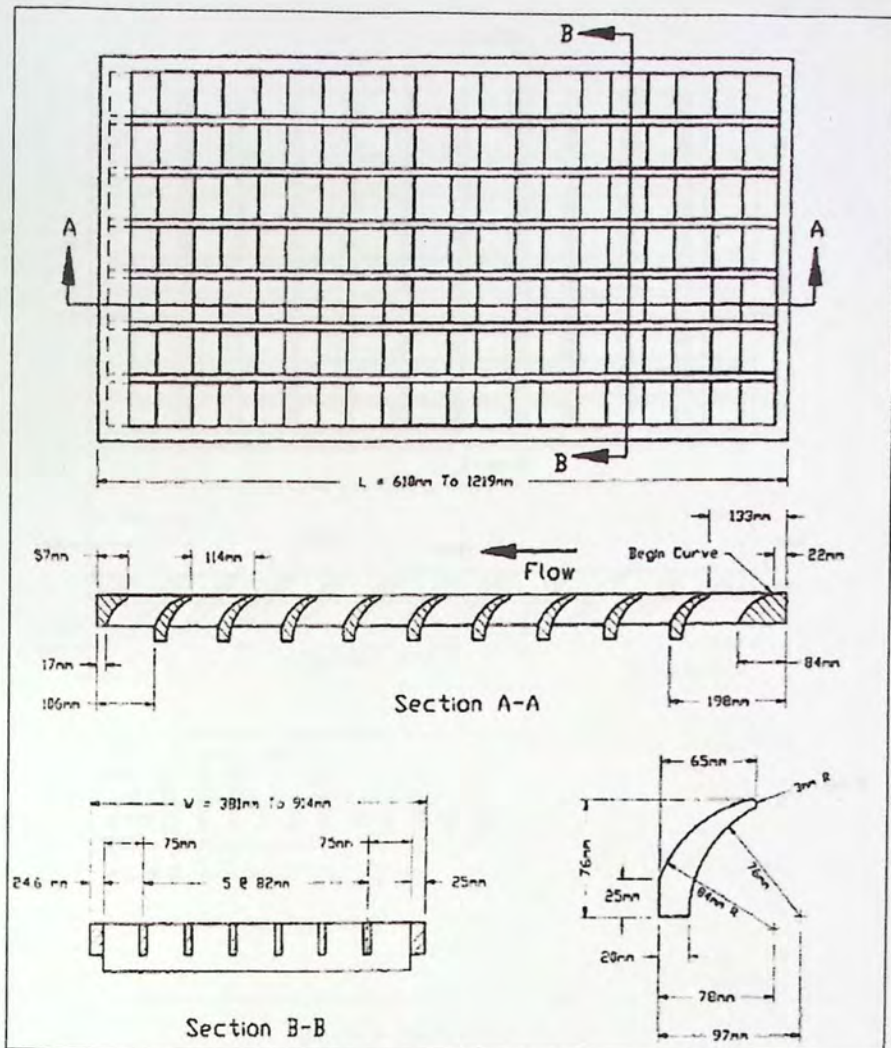


Figura 2.17 - Rejilla Curved Vane

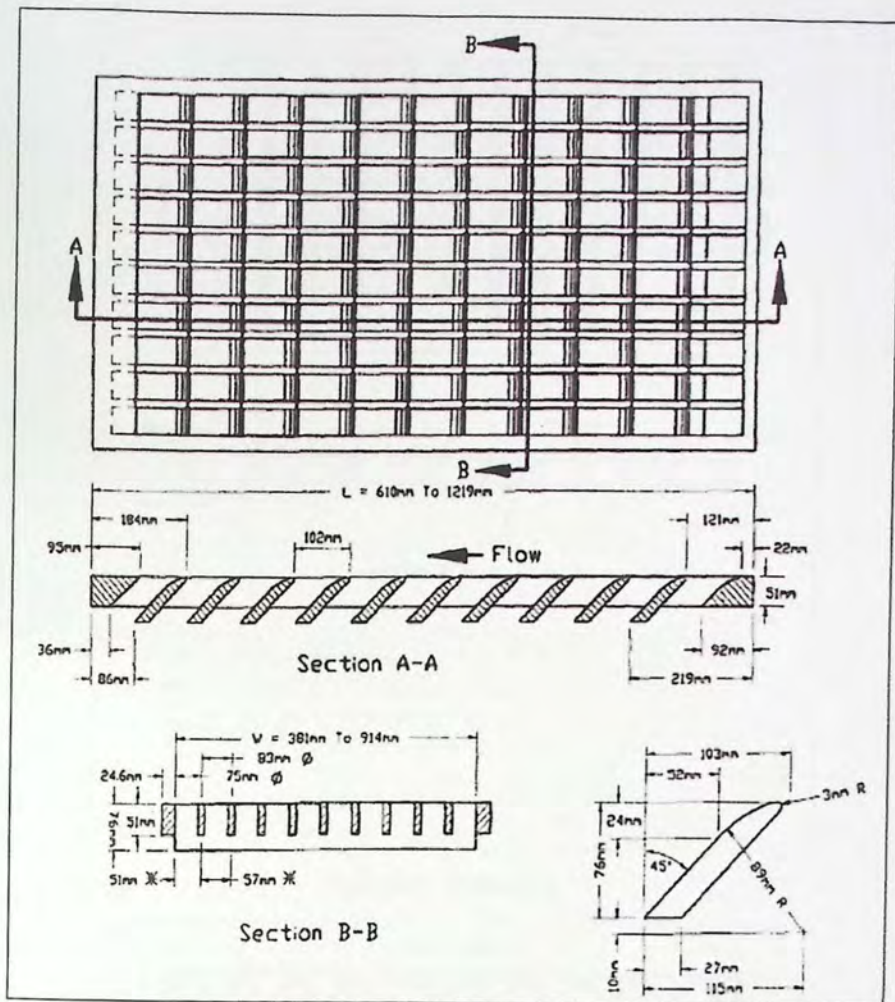


Figura 2.18 - Rejillas 45°-83, 45°-60

Ø: Corresponde para las medidas de la rejilla 45°-83

*: Corresponde para las medidas de la rejilla 45°-60

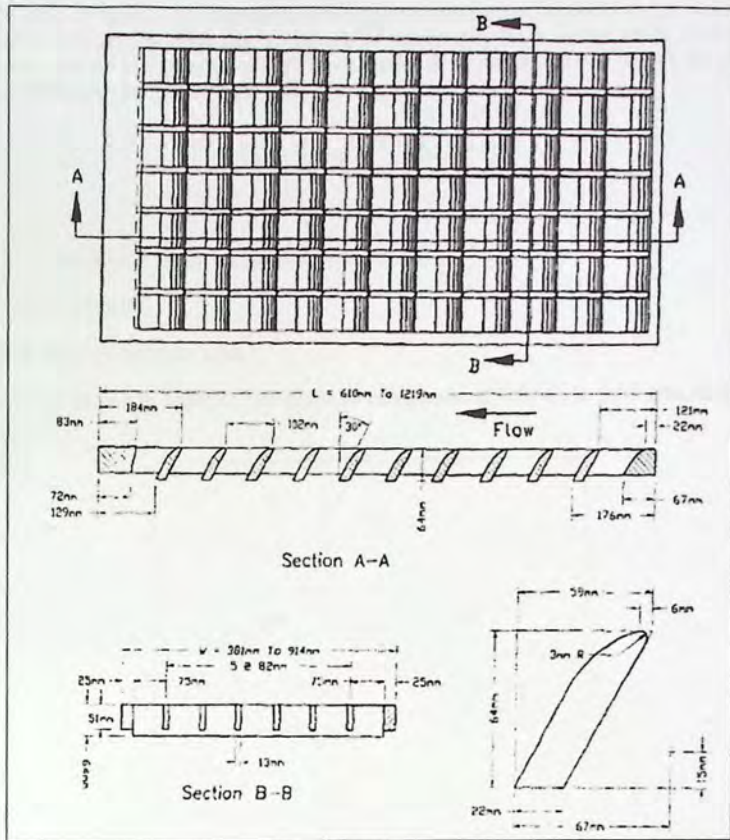


Figura 2.19 - Rejilla 30°-85

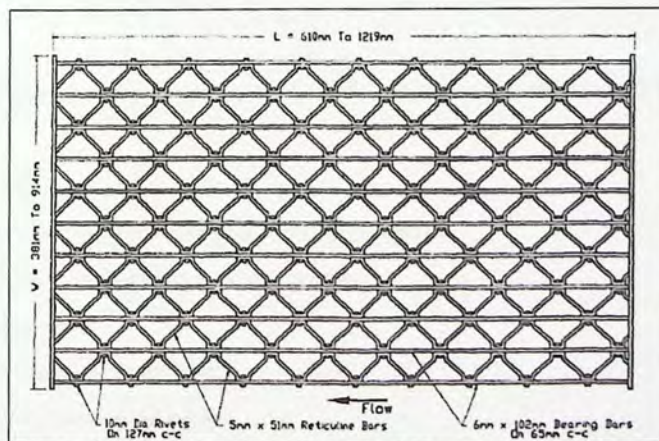


Figura 2.20 - Rejilla reticulada

El procedimiento considera que el análisis de la capacidad de interceptación de una rejilla, requiere la determinación de un Q_w el caudal frontal que descarga en todo el ancho W de la rejilla, y Q_s el caudal lateral, que es la descarga al lado de la rejilla. Si la sección de la cuneta es uniforme, la relación E_o del caudal frontal Q_w está dada por:

$$E_o = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67} \quad (\text{Ec 2.11})$$

Donde:

E_o = relación entre caudal frontal y el caudal total (Q_w/Q)

W = ancho de la rejilla (m)

T = ancho de escurrimiento del agua

En la figura 2.21 se puede observar de cómo se comportan el flujo en la calle ante la aparición de un sumidero

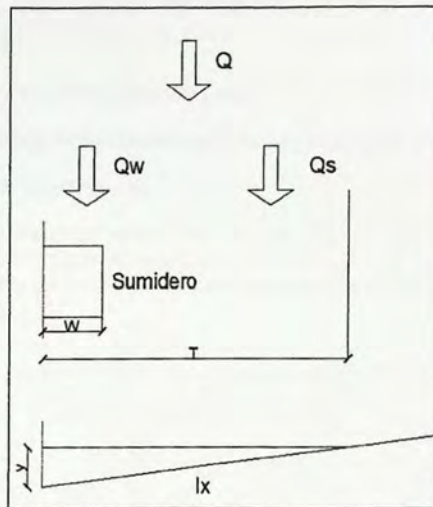


Figura 2.21 - vista en planta y elevación del comportamiento del flujo en la calle

Donde:

Q = Caudal total

Q_w = caudal frontal que descargara en el ancho de la rejilla

Q_s = Caudal lateral que descarga al lado de la rejilla

W = ancho de la rejilla

T = ancho de escurrimiento del agua

y = altura de escurrimiento del agua

l_x = pendiente transversal de la calle

Una vez E_o es conocido, el caudal frontal y el caudal lateral que se acerca a la rejilla se da por las siguientes ecuaciones:

$$Q_w = E_o * Q \quad (\text{Ec. 2.12})$$

$$Q_s = (1 - E_o) * Q \quad (\text{Ec. 2.13})$$

El caudal frontal captado en la entrada, es denotado por $(Q_w)_{int}$:

$$(Q_w)_{int} = R_f * Q_w \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Dónde:

$$R_f = 1 - K_c(v - v_o) \rightarrow v \geq v_o \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$R_f = 1 \rightarrow v < v_o$$

K_f es constante ($SI=0.295$)

$v = Q/A$, es la velocidad del caudal en la cuneta (m/s)

v_o es la velocidad donde ocurre el primer fenómeno de salpicadura en la reja

R_f no puede ser mayor que 1 y menor que 0

Generalmente v_o se llama velocidad splash-over (la velocidad mínima que el caudal frontal pasa por encima de la parte superior de la rejilla sin ser interceptado). v_o (y R_f) depende del tipo de rejilla y su longitud en la dirección del flujo y pueden ser determinadas a partir de un gráfico apropiado para la rejilla analizado (fig. 2.22).

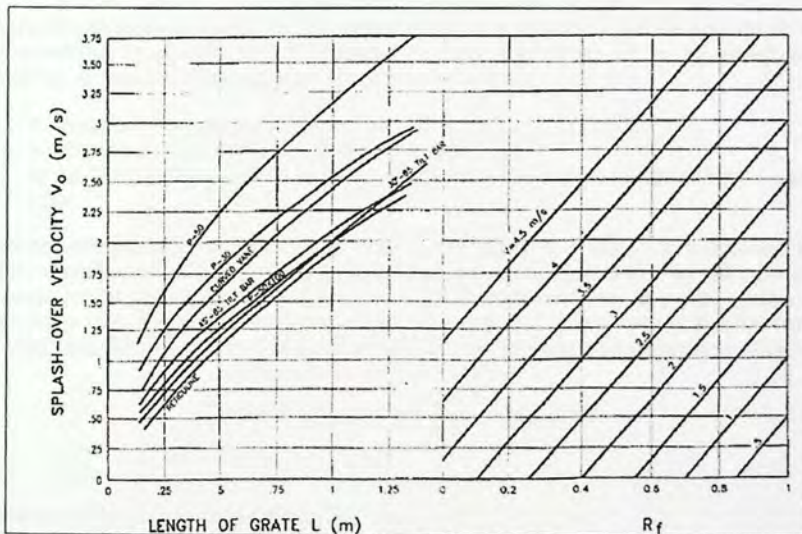


Figura 2.22 - Gráfico de la velocidad de salpicadura [5]

El caudal lateral captado se denota por $(Q_s)_{int}$:

$$(Q_s)_{int} = R_s * Q_s \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde R_s depende de algunos factores y viene dada por:

$$R_s = \left(1 + \frac{K_s * v^{1.8}}{I_x * L^{2.3}} \right)^{-1} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Dónde:

K_s = es constante (SI=0.0828)

I_x = pendiente transversal del camino (m/m)

L = largo de la rejilla (m)

Combinando las ecuaciones anteriores da el caudal total captado por una rejilla

$$Q_{int} = (Q_w)_{int} + (Q_s)_{int} = R_f * Q_w + R_s * Q_s = Q [R_f * E_o + R_s (1 - E_o)]$$

La eficiencia final en la entrada de la rejilla está dada por:

$$E = R_f * E_o + R_s (1 - E_o) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

2.6.3 Método de la John Hopkins University, EEUU [Li, 1956]

Es la primera metodología llevada a cabo para determinar el espaciamiento de entrada de drenaje fue propuesto por Li en 1956 en la Universidad de John Hopkins en EE.UU [6], de acuerdo con este método, el traspaso de caudal puede ocurrir en tres formas:

- El caudal entre la cuneta y la primera ranura
- El traspaso del caudal a través de la propia rejilla;
- El caudal no interceptado de la última ranura de la rejilla (hacia la corona de la calzada o calle)

El método requiere el conocimiento tres coeficientes adimensionales, los resultados que se realizaron en la Universidad John Hopkins fueron propuestos por Stephenson en 1981. De acuerdo con estos resultados, es posible estimar la longitud necesaria de la rejilla L' con barras longitudinales para interceptar totalmente el flujo circulante Q . En este caso la longitud necesaria de la rejilla está relacionada con otros parámetros como se demuestra en la siguiente ecuación:

$$Q = 0.417 * L' * y * g^{0.5} * \left(y - \frac{W}{\tan \theta} \right)^{-0.5} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

Q = caudal total que circula en la calle (m^3/s)

L' = longitud necesaria de la rejilla capaz de interceptar en su totalidad el caudal que circula (m)

y = altura de escurrimiento del caudal (m)

g = aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m}^2/\text{s}$)

W = ancho de la rejilla (m)

θ = ángulo entre la acera y la calle expresada en grados

Si se admite el flujo no interceptado, el método propone otra expresión para el cálculo de la longitud de la rejilla L correspondiente a un caudal captado Q_{int} que esta entre 0,8 y 0,85 veces del caudal que circula Q a través de una entrada con barras longitudinales:

$$Q_b = 0.25 * (L - L') * g^{0.5} * \left(y - \frac{W}{\tan \theta} \right)^{1.5} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

Q_b = caudal no captado

2.6.4 Método Colorado State University para el UDFCD EEUU [Comport et ál., 2009]

El estudio hizo un total de 318 pruebas, el cual constaba de 3 tipos de sumideros (tipo 13, tipo 16 y tipo R) que se ensayaron bajo distintas pendientes longitudinales y transversal, como también bajo tres alturas del escurrimiento diferentes. Las eficiencias obtenidas en el ensayo se compararon con el método de UDFCD (Urban Drainage and Flood Control District), el cual se basa en el ensayo de FHWA, con lo cual después de un análisis obtuvieron nuevas formulaciones con la que se puede obtener la eficiencia de la rejilla [7].

Descripción del ensayo

Se realizó en una plataforma a escala 3:1, con una longitud de 19,2 metros y ancho 4,87 metros (figura 2.23). La pendientes longitudinal variaba entre 0 a 4%, y la pendiente transversal eran de 1% y 2%. Las alturas de escurrimiento eran de 0,1- 0,15 y 0,3 metros. El caudal máximo que se podía ensayar es de 2831 l/s.



Figura 2.23 - Plataforma ensayo UDFCD

Tipos de sumideros

Se ensayaron 3 tipos de sumideros, tipo 13 y tipo 16 que eran ventana horizontal y el tipo R solo tenía una ventana lateral. A continuación se muestran unos esquemas de ellos. (Figura 2.24, 2.25, 2.26)

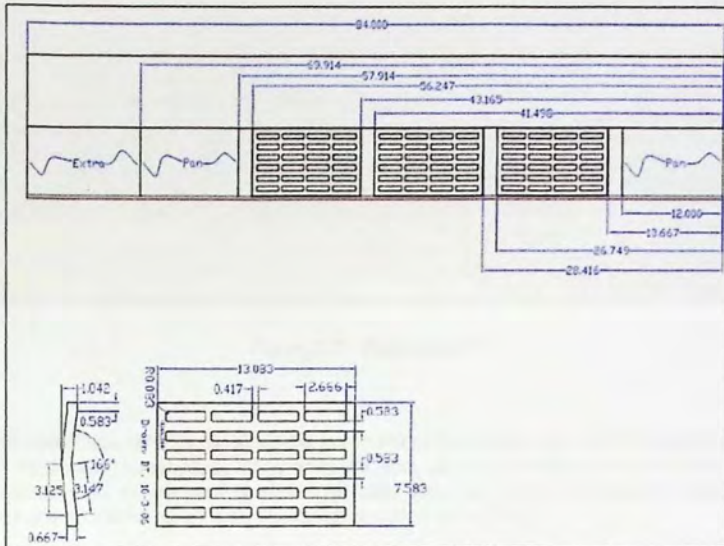


Figura 2.24 - Rejilla tipo 13

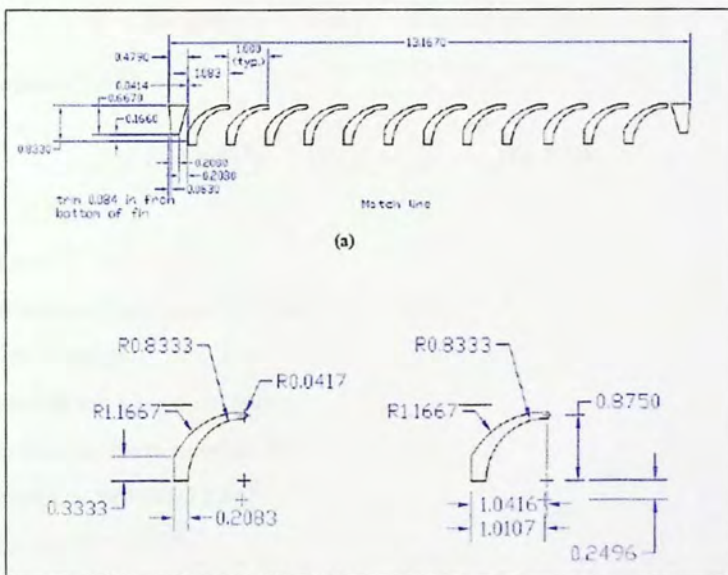


Figura 2.25 - Rejilla tipo 16

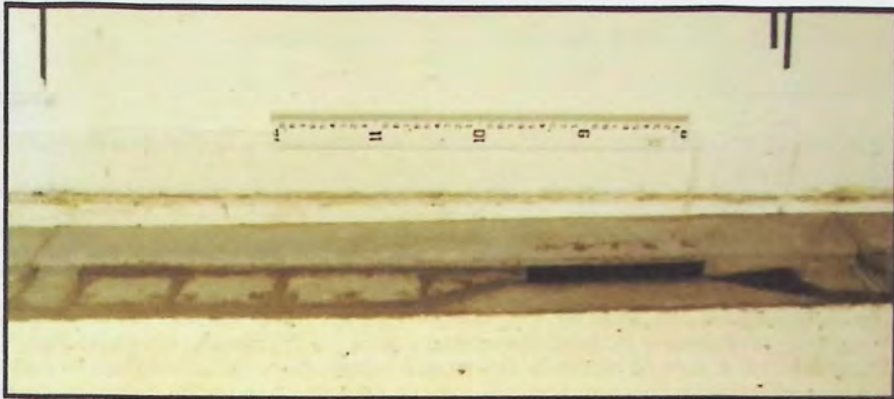


Figura 2.26 - Rejilla tipo R

Ya que se necesitaba obtener la eficiencia con parámetros conocidos por el usuario (velocidad, pendiente transversal, longitudinal, largo de rejilla, etc), con lo cual bajo varios análisis se obtuvo una formulación más simple para la eficiencia, cabe decir que esta investigación encontró unos parámetros que solo sirve para los sumideros ensayados por UDFCD.

Eficiencia para tipo 13

$$E=0,063 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,665} \left(\frac{V^2 T}{gA}\right)^{0,835} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-1,138} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Eficiencia para el tipo 16

$$E=0,095 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,573} \left(\frac{V^2 T}{gA}\right)^{0,756} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-0,920} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

E = eficiencia

y = altura de escurrimiento aguas arriba (m)

L = largo de la reja (m)

V = velocidad de flujo aguas arriba (m/s)

T = ancho de escurrimiento superficial (m)

g = aceleración de gravedad (9,8 m/s²)

A = área mojada del flujo (m²)

Eficiencia para el tipo R

$$E=0,076 \left(\frac{V^2}{gy}\right)^{0,545} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-0,879} I_x^{0,231} \quad (\text{Ec. 2.23})$$

Donde:

L = largo de la abertura en la solera (m)

I_x = pendiente transversal

2.6.5 Método del HR Wallingford (UK)

En noviembre de 1996 la Highway Agency (HA) encargó a HR Wallingford, en asociación con el Transport Research Laboratory (TRL), llevar a cabo un estudio sobre el rendimiento hidráulico de rejillas de sumideros utilizados para recoger la escorrentía superficial del agua de las carreteras. El resultado principal del estudio fue un aviso de HA dando recomendaciones del diseño en que las rejillas se deben instalar, teniendo cuenta las características de las lluvias locales, la geometría de las rejillas y la carretera. Un requisito clave para el nuevo documento era que la información sobre el diseño debe ser aplicable a cualquier patrón de rejilla que se ajusta a la norma europea UNE EN 124 [8].

Un total de 24 rejillas se ensayaron en un canal de inclinación (4,9 m x 1,5 m) con un perfil de sección transversal que representa un lado de la acera en forma triangular.

El rango de las dimensiones de las rejillas era la siguiente:

- ancho de 220 mm hasta 400 mm
- longitud de 200 mm hasta 500 mm

Se decidió para medir la eficiencia hidráulica de cada rejilla bajo las siguientes condiciones

- 3 ancho de flujo T: 0,5 m, 1,0 m, 1,5 m
- 5 pendientes longitudinales I_L : 0.5%, 1%, 2%, 4%, 6.67%
- 3 pendientes transversales I_x : 2%, 2.5%, 3.33%

En total 45 pruebas se llevaron a cabo para cada tipo de rejilla. Flujo de Profundidad en la acera varió de 10 mm a 50 mm. Por el análisis de los resultados de los datos, se demostró que existe una relación lineal entre la eficiencia de recolección de flujo E y el Q total de descarga para cada tipo de flujo de ancho (T) y cada tipo de pendiente transversal (I_x)

Análisis de los datos experimentales mostraron que, excepto a bajos valores de eficiencia, los resultados para una rejilla podrían ser descritos satisfactoriamente por una ecuación de la forma:

$$E=102.7-G \frac{Q}{y} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Donde

E = la eficiencia hidráulica (expresada en porcentaje $E \leq 100\%$)

Q = caudal total que se aproxima a la rejilla (m^3/s)

y = profundidad del agua en la acera (m)

G = coeficiente que depende de las características geométricas de la rejilla

Para predecir los valores de G sobre la base de los parámetros geométricos de las rejillas, utilizaron el análisis dimensional y técnicas de regresión múltiple, la siguiente ecuación general fue desarrollada para predecir los valores de G obtenidos de la prueba en las rejillas modelo HR:

$$G = K_A * k_{B1} * k_{B2} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Donde:

K_A = parámetro específico de la rejilla definido por:

$$K_A = \frac{69}{A_g^{0.75} * \sqrt{p}} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde:

A_g = área del rectángulo más pequeño que tiene lados paralelos a la acera que puede contener todas las ranuras de la rejilla (m^2)

p = relación entre el área de vacío y A_g (%)

El coeficiente de k_{B1} tiene en cuenta los efectos de las barras transversales y longitudinales en la rejilla y está dada por

$$k_{B1} = (n_t + 1)^{0.19} * (n_l + 1)^{0.07} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Donde:

n_t = número de barras transversales

n_l = número de barras longitudinales

Similarmente el coeficiente k_{B2} describe el efecto de cualquier barra diagonal y está dada por:

$$k_{B2} = (n_d + 1)^{0.15} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Donde:

n_d = número de barras diagonales

La ecuación completa para predecir la eficiencia hidráulica de la rejilla es obtenida por la combinación de las expresiones previas que da:

$$E = 102.7 - \left(\frac{69}{A_g^{0.75} * \sqrt{p}} * (n_t + 1)^{0.19} * (n_l + 1)^{0.07} * (n_d + 1)^{0.15} \right) * \left(\frac{Q}{y} \right) \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Durante el ensayo, se dieron cuenta de que las ecuaciones 2.27 y 2.28 para estimar el efecto del patrón de barras podría dar lugar a incertidumbres cuando se aplica a algunas rejillas comerciales con patrón complicado, por lo tanto, se decidió simplificar la ecuación 2.25 a la forma

$$G = K_A * C_b \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde:

K_A = parámetro específico de la rejilla definido en la ecuación 2.26

C_b = coeficiente global para un patrón de barras particular de acuerdo con los valores contenidos en la tabla 2.3

Tabla 2.3 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras

patrón de barras de rejilla	C_b
Barras transversales	1,75
Barras longitudinales, diagonales o curvas	1,5

Fuente: Adaptado de [8]

En el caso de que las rejillas contengan una mezcla de la orientación de las barras, se sugiere que el patrón predominante de las barras debe determinarse contando el número de huecos en las direcciones longitudinal y transversal, y también los huecos que estén en un ángulo a la línea de la acera. Si más de la mitad del total de número de huecos son transversales, se debe utilizar el valor de $C_b = 1,75$, mientras que, por el contrario, el valor correcto es de $C_b = 1,5$ [9].

CAPÍTULO 3: Desarrollo del estudio comparativo

3.1 Recopilación de datos

Como se mencionó en el Capítulo 1, se recopilaron los datos de eficiencia de captación de sumideros del "Estudio Experimental del Funcionamiento de Sumideros de Aguas Lluvias" [Kaliski y Cortez, 2004] realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica en conjunto con el Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Públicas.

3.2 Estudio Experimental del Funcionamiento de sumideros de Aguas Lluvias [Kaliski y Cortez, 2004]

En el 2004, el Laboratorio del Instituto Nacional de Hidráulica diseñó y construyó un banco de pruebas en escala real (1:1), el cual consistió en la representación de una calle que se podía variar las pendientes transversales y longitudinales, el tipo de sumidero y los caudales de aproximación de la calle [10].

Descripción del Banco de pruebas

La plataforma tiene una longitud de 14 metros y un ancho de 3,5 metros, el cual representa de una mejor forma el ancho de media calzada de una calle de medidas normal), está dividida en 5 zonas (señaladas en un círculo amarillo con su respectiva numeración), la cual se muestra en la figura 3.1:



Figura 3.1 - Vista esquemática plataforma ensayo INH

Zona 1: el agua es bombeada a un estanque de receptor del flujo y aquietador. En su salida tiene un aforador de tipo triangular, en el cual se controla el caudal total de entrada, el caudal máximo de bombeo es de 240 l/s, en el estudio se probaron con caudales de entrada de 20, 40, 60, 80, 100 y 120 l/s. Se encuentra las bombas centrífugas y tableros de control

Zona 2: Estanque de albañilería estucado, es una zona de estabilización del flujo, para asegurar un escurrimiento unidimensional para traspasar el caudal a la plataforma. Su longitud es de 6 metros.

Zona 3: Plataforma de ensayo, la cual tiene un pivote en su inicio y también mediante de hilos colgantes desde la parte superior de cada marco unidas a volantes que permiten variar las pendientes tanto transversales y longitudinales. El rango de pendientes longitudinales es de 0 – 10% y transversales es de 0 – 5%.

Zona 4: Se encuentra instalados los sumideros en la calle.

Zona 5: Obra de recepción del caudal no captado por el sumidero, se mide en un canal receptor, que permite conducir y aquietar las aguas, hasta un vertedero de tipo triangular.

Sumideros ensayados

Se realizó el estudio con 5 sumideros diferentes, los cuales varían en sus barras longitudinales y transversales, el tipo de material fabricado de la rejilla, áreas de huecos, etc. A continuación se muestra en la tabla 3.1 con las características de los sumideros

Tabla 3.1 - Principales características de los sumideros ensayados INH

Identificación	Largo, L (m)	Ancho W (m)	Área huecos (%)	Barras long. n_L	Barras trans. n_T	Observaciones	Imagen
1.- DOH Simple	1,0	0,7	50,9	8	12	Con ventana lateral, y sin depresión.	
2.- DOH Doble	2,0	0,7	50,9	8	24	Con ventana lateral. en serie, sin depresión.	
3.- SERVIU S1	1,0	0,4	68,5	3	19	Similar al tipo S1 de Servi, sin depresión.	
4.- Las Condes	1,4	0,5	66,0	15	0	Solo pletinas longitudinales I.M. Las Condes, sin depresión.	
5.- DOH especial	1,0	0,8	58,7	10	12	Acero macizo DOH, sin depresión.	

Fuente: Adaptado de [1]

A continuación se muestra el detalle de la rejilla de cada sumidero y sus respectivas medidas:

Sumidero N°1: DOH simple

Escala 1:20, medidas en milímetros

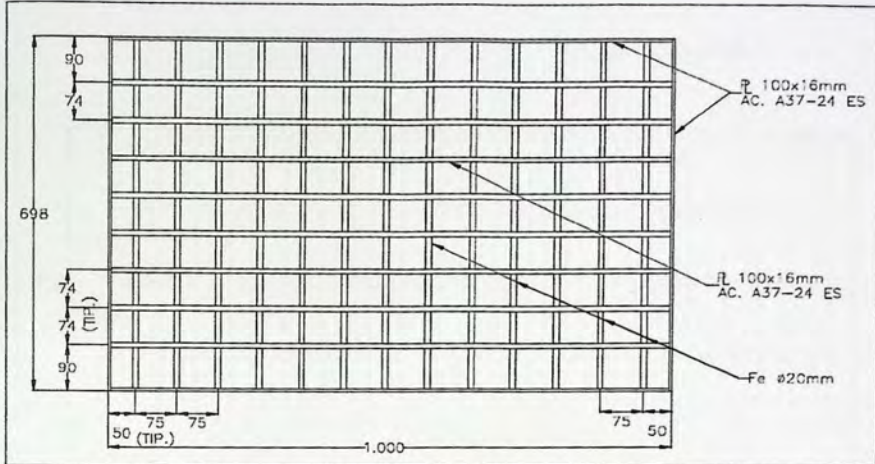


Figura 3.2 - Detalle rejilla DOH simple

Sumidero N° 2: DOH doble

Escala 1:20, medidas en milímetros

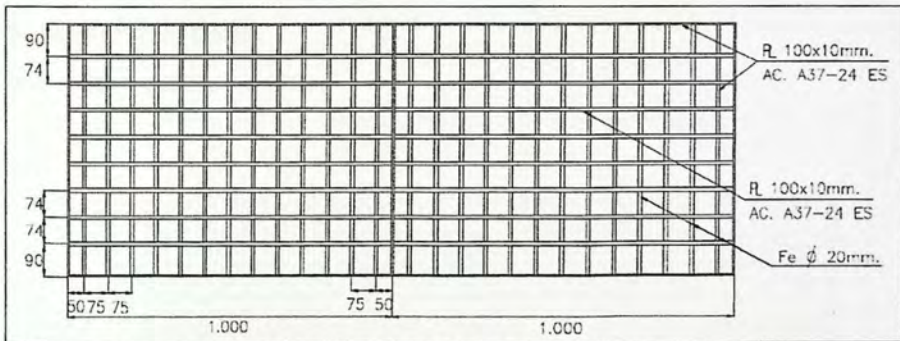


Figura 3.3 - Detalle rejilla DOH doble

Sumidero N° 3: SERVIU S1

Escala 1:20, medidas en milímetros

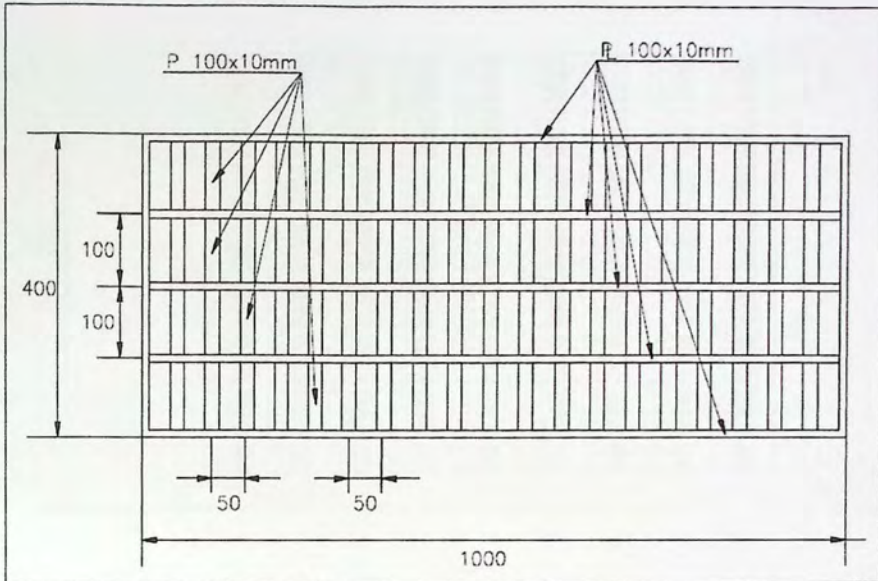


Figura 3.4 - Detalle rejilla SERVIU S1

Sumidero N° 4: Las Condes

Escala 1:20, medidas en milímetros

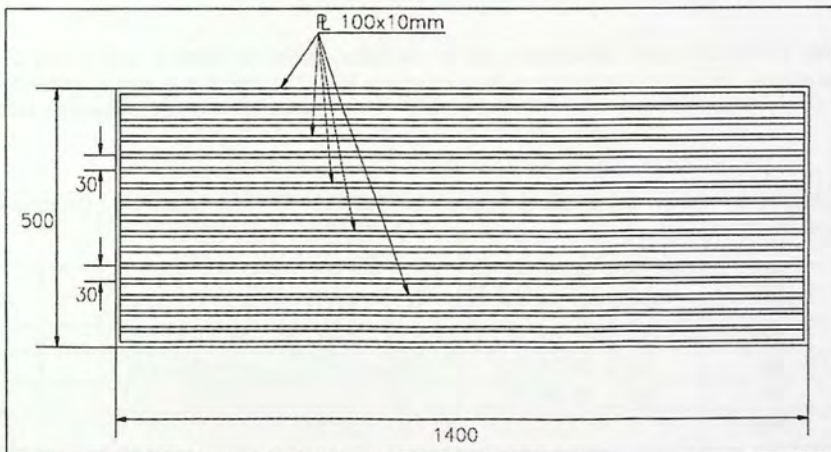


Figura 3.5 - Detalle rejilla Las Condes

Sumidero N° 5: DOH especial

Escala 1:20, medidas en milímetros

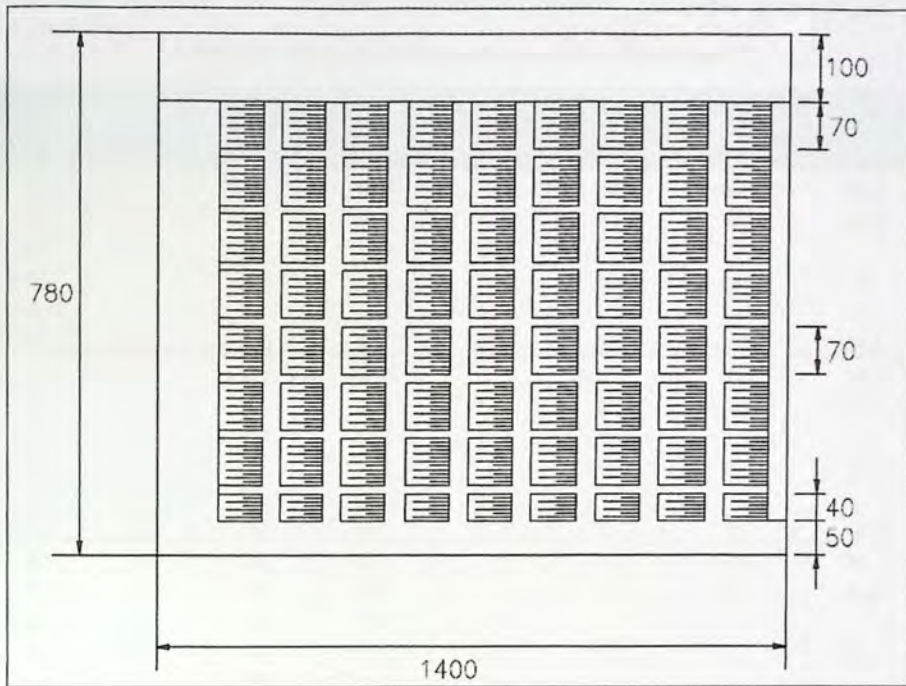


Figura 3.6 - Detalle rejilla DOH especial

Experiencias realizadas

En la tabla 3.2 se muestra un cuadro resumen de las experiencias realizadas por el estudio, adicionalmente para el sumidero N°1 DOH simple se realizaron 24 ensayos con la ventana lateral tapada y 5 ensayos con la rejilla tapada.

Tabla 3.2 - Resumen de número de experiencias realizadas por INH

SUMIDERO	PENDIENTE LONGITUDINAL (%)	PENDIENTE TRANSVERSAL (%)	CAUDAL (l/s)	CANTIDAD EXPERIENCIAS
1	0.1-0.5-1.0-3.0	1-2-3-4 y 5	20, 40, 60, 80, 100 y 120	117
2	0.1-1.0-3.0	1-2-3 y 5	60, 80, 100 y 120	48
3	0.1-1.0-3.0	1-2-3 y 5	20, 40, 80 y 120	40
4	0.1-1.0-3.0	1-2-3 y 5	20, 40, 80 y 120	48
5	0.1-1.0-3.0	1-2-3 y 5	20, 40, 80 y 120	48
TOTAL				301

Fuente: Adaptado de [10]

Resultados obtenidos de eficiencias

En la siguiente tabla, se puede visualizar las eficiencias obtenidas en laboratorio para los cinco sumideros ensayados con diferentes caudales de entrada, pendientes longitudinales y transversales.

Tabla 3.3 - Eficiencias de captación de sumideros ensayados

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total) (l/s)	E (eficiencia de captación %)				
			DOH simple	DOH doble	SERVIU S1	Las Condes	DOH especial
0,1	1	20	68,8		53,5	60,8	66,9
0,1	1	40	55,5		41,4	48,7	55,5
0,1	1	60	49,3	59,4			
0,1	1	80	45,1	54,5	32,7	39,7	44
0,1	1	100	41,1	49,7			
0,1	1	120	39,7	47,2	27,6	33,9	38,4
0,1	2	20	86,3		71,8	80,9	85,2
0,1	2	40	72,6		57,1	66,4	70,1
0,1	2	60	64,5	77,7			
0,1	2	80	57,9	71,1	45	53,1	57,6
0,1	2	100	52,6	65,7			
0,1	2	120	49,7	61,5	37,7	45,3	48,7
0,1	3	20	95,2		82,7	91,2	94,1
0,1	3	40	83,3		67	77,8	81,4
0,1	3	60	74,8	87,4			
0,1	3	80	68,8	80,6	53,2	62,7	67,4
0,1	3	100	63,5	75			
0,1	3	120	59,3	70,5	44	53,1	57,1
0,1	5	20				99,3	99,7
0,1	5	40				91	94
0,1	5	60		99,1			
0,1	5	80		95		76,4	80,1
0,1	5	100		90,3			
0,1	5	120		86,3		65,9	69,9
0,5	1	20	61,4				
0,5	1	40	50,1				
0,5	1	60	44,6				
0,5	1	80	41				
0,5	1	100	37,5				
0,5	1	120	36,2				
0,5	2	20	83,8				
0,5	2	40	69,9				
0,5	2	60	62,6				
0,5	2	80	56,7				
0,5	2	100	51,3				
0,5	2	120	48				

0,5	3	20	94,7				
0,5	3	40	82,9				
0,5	3	60	73,8				
0,5	3	80	67,7				
0,5	3	100	62,7				
0,5	3	120	58,1				
0,5	4	20	99,3				
0,5	4	40	90,2				
0,5	4	60	82,3				
0,5	4	80	76,1				
0,5	4	100	69,6				
0,5	4	120	64,6				
0,5	5	20	100				
0,5	5	40	95,6				
0,5	5	60	88,4				
0,5	5	80	81,7				
0,5	5	100	76,4				
0,5	5	120	70,9				
1	1	20	59,7		43,3	49,7	63,8
1	1	40	50,3		35,3	41,1	53,6
1	1	60	45,8	53,2			
1	1	80	42,3	49,3	29,4	34,8	43,2
1	1	100	38,9	45,1			
1	1	120	37	42,9	24,9	29,8	37
1	2	20	82,9		64,2	72,3	82,5
1	2	40	69,3		51,9	59	69
1	2	60	61	71,1			
1	2	80	54,6	64,1	37,9	45,3	56,9
1	2	100	50,7	59,4			
1	2	120	48,5	55,5	32,5	38,8	50
1	3	20	94,4		76,7	86	93,9
1	3	40	82,1		62,6	71,5	83
1	3	60	74,4	86			
1	3	80	68,2	79,1	49,8	58,2	66,3
1	3	100	62,3	72,4			
1	3	120	57,8	67,5	38,9	47	56,8
1	5	40				89,1	94,9
1	5	60	88,3	98,4			
1	5	80	82	93,7		71,6	83,4
1	5	100	76	88,7			
1	5	120	72	84,6		61,5	72

3	1	20	64		47,5	51,7	72,1
3	1	40	54,8		39	43,7	57,6
3	1	60	49,7	57,4			
3	1	80	45,6	52,8	31,8	35,2	46,1
3	1	100	42,6	48,3			
3	1	120	40,1	45,2	26,4	30,6	39,3
3	2	20	81,8		64,8	69,9	92,9
3	2	40	73		52,7	59,7	81,5
3	2	60	69,2	74,5			
3	2	80	65,7	71,2	46	52,3	70,4
3	2	100	61,5	68,4			
3	2	120	57,2	66,1	37,9	47	60,1
3	3	20	94,4		77,7	84,8	96,3
3	3	40	82,8		61,7	68,9	87,7
3	3	60	74,2	81,5			
3	3	80	68,1	75,1	47,8	55,3	78
3	3	100	61,8	71,5			
3	3	120	59,6	69,5	40,4	50,9	73,8
3	5	20			93,2	97,4	99
3	5	40			81,2	89	96,6
3	5	60		98,4			
3	5	80		94,1	61,6	73,9	82,7
3	5	100		88			
3	5	120		81,2	45,9	59,2	73,7

Fuente: Adaptado de [10]

La eficiencia se obtuvo mediante el cociente entre el caudal captado por los distintos sumideros y el caudal total de entrada. Como en el ensayo se obtuvo el caudal no captado, como se explica con anterioridad, la diferencia entre el caudal total y no captado, se puede obtener el caudal captado por el sumidero y así obtener las eficiencias correspondientes para distintos casos.

Como se menciona en los alcances, solo se tomará en cuenta los datos obtenidos sin ventana lateral para los sumideros ensayados, ya que hay un mayor rango de datos en este caso. En el estudio del Instituto Nacional de Hidráulica mencionan en sus conclusiones y análisis que la ventana lateral no aporta casi nada en términos de eficiencias.

CAPÍTULO 4: Obtención y Análisis de las eficiencias

4.1 Generalidades

Se contrastará las eficiencias del estudio del Instituto Nacional de Hidráulica con las diversas metodologías extranjeras, explicadas en el capítulo 1 de este trabajo de título, bajo condiciones ensayadas de caudal, pendiente transversal y longitudinal. Como también se evaluará lo que se menciona en el Manual de Drenaje Urbano con respecto al diseño de capacidad de sumidero bajo condiciones no ensayadas y ante nuevos sumideros.

4.2 Eficiencias ante los mismos sumideros y condiciones ensayadas por INH por las distintas metodologías.

Obtenidos los datos de eficiencias del "Estudio Experimental del Funcionamiento de Sumideros de Aguas Lluvias" realizado por el Instituto Nacional de Hidráulica bajo diferentes condiciones de caudales de entrada, pendiente longitudinal y transversal de los 5 sumideros ensayados, se realizó el cálculo de h (altura de escurrimiento junto a la solera); este parámetro fue adquirido en el ensayo pero no se pudo tener acceso directo a ellos, con lo cual por medio de la ecuación de Izzard [11], se considera una altura de escurrimiento constante a lo largo de calle, que depende de la geometría de la calle y la sección transversal por donde escurre el caudal, se puede tener el valor de h teóricamente

$$Q = \frac{C_f}{n} \cdot I_x^{5/3} \cdot T^{8/3} \cdot I_y^{1/2} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Ecuación de Izzard

Donde:

Q = caudal total que circula por la calle (m³/s)

C_f = constante (SI=0,376)

n = coeficiente de rugosidad de Manning

I_x = pendiente transversal de la calle

I_y = pendiente longitudinal de la calle

T = ancho de escurrimiento del agua en la calle

En el ensayo se tomó en cuenta una media calzada de ancho 3,5 metros y la sección transversal al lado de la solera, es de forma triangular, el esquema de la calle se puede observar en la figura 4.1.

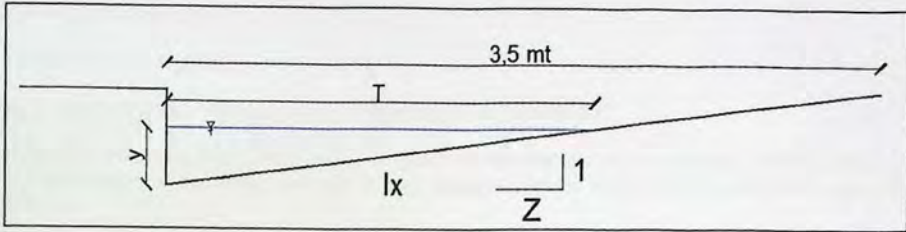


Figura 4.1 - Esquema del corte de la calle

En el esquema se observa un nuevo parámetro, que es Z (inverso de la pendiente transversal de la calzada) el cual para efecto de cálculo, se utiliza en los siguientes métodos de la obtención de eficiencia. Con esto reordenando la ecuación de Izzard para introducir el parámetro Z, se obtiene

$$Q = 0,376 \cdot \frac{Z}{n} \cdot \sqrt{l_y} \cdot y^{8/3} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

n = rugosidad de Manning, para nuestro cálculo es 0,015 que corresponde al hormigón, que es el material con el cual se caracterizó la calle en el ensayo.

Z = inverso de la pendiente transversal de la calzada ($Z = 1/l_x$)

y = altura de escurrimiento de la cuneta al lado de la solera (m)

Con esto se obtiene los valores de Z y h para las distintas condiciones de caudales, pendientes transversales y longitudinales ensayados en el estudio de INH. Se adjunta en el Anexo digital A, pestaña A.1 (CD)

4.2.1 Eficiencia: Método Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Como fue explicado en capítulos anteriores el método de la Universidad Politécnica de Cataluña, ellos obtuvieron unas formulaciones para el cálculo de la eficiencia de los sumideros, el cual mediante unos parámetros de A y B que dependían de la geometría de la rejilla (largo, ancho, barras longitudinales, transversales y diagonales, n° de huecos, etc.). Estos parámetros se obtienen por las siguientes ecuaciones:

$$A = \frac{1,988 \cdot A_g^{0,403}}{p^{0,190} \cdot (n_t + 1)^{0,088} \cdot (n_l + 1)^{0,012} \cdot (n_d + 1)^{0,082}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$B = 1,346 \cdot \frac{L^{0,179}}{W^{0,394}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

p = porcentaje de área de huecos respecto al área que los engloba a todos ($p = A_{\text{huecos}}/A_g$)

n_t = número de barras transversales

n_l = número de barras longitudinales

n_d = número de barras transversales

L = largo de la reja (cm)

W = ancho de la reja (cm)

A_g = área del mínimo rectángulo que engloba todos los huecos (m^2),

Para tener más claro el concepto de A_g , se puede ver un ejemplo en un sumidero SERVIU S1 en la siguiente figura, el rectángulo en rojo sería el área del mínimo rectángulo que engloba todos los orificios.

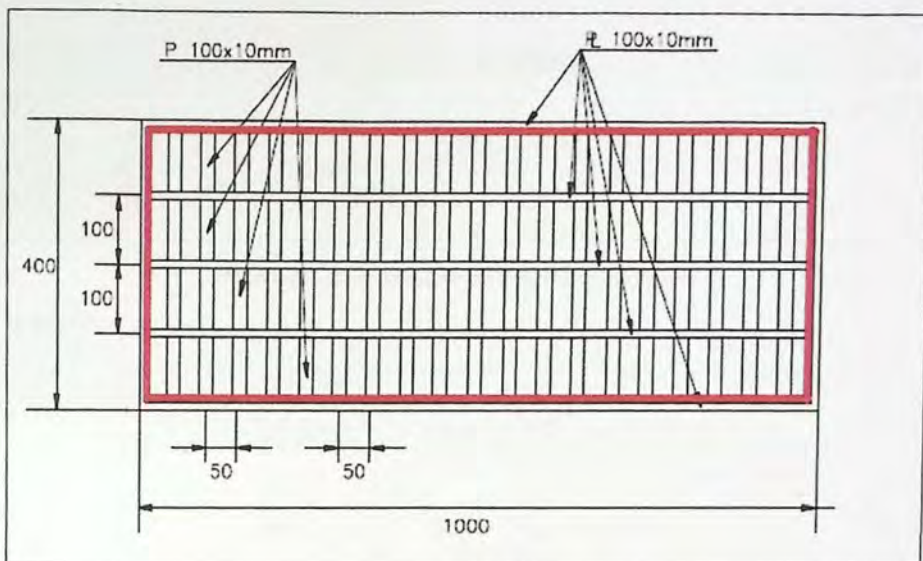


Figura 4.2 - Ejemplo de obtención de A_g en sumidero SERVIU S1

A continuación se adjunta la tabla 4.1, la cual muestra los parámetros A y B para los sumideros ensayados por el estudio INH

Tabla 4.1 - Valores A y B para sumideros chilenos

Sumidero	L (m)	W (m)	Área huecos (%)	nL	nt	nd	A_g (m^2)	A_h (m^2)	p (%)	B	A
DOH simple	1	0,7	50,9	8	12	0	0,647	0,33	50,9	0,576	0,614
DOH doble	2	0,7	50,9	8	24	0	1,346	0,69	50,9	0,652	0,779
SERVIU S1	1	0,4	68,5	3	19	0	0,372	0,26	68,5	0,718	0,452
Las Condes	1,4	0,5	66	15	0	0	0,662	0,44	66	0,698	0,735
DOH especial	1	0,8	58,7	10	12	0	0,5655	0,33	58,7	0,546	0,565

Fuente: Elaboración propia

Se destacan los valores del sumidero SERVIU S1 ya que es el único que cumple con los requisitos de las medidas máximas y mínimas (largo: 59 hasta 100 cm, ancho: 26 hasta 50 cm) de las rejillas con las cuales es válida los parámetros A y B.

Ya que el ancho de la media calzada que se utilizó en el estudio de INH es de 3,5 metros, se emplea la ecuación con la cual se saca un coeficiente k, que depende de la geometría de la calle, caudal total que circula y la altura de escurrimiento del caudal. Ya que el estudio UPC considero un ancho de 3 metros de la media calzada se modificó la ecuación de eficiencia agregándole este coeficiente cuando el ancho es distinto al ensayado. A continuación se muestra los rangos y ecuaciones con los cuales el coeficiente k depende de la altura de escurrimiento y la pendiente transversal de la calle para este estudio.

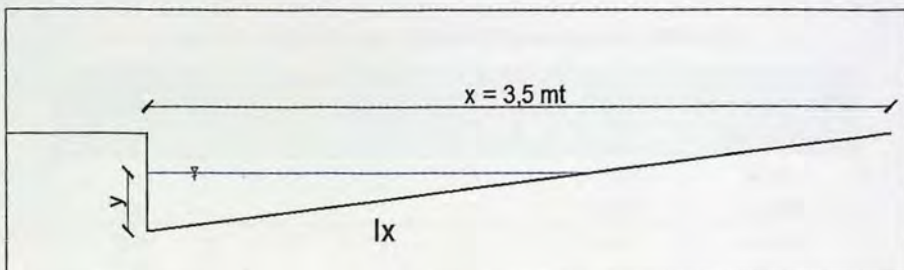


Figura 4.3 - Corte esquema calle de ancho 3,5 metros

Si $x > 3$ mt

$$y \leq 3 \cdot l_x \quad k=1$$

$$3 \cdot l_x \leq y \leq x \cdot l_x \quad k=1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$y \geq x \cdot l_x \quad k = \frac{1 - \left(1 - \frac{3 \cdot l_x}{y}\right)^2}{1 - \left(1 - \frac{x \cdot l_x}{y}\right)^2} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

y = altura de escurrimiento al lado de la solera

x = ancho de la media calzada (x = 3,5 mt)

l_x = pendiente transversal de la calle

Estos valores de k dependerán de la altura de escurrimiento, por consiguiente el caudal que circula por la calle. Con esto se obtuvo las eficiencias para cada sumidero chileno (DOH simple, DOH doble, SERVIU S1, Las Condes y DOH especial) con el método de UPC. La eficiencias se obtuvieron con la siguiente fórmula

$$E = A \left(k \cdot \frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

E = Eficiencia de captación de la reja

Q = caudal circulante por un ancho de 3,5 metros (m^3/s)

y = Altura de escurrimiento del agua inmediatamente antes de la reja (m)

A y B = parámetros de ajuste

k = coeficiente que depende la geometría de la calle

Se adjunta una tabla resumen con la eficiencia del sumidero SERVIU S1 ya que es el cumple con requisitos de las medidas de la rejilla, y a la vez se tomaron en cuenta los caudales de aproximación con las pendientes transversales y longitudinales que mayor se asemejan a los rangos ensayados por el estudio UPC.

Tabla 4.2 - Eficiencias por método UPC para sumidero SERVIU S1

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	y	EFICIENCIA (%)
%	%	(l/s)	(m)	SERVIU S1
0,5	1	20	0,0140	34,90
0,5	1	100	0,0255	16,96
0,5	2	20	0,0181	42,06
0,5	2	100	0,0331	20,44
0,5	3	20	0,0211	46,91
0,5	3	100	0,0385	22,79
0,5	4	20	0,0235	50,68
0,5	4	100	0,0429	24,63
1	1	20	0,0123	31,79
1	1	100	0,0224	15,45
1	2	20	0,0159	38,31
1	2	100	0,0291	18,62
1	3	20	0,0185	42,73
1	3	100	0,0338	20,76

Fuente: Elaboración propia

En anexo digital A, pestaña A.2 (CD) se muestran las eficiencias correspondientes a todos los sumideros ensayados en el estudio del INH por el método del UPC.

4.2.2 Eficiencia: Método Federal Highway Administration (FHWA)

Este método obtuvo formulaciones de eficiencia para el uso exclusivo de rejillas comunes de EEUU (P-50, P-50x100, P-30, Curved vane, 45°-83, 45°-60, 30°-85 y reticulada) con lo cual para poder caracterizarlas y emplearlas para los sumideros chilenos, se hizo una similitud entre la geometría de la rejilla evaluando sus medidas y formas.

En primera instancia se calculó el E_o para cada sumidero chileno, el cual depende del ancho de la rejilla y el ancho de escurrimiento del agua en la calzada.

$$E_o = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2,67} \quad (\text{Ec 2.11})$$

Donde:

E_o = relación entre caudal frontal y el caudal total (Q_w/Q)

W = ancho de la rejilla (m)

T = ancho de escurrimiento del agua

En Anexo digital A, pestaña A.3 (CD) se puede visualizar estos valores de E_o .

Mientras se efectuaban los cálculos de este parámetro E_o , se pudo observar que si el ancho de escurrimiento del agua B era menor al ancho de la rejilla W , no tenía un valor numérico real, con esto se llegó al análisis que el caudal frontal era igual al caudal total y con esto el valor de E_o era igual a 1 para estos casos.

El segundo parámetro que se calculó fue R_f , este valor depende de una constante K_f , la velocidad que hay en la cuneta y una velocidad de salpicadura, esta última se obtiene mediante un gráfico para uso exclusivo para las rejillas ensayadas por FHWA, con lo cual se asemejo los sumideros chilenos tomando sus formas geométricas y medidas lo más cercano posible a las rejillas de EEUU, obviamente no todas cumplían en su totalidad estas semejanzas.

El cálculo del parámetro R_f se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_f = 1 - K_f(v - v_o) \rightarrow v \geq v_o \text{ (Ec. 2.15)}$$

$$R_f = 1 \rightarrow v < v_o$$

Donde:

K_f = constante (SI=0.295)

v = Q/A , es la velocidad del caudal en la cuneta (m/s)

v_o es la velocidad donde ocurre el primer fenómeno de salpicadura en la reja

R_f no puede ser mayor que 1 y menor que 0

Se realizó una tabla con las velocidades de escurrimiento en la cuneta considerando los valores de caudal y área de la sección transversal de la cuneta para cada sumidero chileno (Anexo digital A, pestaña A.3)

Para el cálculo de V_o se tomó las siguientes consideraciones para cada sumidero chileno:

Los sumideros DOH simple, DOH doble y SERVIU S1 eran similares a la rejilla P-50x100

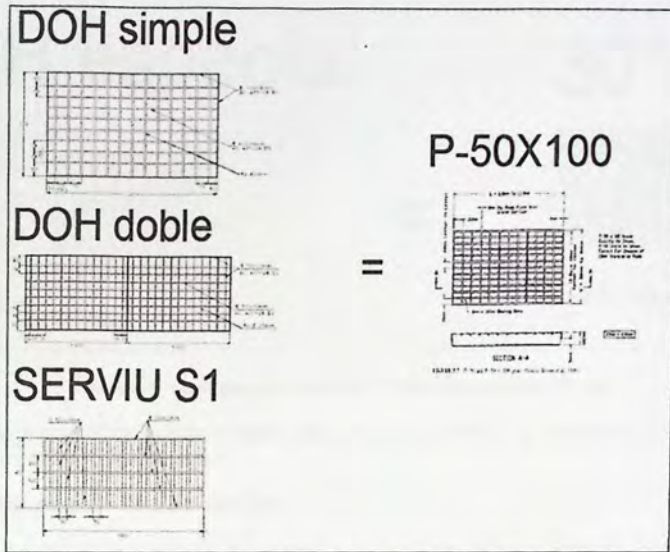


Figura 4.4 - comparación sumideros DOH simple, DOH doble y SERVIU S1 con P-50x100

DOH doble: supera el largo de la rejilla en comparación a P-50x100

SERVIU S1: supera el ancho de la rejilla en comparación a P-50x100

El sumidero de Las Condes es similar a la rejilla P-50

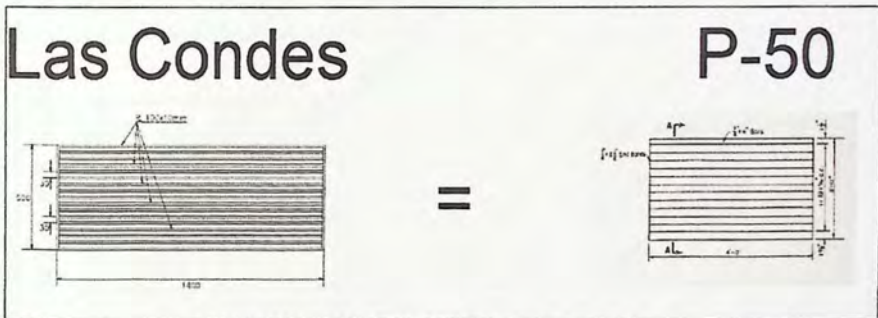


Figura 4.5 - Comparación sumidero Las Condes con P-50

Las condes: supera en el largo de la rejilla P-50

El sumidero DOH especial es similar a la rejilla 30°-85

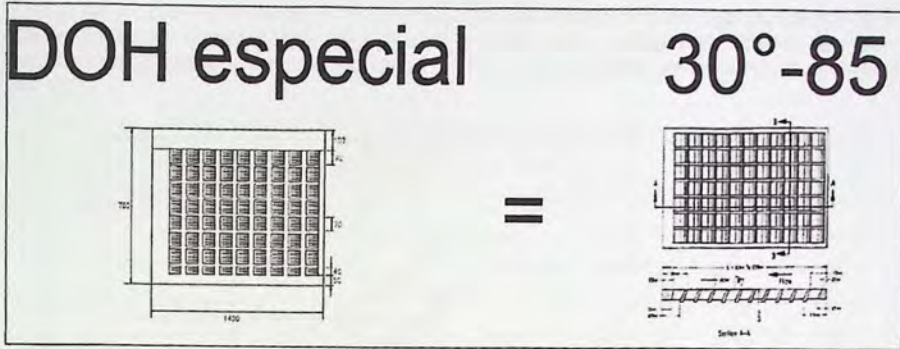


Figura 4.6 - Comparación sumidero DOH especial con 30°-85

Al tener ya comparados los sumideros entre ellos, se puede evaluar la velocidad de salpicadura v_o con las rejillas de EEUU contrastadas.

Sumidero DOH simple = Rejilla P-50X100

El largo del sumidero DOH simple es de 1 metro, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-50X100.

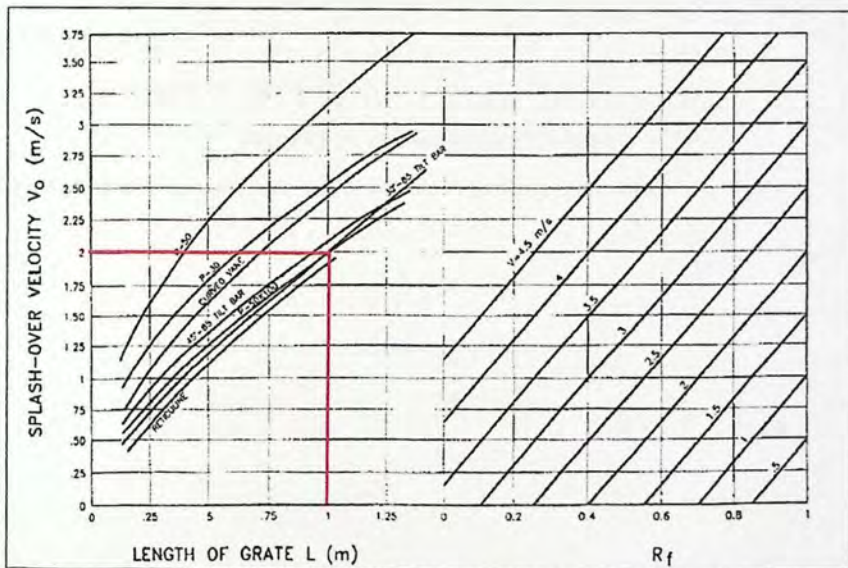


Figura 4.7 - V_o para el sumidero DOH simple

Con esto el valor de salpicadura $v_o = 2$ m/s para el sumidero DOH simple

Sumidero DOH doble =rejilla P-50x100

El largo del sumidero DOH doble es de 2 metros con cual es mayor al largo máximo del gráfico, así que se consideró el mayor valor de L que se muestra en el gráfico para obtener la máxima velocidad de salpicadura, con este ingresa al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-50X100

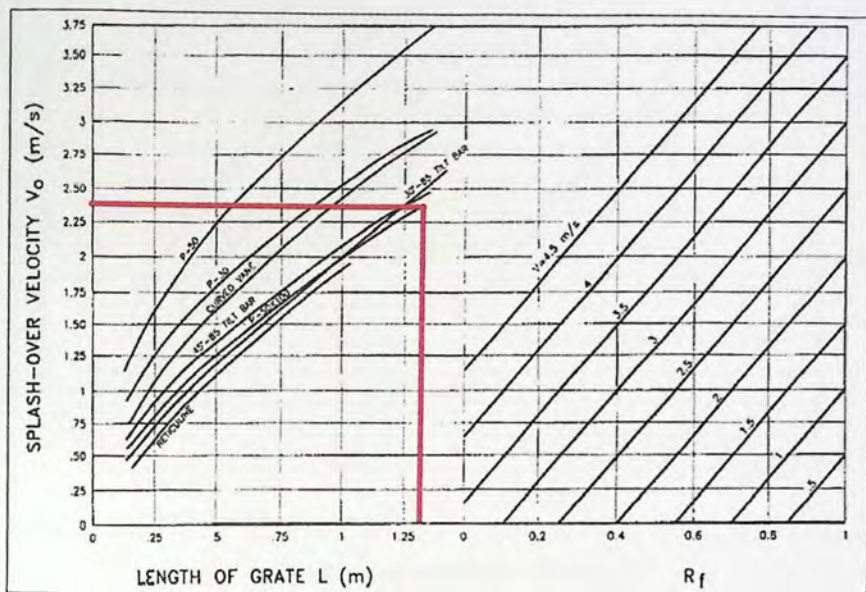


Figura 4.8 - V_o para el sumidero DOH doble

Con esto el valor de salpicadura $v_o = 2,38$ m/s para el sumidero DOH doble

Sumidero SERVIU S1 = rejilla P-50x100

El largo del sumidero SERVIU es de 1 metro, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-50X100.

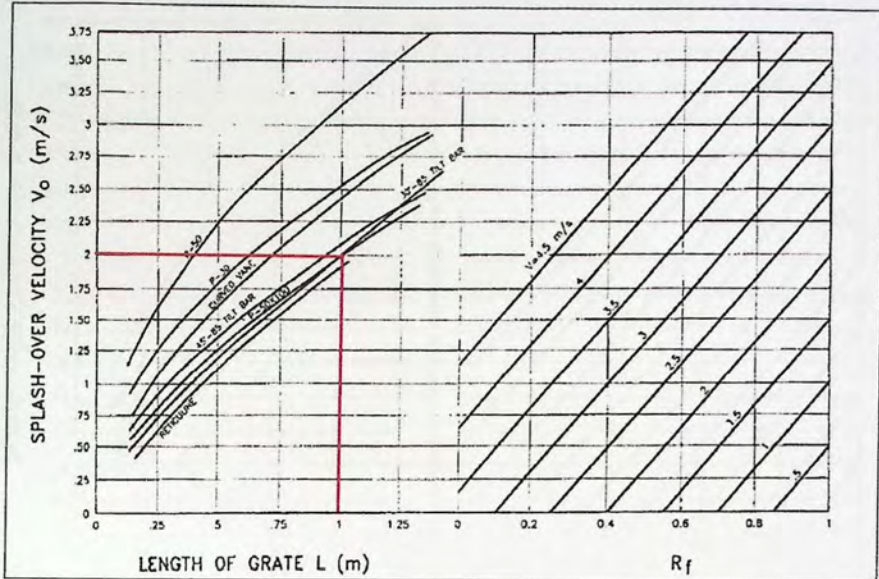


Figura 4.9 - V_o para el sumidero SERVIU S1

Con esto el valor de salpicadura $v_o = 2$ m/s para el sumidero SERVIU S1

Sumidero Las Condes = rejilla P-50

El largo del sumidero Las Condes es de 1,4 metros, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-50.

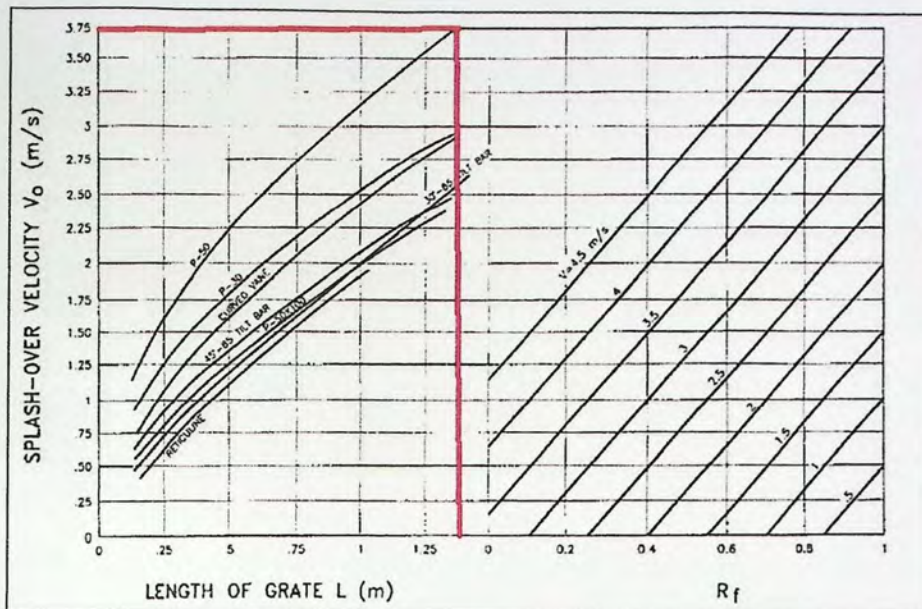


Figura 4.10 - V_o para el sumidero Las Condes

Con esto el valor de salpicadura $v_o = 3,75$ m/s para el sumidero Las Condes

Sumidero DOH especial = rejilla 30°-85

El largo del sumidero DOH especial es de 1 metro, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla 30°-85.

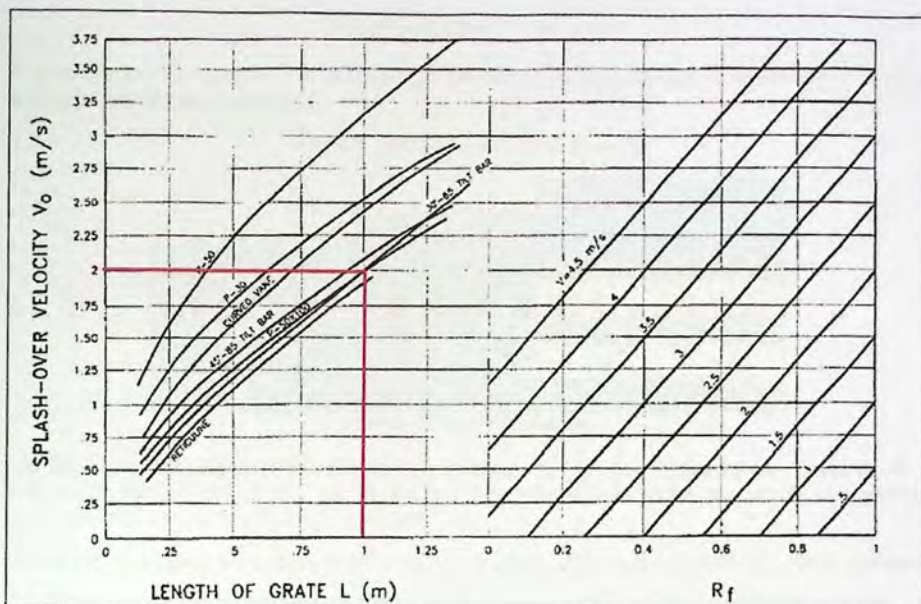


Figura 4.11 - V_o para el sumidero DOH especial

Con esto el valor de salpicadura $v_o = 2$ m/s para el sumidero DOH especial

Ya obtenidas las v_o para cada sumidero chileno se realiza una tabla (Anexo digital A, pestaña A.3) para calcular el coeficiente R_f el cual a velocidades de la cuneta muy grandes (mayores a 6,0 m/s), se observa que estos valores del coeficiente se vuelven negativos, pero se restringen ya que R_f como valor mínimo puede ser 0.

En tercera instancia se calcula el parámetro de R_s , el cual depende de la velocidad de la cuneta, largo de la rejilla, pendiente transversal de la calle y una constante K_s . A continuación se muestra la ecuación para obtener este parámetro:

$$R_s = \left(1 + \frac{K_s v_o^{1.8}}{i_x L^{2.3}} \right)^{-1} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

K_s = es constante (SI=0.0828)

i_x = pendiente transversal del camino (m/m)

L = largo de la rejilla (m)

Este valor no representa ninguna restricción o acotación mientras se efectuó el cálculo. En el Anexo digital A, pestaña A.3 (CD) se observa los valores de R_s para todos los sumideros.

Y por último, ya calculados todos los parámetros anteriores se obtiene la eficiencia de cada sumidero para sus respectivos caudales, pendientes longitudinales y transversales. La ecuación de la eficiencia de entrada es:

$$E = R_f * E_0 + R_s(1 - E_0) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

A continuación, se muestra una tabla con los sumideros destacados que cumplen con el largo y ancho requerido para este método

Tabla 4.3 - Características Sumideros INH

	Sumidero	largo	Ancho
		L (m)	W (m)
sumidero 1	DOH simple	1	0,7
sumidero 2	DOH doble	2	0,7
sumidero 3	SERVIU S1	1	0,4
sumidero 4	Las Condes	1,4	0,5
sumidero 5	DOH especial	1	0,8

Fuente: Elaboración propia

Las eficiencias más significativas son las que cumplían con las pendientes longitudinales (0,5% - 1%) y transversales (2% - 4%) con la cual fue ensayado este métodos, se adjunta la siguiente tabla resumen con las eficiencias respectivas.

Tabla 4.4 - Eficiencias por método FHWA para los sumideros DOH simple, SERVIU S1 y DOH especial

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	EH (eficiencia %)		
			DOH simple	SERVIU S1	DOH especial
0,5	2	20	85,36	69,60	86,66
0,5	2	40	67,10	50,33	70,00
0,5	2	60	55,14	39,85	58,31
0,5	2	80	46,54	32,91	49,63
0,5	2	100	39,96	27,85	42,84
0,5	2	120	34,68	23,94	37,33
0,5	4	20	73,28	70,15	73,28
0,5	4	40	57,00	49,95	57,07
0,5	4	60	45,54	37,74	46,11
0,5	4	80	36,52	29,26	37,38
0,5	4	100	29,19	22,91	30,11
0,5	4	120	23,08	17,90	23,94
1	2	20	65,31	55,87	65,53
1	2	40	45,65	35,54	47,00
1	2	60	32,69	24,42	34,17
1	2	80	23,33	17,06	24,61
1	2	100	16,15	11,70	17,12
1	2	120	10,40	7,56	11,05

Fuente: Elaboración propia

Anexo digital A, pestaña A.3 (CD) se adjunta las eficiencias para todos los sumideros con sus respectivas combinaciones de caudales, pendientes longitudinales y transversales.

4.2.3 Eficiencia: Método John Hopkins University (FHU)

Fue el primer método que abarcaba, mediante el caudal no captado, la eficiencia de sumideros, el cual no se tiene mayor información que parámetros (pendiente longitudinal y transversal, caudal, geometría plataforma, tipos de rejillas, etc) incluía en este estudio. Solo se consideró rejillas con barras longitudinales con lo cual se puede hacer más efectivo este método. Aunque los sumideros ensayados chilenos tienen distintas disposiciones de sus barras se calcula de igual forma la eficiencia con este método para hacer un contraste.

Se calcula, mediante la ecuación 2.19, una longitud L' teórica que es la necesaria para interceptar todo el caudal que circula por la calle

$$Q=0.417 \cdot L' \cdot y \cdot g^{0.5} \cdot \left(y - \frac{W}{\tan \theta}\right)^{-0.5} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

Q = caudal total que circula en la calle (m^3/s)

L' = longitud necesaria de la rejilla capaz de interceptar en su totalidad el caudal que circula (m)

y = altura de escurrimiento del caudal (m)

g = aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m}^2/\text{s}$)

W = ancho de la rejilla (m)

θ = ángulo entre la acera y la calle expresada en grados ($\tan \theta = Z$)

Ya obtenido este largo teórico L' en los cálculos, se puede llegar a la misma consideración que en el método de Federal Highway Administration, que el ancho de escurrimiento del agua en la calzada no puede ser menor al ancho del sumidero, si esto sucede se considera que el L' es igual a cero, y por consecuencia no existe un caudal no captado y todo el caudal que escurre por la calle es interceptado por el sumidero. En Anexo digital A, pestaña A.4 (CD) se puede visualizar estos valores.

A continuación se calcula el caudal no interceptado para cada sumidero chileno, con la siguiente ecuación:

$$Q_b = 0.25 \cdot (L' - L'') \cdot g^{0.5} \cdot \left(y - \frac{W}{\tan \theta}\right)^{1.5} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

Q_b = caudal no captado (m^3/s)

Al tener los caudales no interceptados, se puede obtener el caudal interceptado el cual será:

$$Q_{\text{captado}} = Q - Q_b \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

Q_{captado} = Caudal captado por la rejilla (m^3/s)

Y por consecuencia se puede llegar a la eficiencia de cada sumidero:

$$E = \frac{Q_{\text{captado}}}{Q} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

E = Eficiencia (%)

Se muestra un ejemplo en la siguiente tabla de las eficiencias alcanzadas por este método para los 5 sumideros chilenos con una combinación de pendientes longitudinales de 0,5% - 1% y pendientes transversales de 2% - 4%

Tabla 4.5 - Eficiencias por método JHU para los sumideros chilenos

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total) (l/s)	E (eficiencia %)				
			DOH simple	DOH doble	SERVIU S1	Las Condes	DOH especial
0,5	2	20	97,95	98,98	85,29	91,98	99,57
0,5	2	40	92,04	93,84	77,70	84,52	95,19
0,5	2	60	87,74	89,75	73,50	80,05	91,27
0,5	2	80	84,57	86,63	70,69	76,95	88,20
0,5	2	100	82,10	84,16	68,62	74,63	85,75
0,5	2	120	80,10	82,14	67,00	72,79	83,72
0,5	4	20	100,00	100,00	96,45	99,81	100,00
0,5	4	40	99,85	100,00	89,90	95,87	100,00
0,5	4	60	98,20	99,03	85,49	92,12	99,70
0,5	4	80	96,14	97,34	82,30	89,12	98,48
0,5	4	100	94,18	95,61	79,86	86,70	97,01
0,5	4	120	92,41	93,98	77,89	84,68	95,55
1	2	20	99,47	99,79	87,95	94,23	100,00
1	2	40	94,88	95,93	80,31	87,10	97,61
1	2	60	90,90	92,20	75,98	82,62	94,28
1	2	80	87,80	89,21	73,05	79,47	91,43
1	2	100	85,34	86,78	70,88	77,08	89,05
1	2	120	83,31	84,77	69,18	75,17	87,06

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo digital A, pestaña A.4 (CD) se puede observar todas las eficiencias obtenidas por este método para los sumideros chilenos, como también el caudal interceptado y no interceptado.

4.2.4 Eficiencia: Colorado State University (UDFCD)

Este método considera unos parámetros que depende solo de las rejillas ensayadas en el estudio (single N°13 y single N°16) en el cual la diferencia más grande entre ellas, es que la rejilla N°13 tiene barras longitudinales y transversales y el N°16 tiene barras curvas.

Se verifico la similitud de los sumideros chilenos con los ensayados en este método, igual como se hizo en el método de Federal Highway Administration.

El sumidero DOH simple, DOH doble, SERVIU S1 y Las condes es similar a la rejilla single N°13

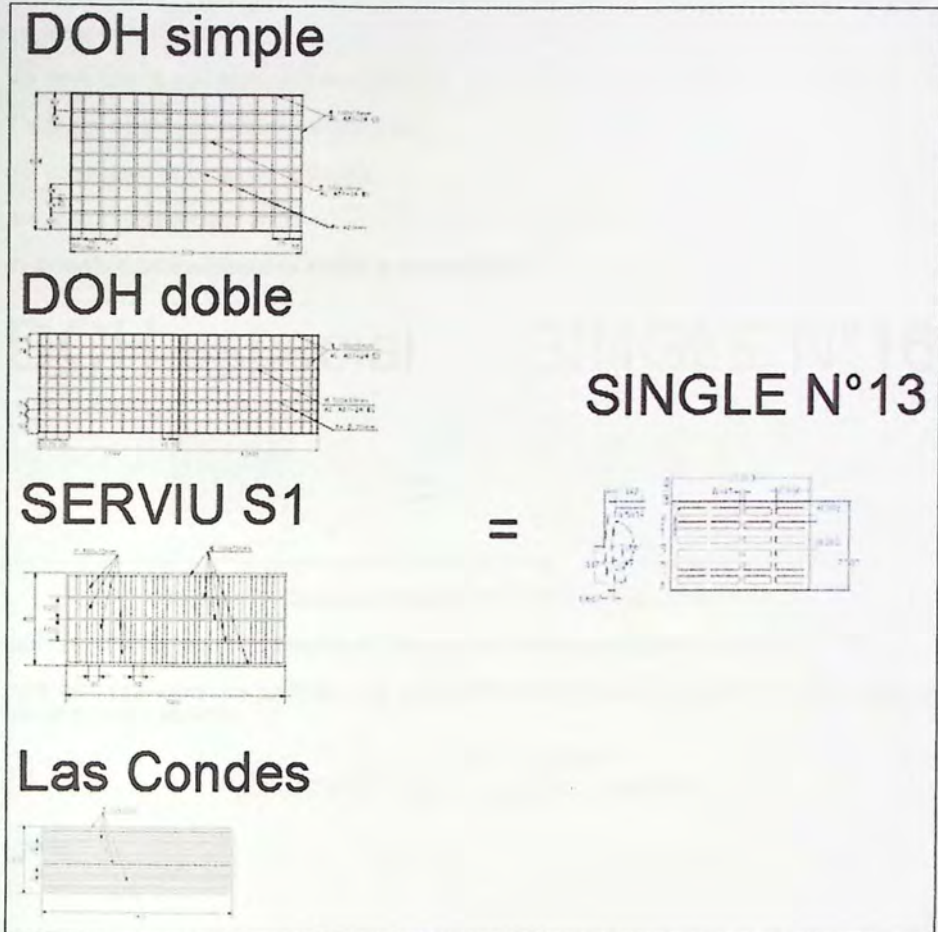


Figura 4.12 - Comparación sumidero DOH simple, DOH doble, SERVIU y Las Condes con Single N°13

Con esto se puede concluir que los parámetros a utilizar para los sumideros DOH simple, DOH doble, SERVIU S1, Las Condes y así también para obtener la eficiencia son:

$$E = 0,063 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,665} \left(\frac{V^2 T}{gA}\right)^{0,835} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-1,138} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

E = eficiencia

y = altura de escurrimiento aguas arriba (m)

L = largo de la reja (m)

V = velocidad de flujo aguas arriba (m/s)

T = ancho de escurrimiento superficial (m)

g = aceleración de gravedad (9,8 m/s²)

A = área mojada del flujo (m²)

El sumidero DOH especial es similar a la rejilla N°16

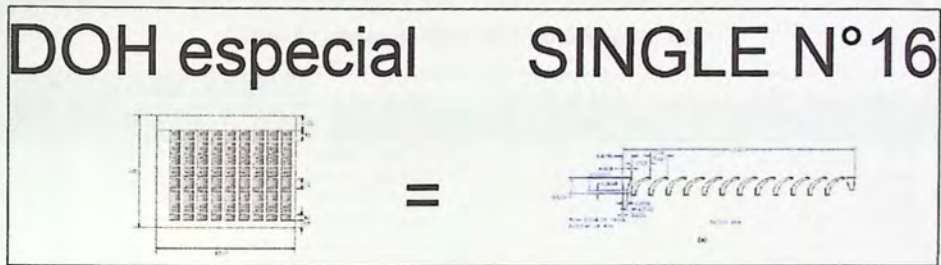


Figura 4.13 - Comparación sumidero DOH especial con Single N°16

DOH especial es único sumidero que se presenta con barras curvas igual que el single N°16

Para esto se tomaron los parámetros de single N°16 para calcular la eficiencia de DOH especial con la siguiente ecuación:

$$E=0,095 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,573} \left(\frac{V^2 T}{gA}\right)^{0,756} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-0,920} \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

E = eficiencia

y = altura de escurrimiento aguas arriba (m)

L = largo de la reja (m)

V = velocidad de flujo aguas arriba (m/s)

T = ancho de escurrimiento superficial (m)

g = aceleración de gravedad (9,8 m/s²)

A = área mojada del flujo (m²)

Se observa en la tabla 4.4, los parámetros adoptados para los sumideros ensayados en Chile

Tabla 4.6 - Parámetros a,b,c y d para sumideros chilenos

Sumidero		Parámetros			
		a	b	c	d
sumidero 1	DOH simple	0,063	0,665	0,835	-1,138
sumidero 2	DOH doble	0,063	0,665	0,835	-1,138
sumidero 3	SERVIU S1	0,063	0,665	0,835	-1,138
sumidero 4	Las Condes	0,063	0,665	0,835	-1,138
sumidero 5	DOH especial	0,095	0,573	0,756	-0,92

Fuente: Elaboración propia

Se muestra la tabla 4.5, las eficiencias obtenidas pero con las cuales cumplían con las pendientes longitudinales (0,5%) y transversales (1% y 2%) en el cual fue ensayado este método.

Tabla 4.7 - Resumen Eficiencias metodología UDFCD

SL	ST	Qc									
(pend. Long)	(pend. Transv.)	(caudal total)	h	T	Area	V	E (eficiencia %)				
%	%	(l/s)	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)	sumidero 1	sumidero 2	sumidero 3	sumidero 4	sumidero 5
0.5	1	20	0.0140	1.40	0.0097	2.05	29.99	41.62	29.99	35.16	40.25
0.5	1	40	0.0181	1.81	0.0164	2.44	25.63	35.85	25.83	30.29	36.26
0.5	1	60	0.0211	2.11	0.0222	2.70	23.67	32.86	23.67	27.76	34.12
0.5	1	80	0.0235	2.35	0.0275	2.91	22.25	30.88	22.25	26.09	32.67
0.5	1	100	0.0255	2.55	0.0325	3.07	21.21	29.44	21.21	24.87	31.59
0.5	1	120	0.0273	2.73	0.0373	3.22	20.39	28.30	20.39	23.91	30.73
0.5	2	20	0.0181	0.90	0.0082	2.44	25.83	35.85	25.83	30.29	36.26
0.5	2	40	0.0235	1.17	0.0138	2.91	22.25	30.88	22.25	26.09	32.67
0.5	2	60	0.0273	1.37	0.0187	3.22	20.39	28.30	20.39	23.91	30.73
0.5	2	80	0.0304	1.52	0.0232	3.46	19.17	26.60	19.17	22.47	29.43
0.5	2	100	0.0331	1.65	0.0274	3.65	18.27	25.36	18.27	21.42	28.46
0.5	2	120	0.0354	1.77	0.0314	3.82	17.56	24.38	17.56	20.60	27.69

Fuente: Elaboración propia

En anexo digital A, pestaña A.5 (CD) se encontraran las eficiencias de todos los sumideros ensayados en Chile por este método.

4.2.5 Eficiencia: Wallingford (UK)

Este método fue estudiado en el Reino Unido, el cual mediante un total de 24 rejillas se obtuvieron las eficiencias variando el ancho de escurrimiento del agua, pendientes longitudinales y transversales. El estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña se basa en este método, ya que obtiene parámetros similares que dependen del número de barras que tiene la rejilla a estudiar.

Ya que este estudio obtiene unos k_{B1} y k_{B2} según las rejillas ensayadas, también realiza una acotación cuando se quiere emplear este método para otro tipos de sumideros no ensayados, el cual mediante un coeficiente C_b , que depende de la disposición de las barras en las rejillas.

Tabla 4.8 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras

patrón de barras de rejilla	C_b
Barras transversales	1,75
Barras longitudinales, diagonales o curvas	1,5

Fuente: Adaptado de [8]

Cuando hay una mezcla de patrones de barras, que ocurren en el caso de los sumideros chilenos, este coeficiente C_b menciona que hay que observar cuántos números de huecos tiene la rejilla según la orientación longitudinal, transversal, diagonal y curvas. Y así la orientación que sea mayor a la otra será el coeficiente predominante a utilizar. A continuación se explicará cómo se consideró este coeficiente C_b para los sumideros chilenos ensayados.

Sumidero DOH simple

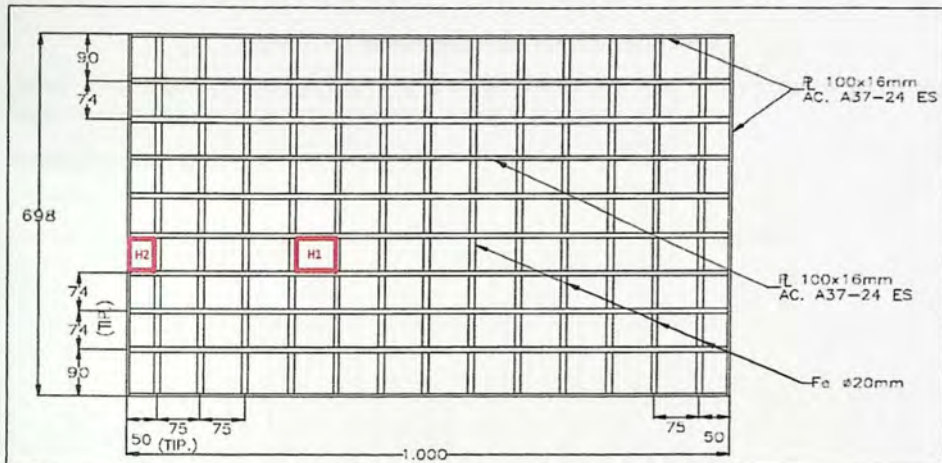


Figura 4.14 - Número de huecos sumidero DOH simple

Como se observa en la figura 4.14 hay dos tipos de huecos con distintas medidas, El tipo de hueco H1 y H2, el cual su longitud dominante es transversal, con esto se considera que el C_b para el sumidero DOH simple es 1,75.

Sumidero DOH doble

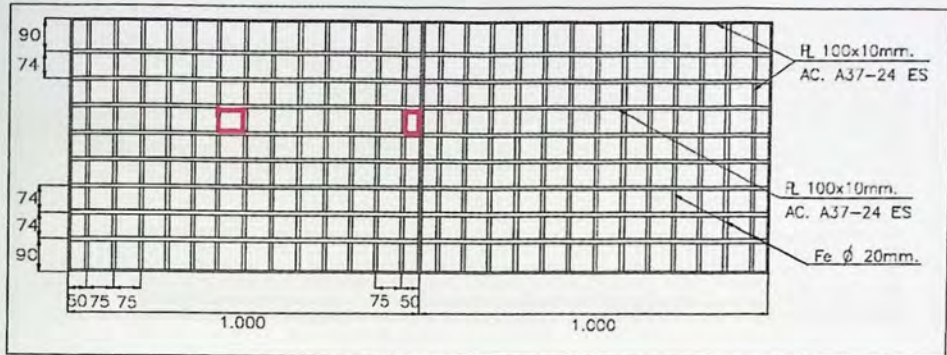


Figura 4.15 - Número de huecos sumidero DOH doble

Como el sumidero DOH doble, es igual al DOH simple solo que es el doble de largo, sus disposiciones de los huecos son iguales, con esto el C_b es igual a 1,75.

Sumidero SERVIU S1

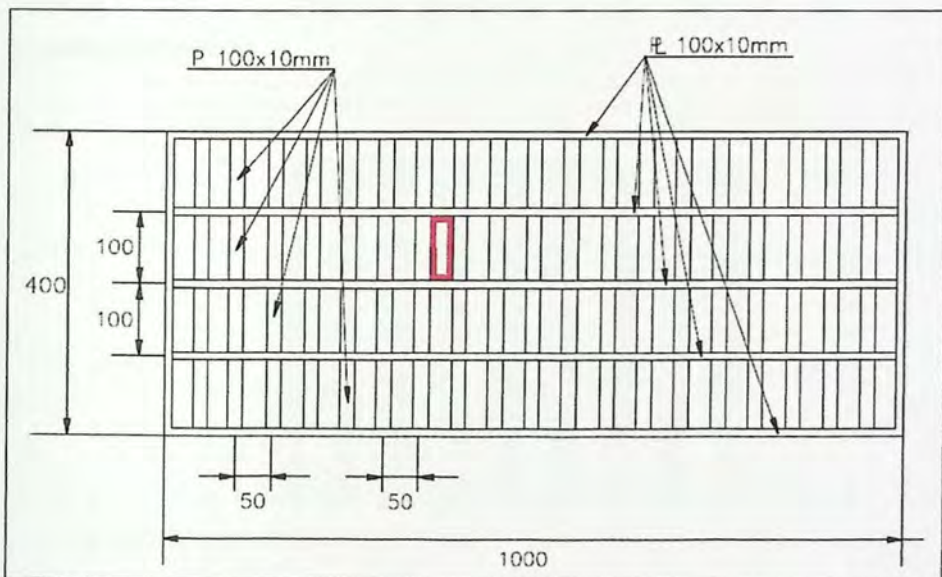


Figura 4.16 - Número de huecos sumidero SERVIU S1

Como se puede observar el sumidero SERVIU S1 posee puros huecos en sentido transversal, con lo cual el coeficiente C_b es 1,75.

Sumidero Las Condes

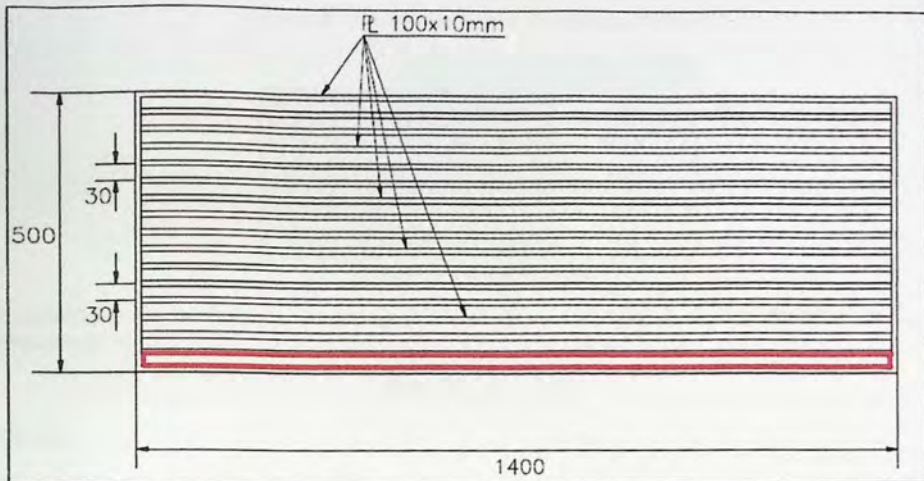


Figura 4.17 - Número de huecos sumidero Las Condes

Para el sumidero Las Condes la disposición de los huecos es en sentido longitudinal, con esto el C_b es 1,5.

Sumidero DOH especial

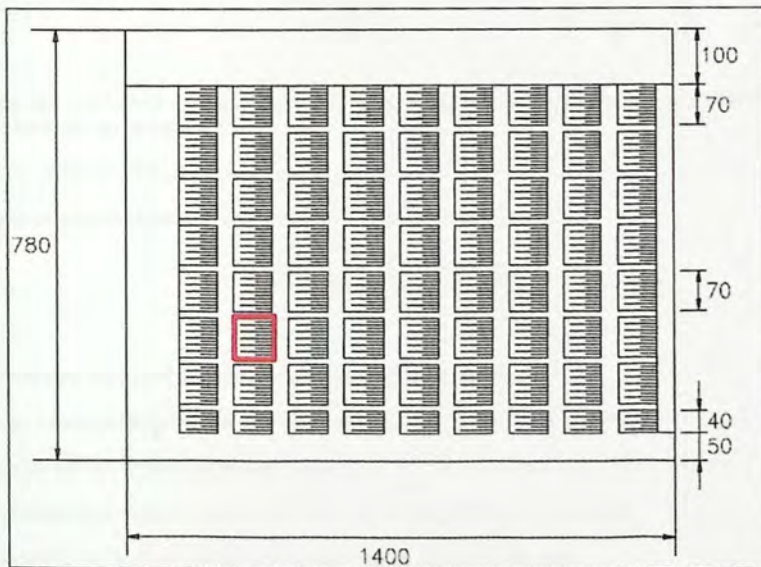


Figura 4.18 - Número de huecos sumidero DOH especial

El sumidero DOH especial, tiene sus huecos en disposición diagonal, con lo cual el C_b es 1,5.

Con esto se llega a una tabla resumen de todos los sumideros con sus respectivos C_b obtenidos.

Tabla 4.9 - Valores de C_b para sumideros chilenos

	Sumidero	C_b
sumidero 1	DOH simple	1,75
sumidero 2	DOH doble	1,75
sumidero 3	SERVIU S1	1,75
sumidero 4	Las Condes	1,5
sumidero 5	DOH especial	1,5

Fuente: Elaboración propia

Logrados estos coeficientes, se prosigue a calcular el valor de G , el cual depende de C_b y parámetro K_A

$$G = K_A * C_b \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Donde

K_A = parámetro específico de la rejilla

C_b = coeficiente global para un patrón de barras particular de acuerdo con los valores contenidos en la tabla 4.7

K_A se obtiene de la siguiente ecuación:

$$K_A = \frac{69}{A_g^{0,75} \cdot \sqrt{p}} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde:

A_g = área del rectángulo más pequeño que tiene lados paralelos a la acera que puede contener todas las ranuras de la rejilla (m^2)

p = relación entre el área de vacío y A_g (%)

Y con esto se puede llegar a la eficiencia de los sumideros:

$$E = 102,7 - G \frac{Q}{y} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Donde

E = la eficiencia hidráulica (expresada en porcentaje $E \leq 100\%$)

Q = caudal total que se aproxima a la rejilla (m^3/s)

y = profundidad del agua en la acera (m)

G = coeficiente que depende de las características geométricas de la rejilla

Reemplazando los parámetros en la ecuación de la eficiencia se tiene:

$$E=102.7-\left(\left(\frac{69}{A_g^{0.75}\sqrt{P}}\right)*C_b*\frac{Q}{y}\right) \text{ (Ec. 4.5)}$$

A continuación se puede observar en la tabla 4.8 con la eficiencia del sumidero SERVIU S1, ya que era el único que cumplía con el ancho del sumidero con lo cual fue ensayado este método (200 a 400 mm), y a su vez las pendientes longitudinales (0,5% y 1%), pendiente transversal (2%) y ancho de escurrimiento (0,5 m a 1,5 m) con lo cual fue realizado este método bajo esas condiciones.

Tabla 4.10 - Eficiencia SERVIU S1 por metodología Wallingford

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	T	Eficiencia (%)
%	%	(l/s)	(m)	SERVIU S1
0,5	2	20	0,90	68,87
0,5	2	40	1,17	50,53
0,5	2	60	1,37	35,49
1	2	20	0,79	64,18
1	2	40	1,03	43,29
1	2	60	1,20	26,16
1	2	80	1,34	11,08
1	2	100	1,45	0,00

Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital A, pestaña A.6 (CD) se puede visualizar las eficiencias para todos los sumideros chilenos con todas las combinaciones de caudales, pendientes longitudinales y transversales.

4.2.6 Análisis y Comparación de eficiencias entre INH y las distintas metodologías.

Ya obtenidas todas las eficiencias mediante todas las metodologías mencionadas anteriormente, bajo las distintas condiciones, se realiza tablas de comparación entre ellas y gráficos para los distintos sumideros chilenos.

Se analiza en detalle el sumidero DOH simple, los demás sumideros siguen casi el mismo patrón de análisis que este.

Sumidero DOH simple

En la siguiente tabla con pendiente longitudinal 0,1% y transversal 1%, variando el caudal que escurre por la calle, se puede visualizar las distintas eficiencias para el sumidero DOH simple y su diferencia entre el estudio INH con otras metodologías.

Tabla 4.11 - Diferencias entre las metodologías (SL: 0,1%; Sr: 1%)

SL (pend Long)	ST (pend Transv.)	Qc (caudal total)	Eficiencia										
			sumidero 1 (DOH simple)										
			INH-DOH	UPC	DV	SAU	DV	SAFTD	DV	DV	DV	DV	
0,1	1	20	68,80	59,40	-13,66	73,59	6,96	81,32	18,20	41,07	-40,31	77,82	13,11
0,1	1	40	55,50	46,29	-16,59	62,05	11,81	73,94	33,22	35,38	-36,26	64,33	15,91
0,1	1	60	49,30	40,01	-18,84	55,56	12,69	69,97	41,93	32,42	-34,24	53,26	8,04
0,1	1	80	45,10	36,14	-19,87	51,16	13,43	67,36	49,35	30,47	-32,43	43,53	-3,49
0,1	1	100	41,10	33,62	-18,19	47,89	16,52	65,45	59,24	29,04	-29,34	34,67	-15,64
0,1	1	120	39,70	31,78	-19,95	45,32	14,16	63,96	61,12	27,93	-29,66	26,46	-33,36

UPC: su diferencia es negativa, esto considera que es baja en comparación a los obtenidos en INH, aunque esta diferencia es relativamente constante y aumenta cuando el caudal es mayor.

FHWA: las diferencias son positivas, esto quiere decir que son mayores las eficiencias comparadas al INH, para un caudal de 20 l/s su diferencia no es tan grande, pero al aumentar el caudal, inmediatamente la diferencia aumenta aunque después aumenta en forma constante.

JHU: sus diferencias son positivas, pero se observar que son mucho más mayores sus eficiencias en comparación con INH. Su diferencia aumenta en forma drástica a mayor caudal, siendo así que su diferencia puede llegar hacer un 50% mayor al INH.

UDFCD: diferencias negativas, estas eficiencias son mucho menores a las INH, pero aumentando el caudal, las diferencias se vuelve menor, aunque no tan considerable.

Wallingford: sus diferencias son variables, pueden ser mayores a caudales relativamente pequeños pero aumentando el caudal las eficiencias disminuyen.

Al aumentar la pendiente longitudinal (3%) y transversal (2%) variando los caudales se puede visualizar drásticos cambios en las eficiencias. Tabla 4.10

Tabla 4.12 - Diferencias de eficiencias entre las metodologías

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total) (l/s)	Eficiencia											
			sumidero 1 (DOH simple)											
			INH	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC	UPC
3	2	20	81.80	47.79	-41.57	17.87	-78.15	100.00	22.25	18.20	-77.75	66.40	-18.83	
3	2	40	73.00	37.25	-48.98	0.01	-99.99	98.65	35.13	15.68	-78.52	46.72	-36.01	
3	2	60	69.20	32.19	-53.48	0.03	-99.96	95.73	38.34	14.37	-79.24	30.57	-55.82	
3	2	80	65.70	29.03	-55.82	0.05	-99.93	93.05	41.63	13.51	-79.44	16.36	-75.10	
3	2	100	61.50	26.79	-56.44	0.06	-99.90	90.76	47.57	12.87	-79.07	3.44	-94.41	
3	2	120	57.20	25.09	-56.14	0.07	-99.87	88.79	55.23	12.38	-78.35	0.00	-100.00	

Fuente: Elaboración propia

UPC: las eficiencias son mucho menores variando la pendiente longitudinal y transversal en comparación a INH, incluso están dentro un rango del 50% de diferencias.

FHWA: En este caso, las eficiencias de FHWA con casi nulas, esto se debe a que esta metodología considera un parámetro de velocidad de salpicadura solo para los sumideros ensayados en este estudio, al tener valores de velocidad que escurre por la calle muy altas, que depende las geometría de la calle y el caudal que escurre por ella, el R_r , que depende de estas dos velocidades, se vuelve cero y con esto la eficiencias se vuelve casi nula.

JHU: las eficiencias siguen siendo muy altas en comparación INH por este método. Quizás se debe a que este método considera un largo teórico, el cual se vuelve cero cuando el ancho de escurrimiento es menor al ancho del sumidero, con esto el caudal captado es casi todo interceptado por el sumidero, y las eficiencias se vuelven mayores.

UDFCD: aquí las eficiencias siguen siendo menores, pero ahora sus diferencias llegan hacer casi de un 80% con las del estudio INH. Esto se debe a que este método obtiene unos parámetros exclusivos para los sumideros ensayados en este.

Wallingford: Ahora las eficiencias se vuelve toda menores, incluso disminuyen de una forma drástica.

En Anexo digital A, pestaña A.7 (CD) se puede observar todas las comparaciones de los sumideros chilenos con las diferentes metodologías.

A continuación se puede visualizar estos mismos análisis mediante gráficos comparando las eficiencias de INH con las otras metodologías para el sumidero DOH simple para distintas condiciones de caudales, pendientes longitudinal y transversal.

Cabe destacar que existe una línea de 45° en los gráficos, esta se debe a que en una forma ideal, todas las eficiencias deberían situarse en esa línea comparándose con el estudio INH.

UPC v/s INH

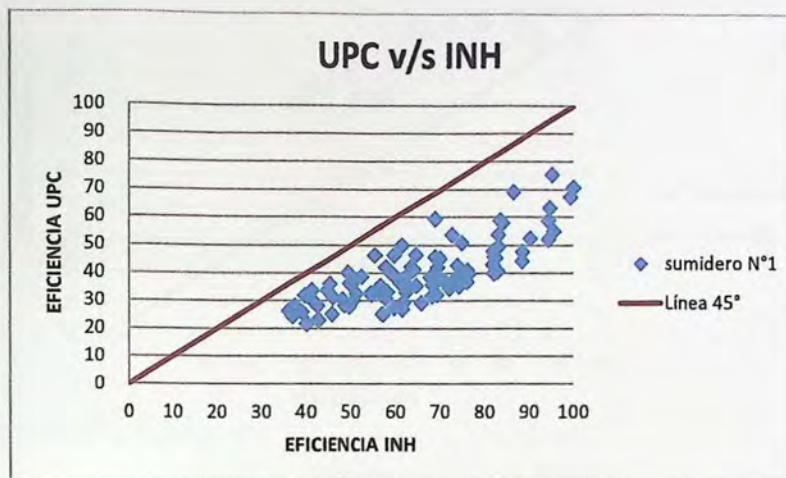


Figura 4.19 - Comparación eficiencias UPC v/s INH

Aquí se puede visualizar de forma clara que las eficiencias por el método UPC son muchos menores para las distintas condiciones aunque no se encuentran tan dispersas entre ellas.

FHWA v/s INH

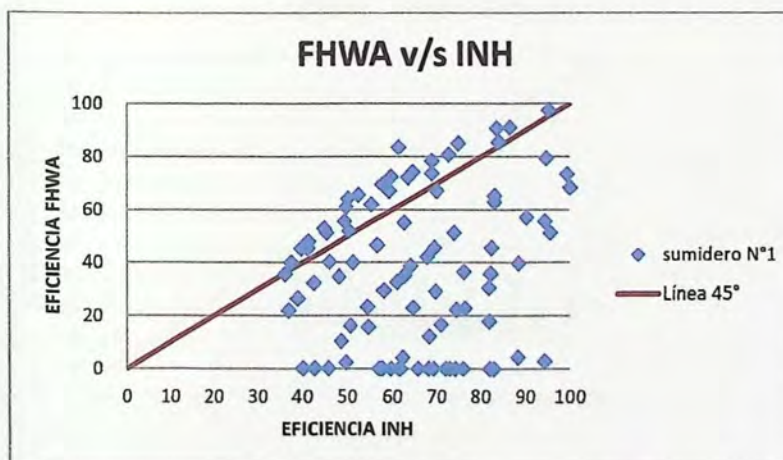


Figura 4.20 - Comparación eficiencias FHWA v/s INH

Se encuentra una gran dispersión por este método en las eficiencias, algunas solo mayores a la INH, pero otras, incluso llegar a hacer nulas, no tienden a hacer constantes.

JHU v/s INH

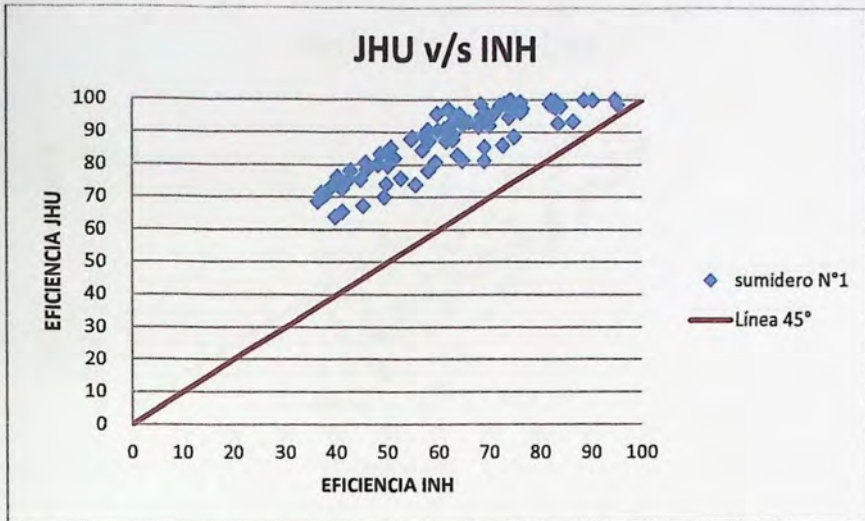


Figura 4.21 - Comparación eficiencias JHU v/s INH

Las eficiencias son muy mayores a INH, entre el 80% y 100%, no tienden a dispersarse tanto entre ellas.

UDFCD v/s INH

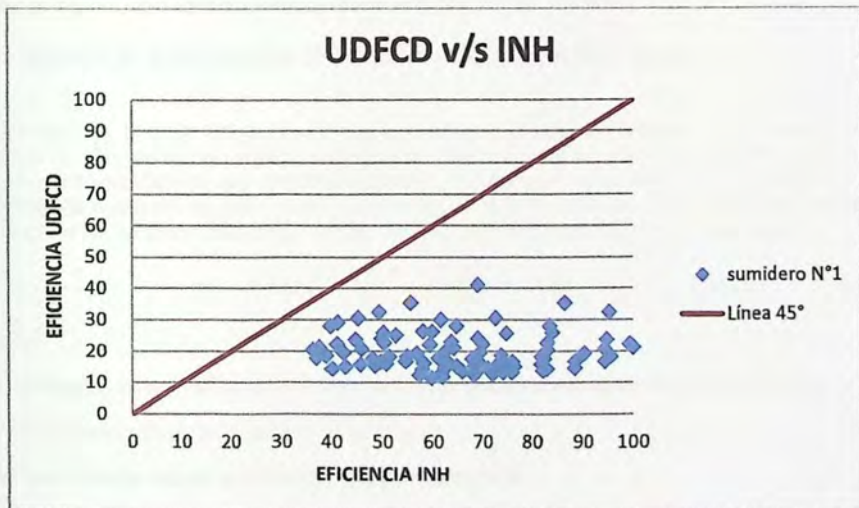


Figura 4.22 - Comparación eficiencias UDFCD v/s INH

Las eficiencias son mucho menores, se sitúan entre un 10% y 40%, no hay mucha dispersión entre ellas bajo las distintas condiciones.

Wallingford v/s INH

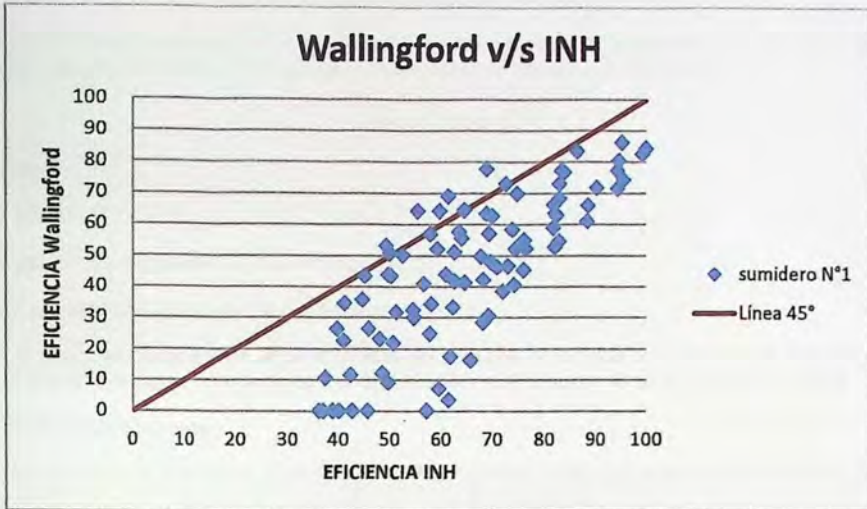


Figura 4.23 - Comparación eficiencias Wallingford v/s INH

Existe una clara dispersión de las eficiencias por este método, desde un 0% a un 90%, no siguen una tendencia, aunque si algunas eficiencias se sitúan casi en la misma línea de tendencias, pero son las menores.

En el Anexo digital A, desde la pestaña A.8 a la A.12 (CD), se encuentran las representaciones graficas de las comparaciones de las diversas metodologías con INH.

4.3 Mismos sumideros INH, diferentes condiciones.

El Manual de Drenaje Urbano menciona que antes distintas condiciones, no ensayadas por el estudio de INH, en el caso específicamente que sean mayores caudales, pendientes longitudinales y transversales. Obtiene una variable explicativa, considerada como velocidad característica, está se basa en el estudio de John Hopkins University, la cual depende de la geometría del sumidero y de la calle específicamente, como también del caudal y velocidad que escurre por esta.

$$C = V \cdot \frac{Z}{L} \cdot \left(y - \frac{W}{Z} \right) \quad \text{si } W < hZ \text{ (Ec. 4.6)}$$

Donde:

C = velocidad característica del sumidero que se empleará como variable explicativa (m/s)

V = velocidad del flujo de la calzada (m/s)

Q = caudal en la calzada en la sección del sumidero (m³/s)

Z = inverso de la pendiente transversal de la calzada, adimensional.

L = longitud del sumidero (m)

W = ancho del sumidero (m)

y = altura de agua en la sección transversal junto a la solera (m)

Así se encontró la relación entre la eficiencia y esta velocidad característica, que es una ecuación del tipo potencial, similar al estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña.

$$E = a \cdot C^b \quad (\text{Ec. 4.7})$$

Donde

E = eficiencia

C = velocidad característica del sumidero (m/s)

a, b = parámetros que depende del sumidero.

Estos parámetros de a y b fueron obtenidos para 3 tipos de sumideros, DOH simple, DOH doble y SERVIU S1 mediante curvas del tipo potencial entre la eficiencia y la velocidad característica.

Sumidero DOH simple

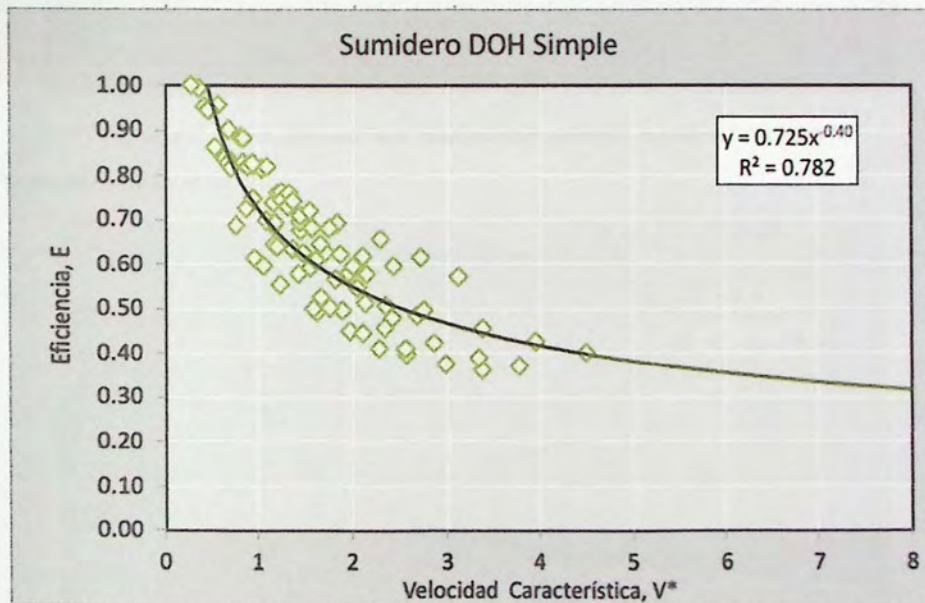


Figura 4.24 – Curva potencial de la velocidad característica, sumidero DOH simple [1]

Sumidero DOH doble

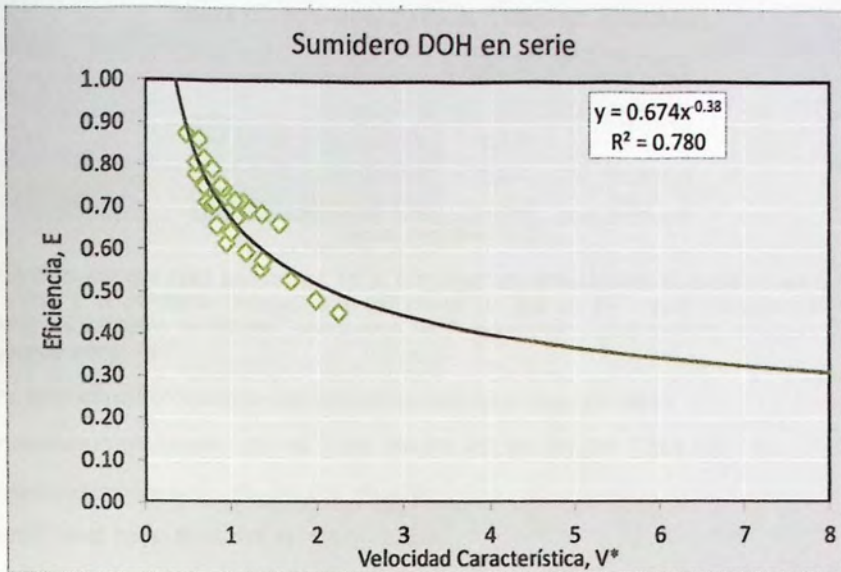


Figura 4.25 - Curva potencial de la velocidad característica, sumidero DOH doble [1]

Sumidero SERVIU S1

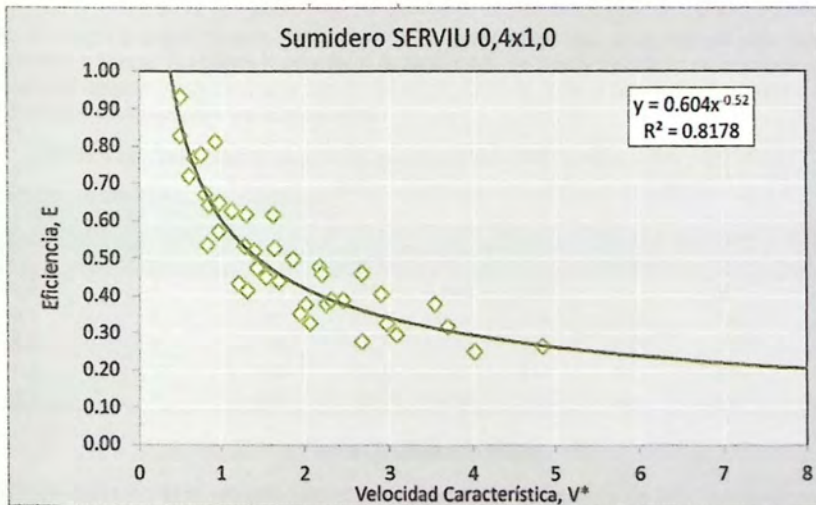


Figura 4.26 - Curva potencial de la velocidad característica, sumidero SERVIU S1 [1]

Así para estos 3 sumideros ensayados, los parámetros a y b son:

Tabla 4.13 – Parámetros a y b para la velocidad característica

	Sumidero	parámetros (manual)	
		a	b
sumidero 1	DOH simple	0,725	-0,4
sumidero 2	DOH doble	0,674	-0,38
sumidero 3	SERVIU S1	0,604	-0,52

Fuente: Adaptado de [1]

Cabe destacar que estos parámetros, serán con mayor eficiencia cuando el caudal no sea mayor a un 20% y la pendiente longitudinal y transversal no sea un 5% mayor, considerando como referencia los datos del Estudio Experimental del Funcionamiento de Sumideros de Aguas Lluvias realizado por el INH

Para este estudio comparativo, las distintas condiciones a considerar serán

Pendientes longitudinales: 0,0001%, 0,5%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 9%, 10% y 13%.

Pendientes transversales: 1%, 2%, 3%, 4% y 6%.

Caudal Total: 20 l/s, 50 l/s, 100 l/s, 150 l/s, 200 l/s.

Se tomaron en cuenta estas condiciones, ya que son una acumulación de todas condiciones ensayadas por las distintas metodologías extranjeras.

4.3.1 Eficiencia: Manual de Drenaje

Como se explicó anteriormente, se obtiene unos parámetros que dependen de una velocidad característica la cual se obtiene mediante la ecuación 4.6. Se puede visualizar en la siguiente tabla la velocidad característica para una pendiente longitudinal de 0,5% y pendiente transversal de 1% ante distintos caudales para los 3 sumideros.

Tabla 4.14 – Velocidad característica para sumideros DOH simple, doble y SERVIU S1

SL	ST	Qc	c (velocidad característica)					
(pend. Long)	(pend. Transv.)	(caudal total)	Z	h	v	sumidero 1	sumidero 2	sumidero 3
%	%	(l/s)	(1/ST)	(m)	(m/s)			
0.5	1	20	100.0	0.0140	2.05	1.43	0.71	2.04
0.5	1	50	100.0	0.0197	2.58	3.27	1.64	4.05
0.5	1	100	100.0	0.0255	3.07	5.69	2.84	6.61
0.5	1	150	100.0	0.0297	3.40	7.72	3.86	8.74
0.5	1	200	100.0	0.0331	3.65	9.53	4.77	10.63

Fuente: Elaboración propia

Ya que la obtención de la velocidad característica, se basa del método de JHU, existe de nuevo la restricción de que el ancho de escurrimiento no debe ser menor al ancho del sumidero, cuando esto ocurre, la velocidad característica tomara un valor de 0, y por consecuencia la eficiencia será de un 100% en estos casos.

Obtenida esta velocidad característica se calculará la eficiencia con los parámetros a y b (tabla 4.11) con la ecuación antes mencionada.

Tabla 4.15 – Eficiencia según Manual de Drenaje Urbano

SL	ST	Qc	Eficiencia parametros manual (%)		
(pend. Long)	(pend. Transv.)	(caudal total)	sumidero 1	sumidero 2	sumidero 3
%	%	(l/s)			
0,5	1	20	62,86	76,59	41,64
0,5	1	50	45,11	55,89	29,19
0,5	1	100	36,17	45,31	22,62
0,5	1	150	32,01	40,34	19,56

Fuente: Elaboración propia

En anexo digital B, pestaña B.6 (CD) se puede visualizar las eficiencias para todos los sumideros bajo las condiciones de caudal, pendientes longitudinales y transversales antes mencionados para este estudio comparativo.

4.3.2 Eficiencia: Distintas Metodologías

Como se explica, en este mismo capítulo, la obtención de las eficiencias por las distintas metodologías con las mismas condiciones ensayadas por INH. Se realiza el mismo análisis para cada metodología siguiendo las mismas secuencias de cálculos para unas condiciones distintas, las cuales son:

Pendientes longitudinales: 0,0001%, 0,5%, 1%, 2%, 4%, 6%, 8%, 9%, 10% y 13%.

Pendientes transversales: 1%, 2%, 3%, 4% y 6%.

Caudal Total: 20 l/s, 50 l/s, 100 l/s, 150 l/s, 200 l/s.

A continuación se puede visualizar las siguientes tablas resumen de las eficiencias alcanzadas por los distintos métodos para los 5 sumideros con una combinación de pendiente longitudinal de 0,0001% - 13% y pendiente transversal 4% - 6%

Tabla 4.16 – Eficiencia por método UPC para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)				
			DOH simple	DOH doble	SERVIU S1	Las Condes	DOH especial
%	%	(l/s)					
13	6	20	51,71	64,14	36,46	59,64	47,99
13	6	50	37,19	44,16	24,18	39,99	35,10
13	6	100	28,99	33,30	17,72	29,56	27,71
13	6	150	25,05	28,23	14,77	24,76	24,13
13	6	200	22,59	25,11	12,98	21,84	21,87
0,0001	4	20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	100	99,44	100,00	82,38	100,00	89,24
0,0001	4	150	86,59	100,00	69,33	100,00	78,26
0,0001	4	200	78,41	100,00	61,26	98,79	71,23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.17 - Eficiencia por método FHWA para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)				
			%	%	(l/s)	DOH simple	DOH doble
13	6	20	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
13	6	50	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
13	6	100	0,00	100,00	0,00	100,00	0,00
13	6	150	0,00	100,00	0,01	99,97	0,00
13	6	200	0,00	100,00	0,02	99,41	0,00
0,0001	4	20	97,94	99,57	97,11	98,77	98,18
0,0001	4	50	96,15	99,18	95,17	97,86	96,45
0,0001	4	100	94,18	98,73	93,11	96,85	94,52
0,0001	4	150	92,74	98,40	91,62	96,10	93,08
0,0001	4	200	91,56	98,12	90,41	95,49	91,92

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.18 - Eficiencia por método JHU para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)				
			%	%	(l/s)	DOH simple	DOH doble
13	6	20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13	6	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13	6	100	100,00	100,00	99,34	100,00	100,00
13	6	150	100,00	100,00	96,89	99,90	100,00
13	6	200	100,00	100,00	94,41	98,91	100,00
0,0001	4	20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	50	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	150	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,0001	4	200	99,58	100,00	98,30	100,00	99,97

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.19 - Eficiencia por método UDFCD para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)				
			%	%	(l/s)	DOH simple	DOH doble
13	6	20	10,79	14,98	10,79	12,65	23,02
13	6	50	8,86	12,29	8,86	10,39	20,05
13	6	100	7,63	10,59	7,63	8,95	18,06
13	6	150	6,99	9,71	6,99	8,20	16,99
13	6	200	6,57	9,12	6,57	7,71	16,27
0,0001	4	20	100,00	100,00	100,00	100,00	69,53
0,0001	4	50	96,47	100,00	96,47	100,00	60,57
0,0001	4	100	83,10	100,00	83,10	97,43	54,56
0,0001	4	150	76,15	100,00	76,15	89,29	51,33
0,0001	4	200	71,58	99,35	71,58	83,93	49,15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.20 - Eficiencia por método Wallingford para los mismos sumideros INH pero diferentes condiciones

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)							
			%	%	(l/s)	DOH simple	DOH doble	SERVIU S1	Las Condes	DOH especial
13	6	20				71,05	84,44	61,43	79,30	74,76
13	6	50				46,58	70,32	29,53	61,21	53,17
13	6	100				16,15	52,77	0,00	38,72	26,31
13	6	150				0,00	38,37	0,00	20,27	4,28
13	6	200				0,00	25,70	0,00	4,03	0,00
0,0001	4	20				98,65	100,00	97,42	99,71	99,12
0,0001	4	50				95,52	98,56	93,33	97,39	96,36
0,0001	4	100				91,62	96,31	88,26	94,51	92,92
0,0001	4	150				88,43	94,47	84,09	92,15	90,10
0,0001	4	200				85,62	92,84	80,43	90,07	87,62

Fuente: Elaboración propia

Con esto se realizó 230 combinaciones bajo estas condiciones para los cinco sumideros ensayados por INH. Anexo digital B, desde la pestaña B.1 a la B.5 (CD) se puede observar todas estas eficiencias bajo las distintas metodologías.

4.3.3 Análisis y Comparación de Eficiencias

Se realiza el mismo análisis y comparación de las eficiencias que en el punto 4.2.6 en este mismo capítulo, obteniendo unos gráficos entre la eficiencia de la metodología correspondiente y la eficiencia que se realiza mediante el cálculo que menciona el Manual de Drenaje Urbano con la velocidad característica.

Bajo distintas condiciones ensayadas, las eficiencias no varían, con lo cual los gráficos, tienden a la misma directriz como se observaron anteriormente. En anexo digital B, desde la pestaña B.10 a la B.12 (CD) se puede observar todos los gráficos de comparación para los sumideros SERVIU S1, DOH doble y simple.

Además se realizó gráficos que interpretan el caudal captado versus el caudal de aproximación de la calle, bajo distintas condiciones de pendientes longitudinales y transversales, comparándolo entre las distintas metodologías más lo que se menciona en el Manual de Drenaje Urbano.

Esta comparación grafica se realizó para los sumideros DOH simple, DOH doble y SERVIU S1.

Se puede visualizar un ejemplo de la interpretación para el sumidero DOH simple con una pendiente longitudinal igual a 0,5% y transversal 1%

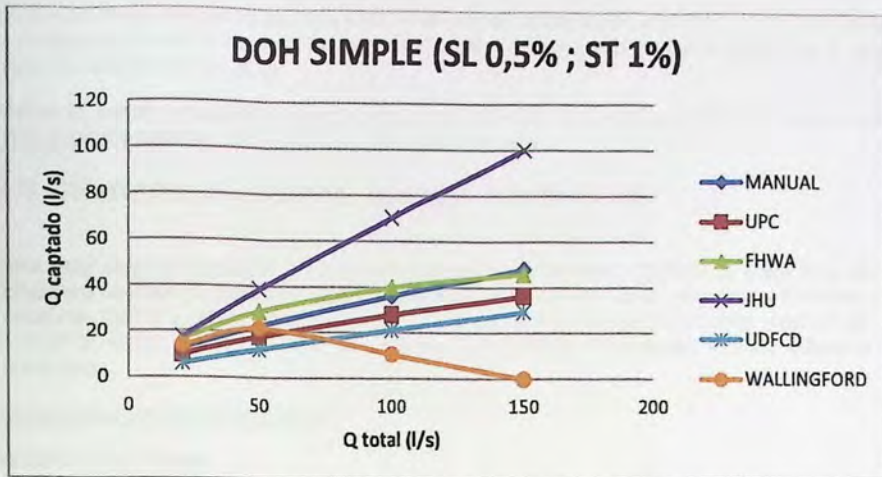


Figura 4.27 – Comparación Q captado v/s Q total, DOH simple

En este gráfico, se puede interpretar que para las metodologías UPC, FHWA y UDFCD siguen una misma tendencia que el caudal captado obtenido por la metodología del Manual de Drenaje Urbano, como se analizó anteriormente, para JHU las eficiencias son mayores, por ende los caudales captados serán igual de altos, pero siguen una tendencia pareja. En el caso del método de Wallingford se observa que llega a un peak de caudal captado y después disminuye, incluso llega hasta un 0 caudal captado, esto quiere decir que el sumidero no capta nada de agua y su eficiencia es 0.

Otro ejemplo es para un sumidero SERVIU S1 con pendiente longitudinal 2% y transversal 4%.

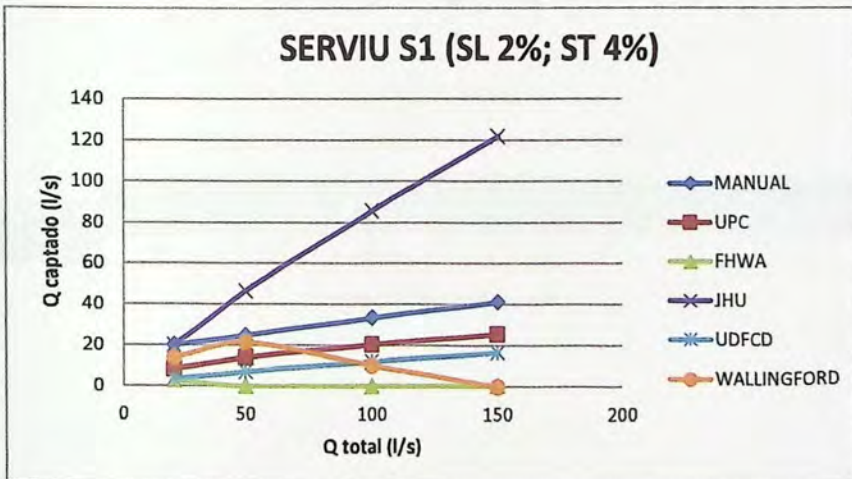


Figura 4.28 - Comparación Q captado v/s Q total, SERVIU S1

Aumentando la pendiente longitudinal y transversal, el caudal captado empieza a disminuir para las metodologías aunque el estudio JHU sigue una tendencia alta con respecto al caudal captado.

FHWA no tiene casi caudal captado y por ende una eficiencia similar a 0. UPC y UDFCD mantiene la misma tendencia que la metodología del Manual. Wallingford disminuye bruscamente el caudal captado después de los 20 l/s.

Anexo B, desde la pestaña B.7 a la B.9 se puede observar la comparación entre Q captado v/s Q total, para los sumideros SERVIU S1, DOH simple y doble.

4.4 Diferentes sumideros, mismas condiciones

Para esta etapa se evaluaron 2 sumideros chilenos no ensayados, SERVIU S2 y S3. A su vez se consideró también un sumidero español ensayado en el estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña, tipo 9 y un sumidero del ensayo de Federal Highway Administration, rejilla P-30. Se evaluarán estos sumideros bajo las mismas condiciones del estudio Instituto Nacional de Hidráulica.

Características de los sumideros

SERVIU S2 (Chileno)

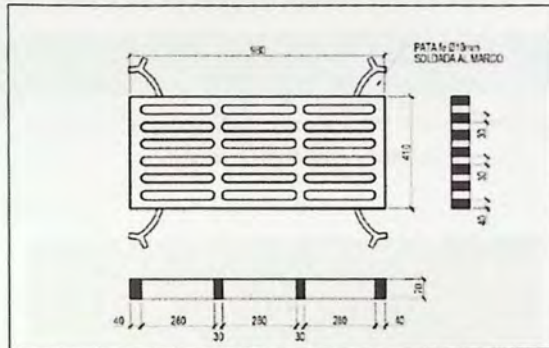


Figura 4.29 – SERVIU S2

Tabla 4.21 – Características geométricas, SERVIU S2

Sumidero	Largo L (cm)	Ancho W (cm)	Ag (m ²)	AH m ²	barra long. nl	barra transv nt	barra diag nd
SERVIU S2	98	41	0.30	0.1512	5	2	0

Fuente: Elaboración propia

SERVIU S3 (Chileno)



Figura 4.30 – SERVIU S3

Tabla 4.22 - Características geométricas, SERVIU S3

	Largo	Ancho	Ag	AH	barra long	barra transv	barra diag
Sumidero	L (cm)	W (cm)	(m2)	m2	nl	nt	nd
SERVIU S3	67	41	0,19	0,1008	5	1	0

Fuente: Elaboración propia

Rejilla tipo 9 (Español)



Figura 4.31 – Rejilla tipo 9

Tabla 4.23 - Características geométricas, tipo 9

	Largo	Ancho	Ag	AH	barra long	barra transv	barra diag
Sumidero	L (cm)	W (cm)	(m2)	m2	nl	nt	nd
Type 9	100	50	0,5	0,2012	1	3	21

Fuente: Elaboración propia

Rejilla P-30 (EEUU)

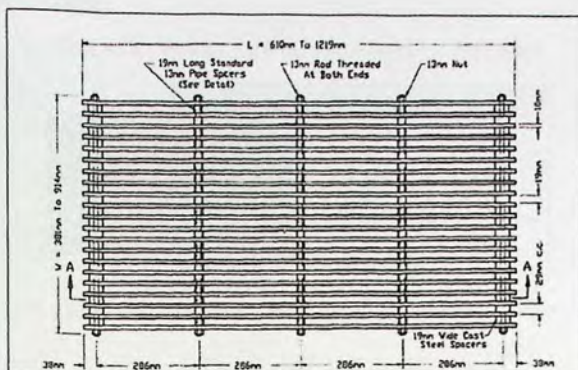


Figura 4.32 – Rejilla P-30

Tabla 4.24 - Características geométricas, P-30

	Largo	Ancho	Ag	AH	barra long.	barra transv	barra diag
Sumidero	L (cm)	W (cm)	(m ²)	m ²	nl	nt	nd
P-30 grate	122	50,9	0,58	0,39	19	3	0

Fuente: Elaboración propia

4.4.1 Eficiencia: Método Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

La obtención y cálculos de esta eficiencia por este método fueron explicadas en el punto 4.2.1, se sigue el mismo curso, la única diferencia que los parámetros A y B se calculan nuevamente, ya que son distintos sumideros

$$A = \frac{1.988 \cdot A_g^{0.403}}{p^{0.190} \cdot (n_l + 1)^{0.088} \cdot (n_t + 1)^{0.012} \cdot (n_d + 1)^{0.082}} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

$$B = 1.346 \cdot \frac{L^{0.179}}{W^{0.394}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

p = porcentaje de área de huecos respecto al área que los engloba a todos ($p = A_{\text{huecos}}/A_g$)

n_t = número de barras transversales

n_l = número de barras longitudinales

n_d = número de barras diagonales

L = largo de la reja (cm)

W = ancho de la reja (cm)

A_g = área del mínimo rectángulo que engloba todos los huecos (m²),

A continuación se adjunta la tabla 4.18, la cual muestra los parámetros A y B para los sumideros mencionados anteriormente.

Tabla 4.25 - Valores A y B para sumideros no ensayados

	Sumidero	B	A
ESPAÑOL	TYPE 9	0,657	0,508
EEUU	P-30 GRATE	0,676	0,612
Chileno	SERVIU S2	0,708	0,513
Chileno	SERVIU S3	0,661	0,447

Fuente: Elaboración propia

Con este se realiza el cálculo de la eficiencia, mediante la siguiente ecuación:

$$E=A\left(k\frac{Q}{y}\right)^{-B} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

E = Eficiencia de captación de la reja

Q = caudal total circulante por un ancho de 3 metros (m³/s)

y = Altura de escurrimiento del agua inmediatamente antes de la reja (m)

A y B = parámetros de ajuste

k = coeficiente que depende la geometría de la calle (explicado en el punto 4.2.1).

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por el método UPC para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.26 – Eficiencias por método UPC para los sumideros Tipo 9, P – 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
0,1	1	20	48,86	58,87	49,25	43,03
0,1	1	40	36,75	43,92	36,24	32,31
0,1	1	60	31,11	37,00	30,29	27,32
0,1	1	80	27,70	32,83	26,72	24,31
0,1	1	100	25,51	30,17	24,46	22,38
0,1	1	120	23,92	28,23	22,86	21,01
1	3	20	48,23	58,09	48,57	42,47
1	3	40	36,28	43,34	35,74	31,89
1	3	60	30,71	36,51	29,87	26,97
1	3	80	27,29	32,33	26,30	23,95
1	3	100	24,90	29,42	23,83	21,84
1	3	120	23,10	27,24	21,98	20,25

Fuente: Elaboración propia

Se pueden visualizar todos los cálculos en Anexo digital C, pestaña C.1 (CD)

4.4.2 Eficiencia: Método Federal Highway Administration (FHWA)

Se emplea el mismo calculo explicado en el punto 4.2.2 para este método, para mayor detalle, la diferencia será que para estos sumideros se tiene que evaluar de nuevo una semejanza entre los sumideros del método FHWA para poder obtener la velocidad de salpicadura. Obviamente para la rejilla P-30 se logrará directo del grafico dicha velocidad.

El sumidero tipo 9 español es similar a la rejilla reticulada

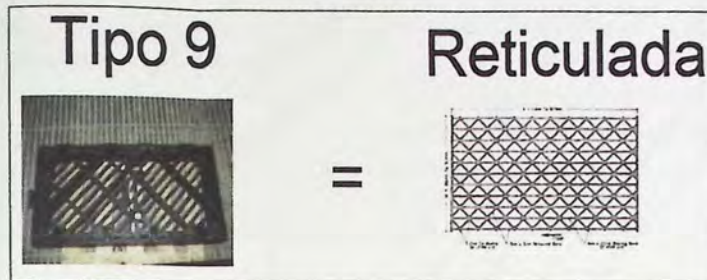


Figura 4.33 - Comparación rejilla tipo 9 con reticulada

Sumideros SERVIU S2 y S3 es similar a la rejilla P-30

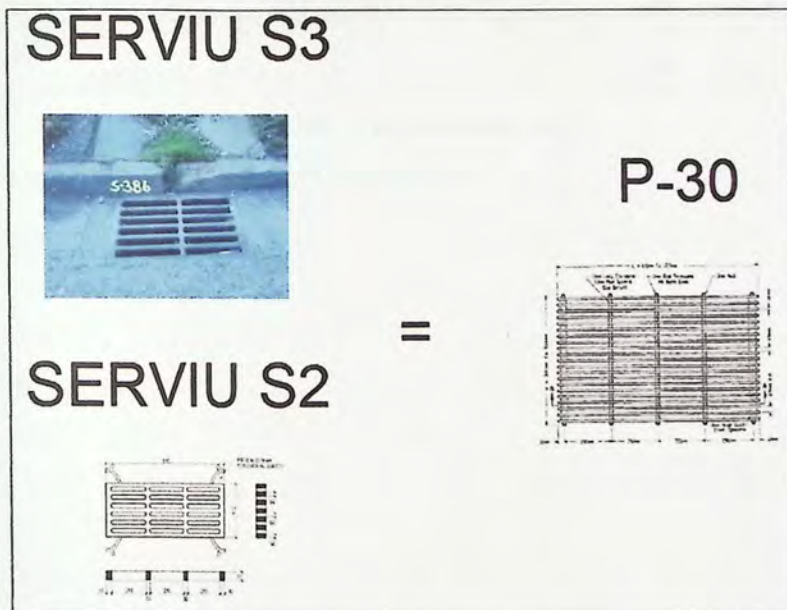


Figura 4.34 - Comparación sumidero SERVIU S2 y S3 con P-30

Ya realizada esta similitud con los sumideros de FHWA, se puede evaluar la velocidad de salpicadura v_0 .

Sumidero SERVIU S2 = P-30

El largo del sumidero SERVIU S2 es de 0,98 metros, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-30.

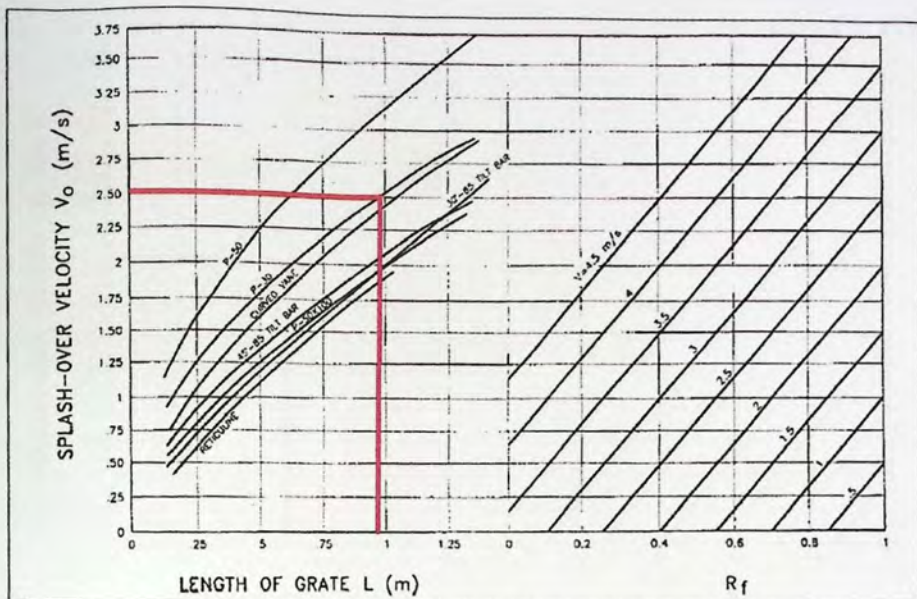


Figura 4.36 - V_o para el sumidero SERVIU S2

El valor de salpicadura $v_o = 2,5$ m/s para el sumidero SERVIU S2

Sumidero SERVIU S3 = P-30

El largo del sumidero SERVIU S2 es de 0,67 metros, con este valor se va al gráfico y se intercepta con la curva de la rejilla P-30.

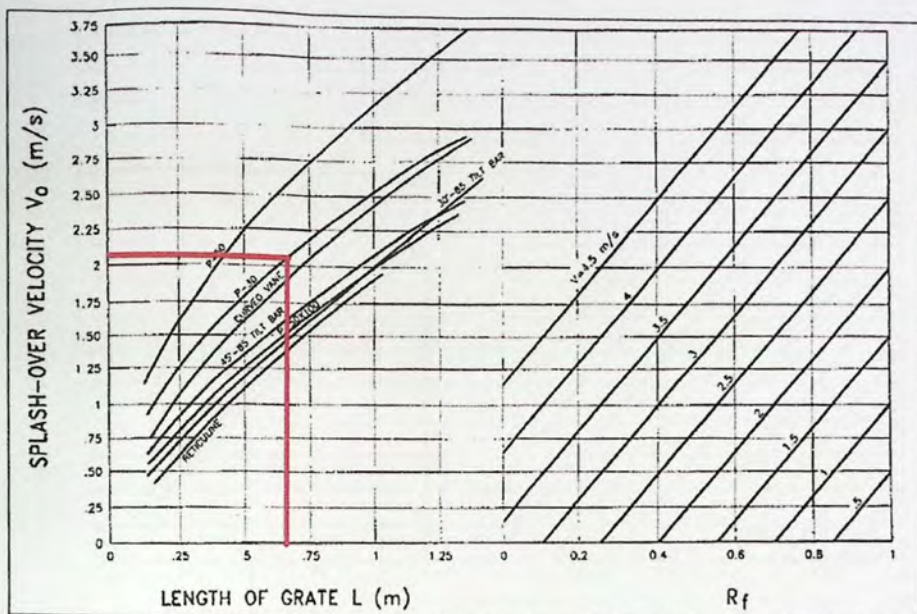


Figura 4.37 - V_o para el sumidero SERVIU S3

El valor de salpicadura $v_o = 2,1$ m/s para el sumidero SERVIU S3

Rejilla P-30

El largo de la rejilla P-30 es de 1,22 metros, con este valor se va al gráfico y se intercepta con su curva correspondiente.

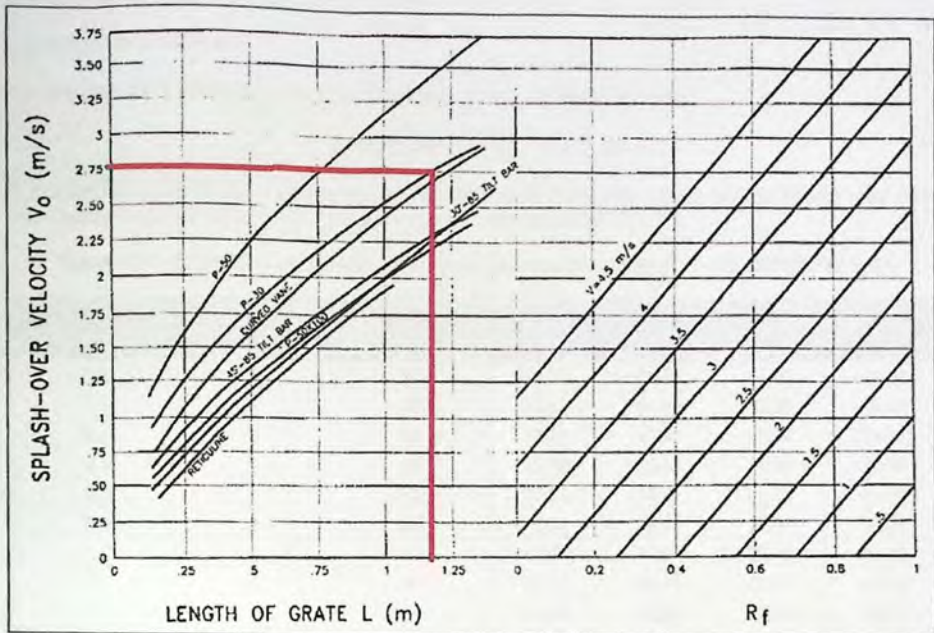


Figura 4.38 - V_o para la rejilla P-30

El valor de salpicadura $v_o = 2,75$ m/s para la rejilla P-30

Ya obtenidos las velocidades de salpicadura correspondiente a cada sumidero a evaluar, se reemplaza y se obtiene el parámetro R_f , se obtiene con la siguiente ecuación:

$$R_f = 1 - K_c(v - v_o) \rightarrow v \geq v_o \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$R_f = 1 \rightarrow v < v_o$$

K_f = constante (SI=0.295)

$v = Q/A$, es la velocidad del caudal en la cuneta (m/s)

v_o es la velocidad donde ocurre el primer fenómeno de salpicadura en la reja

R_f no puede ser mayor que 1 y menor que 0

Y por último se calcula el parámetro de R_s

$$R_s = \left(1 + \frac{K_s v^{1.8}}{l_x L^{2.3}} \right)^{-1} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde:

K_s = es constante (SI=0.0828)

I_x = pendiente transversal del camino (m/m)

L = largo de la rejilla (m)

Así se calcula la eficiencia para cada sumidero, con la siguiente ecuación:

$$E = R_f * E_0 + R_s(1 - E_0) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por el método FHWA para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.27 - Eficiencias por método FHWA para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
%	%	(l/s)				
0,1	1	20	59,97	62,59	52,46	49,96
0,1	1	40	49,32	51,81	42,64	40,42
0,1	1	60	43,64	45,98	37,52	35,49
0,1	1	80	39,89	42,10	34,18	32,30
0,1	1	100	37,15	39,25	31,76	29,99
0,1	1	120	35,02	37,04	29,88	28,20
1	3	20	52,03	77,00	66,70	55,43
1	3	40	30,82	54,49	43,67	33,38
1	3	60	17,65	39,97	30,08	20,52
1	3	80	8,42	29,60	20,79	11,78
1	3	100	1,45	21,68	13,87	5,31
1	3	120	0,40	15,37	8,46	0,25

Fuente: Elaboración propia

Todos los cálculos realizados se pueden observar en Anexo digital C, pestaña C.2 (CD)

4.4.3 Eficiencia: Método John Hopkins University (FHU)

Este cálculo fue realizado en detalle en el punto 4.2.3, en primera instancia se obtiene un largo teórico L' mediante la siguiente ecuación

$$Q = 0.417 * L' * y * g^{0.5} * \left(y - \frac{W}{\tan \theta}\right)^{-0.5} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

Q = caudal total que circula en la calle (m^3/s)

L' = longitud necesaria de la rejilla capaz de interceptar en su totalidad el caudal que circula (m)

y = altura de escurrimiento del caudal (m)

g = aceleración de gravedad ($9,8 m^2/s$)

W = ancho de la rejilla (m)

θ = ángulo entre la acera y la calle expresada en grados ($\tan\theta = Z$)

A continuación se calcula el caudal no interceptado para los diferentes sumideros a comparar, con la ecuación:

$$Q_b = 0.25 * (L' - L'') * g^{0.5} * \left(y - \frac{W}{\tan\theta}\right)^{1.5} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

Q_b = caudal no captado (m^3/s)

Al tener los caudales no captados, se puede obtener el caudal captado el cual será :

$$Q_{\text{captado}} = Q - Q_b \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde:

Q_{captado} = Caudal captado por la rejilla (m^3/s)

Y por consecuencia se puede llegar a la eficiencia de cada sumidero:

$$E = \frac{Q_{\text{captado}}}{Q} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

Donde:

E = Eficiencia (%)

El cálculo de la eficiencia para este método no requiere mayor restricciones, se obtiene directo reemplazando los distintos parámetros en las ecuaciones correspondientes.

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por el método JHU para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.28 - Eficiencias por método JHU para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
0,1	1	20	73,98	75,73	70,13	67,95
0,1	1	40	67,33	68,81	64,00	62,23
0,1	1	60	63,91	65,22	60,90	59,36
0,1	1	80	61,69	62,89	58,91	57,51
0,1	1	100	60,10	61,21	57,48	56,19
0,1	1	120	58,87	59,92	56,38	55,18
1	3	20	98,66	99,05	95,13	94,54
1	3	40	93,24	94,02	88,18	87,41
1	3	60	89,06	89,94	83,71	82,92
1	3	80	85,91	86,82	80,54	79,76
1	3	100	83,44	84,36	78,12	77,36
1	3	120	81,42	82,34	76,20	75,45

Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital C, pestaña C.3 (CD) se puede visualizar las eficiencias por el método JHU

4.4.4 Eficiencia: Colorado State University (UDFCD)

La eficiencia para este método se realizó en detalle en el punto 4.2.4. Como este método depende de unos parámetros obtenidos solo para rejillas ensayadas, se procede a generar las similitudes entre estas rejillas con las que se van a estudiar en este punto.

Los sumideros se consideraran similar la rejilla single N°13, ya que tienen solo barras transversales y longitudinales.

Sumideros P-30, Tipo 9, SERVIU S2 y S3 es similar a la rejilla single N°13

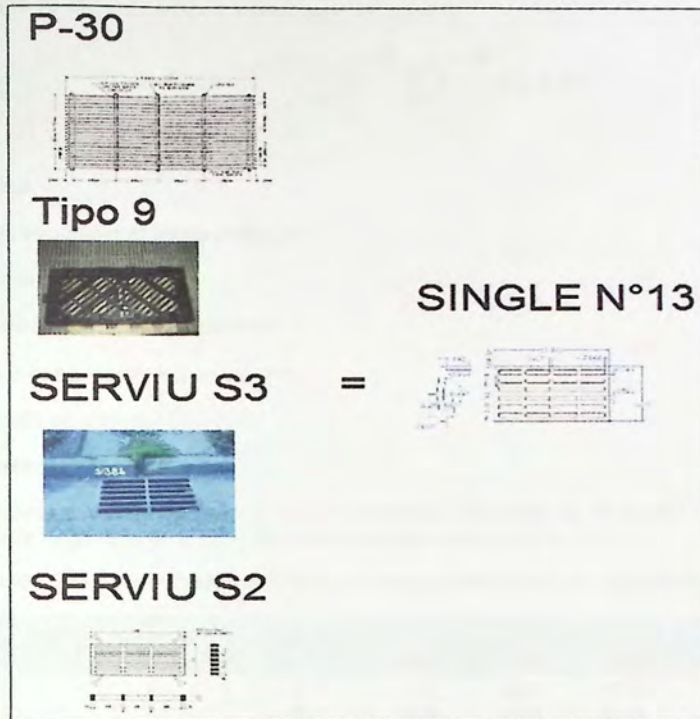


Figura 4.39 – Comparación sumidero P-30, Tipo 9, SERVIU S2 y S3 con Single N°13

Entonces los parámetros serían para los distintos sumideros:

Tabla 4.29 – Parámetros UDFCD para sumideros no ensayados

Sumidero	Parámetros			
	a	b	c	d
P-30	0,063	0,665	0,835	-1,138
Tipo 9	0,063	0,665	0,835	-1,138
SERVIU S2	0,063	0,665	0,835	-1,138
SERVIU S3	0,063	0,665	0,835	-1,138

Fuente: Elaboración propia

En conclusión, la eficiencia en este método para dada por:

$$E = 0,063 \left(\frac{y}{L}\right)^{0,665} \left(\frac{V^2 T}{gA}\right)^{0,835} \left(\frac{V^2}{gL}\right)^{-1,138} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

E = eficiencia

y = altura de escurrimiento aguas arriba (m)

L = largo de la reja (m)

V = velocidad de flujo aguas arriba (m/s)

T = ancho de escurrimiento superficial (m)

g = aceleración de gravedad (9,8 m/s²)

A = área mojada del flujo (m²)

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por el método UDFCD para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.30 - Eficiencias por método UDFCD para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
0,1	1	20	41,07	45,12	40,68	33,98
0,1	1	40	35,38	38,86	35,04	29,27
0,1	1	60	32,42	35,62	32,11	26,82
0,1	1	80	30,47	33,48	30,18	25,21
0,1	1	100	29,04	31,91	28,77	24,03
0,1	1	120	27,93	30,68	27,66	23,11
1	3	20	20,67	22,71	20,48	17,11
1	3	40	17,81	19,56	17,64	14,74
1	3	60	16,32	17,93	16,16	13,50
1	3	80	15,34	16,85	15,19	12,69
1	3	100	14,62	16,06	14,48	12,10
1	3	120	14,06	15,44	13,92	11,63

Fuente: Elaboración propia

Las eficiencias obtenidas por este método se pueden apreciar en Anexo digital C, pestaña C.4 (CD)

4.4.5 Eficiencia: Wallingford (UK)

El método de Wallingford, como se explicó en el punto 4.2.5, depende de las disposiciones de las barras, para sumideros no ensayados, se obtiene un coeficiente C_b .

Para cada sumidero se observa cual es la disposición dominante de sus huecos en la rejillas, ya sea, transversal, longitudinal, diagonal y curvos.

Tabla 4.31 - Valores de C_b para diferentes patrones de las barras

patrón de barras de rejilla	C_b
Barras transversales	1,75
Barras longitudinales, diagonales o curvas	1,5

Fuente: Adaptado de [8]

Sumidero SERVIU S2

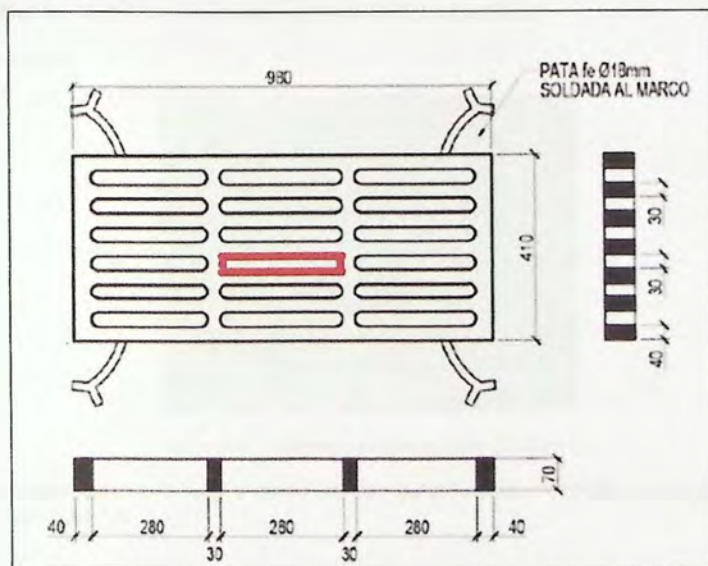


Figura 4.40 – Número de huecos sumidero SERVIU S2

La disposición de los huecos es en sentido longitudinal, con esto se considera que el C_b para el sumidero SERVIU S2 es 1,5.

Sumidero SERVIU S3



Figura 4.41 - Número de huecos sumidero SERVIU S3

Como el sumidero SERVIU S3, es igual al SERVIU S2 solo que el largo es menor, sus disposiciones de los huecos son iguales, con esto el C_b es igual a 1,5.

Sumidero tipo 9



Figura 4.42 - Número de huecos sumidero tipo 9

Como se puede observar el sumidero tipo 9 posee huecos en sentido diagonal, con lo cual el coeficiente C_b es 1,5.

Sumidero P-30

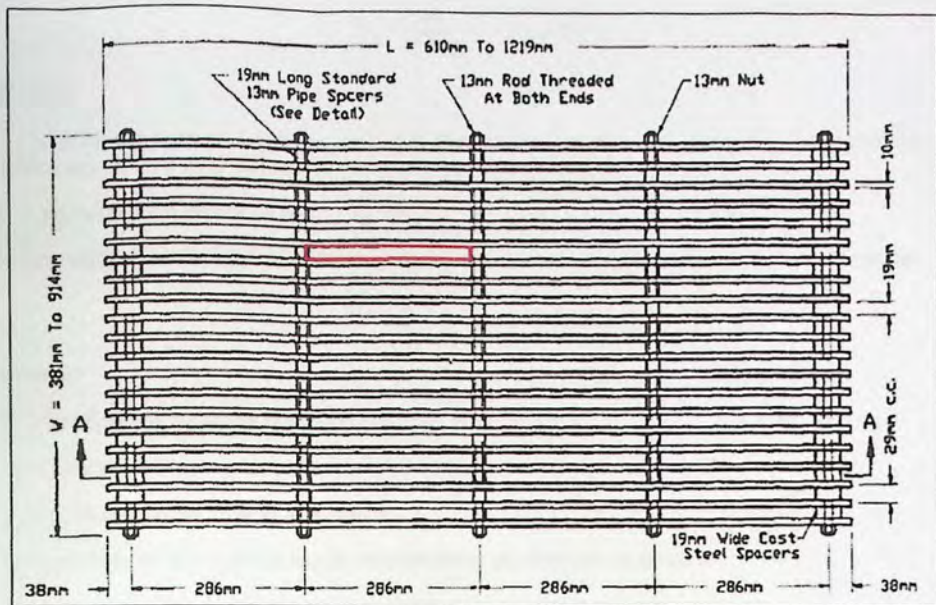


Figura 4.43 - Número de huecos sumidero P-30

Para el sumidero P-30 la disposición de los huecos es en sentido longitudinal, con esto el C_b es 1,5.

Con esto se llega a una tabla resumen de todos los sumideros con sus respectivos C_b obtenidos.

Tabla 4.32 – Valores C_b para sumideros no ensayados

Sumidero	C_b
SERVIU S2	1,5
SERVIU S3	1,5
TIPO 9	1,5
P-30	1,5

Fuente: Elaboración propia

Conseguido los coeficientes, se calcular el valor de G

$$G = K_A * C_b \text{ (Ec. 2.30)}$$

Donde

K_A = parámetro específico de la rejilla

C_b = coeficiente global para un patrón de barras particular de acuerdo con los valores contenidos en la tabla 4.21

K_A se obtiene de la siguiente ecuación:

$$K_A = \frac{69}{A_g^{0.75} \cdot \sqrt{p}} \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde:

A_g = área del rectángulo más pequeño que tiene lados paralelos a la acera que puede contener todas las ranuras de la rejilla (m^2)

p = relación entre el área de vacío y A_g (%)

Y con esto se puede llegar a la eficiencia de cada sumidero para diferentes condiciones de caudal:

$$E = 102.7 - G \cdot \frac{Q}{y} \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Donde

E = la eficiencia hidráulica (expresada en porcentaje $E \leq 100\%$)

Q = caudal total que se aproxima a la rejilla (m^3/s)

y = profundidad del agua en la acera (m)

G = coeficiente que depende de las características geométricas de la rejilla

Reemplazando los parámetros en la ecuación de la eficiencia se tiene:

$$E = 102.7 - \left(\left(\frac{69}{A_g^{0.75} \cdot \sqrt{p}} \cdot C_b \right) \cdot \frac{Q}{y} \right) \quad (\text{Ec. 4.5})$$

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por el método Wallingford para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.33 - Eficiencias por método Wallingford para los sumideros Tipo 9, P - 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
0,1	1	20	73,61	82,56	64,48	50,68
0,1	1	40	57,84	71,65	43,76	22,47
0,1	1	60	44,91	62,69	26,76	0,00
0,1	1	80	33,52	54,81	11,80	0,00
0,1	1	100	23,17	47,64	0,00	0,00
0,1	1	120	13,57	41,00	0,00	0,00
1	3	20	73,03	82,16	63,72	49,64
1	3	40	56,95	71,03	42,58	20,87
1	3	60	43,75	61,89	25,24	0,00
1	3	80	32,14	53,85	9,99	0,00
1	3	100	21,58	46,54	0,00	0,00
1	3	120	11,79	39,77	0,00	0,00

Fuente: Elaboración propia

Ya realizado todos los cálculos de eficiencia, se alcanzan distintas tablas, que se adjunta en Anexo digital C, pestaña C.5 (CD)

4.4.6 Eficiencia: Manual de Drenaje Urbano

Para diferentes sumideros, no ensayados, el Manual de Drenaje Urbano plantea, que para el cálculo de la eficiencia en estos caso, debería considerarse el método del Johns Hopkins University, aunque estas eficiencias son mucho más elevadas a las obtenidas en el ensayo del Instituto Nacional de Hidráulica, se le agrega un factor de reducción para llevarlas a un resultado similar al realizado por el estudio.

$$E=0,7 \cdot \left(\frac{Q-Q_{\text{captado}}}{Q} \right) \text{ (Ec. 4.8)}$$

Donde:

E = eficiencia

Q = caudal total que pasa por la calle (m³/s)

Q_{captado} = caudal captado por el sumidero, realizado por el método de Johns Hopkins University (m³/s)

Con lo cual, los datos de eficiencia obtenidas por el método de Johns Hopkins University en el punto 4.5.3 se le multiplica este factor de reducción para los distintos sumideros utilizados.

A continuación se muestra un ejemplo de las eficiencias calculadas por la formulación que menciona el Manual de Drenaje Urbano para una pendiente longitudinal de 0,1% - 1% y pendiente transversal de 1% - 3%

Tabla 4.34 – Eficiencias del Manual de Drenaje Urbano para los sumideros Tipo 9, P – 30, SERVIU S2 y S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	E (eficiencia %)			
			Tipo 9	P - 30	SERVIU S2	SERVIU S3
%	%	(l/s)				
0,1	1	20	51,78	53,01	49,09	47,56
0,1	1	40	47,13	48,16	44,80	43,56
0,1	1	60	44,74	45,65	42,63	41,55
0,1	1	80	43,19	44,03	41,23	40,26
0,1	1	100	42,07	42,85	40,23	39,33
0,1	1	120	41,21	41,94	39,47	38,63
1	3	20	69,06	69,33	66,59	66,18
1	3	40	65,27	65,81	61,72	61,19
1	3	60	62,34	62,96	58,60	58,04
1	3	80	60,14	60,78	56,38	55,83
1	3	100	58,41	59,05	54,69	54,15
1	3	120	57,00	57,64	53,34	52,81

Fuente: Elaboración propia

En Anexo digital C, pestaña C.6 (CD) se puede visualizar todas las eficiencias obtenidas por el Manual de Drenaje Urbano para los 4 sumideros mencionados anteriormente.

4.4.7 Análisis y Comparación de eficiencias

Se realizará un análisis de los cuatro sumideros escogidos, obteniendo gráficos similares al punto 4.3, pero comparando su metodología de origen con el cual el sumidero fue ensayado con las otras metodologías y más lo que se menciona en el Manual de Drenaje Urbano bajo las mismas condiciones.

Sumidero tipo 9 (español)

Su eficiencia efectiva será la calculada por el método de la Universidad Politécnica de Cataluña, en la cual este sumidero fue ensayado, aunque no en sus mismas condiciones, ya que será expuesto en las situaciones que se realizó el estudio del Instituto Nacional de Hidráulica.

A continuación se muestra una representación gráfica, en las cuales se encuentra una línea de 45°, que representa los resultados semejantes entre el método UPC comparado con lo sugerido en el Manual de Drenaje para estos casos.

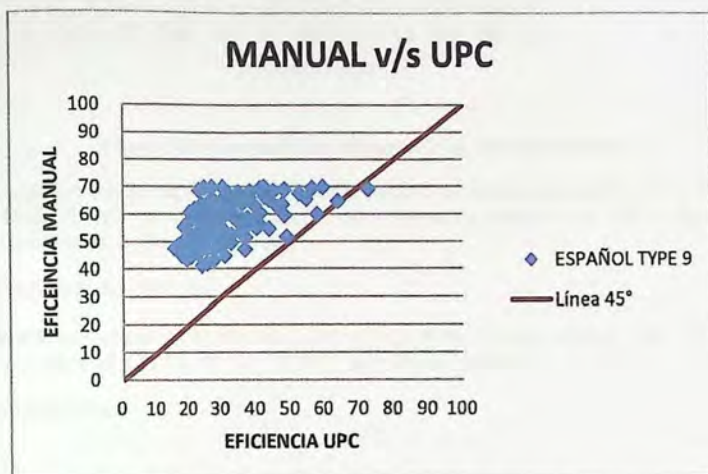


Figura 4.44 – Comparación eficiencia tipo 9, Manual v/s UPC

Las eficiencias por medio del manual tienden a ser mayores, aunque tiene un factor de reducción en su formulación, se obtienen por el método de JHU y este estudio, analizado anteriormente bajo distintas condiciones y sumideros, siempre son muy altas. No se observa una dispersión entre ellas, se sitúan entre el 70% y 40%. Algunos puntos tienden ser similares al UPC.

Sumidero P-30 (EEUU)

Su eficiencia efectiva será la calculada por el método de la Federal Highway Administration, en la cual este sumidero fue ensayado, será comparado con Manual referente al cálculo de eficiencia

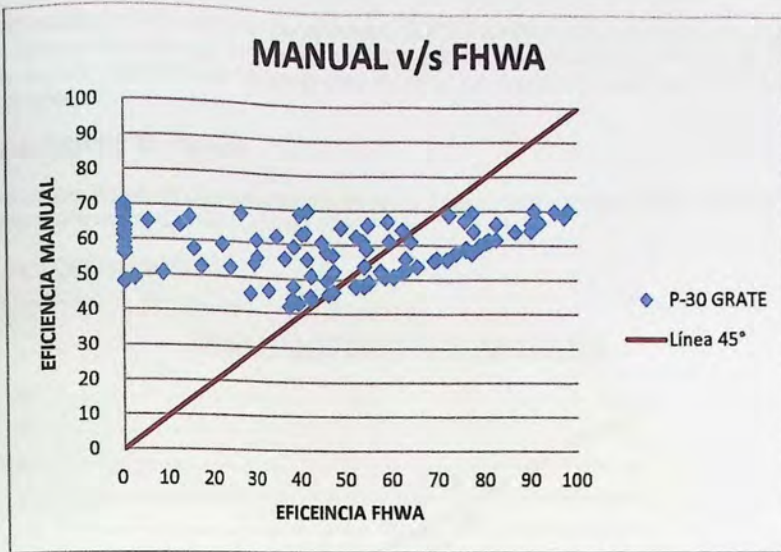


Figura 4.45 – Comparación eficiencia P-30, Manual v/s FHWA

Las eficiencias por medio del Manual de Drenaje Urbano, se sitúan entre 40% y 50%. Comparadas con el método FHWA, está tiene eficiencias muy variadas, desde 0 al 100%, algunos puntos tienden a igualarse entre los dos métodos.

Sumidero SERVIU S2 (Chileno)

Se comparará los valores de eficiencia entre el Manual de Drenaje urbano, bajo condiciones de sumidero no ensayados con el método UDFCD a modo de ejemplo

UDFCD v/s MANUAL

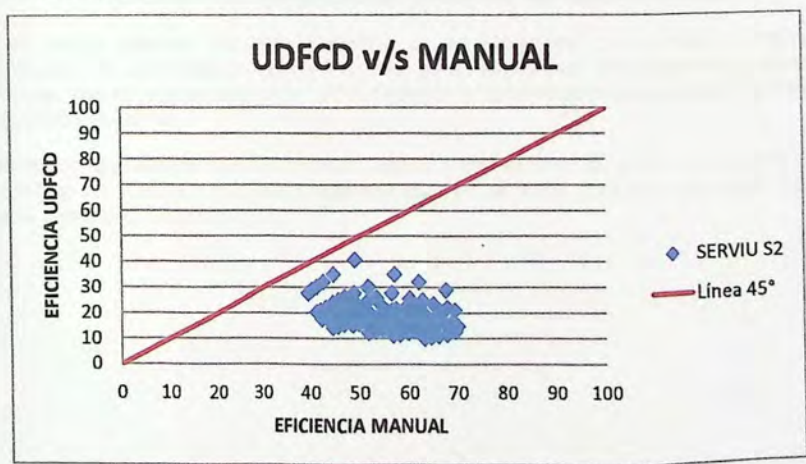


Figura 4.46 - Comparación eficiencia SERVIU S2, UDFCD v/s Manual

La comparación con los resultados por el método UDFCD tienden acumularse entre un rango 10% y 40%, esto quiere decir que son mucho menores a la eficiencia obtenida por medio del Manual. No hay mucha dispersión de las eficiencias al variar los caudales, pendientes transversales y longitudinales.

Sumidero SERVIU S3 (Chileno)

Como ejemplo, las eficiencias comparadas de este sumidero serán entre el método Wallingford y lo referente al Manual de Drenaje Urbano.

WALLINGFORD v/s MANUAL

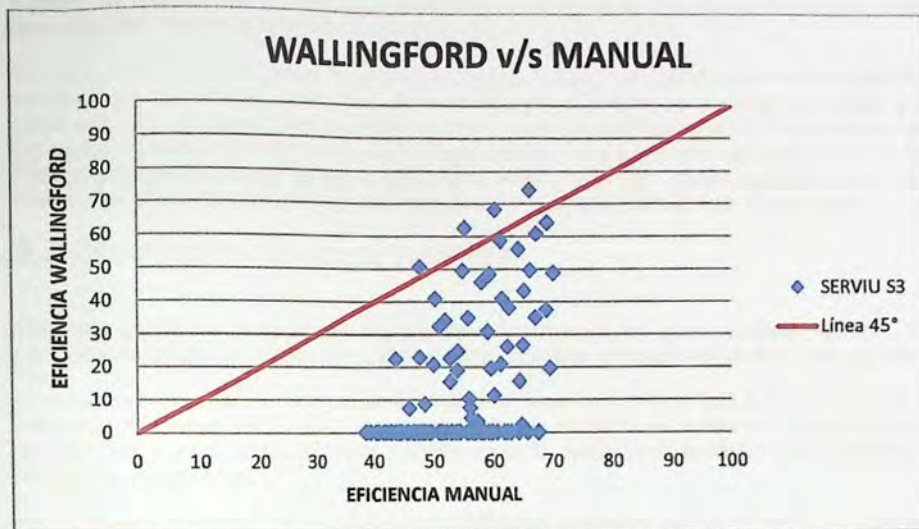


Figura 4.47 - Comparación eficiencia SERVIU S3, Wallingford v/s Manual

Aquí se puede observar una gran dispersión de las eficiencias, por el método Wallingford, habiendo un gran porcentaje cercana al 0%. Unas pocas llegan a las tendencias de las eficiencias del Manual. Las eficiencias con valores a 0% se deben a las condiciones de caudales y pendientes longitudinales elevadas.

Todas las comparaciones de los sumideros Tipo 9, P-30, SERVIU S2 y S3, con los respectivos gráficos bajo las mismas condiciones ensayadas por INH, se puede observar en el Anexo digital C, desde la pestaña C.7 a la C.14 (CD)

CAPÍTULO 5: Cálculo hidráulico en una cuenca urbana

5.1 Generalidades

El programa SWMM 5 (Storm Water Management Model), realiza una modelación hidrológica e hidráulica que permite simular las precipitaciones o aguas lluvias en un drenaje urbano contemplando todos los componentes que se pueden encontrar en una ciudad que influyen en la escorrentía superficial generando una interpretación más cercana y óptima a la realidad. Se pueden representar calles, cuencas urbanas, colectores, cámaras, sumideros, etc. ya que cuenta con una gran variedad de elementos en el programa.

Se toma datos del sector Santa Rosa de la ciudad de Temuco, ya que se cuenta con un catastro de todos los sumideros ubicados en una avenida principal y calles secundarias. Se verifica por cada sumidero, en qué condiciones se encuentran, ya sea funcionamiento al 100% o en el peor de los casos, que se encuentren embancados. Se modelarán estos sumideros bajo varios periodos de retorno y duración, obteniendo bajo el análisis del programa las velocidades que escurren por las calles y las alturas de escurrimientos de estas para ver la peligrosidad del flujo en las calles.

5.2 Descripción de la zona a analizar

Temuco, ciudad de la región de la Araucanía, consta con un clima templado lluvioso. Su precipitación anual promedio es de 1150 mm, concentrándose en los meses de abril hasta agosto.

El estudio se enfocará en la avenida costanera, de un largo de 3,2 kilómetros, la cual cuenta con 2 calzadas (3,5 metros media calzada) separadas por una mediana de 24 metros para la utilización de ciclo vías y áreas verdes. También abarcara las calles secundarias alrededor de ella, haciendo un total de 83 hectáreas.

En la avenida costanera, se encuentran principalmente sumideros del tipo SERVIU S1 y en las calles aledañas hay una variedad de sumideros SERVIU S2 y S3.

A continuación se muestran la figura 5.1 del área aportante a analizar.



Figura 5.1 - Vista mapa sector Santa Rosa

5.3 Modelación en SWMM 5

Para realizar la modelación, se obtiene información del plano caracterizado en SWMM 5, el cual abarca una zona de Temuco con sus cuencas urbanas, colectores, calles, cámaras y sumideros.

Por consiguiente, se reduce el área, ya que se quiere analizar solo el sector Santa Rosa que abarca la avenida costanera y las calles secundarias, que son 83 hectáreas aproximadamente. Se puede observar el modelo final representado en SWMM 5. (Fig. 5.2)

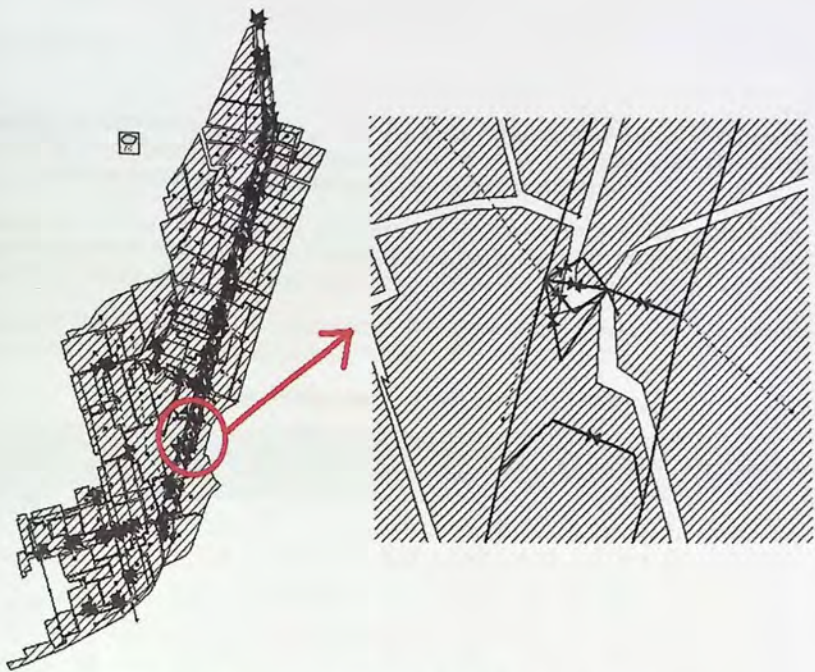


Figura 5.2 – Modelación SWMM 5, sector Santa Rosa

En la figura 5.2 se puede el área que abarca la modelación en SWMM 5, Sector Santa Rosa. Los sumideros están representados por el siguiente objeto:

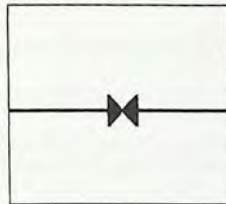


Figura 5.3 – Sumidero representado en SWMM 5

5.3.1 Precipitación

Para la elaboración del modelo, se trabajara con una lluvia proyecto, con la cual se obtiene la información de la precipitación en Temuco para realizar la curva IDF (intensidad, duración y frecuencia), que es la variación de la intensidad de la lluvia en distintas duraciones.

La información de la curva IDF en Temuco, se obtiene de los planes maestros de aguas lluvias, estos datos se encuentran en el Manual de Drenaje Urbano, los cuales están asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años con duraciones de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18 y 24 hrs.

A continuación se muestra una tabla con la curva IDF intensidad media (mm/hr) para sus distintos periodos de retorno y duración para la ciudad de Temuco

Tabla 5.1 – Intensidad Media (mm/hr) para la ciudad de Temuco

Periodo de retorno (años)	Duración (horas)									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
2	11,1	8,9	6,7	5,4	4,6	4	3,7	3,3	2,8	2,3
5	14,37	11,8	8,88	6,11	5,35	4,91	4,39	3,79	3,1	2,71
10	16,7	13,7	10,3	8,4	7,1	6,2	5,7	5,1	4,4	3,6
25	19,6	16,2	12,2	9,8	8,3	7,2	6,7	6	5,1	4,3
50	21,7	18	13,6	10,8	9,2	8	7,4	6,6	5,7	4,7
100	23,8	19,8	14,9	11,9	10,1	8,7	8,1	7,3	6,3	5,2

Fuente: Adaptado de [1]

Con estos datos, se realiza la tormenta de diseño con el método de los bloques alternados para los periodos de 2, 5, 10 y 100 años con duraciones de 2, 6 y 12 hrs con un tiempo de intervalo de 10 minutos.

En primera instancia, se realiza una tabla con los siguientes datos:

Duración acumulada: el intervalo de tiempo cada 10 min hasta la hora de duración requerida

Coefficiente de duración: este valor se calcula cuando la duración es menos de una hora, que se obtiene mediante la formulación de Bell, con una frecuencia cada 10 minutos.

$$CD = 0,54 \cdot t^{0,25} - 0,50 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

CD = coeficiente de duración

t = intervalos de tiempos acumulados cada 10 minutos (minutos)

Precipitación: la obtención de este valor será cada 10 min, para la precipitación menor a 1 hora, será:

$$P_{10 \text{ minutos}} = CD \cdot P_{1 \text{ hora}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Donde:

$P_{10\text{ minutos}}$ = precipitación en intervalos cada 10 minutos

CD = coeficiente de duración de 10 minutos

$P_{1\text{ hora}}$ = será la intensidad media sacada de la tabla anterior multiplicada por 1 hora para el periodo de retorno que se quiere utilizar (mm)

Cuando las duraciones sean mayores a 1 hora, la precipitación será obtenida por:

$$P_{10\text{ minutos}} = \frac{P_t - P_{t+1}}{n^\circ \text{ de intervalos}} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Donde:

P_t = intensidad media de la tabla IDF por la hora que se requiere evaluar asignada al periodo de retorno correspondiente.

N° de intervalos = número de bloques cada 10 minutos

Intensidad: Siempre evaluada cada 10 minutos, se calcula por la precipitación cada 10 minutos dividida por el tiempo de 10 minutos en horas.

$$I_{10\text{ minutos}} = \frac{P_{10\text{ minutos}}}{t} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Donde:

$I_{10\text{ minutos}}$ = intensidad cada 10 minutos (mm/hr)

$P_{10\text{ minutos}}$ = Precipitación cada 10 minutos (mm)

t = periodo de tiempo acumulado cada 10 minutos (hr)

Se muestra en la tabla 5.2 de la tormenta de diseño por el método de bloques alternados, explicado anteriormente, para una duración de 2 horas cada 10 minutos para un periodo de retorno de 2 años para la ciudad de Temuco.

Tabla 5.2 – Método bloques alternados, T = 2 años con duración de 2 horas

Duración parcial (minutos)	Duración acumulada (minutos)	Coeficiente de duración	precipitación acumulada (mm)	precipitación parcial (mm)	intensidad en el intervalo (mm/hora)	Intensidad ordenada (mm/hora)
10	10	0,46	5,11	5,11	30,65	5,19
	20	0,64	7,13	2,02	12,10	6,67
	30	0,76	8,48	1,35	8,11	6,67
	40	0,86	9,52	1,05	6,28	6,67
	50	0,94	10,39	0,86	5,19	12,10
	60	1,00	11,13	0,74	4,46	30,65
	70		12,24	1,11	6,67	8,11
	80		13,35	1,11	6,67	6,67
	90		14,47	1,11	6,67	6,67
	100		15,58	1,11	6,67	6,67
	110		16,69	1,11	6,67	6,28
	120		17,8	1,11	6,67	4,46

Fuente: Elaboración propia

Al final se ordenan las intensidades, desde el centro alternamente de mayor a menor, y se realiza un hietograma con ellas.

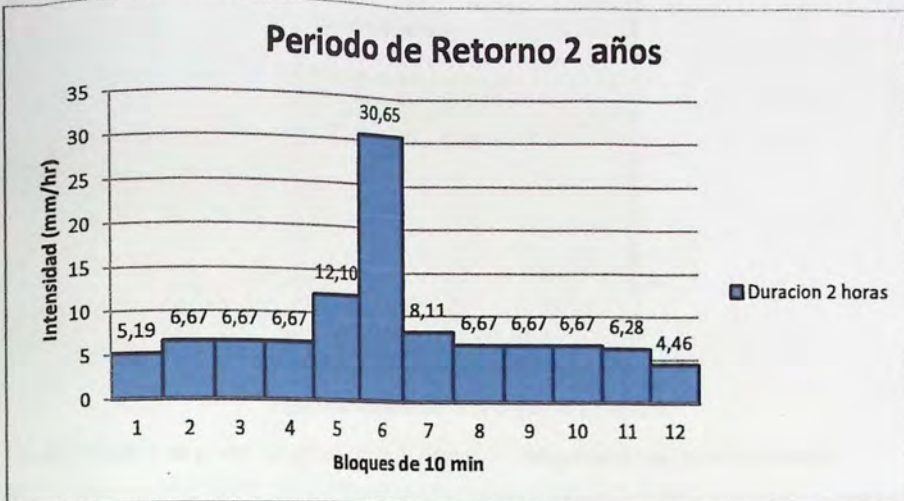


Figura 5.4 – Hietograma, T = 2 años con duración de 2 horas

Se realiza este método para los periodos de retorno de 2, 5, 10 y 100 años con duraciones de 2, 6 y 12 horas. (Anexo digital D)

Ya realizados todos estos cálculos de precipitación, se introducen al programa SWMM 5, en el objeto Rain Gage, la opción de formato de los datos de lluvia (Rain format) como intensidad y un tiempo de intervalo (time interval) de 10 minutos, se ingresan los datos por time serie, que son los datos de intervalos cada 10 minutos y las intensidades ordenadas obtenidas anteriormente siguiendo con el ejemplo anterior:

Time Series Editor

Time Series Name
2T2hr

Description

Use external data file named below

Enter time series data in the table below
No dates means times are relative to start of simulation.

Date (M/D/Y)	Time (H:M)	Value
	0:10	5.19
	0:20	6.67
	0:30	6.67
	0:40	6.67
	0:50	12.10
	1:00	30.65
	1:10	8.11
	1:20	6.67
	1:30	6.67
	1:40	6.67
	1:50	6.28

View

OK

Cancel

Help

Figura 5.5 – Datos de intensidad para SWMM 5

En este cuadro, se puede visualizar como quedaría el hietograma de los datos ingresados.

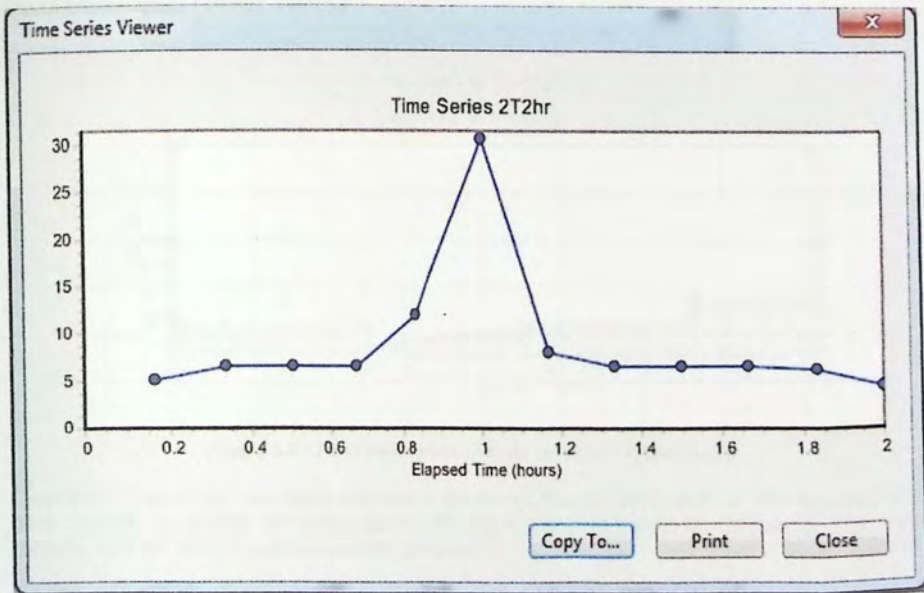


Figura 5.6 – Hietograma por SWMM 5, T = 2 años con duración 2 horas.

5.3.2 Pendientes transversales y longitudinales de las calles.

La avenida costanera, consta con dos calzadas (pista derecha e izquierda) materializada de hormigón, con un ancho 3,5 metros la media calzada, separadas por una mediana de 24 metros, en la cual hay áreas verdes y ciclo vía para la recreación de la comunidad.

Perfil transversal calzada izquierda

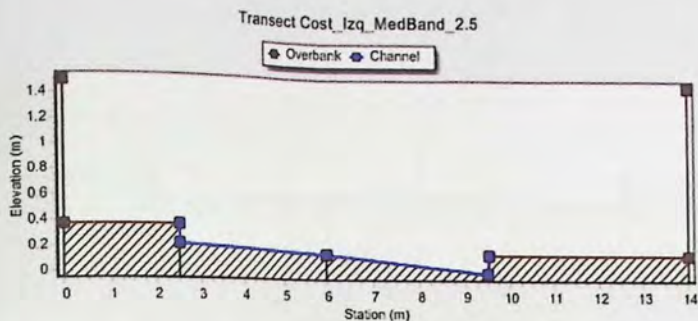


Figura 5.7 – Perfil transversal calzada izquierda Av. Costanera

Perfil transversal calzada derecha

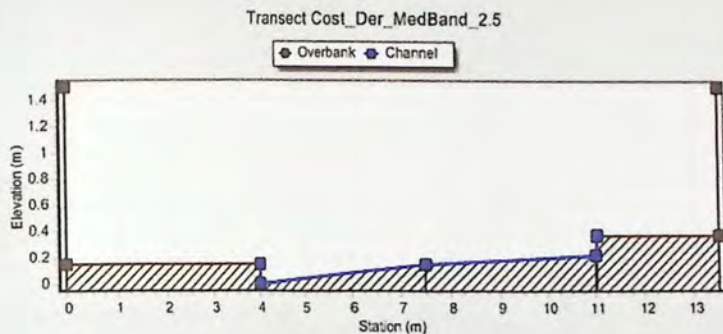


Figura 5.8 – Perfil transversal calzada derecha Av. Costanera

Cada perfil consta con sus datos respectivos de ancho, con un coeficiente de Manning de 0,015 para la calle. Al constar con estos valores, se puede lograr la pendiente transversal para cada calzada, que es un 4,3% para la avenida costanera.

En las calles secundarias, se pueden identificar dos tipos de calzadas, una calzada que se encuentran en la mayoría de las calles, con un ancho de media calzada de 3 metros y pendiente transversal de 3%.

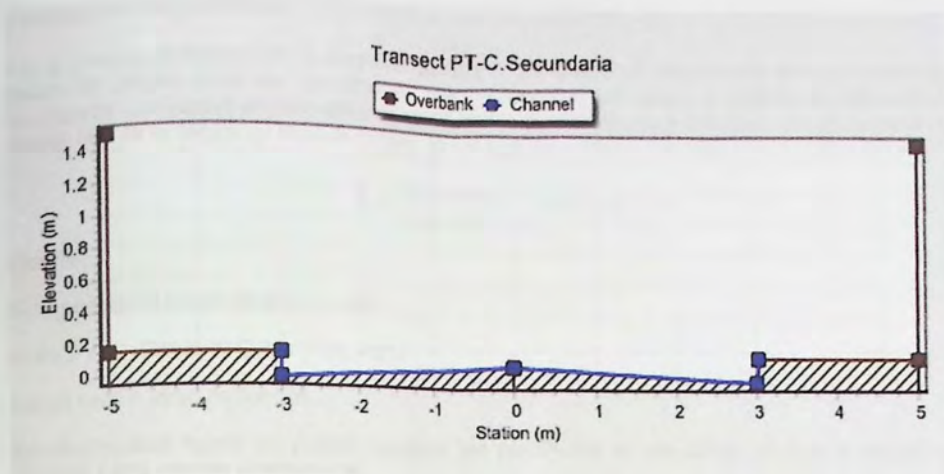


Figura 5.9 – Perfil transversal calles secundarias

El otro tipo de calzada se encuentra solo en la calle Tegualda, con un ancho de media calzada de 3,5 metros y una pendiente transversal de 4,3%.

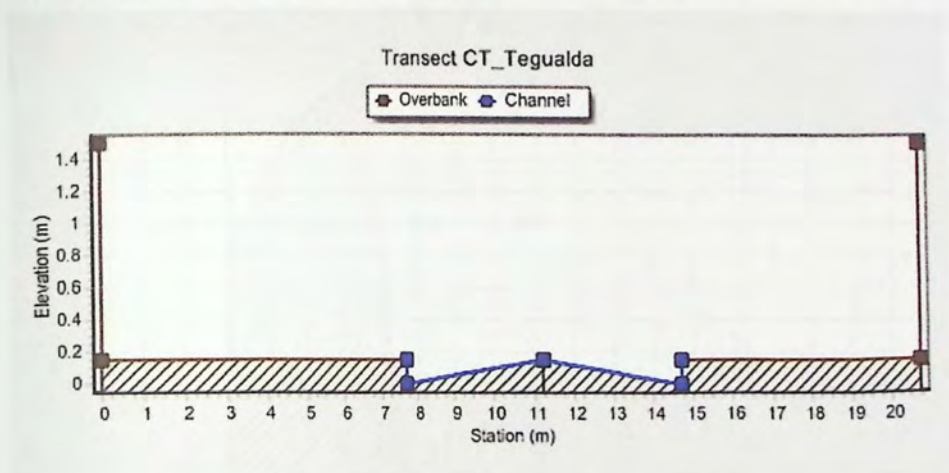


Figura 5.10 – Perfil transversal calle Tegualda

Ambas calzadas son materializadas de homigón, por consecuencia se utiliza un coeficiente de Manning de 0,015.

Pendientes longitudinales

En el modelo realizado por el programa SWMM 5, se identifican unos nodos llamados junction, estos se utilizan para unir los conduits, que representan las calles, o cuando se encuentran sumideros. Los junction poseen datos de cotas, con lo cual entre uno y otro para unir un conduits (o calle), que se le asigna un largo de la calle, se calcula la pendiente asociada a esa calle o unión.

$$S_L = \frac{\text{Cota 2} - \text{Cota 1}}{\text{Largo calle}} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

Donde:

S_L = pendiente longitudinal de la calle

Cota 2 y 1 = Datos de Cotas entre nodos

Largo calle = largo de conduit

En la siguiente figura, se pueden visualizar las pendientes en las calles, ya que el programa entrega estos valores directamente.

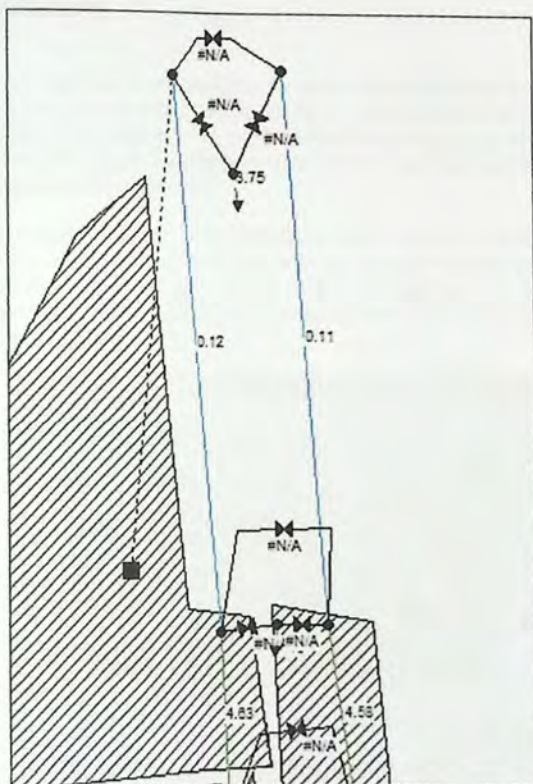


Figura 5.11 – Pendientes longitudinales

Se obtuvo las pendientes longitudinales para todos los tramos de calles en la avenida costanera y calles secundarias. Al final se agruparon todas las pendientes, otorgándoles un rango.

A continuación se puede visualizar una tabla con las pendientes longitudinales y transversales que sacaron en todos los trazados que se identifican como las calles en el modelo, se utilizarán para el cálculo de las eficiencias de los sumideros en este análisis.

Tabla 5.3 – Pendientes transversales y longitudinales

avenida costanera		calles secundarias	
pendiente longitudinal	pendiente transversal	pendiente longitudinal	pendiente transversal
0,1%	5%	3%	3%
4%	4%	1%	3%
2%	4%	0,5%	3%
1%	4%	0,5%	4%
0,5%	4%	0,1%	3%
0,0001%	4%	0,1%	5%

Fuente: Elaboración propia

5.3.3 Tipos de sumideros

En este punto, se tiene acceso a un catastro de todos los sumideros existente en el área de estudio, los cuales constan con un total de 88 sumideros, los cuales se identifican 53 en la avenida costanera del tipo SERVIU S1 (figura 5.11), la mayoría en buen estado, esto quiere decir que la rejilla, cámara, empalme, etc no se encuentran embancados y su funcionamiento para la captación del caudal está en óptimas condiciones [12].

Los existentes en las calles secundarias son alrededor de 35 sumideros del tipo SERVIU S2 y S3 (figuras 5.11, 5.12, 5.13), los cuales, no se encuentran en tan buen estado como los ubicados en la avenida costanera, la mayoría se encuentran en malas condiciones, ya sea dañados, tapados, embancados e incluso sin ninguna rejilla. Con lo cual su funcionamiento de interceptar el caudal proveniente de las calles es casi nulo.



Figura 5.12 – Sumidero SERVIU S1 sector Av. Costanera



Figura 5.13 – Sumidero SERVIU S2 embancado



Figura 5.14 – Sumidero SERVIU S3, buen estado

En Anexo digital D, pestaña E.2 se clasifican todos los sumideros que se encuentran en la avenida Costanera y calles secundarias.

5.3.4 Datos de eficiencia

Ya realizado el catastro de todos los sumideros existente en el área a analizar, verificando cuales estaban en buen estado o embancados, se clasificaron los sumideros dependiendo a qué tipo de pendiente longitudinal y transversal están asociadas, esto se generó según la ubicación de la calle a la que pertenecen. En la modelación se le asignó un número a cada sumidero para poder ser identificado, se puede visualizar también en las figuras anteriores (Fig. 5.12, 5.13, 5.14) y Anexo digital D, pestaña E.2

El elemento con el cual se analizan los sumideros en el programa SWMM 5 se llama outlets, el cual se le puede asignar una tabla de entrada, que representa la altura de escurrimiento y el caudal que capta el sumidero, en otras palabras será la eficiencia que tenga el sumidero ante diferentes tormentas de diseño.

Ya que se hará un contraste entre los resultados de eficiencia obtenidos del estudio del Instituto Nacional de Hidráulica con las distintas metodologías (UPC, FHWA, JHU, UDFCD y Wallingford). Solo se tiene los datos de forma experimental del sumidero SERVIU S1, el cual fue ensayado por el estudio INH, pero no se tiene estos datos de los sumideros SERVIU S2 y S3. Con lo cual para hacer un mayor contraste de forma real, se obtendrán las eficiencias para esos tipos de sumideros, de la Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructura de aguas lluvias emitido por el SERVIU en el año 2005 [13].

En esta guía, emplea una formulación basada en el método Federal Highway Administration, pero omitiendo algunos parámetros ya mencionados anteriormente por este estudio.

La eficiencia para un sumidero horizontal se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$E_H = E_0 + R_s(1 - E_0) \quad 0 \leq E_H \leq 1 \quad (\text{Ec. 5.6})$$

$$E_0 = 1 - \left(1 - \frac{W}{T}\right)^{2.67} \quad 0 \leq E_0 \leq 1 \quad (\text{Ec. 5.7})$$

$$R_s = \left(1 + \frac{0.0828 \cdot v^{1.8}}{I_x \cdot L^{2.3}}\right)^{-1} \quad 0 \leq R_s \leq 1 \quad (\text{Ec. 5.8})$$

Donde:

E_H = Eficiencia del sumidero

W = ancho del sumidero (m)

T = ancho de escurrimiento del caudal en la calle (m)

v = velocidad del caudal en la cuneta (m/s)

I_x = pendiente transversal del camino (m/m)

L = largo de la rejilla (m)

El parámetro omitido, es R_i , el cual dependía de una velocidad de salpicadura con un gráfico exclusivamente para los sumideros empleados en el estudio de FHWA.

Con esto se obtienen las eficiencias, para el sumidero SERVIU S2 con pendientes longitudinales de 0,5% y 1%, pendientes transversales 3% y 4%, para el sumidero SERVIU S3, con pendientes longitudinales 1% y 3%, pendiente transversal de 3% con las mismas condiciones de caudales que se hizo el estudio INH. Se hicieron estas combinaciones solamente ya que, son a las cuales estos tipos de sumideros se encuentran en el modelo a analizar.

SERVIU S2

Tabla 5.4 – Eficiencias método SERVIU sumidero S2

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	Z	h	T	A	v				Q captado
(%)	%	(l/s)	(1/ST)	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)	Rs	Es	EH	(m ³ /s)
0.5	3	20	33.3	0.0211	0.70	0.007	2.70	0.05	0.90	0.91	0.0182
0.5	3	40	33.3	0.0273	0.91	0.012	3.22	0.04	0.80	0.81	0.0322
0.5	3	60	33.3	0.0318	1.06	0.017	3.56	0.03	0.73	0.74	0.0443
0.5	3	80	33.3	0.0354	1.18	0.021	3.82	0.03	0.68	0.69	0.0551
0.5	3	100	33.3	0.0385	1.28	0.025	4.04	0.03	0.64	0.65	0.0652
0.5	3	120	33.3	0.0412	1.37	0.028	4.23	0.03	0.61	0.62	0.0746
0.5	4	20	25.0	0.0235	0.59	0.007	2.91	0.06	0.96	0.96	0.0192
0.5	4	40	25.0	0.0304	0.76	0.012	3.46	0.05	0.87	0.88	0.0352
0.5	4	60	25.0	0.0354	0.89	0.016	3.82	0.04	0.81	0.82	0.0490
0.5	4	80	25.0	0.0395	0.99	0.019	4.11	0.03	0.76	0.77	0.0616
0.5	4	100	25.0	0.0429	1.07	0.023	4.34	0.03	0.72	0.73	0.0732
0.5	4	120	25.0	0.0459	1.15	0.026	4.55	0.03	0.69	0.70	0.0842
1	4	20	25.0	0.0206	0.52	0.005	3.77	0.04	0.99	0.99	0.0197
1	4	40	25.0	0.0267	0.67	0.009	4.48	0.03	0.92	0.92	0.0369
1	4	60	25.0	0.0311	0.76	0.012	4.96	0.03	0.86	0.87	0.0521
1	4	80	25.0	0.0347	0.87	0.015	5.33	0.02	0.82	0.82	0.0659
1	4	100	25.0	0.0377	0.94	0.018	5.63	0.02	0.78	0.79	0.0787
1	4	120	25.0	0.0403	1.01	0.020	5.90	0.02	0.75	0.76	0.0908

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.5 - Eficiencias método SERVIU sumidero S3

SL (pend. Long)	ST (pend. Transv.)	Qc (caudal total)	Z	h	T	A	v				Q captado
(%)	%	(l/s)	(1/ST)	(m)	(m)	(m ²)	(m/s)	Rs	Es	EH	(m ³ /s)
1	3	20	33.3	0.0185	0.62	0.006	3.51	0.01	0.95	0.95	0.0189
1	3	40	33.3	0.0240	0.80	0.010	4.17	0.01	0.85	0.85	0.0342
1	3	60	33.3	0.0279	0.93	0.013	4.61	0.01	0.79	0.79	0.0474
1	3	80	33.3	0.0311	1.04	0.016	4.95	0.01	0.74	0.74	0.0593
1	3	100	33.3	0.0338	1.13	0.019	5.24	0.01	0.70	0.70	0.0703
1	3	120	33.3	0.0362	1.21	0.022	5.49	0.01	0.67	0.67	0.0806
3	3	20	33.3	0.0151	0.50	0.004	5.29	0.01	0.99	0.99	0.0198
3	3	40	33.3	0.0195	0.65	0.006	6.30	0.01	0.93	0.93	0.0372
3	3	60	33.3	0.0227	0.76	0.009	6.97	0.00	0.88	0.88	0.0525
3	3	80	33.3	0.0253	0.84	0.011	7.49	0.00	0.83	0.83	0.0665
3	3	100	33.3	0.0275	0.92	0.013	7.92	0.00	0.79	0.79	0.0795
3	3	120	33.3	0.0295	0.98	0.014	8.29	0.00	0.76	0.76	0.0917

Fuente: Elaboración propia

Asimismo se realizan por los distintos métodos, ya explicados anteriormente, para los sumideros SERVIU S2 y S3, con las mismas combinaciones de pendientes y caudales. (Anexo digital F)

Realizados todos los cálculos correspondiente a la eficiencias por las diferentes metodologías, siguiendo el mismo cálculo como se presentó en el capítulo 4, bajo distintas combinaciones de pendiente y caudales, se ingresan al programa, en la parte de opciones del elemento oulets, como tabla de altura de escurrimiento versus el caudal captado. (Figura 5.14)

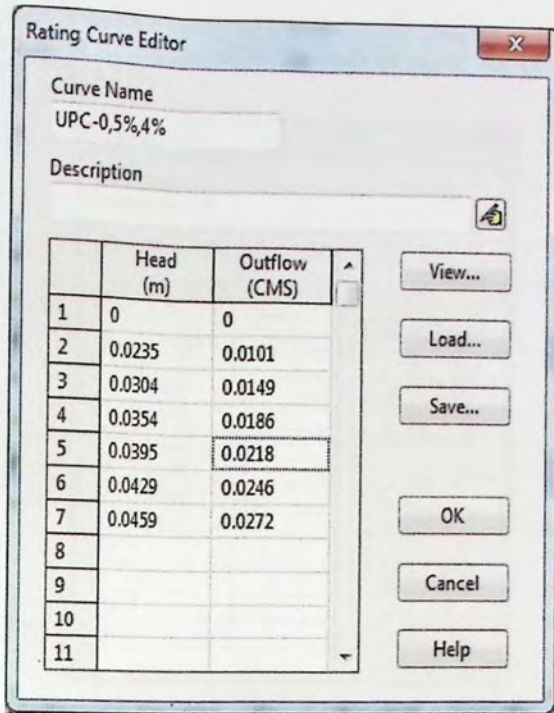


Figura 5.15 – Datos de altura y caudal captado en SWMM 5

En el Curve name, se le asignara la abreviación del nombre del método con la pendiente longitudinal y transversal, para tener más claro al momento de ejecutar. También se puede generar una visualización de cómo es la curva asociada a estos datos. (Figura 5.15)

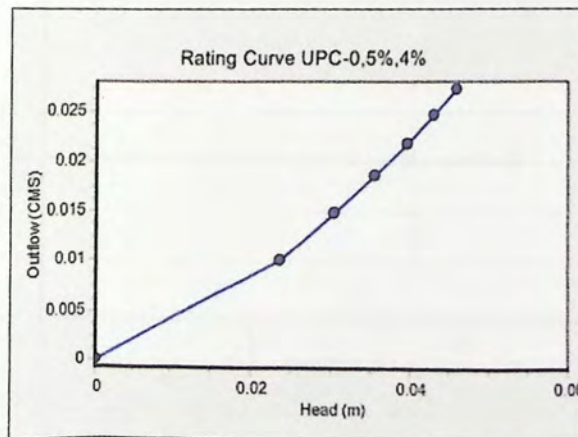


Figura 5.16 – Curva de altura y caudal captado en SWMM 5

Para los sumideros embancados o malos, se le asignara solo datos de altura de escurrimiento, ya que como están en malas condiciones, no captan nada de caudal, con esto se tiene un análisis más real del modelo. (Figura 5.16)

Rating Curve Editor

Curve Name
EMBAC-0,1%,5%

Description

	Head (m)	Outflow (CMS)
1	0	0
2	0.0345	0
3	0.0447	0
4	0.0521	0
5	0.0580	0
6	0.0631	0
7	0.0676	0
8		
9		
10		
11		

View...
Load...
Save...
OK
Cancel
Help

Figura 5.17 - Datos de altura y caudal captado en SWMM 5 para sumidero embancado

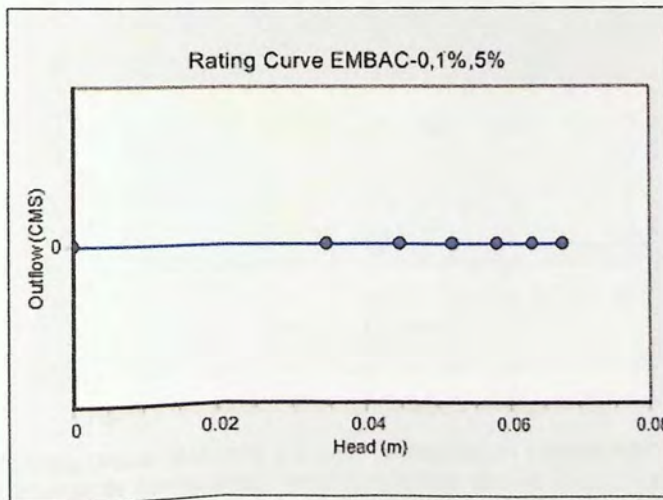


Figura 5.18 - Curva de altura y caudal captado en SWMM 5 para sumidero embancado

Al final se crearán 6 modelos, de los cuales uno contendrá los datos de eficiencia por el método INH (sumidero SERVIU S1) y la Guía de SERVIU (sumidero SERVIU S2 y S3). Los demás modelos serán las distintas metodologías (UPC, FHWA, JHU, UDFCD y Wallingford).

Para cada modelo también se le asignará una tormenta de diseño de periodos de retorno de 2, 5, 10 y 100 años con duraciones de 2, 6 y 12 horas.

5.3.5 Análisis de Resultados

Ya ingresados todos los datos, explicados anteriormente, para los 6 modelos bajo las distintas metodologías con su respectiva tormenta de diseño, se realiza la ejecución del programa SWMM 5.

Los datos de mayor interés, que se desean analizar, serán las alturas máximas de escurrimiento en la avenida costanera y las calles secundarias, que se visualizan en los nodos, donde se encuentran los sumideros. También un dato importante a analizar es la velocidad de escurrimiento, que se encuentran en los conduit (calles).

Estos dos parámetros (altura y velocidad) son factores de riesgo que se pueden encontrar bajo una tormenta de gran magnitud y generar anegamiento, daños estructurales, como también daños a la ciudadanía.

En el Manual de Drenaje Urbano menciona un ensayo de la Universidad Politécnica de Cataluña, que generó un estudio de la estabilidad de una persona en una calle antes distintas velocidades y alturas de escurrimiento en la vía, con esto creo unos rangos de riesgo que podría producirle al peatón.

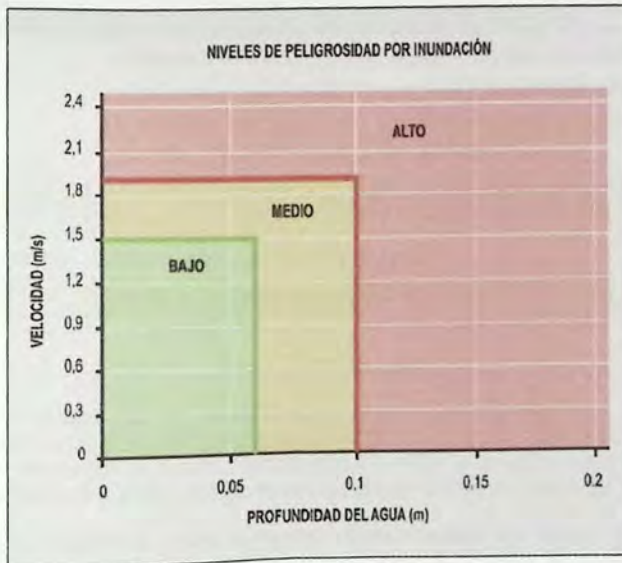


Figura 5.19 – Niveles de Peligrosidad por Inundación [1]

El Manual de Drenaje Urbano, menciona a su vez, las velocidades y alturas máximas en una calle para distintas tormenta de diseño, según también el tipo de vía. Con lo cual no generen mayores problemas a la ciudadanía y mantenga un funcionamiento óptimo del entorno antes estas tormentas de diseño.

Se puede observar los parámetros máximos en las siguientes tablas para los periodos de retorno de 2 años (tormentas menores) y 100 años (tormentas mayores)

Tabla 5.6 - Condiciones máximas de inundación para tormentas menores en calles urbanas

Tipo de vía vehicular	Condiciones máximas de inundación para tormentas menores
Todos los tipos	No sobrepasar el nivel de la solera. El ancho de inundación en la cuneta no debe superar 1,0 m para tormentas de 2 años de periodo de retorno
Pasajes	Dejar libre al menos 1 m a cada lado junto a la línea de edificación.
Locales y de servicio	Dejar libre, al menos, una pista* libre en cada sentido.
Colectoras y troncales	Dejar libre, al menos, una pista en cada sentido si la calle es de doble dirección, y una pista, si es de sentido único. En todo caso no debe inundar más de dos pistas en una dirección.
Expresas	Consultar las condiciones de diseño localmente. En general debe evitarse el flujo de agua sobre la calzada.

* Una pista corresponde a 3 m de ancho.

Fuente: Adaptado de [1]

Tabla 5.7 - Condiciones máximas de inundación para tormentas mayores en calles urbanas

Tipo de vía vehicular	Condiciones máximas de inundación permitida para tormentas mayores
Todos los tipos	La inundación no debe alcanzar el nivel de la línea de edificación. La profundidad máxima del agua en todo el perfil no debe superar 15 cm. La velocidad del agua debe proveer condiciones seguras para peatones y vehículos, con valores medios no superiores a 2,0 m/s.
Locales y de Servicio	El nivel del agua no debe sobrepasar la solera, y en todo caso ser menor de 15 cm.
Colectoras y Troncales.	Debe quedar una pista libre de agua.
Expresas	Consultar las condiciones de diseño.

Fuente: Adaptado de [1]

Ya teniendo claro cuáles son las velocidades y alturas máximas permitidas, para que no se generen problemas en las vías, se realiza una tabla con los resultados obtenidos por los 6 modelos bajo las distintas tormentas de diseño, destacando los nodos y conduits (calles) en los cuales se plasman valores mayores a estos, que generan dificultades en la vía. (Anexo digital G)

Se observa en las siguientes tablas y figuras representativas, las alturas de escurrimiento y velocidades críticas en el modelo, para tormentas menores, 2 años de periodo de retorno de duración 12 horas y tormenta mayores, 100 años de periodo de retorno, también 12 horas de duración.

Periodo de retorno 2 años, duración 12 horas.

Tabla 5.8 – Alturas de escurrimiento, T = 2 años con duración 12 horas

Nodo	ALTURAS DE ESCURRIMIENTO (m)					
	INH	UPC	FHWA	JHU	UDFCD	WALLINGFORD
36	0,87	0,87	0,9	0,87	0,89	0,89
34	0,61	0,62	0,64	0,61	0,63	0,64
29	0,32	0,34	0,37	0,31	0,4	0,32
33	0,31	0,31	0,34	0,31	0,32	0,33
73	0,31	0,39	0,94	0,31	0,49	0,86
14	0,22	0,24	0,22	0,22	0,24	0,23
27	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
48	0,19	0,36	0,34	0,07	0,39	0,36
296	0,19	0,22	0,22	0,14	0,23	0,22
26b	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18
41	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
10	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
292	0,16	0,2	0,21	0,04	0,21	0,21
284b	0,16	0,19	0,19	0,08	0,2	0,19

Fuente: Elaboración propia

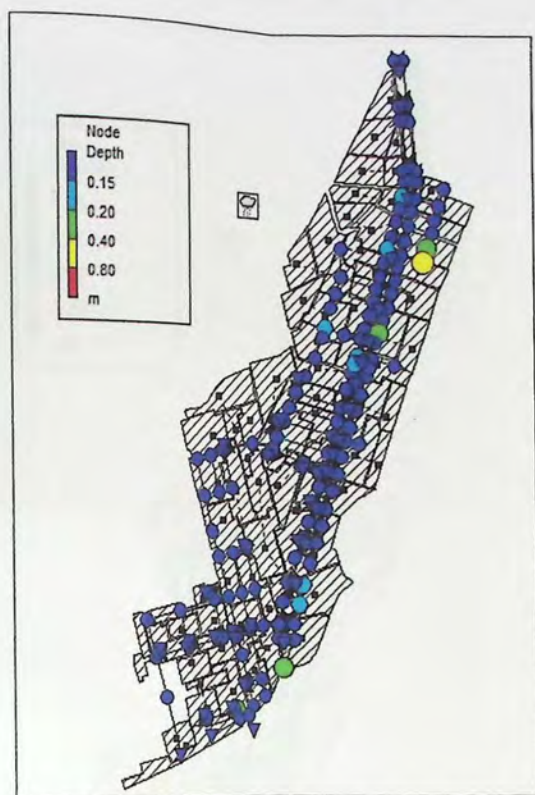


Figura 5.20 – Modelación SWMM 5, alturas de escurrimiento T = 2 años con duración 12 horas

Al realizar un contraste con las alturas de escurrimientos del modelo INH, entre las distintas metodologías, se puede concluir que no hay mucha variación de éstas, se generan alturas si, alrededor de 90 centímetros, se debe que en esos nodos no hay un sistema de captación superficial del caudal y están a contrapendiente (figura 5.19). Son pocos los nodos que sobrepasen la altura admisible según el manual, que son los 15 centímetros, altura de solera (Tabla 5.7).

Tabla 5.9 – Velocidades para T = 2 años con duración de 12 horas.

LINK (CALLES)	VELOCIDAD (m/s)					
	INH	UPC	FHWA	JHU	UDFCD	WALLINGFORD
15	1,07	1,12	1,06	1,05	1,15	1,08
18	1,06	1	1,11	1,12	0,92	1,09

Fuente: Elaboracion propia

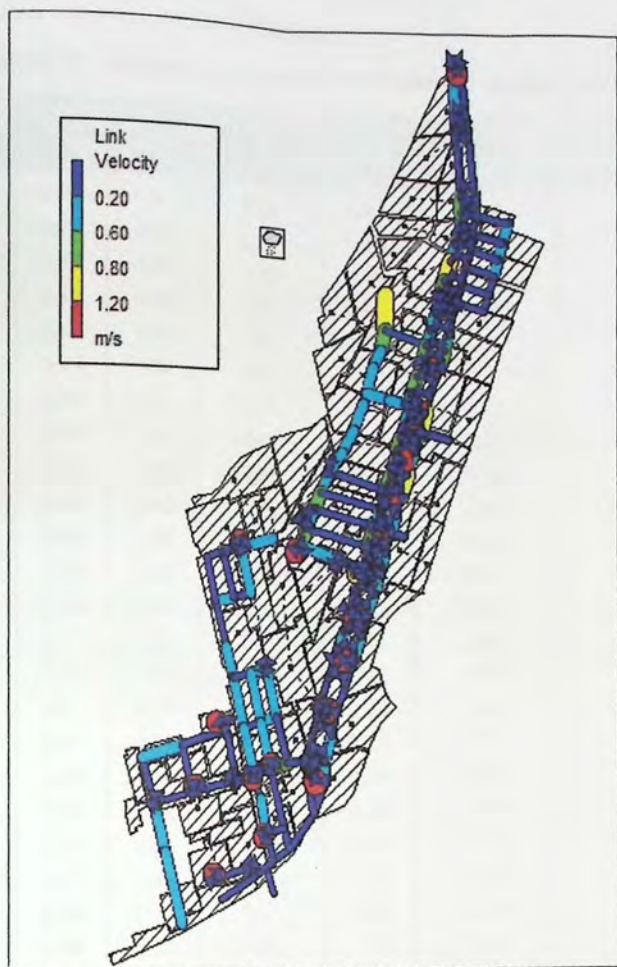


Figura 5.21 - Modelación SWMM 5, velocidades T = 2 años con duración 12 horas

Las velocidades no superan los 2,0 m/s (tabla 5.7), con cual no generan un riesgo para los peatones y vehículos. En la figura 5.20, se puede visualizar los tramos representativos. Nota: los puntos rojos en la figura no representan calles.

Periodo de retorno 100 años, duración 12 horas.

Tabla 5.10 - Alturas de escurrimiento, T = 100 años con duración 12 horas

NODOS	ALTURAS DE ESCURRIMIENTO (m)					
	INH	UPC	FHWA	JHU	UDFCD	WALLINGFORD
36	0,98	1	1,01	0,97	1,01	1,01
34	0,73	0,74	0,75	0,71	0,75	0,75
29	0,71	0,94	0,93	0,46	0,98	0,93
48	0,52	0,58	0,57	0,45	0,59	0,57
63	0,48	0,64	0,63	0,37	0,7	0,66
70	0,48	0,64	0,63	0,35	0,7	0,66
73	0,43	0,93	1,5	0,42	1,27	1,5
69	0,43	0,46	0,46	0,38	0,47	0,46
28	0,42	0,65	0,64	0,18	0,69	0,64
33	0,42	0,43	0,45	0,41	0,45	0,45
273b	0,42	0,65	0,64	0,18	0,69	0,64
49	0,37	0,42	0,41	0,3	0,44	0,42
47	0,36	0,41	0,4	0,29	0,43	0,41
14	0,31	0,32	0,31	0,31	0,32	0,31
76	0,31	0,47	0,45	0,2	0,52	0,49
296	0,3	0,31	0,31	0,27	0,32	0,31
292	0,3	0,31	0,32	0,23	0,32	0,32
27	0,29	0,36	0,35	0,25	0,38	0,35
290	0,28	0,29	0,3	0,22	0,31	0,3
65	0,27	0,43	0,42	0,16	0,49	0,45
68	0,27	0,42	0,41	0,13	0,48	0,44
285	0,26	0,27	0,27	0,23	0,28	0,27
284	0,26	0,28	0,28	0,23	0,29	0,28
283	0,26	0,28	0,28	0,23	0,29	0,28
274	0,26	0,34	0,32	0,22	0,37	0,33
284b	0,26	0,28	0,28	0,23	0,29	0,28
26b	0,26	0,34	0,32	0,23	0,35	0,33
44	0,25	0,26	0,26	0,23	0,27	0,26
45	0,24	0,26	0,25	0,22	0,26	0,25
54	0,24	0,29	0,3	0,23	0,29	0,3
291	0,24	0,25	0,26	0,18	0,26	0,26
289	0,24	0,25	0,25	0,2	0,26	0,25
70b	0,24	0,4	0,39	0,12	0,46	0,42
273c	0,24	0,31	0,3	0,2	0,33	0,31
17	0,23	0,24	0,24	0,21	0,25	0,24
18	0,23	0,26	0,25	0,19	0,27	0,25
41	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24

53	0,23	0,29	0,3	0,22	0,29	0,3
287	0,23	0,25	0,25	0,19	0,25	0,25
278	0,23	0,28	0,27	0,16	0,3	0,28
10	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
22	0,22	0,24	0,24	0,18	0,26	0,24
295	0,22	0,22	0,22	0,19	0,23	0,22
288	0,22	0,23	0,24	0,17	0,24	0,24
286	0,22	0,23	0,24	0,18	0,24	0,24
281	0,22	0,25	0,24	0,18	0,26	0,24
12	0,21	0,22	0,21	0,19	0,22	0,21
19	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21
294	0,21	0,22	0,22	0,19	0,22	0,22
293	0,21	0,22	0,22	0,2	0,22	0,22
277	0,21	0,25	0,24	0,14	0,26	0,24
276	0,21	0,25	0,24	0,12	0,26	0,24
276b	0,21	0,25	0,24	0,14	0,26	0,24
275b	0,21	0,25	0,24	0,14	0,26	0,25
25b	0,21	0,25	0,24	0,13	0,26	0,24
15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
24	0,2	0,25	0,24	0,11	0,26	0,24
52	0,2	0,25	0,27	0,19	0,26	0,27
297	0,2	0,21	0,21	0,19	0,21	0,21
282	0,2	0,22	0,22	0,16	0,23	0,22
23	0,19	0,22	0,22	0,13	0,23	0,22
25	0,19	0,24	0,23	0,04	0,25	0,23
46	0,19	0,2	0,2	0,18	0,21	0,2
275	0,19	0,24	0,23	0,04	0,25	0,23
297b	0,19	0,19	0,2	0,17	0,2	0,2
24b	0,19	0,22	0,22	0,13	0,23	0,22
274b	0,19	0,24	0,23	0,04	0,25	0,23
27b	0,19	0,24	0,23	0,04	0,25	0,23
43	0,18	0,2	0,2	0,17	0,2	0,2
1b	0,18	0,19	0,19	0,17	0,2	0,19

Fuente: Elaboracion propia

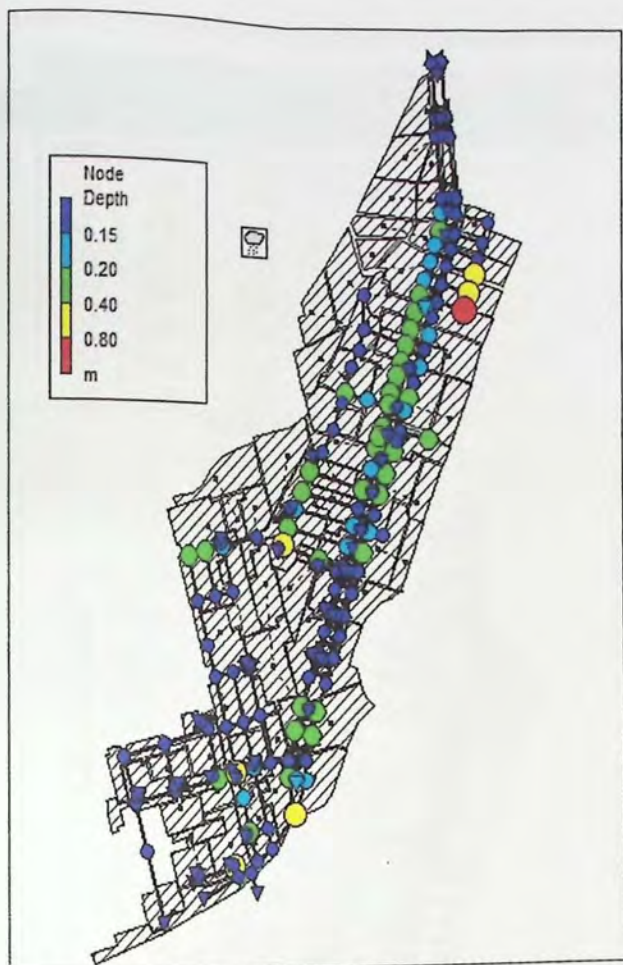


Figura 5.22 - Modelación SWMM 5, alturas de escurrimiento T = 100 años con duración 12 horas

Para un diseño de tormenta, 100 años de periodo de retorno, se generan muchos más nodos críticos que superan los 15 centímetros admisible, esto se debe a que es un diseño crítico, que en los peores casos podrían ocurrir y generar estos problemas que se observan (figura 5.21). No hay variación entre las distintas metodologías con INH, los valores de alturas son relativamente parecidos para este diseño.

Tabla 5.11 - Velocidades para T = 100 años con duración de 12 horas.

LINK (CALLES)	VELOCIDAD (m/s)					
	INH	UPC	FHWA	JHU	UDFCD	WALLINGFORD
15	1,32	1,31	1,26	1,37	1,29	1,27
40	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
3b_3	1,2	1,19	1,26	1,13	1,18	1,25
41	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13
58	1,12	0,76	0,75	1,17	0,69	0,69
18	1,07	0,96	1,03	1,26	0,9	1,02
294_293	1,06	1,05	1,05	0,99	1,05	1,05
298_297b	1,01	1,09	1,09	0,75	1,11	1,11

Fuente: Elaboración propia

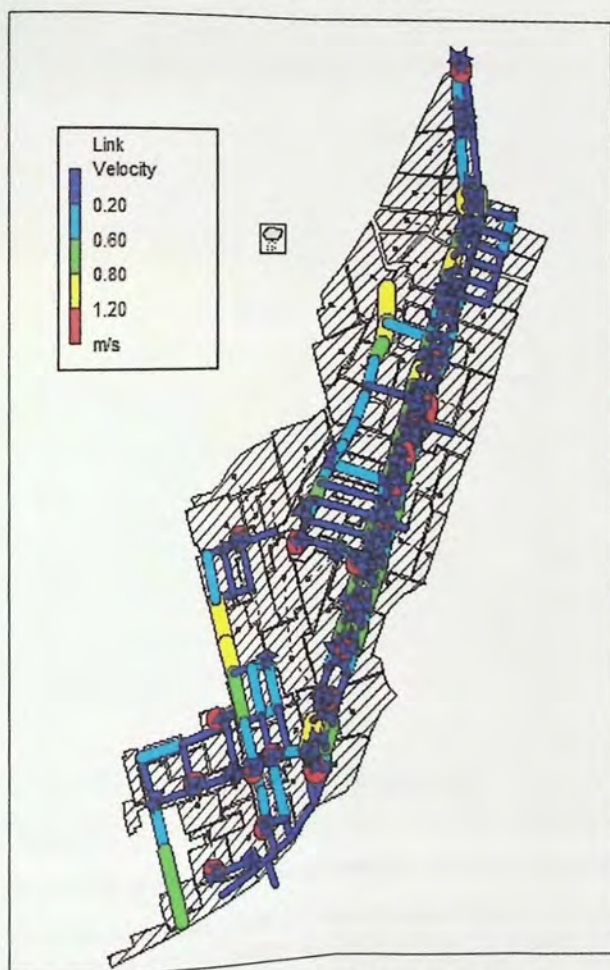


Figura 5.23 - Modelación SWMM 5, velocidades T = 100 años con duración 12 horas

Las velocidades mantienen sus rangos entre 1,30 y 1 m/s, con lo cual para una tormenta de diseño de 100 años de periodo de retorno, no generan problemas para la ciudad. Nota: los puntos rojos en la figura no representan calles.

Ya realizado este análisis, se concluye que en término de las velocidades no hay mayor riesgo, ya que son menores a 2,0 m/s, pero el problema se presenta en las alturas de escurrimiento, que en los casos más desfavorable son mayores a 1 metro, con lo cual sobrepasa en considerablemente lo mencionado en el Manual de Drenaje Urbano.

Como se explicó, en el estudio realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña, generaron unos niveles de peligrosidad por inundación que dependían de la velocidad y altura de escurrimiento en la calle. Para un mayor entendimiento se seleccionaron los datos anteriormente obtenidos (tabla 5.8 y 5.10) para ubicarlos en el grafico elaborado por la UPC, y observar que nivel de peligrosidad se encuentran estos modelos.

Niveles de peligrosidad por inundación, T = 2 años con duración 12 horas

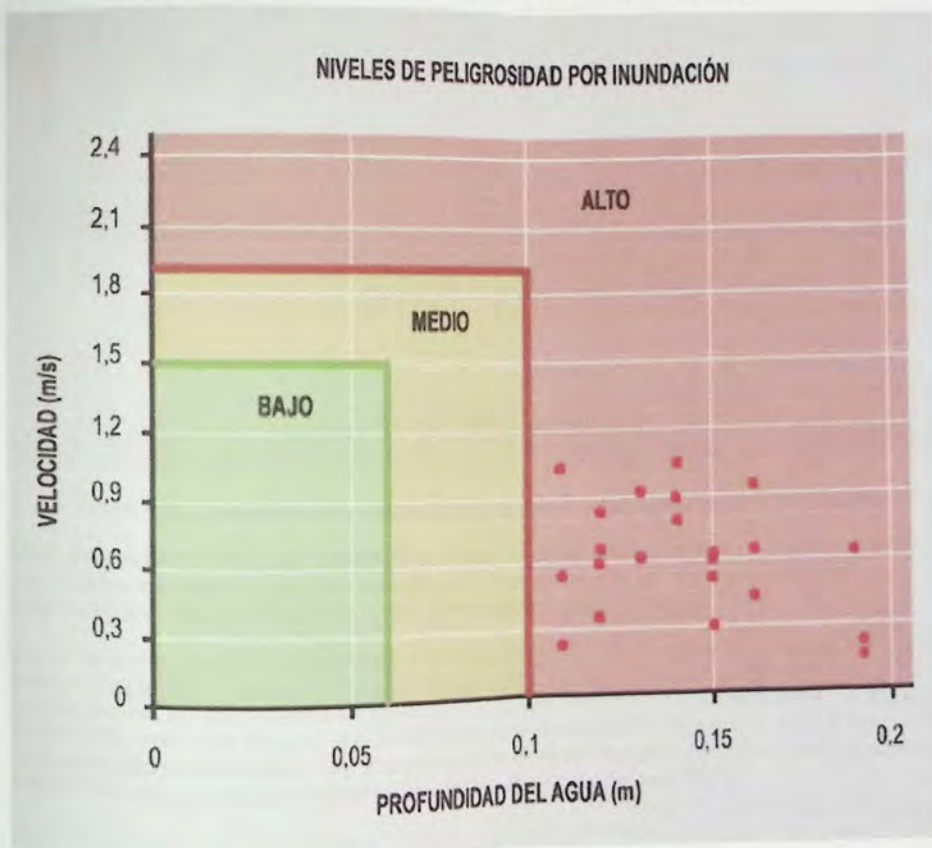


Figura 5.24 – Niveles de peligrosidad por inundación, T = 2 años con duración 12 horas

Nota: Se evaluaron solos datos hasta 20 cm de altura de escurrimiento, aunque según la tabla 5.8 hay valores mayores a estos sus velocidades correspondientes no superan los 1,2 m/s, solo se quiere destacar que se encuentran en el mismo rango de peligrosidad.

Niveles de peligrosidad por inundación, T = 100 años con duración 12 horas

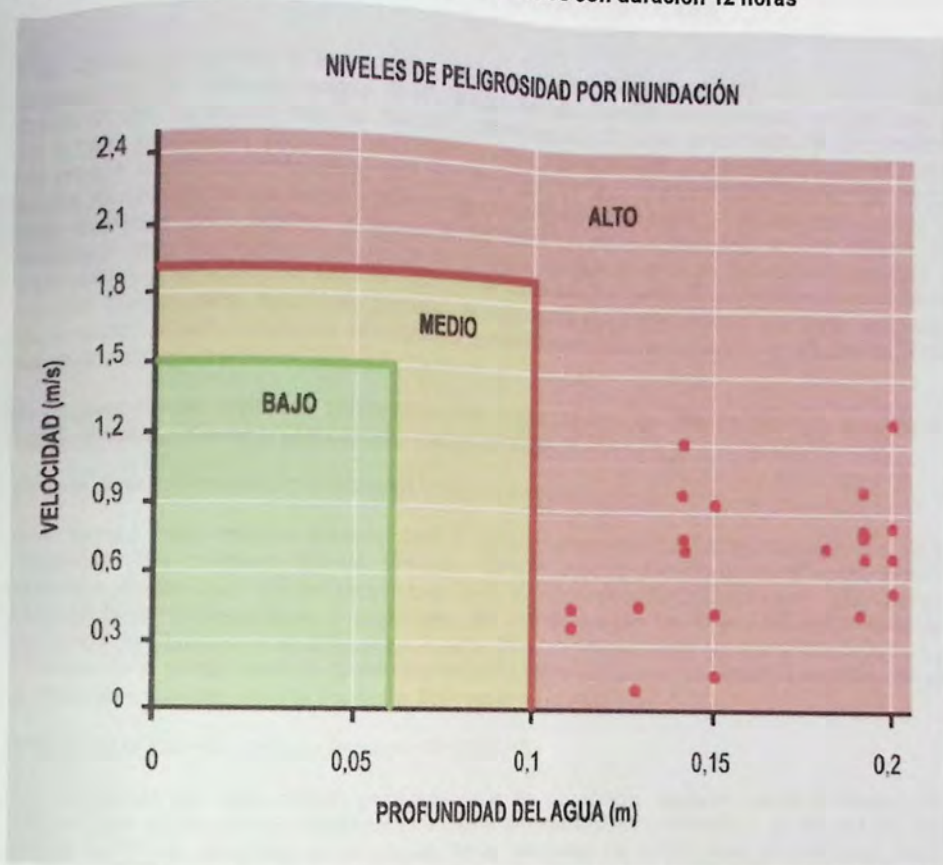


Figura 5.25 - Niveles de peligrosidad por inundación, T = 100 años con duración 12 horas

Nota: Se evaluaron solos datos hasta 20 cm de altura de escurrimiento, aunque según la tabla 5.10 hay valores mayores a estos sus velocidades correspondientes no superan los 1,5 m/s, solo se quiere destacar que se encuentran en el mismo rango de peligrosidad.

Como se puede observar, para ambas tormentas de diseño, de 2 años y 100 años de periodo de retorno y duración 12 horas, el nivel de peligrosidad es alto, según esta clasificación, ya que poseen alturas de escurrimientos elevadas, aunque sus velocidades son menores a 1,5 m/s. Esto quiere decir, como por ejemplo, que a un peatón se le es imposible desplazarse de una calle a otra ya que las alturas del agua en la solera sobrepasen en toda magnitud para dicha acción o que para un vehículo se vea afectado íntegramente y no pueda circular por las calles.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Este estudio comparativo de la capacidad hidráulica de captación de los sumideros entre el ensayo experimental del Instituto Nacional de Hidráulica con las diversas metodologías, concluyó que, a través de todo el análisis bajo las mismas o diferentes condiciones de caudales de aproximación en la calle, pendientes longitudinales y transversales a lo ensayado, y como también en los casos de nuevos sumideros o no ensayados en Chile, con distinta características geométricas (largo, ancho, disposición de las barras y número de huecos), hay que evaluar bien que método sería el más aceptable para obtener la eficiencia de captación de un sumidero ya que algunos se ensayaron bajo condiciones (geometría de la rejilla, caudal de entrada, pendiente longitudinal y transversal) ya establecidas que solo cumple en esos rangos dados, y en otros métodos solo se pueden utilizar para sumideros propios de sus ensayos, con lo cual no sería adecuado implementarlos para otros tipos de rejillas ya que los resultados de eficiencia no tendrían un grado de veracidad.

A continuación se menciona los factores más importantes para cada metodología después de haber generado todo el análisis en este trabajo de título

Método de la Universidad Politécnica de Cataluña (España)

Este estudio, bajo distintos ensayos, llegó a formulaciones más completas para el cálculo de la eficiencia, ante cualquier tipo de sumidero, siempre cuando cumpliera con el ancho y largo requerido donde eran válidas estas ecuaciones. Consideraron las disposiciones de las barras, longitudinales, transversales y diagonales, las cuales juegan un papel importante ante las captación del caudal que se aproxima a la rejilla. Otro factor importante que se tomó en cuenta, fue el ancho de la media calzada, generando rangos cuando estos eran diferentes, que dependían de la altura de escurrimiento y la pendiente transversal de la calle.

Método de la Federal Highway Administration (EEUU)

Las eficiencias por este método ante otros tipos de sumideros, generan ciertas incertidumbres, esto se debe a que, solo es válido para las rejillas ensayadas por este estudio, ya que el factor que influye en forma categórica en el cálculo, es la velocidad de salpicadura, obtenida bajo varios ensayos en Estados Unidos. Esta velocidad se logra mediante un análisis gráfico que solo considera unas curvas que depende del largo del sumidero y la velocidad que escurre en la calle, que son exclusiva para las características geométricas de los sumideros y la calles ensayadas. Cuando las velocidades de la calle superan los 6,0 m/s, este factor se ve afectado altamente, por ende se llega a generar eficiencias casi nulas.

Método de la John Hopkins University (EEUU)

Primer estudio para la capacidad de captación en los sumideros, no se tiene mayor información cuales fueron los rangos de caudales, pendientes transversales y longitudinales que se utilizaron en el estudio, ni tampoco los tipos de sumideros. Según lo antes mencionado, la acotación más importante que se realiza en este análisis, es que, en la formulación para obtener el largo teórico, necesario para poder captar todo el caudal, se logre un valor real, el ancho del escurrimiento del caudal en la calle no debe ser menor al ancho de la rejilla, si ocurre esto, se intuye que todo el caudal es captado por el sumidero, por ende este largo teórico es cero y la eficiencia es de un 100%. Por eso las eficiencias por este método siempre son sobredimensionadas como se analizó en los capítulos anteriores.

Método de Colorado State University para el UDFCD (EEUU)

Uso exclusivo para los sumideros ensayados por este estudio, depende de factores obtenidos por un análisis dimensional y ecuaciones empíricas, que dependen de las características geométricas

de la rejilla y la calle. Las eficiencias por este método siempre fueron menores comparadas con el estudio del Instituto Nacional de Hidráulica.

Método del HR Wallingford (UK)

Estudio realizado en el Reino Unido, ya que la Universidad Politécnica de Cataluña se basó en él, tienden abarcar los mismos parámetros que dependen de la disposición de las barras de la rejilla. Considero formulaciones exclusivas para los sumideros ensayados, pero al haber una discrepancia en el cálculo de la eficiencia ante otros sumideros, introdujo un coeficiente C_b , el cual depende de la disposición de los huecos en la rejilla. Para elevadas pendientes longitudinales y caudales la eficiencia disminuía drásticamente, llegando a valores 0.

Aunque las distintas metodologías, generan formulaciones, que en algunos casos tratan de englobar toda la problemática de la captación del caudal en una calle, siempre tienden una discrepancia en sus resultados. Quizás sigue siendo la manera más óptima para saber la real capacidad de captación mediante un estudio de laboratorio.

La recomendación que se puede implementar, al emplear esto en un diseño real, como se realiza con el programa SWMM 5, que no solo basta saber cuánto caudal capta un sumidero, sino también como se comporta el caudal en las calles, y como este se van acumulando, ya sea que vienen aguas desde las estructuras (veredas, edificios, etc.) o de otros sumideros que no captaron todo el caudal. Y así con esto tener una noción global a que distancia hay que ubicar los sumideros para que operen de forma óptima sin generar velocidades y alturas de escurrimiento muy elevadas, y no pongan en peligro el funcionamiento normal de una ciudad.

Quizás el enfoque más importante para la realización de un estudio de la capacidad hidráulica de un sumidero, es la característica geométrica de la rejilla (largo, ancho y disposiciones de barras), ya que es el elemento que está en contacto directo con el caudal que se genera en las calles, y por ende cuánta agua distribuirá hacia las cámaras y colectores.

Referencias bibliográficas.

- [1] Manual de Drenaje Urbano, Dirección de Obras Hidráulicas, 2013
- [2] M. Gomez y B. Russo. (2009), **"Methodology to Estimate Hydraulic Efficiency of Drain Inlet"**, Universidad Politécnica de Cataluña.
- [3] Brown et al. (1996), **"Urban Drainage Design Manual, Hydraulic Engineering Circular No. 22, Report No. FHWA-SA-96-078"**, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Technology Applications, Washington, DC.
- [4] FHWA (1997), **"Hydraulic and Safety Characteristics of Selected Grate Inlets on Continuous Grades"**, Vol. 1
- [5] Larry W. Mays (2004), **"Stormwater Collection Systems Design Handbook"**, Mc Graw – Hill
- [6] Li, W. H. (1956), **"Design of Storm-Water Inlets"**. Baltimore, MD: The John Hopkins University.
- [7] Comport et al. (2009), **"Hydraulic Efficiency of Grate and Curb Inlets for Urban Storm Drainage"**, The Urban Drainage and Flood Control District, Colorado State University
- [8] Russo B. (2009). **"Design of Surface Drainage Systems According to Hazard Criteria Related to Flooding of Urban Areas"**, Universidad Politécnica de Cataluña
- [9] Spaliviero F and May RWP (1998), Spacing of Road Gullies. Hydraulic Performance of BS EN 124 Gully Gratings. HR Wallingford, UK, internal report.
- [10] E. Kaliski y Cortez (2004), **"Estudio Experimental del Funcionamiento de Sumideros de Aguas Lluvias"**, Instituto Nacional de Hidráulica
- [11] Izzard, (1946), **"Hydraulics of Runoff from Developed Surfaces"**, Proc. Highway Research Board, Vol. 26, pp. 129–150, Highway Research Board, Washington, DC.
- [12] Catastro de sumideros del sector Santa Rosa, Temuco, SIGA
- [13] Guía de diseño y especificaciones de elementos urbanos de infraestructura de aguas lluvias, Servicio de Vivienda y Urbanismo, 2005