

TRINCHERAS DE RETENCIÓN / INFILTRACIÓN UTILIZADAS COMO SISTEMAS  
ALTERNATIVOS AL DRENAJE URBANO



Presentado por:

ANDRÉS FELIPE VANEGAS TAMAYO  
SERGIO HUMBERTO FLÓREZ VITOLA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.  
MAYO DE 2012



Presentado por:

ANDRÉS FELIPE VANEGAS TAMAYO

C.C.: 1.071.164.300 de Bogotá D.C.

SERGIO HUMBERTO FLÓREZ VITOLA

C.C.:1.015.414.616 de Cartagena, Bolívar.

Director:

ANDRÉS TORRES ABELLO

I.C., M.S.C., P.H.D.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

MAYO DE 2012



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE TRINCHERAS Y ANTECEDENTES</b> .....	<b>13</b>
2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE TRINCHERAS .....	13
2.2. EXPERIENCIAS REPORTADAS EN LA LITERATURA .....	16
2.3. TRINCHERAS DE INFILTRACIÓN .....	22
2.4. TRINCHERAS DE RETENCIÓN .....	24
<b>3. ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y CALIDAD DE AGUAS</b> .	<b>26</b>
3.1. HIDROLOGÍA .....	26
3.1.1. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD .....	26
3.1.2. INFILTRACIÓN .....	27
3.1.3. EXCESO DE PRECIPITACIÓN .....	28
3.1.4. MÉTODO RACIONAL .....	32
3.1.5. PERIODO DE RETORNO.....	32
3.1.6. RELACIONES INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) .....	32
3.1.7. CURVAS ALTURA-DURACIÓN-FRECUENCIA (HDF) .....	34
3.1.8. STORMWATER HOTSPOTS.....	35
3.2. HIDRÁULICA.....	36
3.2.1. FLUJO EN CANALES ABIERTOS.....	36
3.2.2. FLUJO UNIFORME .....	37
3.3. CALIDAD DEL AGUA .....	38
3.3.1. DIAGRAMA DE FASES.....	38
3.3.2. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL .....	39
3.3.3. SÓLIDOS .....	42
<b>4. ASPECTOS PRELIMINARES, CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>47</b>
4.1. CONSIDERACIONES GENERALES .....	47
4.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES .....	50
4.2.1. Consideraciones geotécnicas (CIRIA R145, 1995).....	50
4.2.2. Coeficiente de infiltración .....	52
<b>5. DISEÑO</b> .....	<b>53</b>
5.1. DISEÑO HIDROLÓGICO .....	53
5.1.1. MÉTODO HIDROLÓGICO PARA PEQUEÑOS EVENTOS DE LLUVIA	
53	
5.2. METODOLOGÍAS PARA DISEÑO COMPLETO.....	54
5.2.1. LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS .....	54

5.2.2.	METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN .....	63
5.2.3.	METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO PARA SISTEMAS DE INFILTRACIÓN .....	69
5.2.4.	BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE).....	73
5.2.5.	DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS POR INFILTRACIÓN ...	75
5.2.6.	METODOLOGÍA CHILE.....	76
5.2.7.	METODOLOGÍA MORA.....	79
5.3.	DISEÑO PRE-TRATAMIENTO .....	81
5.3.1.	CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN .....	81
5.3.2.	CUNETAS VERDES.....	81
5.4.	TRINCHERAS DE RETENCIÓN .....	83
<b>6.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>85</b>
6.1.	MATERIALES Y COMPONENTES EN LA CONSTRUCCIÓN .....	85
6.2.	ASPECTOS PREDOMINANTES.....	86
6.3.	PASOS Y CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CUALQUIER TÉCNICA SUDS .....	90
6.4.	CONSTRUCCIÓN DE LA TRINCHERA .....	93
<b>7.</b>	<b>OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.....</b>	<b>95</b>
<b>8.</b>	<b>APLICABILIDAD.....</b>	<b>97</b>
8.1.	EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA BOGOTÁ.....	97
8.1.1.	LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO.....	97
8.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA .....	98
8.1.3.	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO.....	98
8.1.4.	ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA .....	99
8.1.5.	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA .....	99
8.1.6.	LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA.....	100
8.1.7.	CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA.....	100
8.1.8.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO.....	101
8.2.	EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA CARTAGENA.....	122
8.2.1.	LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO.....	122
8.2.2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA .....	123
8.2.3.	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO.....	123
8.2.4.	ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA .....	123
8.2.5.	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA .....	123
8.2.6.	LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA.....	124
8.2.7.	CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA.....	124

8.2.8.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS.....	124
8.3.	EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA MEDELLIN.....	126
8.3.1.	LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO.....	126
8.3.2.	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA .....	126
8.3.3.	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO.....	126
8.3.4.	ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA .....	127
8.3.5.	ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.....	127
8.3.6.	LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA.....	127
8.3.7.	CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA.....	128
8.3.8.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS.....	128
<b>9.</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>130</b>
9.1.	RESULTADOS GENERALES .....	130
9.2.	ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS.....	133
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>138</b>
<b>11.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>140</b>
<b>12.</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>143</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>148</b>
	<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>220</b>
	<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>222</b>



## 1. INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir de los años se puede ver un claro aumento en la urbanización de la mayoría de los países del mundo (Boyle, 2004). Si esta tendencia continúa, para el 2030 más de la mitad de la población mundial vivirá en zonas urbanas, como se muestra en la siguiente gráfica:

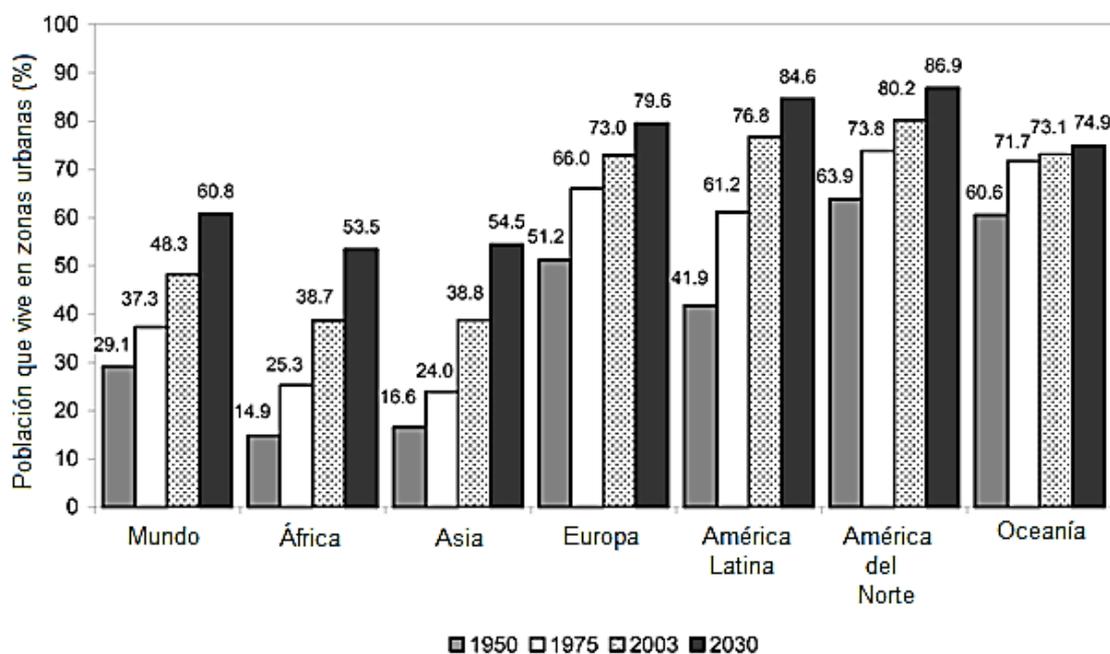
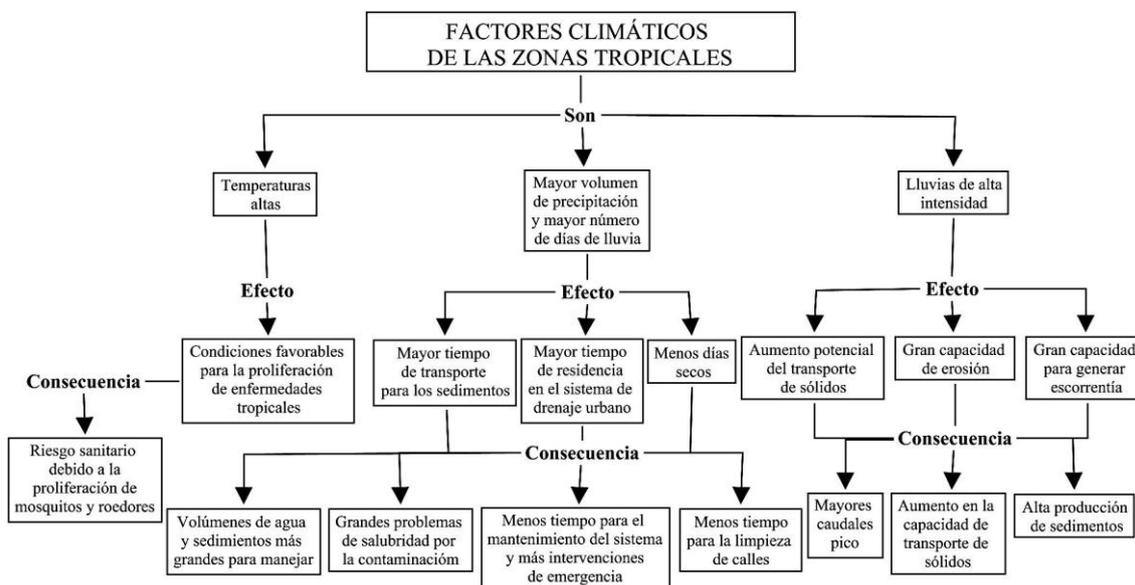


Figura 1-1. Proceso de urbanización creciente en el mundo (Naciones Unidas, 2004)

Debido a lo anterior, la escorrentía en zonas urbanas aumenta como resultado de la pérdida de procesos naturales como la infiltración, la retención, la evaporación y la evapotranspiración, entre otros. Como consecuencia de la urbanización, se conciben impactos como el aumento de caudales de escorrentía superficial, inundaciones en las zonas urbanizadas o aledañas al recorrido de la escorrentía urbana, erosión de bancos por corriente, sedimentación acelerada, disminución de la recarga de acuíferos, impacto negativos sobre el hábitat de ecosistemas naturales, impactos negativos sobre la salud pública, e impactos paisajísticos (EPA, 1999a).

Adicionalmente, esta escorrentía transporta gran variedad de contaminantes, encontrados durante el recorrido del flujo por las superficies de las ciudades. En efecto,

la escorrentía urbana presenta contaminantes como sedimentos, pesticidas, herbicidas, materiales orgánicos, metales, bacterias, nitrógeno y fósforo entre otros (EPA, 1999a).



**Figura 1-2. Factores climáticos de las zonas tropicales (Galarza & Garzón, 2005)**

Como respuesta a los impactos negativos anteriormente mencionados, en los últimos años, los sistemas de drenaje urbano tradicionales han comenzado a soportarse por nuevas técnicas que intentan simular los procesos naturales (antes de la urbanización), introduciendo metodologías de retención, infiltración y/o disposición de las aguas lluvias. A este grupo de tecnologías innovadoras se les conoce como las “Best Management Practices” (BMP’s) o Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), los cuales básicamente, al infiltrar y/o retener las aguas lluvias, impactan tanto en la disminución de la escorrentía (Freni *et al*, 2009) como también en la reducción de las cargas de contaminantes (Proton & Chocat, 2007).

Las estructuras de detención son aquellas que acumulan el agua de escorrentía y luego de un tiempo la liberan, en cambio en las de retención hay un almacenamiento, sin una descarga posterior de ésta, limitada a procesos de infiltración o aprovechamiento ((WEP) & (ASCE s.d.)). En general lo que se busca con estas estructuras, sin importar el sistema en particular, es tratar de emparejar el ciclo hidrológico del agua lluvia natural con el urbanizado (Torres, 2001), en términos de cantidad y calidad, teniendo en cuenta factores como la relación costo-efectividad. Los tres objetivos que un BMP intenta cumplir son: control de inundaciones, remoción de contaminantes y disminución

de la producción de éstos. En el control de inundaciones se incluye el manejo tanto del volumen como de la intensidad de descarga de las aguas lluvias. La remoción de contaminantes, siendo éstos los encontrados en las zonas urbanizadas y arrastrados por la escorrentía, depende de factores referentes a la zona, como lo son la topografía y la geología del lugar, el área a tratar, el comportamiento hidrológico de la zona, factores climáticos y los contaminantes característicos de la zona. La disminución de la producción de contaminantes hace referencia a los BMP's No Estructurales, y como tal, acoge técnicas como la no utilización de ciertos productos empleados comúnmente en las labores domésticas o diarias (EPA, 1999a).

En los BMP's Estructurales, se puede encontrar una amplia variedad de sistemas, tales como: sistemas de infiltración, sistemas de detención, sistemas de retención, sistemas de filtración, sistemas vegetales o bio-filtros, humedales artificiales, entre otros (EPA, 1999a).

Los sistemas de infiltración incluyen estructuras tales como estanques de infiltración, pavimentos porosos, trincheras de infiltración/retención y pozos de infiltración (EPA, 1999a). Los sistemas de infiltración están diseñados para capturar o captar aguas de escorrentía, retenerlas e infiltrarlas en el suelo. Lo anterior trae como consecuencia la disminución del caudal de escorrentía, reduciendo el potencial impacto causado por el exceso de caudal en zonas urbanas y la eliminación de contaminantes por medio de procesos como la percolación o la misma acción de los microorganismos encontrados en el suelo o la base de estos sistemas.

Por otro lado los sistemas de retención incluyen estructuras como estanques, tuberías y tanques. Entre las estructuras de retención/infiltración existen las trincheras, las cuales son comúnmente utilizadas para reducir la cantidad de flujo y contaminantes en las descargas de la ciudades durante los periodos de lluvia (Proton & Chocat, 2007). Se usan en zonas donde el espacio es reducido (< 2 hectáreas) (Santa & Quintero, 2010). Estos sistemas se conciben para controlar la hidrología en zonas urbanas, reduciendo los caudales pico (Raimbault & Metois, 1992) y el volumen total de la escorrentía (Balades *et al*, 1998).

Las trincheras de infiltración pueden ser descritas como excavaciones en el terreno las cuales son llenadas nuevamente con material muy permeable (como gravas por ejemplo). El caudal de escorrentía es retenido en el material de relleno hasta que éste, luego de un tiempo, se infiltra en el suelo. Generalmente cuentan con una profundidad de 0.6 a 3 metros, y su fondo debe estar como mínimo a unos 0.6 a 1.2 metros sobre el nivel freático. Las dimensiones de la trinchera están basadas en la máxima retención de agua en un tiempo determinado, por lo cual es importante conocer el tiempo de diseño de retención del flujo (Akan & Houghtalen, 2003). Estos sistemas han demostrado ser eficientes para controlar la escorrentía superficial y la frecuencia de las inundaciones (Browne *et al.*, 2011).

Las trincheras de retención difieren de las trincheras de infiltración en que las primeras, al captar el agua, no la infiltran sino que la redirigen, ya sea a un pozo de detención, un humedal artificial u otro sistema de drenaje. Estas trincheras cuentan con una base impermeable y se utilizan cuando el suelo es totalmente impermeable o su permeabilidad es muy baja. En la actualidad, debido a que el comportamiento de las trincheras de infiltración/retención se ve expuesto a una cantidad de factores y fenómenos dependientes de la zona, así como a la climatología y la topografía, se han generado modelos con el fin de simular el comportamiento real de una trinchera de retención, en cuanto a la remoción de contaminantes (Hurley & Forman, 2011) o la evolución de su desempeño a largo plazo (Proton & Chocat, 2007).

A pesar de que en Colombia se han realizado algunos trabajos de investigación sobre el comportamiento hidráulico y de retención de contaminantes, así como la colmatación y los efectos financieros de los SUDS (Torres *et al.*, 2009), no existe aún en nuestro medio un documento en español que reúna los procesos de diseño, construcción y mantenimiento de éstos aplicables en las principales ciudades del país. Esta falta de información podría ser una de las causas de la falta de aplicación de estas técnicas de drenaje en Colombia. Con el fin de hacer un aporte que permita disminuir esta falta de información en nuestro medio, este proyecto busca describir y analizar los diferentes métodos que existen para el diseño, construcción y mantenimiento de las trincheras de retención/infiltración utilizadas como métodos alternativos al drenaje urbano.

En el capítulo dos de éste documento, se hace una breve descripción de las trincheras de retención e infiltración, además se mencionan algunos conceptos que se deben tener en cuenta en el momento de implementar estas técnicas. Seguidamente, en el capítulo tres, se encuentra el marco teórico, el cual constituye el fundamento de todo el trabajo, al presentar cada uno de los conceptos necesarios para la elaboración del mismo. En el capítulo cuatro, llamado aspectos preliminares, consideraciones y recomendaciones, se presentan las consideraciones generales que se deben tener en cuenta, en el momento de implementar estas técnicas. Las diferentes metodologías de diseño tanto hidrológicas como hidráulicas se presentan en el capítulo cinco, en este capítulo se enumeran y explican cada una de las metodologías encontradas en la literatura. En el siguiente capítulo que es el de construcción, se mencionan aspectos que se deben tener en cuenta en el momento de la construcción de estas técnicas SUDS. En el capítulo siete se mencionan los diferentes tipos de mantenimiento que deberán tener estas técnicas, para que con el pasar del tiempo no pierdan su eficiencia. Con base en los capítulos anteriores, se presenta el capítulo nueve el cual lleva como nombre aplicabilidad, en este capítulo se realizan dimensionamientos de trincheras para tres ciudades del país (Bogotá, Medellín y Cartagena), posteriormente se efectúan los análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, en los capítulos once y doce se encuentran las conclusiones y recomendaciones respectivamente del presente trabajo.

## 2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE TRINCHERAS Y ANTECEDENTES

### 2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE TRINCHERAS

Las trincheras de infiltración y retención son excavaciones poco profundas rellenas de gravas u otros materiales porosos con el fin de crear vacíos y así generar un almacenamiento temporal de aguas lluvias. Luego de dicha interceptación, las aguas, según el tratamiento, pueden infiltrarse en el suelo o ser enviadas aguas abajo (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Las trincheras se pueden utilizar para la captura de flujos distribuidos o puntuales provenientes de un área de drenaje. Estos pueden funcionar como dispositivos amortiguadores de caudales pico. En general, se diferencian dos tipos de trincheras (Woods-Ballard *et al.*, 2007): (i) las trincheras de infiltración, las cuales infiltran el agua en el suelo, reduciendo las tasas y volúmenes de escorrentía superficial, ayudando a preservar el equilibrio natural del ciclo hidrológico, recargando los acuíferos y manteniendo un caudal base en los cursos de agua superficiales y (ii) las trincheras de retención que, ofrecen zonas de aquietamiento para la remoción de sedimentos finos, favoreciendo los procesos de filtración, adsorción y biodegradación. A continuación se mostrará un esquema típico de una trinchera:

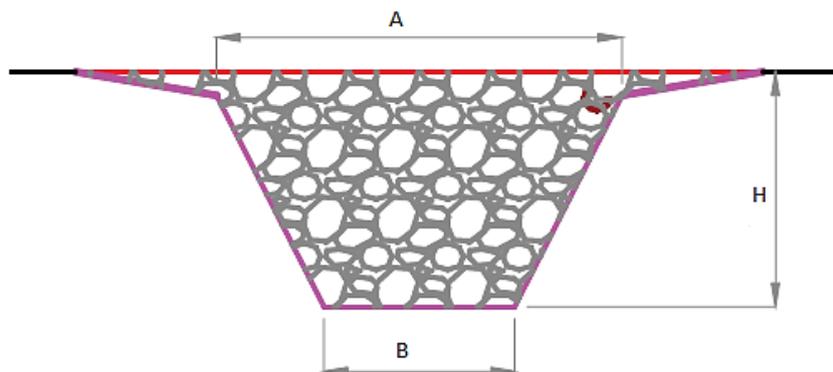


Figura 2-1. Esquema general de trincheras (Proton *et al.*, 2008)

Como se muestra en el esquema anterior, cualquier tipo de trinchera debe tener en cuenta los siguientes componentes o características en el momento de su construcción: sección transversal, longitud, pendiente, tipo de suelo, material poroso, número de desagües y disposición de estos y por último el modo de vaciado (Proton *et al.*, 2008).

Usualmente, las trincheras de infiltración/retención cuentan con capas filtrantes en su superficie y fondo, ya sea de grava fina o material particulado. En ciertos casos, se utilizan mallas geo-sintéticas las cuales pueden llegar a remplazar el material (gravas o arenas) empleados como filtro en los sistemas de infiltración. El material particulado presenta relaciones de vacío mayores, y por lo tanto capacidades de retención de contaminantes menores. Sin embargo, se utilizan a menudo para proporcionar zonas de almacenamiento adicionales en eventos extremos, en asociación con componentes complementarios de tratamiento (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

El material poroso es contenido alrededor de un geo-textil o una geo-membrana, dependiendo del caso. El geo-textil cumple la función de separación, impidiendo que el material fino presente en el suelo no penetre y se acumule en el material poroso, lo cual preserva la capacidad de almacenamiento de la trinchera. Si el suelo es poco permeable, el material que cubre la trinchera será una geo-membrana, la cual asegura capturar el volumen de escorrentía (Proton *et al.*, 2008).

Es importante señalar que las trincheras no están destinadas a funcionar como trampas de sedimentos: éstas funcionan de mejor manera cuando se emplean como técnicas de tratamiento de aguas. Los diseños de trincheras pueden ser modificados para que tengan una cubierta vegetal, y una capa que funcione como filtro la cual puede ser un geo-textil (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

En algunos casos, las trincheras pueden remplazar el sistema de tuberías convencionales, puesto que pueden ser utilizadas como estructuras de transporte y filtro de aguas lluvias, lo cual podría eliminar la necesidad de sardineles o canales que están adyacentes a las vías. Lo anterior se puede hacer siempre y cuando en la zonas de aplicación no se registren altos caudales de escorrentía (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Por esta razón, estas estructuras funcionan mejor cuando son incorporadas a otras técnicas de SUDS, con el propósito de mejorar el comportamiento en cuanto al manejo de escorrentía para eventos extremos (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

A continuación se muestra en la figura 2-2 un esquema general del funcionamiento de los diferentes tipos de trinchera (Woods-Ballard *et al.*, 2007):

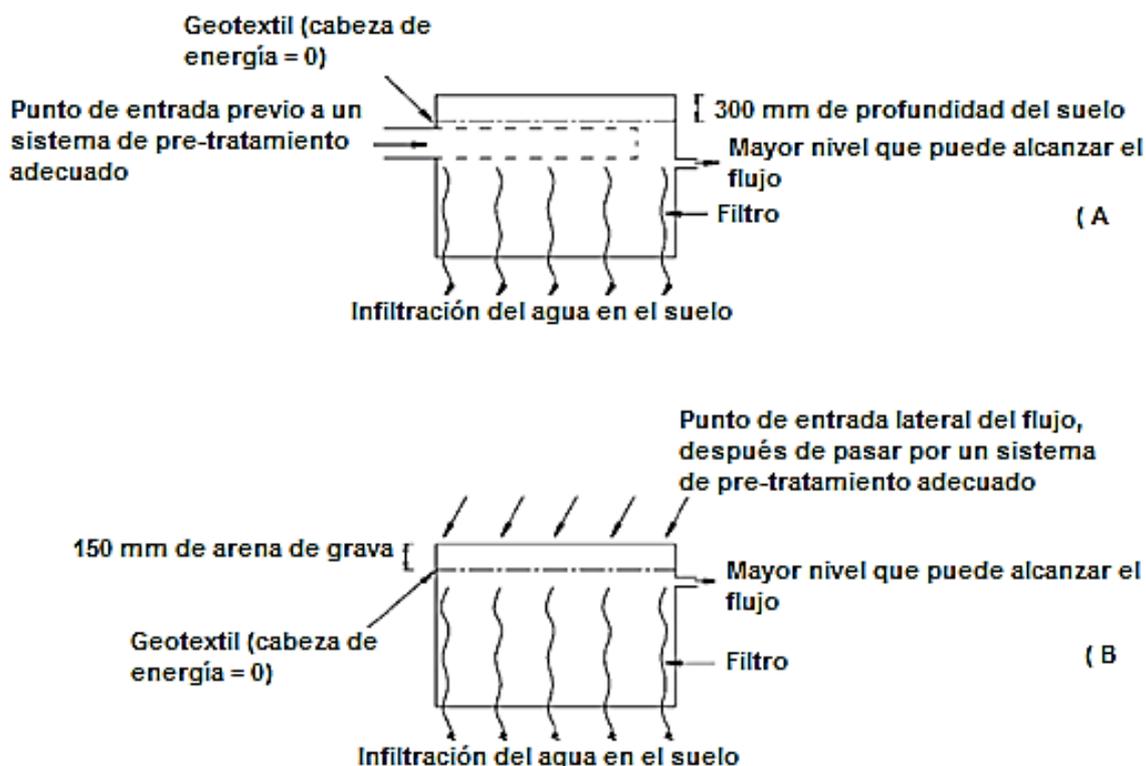


Figura 2-2. Esquema trincheras de infiltración (adaptado de Woods-Ballard *et al.*, 2007)

En la figura 2-2, se ilustran los dos principales medios de alimentación de una trinchera de infiltración. El primer esquema cuenta con una entrada puntual luego de un pre-tratamiento aguas arriba a la estructura. El segundo esquema cuenta con una entrada de escorrentía directamente por la superficie de la trinchera. Ambos sistemas, aún al contar con diferentes tipos de alimentación, presentan la misma función, la cual consiste en favorecer la infiltración de la escorrentía en el suelo. A continuación, el esquema general para una trinchera de retención con las dos posibles tipos de alimentación.

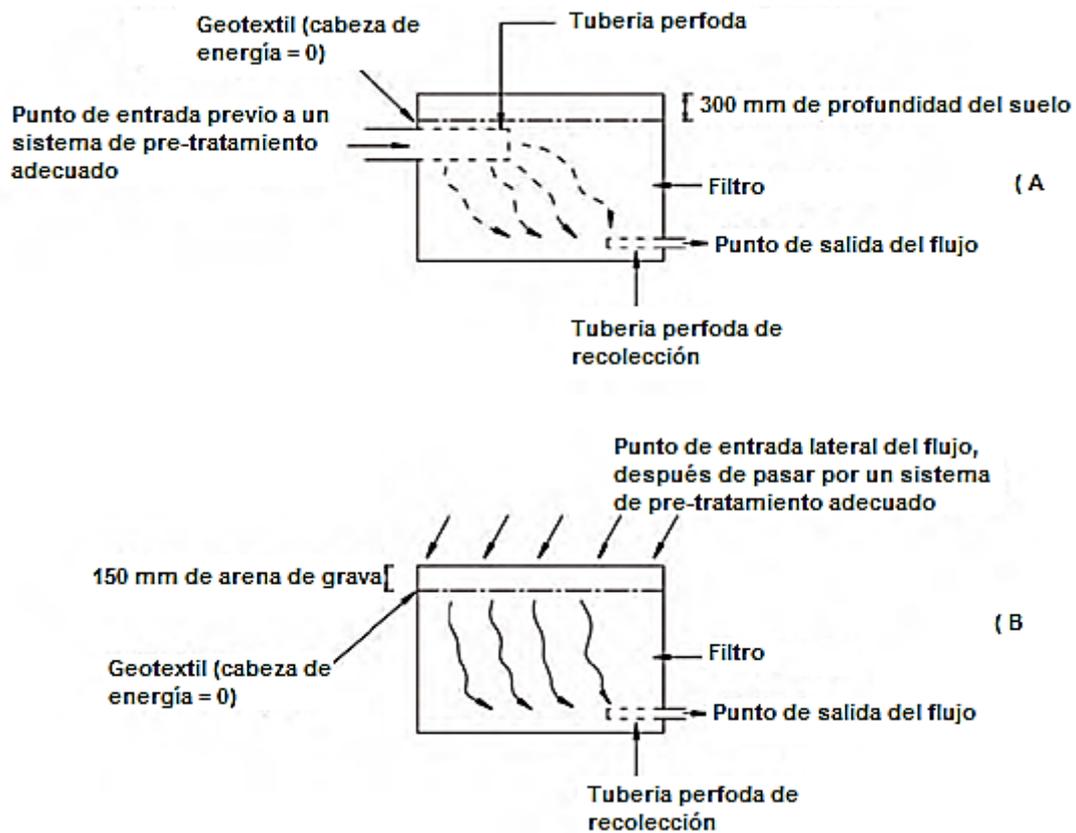
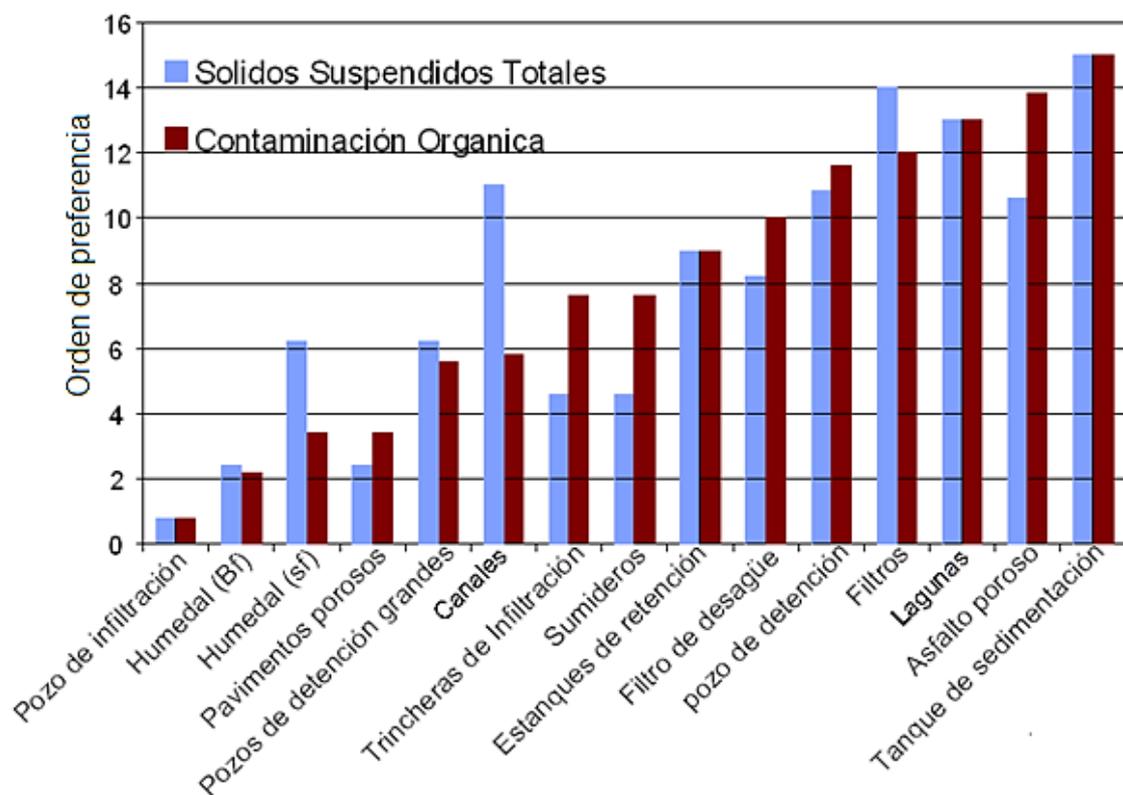


Figura 2-3. Esquema trincheras de retención (adaptado de Woods-Ballard *et al.*, 2007)

A diferencia del primer sistema, éste no intenta infiltrar el flujo en el suelo, usualmente debido a una baja permeabilidad, por lo cual, una de las funciones principales de las trincheras de retención es el retraso de los picos en el hidrograma de esorrentía de la superficie, captando el agua y redirigiéndola a una zona más adecuada para que ésta pueda ser tratada.

## 2.2. EXPERIENCIAS REPORTADAS EN LA LITERATURA

La Universidad de Middlesex, en Burroughs, London, UK, llevaron a cabo estudios para evaluar el nivel de mitigación de contaminantes de diferentes tipos de SUDS. La figura 2-4 ilustra el orden de preferencia de los diferentes tipos de SUDS, siendo el orden 1 la mayor puntuación y 15 la peor puntuación, en lo que concierne la retención de sólidos suspendidos (SST), y contaminación orgánica.



**Figura 2-4. Efectividad de diferentes SUDS en la remoción de contaminantes presentes en el agua (Ellis *et al.*, 2011)**

Como se observa, las trincheras de infiltración ocupan el cuarto y séptimo lugar en cuanto a la remoción de SST y contaminación orgánica, respectivamente.

La tabla 2-1 muestra el índice de la eficiencia de remoción de Solidos Suspendidos Totales (SST) ( $PMI_{TSS}$ ), el índice de mitigación de contaminantes de hidrocarburos poliaromáticos ( $PMI_{PAH}$ ), el índice de mitigación de contaminantes orgánicos ( $PMI_{Org}$ ) y el índice de mitigación de altas cargas de metales pesados ( $PMI_{HM}$ ) para diferentes SUDS. La escala de la tabla va de 0.0 a 1.0, en donde un menor valor indica mayor eficiencia de retención en el tratamiento respecto a los criterios anteriormente mencionados. Los resultados de la tabla indican la habilidad de los sistemas de promover la infiltración para remover los sólidos suspendidos totales (SST) y adicionalmente la degradación microbial para remover los contaminantes orgánicos. A continuación, la tabla de eficiencias de SUDS para los distintos parámetros de análisis:

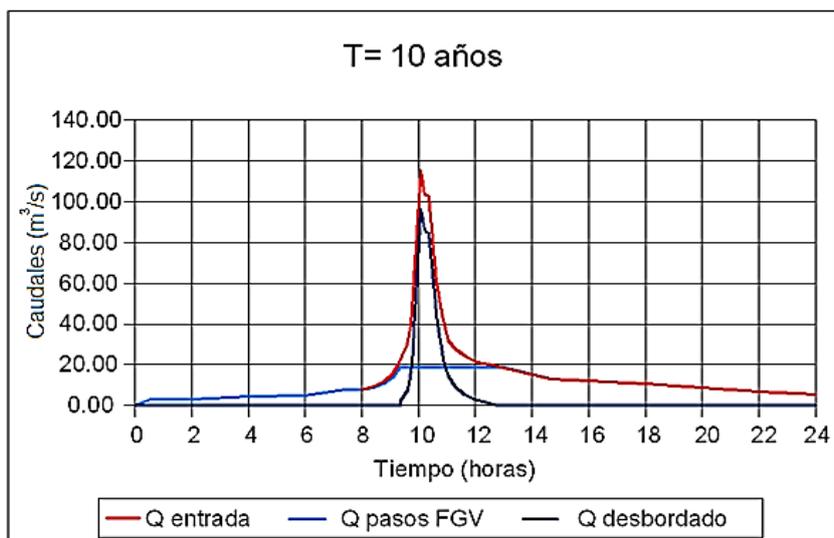
**Tabla 2-1. Eficiencia de SUDS para los distintos parámetros de análisis (Ellis *et al.*, 2011)**

TIPO DE SUDS	PMI <sub>SST</sub>	PMI <sub>PAH</sub>	PMI <sub>Org</sub>	PMI <sub>HM</sub>
Filtros de Drenaje	0.6	0.8	0.7	0.7
Asfaltos Porosos	0.7	0.9	0.9	0.9
Pavimentos Porosos	0.2	0.3	0.2	0.3
Tanques de Sedimentos	0.95	0.95	0.95	0.95
Techos Verdes	0.8 - 0.9	0.9	0.5	0.7 - 0.9
Canales filtrantes	0.9	0.8	0.8	0.7
Cunetas	0.7	0.6	0.4	0.4
Sumideros	0.3	0.6	0.5	0.5
Trincheras de Infiltración	0.3	0.6	0.5	0.5
Pozos de Infiltración	0.05	0.05	0.01	0.05
Estanque de Retención	0.6	0.5	0.6	0.5
Pozos de Detención	0.7	0.7	0.8	0.6
Pozos extendidos	0.4	0.4	0.4	0.4
Lagunas	0.9	0.9	0.9	0.8
Flujo Sub-Superficial	0.2	0.1	0.1	0.1
Flujo superficial	0.4	0.2	0.2	0.2
Tubería de Drenaje	1.0	1.0	1.0	1.0

Como se observa en la tabla 2-1, las trincheras de retención presentan eficiencias elevadas, en especial en lo que concierne los SST, lo que posiciona esta técnica como un elemento interesante para el control de la contaminación de cuerpos acuáticos urbanos.

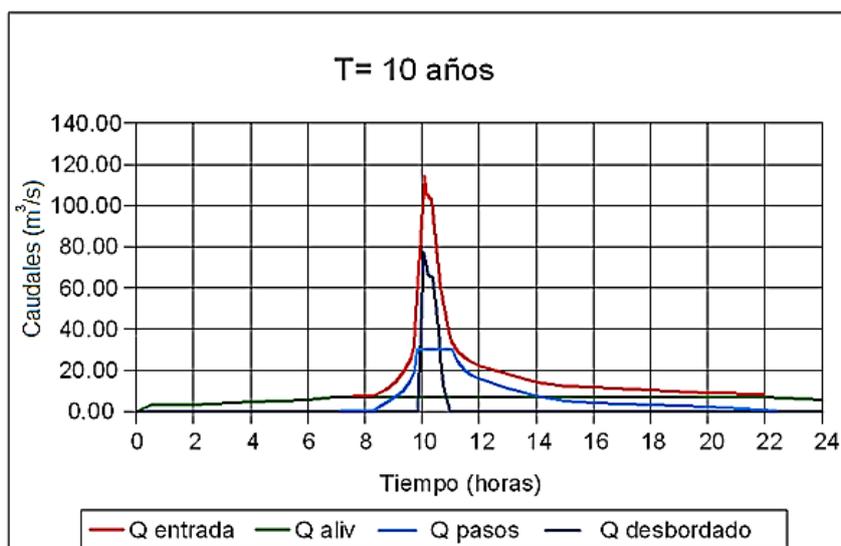
El siguiente conjunto de gráficas hace referencia a los resultados obtenidos antes y después de la implementación de una trinchera de infiltración en el municipio de Paterna situado en la provincia de Valencia, España (Altarejos, 2007).

La figura 2-5 presenta la gráfica correspondiente al hidrograma del parque Apeadero (zona de trabajo). Este hidrograma mostrado fue generado a partir de la herramienta HEC-HMS y modela la situación de la zona antes de la implementación de la trinchera.



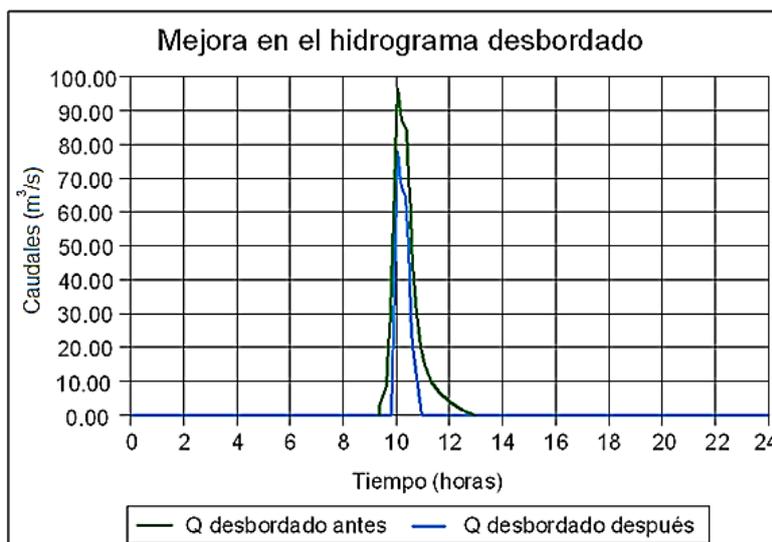
**Figura 2-5. Hidrogramas aguas abajo del Parque Apeadero antes de la actuación (T=10 años) (Altarejos, 2007)**

En la figura anterior se observan tres hidrogramas: el primero, etiquetado como “Q entrada” en la figura, representa el caudal de entrada al sistema en función del tiempo generado por una precipitación con un periodo de retorno de 10 años; el siguiente hidrograma etiquetado como “hidrograma de pasos”, representa la respuesta hidráulica de un alcantarillado convencional encontrado en la zona de trabajo para el caudal generado por el hidrograma de entrada; el hidrograma etiquetado como “hidrograma del caudal desbordado”, representa la evolución temporal del caudal que no puede ser transportado por el sistema convencional de alcantarillado.



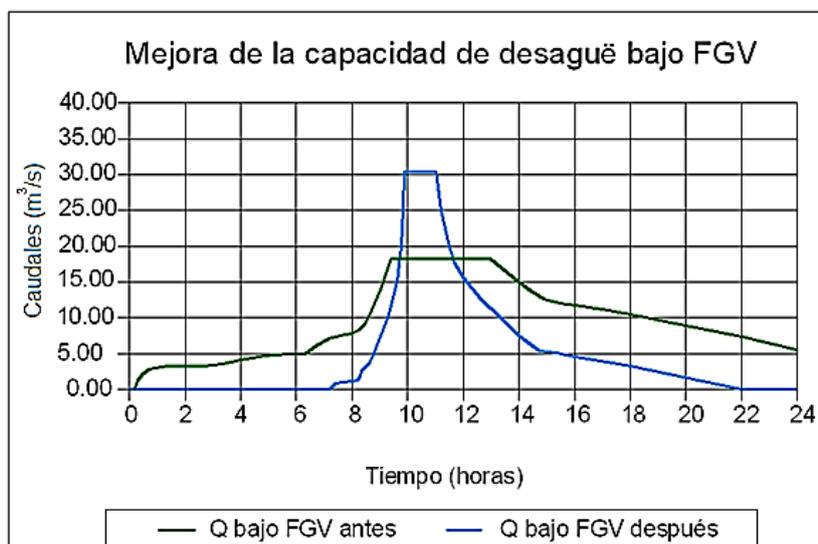
**Figura 2-6. Hidrogramas aguas abajo del Parque Apeadero después de la actuación (Altarejos, 2007)**

En la figura 2-6 se muestra la comparación entre los hidrogramas mencionados antes y el hidrograma correspondiente al considerar las trinchera de infiltración, etiquetado como “Q aliv” en la siguiente figura. La implementación de la trinchera reduce el caudal desbordado, disminuye el tiempo de desbordamiento significativamente de 3 horas y media a 1 hora en total. Además, al mejorar la calidad del agua la sección transversal del sistema convencional de alcantarillado es más efectiva, debido a que disminuye la cantidad de sedimentos en el flujo.



**Figura 2-7. Mejora en el hidrograma desbordado aguas abajo del Parque Apeadero (Altarejos., 2007)**

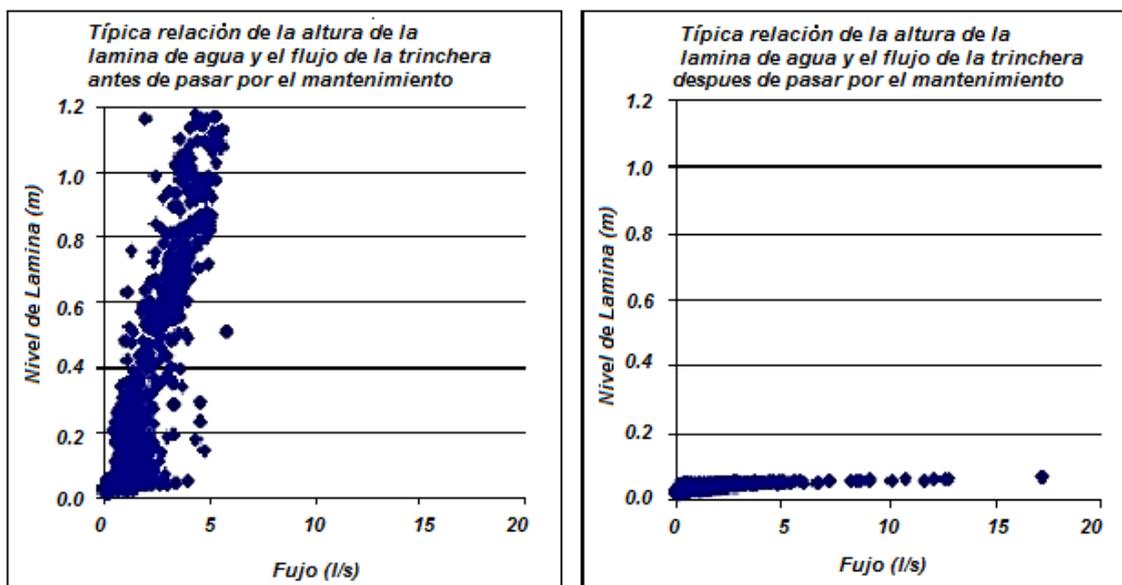
En la figura 2-7 se realiza una comparación entre los hidrogramas de desbordamiento, antes y después de la implementación de la trinchera. En términos generales, se disminuyó el tiempo de desbordamiento en un 70 % y el caudal pico de desborde disminuyó en un 20 % con relación al inicial.



**Figura 2-8. Mejora en la capacidad de desagüe aguas abajo del Parque (Altarejos, 2007)**

En figura 2-8 se compara la capacidad de desagüe del sistema de alcantarillado convencional y la implementación de la trinchera de infiltración. Es notable el aumento en la capacidad del sistema en cuanto al manejo de caudal, después de implementar este sistema.

Existen otros estudios reportados en la literatura sobre el mantenimiento y rehabilitación de las trincheras, por ejemplo un estudio realizado por Wolfram Schluter en Escocia, donde a partir de varias trincheras de infiltración y drenaje, llegó a una serie de conclusiones respecto a su evolución en el comportamiento de estas en el tiempo. A continuación, la comparación del rendimiento de una trinchera de infiltración, antes y después del mantenimiento periódico.

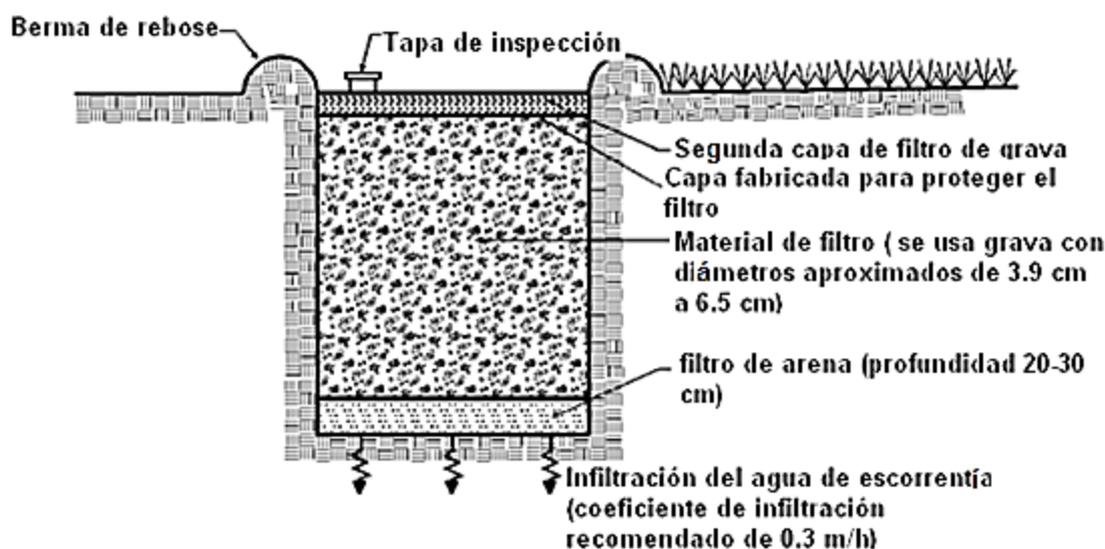


**Figura 2-9. Comportamiento hidráulico en función del mantenimiento (Schluter, 1992)**

La figura 2-9 muestra la relación entre el caudal transportado y la lámina de agua alcanzada por la trinchera. Se observa que antes del mantenimiento, la trinchera estudiada transportaba un caudal con una lámina de agua muy alta (alcanzando niveles superiores de un metro) y caudales inferiores de 5 l/s, pero después del mantenimiento, la sección logró transportar caudales mucho mayores con una lámina de agua mucho menor (inferior a 10 cm), disminuyendo el uso de la sección. Además, en cuanto a la reducción del caudal por infiltración, se documentó que la reducción del volumen del flujo pasó de un 23 % antes del mantenimiento a 40 % después del mantenimiento (Schluter, 1992).

### 2.3. TRINCHERAS DE INFILTRACIÓN

A continuación, se muestra el esquema general de la sección transversal de una trinchera de infiltración:



**Figura 2-10. Sección transversal de Trinchera de infiltración (Adaptado de Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)**

La siguiente tabla muestra las ventajas y desventajas de la aplicación de una trinchera de infiltración.

**Tabla 2-2. Ventajas y Desventajas de los SUDS (Urbonas & Roesner, 1992)**

Ventajas	Desventajas
La infiltración del agua lluvia posibilita la reducción de la escorrentía superficial vertida a la red de alcantarillado.	Durante su construcción se debe tener cuidado para evitar la obstrucción y contaminación de la trinchera.
Aumenta el tiempo pico en hidrogramas de escorrentía	Deben ser inspeccionadas con regularidad, principalmente luego de un gran evento
Posibilita la reducción del dimensionamiento de las redes de drenaje.	La colmatación está en función del tipo de suelo.
Son de uso sencillo, bajo costo y valorización paisajística.	Mantenimiento periódico
Preservación de la recarga natural del flujo subterráneo y mejora la calidad del agua.	Posibilidad de contaminación del nivel freático

Las trincheras de infiltración pueden llegar a remover un 90 % de los sedimentos, metales, coliformos y materia orgánica, y por lo menos un 60 % del fósforo y el nitrógeno encontrado en el flujo de entrada (Schueler, 1992). La remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) está estimada entre el 70 % y 80 %. Cabe recalcar que

la variabilidad de la eficiencia de las trincheras de infiltración depende de la buena escogencia del lugar, el diseño y el mantenimiento que a ésta se le dé.

Como referencia al buen uso de esta técnica, podemos encontrar lugares como Belo Horizonte, Brasil (Caputo *et al.*, 2011) y el Millcreek Expressway en Cincinnati, Ohio, USA. A partir de esta última se logran extraer tasas de eficiencia de remoción de contaminantes al aplicar la técnica (Sansalone *et al.*, 1999):

**Tabla 2-3. Tasas típicas de remoción en (%) (Schueler, 1992)**

Sedimentos	90 %
Fósforo total	60 %
Nitrógeno total	60 %
Metales	90 %
Bacterias	90 %
Desechos orgánicos	90 %
Demanda Bioquímica de oxígeno	75 %

Según lo mencionado anteriormente, las trincheras de infiltración son usualmente implementadas en suelos de alta permeabilidad. Sin embargo, en Suecia se implementaron trincheras de infiltración en suelos arcillosos con naturaleza impermeable, y se encontraron que éstas beneficiaron al suelo en mantener un nivel adecuado de humedad, minimizando el fenómeno de la consolidación del suelo y disminuyendo los asentamientos en las edificaciones. Se reportó que del caudal total entrante, sólo 2/3 de este evacuo la trinchera, por lo cual se concluye, que el tercio restante (en suelo arcilloso), se evaporo o se evapotranspiración (Holmstrand, 1984).

Por otro lado, en Alemania, no es permitida la recolección directa de la esorrentía a partir de trincheras de infiltración paralelas a autopistas, debido al grado de contaminación que estas aguas manejan (Schluter, 2005).

En cualquier tipo de trinchera, se puede encontrar distintos tipos de alimentación. A continuación, se muestra un esquema general de una trinchera de infiltración alimentada por un sistema de pre-tratamiento a partir de conexión directa:

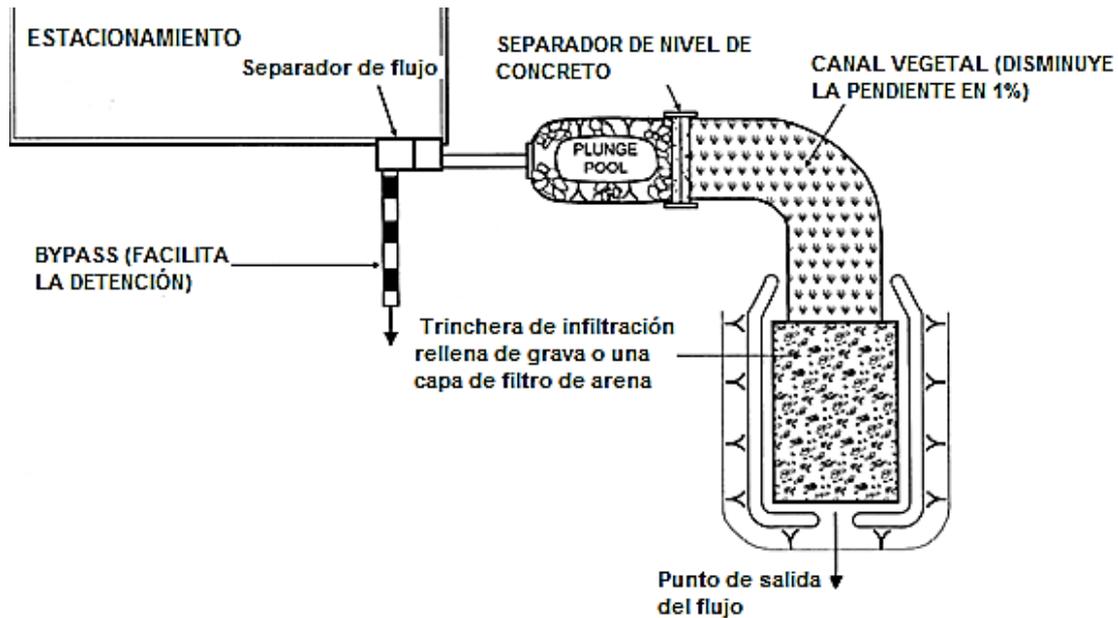


Figura 2-11. Trinchera de Infiltración con pre-tratamiento (Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)

#### 2.4. TRINCHERAS DE RETENCIÓN

Las Trincheras de Retención capturan cierto volumen de escorrentía y retienen ese volumen hasta que éste sea desplazado parcial o totalmente por el siguiente evento. El sistema completo incluye estructuras como estanques, tuberías y tanques de almacenamiento. Estas estructuras pueden servir para el manejo de la cantidad y la calidad de agua. El volumen de flujo se ve expuesto a mecanismos de remoción de contaminantes como lo es la sedimentación (EPA, 1999a).

La diferencia entre las trincheras de retención e infiltración es que estas últimas infiltran el agua a través del suelo y las de retención redirigen el flujo, ya sea a un pozo de detención, un humedal artificial u otro sistema de drenaje. Estas trincheras cuentan con una base impermeable: el motivo de esta diferencia se debe a que el suelo natural en donde se ubica la trinchera normalmente es muy poco permeable, por lo cual, infiltrar el volumen de escorrentía tardaría mucho tiempo, aumentando las dimensiones de las trincheras o aumentando la duración de la lluvia de diseño.

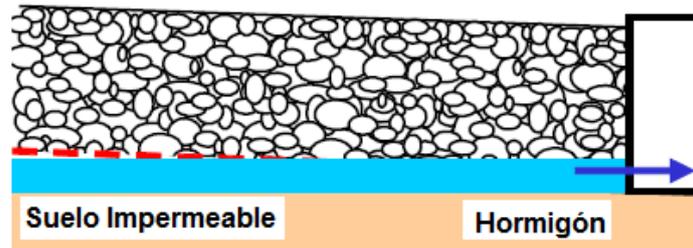


Figura 2-12. Esquema de evacuación de la escorrentía por una trinchera de Retención (Proton *et al.*, 2008)

En la siguiente figura, se mostrará la sección transversal de una trinchera de retención con sus típicos componentes:

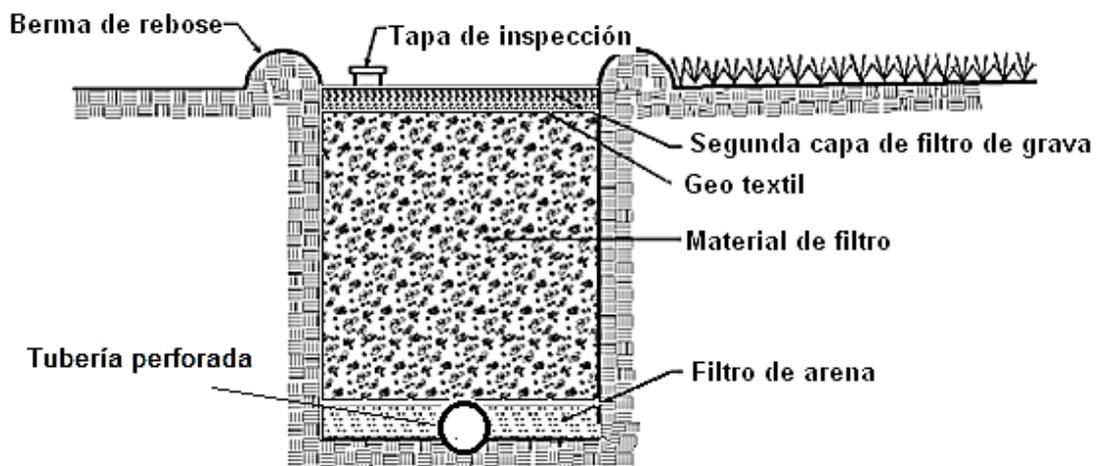


Figura 2-13. Sección transversal de Trinchera de retención (Adaptado de Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)

### 3. ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y CALIDAD DE AGUAS

---

Este capítulo abarca todo lo referente al marco teórico necesario para el entendimiento y desarrollo de las metodologías de diseño, construcción y mantenimiento de trincheras presentadas más adelante.

#### 3.1. HIDROLOGÍA

##### 3.1.1. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD (*Chow et al., 1994*)

En la hidrología, la conservación de masas es un principio básico para la solución de problemas. La ecuación siguiente describe la conservación de la masa para un flujo no permanente de densidad constante.

$$\frac{dS}{dt} = Q(t) - I(t) \quad (3-1)$$

Donde

$S$ : Volumen almacenado

$\frac{dS}{dt}$ : Tasa de cambio de almacenamiento

$Q(t)$ : Volumen de salida en función del tiempo

$I(t)$ : Volumen de entrada en función del tiempo

La ecuación es producto del desarrollo de las ecuaciones generadas para el transporte de Reynolds.

Cuando el flujo es permanente, es decir,  $\frac{dS}{dt} = 0$  y se cuenta con un sistema cerrado (en donde no hay adición de masas en el trayecto), se puede describir el sistema con la siguiente ecuación:

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} Q(t)dt \quad (3-2)$$

Cuando el sistema es abierto, la ecuación anterior no es válida. Cabe resaltar que el ciclo hidrológico es un sistema cerrado, mientras que un evento hidrológico, donde hay un proceso de lluvia escorrentía, es un sistema abierto.

Teniendo en cuenta que la información hidrológica se encuentra normalmente disponible en intervalos de tiempo discretos, es necesario solucionar el problema por intervalos de tiempo y por lo tanto se puede utilizar la ecuación general de la ecuación de continuidad en la siguiente forma:

$$\int_{S_{j-1}}^j dS = \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} I(t)dt - \int_{(j-1)\Delta t}^{j\Delta t} Q(t)dt \quad (3-3)$$

Por lo tanto la relación entre volúmenes en distintos instantes es la siguiente:

$$S_j = S_{j-1} + \Delta S_j \quad (3-4)$$

Sustituyendo en la ecuación 3-3, se obtiene la ecuación discreta de continuidad:

$$S_j = S_0 + \sum_{i=1}^j (I_i - Q_i) \quad (3-5)$$

### 3.1.2. INFILTRACIÓN (Chow et al., 1994)

La infiltración representa el mecanismo del movimiento del agua dentro del suelo. Cuando la intensidad de lluvia  $i$  excede la tasa de infiltración, el agua se infiltra en la superficie del suelo a una tasa generalmente decreciente en el tiempo. La tasa de infiltración depende de la intensidad de lluvia, el tipo de suelo y sus propiedades (conductividad hidráulica, porosidad y contenido de humedad), las condiciones de la superficie y la capa vegetal.

La tasa de infiltración refleja la rapidez a la cual el agua entra al suelo desde la superficie. A partir de gráficas de la capacidad de infiltración del suelo, se muestra el comportamiento de éste con la evolución de un evento en el tiempo (ver anexo 13).

La ecuación de Horton para el cálculo de la tasa de infiltración representa la evolución de dicha tasa en el momento que ocurre un evento. La metodología se aplica siempre y cuando la intensidad del evento sea mayor a la tasa de infiltración del suelo:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt} \quad (3-6)$$

Donde

$f$  : Tasa de Infiltración

$f_o$  : Tasa inicial de Infiltración

$f_c$  : Tasa final de Infiltración

$k$ : Constante empírica

### 3.1.3. EXCESO DE PRECIPITACIÓN O PRECIPITACIÓN EFECTIVA (Chow et al., 1994)

Luego del proceso de infiltración y la retención de precipitación a partir de la superficie del suelo, el excedente se conoce como la precipitación efectiva. Este exceso de precipitación, al transportarse por la superficie de la cuenca, se le conoce como escorrentía superficial.

Las gráficas de exceso de precipitación en función del tiempo se conocen como hietogramas de exceso de precipitación. El exceso de precipitación relaciona la precipitación total con el hidrograma de salida de escorrentía.

Para el cálculo de la precipitación de exceso de un evento, se han desarrollado una variedad de metodologías, entre las que se encuentra la metodología del Soil Conservation Service (SCS). La metodología tiene en cuenta la profundidad adicional

del agua retenida en la cuenca  $F_a$ , la retención potencial máxima  $S$  y la abstracción inicial antes del encharcamiento en la zona  $I_a$ .

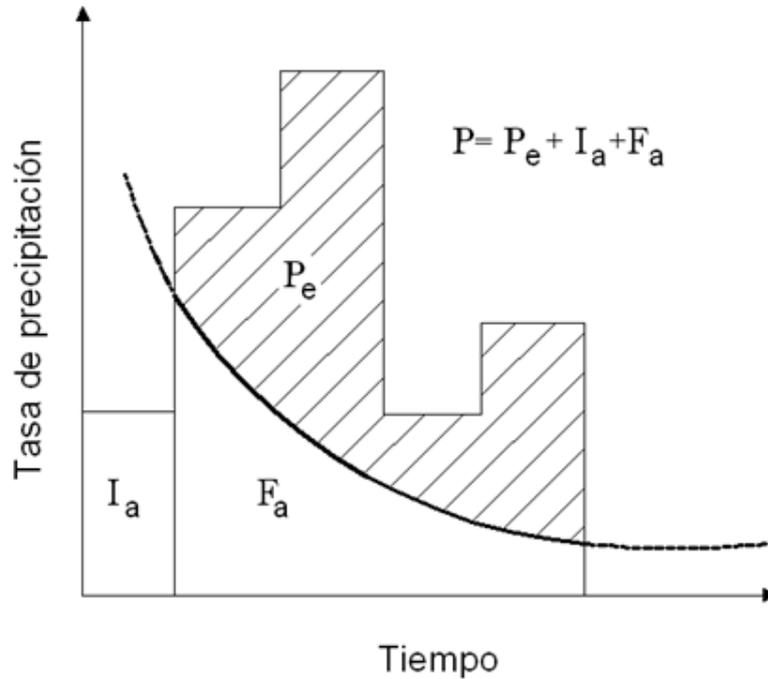


Figura 3-1. Método de abstracciones de precipitación del SCS (Chow *et al.*, 1994)

La metodología, a partir de la experimentación, determinó una relación empírica entre la abstracción inicial y la retención potencial máxima:

$$I_a = 0.2S \quad (3-7)$$

El método SCS se basa en una hipótesis inicial para poder generar relaciones entre los diferentes factores. Esta hipótesis supone que la relación entre las cantidades reales y las cantidades potenciales características del evento y el suelo son iguales. A continuación, se muestra la hipótesis y la base del método racional.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (3-8)$$

Remplazando la ecuación 3-8 en la ecuación hipótesis, se obtiene la solución al problema para el cálculo de la precipitación efectiva de un evento:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3-9)$$

Para llevar a cabo el cálculo de la retención potencial máxima del suelo, la SCS, a partir de la relación entre la escorrentía directa acumulada y la precipitación total acumulada de una gran cantidad de eventos, se realizó gráficos con las relaciones y llegó a una serie de curvas: toda curva tiene un número designado, mejor conocido como el número de curva (adimensional).

El número de curva refleja las propiedades físicas de la zona: el rango de números de curva ( $CN$ ) va de 0 a 100. Si tenemos un terreno con valor de número de curva de 1, quiere decir que la superficie es muy permeable, mientras que si contamos con una superficie con número de curva de 99, ésta se caracterizaría por ser prácticamente una zona impermeable.

La relación que hay entre el número de curva  $CN$  y la retención potencial máxima  $S$  es:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3-10)$$

La SCS realizó una tabla en la que relaciona el número de curva de escorrentía según el uso del suelo, ya sea tierra agrícola, suburbana y urbana. El número de curva varía según el grupo hidrológico del suelo. La SCS también desarrollo una clasificación para cuatro distintos tipos de suelo (tabla 3-2).

A continuación, en la tabla 3-1, se muestra la relación entre el número de curva, el tipo de suelo, los usos del suelo y las condiciones de este. Estos son los parámetros utilizados para la determinación del número de curva.

**Tabla 3-1. Relación número de curva de escorrentía según el uso del suelo (Chow *et al.*, 1994)**

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
<b>Tierra cultivada:</b>	Sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81
<b>Pastizales:</b>	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones optimas	39	61	74	80
<b>Vegas de rio:</b>	Condiciones optimas	30	58	71	78
<b>Bosques:</b>	Troncos delgados, cubierta pobre	45	66	77	83
	Cubierta buena	25	55	70	77
<b>Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc:</b>					
Óptimas condiciones: Cubierta de pasto en el 75 % o mas		39	61	74	80
Condiciones aceptables: Cubierta de pasto 50 % -75 %		49	69	79	84
<b>Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)</b>		89	92	94	95
<b>Distritos Industriales (72 % impermeables)</b>		81	88	91	93
<b>Residencial:</b>					
Tamaño promedio del lote (m <sup>2</sup> )	Porcentaje Impermeable (%)				
505 o menos	65	77	85	90	92
1010	38	61	75	83	87
1335	30	57	72	81	86
2020	25	54	70	80	85
4040	20	51	68	79	84
<b>Parqueaderos Pavimentados, techos accesos, etc</b>		98	98	98	98
<b>Calles y carreteras:</b>					
Pavimentos con cunetas y alcantarillado		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89

En la SCS existen diferentes números de curva según el grupo del suelo. Los cuatro principales grupos de suelos encontrados en la SCS son los siguientes:

**Tabla 3-2. Clasificación del suelo según la SCS (Modificado de Chow *et al.*, 1994)**

<b>Grupo A</b>	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
<b>Grupo B</b>	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
<b>Grupo C</b>	Margas Arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido porcentaje de arcilla.
<b>Grupo D</b>	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y algunos suelos salinos.

### 3.1.4. MÉTODO RACIONAL (*Monsalve S, 1995*)

En la hidrología, se conoce la ecuación 3-11 como la fórmula racional, la cual es ampliamente empleada para el cálculo del caudal de escorrentía generado por un evento lluvioso de características particulares:

$$QE = 0.278CiA \quad (3-11)$$

Donde

*QE*: Caudal de escorrentía directa

*C*: Coeficiente de escorrentía

*i*: Intensidad de lluvia

*A*: Área de drenaje

La fórmula racional arroja los valores del caudal *QE* pico, a causa de una intensidad de lluvia en un área de drenaje determinada. Dicho caudal es producido por esa precipitación en un rango de tiempo conocido como tiempo de concentración, el cual es requerido para el recorrido de la escorrentía superficial desde la parte más lejana de la cuenca hasta el punto en cuestión. Una forma común para la determinación de la intensidad *i* de lluvia es el uso de curvas de intensidad duración frecuencia (IDF), con las cuales se logran establecer las frecuencias *f* de los eventos lluviosos observados, a partir de su intervalo de observación *d* y su intensidad media *i*.

### 3.1.5. PERIODO DE RETORNO (*Chow et al., 1994*)

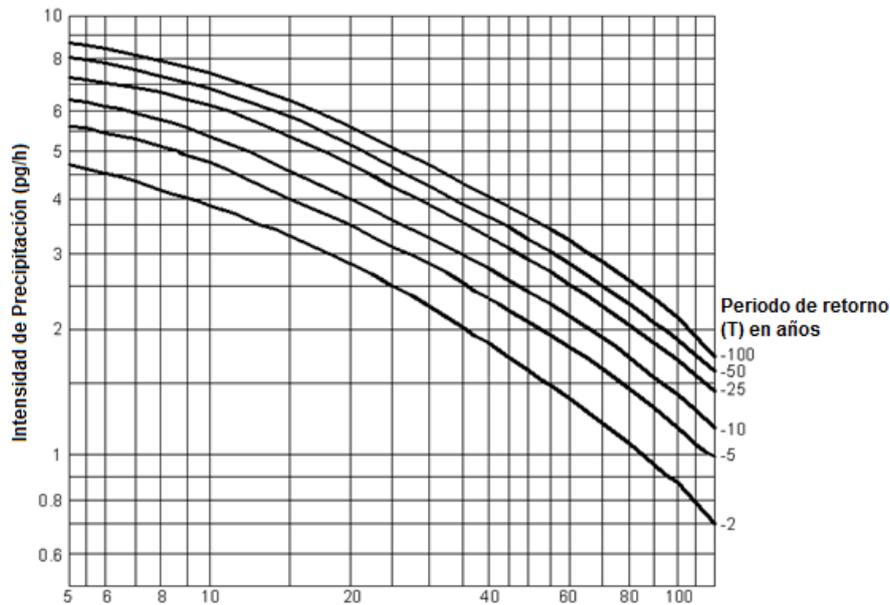
El periodo de retorno es el intervalo de tiempo promedio entre eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño.

### 3.1.6. RELACIONES INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) (*Chow et al., 1994*)

Es esencial en un proyecto determinar el evento o los eventos de lluvia que deben usarse para el diseño. Para esto, usualmente se recurre a un evento de diseño con cierta

intensidad y periodo de retorno según el tipo de obra y el sitio en donde el proyecto tomará lugar. Las curvas IDF resuelven el problema de la escogencia del evento de diseño relacionando los últimos aspectos mencionados.

A continuación se presenta una gráfica de curvas IDF para un lugar específico:



**Figura 3-2. Curvas intensidad-duración-frecuencia para lluvia máxima en Chicago, Estados Unidos (Chow *et al.*, 1994)**

En el eje vertical, se visualiza la intensidad y se entiende como la tasa temporal de precipitación; en el eje horizontal, se tiene la duración del evento y cada curva relaciona estos dos últimos factores con el periodo de retorno del evento de diseño con una duración y una intensidad característica.

La intensidad usualmente utilizada en las curvas IDF es la intensidad promedio, calculada a partir de la siguiente fórmula:

$$i = \frac{P}{T_d} \quad (3-12)$$

Donde

$P$ : Profundidad de lluvia (precipitación) (mm)

$T_d$ : Duración del evento  $P$  (h)

Las curvas IDF también pueden expresarse como ecuaciones con el fin de evitar recurrir siempre a la gráfica como solución del problema. Existen diferentes formas de expresar una curva IDF a partir de una ecuación:

**Tabla 3-3. Ecuaciones para curvas IDF**

<i>Ecuación de Wenzel (1982)</i>	$i = \frac{c}{T_d^e + f}$ (3-13)	<i>c, e y f</i> Son coeficientes que varían según el lugar y el periodo de retorno.
<i>Ecuación de Talbot</i>	$i = \frac{aT^b}{t + c}$ (3-14)	<i>t</i> : Duración del evento <i>a, b</i> y <i>c</i> Son parámetros de la ecuación según el lugar.
<i>Ecuación Potencial de Aparicio (1997)</i>	$i = \frac{kT^m}{(t + d)^n}$ (3-15)	<i>k, m</i> y <i>n</i> Son parámetros ajustados para todos los periodos de retorno de interés.
<i>Ecuación de Montana</i>	$i = C1 \cdot (X_0 + D)^{C2}$ (3-16)	C1 C2 Y X0 son coeficientes que dependen del periodo de retorno, D es la duración del evento

### 3.1.7. CURVAS ALTURA-DURACIÓN-FRECUENCIA (HDF)

Las curvas HDF son el resultado de multiplicar las curvas IDF por la duración del evento. La curva se rige a partir de la siguiente fórmula:

$$H(D, F) = I(D, F) \cdot D \quad (3-17)$$

A continuación, se muestra la figura 3-3, la cual que describe la forma de las curvas HDF.

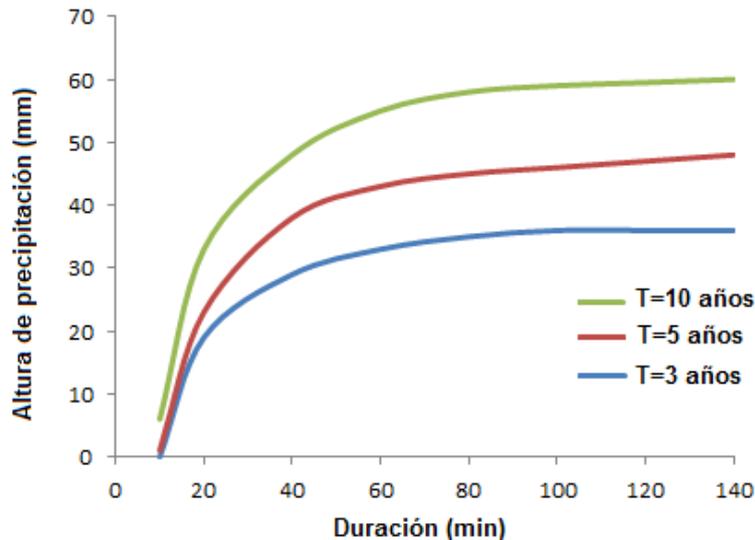


Figura 3-3. Curvas de altura-duración-frecuencia (HDF) (adaptado de Azzout *et al*, 1994)

Estas curvas determinadas estadísticamente representan la evolución de las alturas de precipitación para diferentes duraciones; también conocida como curvas envolventes.

### 3.1.8. *STORMWATER HOTSPOTS (PUNTOS DE ACCESO)* (Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)

Uso del terreno o actividad que genera mayores concentraciones de contaminantes que los encontrados en una típica escorrentía. Si el lugar o la descarga puntual específica son catalogados como un punto de acceso (hotspot), se deben tomar medidas en el manejo de la escorrentía.

La siguiente lista son los puntos de acceso (Hotspots):

#### *Usos del suelo y actividades consideradas como puntos de acceso (hotspots)*

A continuación se mencionarán algunos usos del suelo y actividades que se consideran puntos de accesos: Patios vehiculares e instalaciones de reciclaje, estaciones de gasolina, instalaciones para el servicio y mantenimiento de vehículos, instalaciones para la limpieza de vehículos, contenedores al aire libre, instalaciones de carga y descarga al aire libre, instalaciones para la generación y almacenamiento de materiales peligrosos, viveros, calles residenciales y carreteras rurales, zona institucional, áreas permeables a excepción de campos de golf, centros de jardinería y viveros, entre otros.

## 3.2. HIDRÁULICA

### 3.2.1. FLUJO EN CANALES ABIERTOS (*Chow et al, 2004*)

El flujo en canales abiertos se caracteriza por contar con una superficie libre, ya sea un flujo por un canal abierto o un tubo parcialmente lleno. Su principal diferencia con el flujo a presión es que el primer flujo cuenta con una superficie libre, la presión del flujo en su superficie es la presión atmosférica.

La energía del flujo en canales abiertos se expresa como la altura total del agua, la cual incluye la elevación por encima del nivel de referencia, la altura de presión y la altura de velocidad.

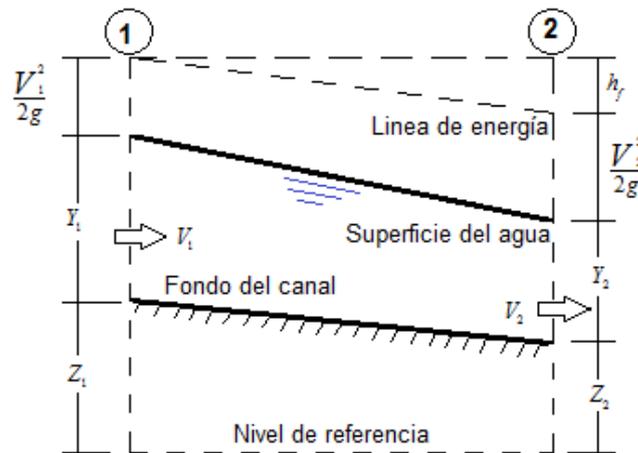


Figura 3-4. Flujo en canales abiertos (Adaptado de *Chow et al, 2004*)

Por lo tanto, la ecuación de energía total puede escribirse como:

$$H = z + d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3-18)$$

Donde

$z$ : Profundidad de posición ( $m$ )

$d$ : Distancia perpendicular desde la base del canal hasta la lámina de agua ( $m$ )

$\alpha$ : Coeficiente de Coriolis

$\theta$ : Inclinación del terreno

$H$  : Energía total ( $m$ )

La energía específica en un punto del canal es la energía medida con respecto al fondo del canal. Por lo tanto, la ecuación que describe la energía específica es la misma que aquella especificada en la ecuación 3-18 sin la energía potencial, suministrada por el nivel de referencia:

$$E = d \cos \theta + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3-19)$$

Para canales con una pendiente pequeña y  $\alpha = 1$  :

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (3-20)$$

Es decir, la energía específica es igual a la suma de la altura de la lámina de agua más la altura por la velocidad del flujo.

### 3.2.2. FLUJO UNIFORME (Chow et al., 2004)

En un canal abierto, el flujo encuentra resistencia en su camino hacia aguas abajo. Ocurre flujo uniforme cuando la fuerza de resistencia al movimiento del flujo se balancea con las fuerzas gravitacionales que apuntan en dirección contraria a ésta.

Lo que caracteriza un flujo uniforme es que su profundidad, su área mojada, su velocidad y su caudal en la sección son constantes. Como consecuencia, la línea de energía es constante y la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos.

Las principales expresiones que rigen la velocidad del flujo uniforme se encuentran en el anexo 10.

### 3.3. CALIDAD DEL AGUA

#### 3.3.1. DIAGRAMA DE FASES (Shackerlford F., 1998)

El diagrama de fases muestra el estado físico de la materia para diferentes combinaciones de presión y temperatura. El material a analizar se encuentra uniforme respecto a su composición química.

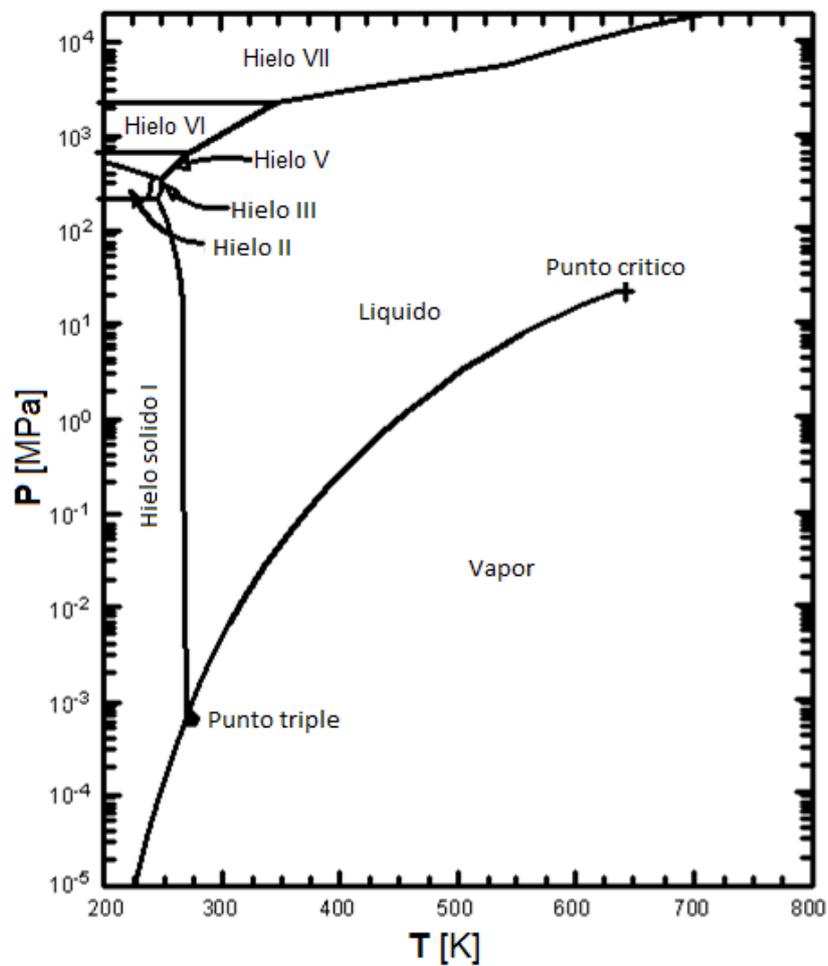


Figura 3-5. Diagrama de fase del Agua (Shackerlford F., 1998)

A partir de la gráfica 3-5, se puede encontrar todas las posibilidades en las que el agua pasa de un estado líquido a uno sólido.

### 3.3.2. ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La escorrentía producida por aguas lluvias en zonas urbanas se puede generar a partir de varias fuentes, como lo son: las aéreas residenciales, aéreas comerciales e industriales, caminos, vías, puentes, en general cualquier estructura que no permita la infiltración del agua puede producir escorrentía durante cualquier evento lluvioso. Por esta razón, las estructuras pueden alterar el ecosistema. Al no permitir que el agua se infiltre en suelo se está afectando el ciclo natural del agua, debido a que las aguas lluvias son las encargadas de recargar los acuíferos al infiltrarse, el agua almacenada en estos depósitos subterráneos naturales es aprovechada por árboles o plantas, los cuales posteriormente se encargan de evaporarla para que ésta pueda volver nuevamente a la atmósfera (EPA, 1999).

La siguiente figura muestra cómo se ve influenciada la escorrentía superficial producto de la urbanización de zonas:

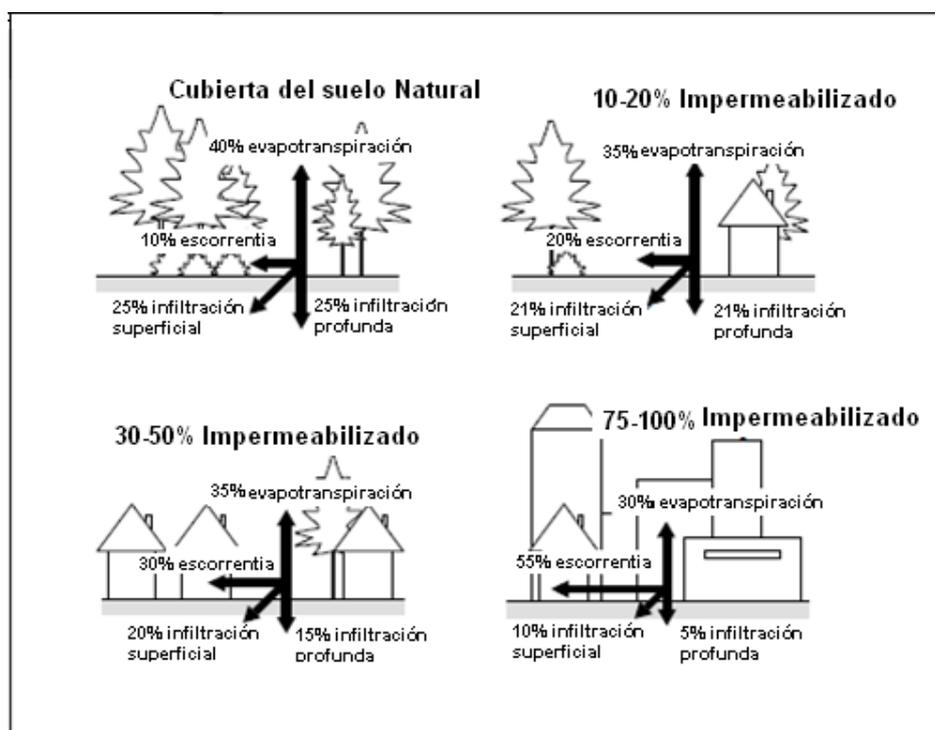


Figura 3-6. Efecto de la Urbanización sobre la escorrentía superficial (Adaptado de Arnold & Gibbons, 1996)

La escorrentía producida por las aguas lluvias en zonas urbanas contienen concentraciones significativas de sustancias contaminantes, las cuales pueden causar

impactos negativos cuando éstas llegan a arroyos, ríos u otras fuentes fluviales. Por esta razón el agua de escorrentía ha entrado a ser objeto de intensas investigaciones desde los años 1960 a 1965, cuando empezaron a producirse una serie de marcos legales en Estados Unidos referentes al tema de calidad del agua (EPA, 1999b). A partir de estas leyes, se realizaron diversos ensayos mediante los cuales se lograron determinar los componentes adversos de estas aguas, entre los cuales se encuentran: Sólidos suspendidos totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Fósforo total (TP), Fósforo soluble (SP), Nitrógenos Totales (NKT), Nitrato + Nitrito (N), Cobres totales (Cu), Plomos totales (Pb) y Zinc total (Zn) (EPA, 1999).

En la siguiente tabla se mostrara cuáles son las fuentes contaminantes más comunes para las aguas de escorrentía en zonas urbanas (EPA, 1999):

**Tabla 3-4. Fuentes más comunes de contaminación del agua (EPA, 1999b)**

CONTAMINANTES	FUENTES DE CONTAMINACIÓN
Sedimentos y Sustancias flotantes	Calles, jardines, carreteras, construcciones, erosión en canales de drenaje, entre otros
Pesticidas y Herbicidas	Césped residencial y jardines, borde de vías, zonas comerciales e industriales que tienen campos de césped
Materiales Orgánicos	Jardines y zonas verdes residenciales y residuos animales
Aceites y grasas / Hidrocarburos	Carreteras, calles, estacionamientos, áreas en donde se hace mantenimiento de vehículos, gasolineras, drenes ilícitos
Metales	Zona de vehículos, puentes, áreas industriales, suelos erosionados, corrosión en superficies metálicas y procesos de combustión
Bacterias y Virus	Zonas verdes, carreteras, fugas en alcantarillados, residuos de animales
Nitrógeno y Fosforo	Fertilizantes usados en zonas verdes, erosión del suelo, deposición atmosférica y desechos

Las concentraciones de contaminantes en la escorrentía urbana se relacionan directamente con el grado de desarrollo de urbanización dentro de la zona.

La siguiente tabla muestra las cargas típicas de contaminantes de la escorrentía en diferentes zonas urbanizadas, en (lb /Ha-año) (EPA, 1999b):

**Tabla 3-5. Cargas típicas de contaminantes de la escorrentía en diferentes zonas urbanizadas, en (lb /ha-año) (Horner *et al.*, 1991)**

Uso del Suelo	SST	PT	NKT	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> -N	DBO	DQO	Pb	Zn	Cu
Comercial	1000	1.5	6.7	1.9	3.1	62	420	2.7	2.1	0.4
Estacionamientos	400	0.7	5.1	2	2.9	47	270	0.8	0.8	0.04
Alta densidad Residencial	420	1	4.2	0.8	2	27	170	0.8	0.7	0.03
Media densidad Residencial	190	0.5	2.5	0.5	1.4	13	72	0.2	0.2	0.14
Baja densidad Residencial	10	0.04	0.03	0.02	0.1	N/A	N/A	0.01	0.04	0.01
Autopistas	880	0.9	7.9	1.5	4.2	N/A	N/A	4.5	2.1	0.37
Industrias	860	1.3	3.8	0.2	1.3	N/A	N/A	2.4	7.3	0.5
Parques	3	0.03	1.5	N/A	0.3	N/A	2	0	N/A	N/A
Construcciones	6000	80	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Como lo muestra la tabla anterior, la escorrentía urbana contiene concentraciones significativas de sólidos, nutrientes, materia orgánica y metales. A continuación se muestra una tabla en donde se hace una comparación de la concentración de contaminantes que tienen las aguas de escorrentía y las aguas residuales domésticas (EPA, 1999b):

**Tabla 3-6. Concentración de contaminantes que tienen las aguas de escorrentía y las aguas residuales domésticas (mg/l) (EPA, 1999b)**

Componente	Escorrentía Urbana		Aguas Residuales Domésticas		
	Antes de entrar al alcantarillado		Antes del tratamiento		Después del tratamiento secundario
	Rango	Típico	Rango	Típico	Típico
DQO	200-275	75	250-1000	500	80.0
SST	20-2.89	150	100-350	200	20.0
P Total	0.02-4.3	0.36	Abr-15	8.00	2.00
N Total	0.4-20	2	20-85	40.0	30.0
Plomo	0.01-1.2	0.18	0.02-0.94	0.10	0.05
Cobre	0.01-0.4	0.05	0.03-1.19	0.22	0.03
Zinc	0.01-2.9	0.02	0.027-7.68	0.28	0.08
Bacterias fecales por ml	400-50000		10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup>		200

Como se puede observar en la tabla 3-6, la calidad del agua en la escorrentía urbana se puede comparar con las aguas residuales domésticas antes de ser tratadas. Por esta razón es importante realizar control y tratamiento en éstas y así evitar la contaminación de fuentes naturales de aguas donde éstas últimas normalmente desembocan (EPA, 1999b).

### 3.3.3. SÓLIDOS

Los sólidos son los contaminantes más comunes que se encuentran en las aguas lluvias urbanas, estos son originados de muchas fuentes, incluyendo la erosión de superficies, el polvo producido por construcciones aledañas, basuras, las partículas arrojadas por las personas a las calles, la atmósfera, entre otras.

Los sólidos actúan negativamente en la calidad del agua y el hábitat, al haber niveles elevados de sólidos estos se pueden asentar produciendo la sedimentación y pueden alterar el hábitat de peces y otros organismos, llevándolos al punto de su destrucción, estos también proporcionan un medio para la acumulación y transporte de otros contaminantes como son los nutrientes y metales. Como se muestra en la anterior tabla, la concentración típica de SST en escorrentía urbana es sustancialmente mayor que en las aguas negras tratadas (EPA, 1999b).

Los sólidos se pueden dividir en suspendidos y disueltos, luego, subdividirse en volátiles y no volátiles. La mayor parte de la fracción volátil es biodegradable. Además, se pueden clasificar por su tamaño (de menor a mayor) en sólidos disueltos ( $<10^{-3}\mu\text{m}$ ), coloidales y suspendidos ( $> 1 \mu\text{m}$ ). Los tamaños coloidales y disueltos pueden removerse por procesos de coagulación y decantación (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Los sólidos totales se refiere a la totalidad de sólidos contenidos en una muestra después de evaporarla y secarla, sin tener en cuenta los sólidos gruesos (por ejemplo basuras, escombros y desechos) (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Los Sólidos Suspendidos Totales (SST) es un concepto arbitrario pero que generalmente se refiere a la porción de ST retenida en un filtro de fibra de vidrio. Un agua residual

puede tener concentraciones de SST entre 100 mg/L y 350 mg/L. Una estimación razonable de SST se puede obtener con base en la contribución per cápita, la cual es típicamente de 0.08 kg por día (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Los Sólidos Disueltos Totales son aquellos que pasan a través de un filtro de un tamaño nominal de poro de 2.0  $\mu\text{m}$ , y están comprendidos por sólidos disueltos y coloidales (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

La fracción biodegradable de los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) contribuye en las cargas de DBO, nitrógeno y fósforo y representa entre 70 % y 80 % de los SST. Los valores más altos dentro de este rango corresponden a aguas residuales domésticas (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Las sustancias de demanda de oxígeno que se encuentran en el agua de lluvia urbana se pueden medir por medio del DBO, DQO y Carbón Orgánico total (COT). El mantenimiento de niveles apropiados de Oxígeno Disuelto (OD) en las aguas receptoras es una de las consideraciones más importantes para la protección de los peces y la vida acuática en general. La cantidad de OD en la escorrentía urbana normalmente es de 5.0 mg/l o mayor y rara vez representa una amenaza directa para las fuentes naturales. Como se muestra en la Tabla 3-6, el nivel de DQO asociado a la escorrentía urbana es comparable con aquel correspondiente a las aguas residuales domésticas tratadas. A primera vista se puede decir que el impacto producido por las demandas de oxígeno a las aguas receptoras no es considerable, sin embargo estas demandas pueden ganar nutrientes y con el tiempo la demanda resultante de sedimentos de oxígeno puede ser importante trayendo problemas posteriores (EPA, 1999b).

La DBO es un parámetro comúnmente utilizado para medir el contenido de carbono orgánico en aguas residuales. Es una medida de la cantidad de oxígeno consumido durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica. La oxidación tanto del carbono como del nitrógeno en forma de amonio contribuyen al valor de la DBO y por lo tanto los límites de descarga permitidos se escriben usualmente en términos de DBO

carbonácea (DBOC) la cual es determinada completando el ensayo de DBO con un químico adicionado que inhibe la nitrificación. La DBOC es aproximadamente 80% o más del valor de DBO (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

La generación per cápita es otra forma de considerar el contenido orgánico de un agua residual. Típicamente una persona genera entre 0.08 y 0.09 kg/día de DBO (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Otra medida comúnmente utilizada para determinar el contenido orgánico es la DQO, definida como la cantidad de oxígeno consumido durante un protocolo de laboratorio que oxida químicamente la materia orgánica contenida en el agua residual. Típicamente es mucho mayor que la DBO porque parte del carbón contenido en las aguas residuales municipales se encuentra en una forma no biodisponible. Típicamente la proporción DQO/DBO está entre 2.0 y 2.2. Una mayor proporción puede indicar la presencia de vertimientos industriales. También puede indicar que hay procesos de estabilización o de consumo biológico de carbono dentro del sistema de alcantarillado. Un valor pequeño de DQO/DBO puede ocurrir en sistemas de recolección con tiempos de detención largos, especialmente para temperaturas altas, como un resultado de la fermentación anaerobia del agua residual: la fermentación puede solubilizar la materia orgánica volviéndola más biodegradable. Un valor bajo, puede también indicar contribuciones industriales, si las industrias hacen vertimientos altamente solubles o biodegradables (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

El nitrógeno existe en diferentes formas dependiendo de su oxidación. El amoníaco, que es una forma soluble, existe bajo forma de amoníaco molecular ( $\text{NH}_3$ ) y de ión amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) a la vez. La concentración relativa de cada forma depende del pH y de la temperatura. Con altos valores de pH y temperatura, se favorece el amoníaco molecular, el cual es tóxico (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

En las aguas residuales, generalmente hay muy poco nitrógeno oxidado (nitritos, nitratos). La presencia de esta forma de nitrógeno, indicará contribución industrial (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

El NTK se usa para medir la combinación de amoníaco (forma inorgánica del nitrógeno) y del nitrógeno orgánico. Este parámetro varía entre 25 y 45 mg/L para aguas residuales. Generalmente el amoníaco es un 60% del NTK y el nitrógeno orgánico es un 40% del NTK (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

El Nitrógeno Total (NT) es la suma del amoníaco y el nitrógeno orgánico (NTK) más las formas oxidadas del nitrógeno (nitritos y nitratos). Como las aguas residuales domésticas no contienen o contienen muy pocos nitratos y nitritos, el NTK es generalmente un indicativo del NT (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

La proporción DBO/NTK es importante si la planta de tratamiento está diseñada para des-nitrificación. También tiene influencia sobre la fracción de biomasa de los nitrificadores. Los valores típicos para aguas residuales domésticas van de 4:1 a 5:1. Proporciones más bajas indican contribuciones industriales (puede afectar la remoción de nitrógeno). Valores más altos indican una deficiencia en nutrientes (lo que puede afectar procesos de tratamiento al inhibir el crecimiento biológico y puede favorecer el crecimiento de filamentos, puede reducir la eficiencia del proceso de nitrificación), posiblemente debido a una dilución de las descargas residuales debido a industrias (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

La conversión “como nitrógeno” se utiliza para simplificar la relación entre los diferentes compuestos del nitrógeno. Se logra multiplicando la masa o la concentración del compuesto por el peso molecular del nitrógeno (14 g/mol) y dividiendo por el peso molecular de ese compuesto (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

El fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento biológico y por lo tanto si no está presente en cantidades suficientes puede reducir la eficiencia del tratamiento biológico (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

Para aguas residuales el PT se encuentra entre 4 mg/L y 8 mg/L. Se encuentra en formas orgánica (solubles, incluye ortofosfato  $\text{PO}_4^{3-}$  (70% a 90% del PT) y polifosfatos) e inorgánica (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

La relación DBO/PT es interesante para aquellas plantas de tratamiento que contemplan alguna forma de remoción biológica avanzada de fósforo. Relaciones inferiores a 20 pueden indicar problemas potenciales en dicho tratamiento (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

El PH es importante porque el rango deseable para la mayoría de la actividad biológica es de 6 a 9. Casi todas las aguas residuales se encuentran dentro de este rango a menos que haya descargas industriales inusuales (Water Environment Federation.;Environmental and Water Resources Institute (U.S.), 2006).

## 4. ASPECTOS PRELIMINARES, CONSIDERACIONES Y RECOMENDACIONES

Éste capítulo abarca recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de plantear la implementación de trincheras de infiltración o retención; además, describe los pasos anteriores al diseño de la estructura en sí.

### 4.1. CONSIDERACIONES GENERALES

El área máxima de contribución para las trincheras de infiltración debe ser de 20000 m<sup>2</sup> según el Vermont Stormwater Management Manual del 2005. Otras referencias, recomiendan que el área que el sistema drenara, no sea superior a los 4000 m<sup>2</sup> (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Las trincheras de infiltración cuentan con áreas de drenaje normalmente menores a 100 m<sup>2</sup> (BRE, 1991). El área destinada al dimensionamiento de las trincheras de infiltración debe encontrarse entre un 5 % a un 10 % del área de contribución, aunque varía en función de la profundidad, la capacidad de almacenamiento y la tasa de infiltración (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Teniendo en cuenta que las trincheras de infiltración infiltran el volumen capturado, éste volumen puede generar problemas en las estructuras aledañas. La tabla 4-1 resume las distancias mínimas necesarias que deben existir entre la trinchera y la estructura, además, compara las recomendaciones suministradas por diferentes manuales.

**Tabla 4-1. Distancias mínimas entre el sistema de infiltración para distintas estructuras**

	Recurso Hídrico	Estructuras	Fundaciones	Sistemas Sépticos, Pozos	Aguas Aptas para consumo	Puntos destinados al Abastecimiento
Urban Stormwater Retrofit Practices	30 m	3 m	12 m	30 m	120 m	370 m
Vermont Stormwater Management Manual	30 m	10 m	N/A	10 m	N/A	N/A

Los rangos de profundidades de la trincheras pueden encontrarse entre 0.90 m a 3.70 m, pero las trincheras de infiltración deben estar separadas al menos 1 m (entre 0.60 m y

1.20 m, según Debo y Reese, 1995) del nivel freático con el fin de garantizar que éste nunca llegue a interferir con la trinchera. Si esto no se garantiza, puede provocar la contaminación del agua subterránea o la falla del sistema de infiltración (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007). Para lo anterior se deben realizar pruebas de infiltración donde se demuestre que el nivel freático no resulta afectado. En el diseño de las trincheras de retención solo se debe asegurar que la base de la trinchera se encuentra por encima del nivel freático.

A continuación, se presentan algunos criterios que deben ser evaluados para seleccionar el lugar para instalar la trinchera, ya sea de infiltración o de retención (Woods-Ballard *et al.*, 2007):

**Tabla 4-2. Criterios de selección (adaptado de Woods-Ballard *et al.*, 2007)**

Ubicación	Las trincheras deben ubicarse en lugares adyacentes a superficies impermeables. Ejemplo de sitios adecuados son: estacionamiento de vehículos, carreteras o autopistas. Las zonas impermeables facilitan la captación del flujo. Además, Las trincheras de infiltración deben estar alejadas de estaciones de gasolina o zonas industriales que manejen desechos tóxicos o peligrosos (ASCE, 1992).
Espacio Requerido	Las trincheras pueden ser utilizadas en jardines o zonas públicas al aire libre.
Pendientes	El fondo del reservorio de la trinchera de infiltración debe encontrarse completamente plano, con el fin de lograr infiltrar la escorrentía en toda su superficie. En casos donde no se pueda garantizar una superficie plana, la pendiente longitudinal de la base no debe ser mayor al 2 %. Si el terreno cuenta con una pendiente alta, se recomienda ubicar la trinchera perpendicular a la pendiente del suelo.
Estabilidad	Se deben realizar estudios de estabilidad del suelo y determinar la ubicación del nivel freático y el potencial de inestabilidad de la zona.

Adicionalmente a la anterior tabla, en zonas donde se presenten capas confinadas de roca o de arcilla, no se recomienda diseñar trincheras de infiltración (Novotny, 1995). Por otro lado, para sitios con estas características, se invita a implementar trincheras de retención (Schueler, 1987).

Las trincheras deben descargar su almacenamiento suficientemente rápido para proveer la capacidad necesaria para recibir la próxima escorrentía del siguiente evento sin ningún problema (BRE, 1991). El tiempo de descarga depende de las dimensiones de la trinchera, y las características de infiltración del suelo (BRE, 1991). El tiempo de vaciado total de la trinchera debe encontrarse entre 48 a 72 horas según el Urban Stormwater Retrofit Practices (2007).

Para las trincheras de infiltración, cuando disminuye la tasa de infiltración del suelo es recomendable usar una tubería de rebose (tuberías que evacuan el exceso de agua que entra al dispositivo, esto para evitar el colapso del sistema). En trincheras de retención, las tuberías pueden ubicarse justo antes de los puntos de entrada de la trinchera (puntos de alimentación) y tendrán la función de dirigir la escorrentía y así garantizar su transporte adecuado hacia la estructura. De igual forma, se recomienda el uso de tuberías perforadas a la salida de la trinchera (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Nunca se debe capturar e infiltrar la escorrentía proveniente de puntos de acceso (hotspots). Si se determina que la escorrentía afluyente a la trinchera es un punto de acceso, la infiltración de esta llevaría al riesgo de contaminar el agua subterránea, por lo tanto, se recomienda que la escorrentía pase primero por un pre-tratamiento antes de ser infiltrada por la trinchera (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Si se obtienen condiciones de colmatación y estancamiento del flujo, las trincheras de infiltración se convertirán en ambientes favorables para la proliferación de mosquitos (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Aunque tradicionalmente se use geo-textil en las paredes superficiales de las trincheras de infiltración, el Urban Stormwater Retrofit Practices (2007) recomienda usar una capa de roca lavada como sustituto al uso del geo-textil, ya que a partir de la experiencia, se ha concluido que éste aumenta el ritmo de colmatación en la trinchera.

El problema en la implementación de estas técnicas en zonas de muy baja temperatura, es la presencia de hielo en el flujo sub-superficial. El principal problema puede presentarse en primavera, al aumentar la temperatura, el hielo se derretirá y generará inundaciones en zonas aledañas. Éste problema se puede evitar si el fondo del canal se

encuentra por debajo de la línea de congelación del terreno (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

La principal consideración en cuencas hidrológicas áridas y semiáridas, es el mayor potencial de colmatación gracias al aumento de los sedimentos arrastrados por la escorrentía; por lo tanto, es necesario tomar medidas en el diseño del pre-tratamiento, además de mantener el área contribuyente lo más impermeable posible (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Las técnicas de infiltración no deben ser usadas en regiones kársticas activas, excepto cuando luego de ensayos geotécnicos, se concluya la no formación de sumideros ni la contaminación de las aguas subterráneas (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

Las trincheras pueden ser utilizadas como técnicas de drenaje en zonas residenciales. Además, si se hace un diseño adecuado pueden ser también empleadas para el manejo de aguas lluvias en zonas industriales. Si el control de sedimentos no es el adecuado, no se garantizará el buen funcionamiento de la trinchera, por lo cual deberán incluirse diseños de pre-tratamiento (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Se debe contar con una superficie vegetal adyacente y paralela a la longitud de la trinchera para minimizar la contaminación del suelo (Urban Stormwater Retrofit Practices, 2007).

## 4.2. CONSIDERACIONES PRELIMINARES

### 4.2.1. Consideraciones geotécnicas (CIRIA R145, 1995)

Los sistemas de infiltración introducen agua al suelo circundante. Normalmente, éste proceso no genera cambios significativos en el comportamiento del suelo. Pero, hay otros casos en los que la infiltración del agua en el suelo genera impacto en las características del suelo circundante al sistema de infiltración, lo cual puede generar serios problemas en la estabilidad de áreas cercanas, además de afectar las fundaciones de las estructuras y la pendiente del terreno.

Los factores que más incrementan los problemas por el sistema son los siguientes: El volumen de agua esperado para ser infiltrado por el suelo, la tasa de infiltración del suelo, el tipo de suelo y la reacción de éste al agua, la cercanía del sistema a estructuras.

Para disminuir el potencial, se recomienda realizar un estudio geotécnico del área de infiltración. La siguiente información debe ser suministrada por el reporte geotécnico: historia geotécnica del sitio, información del nivel de aguas subterráneas, la forma en que el suelo reaccionara a la entrada del agua, la localización de fundaciones adyacentes y pendientes, cualquier obstrucción frente al flujo natural del agua en el suelo producto de la geología local del terreno o estructuras cercanas.

A continuación se muestra el esquema a seguir por el especialista geotécnico para determinar si un proyecto de infiltración es factible o no en la zona de análisis:

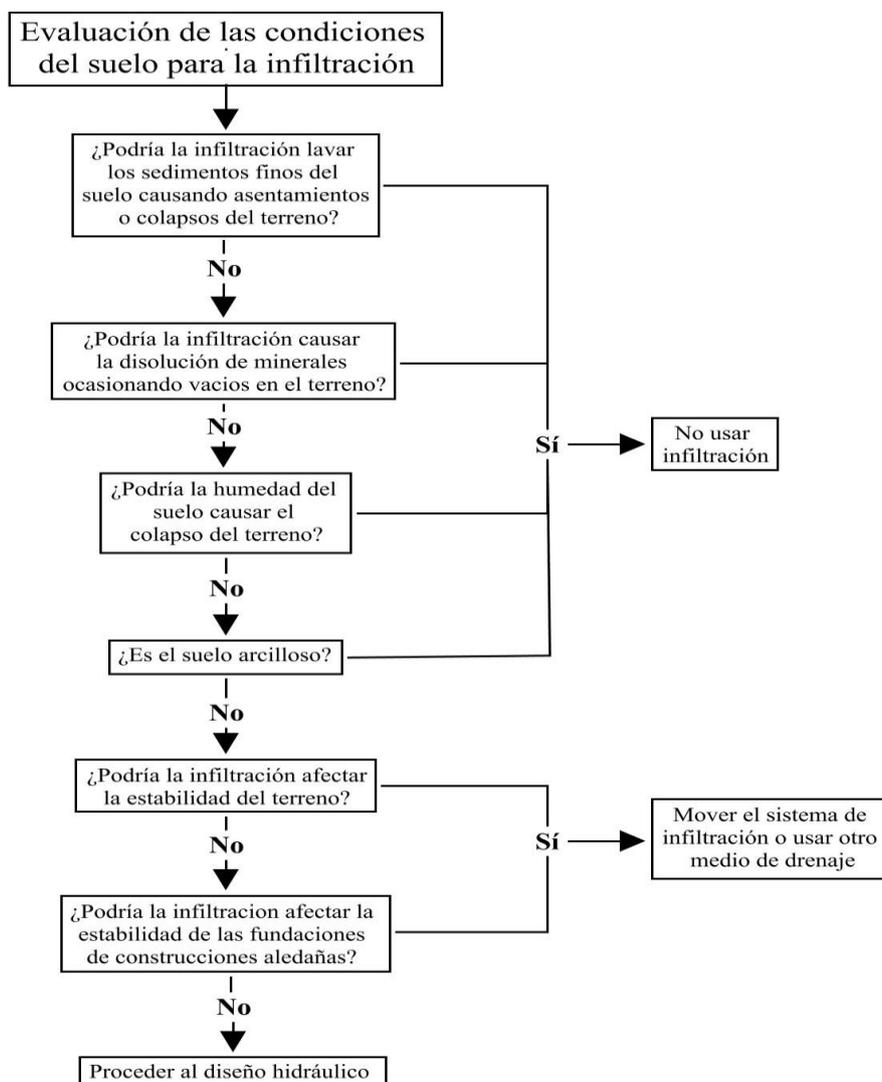


Figura 4-1. Guía de decisión para el uso de sistemas de infiltración (Adaptado de CIRIA C697, 2007)

#### 4.2.2. *Coefficiente de infiltración*

Para poder realizar el diseño de una trinchera de infiltración, es necesario conocer la velocidad en la que el suelo infiltra cierto volumen de agua (coeficiente de infiltración), este dato debe ser extraído en campo. Existen muchas metodologías para el cálculo del coeficiente de infiltración que varían según el autor. En los anexos 1, 2 y 7 se encuentran distintas metodologías para determinar el coeficiente de infiltración del suelo en campo.

## 5. DISEÑO

---

Este capítulo abarca todo lo referente al diseño hidráulico e hidrológico para trincheras de infiltración, retención y algunos sistemas de pre-tratamiento.

La mayoría de los métodos estudiados contemplan diseños completos de la estructura, lo cual quiere decir, que para un mismo diseño, se plantea el diseño hidrológico e hidráulico de la trinchera. A esta metodología de diseño se le llamará diseño completo.

El siguiente subcapítulo abarca lo referente al diseño hidrológico, es decir, el cálculo del volumen de entrada en el sistema. Cabe aclarar que todas las metodologías para el diseño hidrológico expuestas en la parte de diseño completo se basan en el principio del método racional, por lo tanto en el siguiente subcapítulo solo se muestra la metodología adicional encontrada en la bibliografía revisada.

### 5.1. DISEÑO HIDROLÓGICO

#### 5.1.1. *MÉTODO HIDROLÓGICO PARA PEQUEÑOS EVENTOS DE LLUVIA (SSHM)* (Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual, 2006)

Este método fue desarrollado para estimar el volumen de escorrentía de zonas urbanas y suburbanas para eventos de lluvias relativamente pequeños. Éste es un método sencillo en el cual el volumen de escorrentía se calcula utilizando los coeficientes de escorrentía ( $R_v$ ). Estos coeficientes se basan en una investigación elaborada por el sur-occidente, medio-oriente de los Estados Unidos de América y Ontario (Canadá), basándose en una amplia gama de suelos y distintos eventos de lluvias que se presentan en estas zonas.

El coeficiente de escorrentía y el evento de lluvia son directamente proporcionales, es decir, para un evento de lluvia grande, el coeficiente es mayor y viceversa. A continuación se mostrará un cuadro en el cual se reportan los distintos coeficientes de escorrentía, para distintos usos del suelo y diferentes eventos de lluvia:

Tabla 5-1. Coeficientes de escorrentía a partir del método (SSHM) (adaptado de Pitt, 2003)

Alturas totales de eventos de lluvia (cm)	Áreas Impermeables				Áreas Permeables		
	Cubiertas planas	Cubiertas a dos aguas	Grandes áreas impermeables	Pequeñas áreas impermeables	Suelos arenosos	Suelos limosos	Suelos arcillosos
1.27	0.75	0.94	0.97	0.62	0.02	0.09	0.17
3.81	0.88	0.99	0.99	0.77	0.05	0.15	0.24

La escorrentía se calcula multiplicando la cantidad de lluvia por el coeficiente de escorrentía que le corresponde a cada zona. Debido a que la relación que presenta el evento y el coeficiente es lineal, se puede utilizar un coeficiente ponderado para un área que tengan varios tipos de usos o varios tipos de suelo.

A continuación se muestra la fórmula con la que se puede obtener la escorrentía:

$$Q = P \cdot R_v \quad (5-1)$$

Donde

$Q$ : Escorrentía (cm)

$P$ : Precipitación (cm)

$R_v$ : Coeficiente ponderado de escorrentía para el área total

## 5.2. METODOLOGÍAS PARA DISEÑO COMPLETO

### 5.2.1. LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS (Azzout *et al.*, 1994)

Estos métodos son simplificados en la medida en que sólo permiten hacer un dimensionamiento. Los dos métodos presentados (método de las lluvias y método de los volúmenes) se basan en 2 hipótesis:

La primera hipótesis es que el flujo de fuga de la estructura de almacenamiento es constante, la segunda es que hay una transferencia instantánea de lluvia a la estructura de almacenamiento.

Los fenómenos de amortiguamiento debido a la escorrentía en la cuenca son desatendidos. Esto significa que estos métodos serán aplicables sólo a cuencas hidrográficas relativamente pequeñas.

A continuación se presenta el esquema para la aplicación de los métodos:

**Tabla 5-2. Esquema de los métodos simplificados (Azzout *et al.*, 1994)**

Pasos	Descripción de pasos a seguir
Paso 1	Escogencia del riesgo hidrológico ( $T$ )
Paso 2	Determinación del caudal de fuga ( $Q_s$ )
Paso 3	Determinación de las superficies drenadas ( $S_a$ )
Paso 4	Evacuación del volumen almacenado
Paso 5	Determinación de la profundidad necesaria por el sistema

### 1. Determinación del caudal de fuga

El caudal de fuga está generalmente dado por unas limitaciones establecidas por los servicios técnicos, en la presentación de los permisos de construcción. Algunas comunidades imponen como límite el flujo producido por la zona antes de que sea urbanizado (limitación del impacto de un desarrollo) o con base en un estado de la urbanización muy por debajo del existente (mejoramiento de la situación existente).

Si hay infiltración en el lugar, el flujo es igual al producto de la superficie de contacto entre la calzada y la capacidad de absorción del suelo  $q_{as}$ . Un posible bloqueo puede ser tomado en cuenta mediante la introducción de un factor de seguridad.

El flujo  $Q_s$  se calcula como:

$$Q_s = \alpha q_{as} s \quad (5-2)$$

Donde

$\alpha$  : Coeficiente de seguridad (puede ser tomado como 0.1)

$q_{as}$  : Capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración ( $m^3/s/m^2$ )

$s$  : La superficie de infiltración en la carretera ( $m^2$ )

Es importante tener en cuenta que cuando se habla de un flujo constante, se entiende que esto es sólo una aproximación.

## 2. Determinación de la superficie activa

En el cálculo de la superficie  $S_a$  se tienen en cuenta las superficies involucradas en la escorrentía y que son drenadas por el sistema de infiltración y el suelo de reserva que tiene la estructura del reservorio en sí.

La superficie activa  $S_a$  se calcula como:

$$S_a = C_a \cdot S_a \quad (5-3)$$

Donde

$C_a$  : Coeficiente de aporte

$S_a$  : Área total de la cuenca de drenaje ( $m^2$ ).

Según Azzout et al. (1994), una de las dificultades de utilizar los métodos simplificados radica en la determinación del coeficiente de aporte  $C_a$ . Éste es el coeficiente de medición del rendimiento de la lluvia en general, es decir la fracción de la lluvia que llega efectivamente a la salida de la cuenca considerada. Cuando en la alimentación de las cuencas hidrográficas la retención es altamente urbanizada, se puede asimilar  $C_a$  al coeficiente de impermeabilización el cual se calcula como proporción de superficies impermeables que contribuyen a la escorrentía en toda la superficie de la cuenca. Pero cuando el grupo es heterogéneo y contiene áreas naturales, su determinación resulta más

compleja:  $C_a$  en este caso no puede confundirse con el coeficiente de impermeabilización. En efecto, la relación  $C_a$  es variable en función del tipo de suelo, del estado de humedad del suelo en el momento de aparición de la lluvia y, por lo tanto, antes de la lluvia (o al comienzo de la lluvia), si el suelo no está saturado, el coeficiente de aporte es bajo, pero puede convertirse en lluvia de magnitud muy elevada cuando el suelo alcanza una saturación. La literatura ofrece valores de las tablas Donnat promedio de estos coeficientes basados en los tipos de suelo (densidad, tipo de espacio de vivienda, tipo de cobertura vegetal). A falta de medidas locales, dichos valores pueden ser utilizados. Se da como ejemplo la tabla siguiente.

**Tabla 5-3. Coeficientes de escorrentía de áreas homogéneas**

Tipo de áreas	Coefficientes
Espacios verdes, paisaje, campos deportivos	0.25 a 0.35
<b><u>Vivienda individual (unidades/ha)</u></b>	
12	0.40
16	0.43
20	0.45
25	0.48
35	0.52
<b><u>Vivienda colectiva (unidades/ha)</u></b>	
50	0.57
60	0.60
80	0.70
Instalaciones publicas	0.65
Áreas de actividades	0.70
Supermercados	0.80 a 0.90
Estacionamientos, carreteras	0.95

La ecuación 5-4 se utiliza para calcular el valor del coeficiente de aporte para un área urbana a partir de coeficientes de escorrentía de 10 años de superficies homogéneas de las superficies:

$$C_a = \frac{\sum_{i=1}^n C_i S_i}{S} \quad (5-4)$$

### 3. Evaluación de un volumen de almacenamiento

Para evaluar el volumen de almacenamiento, se proponen los siguientes métodos:

### 5.2.1.1. Método de las lluvias (Azzout et al., 1994)

A partir de las relaciones altura – duración – frecuencia (HDF), la elección del periodo de retorno, conocimiento de la porosidad del material de la capa de almacenamiento y el flujo de drenaje, es posible determinar el espesor de la estructura.

En este método, además de los supuestos anteriores, se tiene en cuenta que no hay continuidad pluviométrica. Las estadísticas correspondientes al cálculo de volúmenes de almacenamiento de agua se basan en la independencia de los eventos de lluvia. Por lo tanto no tiene en cuenta periodos secos en la zona de análisis.

La construcción del método es el siguiente:

#### 1. Análisis estadístico de las intensidades o alturas

El método se basa en series de lluvias idénticas a las usadas para la construcción de las curvas IDF. En un conjunto de episodios lluviosos medidos para  $N$  años se calcula la  $N$  intensidades máximas anuales para diferentes intervalos de tiempo  $D$ , con lo que es posible construir una clasificación de los valores de frecuencia  $I$ . Podemos determinar las diferentes curvas de intensidad máxima y duración del análisis de frecuencias  $F$  (o periodos de retorno  $T$ ).

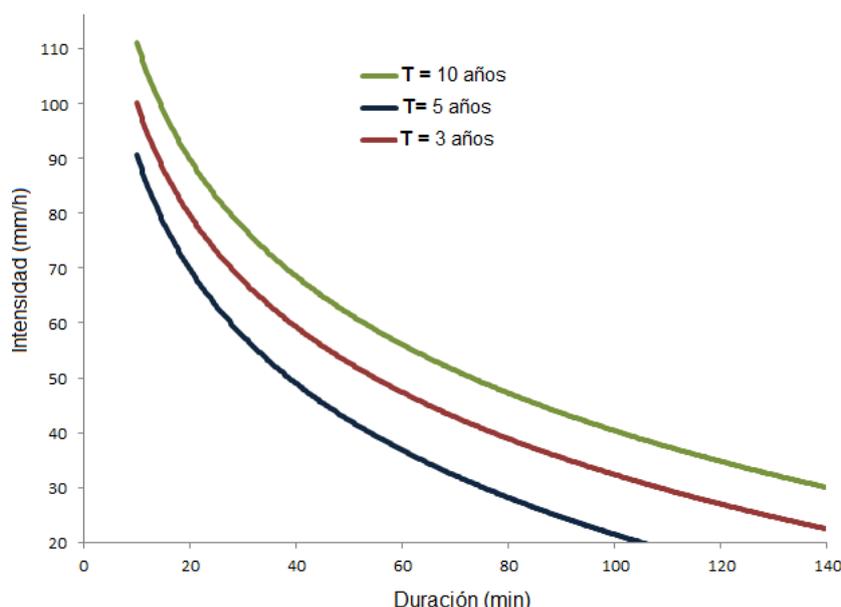


Figura 5-1. Curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) (Adaptado Azzout et al., 1994)

## 2. Determinación de curvas altura-duración-frecuencia

Para dimensionar la retención es necesario transformar estas intensidades  $i(D,T)$  en alturas, aplicando la ecuación  $H(D,T): H(D,T) = i(D,T) \cdot D$

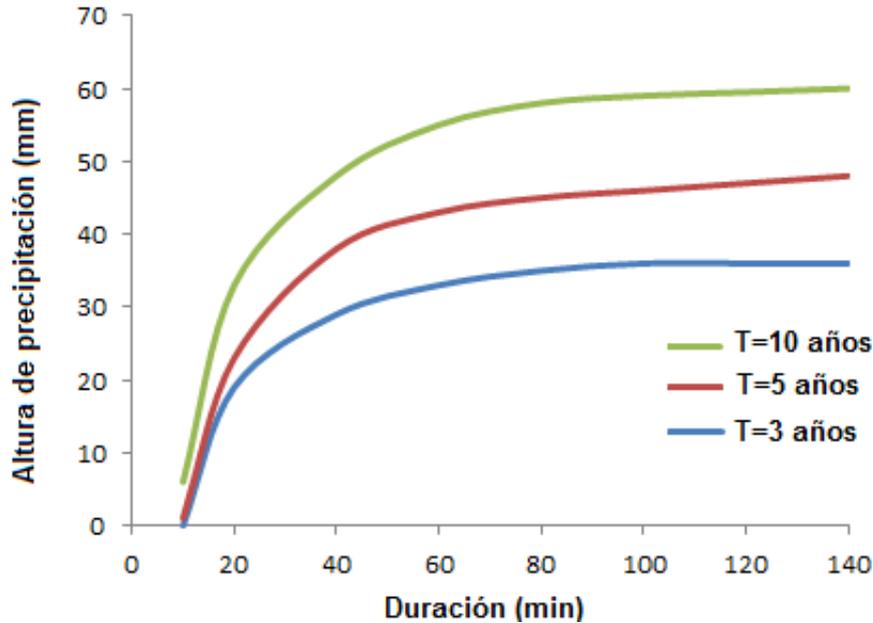


Figura 5-2. Curvas de Altura-Duración-Frecuencia (Adaptado Azzout *et al.*, 1994)

A partir de estas curvas, se pueden realizar resumen de las alturas. En un conjunto de episodios de lluvias medidos para  $N$  años, se identifican las  $N$  alturas máximas anuales  $H$  para diferentes intervalos de tiempo  $D$  con lo cual es posible construir una clasificación de los valores de frecuencia  $H$  para determinar directamente las curvas altura-duración-frecuencia. Esto evita hacer aproximaciones en el suavizado de las curvas IDF.

## 3. Determinación de una altura de almacenamiento

Se supone que la obra tiene un flujo de fuga constante  $Q_s$  que se expresa como un flujo específico:

$$q_s = 360Q_s / S_a \quad (5-5)$$

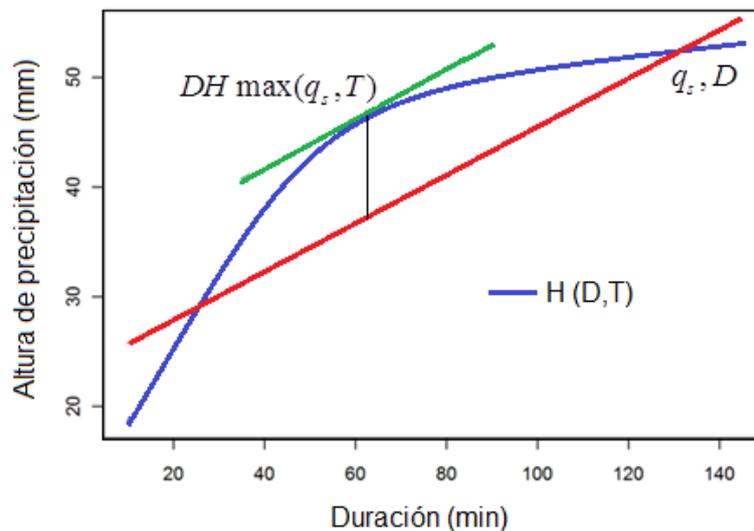
Donde

$Q_s$  : Caudal de salida constante ( $m^3/s$ )

$S_a$  : Área activa de escurrimiento (ha)

$q_s$  : Flujo específico (mm/h)

El área activa  $S_a$  se calcula como el producto del coeficiente de aporte  $C_a$  y el área total de la cuenca de drenaje. Por lo tanto, se puede extraer conjuntamente la altura de precipitación a un periodo de retorno dado  $H(D,T)$ . La curva que se obtiene representa la evolución de la altura de descarga de agua ( $q_s D$ ) en función de la duración de la evacuación  $D$ .



**Figura 5-3. Superposición de la curva altura-duración para una frecuencia elegida y la curva de evacuación (Adaptado Azzout *et al.*, 1994)**

Las diferencias  $DH(q_s, T, D)$  entre la curva  $q_s D$  y  $H(D, T)$ , corresponden a las alturas a almacenar para diferentes duraciones  $D$ . El máximo  $DH_{max}(q_s, T)$  corresponde a la altura total de almacenamiento necesario para que no se presente desbordamiento. El volumen de agua almacenada se determina por:

$$V = 10DH_{max}(q_s, T)S_a \quad (5-6)$$

Donde

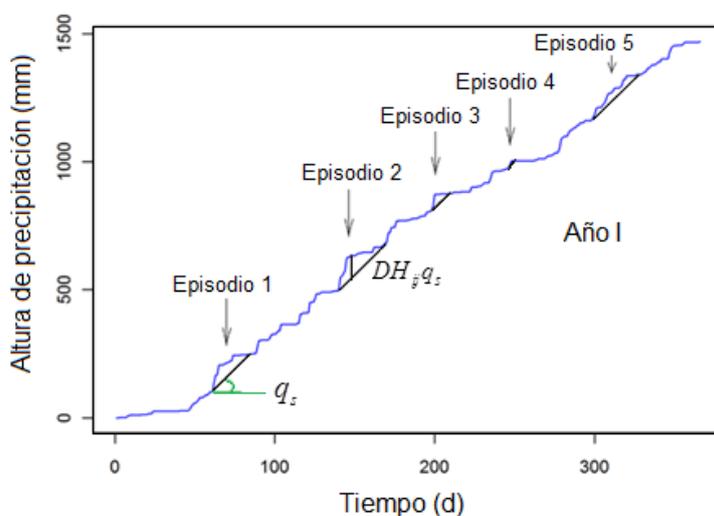
$S_a$  : Área activa (ha)

$DH_{max}$  : Máxima altura específica de almacenamiento (mm)

### 5.2.1.2. Método de los volúmenes (Azzout et al, 1994)

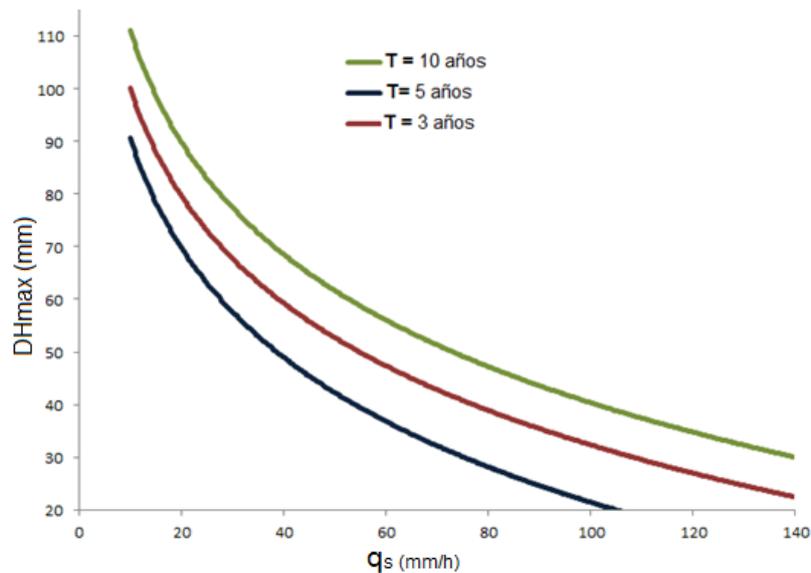
A partir de las relaciones de *flujos específicos - alturas específicas*, la selección de un período de retorno, y la porosidad del material de la capa de almacenamiento, es posible determinar el espesor del pavimento.

El método de los volúmenes difiere del anterior por el hecho de que no se extraen los eventos más importantes de lluvia (lluvia de diseño) totales de un periodo determinado sino que las alturas de agua son acumuladas por año.



**Figura 5-4. Curva de alturas acumuladas en un año**

Para cada año  $i$ , cada evento de lluvia  $j$  y para cada caudal específico  $q_s$ , se calcula la altura  $DH_{ij}(q_s)$  (la diferencia entre la curva de alturas acumuladas para cada episodio y la de evacuación  $q_s$ ). Se determinan los valores máximos anuales y se realiza la clasificación frecuencial de estos valores máximos.



**Figura 5-5. Curvas para la determinación de la altura específica**

El volumen se determina mediante la ecuación 5-6 y el cálculo del volumen se realiza igual que en el método de las lluvias.

#### 5.2.1.3. Comparación de los métodos simplificados

En general, el método de los volúmenes otorga resultados de altura a almacenar superiores a aquellos obtenidos mediante el método de las lluvias (Azzout *et al.*, 1994).

Lo anterior puede deberse a que en el método de las lluvias, se aísla y se extraen los eventos “interesantes” de una serie pluviométrica completa, por lo tanto se pierde el concepto de sucesión de lluvia.

Para la correcta aplicación, el método de los volúmenes requiere de series prolongadas de lluvias medidas a alta reducción (< 24 horas). En ausencia de estas mediciones, es preferible el uso del método de las lluvias (Azzout *et al.*, 1994).

## 5.2.2. METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

### 5.2.2.1. Método sistemas de infiltración planos (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

Una de las mayores incertidumbres en el diseño de sistemas de infiltración es la tasa de infiltración del suelo, ya que ésta varía con el tiempo. Por esta razón se debe introducir un factor de seguridad en el procedimiento del diseño y así reducir el valor del coeficiente de infiltración. Estos factores tendrán en cuenta la posible pérdida de capacidad de infiltración del suelo a lo largo de la vida útil del sistema (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

La metodología expone ciertos valores de seguridad según su posible tipo de falla: para casos en los que no se genera ningún daño o inconveniente, el valor del coeficiente es de 1.5; para inconvenientes de menor importancia, se asume un valor de 2 y para casos con daños en edificaciones o estructuras, se debe diseñar con un factor de seguridad de 10. Lo anterior está en función de la posible consecuencia de falla, producto de la infiltración del flujo al terreno, determinada anteriormente por el estudio geotécnico.

Este factor corrector se utiliza para determinar el coeficiente de infiltración de la siguiente manera:

$$q = f / F \quad (5-7)$$

Donde

*f*: Tasa de infiltración medida en campo (mm/h)

*F*: Factor de seguridad determinado según lo descrito anteriormente

Para el diseño se tendrán en cuenta los eventos máximos de lluvia reportados en la zona, a partir de las siguientes ecuaciones hidráulicas se podrá determinar la profundidad máxima que deberá tener el sistema (Woods-Ballard *et al.*, 2007):

$$h = \frac{D}{n}(Ri - q) \quad (5-8)$$

Donde

$R$ : Relación entre el área de drenaje y el área de infiltración  $R = A_D/A_b$

$q$ : Coeficiente de infiltración, obtenido por el ensayo en campo y ajustado con el factor de seguridad adecuado (m/h).

$i, D$ : Intensidad y Duración de la lluvia con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (m/h, h).

$A_b$ : Área del sistema de infiltración para el drenaje (m<sup>2</sup>).

$A_D$ : Área drenada (m<sup>2</sup>).

$n$ : Porosidad del material de relleno (volumen de vacíos / volumen total).

La porosidad ( $n$ ) puede ser obtenida por medio de pruebas de laboratorio o a partir de tablas guías:

**Tabla 5-4. Porosidad según el material (Woods-Ballard *et al.*, 2007)**

Material	Porosidad ( $n$ )
Sistemas geo-celulares	0.90 - 0.95
Piedra limpia	0.40 - 0.50
Grava uniforme	0.30 - 0.40
Arena uniforme o Grava	0.20 - 0.30

En ciertas trincheras de infiltración, como medida de seguridad, se instalan tuberías longitudinales que agilizan el movimiento del flujo; estas tuberías cuentan con un grado diferente de porosidad, y por lo tanto afecta la porosidad general de la trinchera. Para tener en cuenta esta nueva porosidad, la porosidad efectiva se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$n' = \frac{\pi r^2 + n (WL - \pi r^2)}{WL} \quad (5-9)$$

Donde

$r'$ : Radio de la sección tubular (m)

$W$ : Ancho de la sección excavada (m)

$L$ : Longitud de la sección excavada (m)

A continuación se muestra el procedimiento que debe seguirse para el diseño de sistemas de infiltración (Woods-Ballard *et al.*, 2007):

1. Obtener el coeficiente de infiltración del terreno,  $q$ , (m/h), dividiendo la tasa de infiltración  $i$  encontrada por ensayos de campo por el factor apropiado de seguridad.
2. Asignar la porosidad del material granular empleado para el relleno.
3. Escoger el área de drenaje  $A_D$  (m<sup>2</sup>) y el área de la base del sistema de infiltración  $A_b$  (m<sup>2</sup>).
4. Después, calcular el radio de drenaje  $R$ :

$$R = \frac{A_D}{A_b} \quad (5-10)$$

5. Seleccionar la duración del evento de lluvia  $D$  (h) para luego determinar la intensidad de lluvia correspondiente  $i$  (m/h) (ya sea a partir de curvas IDF u otros métodos según sea el caso).
6. Comprobar si  $q$  excede a  $Ri$  según la ecuación 5-8. Si la tasa de infiltración es superior a la tasa de escorrentía: para estos casos, la altura máxima que deberá tener el sistema es igual a cero.
7. Si no se presenta el caso anterior, calcular el valor de la altura máxima de la trinchera  $h_{\max}$  para ese evento según la fórmula 5-8.

8. Repita los pasos 5 y 6 para diferentes duraciones de lluvias, construyendo una tabla de alturas con los resultados obtenidos.
9. Finalmente se selecciona el mayor valor obtenido para la altura máxima de la trinchera  $h_{\max}$ .

El tiempo de vaciado de la estructura debe ser suficientemente rápido para vaciar la mitad del agua capturada por la trinchera en 24 horas y así evitar el colapso del sistema. Éste factor depende completamente de las dimensiones de la trinchera y de su tasa de infiltración. Para realizar el cálculo del tiempo de vaciado de la trinchera se recurre a la siguiente ecuación. La siguiente fórmula es un parámetro para conocer cual deberá ser el tiempo que la trinchera tardara en vaciar la mitad del volumen de agua retenido, para un sistema de infiltración plano:

$$t_{50} = \frac{nh}{2q} \quad (5-11)$$

Donde  $t_{50}$  es el tiempo que la trinchera tardara en vaciar la mitad del volumen de agua retenido. Si el tiempo que la trinchera tardara en vaciar la mitad del volumen de agua retenido es menor a 24 horas, es aceptable determinar el coeficiente de infiltración de la estructura como:

$$q \geq \frac{nh_{\max}}{48} \quad (5-12)$$

#### 5.2.2.2. Método sistemas de infiltración en 3D (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

En el diseño de trincheras por el método de sistemas de infiltración 3D se calcula la altura máxima  $h_{\max}$  que alcanzará la lámina de agua en ésta, a partir de ecuaciones hidráulicas que están en función de las pendientes laterales del sistema (trincheras de infiltración entre otros) (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Para el cálculo de la altura máxima de la lámina de agua  $h_{\max}$  para canales con paredes verticales se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_{\max} = a(e^{-bD} - 1) \quad (5-13)$$

Donde

$$a = \frac{A_b}{P} - \frac{iA_D}{Pq} \quad \text{y} \quad b = \frac{Pq}{nA_b} \quad (5-14) \text{ y } (5-15)$$

Siendo  $P$  el perímetro del sistema de infiltración (m).

$q$ : Coeficiente de infiltración, obtenido por el ensayo de percolación y ajustado con el factor de seguridad adecuado (m/h)

$i, D$ : Intensidad y Duración de la lluvia con el periodo de retorno requerido en la ubicación del sitio (m/h),(h)

$A_D$ : Área drenada ( $\text{m}^2$ )

$A_b$ : Área del sistema de infiltración para el drenaje ( $\text{m}^2$ )

$n$ : Porosidad del material de relleno (volumen de vacíos / volumen total)

Las ecuaciones pueden ser solucionadas a partir de métodos computacionales o gracias a la siguiente gráfica:

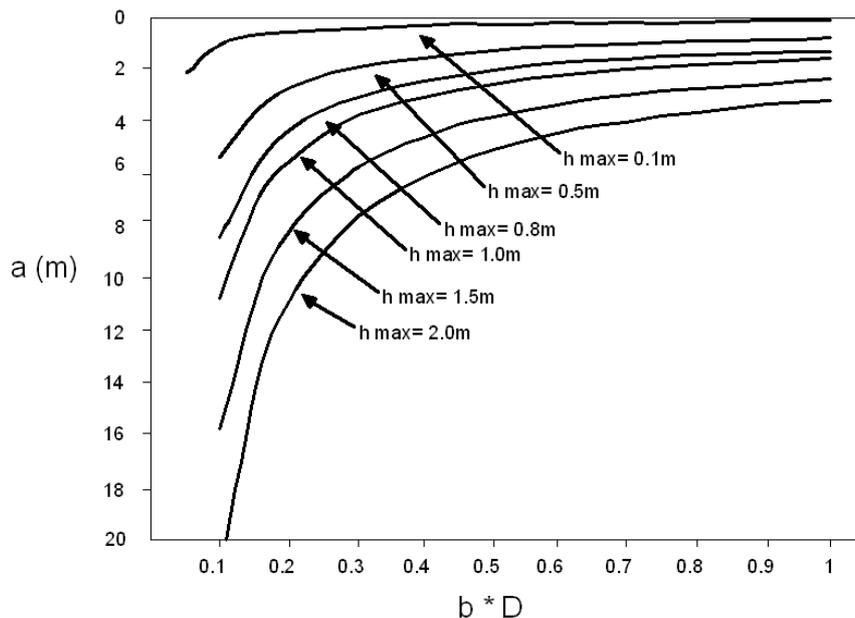


Figura 5-6. Máxima profundidad sistemas de infiltración en 3D (Woods-Ballard *et al.*, 2007)

Para el correcto cálculo y dimensionamiento de sistemas de infiltración, se deben seguir los siguientes pasos:

**Tabla 5-5. Dimensionamiento de sistemas de infiltración (Woods-Ballard *et al.*, 2007)**

Obtener el coeficiente del terreno $q$ (m/h)	Se divide la tasa de infiltración entre el factor de seguridad $F$
Asignar material de relleno	Se elige el material según la porosidad necesaria
Escoger área de drenaje	Escogiendo el área se determina $A_D$
Escoger la geometría del sistema	Se determina si la trinchera será de fondo circular, triangular plano u otra forma geométrica
Determinar las dimensiones	Pre dimensionar la estructura, dando un ancho y un largo aleatorio
Calcular el coeficiente $b$	$b = \frac{Pq}{A_b n}$
Seleccionar la duración del evento de lluvia $D$	Luego de seleccionar el evento, calcular la intensidad de este según la fórmula que rija la zona
Determinar el coeficiente $a$	$a = \frac{A_b}{P} - \frac{A_D i}{Pq}$
Calcular $h_{\max}$	$h_{\max}$ se puede determinar a través de métodos computacionales o con ayuda de la figura 5-6
Repetir los dos últimos pasos	Los pasos se repiten con una duración del evento distinta, con el fin obtener una altura máxima mayor a la anterior

Si  $h_{\max}$  es muy alta, redimensionar la geometría de la trinchera, cambiando el ancho y largo de la trinchera si es posible. Si  $h_{\max}$  sigue siendo muy grande (mayor de 2 metros) (Woods-Ballard *et al.*, 2007): reducir el área de drenaje. O si no cambiar el sistema de infiltración.

Con la siguiente fórmula se podrá calcular el tiempo que la trinchera tardara en vaciar la mitad del volumen de agua retenido, para sistemas de infiltración 3D:

$$t_{50} = \frac{nA_b}{qP} \ln \left[ \frac{h_{\max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{\max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right] \quad (5-16)$$

La fórmula 5-17 puede estimar el coeficiente de infiltración de la trinchera, entre más cercanos se encuentren los dos valores (real y calculado) más efectiva resulta ser la trinchera.

$$q > \frac{n}{24} \frac{A_b}{P} \ln \left[ \frac{h_{\max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{\max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right] \quad (5-17)$$

### 5.2.3. METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO PARA SISTEMAS DE INFILTRACIÓN (DAEE/ CETESB, 1980)

El método de la "envolvente" o "método de la lluvia" es comúnmente utilizado en el diseño de estanques de detención acelerada (DAEE / CETESB, 1980). El método se basa en que el volumen de almacenamiento necesario será la diferencia entre el volumen afluente y el volumen efluente del sistema. El método puede ser adaptado a cualquier SUDS con un volumen de almacenamiento. Para efectos de prácticos, la metodología transforma los volúmenes en láminas de agua. A continuación, la notación y variables de este método.

*He*: Lámina de agua de entrada acumulada medida a lo largo de la zona en planta del sistema.

*Hs*: Profundidad del agua de salida acumulada, también medida sobre el área en planta del sistema.

La función *He* es construida multiplicando las curvas IDF por el tiempo de duración del evento (que pasa a ser una curva HDF), por factores de escorrentía y relaciones del área.

La expresión de Talbot permite una solución explícita del volumen máximo (Azzout *et al.*, 1994), como se muestra a continuación:

$$i = \frac{aT^b}{t+c} \quad (5-18)$$

Donde

$i$ : Intensidad de la lluvia (mm/h)

$T$ : Período de retorno (años)

$t$ : Duración de la lluvia (h)

$a$ ,  $b$  y  $c$ : parámetros de la ecuación

La expresión de  $He$ , en mm, es:

$$He = \beta \frac{aT^b}{t+c} \frac{t}{60} \quad (5-19)$$

En donde  $\beta$  es la relación entre el área aportante efectivo y el área de drenaje del sistema.

$H_s$  (mm) es la función producto de la multiplicación del flujo de salida constante por el tiempo de duración del evento:

$$H_s = \gamma H q_s \frac{t}{60} \quad (5-20)$$

Donde

$q_s$  : Flujo de salida constante del dispositivo (mm/h)

$\gamma$  : Relación entre el área de percolación y el volumen del dispositivo ( $\text{mm}^{-1}$ )

$H$  : Profundidad media del dispositivo (mm)

$t$ : Duración de la lluvia (min)

Para calcular el volumen máximo de esorrentía que contendrá la trinchera, se calcula el comportamiento del volumen acumulado en función del tiempo con relación a las diferentes alturas:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial (H_e - H_s)}{\partial t} = 0 \quad (5-21)$$

Remplazando la ecuación 5-21 por las expresiones anteriores:

$$\beta \frac{aT^b}{t+c} \left[ 1 - \frac{t}{t+c} \right] - \gamma H q_s = 0 \quad (5-22)$$

Simplificando:

$$\beta \frac{caT^b}{(t+c)^2} - \gamma H q_s = 0 \quad (5-23)$$

En este paso se despeja la ecuación 5-23, dejando al tiempo a un lado:

$$t = \sqrt{\frac{\beta caT^b}{\gamma H q_s}} - c \quad (5-24)$$

Siendo ésta la duración de donde la diferencia entre el caudal afluente y el caudal efluente en la trinchera es máxima; es decir, es decir, ésta será la mayor demanda que la zona le exigirá al sistema y responde a la siguiente ecuación:

$$V_{\max} = \left( \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta T^{b/2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{H} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (5-25)$$

A partir de esta expresión, se puede hacer el pre-dimensionamiento de una trinchera así como cualquier otro SUDS. Este diseño se basa en la relación entre la retención y la salida de la escorrentía superficial en el dispositivo. Cabe recalcar que esta metodología no tiene en cuenta el control sobre la contaminación, tampoco se enfatiza en otros aspectos relevantes, por ejemplo la localización.

La longitud del dispositivo está en función al trazado arquitectónico (por ejemplo, una longitud coincidente con la longitud de un estacionamiento). El ancho de la sección de la trinchera no debe ser muy estrecho ni muy ancho para no ocupar mucho espacio en el terreno (anchos normalmente utilizados entre 0.8 m a 1.0 m). Luego de haber escogido estas dos dimensiones, se procede al cálculo de la profundidad necesaria para el buen funcionamiento de este dispositivo. Para esto, se tiene que seguir los siguientes pasos:

1. Calcular del coeficiente  $\beta$

$$\beta = \frac{CA}{BL} \quad (5-26)$$

Donde

A: Área contribuyente de la trinchera

C: Coeficiente de escorrentía del área contribuyente

B: Ancho de la trinchera

L: Longitud de la trinchera

2. Se procede a calcular  $\gamma$  por medio de la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{2L}{LB} = \frac{2}{B} \quad (5-27)$$

Donde B debe estar en mm.

3. Se remplaza en la ecuación 5-25

$$nH = (k_1 - k_2 \sqrt{H})^2 \quad (5-28)$$

Donde  $nH = V_{Máx}$ , y  $k_1$  y  $k_2$  son coeficientes se utiliza para el desarrollo de las expresiones del método. Estos no tienen ninguna función específica en la trinchera, solo se encargan de simplificar ecuaciones.

4. Se calcula los coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$ :

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta T}^{b/2} \quad (5-29)$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{q_s} \quad (5-30)$$

5. Despejando la ecuación 5-28, se puede obtener que, la profundidad  $H$  de la trinchera (mm) es:

$$H = \left[ \frac{k_1(k_2 - \sqrt{n})}{n - k_2^2} \right]^2 \quad (5-31)$$

Y así se obtiene la profundidad y el dimensionamiento total de la trinchera de infiltración. El siguiente gráfico es el resumen de ecuaciones que rigen el diseño de una trinchera de retención por este método:

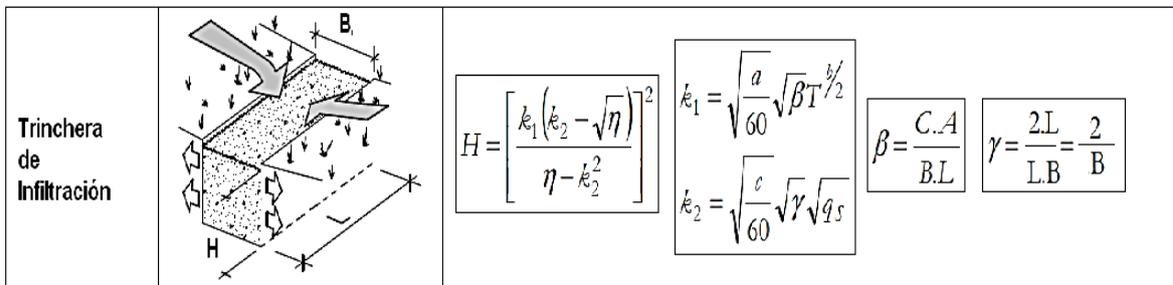


Figura 5-7. Resumen de fórmulas de dimensionamiento (A. Lopes & J. Ayruch, 2007)

5.2.4. BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT (BRE) DIGEST 365 (BRE, 1991)

Esta metodología de diseño y dimensionamiento de trincheras, se basa en la *ecuación de continuidad*:

$$I - O = S \quad (5-32)$$

Donde

$I$ : Volumen de entrada proveniente del área impermeable de drenaje hacia la trinchera ( $m^3$ )

$O$ : Volumen de salida proveniente de la infiltración del volumen de agua en el suelo durante el evento ( $m^3$ )

$S$ : Capacidad de almacenamiento requerido por la trinchera para balancear temporalmente el flujo de entrada y salida ( $m^3$ )

*Volumen de entrada en la trinchera*

$$I = A \cdot R \quad (5-33)$$

Donde

$A$ : Área impermeable de drenaje hacia la trinchera ( $m^2$ )

$R$ : Lluvia total del evento de diseño (de 10 años de periodo de retorno) (m)

*Volumen de salida en la trinchera*

$$O = a_{50} \cdot f \cdot D \quad (5-34)$$

Donde

$a_{50}$ : Superficie interna de la trinchera al 50% de la profundidad efectiva, sin tener en cuenta el área de drenaje suministrada por la base (asumiendo que el área base de la trinchera se colmatara al paso del tiempo, producto de la captura de finos, convirtiendo la infiltración de esta área en ineficiente) ( $m^2$ )

$f$ : Tasa de infiltración del suelo, determinada en campo (m/h)

$D$ : Duración del evento (h)

El almacenamiento de la trinchera debe ser igual o mayor a la diferencia entre el flujo de entrada menos el flujo de salida. Es el volumen efectivo requerido entre la base de la trinchera y el nivel de la superficie de drenaje. En la siguiente tabla se exponen los pasos para el dimensionamiento de una trinchera a partir de esta metodología.

**Tabla 5-6. Pasos para calcular el volumen máximo demandado (BRE, 1991)**

Determinar $q$ (m/h) en terreno	Determinada en campo según las metodologías del anexo 7
Escoger el tipo de sistema a implementar	Pozo relleno de gravas en forma circular, cuadrada o trincheras
Calcular el volumen requerido ( $S$ )	Se halla para un caudal de entrada para un evento de duración $D$ con un periodo de retorno de 10 años
Repetir este último paso para diferentes duraciones del evento	Los pasos se repiten con una duración del evento distinta, con el fin obtener el volumen máximo demandado

Finalmente, al obtener diferentes duraciones de evento y determinar cuál evento exige la máxima capacidad en la trinchera, ésta última será la finalmente escogida como la geometría real de la trinchera. Se debe garantizar que el tiempo de vaciado (el cual responde a la siguiente ecuación) sea menor a 24 horas.

$$t_{50} = \frac{S \cdot 0.5}{a_{50} \cdot f} \quad (5-35)$$

La metodología, al realizar suposiciones en sus cálculos, genera un factor de seguridad. A continuación, las suposiciones encontradas en este método.

- El porcentaje de escorrentía del área de drenaje es el 100% de esta, por lo tanto no se están teniendo en cuenta pérdidas por encharcamientos y humectación de la superficie.
- No se tiene en cuenta el tiempo en que le toma a la escorrentía llegar a la trinchera; el volumen de almacenamiento necesario por la trinchera es calculado con la instantánea descarga del flujo de entrada sobre esta.
- El flujo de salida en la trinchera se encuentra subestimado, mayores tasas de infiltración ocurren a mayor profundidad de almacenamiento en la práctica que las asumidas en el diseño, y teniendo en cuenta que la infiltración para el diseño se basa en el tiempo de duración del evento mas no en el tiempo de duración de la escorrentía, la duración será considerablemente más larga (depende de la longitud de la superficie de drenaje).

#### 5.2.5. *DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS POR INFILTRACIÓN* (Vermont Stormwater Management Manual 1, 2002)

Las técnicas de infiltración en general, deben diseñarse para infiltrar toda la escorrentía captada sin considerar la infiltración por las paredes. El cálculo del área superficial del sistema de infiltración se realiza a partir de la siguiente ecuación.

$$A_p = \frac{V_w}{\left( nd_t + \frac{fT}{12} \right)} \quad (5-36)$$

Donde

$A_p$  : Área superficial

$V_w$  : Volumen de diseño

$n$  : Porosidad (asuma 0.4)

$d_t$  : Profundidad de la trinchera (profundidad máxima de 2.2 m y separado al menos 1.0 m del máximo nivel freático).

$f$  : Tasa de infiltración

$T$  : Tiempo de llenado de la trinchera (generalmente se asume un valor menor a las 2 horas).

Luego de determinar el área superficial, la cual será el área de drenaje total mínima que debe tener el sistema para infiltrar el volumen de diseño, se eligen las dimensiones de la trinchera (longitud y ancho).

#### 5.2.6. METODOLOGÍA CHILE (Aguado & Albert, 1994)

A continuación, los pasos para llevar a cabo el dimensionamiento de sistemas de infiltración a partir de la metodología Chile:

##### 1. Selección de una lluvia de diseño

Se recomienda dimensionar el volumen de almacenamiento del sistema, seleccionando la lluvia de diseño de mayor periodo de retorno entre las siguientes:

- i.  $T = 5$  años, si aguas abajo existe una red de drenaje bien desarrollada.
- ii.  $T = 10$  años, si no existe una red de drenaje bien desarrollada.

No sobra visitar a la entidad encargada de la zona de trabajo, y determinar si la zona cuenta con un evento característico para el diseño hidrológico, o si por el contrario, la entidad cuenta con periodos de retorno según el tipo de estructura a diseñar.

La metodología se basa en la máxima diferencia entre el volumen acumulado de aguas lluvia que recibe el sistema y el volumen acumulado infiltrado por la técnica para una lluvia de diseño con una precipitación y duración característica.

## 2. Tasa de infiltración

La tasa de infiltración del terreno debe estimarse en base a ensayos en terreno realizados por un laboratorio autorizado.

## 3. Volumen afluente acumulado

Determinamos el volumen acumulado generado por una lluvia de período de retorno  $T$  y una intensidad media determinada, de acuerdo a la curva IDF correspondiente al área de trabajo. El volumen afluente acumulado en metros cúbicos, para un tiempo, en horas, se calcula como:

$$V_{afl}(t) = 1.25 \cdot 0.001 C I_t A t = 0.00125 C A P_t^T \quad (5-37)$$

Donde

$C$ : Coeficiente de escorrentía superficial del área total aportante  $A$  ( $m^2$ )

$I_t$ : Intensidad de la lluvia de período de retorno  $T$  y duración  $t$ , en (mm/h)

$t$ : Tiempo acumulado (h)

$P_t^T$ : Precipitación acumulada (mm) en el tiempo  $t$  para una lluvia de periodo de retorno  $T$

El valor de  $V_{afl}$  en función de  $t$  se denomina *curva de recarga*. Se recomienda multiplicar el volumen acumulado  $V_{afl}$  por un factor de seguridad de 1.25, y así considerar la porción de lluvia que cae antes y después de la porción más intensa de la tormenta, no incluida en las curvas IDF.

## 4. Volumen de almacenamiento

Para calcular el volumen de almacenamiento  $V_{alm}$  del sistema de infiltración, se estima el volumen que puede ser drenado por la superficie de drenaje a partir de la tasa de infiltración estimada en función del tiempo.

Gráficamente, podemos determinar la máxima diferencia que hay entre el volumen afluente acumulado de agua lluvia o volumen de recarga  $V_{afl}(t)$  y el volumen acumulado infiltrado  $V_{inf}(t)$ , ambos en función del tiempo. Éste último, en metros cúbicos, está dado por:

$$V_{inf}(t) = 0.001 f C_s A_e t \tag{5-38}$$

Donde

$f$ : Tasa de infiltración del suelo

$A_e$ : Superficie de infiltración de la técnica

$T_a$ : Tiempo acumulado

$C_s$ : Coeficiente de seguridad que afecta la capacidad de infiltración dependiendo de las propiedades del agua y las condiciones de mantenimiento, toma en cuenta los efectos de la colmatación. Para su determinación, se recomienda seguir el siguiente procedimiento.

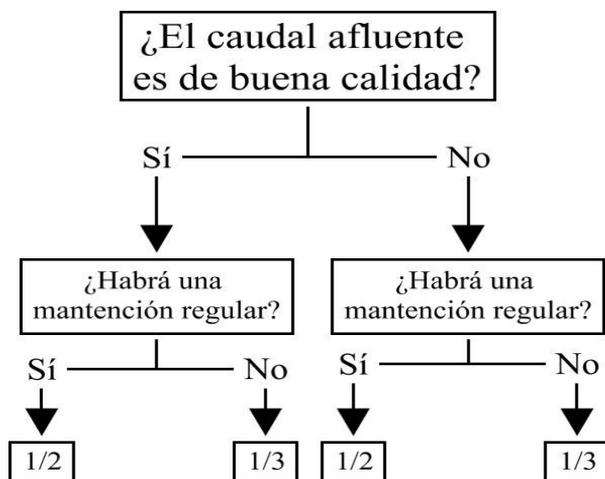


Figura 5-8. Determinación del coeficiente  $C_s$  (Aguado & Albert, 1994)

El volumen de almacenamiento necesario se calcula como:

$$V_{alm} = Max(V_{afl}(t) - V_{inf}(t)) \tag{5-39}$$

Si la tasa de infiltración del terreno es siempre mayor que la intensidad de la lluvia, no se requiriera un volumen de almacenamiento.

#### 5. *Espesor de la estructura*

El espesor mínimo necesario por la estructura es:

$$e = V_{alm} / (nA_e) \quad (5-40)$$

Donde  $n$  es la porosidad del material de relleno del sistema (0.3 para efectos de diseño)

#### 6. *Tiempo de vaciado*

El tiempo máximo de vaciado del volumen almacenado en la estructura, debe ser inferior a 48 horas. Este tiempo máximo (en horas) se puede estimar a partir de la siguiente relación:

$$t_m = \frac{ne_s}{C_s f} \quad (5-41)$$

Donde

$e_s$  : Profundidad de la estructura (m)

$f$ : Tasa de infiltración del suelo (mm/h)

$C_s$  : Coeficiente de seguridad adoptada

$n$  : Porosidad del material de relleno (se recomienda un valor de 0.3)

#### 5.2.7. *METODOLOGÍA MORA (Mora et al., 2011)*

Para el desarrollo de esta metodología se deberá seguir el siguiente procedimiento:

*Conocer la descarga pico del evento:* Esta descarga pico se puede calcular por medio del método racional entre otros.

Calcular el volumen del flujo ( $V_f$ ): El volumen se determina, multiplicando la duración máxima del evento ( $D$ ) por su correspondiente caudal de flujo ( $Q_f$ ), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_f = D \cdot Q_f \quad (5-42)$$

Obtener el volumen de almacenamiento de la trinchera ( $V_A$ ): Este volumen se calcula de la siguiente manera:

$$V_A = n \cdot V_t \quad (5-43)$$

Donde

$n$ : Porosidad del material de relleno en la trinchera

$V_t$ : Volumen estandar del sistema de trinchera

Calcular el volumen no retenido por la estructura ( $V_p$ ):

$$V_p = V_f - V_A \quad (5-44)$$

Determinar la lámina de agua ( $L_A$ ), no retenida por la trinchera:

$$L_A = \frac{V_p}{A_s} \quad (5-45)$$

Donde  $A_s$  es el área superficial de la estructura ( $m^2$ ).

Finalmente la lámina de agua equivalente se convierte en intensidad, al dividir esta por la duración del evento ( $D$ ), y aplicando el método racional se puede determinar el caudal no retenido por la estructura ( $Q_p$ ), el cual será conducido por una tubería perforada para evitar el rebose de la estructura.

### 5.3. DISEÑO PRE-TRATAMIENTO

#### 5.3.1. CÁMARA DE SEDIMENTACIÓN (Vermont Stormwater Management Manual 2, 2002)

La ecuación de Camp-Hazen es utilizada para calcular el área requerida para un filtro orgánico o arena como sedimentador para un pre-tratamiento. El área requerida para la cámara de sedimentación se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$A_s = -\frac{Q}{W} \cdot \ln(1-E) \quad (5-46)$$

Donde

$A_s$  : Área superficial de la cámara

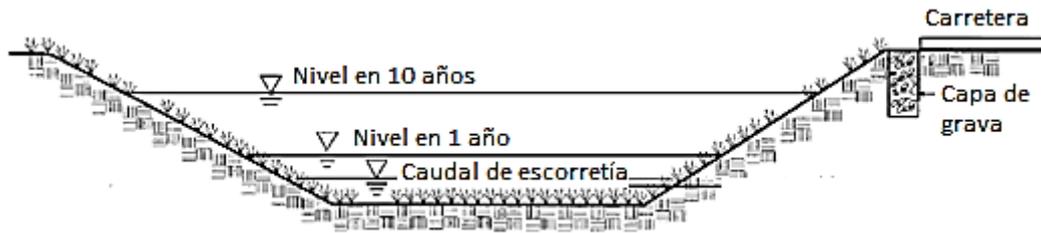
$E$  : Eficiencia de la cámara (utilizar 90 %)

$W$  : Velocidad de la partícula en la cámara (utilizar 0.12 mm/s para partículas de tamaño de limo)

$Q_o$  : Tasa de descarga de la cámara (Volumen de escorrentía de diseño para la cámara entre el tiempo de retención, normalmente asumido como 24 horas)

#### 5.3.2. CUNETA VERDE (Vermont Stormwater Management Manual 2, 2002)

Para el dimensionamiento de una cuneta verde, debe tenerse en cuenta que la longitud total de la cuneta debe ser lo suficientemente larga para mantener la escorrentía tratada en el dispositivo por 10 minutos, con una velocidad no mayor a 0.3 m/s y una lámina de agua menor a 12 cm. El suelo de la cuneta debe ser moderadamente permeable. El volumen manejado por la cuneta es determinado según lo demandado por la trinchera.



**Figura 5-9. Esquema de una Cuneta verde (Vermont Stormwater Management Manual 2, 2002)**

El dimensionamiento de cunetas verdes se logra siguiendo los consecuentes pasos:

1. Determinar el caudal de descarga que manejará la cuneta verde a partir de lo demandado en el sistema de infiltración.
2. Escoger la geometría de la sección transversal (Ancho de fondo y pendiente lateral del canal) y la pendiente longitudinal del canal (superior a una pendiente del 1%).
3. Definir un coeficiente de Manning para la cuneta, según el tipo de revestimiento que decidamos para esta (ver anexo 9).
4. Calcular a partir de la ecuación de Manning y la ecuación del caudal ( $Q=V \cdot A$ ) la lámina de agua del flujo, verificando que esta sea inferior a 12 cm.
5. Determinar la velocidad del fluido a partir de la ecuación del caudal, teniendo en cuenta que este debe ser menor a 0.3 m/s.
6. Puesto que debemos mantener el volumen de escorrentía por 10 minutos como mínimo, la longitud del tramo será igual a:

$$L = V \cdot T \quad (5-47)$$

Dónde

$L$ : Longitud de la tubería

$V$ : Velocidad media del flujo

$T$ : Tiempo de retención del 100% de la escorrentía

7. La longitud final de la cuneta será la multiplicación entre el porcentaje del volumen de tratamiento con respecto al total volumen de escorrentía por la longitud necesaria para tratar el 100% de la escorrentía.

$$L_R = \%Q \cdot L \quad (5-48)$$

Donde

$L_R$ : Longitud definitiva de la cuneta verde

$\%Q$ : Cociente entre el caudal de la cuneta verde y el caudal total de escorrentía

$$\%Q = \frac{Q_{cuneta}}{Q_{escorrentía}}$$

#### 5.4. TRINCHERAS DE RETENCIÓN

Este tipo de dispositivos tienen dos funciones específicas: Eliminar los contaminantes que traen las aguas de escorrentía; Limitar riesgos de inundaciones producidos por los eventos extremos de lluvia en la zona en donde la trinchera es construida. Los siguientes elementos se deben tener en cuenta para el diseño de trincheras de retención:

##### 1. Material empleado como filtro

El material utilizado para ello debe tener un alto contacto con el fluido para remover la mayor cantidad de sólidos, se garantiza un contacto constante del flujo con el filtro a través del diseño geométrico, cabe aclarar que esto se hace para eventos hidrológicos pequeños. En la siguiente tabla se muestran algunos materiales que cuentan con buenas tasas de infiltración.

**Tabla 5-7. Suelos con buenas tasas de infiltración (Woods-Ballard *et al.*, 2007)**

#	Material de relleno
1	Grava
2	Arena
3	Arena francosa
4	Franco arenoso
5	Franco
6	Franco limoso

Usualmente los materiales empleados para el filtro son capas de grava fina o arena con un espesor de 150 mm, aunque se podría utilizar cualquier otro material de relleno (ver

tabla anexo 7) siempre y cuando se garantice que la tasa de infiltración del material empleado para el filtro sea superior a la intensidad del evento de diseño (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

### 2. *Material de relleno para el almacenamiento de agua*

Entre más poroso sea el material de relleno, habrá mayor porcentaje de vacíos, por lo tanto la capacidad de almacenamiento para una misma trinchera será mayor. La demanda de almacenamiento dependerá de que tan rápido sea la salida del fluido de esta (Woods-Ballard *et al.*, 2007). Por lo general, se utilizan materiales con altos valores en porosidad (gravas) para el relleno de trincheras. En la tabla del anexo 8 se pueden encontrar típicos valores de porosidad para distintos materiales de relleno.

### 3. *Sistema de tuberías para el transporte del fluido*

Para el dimensionamiento de las tuberías para el transporte del flujo es necesario conocer cuál será el caudal de entrada. Éste está en función de la tasa de filtración que contenga el material de relleno. La tasa de filtración se puede estimar mediante la ecuación de Darcy (ver ecuación 5-49). La velocidad con la que desciende el flujo depende de la relación de vacíos producidos por el material empleado como filtro (Woods-Ballard *et al.*, 2007). El diámetro de la tubería perforada que se encarga de la salida del flujo es calculado mediante métodos convencionales de dimensionamiento de tuberías. A continuación, se muestra la ecuación de Darcy para determinar el caudal de salida del material de relleno.

$$Q = A \cdot k \cdot s \quad (5-49)$$

Donde

$Q$ : Flujo de salida del material de relleno ( $m^3/s$ )

$A$ : Área de la sección transversal de la trinchera ( $m^2$ )

$k$ : Permeabilidad del material de relleno ( $m/s$ )

$s$ : Gradiente hidráulico (se asume que este es igual a la pendiente del fondo de la trinchera)

## 6. CONSTRUCCIÓN

---

En el presente capítulo, se describen los pasos y aspectos más importantes a tener en cuenta a la hora de construir una trinchera o cualquier otra técnica SUDS. La construcción de este tipo de estructuras exige ciertas pautas y prioridades normalmente no tenidas en cuenta a la hora de la elaboración de un sistema tradicional. A continuación, se presentan los componentes y materiales utilizados en la elaboración de una trinchera.

### 6.1. MATERIALES Y COMPONENTES EN LA CONSTRUCCIÓN

**GEO TEXTIL:** el geo textil tiene la función de prevenir la colmatación en el sistema, en particular en relación al material de relleno empleado, debido a procesos de sedimentación de material fino no capturado en el proceso de filtración (CIRIA C698, 2007).



**Figura 6-1. Geo textil (tomado de: <http://hogar.pisos.com>)**

**GEO MEMBRANA:** es una lámina plástica impermeable, normalmente compuesta de polipropileno, polietileno de alta densidad u otro material geo sintético. La función de la geo membrana en el sistema es evitar la infiltración del flujo en el terreno (CIRIA C698, 2007).



**Figura 6-2. Geo membrana (tomado de: <http://grupoagrinmarsac.blogspot.com>)**

**MATERIAL DE RELLENO:** El material poroso de las trincheras se caracteriza por su durabilidad y su resistencia mecánica. Existen diversos materiales para el relleno de trincheras, entre los más comunes se encuentran gravas, cilindros huecos en concreto y canastillas tipo Aquacell (Proton *et al.*, 2008).



**Figura 6-3. Cilindros huecos (Proton *et al.*, 2008)**



**Figura 6-4. Gravas (Proton *et al.*, 2008)**

Los criterios para la relación del material poroso son usualmente la relación de vacíos, el costo, el espacio disponible en la trinchera y su resistencia mecánica. Para el relleno de la trinchera por gravas, normalmente se utilizan rangos entre 40 y 60 milímetros de diámetro, esto con el fin de garantizar una relación de vacíos suficientemente alta para que permita la filtración del fluido (el rango común de relación de vacíos para el material de relleno oscila entre 0.3 y 0.5), ver anexo 8 (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

**CUNETAS VERDES:** son canales revestidos por una capa vegetal, diseñados para conducir y retener el flujo, aunque también pueden favorecer la infiltración en el terreno (Vermont Best Management Practices Manual 2, 2002)

## 6.2. ASPECTOS PREDOMINANTES

En el momento de la construcción de estos sistemas, además de proteger el área donde se localizará, se deben proteger todas las áreas aledañas a este, cuando esto no se hace puede provocar la alteración de las características de diseño de la trinchera. A continuación, se muestran algunos aspectos predominantes en el proceso constructivo de estas técnicas:

**CONTROL DE EROSIÓN:** la erosión del suelo es el proceso mediante el cual la tierra de la superficie se desgasta por la acción del viento, el agua, el hielo y la gravedad. El ritmo de erosión se incrementa enormemente gracias a actividades de urbanización, especialmente actividades de construcción. Cualquier actividad que altere el suelo o la vegetación natural tiene el potencial de incrementar la erosión en el suelo. Los factores que afectan la erosión potencial de cualquier sitio incluyen el tipo de suelo, la geología, la vegetación, la topografía, el clima y el uso del terreno. Las propiedades físicas del suelo tales como el tamaño de las partículas, la cohesión y la densidad afectan su potencial. La vegetación juega un rol muy importante en el control de la erosión (CIRIA C698, 2007).

Como no se debe permitir que la escorrentía proveniente del sitio de construcción sea transportada por el sistema en construcción (a menos que esté contemplado en el diseño), deben tomarse otras medidas para el manejo de esto: se pueden utilizar técnicas tales como vegetación, geo textiles diseñados para el control de erosión, grama reformada, zanjas con rellenos de gravas y sitios con pendientes planas (New Jersey Department of Environmental Protection, 2000).

La tabla 6-1 relaciona el tipo de suelo en el que se encuentra la obra con la velocidad máxima permitida según la técnica utilizada para el control de este aspecto:

**Tabla 6-1. Velocidad máxima según el suelo (CIRIA C697, 2007)**

TIPO DE SUELO	VELOCIDAD MÁXIMA PERMITIDA (m/s)	
	SEMBRADO	CUBIERTA DE CÉSPED
Arena	0.60	0.90
Franco limoso, franco arenoso, arena arcillosa	0.60	0.90
Franco arcillo limoso, franco arcillo arenoso	0.75	1.20
Arcilla, franco arcilloso, arcilla arenosa, arcilla limosa	0.90	1.50

**CONTROL DE SEDIMENTOS:** la escorrentía superficial, a partir de la velocidad y el volumen de escorrentía favorece el transporte de sedimentos. Estos se van depositando en la superficie a medida que la velocidad o el volumen disminuyen. Los sedimentos depositados pueden ser re-suspendidos por la escorrentía posterior, generando un movimiento progresivo de los sedimentos. En cuanto a la deposición por viento, las partículas finas y de arena son depositadas luego que la fuerza del viento sea incapaz de mantenerlas en movimiento. Las partículas transportadas progresivamente a través de la

superficie son usualmente atrapadas en las irregularidades de la superficie (Williams *et al*, 2001).

Los sistemas para el control de sedimentos son necesarios para reducir la descarga de éstos aguas abajo o en canales recolectores. Las técnicas para el control de sedimentos incluyen barreras de fardos de paja, geo textiles para el control de finos y pozos de sedimentación. El tipo de instalación a utilizar depende del área y de la pendiente del sitio (CIRIA C698, 2007).

Toda escorrentía con potencial de erosión debe pasar a través de un sistema de control de sedimentos y mallas geo textiles antes del desarrollo del lugar. La tabla 6-2 resume las áreas máximas a drenar, la pendiente longitudinal, las pendientes de las barreras de fardos de paja y el geo textil para el control de finos.

**Tabla 6-2. Límites según el sistema de control de sedimentos (CIRIA C697, 2007)**

Sistemas para el control de Sedimentos	LÍMITES MÁXIMOS PERMITIDOS		
	Área a drenar (ha)	Longitud de la pendiente del sistema de drenaje (m)	Gradiente de la pendiente del sistema de drenaje
Barreras de fardos de paja y geo textiles para el control de finos	De 0.6 - 1.2 por cada 100 metros lineales	50	1:2 (50%)

Para el control de sedimentos, las barreras de fardos de paja pueden ser utilizadas para sitios pequeños. Cuando el área de drenaje es mayor al área permitida por los sistemas anteriores, la escorrentía debe ser captada en zanjas de desviación y conducida a pozos temporales de sedimentación (CIRIA C698, 2007).

Las barreras de fardos de paja pueden ser ubicadas en la base de una pendiente para actuar como barreras de sedimentos. No se recomienda el uso de éstas en canales o cunetas. Las barreras de fardos de paja son de naturaleza temporal y puede que funcionen solo por un periodo de tiempo (semanas o meses). La correcta instalación y mantenimiento son necesarios para asegurar su buen funcionamiento (CIRIA C698, 2007).

Las barreras para el control de finos pueden ser instaladas como barreras temporales alrededor del contorno de la base del área afectada, pero su uso no es recomendado en

canales de drenaje. No se utilizan para delimitar el área, tampoco en áreas donde se concentra el flujo. En el caso de una mayor exigencia, utilizar un filtro más robusto (New Jersey Department of Environmental Protection, 2000).

Estas barreras pueden ser también instaladas temporalmente en vías parcialmente construidas para prevenir el transporte de sedimentos hacia otras zonas (CIRIA C698, 2007).

**CONTROL DE CONTAMINACIÓN:** la contaminación del sistema está compuesta por los dos aspectos mencionados anteriormente: el control de sedimentos y el control de erosión. Si se garantiza un buen manejo de estos dos aspectos, se estaría garantizando un buen control para evitar la contaminación del sistema y la zona de trabajo (CIRIA C698, 2007).

Un plan ambiental debe ser puesto en marcha. Éste debe incluir: la evaluación de riesgos con control de medidas, la ubicación de las rutas para la deposición de contaminantes, la ubicación de los sistemas del transporte de la escorrentía, los requerimientos para la descarga y consecución de licencia (WRc, 1998).

A continuación, se especifican la fuente de contaminación y las recomendaciones dadas para la solución del problema:

- Para disminuir el potencial de falla en suelos excavados y expuestos, se deben implementar vallas de sedimentos o barreras de fardos de paja, localizados en lugares descendentes. Otra medida es desviar la escorrentía a partir de cunetas y canales (New Jersey Department of Environmental Protection, 2000).
- Material almacenado: el efecto depende del material almacenado. Si el material es arena fina, el suelo será erosionado más rápidamente que si está compuesta por materiales granulares pesados. Se recomienda localizarlo en lugares alejados de los canales y el sistema de drenaje (SEPA, 2011).
- Vías de acceso: La escorrentía en las rutas de acceso contiene gran cantidad de sólidos e hidrocarburos suspendidos. Se debe diseñar las vías para que ocupen el menor espacio posible. Además, se debe contar con baja pendiente para evitar el

aumento de la velocidad en la escorrentía. Estas vías deben ser rociadas regularmente para mantener un espacio libre de polvo (CIRIA C698, 2007).

Para reducir el porcentaje de sólidos suspendidos en la escorrentía, se recomienda adoptar las siguientes técnicas: enviar la descarga sobre un canal verde, monitoreando la velocidad de descarga para mantener una baja velocidad para promover la retención; conducir la descarga a través de un filtro de gravas; utilizar estanques de amortiguación.

Además, es necesario que todos los operarios relevantes deban entender el mecanismo y el propósito de los diferentes componentes de las técnicas SUDS, para garantizar una correcta construcción y protección del sistema (CIRIA C697, 2007).

### 6.3. PASOS Y CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CUALQUIER TÉCNICA SUDS

Para la construcción de una trinchera, así como de cualquier otra técnica de los SUDS, se recomienda realizar una programación preliminar de actividades como cualquier otro proyecto. Esta programación debe tener en cuenta las siguientes actividades: identificación de áreas destinadas a la protección del sistema, áreas destinadas a rutas de acceso y al almacenamiento de materiales y equipos; instalación de trampas de sedimentos y barreras de control de la escorrentía, sistema principal de transporte de escorrentía, limpieza y clasificación del suelo, estabilización de superficie de construcción de inmuebles, paisajismo, estabilización final y mantenimiento (CIRIA C697, 2007).

La experiencia muestra que realizar la obra en menos tiempo disminuye los problemas de erosión y la sedimentación en el sistema (New Jersey Department of Environmental Protection, 2000). En la tabla 6-3 se muestran; para distintas actividades de construcción, las consideraciones a tener en cuenta en la programación general del proyecto. Cabe recalcar que las actividades que se muestran en la tabla 6-3 no siempre siguen los pasos descritos, además, la programación varía de acuerdo al clima u otros imprevistos.

**Tabla 6-3. Actividades del programa de construcción (adaptado de CIRIA C697, 2007)**

Actividad de Construcción	Componentes y desarrollo
Identificación de áreas destinadas a la protección del sistema	La delineación del sitio debe ser finalizada antes de que cualquier actividad de construcción inicie.
Vías de acceso y áreas destinadas al almacenamiento de materiales y equipos	A estas áreas se les debe garantizar la estabilidad del terreno y una protección temporal frente a la escorrentía y demás mientras la construcción se lleva a cabo.
Trampas de sedimentos y barreras	Se instalan pozos, trampas de sedimentos y barreras necesarias para la protección de espacios cuando se inicia la etapa de excavación.
Control de la escorrentía	Se instalan canales para el desvío de escorrentía, hendiduras y zanjas perimetrales, siendo estas medidas que funcionan en conjunto con las trampas de sedimentos. Estas se realizan durante el proceso de alteración del terreno.
Sistema principal de transporte de escorrentía	El sistema principal para el manejo de la escorrentía debe contar con entradas y salidas lo suficientemente resistentes para resistir la escorrentía y los sedimentos que esta contiene. Además, el sistema debe medir el nivel de la escorrentía, y así registrar eventos.
Limpieza y clasificación del suelo	Se abarca todo lo referente a la preparación del terreno: el corte, relleno y clasificación del suelo. La mayor parte de esta etapa es realizada luego de que el sistema principal de manejo escorrentía y control de sedimentos sea instalado. Se deben instalar medidas de control adicionales en el desarrollo del proceso de gradación del suelo.
Estabilización de superficie	Abarca lo referente a al sembrado de zonas, a la limpieza e instalación del enrocado de protección. Existen medidas temporales y permanentes para la estabilización inmediata en todas las áreas próximas a ser afectadas.
Construcción de inmuebles	Antes de cualquier construcción, se debe garantizar el buen comportamiento de las posibles áreas afectadas en cuanto a la erosión y al control de sedimentos.
Paisajismo y estabilización final	Última fase de construcción. Estabilizar las áreas destapadas. Remover y estabilizar los terrenos que cuentan con medidas de control temporales. En esta fase se realiza todo lo referente a la limpieza final, plantación de árboles y arbustos, siembra de la capa vegetal e instalación del enrocado permanente.
Mantenimiento	Para el primer año, las inspecciones de mantenimiento deben realizarse semanalmente. Siempre se debe inspeccionar la zona luego de un evento.

El acceso a la zona de construcción es normalmente la primera actividad de distribución de suelos. Debe tenerse cuidado para evitar el daño a árboles o para alterar las áreas designadas como áreas de amortiguamiento. El área perimetral destinada a la protección de cada árbol, debe abarcar el perímetro logrado por el goteo de las hojas, determinado luego de un evento. Deben ser evitadas las actividades que puedan llevar a cabo la compactación de raíces (SEPA, 2011).

En las etapas iniciales de un proyecto, usualmente se construyen áreas impermeables destinadas al almacenamiento de materiales y a vías temporales de acceso. Si el sistema a construir, cuenta con áreas permeables, la construcción de zonas impermeables debe

llevarse a cabo al final del programa de construcción, al menos que se realice una adecuada protección al área de trabajo para prevenir la colmatación prematura en esta (CIRIA C697, 2007).

El sistema principal para el transporte de la escorrentía debe contar con medidas de protección en entrada y salida. La protección encontrada en la entrada y la salida del sistema principal debe ser tal que resista la erosión realizada por la escorrentía transportada. Es mejor programar este trabajo tan pronto como las condiciones climáticas lo permitan. Luego de la etapa de limpieza y construcción del proyecto, aumenta la escorrentía y el la cantidad de sedimentos transportados por esta, dificultando la construcción del sistema principal de transporte (New Jersey Department of Environmental Protection, 2000).

Si el lugar designado al almacenamiento de materiales está localizado a menos de 30 metros de un curso de agua, deben suministrarse controles adicionales de sedimentos, tales como zanjas de desviaciones o barreras de sedimentos (SEPA, 2011).

Luego de haber limpiado y clasificado el suelo, debe verificarse la estabilidad del terreno en áreas destinadas a la construcción de canales, trincheras y otras áreas. Cualquier área alterada donde no se pretenda realizar alguna actividad por más de 60 días, debe ser estabilizada con un sembrado temporal y/o abono (CIRIA C697, 2007).

Las medidas de estabilización permanente deben ser instaladas tan pronto como sea posible después de la clasificación final. El sembrado y abono (medidas temporales) pueden ser necesarios durante condiciones de clima extremas (SEPA, 2011).

Cuando en el terreno se encuentren suelos no compactados, se deben tomar medidas para que estos no se vean alterados luego de la etapa de construcción, una medida típica para disminuir el impacto en este tipo de suelos es prohibir el tránsito de maquinaria pesada u otros elementos en las zonas circundantes al suelo (WRC, 1998).

Cuando las trincheras se encuentran adyacentes a vías, una de las principales causas para que haya erosión en las trincheras de filtro, se debe a que en muchas ocasiones los vehículos se salen de la capa de rodadura de la vía pasando por encima de la estructura

provocando que el material fino se vaya cayendo o dispersando, causando la erosión. Para prevenir esto se pueden colocar barandas de protección colocadas entre la trinchera y la berma de la vía para evitar el paso de los vehículos, y con esto se pueden evitar accidentes de tránsito (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

Puede ser útil perfilar todas las actividades de distribución de suelos necesarias para completar el proyecto propuesto, y luego listar todas las prácticas que necesiten control de erosión y sedimentos (CIRIA C698, 2007).

#### 6.4. CONSTRUCCIÓN DE LA TRINCHERA

Anteriormente se mencionaron los pasos generales que debe tener en cuenta cualquier programa de construcción que desee desarrollar una técnica SUDS. Ahora, estos son los pasos específicos para la construcción de una trinchera (adaptado de Pennsylvania Stormwater Best Management Practices Manual, 2006):

- i. Proteja el área de la trinchera desde antes de la compactación del terreno hasta la instalación.
- ii. Instale la trinchera de infiltración en las fases finales de la obra de para evitar la sedimentación y/o daños causados por la actividad de construcción.
- iii. Excave la trinchera de infiltración a un nivel de sub-base uniforme, sin compactar, la superficie debe encontrarse libre de rocas y escombros. No se debe compactar la sub-base.
- iv. Ubique el geo-textil no tejido a lo largo del fondo y a los lados de la trinchera. Los rollos de geo textil no tejido deben superponerse por un mínimo de 40 cm dentro de la trinchera. Asegure exceder el perímetro de la trinchera 20 cm a la redonda con geo textil.
- v. Coloque la grava uniformemente graduada en capas de 20 cm de espesor, ligeramente compactados.
- vi. Instale la tubería perforada de forma continua, como se indique en los planos. Rellene el área circundante con capas de 20 cm de espesor ligeramente compactadas (las tuberías deben estar separadas a los pozos de sedimentación lo suficiente para que en el momento que se deseen limpiar se pueda hacer fácilmente (referencia adicional: Woods-Ballard *et al.*, 2007).

- vii. Rellene la parte superior de la trinchera con el material de filtro indicado a partir de capas de 12 cm de espesor ligeramente compactadas.
- viii. Estabilice la capa superior del suelo.
- ix. No retire la estructura de protección de entrada de sedimentos o control de erosión hasta que el sitio esté totalmente estabilizado.

## 7. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

La siguiente tabla muestra los requisitos de operación y mantenimiento que debe seguir cualquier tipo de trinchera (Woods-Ballard *et al.*, 2007):

**Tabla 7-1. Mantenimiento según la frecuencia (CIRIA C697, 2007)**

<b>PROGRAMA DE MANTENIMIENTO</b>	<b>ACCIÓN REQUERIDA</b>	<b>FRECUENCIA</b>
<b>MANTENIMIENTO REGULAR</b>	Remover residuos y basuras que están en la superficie de la trinchera.	Mensual (o según sea necesario)
	Remover y lavar las piedras expuestas en la superficie de la trinchera.	Anual (bianual durante el primer año) o cuando se ven los sedimentos en la superficie
	Podar las raíces de los árboles que puedan causar obstrucciones.	Anual (semestral el primer año)
	Remover la maleza en la superficie de la trinchera.	Mensual (al principio, después según sea necesario)
<b>MANTENIMIENTO OCASIONAL</b>	Remover los sedimentos que estén en los dispositivos de pre-tratamiento (referencia adicional: Browne <i>et al.</i> , 2011).	Semestral
	Remover raíces de árboles y árboles que crezcan cerca de la trinchera.	Según se requiera
	En lugares con altas cargas de contaminantes, retirar y reemplazar la superficie del geo textil, y lavar o reemplazar los sistemas filtrantes.	Quincenal
<b>ACCIÓN CORRECTIVA</b>	Limpiar los agujeros de las tuberías perforadas bloqueadas.	Según se requiera
	Rehabilitar las superficies de infiltración y filtración.	Según se requiera
	Si hay obstrucción en los filtros, se debe sustituir el geo textil, limpiar y reemplazar los filtros.	Según se requiera
	Excavar las paredes de las trincheras si el rendimiento de la infiltración se reduce a niveles no deseados.	Según se requiera
	Inspeccionar las entradas, salidas y comprobar la funcionalidad de los puntos de inspección, verificando que no haya bloqueo en el sistema.	Mensual
<b>MONITOREO</b>	Inspeccionar los sistemas de pre-tratamiento, entradas, superficies de la trinchera y tuberías perforadas para evitar que los sedimentos no se asientan.	Semestral

Se ha demostrado que la colmatación de estos sistemas puede reducir significativamente la eficiencia del control hidrológico (reducción de caudales pico y volúmenes de escorrentía) (Browne et al., 2011).

Después de su construcción, las trincheras deben tener un mantenimiento rutinario, para asegurar un funcionamiento eficaz del sistema. Las trincheras deben tener un acceso adecuado para que se pueda estar haciendo un control tanto adentro como afuera de la estructura.

La frecuencia y planes de mantenimiento deben estar aclarados desde el momento del diseño. Las actividades de mantenimiento deben estar especificadas en un plan de salud, seguridad y evaluación de riesgos, para que así estas técnicas puedan prestar un buen servicio a la sociedad (Woods-Ballard *et al.*, 2007).

## 8. APLICABILIDAD

---

En este capítulo, se realizará todo lo referente a la aplicación de los métodos anteriormente estudiados para las 3 ciudades seleccionadas. Luego, se extraerán los datos iniciales a partir de suposiciones y consideraciones generales, necesarias para poder realizar el dimensionamiento de las distintas estructuras.

Para realizar la selección de las ciudades para la aplicación de los métodos, fueron considerados los resultados encontrados en los distintos informes de consultoría, intentando obtener distintos tipos de suelos para la aplicación de las metodologías. De igual manera, se buscó que las tres ciudades tuviesen distintas curvas de intensidad-duración-frecuencia con el fin de tener diferentes datos de entrada en el desarrollo de cada una de las metodologías. En cuanto a la selección de la zona de aplicación, se tuvieron en cuenta las consideraciones generales expuestas en el capítulo de aspectos preliminares al diseño (capítulo cuatro), para esto, se eligieron zonas con grandes áreas impermeables, que contaran con suelos destinados al tránsito y estacionamiento de vehículos. Cabe recalcar que además de lo mencionado anteriormente, la disponibilidad de la información contribuyó con la elección de las ciudades de aplicación.

Las tres ciudades seleccionadas para la aplicación de las distintas metodologías fueron Bogotá D.C, Cartagena y Medellín. A continuación, se presenta el desarrollo de cada una de las metodologías para las distintas ciudades.

### 8.1. EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA BOGOTÁ

#### 8.1.1. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

En la figura 8-1 se muestra la zona, objeto de estudio, la cual está localizada en los predios de la empresa Homecenter de Bogotá.

La zona está localizada en la carrera 68 # 80-00, el ejercicio se realizó para el parqueadero. En la siguiente figura se visualiza el sitio de aplicación.



**Figura 8-1. Localización del área de aplicación de las metodologías. Fotografía tomada de maps.google.com**

### 8.1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

Para poder realizar el diseño de una trinchera, es necesario determinar el área que ésta drenará, por lo tanto, se calcula el área de drenaje según los diferentes usos del terreno. En este caso, contamos con un área total de  $4274 \text{ m}^2$ , de los cuales  $3717 \text{ m}^2$  están destinados al estacionamiento de vehículos y los  $557 \text{ m}^2$  restantes lo conforman zonas verdes.

### 8.1.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO

Para este ejercicio práctico, luego de estudiar distintos informes de los diferentes tipos de suelos posibles de encontrar en la capital, se tomó la decisión de suponer que en el área de aplicación se cuentan con los siguientes tipos de estratos:

Limo negro con detritos hasta una profundidad de 0.8 m, luego, una capa de 1.9 m de espesor conformada de limo negro de alta plasticidad, a partir de aquí, hasta los 8.5 m, se cuenta con una capa de arcilla gris de alta plasticidad y consistencia media - blanda. El nivel freático se encuentra en promedio a una profundidad de 3.3 m de la superficie.

A partir de la tabla de anexo 7, la cual relaciona el tipo de suelo con el coeficiente de infiltración, se determina el coeficiente de infiltración de la zona de estudio. Para un suelo con mayor porcentaje de limos, se asumió un coeficiente de 0.02 m/h ó 20 mm/h.

#### 8.1.4. ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA

Para la determinación de la intensidad de la lluvia, se utilizó el método de las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF). En el caso de Bogotá, se realizan los cálculos a partir de la ecuación de Montana:

$$I = 5354.5 \cdot (28.6 + D)^{-1.06}$$

Donde  $D$  es la duración del evento en minutos. Esta ecuación está calibrada para un periodo de retorno de 10 años. Si se quisiera cambiar el periodo de retorno de diseño, los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $X_0$  (5254.5, -1.06, 28.6 respectivamente) cambiarían.

#### 8.1.5. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

A partir de la tabla del anexo 6 tomada del reglamento técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000, se determinó el coeficiente de escorrentía del área en función del tipo de uso que se le dé al suelo. Por lo cual, el área # 1 (área destinada al parqueo de vehículos) se le asigna un valor de coeficiente de 0.8 y al área # 2 (área con predominio de zonas verdes) tiene un coeficiente de escorrentía de 0.3.

Para el cálculo del coeficiente de escorrentía ponderado del área total (4274 m<sup>2</sup>) se realiza un promedio ponderado de los coeficientes en función del área:

$$C_t = \frac{\sum_{i=1}^N C_i \cdot A_i}{A_T} = \frac{0.8 \cdot 3717\text{m}^2 + 0.3 \cdot 557\text{m}^2}{4274\text{m}^2} = 0.73$$

A partir del resultado anterior, el coeficiente de escorrentía asignado al área total es igual a 0.73.

### 8.1.6. LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA

Para la ubicación de la trinchera, se tuvo en cuenta lo descrito en el subcapítulo 4.1. A partir de dicha consideración se estableció que la zona destinada para la construcción de la trinchera se encuentra adyacente al área impermeable del área total (ver figura 8-1).

### 8.1.7. CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA

Teniendo en cuenta las consideraciones para la ubicación de trincheras, y según las características topográficas del sitio, es posible realizar un trazado preliminar de las dimensiones de la trinchera. En este caso, la máxima longitud de la trinchera está determinada por las dimensiones del parqueadero. En la figura 8-1 se visualiza la ubicación en planta de la trinchera y las distintas áreas que ésta drenará.

La máxima longitud que puede tener la trinchera es de 89 m (determinada por el trazado preliminar). En los cálculos, se asumirá un ancho igual en toda la longitud de la trinchera.

La profundidad máxima de la trinchera se encuentra limitada por el nivel freático de la zona. Teniendo en cuenta que el nivel freático promedio del área de aplicación se encuentra a una profundidad de 3.3 m, y considerando las recomendaciones estipuladas por Debo & Reese (1995) en el subcapítulo 4.1, donde se sugiere que la distancia mínima entre el fondo de la trinchera y el nivel freático sea de al menos 1 m (de 0.60 m a 1.20 m dependiendo el caso), la profundidad máxima de la trinchera será de 2.3 m.

Para lograr que el caudal de escorrentía generado por la superficie aportante se dirija al dispositivo, se debe garantizar que las pendientes de las áreas aportantes conduzcan el flujo hacia la trinchera. Las pendientes de las distintas áreas no deben ser superiores al 3 %.

### 8.1.8. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE DISEÑO

#### 8.1.8.1. MÉTODO HIDROLÓGICO PARA PEQUEÑOS EVENTOS DE LLUVIA (SSHM)

Este método no involucra un dimensionamiento del dispositivo, sólo calcula el caudal generado por el área total a partir de un evento de lluvia pequeño.

Con ayuda de la tabla 5-1 de esta metodología, se calcula el coeficiente  $R_v$  para los distintos usos de suelo encontrados en la zona de aplicación.

$A_1$ : Área destinada para el parqueo de vehículos (3717 m<sup>2</sup>)

$A_2$ : Zona verde (557 m<sup>2</sup>)

El área 1 ( $A_1$ ) se asemeja a la casilla de *áreas impermeables*, por lo tanto, el coeficiente volumétrico  $R_v$  del área es 0.99. Para el área 2 ( $A_2$ ), se asume el coeficiente del *área permeable para suelos limosos* (0.15).

Luego, a partir de la ecuación 5-1, y teniendo en cuenta que esta metodología puede ser aplicada para un evento máximo de precipitación de 38.1 mm, se determina el volumen de escorrentía generado en milímetros (mm):

$$Q_1 = P \cdot R_{v1} = 38.1 \text{ mm} \times 0.99 = 37.719 \text{ mm}$$

$$Q_2 = P \cdot R_{v2} = 38.1 \text{ mm} \times 0.15 = 5.715 \text{ mm}$$

A continuación, para calcular el volumen total generado por el evento, se multiplica el volumen de escorrentía en milímetros por el área total de cada una de las áreas aportantes, y finalmente, se realiza una suma de todos los productos:

$$\begin{aligned} Q_t &= A_1 Q_1 + A_2 Q_2 = \\ &= 3717 \text{ m}^2 \times 37.719 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} + 557 \text{ m}^2 \times 5.715 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} = 143.38 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

El volumen total generado por el evento en la zona de estudio es de 143.38 m<sup>3</sup>.

### 8.1.8.2. MÉTODO DE LAS LLUVIAS

Los datos iniciales requeridos para el desarrollo de la metodología son: el periodo de retorno del diseño  $T$ , el coeficiente de seguridad  $\alpha$ , la capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración  $q_{as}$  y la superficie activa.

El diseño de la estructura se realizará para un periodo de retorno de 10 años ( $T$ ), siendo éste el caso extremo de los dos casos que propone la metodología. La metodología recomienda utilizar un valor de 0.1 como coeficiente de seguridad. En cuanto a la determinación de la capacidad de absorción por unidad de superficie de infiltración  $q_{as}$ , se calcula de la siguiente manera:

$$q_{as} = \frac{f \text{ (m/h)}}{3600} = \frac{0.02 \text{ m/h}}{3600} = 0.000006 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$$

La superficie activa  $S_a$  se calcula con ayuda de la ecuación 5-3, multiplicando el coeficiente de aporte  $C_a$  por el área correspondiente. El coeficiente de aporte es determinado según las características del área de análisis (recorrer a la tabla 5-3): el coeficiente de aporte del área 1 ( $A_1$ ) es de 0.95, correspondiendo al grupo denominado *estacionamiento y carreteras*; el área 2 ( $A_2$ ) cuenta con un coeficiente de 0.3, el cual corresponde a *espacios verdes, paisajes y campos deportivos*. A continuación, se deduce el coeficiente promedio, calculado como el promedio ponderado de los coeficientes mencionados antes, con respecto a las áreas correspondientes. El coeficiente correspondiente al área total será de 0.87. La superficie activa es la siguiente:

$$S_a = C_{pon} \cdot A_t = 0.87 \times 4274 \text{ m}^2 = 3698.28 \text{ m}^2 = 0.369 \text{ ha}$$

Luego, se debe determinar la curva altura - duración - frecuencia (HDF), la cual es el resultado de la curva IDF para Bogotá, multiplicada por la duración de cada evento (ecuación 3-17). A continuación, se presenta una tabla que relaciona la duración del evento con la intensidad y altura máxima de éste.

**Tabla 8-1. Relación entre la intensidad la duración y la altura de precipitación para el caso de la zona de estudio en Bogotá**

<i>D</i> (min)	<i>i</i> (mm/h)	<i>H</i> (mm)
5	129.06	10.76
10	111.41	18.57
30	71.57	35.79
60	46.18	46.18
120	26.69	53.38
180	18.63	55.89
240	14.25	57.01
300	11.51	57.55
360	9.63	57.81
420	8.27	57.92

La metodología implica dimensionar la estructura a partir de iteraciones en función de la variable que se disponga, en este caso, para una longitud de 89 m y una profundidad de 2.30 m, la variable a iterar, será el ancho de la trinchera. Por lo tanto, para la determinación del caudal, se debe asumir un ancho inicial *W*: se asume un ancho inicial de 2.0 m.

Para realizar el cálculo de la superficie de drenaje se multiplica la longitud de la trinchera por su ancho:

$$s = 89 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 178 \text{ m}^2$$

Luego, se aplica la ecuación 5-2 para determinar el caudal de fuga:

$$Q_s = \alpha q_{as} s = 0.1 \times 0.000006 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2 \times 178 \text{ m}^2 = 0.00009889 \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal de fuga específico  $q_s$  se halla aplicando la ecuación 5-5:

$$q_s = 360 \frac{Q_s}{S_a} = 360 \cdot \frac{0.00009889 \text{ m}^3/\text{s}}{0.369 \text{ ha}} = 0.0963 \text{ mm/h}$$

Teniendo la función constante de salida (caudal de fuga específico)  $q_s(W)$  y la altura de entrada  $H(D,T)$  (proveniente de la curva HDF) se determina la máxima diferencia  $DH_{m\acute{a}x}$  entre  $H(D,T)$  y  $q_s(W)$ . Este valor será  $DH_{m\acute{a}x} = 57.3$  mm.

Aplicando la ecuación 5-6 se determina el volumen generado por la máxima diferencia  $DH_{m\acute{a}x}$ :

$$V = 10DH_{m\acute{a}x}S_a = 10 \times 57.3 \text{ mm} \times 0.3698 \text{ ha} = 211.74 \text{ m}^3$$

Asumiendo una porosidad del tipo de material de relleno de 0.45, correspondiente al relleno de trincheras a partir de piedra limpia según la tabla del anexo 8, se calcula la profundidad necesaria para alojar el volumen de escorrentía:

$$h = \frac{V}{s \cdot n} = \frac{211.74 \text{ m}^3}{178 \text{ m}^2 \times 0.45} = 2.64 \text{ m}$$

La profundidad necesaria por la trinchera para capturar el volumen generado es de 2.64 m. Sin embargo, se había establecido que la máxima profundidad del sistema debería ser igual a 2.3 m. Por lo tanto, es necesario cambiar las dimensiones. Es necesario variar el ancho de la trinchera y la porosidad del agregado, hasta lograr un valor menor al máximo valor permitido.

Repetiendo el proceso anteriormente descrito; variando el ancho de la estructura hasta cumplir con las condiciones, a continuación se listan las dimensiones definitivas del sistema:

$$W = 2.40 \text{ m}$$

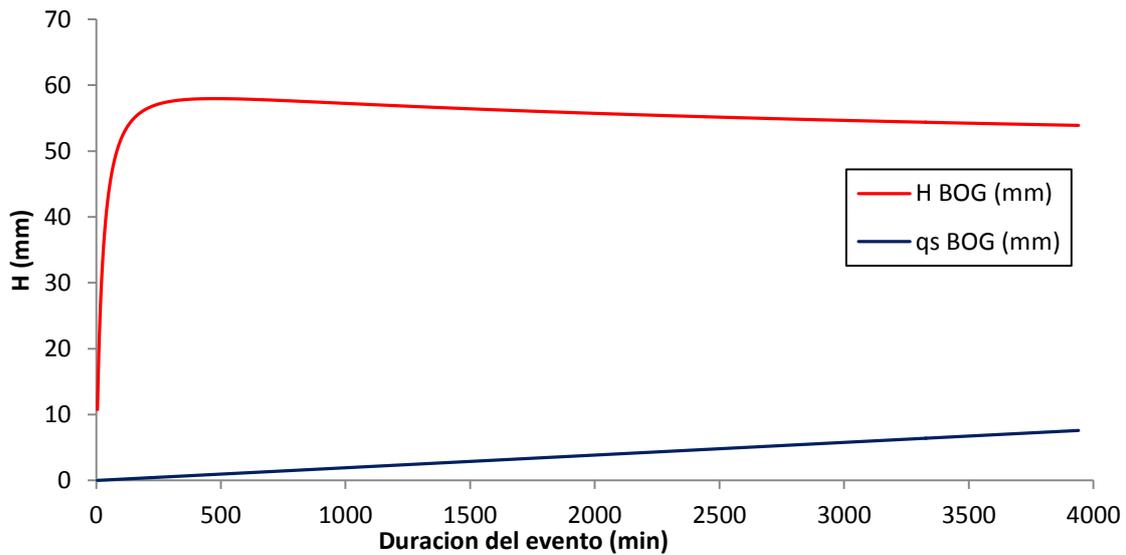
$$L = 89 \text{ m}$$

$$h = 2.20 \text{ m}$$

$$n = 0.45$$

$$V = 211.28 \text{ m}^3$$

En el anexo 14 se muestran los cálculos completos. A continuación, la figura que muestra la evolución del  $DH$  en función de la duración del evento:



**Figura 8-2. Evolución del volumen generado y el volumen infiltrado en función del tiempo para la zona de estudio Bogotá**

### 8.1.8.3. METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN PLANOS

Para determinar el coeficiente de infiltración final del terreno, se selecciona el caso apropiado según los resultados de los estudios geotécnicos. En este ejemplo práctico, se asumirá que la posible consecuencia de falla de la estructura se podrá deber a los inconvenientes de menor importancia, por lo tanto, el factor de seguridad  $F$  será igual a 2.

El coeficiente de infiltración final del terreno será el siguiente:

$$q = \frac{f}{F} = \frac{0.02 \text{ m/h}}{2} = 0.01 \text{ m/h}$$

Esta metodología también exige un pre-dimensionamiento de la estructura, por lo tanto, se asumirán los siguientes valores de la estructura:

$$L = 89 \text{ m}$$

$$W = 2 \text{ m}$$

$$n = 0.45$$

Se determina el radio de drenaje a partir de la ecuación 5-10, teniendo en cuenta que el área de la superficie de drenaje se calcula multiplicando la longitud por el ancho de la estructura, y el área a drenar es la misma para todas las metodologías (4274 m<sup>2</sup>):

$$R = \frac{A_d}{A_b} = \frac{4274 \text{ m}^2}{178 \text{ m}^2} = 24.014$$

Teniendo en cuenta que dentro de la trinchera se ubicara una tubería para el transporte del fluido de un diámetro de 6 pg, se debe calcular la porosidad compuesta. Para esto, utilizamos la ecuación 5-9:

$$n' = \frac{\pi r^2 + n (WL - \pi r^2)}{WL} = \frac{\left(\frac{0.1524 \text{ m}}{2}\right)^2 \pi + 0.45 \left(2 \text{ m} \times 89 \text{ m} \left(\frac{0.1524 \text{ m}}{2}\right)^2 \pi\right)}{2 \text{ m} \times 89 \text{ m}} = 0.45$$

Ahora, se realiza el cálculo de la altura necesaria para la trinchera  $h$ , a partir de la ecuación 5-8:

$$h = \frac{D}{n} (Ri - q)$$

Donde  $i$  y  $D$  son combinaciones de intensidad y duración, extraídas de la ecuación que predomina en la zona. En este caso, la ecuación IDF es  $I = 5354.5 \cdot (28.6 + D)^{-1.06}$

En la próxima tabla, se resume, para diferentes duraciones de evento  $D$ , la intensidad, y el valor de la profundidad necesaria por la trinchera:

**Tabla 8-2. Relación entre la intensidad, la duración y la profundidad demandada para el caso de estudio de Bogotá**

$D$ (min)	$i$ (mm/h)	$H$ (m)
5	129.06	0.57
10	111.41	0.99
30	71.57	1.90
60	46.18	2.44
120	26.69	2.80
180	18.63	2.91
240	14.25	2.95
300	11.51	2.96
360	9.63	2.95
420	8.27	2.93

El valor máximo de profundidad demandado por la ecuación es de 2.96 m, lo cual no cumple con el máximo valor disponible. Por lo tanto, se repite el proceso, variando principalmente el ancho de la estructura y la porosidad del material de relleno. Los resultados luego de la iteración de valores fueron los siguientes (ver capítulo completo en el anexo 15):

$$L = 89 \text{ m}$$

$$W = 2.55 \text{ m}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

$$n' = 0.45$$

Finalmente, se debe comprobar el tiempo de vaciado de la mitad de la trinchera, este se calcula a partir de la ecuación 5-11:

$$t_{50} = \frac{nh}{2q} = \frac{0.45 \times 2.3 \text{ m}}{2 \times 0.01 \text{ m/h}} = 51.8 \text{ h}$$

La metodología exige que volumen almacenado se vacíe a la mitad de este en un tiempo no mayor a 24 horas. Como se observa, esta trinchera no cumple con ese requisito de diseño.

Con un ancho de 5.4 metros de la estructura, el tiempo de vaciado de la mitad del volumen sería de 23.6 horas, cumpliendo con el requisito demandado por la metodología. Sin embargo, el ancho de la estructura sería demasiado grande, y el sistema ya dejaría de ser una trinchera de infiltración.

Las características finales para las cuales la trinchera cumple con todas las condiciones son:

$$L = 89 \text{ m}$$

$$W = 5.4 \text{ m}$$

$$h = 1.05 \text{ m}$$

$$n' = 0.45$$

#### 8.1.8.4. METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN EN 3D

Esta metodología contiene los mismos principios de la *metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos*. Por lo tanto, conserva ciertos valores:

$$q = 0.001 \text{ m/h}$$

$$L = 89 \text{ m}$$

$$W = 2 \text{ m}$$

$$A_b = 178 \text{ m}^2$$

$$A_D = 4247 \text{ m}^2$$

$$n' = 0.45$$

El perímetro del sistema  $P$  se calcula de la siguiente manera:

$$P = 2(W + L) = 2(2 \text{ m} + 89 \text{ m}) = 182 \text{ m}$$

El cálculo de los coeficientes  $a$  y  $b$  se realiza a partir de las ecuaciones 5-14 y 5-15.

$$a = \frac{A_b}{P} - \frac{iA_D}{Pq} = \frac{178 \text{ m}^2}{182 \text{ m}} - i \left( \frac{4274 \text{ m}^2}{182 \text{ m} \times 0.01 \text{ m/h}} \right)$$

$$a = 0.978 - 2348.65i$$

$$b = \frac{Pq}{nA_b} = \frac{182 \text{ m} \times 0.001 \text{ m/h}}{0.45 \times 178 \text{ m}^2} = 0.023$$

Luego, variando la intensidad del evento, y aplicando la ecuación 5-13, se calculan los distintos valores de profundidad demandados por el sistema:

A continuación, una tabla que resume los valores de  $a$ ,  $i$  y  $h$  para distintas duraciones de evento.

**Tabla 8-3. Relación entre la duración e intensidad del evento con respecto al coeficiente  $a$  y la altura demandada para Bogotá**

$D$ (min)	$i$ (mm/h)	$A$	$h_{\max}$ (m)
5	129.06	-302.14	0.57
10	111.41	-260.69	0.98
30	71.57	-167.12	1.89
60	46.18	-107.48	2.41
120	26.69	-61.71	2.74
180	18.63	-42.78	2.82
240	14.25	-32.49	2.82
300	11.51	-26.05	2.80
360	9.63	-21.65	2.76
420	8.27	-18.46	2.71

La máxima profundidad demandada en la tabla es de 2.82 m, por lo tanto, no cumple con la profundidad máxima disponible, como consecuencia, se prosigue con la iteración de las variables  $w$  y  $n$ .

Luego de iterar el sistema, se determinaron las siguientes dimensiones (ver capítulo completo en el anexo 16):

$$L = 89 \text{ m}$$

$$W = 2.5 \text{ m}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

$$n' = 0.45$$

Finalmente, se comprueba si la trinchera cumple con la condición del tiempo de vaciado, para esto, se aplica la ecuación 5-16:

$$t_{50} = \frac{nA_b}{qP} \ln \left[ \frac{h_{\max} + \frac{A_b}{P}}{\frac{h_{\max}}{2} + \frac{A_b}{P}} \right] = \frac{0.45 \times 222.5 \text{ m}^2}{0.01 \text{ m/h} \times 183 \text{ m}} \ln \left[ \frac{2.3 \text{ m} + \frac{222.5 \text{ m}^2}{183 \text{ m}}}{\frac{2.3 \text{ m}}{2} + \frac{222.5 \text{ m}^2}{183 \text{ m}}} \right] = 21.53 \text{ h}$$

El tiempo de vaciado de la mitad del volumen almacenado es de 21.53 h, por debajo de las 24 horas máximas para cumplir el requisito. Por lo tanto, la trinchera cumple con todas las condiciones para estar bien dimensionada.

8.1.8.5. *METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO PARA SISTEMAS DE INFILTRACIÓN (DAEE / CETESB, 1980)*

Las ecuaciones desarrolladas en esta metodología están diseñadas para una curva IDF descrita por la ecuación de Talbot, por lo tanto, para poder aplicar las fórmulas descritas en el diseño, se debe realizar una transformación de la ecuación que rige nuestra zona. En este caso, es la ecuación de Montana. Como consecuencia, el primer paso para poder diseñar será transformar una curva tipo Montana a una tipo Talbot.

La ecuación que describe la zona es la siguiente:

$$I = 5354.5 \cdot (28.6 + D)^{-1.06}$$

La ecuación de Talbot tiene la siguiente estructura:

$$I = \frac{aT^b}{d+c}$$

A partir de la simulación numérica, para poder simular el comportamiento de la primera ecuación con la ecuación de Talbot para un periodo de retorno de 10 años, se dividió la función en cuatro partes, cada una válida para un rango de duraciones de evento. La anterior se realizó con el fin de lograr una mejor precisión de la ecuación resultante de Talbot. La división de la función generó los siguientes intervalos: de 0 a 30 minutos, de 30 a 60 minutos, de 60 a 360 minutos y de 360 a 960 minutos (Los coeficientes calibrados sólo pueden ser utilizados para un periodo de retorno de 10 años).

La siguiente tabla resume la forma de las ecuaciones de Talbot para los distintos intervalos determinados.

**Tabla 8-4. Curva IDF de Talbot para distintos Intervalos en la zona de aplicación de Bogotá**

0 a 30 minutos	30 a 60 minutos	60 a 360 minutos	360 a 960 minutos
$I1 = \frac{2803.91T^{0.159}}{d + 26.35}$	$I2 = \frac{2739.33T^{0.154}}{d + 24.55}$	$I3 = \frac{2684.76T^{0.141}}{d + 19.96}$	$I4 = \frac{2546.96T^{0.134}}{d}$

A continuación, se presenta la tabla que resume los diferentes coeficientes para los distintos intervalos de análisis:

**Tabla 8-5. Coeficientes para la curva tipo Talbot según el intervalo de tiempo para la zona de estudio de Bogotá**

Coeficientes	0 a 30 mins	30 a 60 mins	60 a 360 mins	360 a 960 mins
a	2803.91	2739.33	2684.76	2546.96
b	0.159	0.154	0.141	0.134
c	26.35	24.55	19.95	0.00

Para calcular los coeficientes  $\beta$  y  $\gamma$  se debe tener en cuenta que los datos iniciales son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 n' &= 0.45 \\
 A &= 4274.0 \text{ m}^2 \\
 B &= 2.0 \text{ m} \\
 L &= 89.0 \text{ m} \\
 T &= 10 \text{ años} \\
 C &= 0.73 \\
 f &= 20 \text{ mm/h}
 \end{aligned}$$

Se calcula el coeficiente  $\beta$  de la siguiente manera:

$$\beta = \frac{CA}{BL} = \frac{0.73 \times 4274.0 \text{ m}^2}{89.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m}} = 17.644$$

Luego, se determina el coeficiente  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{2}{B} = \frac{2}{2000 \text{ mm}} = 0.001 \text{ mm}^{-1}$$

Donde el coeficiente de escorrentía  $C$  fue determinado anteriormente en el subcapítulo 8.1.5. A continuación, se debe calcular el flujo de salida constante del dispositivo, resultado del producto al multiplicar el coeficiente de infiltración por un factor de

seguridad (la metodología recomienda utilizar un factor de seguridad  $F$  de 0.5). El caudal de salida es el siguiente:

$$q_s = f \cdot F = 20 \text{ mm/h} \times 0.5 = 10 \text{ mm/h}$$

Los coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  pueden calcularse para cada uno de los distintos intervalos de la ecuación de Talbot. A continuación, se realiza el cálculo de dichos coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  para el primer intervalo de la ecuación de Talbot:

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta T}^{b/2} = \sqrt{\frac{2803.91}{60}} \sqrt{17.644} \left(10^{0.159/2}\right) = 34.487$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{q_s} = \sqrt{\frac{26.347}{60}} \sqrt{0.001 \text{ m}^{-1}} \sqrt{10 \text{ mm/h}} = 0.0577$$

La siguiente tabla resume los valores de  $k_1$  y  $k_2$  para los distintos intervalos de tiempo:

**Tabla 8-6. Coeficientes  $k_1$  y  $k_2$  para los diferentes intervalos en la zona de estudio de Bogotá**

	0 a 30 mins	30 a 60 mins	60 a 360 mins	360 a 960 mins
$k_1$	34.49	33.90	33.06	31.94
$k_2$	0.066	0.064	0.058	0.000

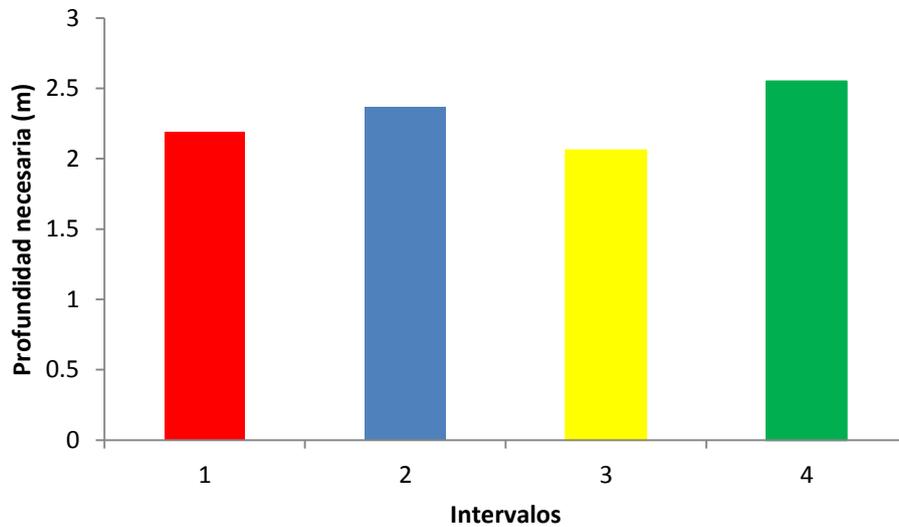
Finalmente, se determina el valor de la profundidad necesaria por el sistema recurriendo a la ecuación 5-31. El cálculo de la profundidad necesaria para el primer intervalo se muestra a continuación:

$$H = \left[ \frac{k_1 (k_2 - \sqrt{n})}{n - k_2^2} \right]^2 = \left[ \frac{34.487 (0.0663 - \sqrt{0.45})}{0.45 - 0.0663^2} \right]^2$$

$$H = 2189.2 \text{ mm} = 2.19 \text{ m}$$

Éste proceso se repitió para las otras tres partes de la ecuación (según el intervalo).

En la siguiente figura se resume el resultado de este intervalo y los otros 3 intervalos de la ecuación:



**Figura 8-3. Profundidad de la trinchera para diferentes intervalos en la zona de estudio de Bogotá**

La máxima del sistema es de 2.55 m, profundidad superior al límite máximo de la zona. Como consecuencia, se repite el mismo proceso cambiando las variables hasta que el sistema cumpla con la altura máxima permitida.

A continuación, la dimensión definitiva de la trinchera:

$$L = 89.0 \text{ m}$$

$$W = 2.3 \text{ m}$$

$$h = 2.22 \text{ m}$$

$$n' = 0.45$$

Siendo la profundidad definitiva de la trinchera menor al límite, la trinchera cumple con las condiciones demandadas.

8.1.8.6. *BRE DIGEST 365 (BRE, 1991)*

A continuación, se presentan los datos iniciales necesarios para aplicar la metodología:

$$L = 89.0 \text{ m}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

$$n = 0.45$$

$$f = 0.01 \text{ m/h}$$

$$A_0 = 4274.0 \text{ m}^2$$

$$C = 0.73$$

Se deben calcular el volumen de entrada  $I$  en la trinchera y el flujo de salida  $O$  de la trinchera:

El cálculo de  $I$  se realiza a partir de la ecuación 5-33:

$$I = A \cdot R = (4274.0 \text{ m}^2 \times 0.73) \times R = 3140.764R$$

Donde  $R$  es la precipitación acumulada de diseño para un periodo de retorno de 10 años. Para poder hallar  $O$ , es necesario determinar la superficie interna de la trinchera al 50 % de la profundidad efectiva  $a_{50}$ . Para lo cual se requiere conocer el ancho de la trinchera, por lo tanto, se asumirá un ancho inicial  $W$  de 2 m.

$$a_{50} = (W + L) \cdot h = (2.0 \text{ m} + 89.0 \text{ m}) \times 2.3 \text{ m} = 214.41 \text{ m}^2$$

El volumen de salida  $O$  de la trinchera es igual a:

$$O = a_{50} \cdot f \cdot D = 214.41 \text{ m}^2 \times 0.02 \text{ m/h} \times D = 4.288D$$

El volumen de almacenamiento requerido por la trinchera  $S$  es igual a  $S = 3140.764R - 4.288D$ , mientras que el almacenamiento real de la estructura es el siguiente:

$$S_r = nhLW = 0.45 \times 2.3 \text{ m} \times 89.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} = 184.23 \text{ m}^3$$

Se debe buscar la combinación de duración  $D$  y precipitación total  $R$  que genere el mayor valor del volumen de almacenamiento requerido por la trinchera  $S$ . En este ejercicio de aplicación, la mayor combinación se obtuvo para una duración del evento de 12 horas y una precipitación acumulado  $R$  en mm es de 57.95 mm. El almacenamiento  $S$  fue de  $131.774 \text{ m}^3$ . Este volumen a almacenar es menor a la actual capacidad de almacenamiento del sistema.

Finalmente, el tiempo de vaciado de la mitad del volumen almacenado por la estructura se halla a partir de la siguiente expresión:

$$t_{s50} = \frac{S \cdot 0.5}{a_{50} \cdot f} = \frac{184.23 \text{ m}^3 \times 0.5}{209.3 \text{ m}^2 \times 0.02 \text{ m/h}} = 22.05 \text{ h}$$

Este valor se encuentra por debajo del límite de 24 horas, por lo tanto, son aceptadas las dimensiones de la trinchera.

Se repite el procedimiento para determinar el ancho crítico, logrando igualdad entre el volumen requerido a almacenar y la capacidad de almacenamiento de la trinchera. Se obtienen los siguientes resultados (ver desarrollo completo en el anexo 17):

$$L = 89.0 \text{ m}$$

$$W = 1.77 \text{ m}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

$$n = 0.45$$

$$C = 0.73$$

$$t = 19.53 \text{ h}$$

### 8.1.8.7. DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS POR INFILTRACIÓN

Los datos de entrada esta metodología son los siguientes:

$$n = 0.45$$

$$A = 4274.0 \text{ m}^2$$

$$f = 0.02 \text{ m}$$

$$L = 89.0 \text{ m}$$

En cuando a la profundidad del sistema, y el tiempo de llenado de la trinchera T, la metodología recomienda el uso de una profundidad máxima del sistema de 2.12 m (7 pies) para que el llenado de la trinchera se realice en 2 horas (T).

Para poder aplicar la ecuación 5-36 para calcular el área superficial necesaria, se debe hallar el volumen total generado por un evento. En este caso, el volumen generado por la lluvia fue determinado a partir del método racional, a partir del coeficiente de escorrentía determinado en el subcapítulo 8.1.5 según el procedimiento siguiente para una duración del evento de 10 minutos:

$$D = 10 \text{ min}$$

$$i_{10\text{min}} = 5354.5 \cdot (28.6 + D)^{-1.06} = 111.41 \text{ mm/h}$$

Se aplica la ecuación 3-11 del método racional multiplicado por la duración del evento:

$$V_{10\text{min}} = Ci_{10}AD = 0.73 \times 0.1114 \text{ m/h} \times 4274.0 \text{ m}^2 \times 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 58.32 \text{ m}^3$$

A continuación, el resumen de la aplicación de estos pasos para determinar el volumen total generado por diferentes duraciones de evento:

Tabla 8-7. Relación entre la duración e intensidad del evento con el volumen  $W$  generado

$D$ (min)	$i$ (mm/h)	$V$ (m <sup>3</sup> )
10	111.41	58.32
30	71.57	112.40
60	46.18	145.04
120	26.69	167.67
180	18.63	175.55
240	14.25	179.04
300	11.51	180.74
360	9.63	181.57

De la tabla anterior se elige el evento que produjo el mayor volumen  $V_w$ , el cual corresponde,  $V_w = 181.57 \text{ m}^3$ . Con este valor, se determina el área superficial necesaria aplicando la ecuación 5-36:

$$A_p = \frac{V_w}{\left( nd_t + \frac{fT}{12} \right)} = \frac{181.57 \text{ m}^3}{0.45 \times 2.12 \text{ m} + \frac{0.02 \text{ m/h} \times 2 \text{ h}}{12}} = 189.94 \text{ m}^2$$

Luego, el área superficial disponible se calcula multiplicando el ancho por la longitud de la estructura.

Por lo tanto, el ancho mínimo necesario por la estructura será igual a:

$$W_{\min} = \frac{A_p}{L} = \frac{189.94 \text{ m}^2}{89.0 \text{ m}} = 2.134 \text{ m}$$

Se asumirá un ancho efectivo de 2.2 m, logrando un área superficial total de 195.8 m<sup>2</sup>.

## 8.1.8.8. METODOLOGÍA CHILE

La siguiente lista contiene los datos de entrada del problema:

$$T = 10 \text{ años}$$

$$C = 0.73$$

$$A = 4274.0 \text{ m}^2$$

$$f = 20 \text{ mm/h}$$

Para determinar el volumen afluente a partir de la ecuación 5-37, se debe hallar la precipitación acumulada para un evento de duración  $t$  e intensidad  $i$ . Para esto, multiplicamos la intensidad determinada por la ecuación que representa la curva IDF de la zona de análisis, por la duración del evento. A continuación, se presentan los cálculos necesarios para determinar la precipitación acumulada  $P_t^T$  para un evento de 10 minutos:

$$P_t^T = P_{10}^{10} = i_{10}t = 111.41 \text{ mm/h} \times 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} = 18.57 \text{ mm}$$

El volumen afluente será:

$$V_{\text{afl}} = 0.00125CAP_t^T = 0.00125 \times 0.73 \times 4274.0 \text{ m}^2 \times 18.57 \text{ mm} = 72.90 \text{ m}^3$$

A continuación, se debe determinar el volumen de infiltración de la trinchera, para lograr solucionar la ecuación. Se debe definir el área superficial de infiltración ( $A_e$ ) suponiendo el ancho de la estructura ( $W_{\text{supuesto}} = 2 \text{ m}$ ) y elegir un coeficiente de seguridad  $C_s$ .

En este caso, se supone que el caudal afluente no será de buena calidad, pero, el mantenimiento a la estructura se realizara regularmente. Por lo tanto, con ayuda de la figura 5-8, se le asigna un coeficiente de seguridad  $C_s$  de 0.5.

Para el caso de una duración del evento de 10 minutos, este sería el volumen infiltrado sería:

$$V_{inf} = 0.001 f C_s A_e t = 0.001 \times 20 \text{ mm/h} \times 0.5 \times 178 \text{ m}^2 \times 10 \text{ min} \times \frac{1 \text{ h}}{1 \text{ min}} = 0.2967 \text{ m}^3$$

El volumen de almacenamiento resulta de la resta de los volúmenes:

$$V_{alm} = V_{alf} - V_{inf} = 72.29 \text{ m}^3 - 0.2967 \text{ m}^3 = 72.60 \text{ m}^3$$

El proceso se repite para cada combinación de intensidad - duración, hasta hallar el mayor volumen de almacenamiento necesario. Para este caso, el mayor volumen es de 217.09 m<sup>3</sup>, presentada para un evento de 285 min de duración, con una intensidad de 57.44 mm/h.

Los resultados generales para esta duración son:

$$P_t^T = 57.45 \text{ mm}$$

$$V_{alf} = 225.53 \text{ m}^3$$

$$V_{inf} = 8.45 \text{ m}^3$$

Se continúa calculando el espesor de la estructura (la profundidad de la trinchera) con la ecuación 5-40:

$$e = \frac{V_{alm}}{n A_e} = \frac{217.07 \text{ m}^3}{0.45 \times 178 \text{ m}^2} = 2.71 \text{ m}$$

Como el resultado es mayor al límite superior de la profundidad máxima en campo, se debe variar el ancho de la estructura hasta que éste cumpla con la condición. El resultado luego de este proceso iterativo es el siguiente:

$$L = 89.0 \text{ m}$$

$$W = 2.4 \text{ m}$$

$$e = 2.25 \text{ m}$$

Finalmente, se calcula el tiempo de vaciado de la estructura, el cual debe ser menor a 48 horas según la metodología. El tiempo de vaciado  $t_m$  de esta estructura es:

$$t_m = \frac{n \cdot e}{C_s \cdot f} = \frac{0.45 \times 2.24 \text{ m}}{0.5 \times 20 \text{ mm/h}} \times \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 100.9 \text{ h}$$

Siendo el límite 48 horas, esta estructura no cumple con la condición enunciada arriba. Para poder lograr un menor tiempo de vaciado de la estructura, se debe disminuir la altura de la trinchera o garantizar que el caudal afluyente sea de buena calidad.

Si se dimensiona la trinchera con un ancho de 4.90 m, la estructura contará con una profundidad de 1.05 metros y el tiempo de vaciado será de 47.4 horas. El ancho de la estructura sería demasiado grande.

Si se aumenta la calidad del caudal afluyente, y el coeficiente de seguridad pasa a ser 1, el ancho necesario para lograr el vaciado en un tiempo menor a 48 horas sería de 2.5 m, con una profundidad de 2.06 m y un tiempo de vaciado de 46.4 horas.

#### 8.1.8.9. METODOLOGÍA MORA

Para esta metodología, se definen las dimensiones iniciales de la trinchera, teniendo en cuenta las características del lugar. Las dimensiones iniciales de la trinchera serán:

$$L = 89.0 \text{ m}$$

$$W = 2.0 \text{ m}$$

$$h = 2.3 \text{ m}$$

El relleno del sistema se realizará con piedra limpia, y se asume una porosidad de 0.45. Por lo tanto, el volumen almacenado se calcula con la ecuación 5-43:

$$V_A = nV_t = 0.45 \cdot (89.0 \text{ m} \times 2.0 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}) = 0.45 \times (409.4 \text{ m}^3)$$

$$V_A = 184.23 \text{ m}^3$$

Se necesita hallar el volumen producido por los distintos eventos: la metodología para el cálculo del volumen en función de la duración del evento, esta descrita en la metodología Chile. A continuación, la tabla 8-8 relaciona la duración del evento con el volumen producido.

**Tabla 8-8. Relación entre la duración del evento y el Volumen generado para la zona de estudio de Bogotá**

$D$ (min)	$V_f$ (m <sup>3</sup> )
10	58.32
30	112.40
60	145.04
120	167.67
180	175.55
240	179.04
300	180.74
360	181.57

De la tabla anterior se elige el mayor volumen: en este caso 181.57 m<sup>3</sup> para un evento de duración igual a 6 horas.

La resta de los dos volúmenes calculados ( $V_f$  y  $V_A$ ) será el volumen total transportado por una tubería externa al sistema. El volumen no retenido es igual a 43.39 m<sup>3</sup> según la ecuación 5-44.

El excedente debe ser transformado a caudal, a continuación la demostración de cómo realizarlo:

$$L_A = \frac{V_p}{A_s} = \frac{43.39 \text{ m}^3}{4274.0 \text{ m}^2} = 0.0102 \text{ m}$$

La lámina de agua equivalente  $L_A$  es dividida por la duración del evento seleccionado para hallar la intensidad equivalente.

$$i_e = \frac{L_A}{D} = \frac{0.0102 \text{ m}}{6 \text{ h}} = 0.0017 \text{ m/h} = 1.7 \text{ mm/h}$$

El caudal de exceso generado por el evento se calcula a partir del método racional:

$$Q_p = CiA = 0.45 \times 0.0017 \text{ m/h} \times 4274.0 \text{ m}^3 = 0.00148 \text{ m}^3/\text{s} = 1.47 \text{ L/s}$$

Según el RAS-2000, el mínimo diámetro de una tubería de recolección debe ser de 200 mm de diámetro. La capacidad de esta tubería se encuentra muy por encima del caudal a transportar  $Q_p$ , por lo tanto, siendo el mínimo diámetro permitido, se decide elegir éste.

## 8.2. EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA CARTAGENA

### 8.2.1. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

En la figura 8-4 se muestra la zona objeto de estudio localizado en las coordenadas  $10^{\circ}25'16.21''$  N con  $75^{\circ}33'07.55''$ , en el sector del centro de Cartagena. El área destinada a la implementación de la trinchera es usada para el parqueo de vehículos.



**Figura 8-4. Localización y características preliminares del área de aplicación de las metodologías. Fotografía tomada de maps.google.com**

### 8.2.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

El área total a drenar se encuentra totalmente pavimentada. En el área de influencia se pueden encontrar dos principales tipos de pavimentos: pavimentación por asfalto y superficies de concreto. En total son 1652.9 m<sup>2</sup> los que conforman el área total a drenar.

### 8.2.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO

Teniendo en cuenta ciertos estudios geotécnicos, se determinó que para este ejemplo práctico, los diferentes estratos encontrados en el suelo son: desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 2.5 m se encuentra material arenoso en estado suelto; el siguiente estrato lo gobierna un suelo arenoso de alta densidad hasta una profundidad de 6 m, lo sigue un estrato de 7 m de grosor de arcilla. Al volver a la tabla de anexo 7, se determina que el coeficiente de infiltración del terreno será de 0.2 m/h.

El nivel freático promedio de la zona se encuentra a una profundidad de 2 m con respecto a la superficie.

### 8.2.4. ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA

La ecuación que gobierna el comportamiento hidrológico de la zona de estudio en cuanto a la relación de la intensidad máxima, duración y frecuencia es la siguiente:

$$I = \frac{616.97 \cdot T^{0.18}}{(D+10)^{0.561}}$$

En la anterior ecuación, la intensidad  $i$  se encuentra en mm/h. La expresión contiene la estructura de una ecuación potencial.

### 8.2.5. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

A partir de la tabla del anexo 6, suministrada por el reglamento técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000, se determina el coeficiente de escorrentía del área en función del tipo de uso que se le dé al suelo. Como sólo se cuenta con un tipo de suelo, se asume un coeficiente general para toda el área de aplicación de 0.8.

### 8.2.6. LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA

En la figura anteriormente mostrada (figura 8-4) se encuentra el trazado preliminar de la trinchera, además de la estimación de la superficie a drenar.

### 8.2.7. CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA

Teniendo en cuenta las consideraciones generales descritas en el subcapítulo 4.1 y teniendo en cuenta el trazado arquitectónico de la zona, se determinó que una trinchera con una longitud total de 100 m podría ser implementada en la zona, mientras que la profundidad máxima permisible de la trinchera para garantizar que el nivel freático se mantenga protegido frente a la nueva escorrentía será de 1 m, teniendo en cuenta que el nivel freático promedio se encuentra a una profundidad de 2 m. Se debe garantizar que las pendientes del área a drenar sean menores al 3%, y que todas estas redirijan la escorrentía hacia la trinchera (esto, siempre y cuando la alimentación de la trinchera sea directa).

### 8.2.8. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS

El procedimiento para el dimensionamiento de la trinchera de infiltración con cada una de las metodologías es exactamente igual a lo descrito en el subcapítulo 8.1.8, por lo tanto, este subcapítulo expondrá los datos de entrada para la solución de los ejercicios y los resultados obtenidos para cada una de las metodologías. A continuación, la tabla de resumen de los datos de entrada para el dimensionamiento.

**Tabla 8-9. Datos de entrada para la zona de estudio en Cartagena**

Longitud de la Trinchera	100 m
Profundidad máxima de la Trinchera	1 m
Coefficiente de infiltración ( $f$ )	200 mm/h o 0.2 m/h
Área de drenaje	1652.9 m <sup>2</sup>
Coefficiente de escorrentía	0.8
Coefficiente de escorrentía método de las lluvias	0.95
Porosidad del material de relleno	0.4
Periodo de retorno de diseño	10 años
Consecuencia de falla	Inconvenientes de menor importancia
Metodología Chile (F.S)	0.5
Metodología Mora ( $W_{\text{asumido}}$ )	4 m
$R_v$	0.99

A partir la calibración de la curva de Talbot para la metodología Lopes. A & Avruch J (2007), se determinaron los siguientes coeficientes para la ecuación de Talbot ajustado para distintos intervalos de duración.

**Tabla 8-10. Coeficientes para la curva tipo Talbot según el intervalo de tiempo para la zona de estudio de Cartagena**

	0 a 30 mins	30 a 60 mins	60 a 360 mins	360 a 960 mins
<b>a</b>	4634.242	7122.890	11273.270	18234.148
<b>b</b>	0.137	0.128	0.142	0.181
<b>c</b>	25.886	51.702	130.824	472.709

Los resultados obtenidos en cuanto al ancho necesario en cada una de las metodologías se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 8-11. Anchos necesarios para las distintas metodologías de dimensionamiento para la zona de estudio de Cartagena**

<b>METODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO</b>	<b>W (m)</b>
<i>MÉTODO DE LAS LLUVIAS</i>	6.80
<i>METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN PLANOS</i>	8.40
<i>METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN EN 3D</i>	3.00
<i>METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO PARA SISTEMAS DE INFILTRACIÓN</i>	3.60
<i>BRE DIGEST 365 (BRE, 1991)</i>	3.61
<i>DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS POR INFILTRACIÓN</i>	6.25
<i>METODOLOGÍA CHILE</i>	3.50
<i>METODOLOGÍA MORA</i>	4.00

### 8.3. EJERCICIO DE APLICACIÓN PARA MEDELLIN

#### 8.3.1. LOCALIZACIÓN DEL TRAMO EN ESTUDIO

En la figura 8-5 se muestra la zona objeto de estudio localizado en las coordenadas 6.249747,-75.584865 en Medellín. El área destinada a la implementación de la trinchera es usada para el parqueo de vehículos.

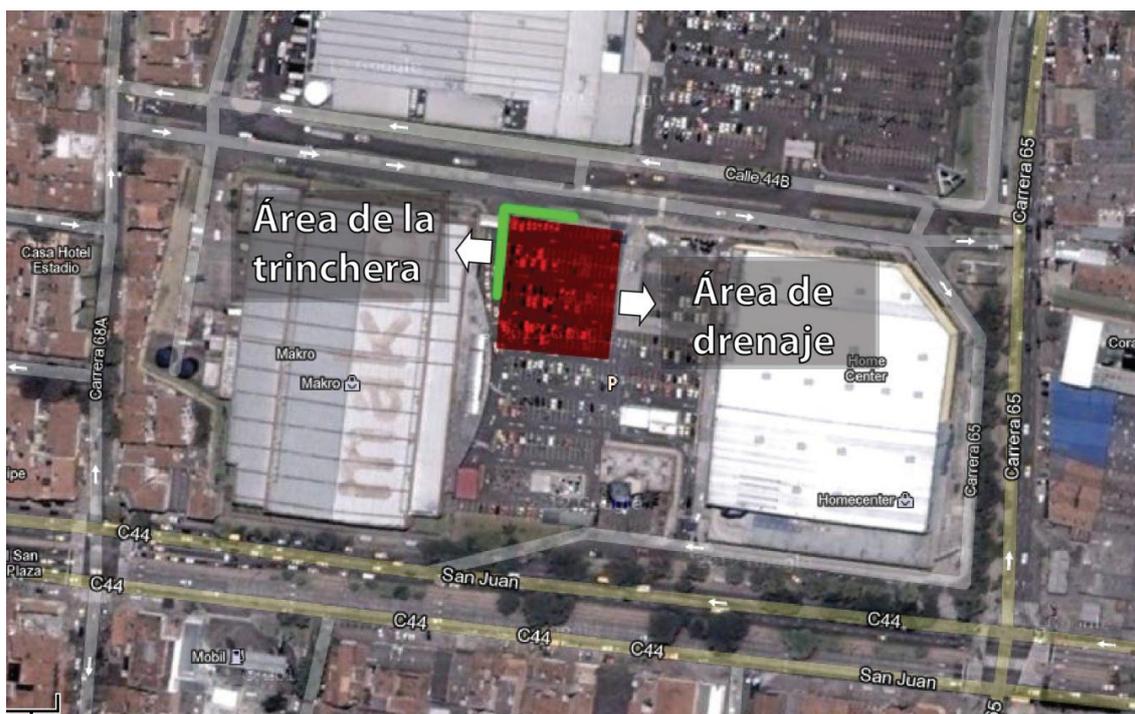


Figura 8-5. Localización y características preliminares del área de aplicación de las metodologías. Fotografía tomada de maps.google.com

#### 8.3.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA

El área total a drenar se encuentra totalmente pavimentada. En total son 2694 m<sup>2</sup> los que conforman el área total a drenar.

#### 8.3.3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DEL TERRENO

Teniendo en cuenta ciertos estudios geotécnicos, se determinó que para este ejemplo práctico, los diferentes estratos encontrados en el suelo son: desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 0.5 m se encuentra material limo arcilloso en estado suelto; el siguiente estrato lo gobierna un suelo de limos arenosos y arenas limosas hasta

una profundidad de 5 m. Al volver a la tabla de anexo 7, se determina que el coeficiente de infiltración del terreno será de 0.1 m/h.

El nivel freático de la zona según los estudios recorridos, no logró ser encontrado. Para fines de diseño se asume un nivel freático a los 5 m de profundidad.

#### 8.3.4. ESTIMACIÓN DE LA INTENSIDAD DE LA LLUVIA

La ecuación que gobierna el comportamiento hidrológico de la zona de estudio en cuanto a la relación de la intensidad máxima, duración y frecuencia es la siguiente:

$$I = \frac{1288 \cdot T^{0.181}}{(D+15)^{0.798}}$$

En la anterior ecuación, la intensidad  $I$  se encuentra en mm/h. La expresión contiene la estructura de una ecuación potencial.

#### 8.3.5. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA

A partir de la tabla del anexo 6, suministrada por el reglamento técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000, se determina el coeficiente de escorrentía del área en función del tipo de uso que se le dé al suelo. Como sólo se cuenta con un tipo de suelo, se asume un coeficiente general para toda el área de aplicación de 0.9.

#### 8.3.6. LOCALIZACIÓN DE LA TRINCHERA

En la figura anteriormente mostrada (figura 8-5) se encuentra el trazado preliminar de la trinchera, además de la estimación de la superficie a drenar.

### 8.3.7. CONSIDERACIONES Y LIMITACIONES DE LA ESTRUCTURA

Teniendo en cuenta las consideraciones generales descritas en el subcapítulo 4.1 y teniendo en cuenta el trazado arquitectónico de la zona, se determinó que una trinchera con una longitud total de 75 m podría ser implementada en la zona, mientras que la profundidad máxima permisible de la trinchera se asumió como 2.5 m para facilitar la construcción.

Se debe garantizar que las pendientes del área a drenar sean menores al 3%, y que todas estas redirijan la escorrentía hacia la trinchera (esto, siempre y cuando la alimentación de la trinchera sea directa).

### 8.3.8. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS

El procedimiento para el dimensionamiento de la trinchera de infiltración con cada una de las metodologías es exactamente igual a lo descrito en el subcapítulo 8.1.8, por lo tanto, este subcapítulo expondrá los datos de entrada para la solución de los ejercicios y los resultados obtenidos para cada una de las metodologías. A continuación, la tabla de resumen de los datos de entrada para el dimensionamiento.

**Tabla 8-12. Datos de entrada para la zona de estudio en Medellín**

Longitud de la Trinchera	75 m
Profundidad máxima de la Trinchera	2.5 m
Coefficiente de infiltración ( $f$ )	100 mm/h o 0.1 m/h
Área de drenaje	2694 m <sup>2</sup>
Coefficiente de escorrentía	0.9
Coefficiente de escorrentía método de las lluvias	0.95
Porosidad del material de relleno	0.35
Periodo de retorno de diseño	10 años
Consecuencia de falla	Inconvenientes de menor importancia
Metodología Chile (F.S)	0.5
Metodología Mora ( $W_{\text{asumido}}$ )	2. m
$R_v$	0.99

A partir la calibración de la curva de Talbot para la metodología Lopes. A & Avruch J (2007), se determinaron los siguientes coeficientes para la ecuación de Talbot ajustado para distintos intervalos de duración.

**Tabla 8-13. Coeficientes para la curva tipo Talbot según el intervalo de tiempo para la zona de estudio de Medellín**

	<b>0 a 30 mins</b>	<b>30 a 60 mins</b>	<b>60 a 360 mins</b>	<b>360 a 960 mins</b>
<b>A</b>	3738.995	4487.268	5580.883	7099.285
<b>B</b>	0.103	0.094	0.087	0.097
<b>C</b>	21.391	29.636	52.112	157.798

Los resultados obtenidos en cuanto al ancho necesario en cada una de las metodologías se resumen en la siguiente tabla.

**Tabla 8-14. Anchos necesarios para las distintas metodologías de dimensionamiento para la zona de estudio de Medellín**

<b>MÉTODOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO</b>	<b>W (m)</b>
<i>MÉTODO DE LAS LLUVIAS</i>	4.30
<i>METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN PLANOS</i>	3.15
<i>METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN EN 3D</i>	2.65
<i>METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO PARA SISTEMAS DE INFILTRACIÓN</i>	2.40
<i>BRE DIGEST 365 (BRE, 1991)</i>	2.34
<i>DIMENSIONAMIENTO DE TRATAMIENTOS POR INFILTRACIÓN</i>	4.45
<i>METODOLOGÍA CHILE</i>	3.60
<i>METODOLOGÍA MORA</i>	2.50

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

### 9.1. RESULTADOS GENERALES

En la tabla 9-1 se muestran los resultados obtenidos a partir de la aplicación de todas las metodologías de diseño en las diferentes ciudades de aplicación. A continuación se encontrará el análisis de los resultados obtenidos y la comparación de estos.

Para el caso de Bogotá, los valores para el ancho  $W$  al aplicar las diferentes metodologías (entre 2.20 m a 2.50 m). Cabe recalcar que la metodología que exige menor espacio sería la metodología Mora, con un valor de 1.50 m de ancho, pero no sobra mencionar que esta metodología sólo se encarga de dimensionar una estructura para que almacene cierto volumen determinado, siendo el volumen adicional es redirigido hacia otro lugar a partir de tuberías de drenaje.

Teniendo en cuenta la infiltración, el método que exigió menor ancho en la trinchera, sería el E (BRE Digest 365), con un valor de 1.77 m. La metodología que exige una sección transversal más ancha es la determinada por el método B (Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos), con un valor de 5.40 m. Esta misma situación ocurre en la trinchera para el caso de Cartagena: al mayor valor, igual a 8.14 m, vuelve a ser aquel hallado por el método B. Sin embargo, el ancho mínimo necesario en Cartagena está dado por el método C (Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración en 3D) con un valor de 3.0 m.

La única metodología de dimensionamiento que cuenta con su propio coeficiente de escorrentía es la metodología A (Método de las lluvias).

La próxima tabla resume los resultados obtenidos por las distintas metodologías de diseño para las ciudades de análisis.

Tabla 9-1. Tabla de resultados para cada metodología en las 3 ciudades de aplicación

		A	B	C	D	E	F	G	H
BOGOTA	W (m)	2.40	5.40	2.50	2.30	1.77	2.20	5.00	1.50
	L (m)	89.00	89.00	89.00	89.00	89.00	89.00	89.00	89.00
	h (m)	2.20	1.05	2.26	2.22	2.30	2.13	1.03	2.30
	n'	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
	C	0.87	N/A	N/A	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
	t (h)	N/A	23.63	21.53	N/A	19.53	N/A	46.39	N/A
	D (min)	420.00	200.00	220.00	N/A	195.00	360.00	205.00	360.00
	V <sub>alm</sub> (m <sup>3</sup> )	211.28	227.17	226.64	204.27	163.11	187.99	206.45	138.17
	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	615.41	678.84	636.58	609.63	575.14	584.97	638.64	549.80
	R	6.95	6.30	6.71	7.01	7.43	7.31	6.69	7.77
CARTAGENA	W (m)	6.80	8.40	3.00	3.60	3.61	6.25	3.50	4.00
	L (m)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
	h (m)	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	n'	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	C	0.95	N/A	N/A	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
	t (h)	N/A	2.00	1.33	N/A	3.48	N/A	3.99	N/A
	D (min)	960.00	460.00	160.00	N/A	350.00	360.00	210.00	360.00
	V <sub>alm</sub> (m <sup>3</sup> )	277.62	336.00	120.00	144.00	144.24	250.00	139.61	160.00
	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	898.01	1056.80	506.00	567.20	567.81	837.50	556.42	608.00
	R	1.84	1.56	3.27	2.91	2.91	1.97	2.97	2.72
MEDELLIN	W (m)	4.30	3.15	2.65	2.40	2.34	4.45	3.60	2.50
	L (m)	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00	75.00
	h (m)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.20	2.47	2.50
	n'	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
	C	0.95	N/A	N/A	0.90	0.90	0.90	N/A	0.90
	t (h)	N/A	8.76	3.60	N/A	3.97	N/A	17.27	N/A
	D (min)	1420.00	330.00	180.00	N/A	175.00	360.00	325.00	360.00
	V <sub>alm</sub> (m <sup>3</sup> )	281.78	206.96	174.11	157.77	153.50	256.99	233.13	164.06
	A <sub>p</sub> (m <sup>2</sup> )	718.43	627.00	587.00	567.67	562.12	683.33	657.80	575.00
	R	3.75	4.30	4.59	4.75	4.79	3.94	4.10	4.69

Donde: Método de las lluvias (A), Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos (B), Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración en 3D (C), Metodología de dimensionamiento para sistemas de infiltración (D), BRE Digest 365 (E), Dimensionamiento de tratamientos por infiltración (F), Metodología Chile (G), Metodología Mora (Mora *et al*, 2011) (H)

$t$  es el tiempo en horas del vaciado de la mitad de la trinchera (excepto para la columna G, donde el valor representa el vaciado total de la trinchera).  $D$  se refiere a la duración de diseño del evento, es decir, para esta duración, las dimensiones de la trinchera fueron las máximas.

Los distintos valores del ancho calculados por las diferentes metodologías, en el caso de Cartagena, muestran una dispersión importante. Los valores se dividen prácticamente en 2 grupos, una mayor frecuencia de anchos entre los 3 y 4 metros, y el segundo grupo de valores, con anchos entre los 6 y 7 metros.

En cuanto al evento de diseño (aquel evento crítico utilizado para cada metodología), para el caso de Bogotá, predominan los eventos encontrados en el rango de 190 a 230 minutos, con excepción del método de las lluvias. Respecto a las duraciones de los métodos F y H, no son representativas, ya que el diseño no propone límites en la duración del evento, por lo tanto, en estos casos, mientras mayor sea la duración del evento, mayor será la demanda de almacenamiento del sistema. En estos casos se tomó un valor estándar de una lluvia de duración de 6 horas. Sin embargo la decisión se basa en el criterio del diseñador.

En el caso de Cartagena, la duración del evento se encuentra en los rangos de 200 a 460 minutos. Como se observa, es mucho más amplio el intervalo entre la menor y la mayor duración calculada a partir de los diferentes métodos. El caso del método A es producto de un problema contenido en la metodología de diseño, cuando el caudal de salida (constante) cuenta con una pendiente baja, la duración del evento de diseño tiende ser muy alta. En estos casos se asumió un valor máximo de duración del evento de 960 minutos (16 horas).

Mientras que para coeficientes de infiltración bajos, el tiempo de vaciado de la trinchera suele ser similar para los diferentes métodos, el tiempo de vaciado para suelos con un alto coeficiente de infiltración demuestra mucha diferencia comparando un método con otro.

No existe una relación clara para las distintas metodologías en cuanto al evento predominante, ni al tiempo de vaciado.

Al comparar los parámetros hidrológicos y del tipo de suelo encontrado en las tres ciudades, se concluye que la ciudad con mayor demanda hidrológica y tasa de infiltración del suelo resulta ser Cartagena, seguida por Medellín y Bogotá. En cuanto a la relación entre el área total de drenaje y el área de drenaje de la trinchera (llamado en

la tabla 9-1 muestra a  $R$  como la relación del área total de drenaje entre el área total superficial de la trinchera). El mayor  $R$  lo obtiene Bogotá con un valor promedio de 7, seguida por Medellín con un valor promedio de 4.4 y Cartagena con un valor de 2.52. Entre mayor sea el número de la relación, menor área es necesaria para infiltrar el volumen producido por una área específica, es decir, si se contará con una área total de drenaje en Cartagena y Medellín igual a la de Bogotá, seguramente el área necesaria por la trinchera para infiltrar el volumen generado en la zona sería mucho mayor, a partir de esto, se logra concluir que aunque el tipo de suelo es un factor importante para el dimensionamiento de la estructura, lo que realmente determina la dimensión de la trinchera es la hidrología de la zona, ya que aunque se cuenta en Cartagena con un suelo con mayor tasa de infiltración que en Bogotá (10 veces la velocidad de infiltración de la escorrentía en el suelo) la relación  $R$  de la trinchera es mucho menor al calculado en Bogotá (aproximadamente la tercera parte de la relación alcanzada en Bogotá). Las lluvias con altas intensidades son las determinantes a la hora de dimensionar la trinchera.

## 9.2. ANÁLISIS DE LAS METODOLOGÍAS

Luego de analizar y aplicar cada metodología para los distintos sitios de estudio, se logró extraer una lista de problemas y aspectos que no tienen en cuenta cada una de las metodologías expuestas en este documento.

Para el problema de la colmatación en las trincheras, todas las metodologías proponen coeficientes que disipan este fenómeno, pero ninguno propone diferentes coeficientes según lo propongo que se encuentre el sistema a sufrir este fenómeno (a través del factor de seguridad o del coeficiente de seguridad). Adicionalmente, de las metodologías que tienen en cuenta las superficies laterales para la infiltración del volumen captado, ninguna soluciona el caso en el que la profundidad de la trinchera se encuentre compuesta por distintos tipos de suelo.

A continuación, en la tabla se resumen los problemas comunes con los que cuentan cada una de las metodologías:

**Tabla 9-2. Situaciones comunes para las diferentes metodologías de diseño**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>	<b>H</b>
<b>I</b>	X	X		X			X	
<b>II</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>III</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>IV</b>	X			X		X		X
<b>V</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>VI</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>VII</b>	X	X				X	X	X

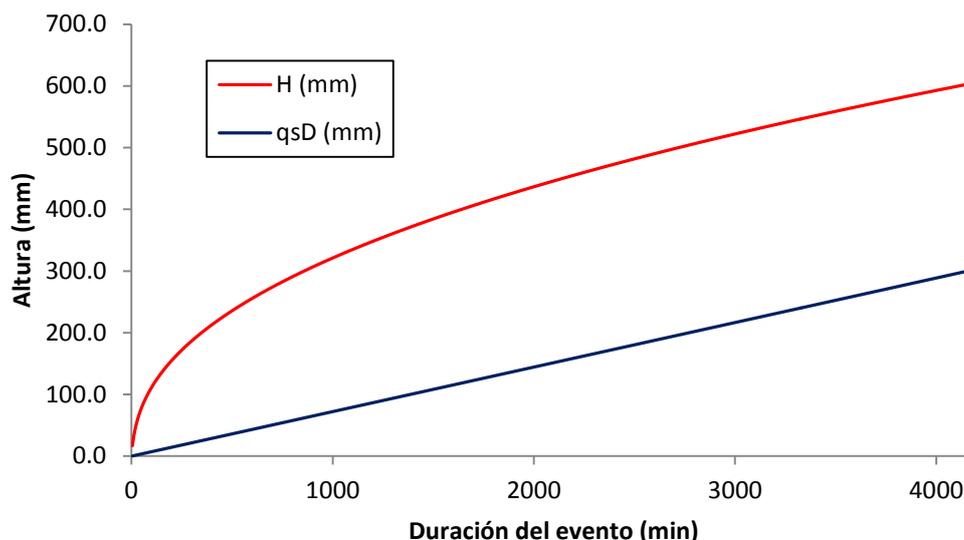
Donde

- I.** Sólo para trincheras de dimensiones rectangulares
- II.** Parámetros hidrológicos de la zona
- III.** Evolución de la tasa de infiltración del suelo
- IV.** Tiempo de vaciado de la estructura es irrelevante en el diseño
- V.** El tipo de alimentación del sistema
- VI.** Descarga instantánea
- VII.** Infiltración en las paredes laterales del sistema

Además de los problemas comunes mencionados anteriormente, existen problemas específicos con cada una de las metodologías. A continuación, la descripción de este tipo de problemas para cada uno de los métodos de dimensionamiento.

#### **A. Método de las lluvias**

Existe un problema en el momento de determinar la altura máxima de diseño, ya que, si la pendiente del caudal infiltrado es muy baja ( $q_s$ ), el resultado de restar la precipitación total generada por el evento ( $H$ ) y la altura total infiltrada por el suelo ( $q_s D$ ) tiende a encontrarse en eventos con duraciones muy altas y lejanas a la realidad, por lo tanto, la metodología debería contar con un límite máximo para la duración del evento de diseño (ver figura 9-1). La metodología propone un coeficiente de seguridad de 0.1, el cual reduce al 10% la infiltración del terreno, limitando considerablemente las propiedades del suelo.



**Figura 9-1. Altura infiltrada y precipitación total del evento en función de la duración del evento**

En el anexo 14 se presenta la tasa de crecimiento de la lámina entrante comienza a descender en un evento con una duración de 4000 minutos, es decir aproximadamente 3 días.

## **B. Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos**

El factor de seguridad que utiliza la metodología no diferencia entre el drenaje de grandes y pequeñas áreas. Además, el método propone utilizar tuberías para agilizar el movimiento del fluido en eventos extremos pero en ningún momento llega a considerar en sus cálculos. Existen casos para los cuales la ecuación 5-8 no tiene un valor máximo, y entre mayor sea la duración del evento, mayor será la profundidad demandada, por lo tanto, la metodología debería incluir un límite máximo de duraciones de eventos. Al momento de calcular el tiempo de vaciado, al no contemplar la infiltración por las paredes laterales, la ecuación de cálculo de ésta (ecuación 5-11) implica que si la trinchera cuentan con mayor profundidad, el tiempo de vaciado será mayor, lo cual no es cierto para todos los casos. El coeficiente de escorrentía no es aplicado para la parte hidrológica del método.

### **C. Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración en 3D**

La metodología también propone el uso de tuberías en la trinchera, pero tampoco las tiene en cuenta a la hora del diseño. No involucra el uso de un coeficiente de escorrentía para la determinación de la escorrentía generada por cada evento de lluvia.

### **D. Metodología de dimensionamiento para sistemas de infiltración**

El factor de seguridad es independiente a las características del sitio y las condiciones hidrológicas de éste. Para el cálculo de la duración del evento extremo, los coeficientes adimensionales de la curva IDF tipo Talbot alteran erróneamente el resultado. Las transformaciones sugeridas en el paper de esta metodología para realizar la transformación de una curva IDF tipo potencial a una curva IDF tipo Talbot no son aplicables a otro caso distinto al considerado en el paper original.

### **E. BRE Digest 365**

La ecuación para hallar el tiempo de vaciado tiene el mismo problema mencionado anteriormente en la metodología B (Metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos).

### **F. Dimensionamiento de tratamientos por infiltración**

La metodología no propone un método para el cálculo del volumen, y por lo tanto, tampoco considera un límite en cuanto a la duración de los eventos. Además, el tiempo de llenado de la trinchera es una variable independiente al evento.

### **G. Metodología Chile**

La ecuación para determinar el tiempo de vaciado de la estructura cuenta con el mismo problema de todas las demás ecuaciones para el cálculo de tiempo de vaciado de las metodologías.

## **H. Metodología Mora**

Esta metodología no tiene en cuenta la infiltración, por lo tanto no hay una reducción del volumen generado por el evento. Por otro lado, es la única que propone un sistema externo para desviar el volumen que no puede ser transportado por la estructura, lo cual soluciona el problema de la limitación por el espacio, ya que cuando el terreno no permita aumentar más las dimensiones de la trinchera, ese exceso de volumen no manejado será destinado hacia otro lugar a partir de tuberías.

## 10. CONCLUSIONES

---

Este trabajo de grado se interesó en realizar un resumen de las metodologías de diseño, construcción y mantenimiento de las trincheras de infiltración y retención. Esto se realizó con el fin de ofrecer un documento en español para la implementación de trincheras, lo cual se espera que favorezca la práctica de este tipo de dispositivos en el país. Con el documento, se espera mejorar la accesibilidad a este tipo de tecnologías, ya sea para el campo académico, de consultoría o de construcción.

En el capítulo de aplicabilidad (ver capítulo ocho), se realizaron ejemplos de diseño paso a paso para todas las metodologías en tres ciudades con distintos datos de entrada, donde se demostró que, es posible lograr el dimensionamiento de las trincheras aplicando todas las metodologías expuestas. Este documento es un primer paso para la creación de un cuerpo de conocimiento en español que abarca el diseño, la construcción y el mantenimiento de estas y otras técnicas SUDS, y así, lograr incorporarlo en la academia.

No se encontró ninguna metodología para el diseño y dimensionamiento de trincheras de retención, pero al analizar todos los métodos en el capítulo de análisis de resultados (ver capítulo nueve), se concluyó que el diseño propuesto por (Mora *et al.*, 2011), al no contemplar la infiltración del volumen de escorrentía en el suelo, estaría simulando la propiedad de las trincheras de retención. Por lo tanto, este método podría ser utilizado para realizar un pre-dimensionamiento hidráulico de la estructura retención, aunque no tenga en cuenta la redirección y evacuación del volumen acumulado.

Luego de realizar el análisis de resultados (ver capítulo nueve), se determinó que ninguna metodología de diseño contempla la evolución de la infiltración, es decir, todas recomiendan el uso de un valor único de coeficiente de infiltración, sin tener en cuenta la duración del evento. Otra característica importante no examinada en ninguna de las metodologías es la manera en que la escorrentía llega a la trinchera: no existe diferencia alguna en suponer que la trinchera es alimentada directamente por la escorrentía o que

el flujo de entrada sea suministrado por una estructura antecesora (por ejemplo un pozo de sedimentación o una cuneta verde) donde la velocidad del flujo es mucho menor, y por lo tanto, el volumen manejado por la trinchera no será el mismo volumen generado por el evento de lluvia. Todos los diseños implican mantener un mismo tipo de suelo en la superficie de infiltración, es decir, las metodologías no consideran la posible diferencia entre el suelo que caracteriza la superficie, el suelo encontrado en el perímetro lateral de la trinchera y el suelo en el fondo del sistema. Sin embargo, la infiltración depende en un gran porcentaje de las características del terreno, y por consiguiente suponer un mismo suelo para todo el sistema sería caer en un error de diseño, ya que en muchas ocasiones, la zona de estudio no cuenta con un estrato uniforme de suelo, y por lo tanto, sus características en cuanto a la infiltración no son iguales.

Existen casos en los que distintas metodologías cuentan con un mismo problema en común. Por ejemplo, el método de lluvias y la metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos cuentan con un problema numérico en la determinación de la profundidad mínima necesaria para la trinchera: al aplicar las ecuaciones originales planteadas por estas metodologías se puede llegar a resultados fuera de la realidad, donde la duración del evento de diseño toma valores entre días y semanas y no existe un parámetro que limite estos resultados. Además, el tiempo de vaciado para la mayoría de metodologías que consideran esto como un criterio de diseño (metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración planos, BRE Digest 365, metodología Chile) no reflejan un valor realista del vaciado, al considerar que la única superficie de infiltración es el fondo de la trinchera, suposición que no va acorde con lo que sucede en la dinámica del vaciado.

## 11. RECOMENDACIONES

---

Como se mencionó, este documento, sería un primer paso para contribuir con la accesibilidad y la aplicabilidad de SUDS en Colombia. Luego de un análisis crítico de las metodologías existentes, se recomienda fomentar la investigación y desarrollo de nuevas metodologías para el diseño de trincheras de retención/infiltración y otras técnicas SUDS, que resuelvan los vacíos no considerados en los métodos encontrados en este documento (ver capítulo diez).

Este documento, de los tres componentes principales desarrollados (diseño, construcción y mantenimiento), hizo énfasis en la parte de diseño y dimensionamiento de trincheras de infiltración. Como consecuencia, se recomienda realizar un trabajo que aborde y haga mayor énfasis en las dos componentes restantes, ya que éstas son una parte importante en el desarrollo de un proyecto de trincheras.

En el desarrollo del documento, se identificaron dos principales maneras de diseñar el sistema: la primera es por medio de un análisis plano, en el que solo se tiene en cuenta la superficie como medio para infiltrar el volumen de escorrentía; la segunda manera de analizar el problema, es teniendo en cuenta las paredes laterales que también ayudan a disminuir el volumen de escorrentía en la trinchera y por ende el volumen de almacenamiento. A partir de esto, se recomienda el desarrollo de un documento en el cual se comparen las ventajas y desventajas de realizar una trinchera a partir de un análisis plano y un análisis teniendo en cuenta toda la superficie de contacto que brinda la trinchera.

Según lo mencionado en el capítulo anterior (ver capítulo diez), no se encontró ninguna metodología de diseño y dimensionamiento para trincheras de retención, y aunque se mencionó anteriormente que a partir del método expuesto por (Mora *et al.*, 2011) se podría realizar un pre-dimensionamiento de la estructura, éste no contempla la evacuación del fluido, y teniendo en cuenta que la trinchera de retención debe ser diseñada para retener y distribuir el volumen captado, se recomienda el desarrollo de una metodología que contemple el dimensionamiento completo para la estructura

abarcando temas como la redirección del flujo, el tiempo de retención y la colmatación en el sistema.

El trabajo realizado no involucró un análisis económico en comparación con los sistemas convencionales. Teniendo en cuenta que las estructuras en las que hizo énfasis este documento sirven para el control de inundaciones, no se hizo un estudio económico que contemplara la inversión necesaria para el desarrollo de estas técnicas (demandadas por el diseño, la construcción y el mantenimiento) en comparación con los problemas resultantes del uso de sistemas convencionales. Por lo tanto, se recomienda el desarrollo de un proyecto que abarque este tema, y que logre, en términos económicos hallar la viabilidad del cambio de sistemas para el manejo de la escorrentía urbana.

Es notable que todas las metodologías para el diseño hidráulico e hidrológico resultaron bastante sencillas de aplicar y requieren de información con la que se cuenta en Colombia, y en base a que éstas no solo son aplicables para el caso del diseño de una trinchera de infiltración, las metodologías del documento pueden ser utilizadas para el dimensionamiento de otras técnicas SUDS, como por ejemplo pavimentos porosos, pozos de infiltración, etc. De acuerdo a lo anterior, se recomienda a ingenieros diseñadores y encargados del desarrollo de la infraestructura urbana, tener en cuenta estas técnicas de drenaje en proyectos de renovación, adecuación y desarrollo de equipamientos urbanos.

En el capítulo de análisis de resultados (ver capítulo nueve), se concluyó que en la mayoría de las metodologías, las ecuaciones fueron desarrolladas solo para trincheras en forma de paralelepípedos rectangulares, pero en la realidad, pueden realizarse trincheras con otras formas geométricas. A razón de esto, se invita a desarrollar un documento el cual amplíe las metodologías de diseño de este documento, donde el objetivo sea dimensionamiento de trincheras con otras formas geométricas diversas.

A partir del monitoreo de trincheras reportado en trabajos referido en la literatura, se sabe que éstas contribuyen a remover contaminantes contenidos en las aguas de escorrentía. Luego de realizar la recopilación y el análisis de cada una de las metodologías de diseño, no se logró encontrar un método que contemplara la parte ambiental, es decir, no se encontró metodología alguna que dimensionara la estructura

en función de eficiencia de remoción de contaminantes. El desarrollo de este trabajo lleva a concluir que siendo una de las principales características de las técnicas SUDS el buen manejo que éstas le dan a la escorrentía, se deben desarrollar métodos de diseño que tengan en cuenta los contaminantes encontrados en la zona y los objetivos de descontaminación, con lo cual se establezcan las dimensiones de la trinchera, el tiempo de vaciado y los materiales utilizados para la conformación de ésta.

Para el dimensionamiento de trincheras de infiltración, se recomienda utilizar la metodología básica para el diseño de sistemas de infiltración en 3D. Esta metodología, como su nombre lo indica, se basa en que la infiltración no solo sucede en el fondo de la trinchera, sino en toda la superficie de contacto con volumen a almacenar (paredes laterales). Además, el cálculo del tiempo de vaciado resulta más acertado, ya que éste considera lo descrito anteriormente respecto a las superficies de infiltración (ver capítulo nueve).

Finalmente, para realizar los ejercicios de aplicación de las distintas metodologías para las tres ciudades de Colombia consideradas (Bogotá, Medellín y Cartagena), fue necesario contar con datos de pluviometría, curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) y estudio de suelos, los cuales no resultaron sencillos de encontrar, por lo cual, se recomienda a la Pontificia Universidad Javeriana apoyar a los estudiantes para que tenga acceso a esta información durante los trabajos académicos por medio de convenios con distintas entidades (IDEAM, empresas prestadoras de servicios, etc.). Las bases de datos con las que cuenta la Pontificia Universidad Javeriana en cuestión al tema desarrollado en este trabajo son pobres, y ninguna base de datos se encuentra suscrita a las publicaciones CIRIA, siendo ésta una de las principales fuentes aportantes que llevaron al desarrollo de este documento.

## 12. REFERENCIAS

---

1. Aguado A. & V. Albert. (1994). Hormigón Poroso. *Universidad de Chile y Centro Tecnológico del hormigón*, Chile.
2. Arnold C.L. & Gibbons J. (1996). Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *J. Am. Plan. Assoc.* 62 (2), 243–258.
3. Akan A.O. & Houghtalen R.J. (2003). Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality. *Engineering Applications and Computer Modeling*. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003, ISBN: 0-471-43158-3.
4. Altarejos García L. (2007). Aplicación de sistemas de drenaje urbano sostenible en el desarrollo urbanístico de Paterna, Valencia. *V Congreso Nacional de la Ingeniería Civil: desarrollo y sostenibilidad en el marco de la ingeniería. Sevilla (España)*, 26-28 Noviembre de 2007. 20 p.
5. Azzout J.R., Barraud S., Cres F., Alfakih E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Paris: Tec et Doc. 372 p.
6. Balades J.D., Berga P & Bourgogne P. (1998). Impact d'une tranchée drainante par temps de pluie. *Actes du congrès Novatech*, págs.551-558.
7. Boyle Torrey Barbara. (2004). La urbanización: una fuerza ambiental considerable. *Population Reference Bureau*. Available at: <http://www.prb.org/SpanishContent/Articles/2004/LaUrbanizacionUnaFuerzaAmbientalConsiderable.aspx> [Accedido Marzo 17, 2011].
8. BRE, Building Research Establishment. (1991). Digest 365 Soakaway Design.151. *BRE Bookshop*, Rosebery Avenue, London, EC1R 4GB.
9. Browne D., Deletic A., Fletcher T.D., Mudd G. (2011). Modeling the development and consequences of clogging for stormwater infiltration trenches. *12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011. 16 p.
10. Caputo U., P. Moura and N. Nascimento. (2011). Evaluating the implementation of infiltration trenches in areas with consolidated urbanization: Case of Belo Horizonte, Brazil, *12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011
11. Chocat B., Ashley R., Ball J., Marsalek J., Matos M.R., Rauch W., Schilling W., Urbonas B. (2004). Urban drainage – out of sight out of mind?. *International Conference On Sustainable Techniques And Strategies In Urban Water Management*, págs 6–10.

12. Chow V.T.; Maidment, D.R. y Mays, L.W. (2000). Hidrología aplicada. *McGraw-Hill Interamericana*, Bogotá, 584 p.
13. Chow, V.T. (2004). Hidráulica aplicada de canales Abiertos. *McGraw-Hill Interamericana*. Bogotá, 633 p.
14. CIRIA, Construction Industry Research and Information Association. (1995). CDM regulations - case study guidance for designers: an interim report (withdrawn), 1995 R145
15. CIRIA, Construction Industry Research and Information Association. (2007). The SUDS manual, London 2007 C697
16. CIRIA, Construction Industry Research and Information Association. (2007). Site handbook for the construction of SUDS, London 2007 C698
17. DAEE-CETESB. Departamento de Água e Energia Elétrica - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. (1980). Drenagem urbana: Manual de projeto. São Paulo: DAEE-CETESB, 1980. 466 p.
18. Ellis J.B. *et al.* (2012). An impact assessment methodology for urban surface runoff quality following best practice treatment. *Sci Total Environ* 2012, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.12.003
19. Environment Agency/ Scottish Environmental Protection Agency. (Undated). Pollution Prevention Guidelines, Available online at: <http://www.environment-agency.gov.uk/business/topics/pollution/39083.aspx>
20. EPA, Environmental Protection Agency.(1999)a. Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. United States Environmental Protection Agency. Washington, DC 20460, Office of Water (4303), United States EPA-821-R-99-012
21. EPA, Environmental Protection Agency.(1999)b. Storm Water Technology Fact Sheet: Infiltration Trench. United States Environmental Protection Agency. Available at: <http://www.epa.gov/OWM/mtb/infltrenc.pdf>.
22. Freni G., Mannina G. & Viviani G. (2009). Stormwater infiltration trenches: a conceptual modelling approach. *Water Science & Technology*, 60(1), p185
23. Galarza S. & Garzon F.(2005). Gestion integrada de servicios relacionados con el agua en asentamientos nucleados. *La sostenibilidad en la gestión del drenaje urbano, seminario internacional*. Grupo de investigación en gestión avanzada del agua urbana, Pontificia Universidad Javeriana, Seccional Cali, 2005
24. Holmstrand O. (1984). Infiltration of stormwater: research at Chalmers University of Technology, results and examples of application. In: Planning and Control of Urban Storm Drainage, Eds. P. Balmer, P-A Malmqvist and A. Sjoberg, ISBN 91 7032 1280.

25. **Horner R.H. & Day H.M.** (1991). The effects of response efficiency on functionally equivalent competing behaviors. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 24, 719-732.
26. **Hurley S.E. & Forman R.T.T.** (2011). Stormwater ponds and biofilters for large urban sites: Modeled arrangements that achieve the phosphorus reduction target for Boston's Charles River, USA. *Ecological Engineering*. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857411000425> [Accedido Mayo 3, 2011].
27. **James F. Shackerlford.** (1998). Introducción a la Ciencia de Materiales para Ingenieros. *Editorial Prentice Hall*, 4th edición
28. **Lopes da Silveira A.L. & Avruch Goldenfum J.** (2007), Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol.12, núm. 2, págs. 157-170.
29. **Monsalve S. G.** (1995). Hidrología en la ingeniería, *Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería*, Bogotá
30. **Mora O., Alvarado D. & Torres A.** (2011). Economic analysis of the application of porous pavements on Bogota roads, *12nd International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre Brazil
31. **New Jersey Department of Environmental Protection.** (2000). Manual for New Jersey: best management practices for control of nonpoint source pollution from stormwaters. *New Jersey Department of Environmental Protection*, Trenton, NJ
32. **Novotny V.** (1995). Water Quality Management Library – Volume 9 - Nonpoint pollution and urban stormwater. *Technomic Publishers Company, Inc*, Pennsylvania.
33. **Pennsylvania Stormwater Best Management Practices.** (2006). Manual Pennsylvania Stormwater BMP Manual, 363-0300-002.
34. **Pinto Liliane Lopes Costa Alves.** (2011). O desempenho de pavimentos permeáveis como medida mitigadora da impermeabilização do solo urbano – *ed.rev São Paulo*, 2011.
35. **Pitt R.** (2003). *The Source Loading and Management Model (WinSLAMM): Introduction and Basic Uses*. Available online at: <http://unix.eng.ua.edu/~rpitt/SLAMMDETPOND/WinSlamm/Ch1/M1.html# Introduction# Introduction>.
36. **Proton A.** (2008). Etude hydraulique des tranchées de rétention / infiltration. Thèse : *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*, 2008 [13/05/2009], 299 p. Disponible sur <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?&id=proton>

37. Proton A. & Chocat B. (2007). Long term behaviour of an infiltration trench. *In: Proceedings NOVATECH 2007 6th International Conference, Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management*. 1015-1022. GRAIE, Lyon, France;2007.
38. Raimbault G. & Metois M. (1992). Le site de structure réservoir de Rezé. *Actes Novatech*, Lyon, págs.213-222.
39. RAS – 2000, Reglamento Técnico Del Sector De Agua Potable Y Saneamiento Básico. (2000). República de Colombia, Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico.
40. Sansalone J.J., Smithson J.A. & Koran J.M. (1998). Development and testing of a partial exfiltration trench for in-situ treatment of highway drainage. *Transportation Research*.
41. Santa Adriana & Quintero José. (2010). Desempeño hidráulico y ambiental de un modelo de trinchera de retención utilizada como componente del drenaje urbano, p11.
42. Schueler T. (1987). *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, DC.
43. Schlüter W., Spitzer A. & Jefferies C. (2002). Performance of 3 Sustainable Urban Drainage Systems in East Scotland. *In Proc.: 9th International Conference on Urban Drainage*, Portland Oregon.
44. *The Vermont Stormwater Management Manual, Volume I*. (2002). Stormwater Treatment Standards. *Vermont Agency of Natural Resources*, April 2002.
45. *The Vermont Stormwater Management Manual, Volume II* (2002). Technical Guidance. *Vermont Agency of Natural Resources*, April 2002.
46. Torres A. (2001). Técnicas alternativas de drenaje. *Revista ACODAL*, 194, pág.7-12.
47. Torres Andrés., Ortega Suescún. & Herrera Daza. (2009). Propiedades filtrantes de los pavimentos porosos rígidos. En *La gestión integrada del recurso hídrico frente al cambio climático. Seminario Internacional: Un Nuevo Paradigma en el Manejo Integrado del Agua en Áreas Urbanas*. Cali, Colombia.
48. United Nations .(2004). Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2004
49. *Urban Subwatershed Restoration Manual*. (2007). Urban Stormwater Retrofit Practices Appendices

50. **Water Environment Federation., Environmental and Water Resources Institute (U.S.). (2006).** Biological nutrient removal (BNR) operation in wastewater treatment plants. New York: McGraw-Hill.
51. **Water Environment Federation (WEF). & American Society of Civil Engineers (ASCE). (1992).** Design and Construction of Urban Stormwater Management Systems. *ASCE Manuals and Reports of Engineering Practice No. 77*, WEF Manual of Practice FD-20. Water Environment Federation, Alexandria, VA.
52. **Williams H., Heap H., Kitts H., Greenshaw L., Davies S., Fisher P., Hendrie M. & Owens D. (2001).** Control of water pollution from construction sites. Guidance for consultants and contractors (C532) CIRIA, London
53. **Woods-Ballard B., Kellagher R., Martin P., Jefferies C., Bray R. & Shaffer P. (2007).** The SUDS Manual, CIRIA C697.
54. **WRc. (1998).** Civil Engineering Specification for the Water Industry (CESWI) 7<sup>th</sup> Edition. Wallingford.

## ANEXOS

### ANEXO 1. METODOLOGÍA CIRIA R145

En la siguiente tabla se encuentran las consideraciones para poder dimensionar un pozo de prueba, con el fin de determinar el coeficiente de infiltración del suelo en campo:

**Tabla Anexo 1 Consideraciones para poder dimensionar un pozo de prueba (Modificado de CIRIA C697, 2007)**

Selección del sitio	El pozo debe encontrarse en la zona de aplicación. Se debe realizar un pozo cada 25 m según la longitud de la trinchera determinada en el pre-dimensionamiento. Si la zona cuenta con distintos tipos de suelo, se recomienda colocar un pozo por cada 10 m de longitud de la trinchera. Se debe diseñar con la tasa más baja de infiltración encontrada.
Dimensiones del pozo de prueba	El pozo debe tener aproximadamente la misma profundidad de la trinchera determinada en el pre-dimensionamiento. Si el área a drenar por la trinchera es menor a 100 m <sup>2</sup> , el pozo debe tener la capacidad de almacenar 0.5 m <sup>3</sup> de agua. En el caso en donde el volumen a drenar sea mayor a los 100 m <sup>2</sup> , el pozo debe tener la capacidad de almacenar un volumen total de al menos 1 m <sup>3</sup> .

Después de haber determinado las dimensiones y el número de pozos necesarios para el proyecto, se debe seguir el siguiente procedimiento para determinar el coeficiente de infiltración:

- a. Excavar el pozo de prueba según las dimensiones mínimas del ensayo.
- b. Medir el área húmeda de la superficie interna del pozo, incluyendo todas las paredes y el fondo.
- c. Llenar el pozo de agua hasta la altura de medición.
- d. Medir el nivel del agua y el tiempo de vaciado en diferentes intervalos a medida que el pozo se vacía.
- e. Repetir dos veces más el ensayo, preferiblemente el mismo día de la realización del primero.

El nivel del agua utilizado en el pozo debe ser comparable con la posible lámina de agua que se presentará en el sistema de infiltración. Esta metodología puede llegar a no ser práctica cuando el pozo tiende a ser muy profundo, y por lo cual suministrar el volumen para el ensayo no sería sencillo ni viable.

En el ensayo, se debe determinar el tiempo  $t_{p75-25}$  que le tomó al pozo disminuir la lámina de agua desde un 75 % de su altura original hasta un 25 % de esta, así como el volumen de agua  $V_{p75-25}$  vaciado durante ese intervalo de tiempo. También, se debe determinar el área  $a_{p50}$  de la base y de los lados del pozo a un 50 % de su altura original.

La tasa de infiltración del suelo  $q$  está dada por la siguiente expresión:

$$q = \frac{V_{p75-25}}{a_{p50} \cdot t_{p75-25}}$$

Luego de repetir el procedimiento anterior en los diferentes pozos presentes en la misma zona de análisis, el pozo con el menor valor de  $q$  será el utilizado a la hora del diseño.

**ANEXO 2. POZO DE INSPECCIÓN METODOLOGÍA URBAN  
SUBWATERSHED RESTORATION MANUAL 3, AUGUST 2007**

A continuación, los pasos y recomendaciones para realizar un pozo de prueba:

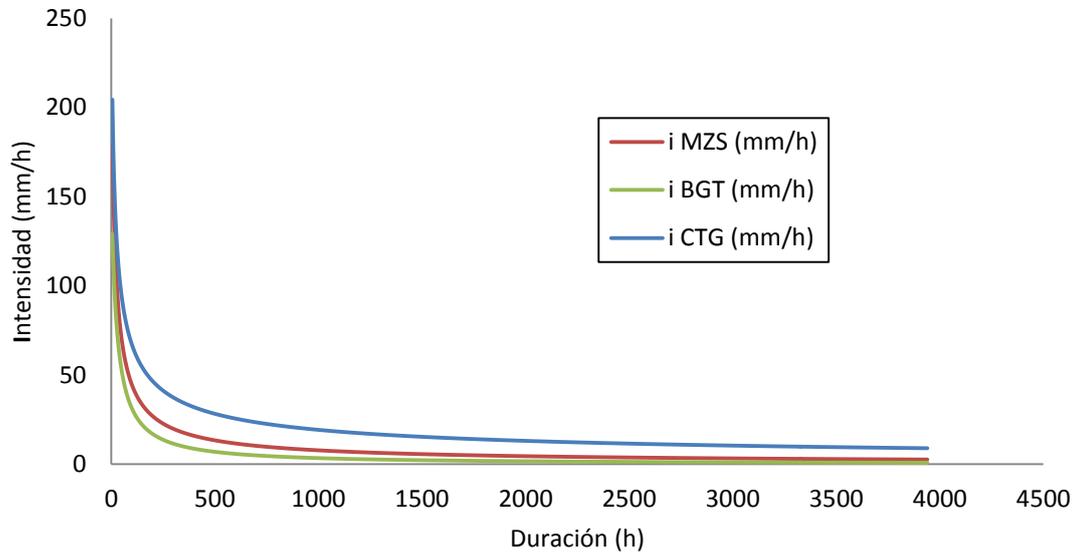
Por cada 18 m<sup>2</sup> de área de infiltración se debe realizar una perforación en el suelo. Se debe hacer un ensayo de penetración estándar (SPT) cada 60 cm, con una profundidad de al menos 60 cm con respecto a la base de la trinchera. Clasificar el suelo encontrado a 60 cm del fondo de la futura trinchera. Si hay una capa rocosa a menos de 60 cm del fondo, determinar la profundidad de esta. Se deben dejar estacas en la zona para identificar que suelo se tomó como referencia para futuras comparaciones.

*Procedimiento para medir la infiltración*

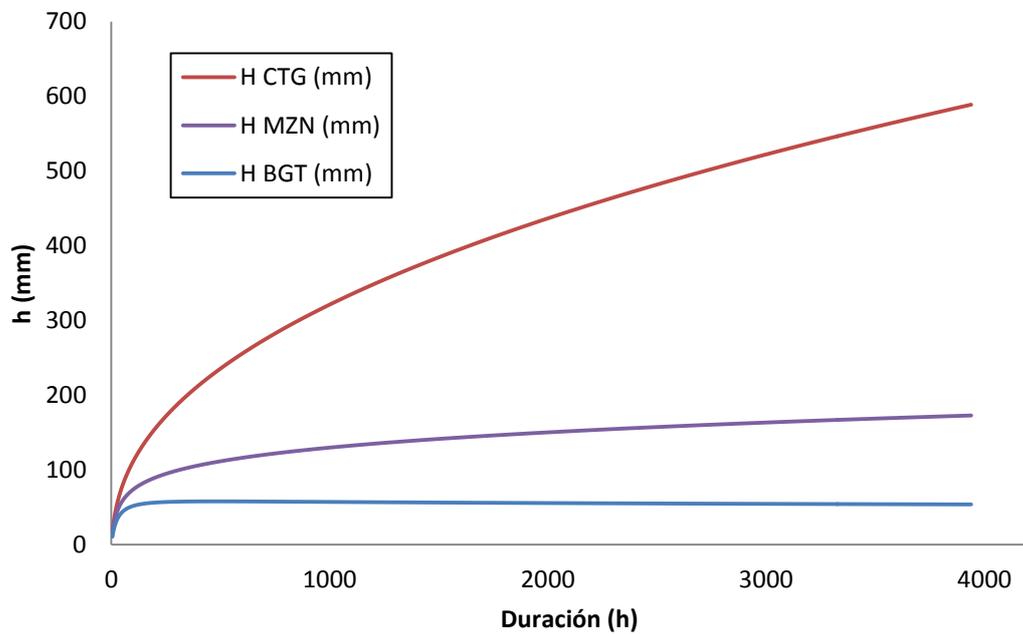
1. Instale una cubierta de prueba (e.g., rígida, de 4 pulgadas a 6 pulgadas de diámetro de tubería) a 60 cm por debajo del fondo de trinchera proyectada.
2. Remueva todo el material suelto encontrado cerca de la zona del ensayo. Rellene con una capa de 5 cm de arena o grava fina en el fondo del ensayo, previniendo la colmatación del subsuelo. Rellene la zona con agua limpia (60 cm) y deje que las capas inferiores se humedezcan por 24 horas.
3. Luego de 24 horas, rellene nuevamente el área con 60 cm de agua limpia y mida el nivel del agua luego de 1 hora. Repita este mismo procedimiento 3 veces rellenando con agua limpia hasta el tope del ensayo. La tasa de infiltración del subsuelo será el promedio de las 4 observaciones completadas anteriormente. El reporte debe estar dado por centímetros por hora (cm/h).

Luego de finalizar el ensayo, este debe ser removido y el terreno rellenado como anteriormente se encontraba.

**ANEXO 3. CURVAS IDF ELABORADAS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS PARA LAS TRES CIUDADES EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE ESTUDIO.**



**ANEXO 4. CURVAS HDF ELABORADAS PARA UN PERIODO DE RETORNO DE 10 AÑOS PARA LAS TRES CIUDADES EN LOS DISTINTOS PUNTOS DE ESTUDIO.**



## ANEXO 5. COEFICIENTES DE ESCORRENTIA PARA DISTINTO TIPO DE LUGARES, (MONSALVE, 1995)

### Coefficientes de escorrentía para distintos tipos de lugares (Monsalve, 1995)

<u>CODIGO</u>	TIPOS DE AREA DE DRENAJE	COEFICIENTE DE ESCORRENTIA C	
		MIN	MAX
-	<b>PRADOS</b>		
<u>1</u>	Suelos arenosos, planos 2%	0.05	0.10
<u>2</u>	Suelos arenosos, promedio 2-7%	0.15	0.20
<u>3</u>	Suelos pesados, planos 2%	0.13	0.17
<u>4</u>	Suelos pesados, promedio 2-7%	0.18	0.22
<u>5</u>	Suelos pesados, pendiente 7%	0.25	0.35
-	<b>DISTRITOS COMERCIALES</b>		
<u>6</u>	Áreas de centro de ciudad	0.70	0.95
<u>7</u>	Áreas Vecinas	0.50	0.70
-	<b>RESIDENCIAL</b>		
<u>8</u>	Áreas casas individuales separadas	0.30	0.50
<u>9</u>	Casas multifamiliares separadas	0.40	0.60
<u>10</u>	Casas mmultifamiliares unidas	0.60	0.75
<u>11</u>	Suburbana	0.25	0.40
<u>12</u>	Áreas de apartamentos de vivienda	0.50	0.70
-	<b>INDUSTRIAL</b>		
<u>13</u>	Áreas livianas	0.50	0.80
<u>14</u>	Áreas pesadas	0.60	0.90
-			
<u>15</u>	<b>PARQUES, CEMENTERIOS</b>	0.10	0.25
-			
<u>16</u>	<b>CAMPOS DE JUEGOS</b>	0.20	0.35
-			
<u>17</u>	<b>AREAS DE PATIOS DE FERROCARRILES</b>	0.20	0.40
-			
<u>18</u>	<b>AREAS NO DESARROLLADAS</b>	0.10	0.30
-			
-	<b>CALLES</b>		
<u>19</u>	Asfaltadas	0.70	0.95
<u>20</u>	Concreto	0.80	0.95
<u>21</u>	Ladrillo	0.70	0.85
<u>22</u>	<b>CALZADAS Y ALAMEDAS</b>	0.75	0.85
-			
<u>23</u>	<b>TECHOS</b>	0.75	0.85

**ANEXOS 6. COEFICIENTES DE ESCORRENTIA SEGÚN EL RAS - 2000**

<b>TIPO DE SUPERFICIE</b>	<b>C</b>
Cubiertas	0.75 - 0.95
Pavimentos asfálticos y superficies de concreto	0.70 - 0.95
Vías adoquinadas	0.70 - 0.85
Zonas comerciales o industriales	0.60 - 0.95
Residencial, con casas contiguas, predominio de zonas duras	0.75
Residencial multifamiliar, con bloques contiguos y zonas dras entre estos	0.60 - 0.75
Residencial unifamiliar, con casas contiguas y predominio de jardines	0.40 - 0.60
Residencial, con casas rodeadas de jardines o multifamiliares apreciablemente separados	0.45
Residencial, con predominio de zonas verdes y parques-Cementerios	0.30
Laderas sin vegetación	0.60
Laderas con vegetación	0.30
Parques recreacionales	0.20 - 0.35

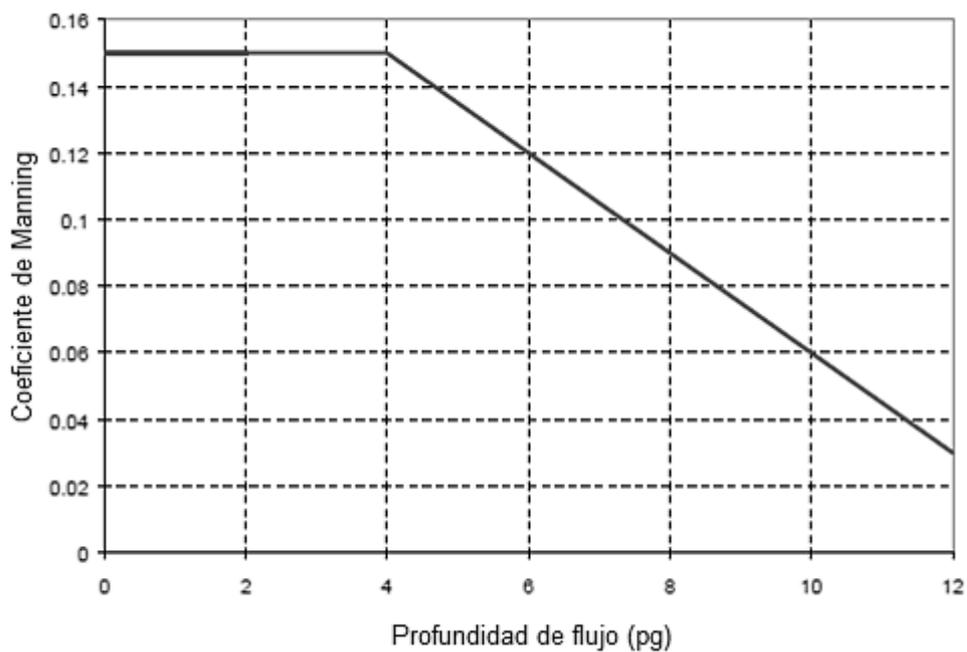
**ANEXO 7. TASA DE INFILTRACIÓN DE DISTINTOS TIPOS DE SUELOS,  
(WOODS-BALLARD ET AL., 2007)**

CODIGO	TIPO DE SUELO	TASA DE INFILTRACIÓN	
		MIN (m/h)	MAX (m/h)
<u>1</u>	Grava	10	1000
<u>2</u>	Arena	0.1	100
<u>3</u>	Arena francosa	0.01	1
<u>4</u>	Franco arenoso	0.05	0.5
<u>5</u>	Franco	0.001	0.1
<u>6</u>	Franco limoso	0.0005	0.05
<u>7</u>	Caliza	0.001	100
<u>8</u>	Franco arcillo arenoso	0.001	0.1
<u>9</u>	Franco limo arcilloso	0.00005	0.005
<u>10</u>	Arcilla		0.0001
<u>11</u>	Till	0.00001	0.01
<u>12</u>	Roca	0.00001	0.1

**ANEXO 8. POROSIDAD PARA DISTINTOS MATERIALES (*n*) (WOODS-BALLARD ET AL., 2007).**

POROSIDAD	n	
	min	max
Sistemas geo-celulares	0.90	0.95
Piedra limpia	0.40	0.50
Grava uniforme	0.30	0.40
Arena uniforme o Grava	0.20	0.30

**ANEXO 9. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING PARA CANALES CON CUBIERTA VEGETAL (SCCHUELER, 1996)**



**ANEXO 10. ECUACIONES PARA FLUJO UNIFORME.*****i. Ecuación de Chezy***

$$V = C\sqrt{RS}$$

Donde

$V$ : Velocidad media del flujo

$R$ : Radio hidráulico

$S$ : Pendiente de la línea de energía

$C$ : Factor de resistencia al flujo

El factor de resistencia al flujo de Chezy ( $C$ ) resulta a partir de dos suposiciones:

**Suposición 1. Fuerza resistente del flujo**

La fuerza que resiste el flujo por unidad de área del lecho de la corriente  $F$  es proporcional al cuadrado de la velocidad:

$$F = KV^2$$

Donde

$K$ : Constante de proporcionalidad

La superficie de contacto del flujo con el lecho de la corriente es igual al producto del perímetro mojado y la longitud del tramo del canal:

$$A_c = PL$$

Donde

$A_c$  : Superficie de contacto ( $m^2$ )

Por lo tanto, la fuerza total que resiste el flujo es igual:

$$F_R = KV^2 PL$$

Donde

$F_R$  es la fuerza resistente del flujo.

**Suposición 2.** *En flujo uniforme, la componente efectiva de la fuerza gravitacional debe ser igual a la fuerza total resistente al flujo.*

La componente efectiva de la fuerza gravitacional en flujo uniforme es igual a:

$$F_g = wALS$$

Donde

$w$ : Peso unitario de agua

$A$ : Área mojada de la sección transversal

$S$ : Pendiente del canal

Luego, igualando las dos fuerzas se obtiene la ecuación de Chézy.

## ii. Ecuación de Manning

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde

$V$ : Velocidad del flujo uniforme

$R_h$  : Radio hidráulico

$S_f$  : Pendiente de la línea de energía (paralela a la pendiente del fondo del canal para flujo uniforme)

$n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning

El coeficiente de rugosidad de Manning está en función de la rugosidad de la superficie del canal, la vegetación, la irregularidad del canal, el alineamiento del canal, la sedimentación y socavación del canal, obstrucciones, tamaño y formas del canal, entre otros factores.

*Relación entre el coeficiente de fricción del Manning y el factor de resistencia al flujo de Chézy:*

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}$$

#### **ANEXO 11. FLUJO EN MEDIOS POROSOS (CHOW ET AL., 2004)**

Cuando un flujo se encuentra en un medio poroso, la relación  $\frac{Q}{A}$  no representa la realidad de la velocidad del flujo. Por lo tanto se recomienda utilizar la ley de Darcy:

$$\frac{Q}{A} = q = K S_f$$

Donde

$K$  : Conductividad hidráulica ( $K = \frac{\gamma D^2}{32\mu}$ )

$\gamma$  : Peso específico del fluido

$\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido

$D$  : Diámetro promedio de las partículas

$S_f$  : Pendiente de la línea de energía

$Q$  : Caudal del flujo

$A$ : Área transversal

La velocidad real promedio del flujo en un medio poroso es igual a:

$$V_a = \frac{q}{\eta}$$

Donde

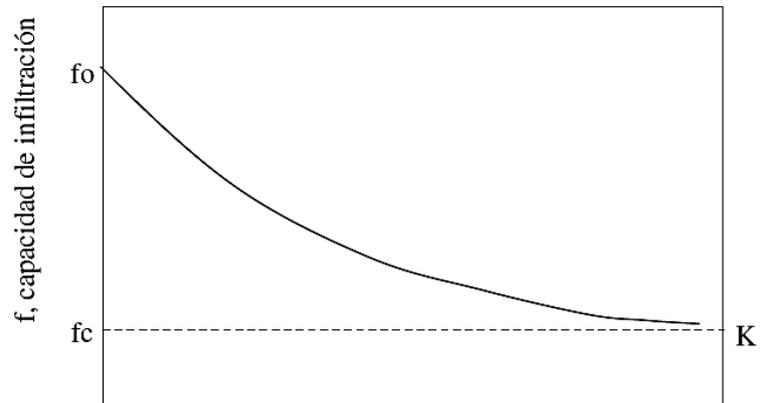
$\eta$ : Porosidad del material

La ley de Darcy es aplicable siempre y cuando el flujo sea laminar. Para clasificar si un flujo es turbulento, de transición o laminar, se determina por medio de un parámetro que se conoce como el “Numero de Reynolds” (NR), este número se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$NR = \frac{VD}{\nu}$$

## ANEXO 12. CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA Y POROSIDAD PARA SUELOS NO CONSOLIDADOS (CHOW *ET AL.*, 1994B)

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA $k$ (cm/s)	POROSIDAD $n$ (%)
Grava	$10^{-1} - 10^2$	25 – 40
Arena	$10^{-5} - 1$	25 – 50
Limo	$10^{-7} - 10^{-3}$	35 – 50
Arcilla	$10^{-9} - 10^{-5}$	40 – 70

**ANEXO 13. EVOLUCIÓN DE LA TASA DE INFILTRACIÓN (Chow *et al.*, 1994)**



## ANEXO 14. CURVAS IDF Y HDF DE LAS DISTINTAS CIUDADES EN ESTUDIO

Duración (min)	H Cartagena (mm)	qs Cartagena (mm)	HD Cartagena (mm)	H Medellín (mm)	qs Medellín (mm)	HD Medellín (mm)	H Bogotá (mm)	qs Bogotá (mm)	HD Bogotá (mm)
5	17.0	0.7	16.3	14.9	0.1	14.8	10.7551889	0.0	10.7
10	29.0	1.4	27.5	25.0	0.2	24.7	18.5688552	0.0	18.5
15	38.4	2.2	36.2	32.4	0.3	32.1	24.47954	0.0	24.5
20	46.2	2.9	43.3	38.2	0.4	37.7	29.0913063	0.0	29.1
25	52.9	3.6	49.3	42.9	0.5	42.4	32.7787965	0.0	32.7
30	58.9	4.3	54.6	46.8	0.6	46.2	35.786354	0.1	35.7
35	64.4	5.1	59.3	50.2	0.7	49.5	38.2799335	0.1	38.2
40	69.4	5.8	63.6	53.2	0.8	52.4	40.3760753	0.1	40.3
45	74.0	6.5	67.5	55.8	0.9	54.9	42.158942	0.1	42.1
50	78.3	7.2	71.0	58.2	1.1	57.2	43.690778	0.1	43.6
55	82.3	7.9	74.4	60.4	1.2	59.2	45.0185713	0.1	44.9
60	86.1	8.7	77.5	62.3	1.3	61.1	46.1784315	0.1	46.1
65	89.8	9.4	80.4	64.1	1.4	62.8	47.198547	0.1	47.1
70	93.2	10.1	83.1	65.8	1.5	64.3	48.1012301	0.1	48.0
75	96.6	10.8	85.7	67.4	1.6	65.8	48.9043617	0.1	48.8
80	99.7	11.5	88.2	68.8	1.7	67.1	49.6224319	0.2	49.5
85	102.8	12.3	90.5	70.2	1.8	68.4	50.267301	0.2	50.1
90	105.8	13.0	92.8	71.5	1.9	69.6	50.8487653	0.2	50.7
95	108.6	13.7	94.9	72.7	2.0	70.7	51.3749839	0.2	51.2
100	111.4	14.4	97.0	73.8	2.1	71.7	51.8528039	0.2	51.7
105	114.1	15.2	98.9	74.9	2.2	72.7	52.2880115	0.2	52.1
110	116.7	15.9	100.8	76.0	2.3	73.7	52.6855276	0.2	52.5
115	119.2	16.6	102.6	77.0	2.4	74.6	53.0495625	0.2	52.8

120	121.7	17.3	104.4	78.0	2.5	75.5	53.383738	0.2	53.2
125	124.1	18.0	106.1	78.9	2.6	76.3	53.6911859	0.2	53.5
130	126.5	18.8	107.7	79.8	2.7	77.1	53.9746271	0.3	53.7
135	128.8	19.5	109.3	80.6	2.8	77.8	54.2364361	0.3	54.0
140	131.1	20.2	110.8	81.5	2.9	78.5	54.4786935	0.3	54.2
145	133.3	20.9	112.3	82.3	3.0	79.2	54.70323	0.3	54.4
150	135.4	21.7	113.8	83.0	3.2	79.9	54.9116621	0.3	54.6
155	137.5	22.4	115.2	83.8	3.3	80.5	55.1054221	0.3	54.8
160	139.6	23.1	116.5	84.5	3.4	81.2	55.2857831	0.3	55.0
165	141.7	23.8	117.8	85.2	3.5	81.8	55.4538805	0.3	55.1
170	143.7	24.5	119.1	85.9	3.6	82.3	55.6107299	0.3	55.3
175	145.6	25.3	120.4	86.6	3.7	82.9	55.7572417	0.3	55.4
180	147.6	26.0	121.6	87.2	3.8	83.4	55.8942348	0.3	55.5
185	149.5	26.7	122.8	87.8	3.9	84.0	56.0224474	0.4	55.7
190	151.4	27.4	123.9	88.5	4.0	84.5	56.1425464	0.4	55.8
195	153.2	28.1	125.0	89.1	4.1	85.0	56.2551357	0.4	55.9
200	155.0	28.9	126.1	89.6	4.2	85.4	56.3607636	0.4	56.0
205	156.8	29.6	127.2	90.2	4.3	85.9	56.4599286	0.4	56.1
210	158.6	30.3	128.3	90.8	4.4	86.4	56.5530851	0.4	56.1
215	160.3	31.0	129.3	91.3	4.5	86.8	56.6406478	0.4	56.2
220	162.0	31.8	130.3	91.8	4.6	87.2	56.722996	0.4	56.3
225	163.7	32.5	131.3	92.4	4.7	87.6	56.8004775	0.4	56.4
230	165.4	33.2	132.2	92.9	4.8	88.1	56.8734111	0.4	56.4
235	167.1	33.9	133.1	93.4	4.9	88.4	56.9420901	0.5	56.5
240	168.7	34.6	134.0	93.9	5.0	88.8	57.0067845	0.5	56.5
245	170.3	35.4	134.9	94.4	5.1	89.2	57.0677432	0.5	56.6
250	171.9	36.1	135.8	94.8	5.3	89.6	57.1251959	0.5	56.6

255	173.5	36.8	136.7	95.3	5.4	89.9	57.1793551	0.5	56.7
260	175.0	37.5	137.5	95.8	5.5	90.3	57.2304175	0.5	56.7
265	176.6	38.3	138.3	96.2	5.6	90.6	57.2785654	0.5	56.8
270	178.1	39.0	139.1	96.6	5.7	91.0	57.323968	0.5	56.8
275	179.6	39.7	139.9	97.1	5.8	91.3	57.3667826	0.5	56.8
280	181.1	40.4	140.7	97.5	5.9	91.6	57.4071553	0.5	56.9
285	182.6	41.1	141.4	97.9	6.0	91.9	57.4452224	0.5	56.9
290	184.0	41.9	142.2	98.3	6.1	92.2	57.4811109	0.6	56.9
295	185.5	42.6	142.9	98.7	6.2	92.5	57.5149392	0.6	56.9
300	186.9	43.3	143.6	99.1	6.3	92.8	57.546818	0.6	57.0
305	188.3	44.0	144.3	99.5	6.4	93.1	57.5768508	0.6	57.0
310	189.7	44.7	145.0	99.9	6.5	93.4	57.6051345	0.6	57.0
315	191.1	45.5	145.6	100.3	6.6	93.7	57.6317599	0.6	57.0
320	192.5	46.2	146.3	100.7	6.7	94.0	57.656812	0.6	57.0
325	193.8	46.9	146.9	101.0	6.8	94.2	57.6803706	0.6	57.1
330	195.2	47.6	147.6	101.4	6.9	94.5	57.7025107	0.6	57.1
335	196.5	48.4	148.2	101.8	7.0	94.7	57.7233028	0.6	57.1
340	197.9	49.1	148.8	102.1	7.1	95.0	57.7428132	0.7	57.1
345	199.2	49.8	149.4	102.5	7.2	95.2	57.7611043	0.7	57.1
350	200.5	50.5	150.0	102.8	7.4	95.5	57.778235	0.7	57.1
355	201.8	51.2	150.5	103.2	7.5	95.7	57.7942605	0.7	57.1
360	203.1	52.0	151.1	103.5	7.6	96.0	57.8092333	0.7	57.1
365	204.3	52.7	151.7	103.8	7.7	96.2	57.8232026	0.7	57.1
370	205.6	53.4	152.2	104.2	7.8	96.4	57.8362151	0.7	57.1
375	206.9	54.1	152.7	104.5	7.9	96.6	57.848315	0.7	57.1
380	208.1	54.9	153.3	104.8	8.0	96.8	57.8595438	0.7	57.1
385	209.4	55.6	153.8	105.1	8.1	97.1	57.8699411	0.7	57.1

390	210.6	56.3	154.3	105.5	8.2	97.3	57.8795442	0.8	57.1
395	211.8	57.0	154.8	105.8	8.3	97.5	57.8883885	0.8	57.1
400	213.0	57.7	155.3	106.1	8.4	97.7	57.8965076	0.8	57.1
405	214.2	58.5	155.7	106.4	8.5	97.9	57.9039333	0.8	57.1
410	215.4	59.2	156.2	106.7	8.6	98.1	57.910696	0.8	57.1
415	216.6	59.9	156.7	107.0	8.7	98.3	57.9168242	0.8	57.1
420	217.8	60.6	157.1	107.3	8.8	98.5	57.9223452	0.8	57.1
425	218.9	61.3	157.6	107.6	8.9	98.6	57.927285	0.8	57.1
430	220.1	62.1	158.0	107.9	9.0	98.8	57.9316682	0.8	57.1
435	221.2	62.8	158.5	108.1	9.1	99.0	57.9355183	0.8	57.1
440	222.4	63.5	158.9	108.4	9.2	99.2	57.9388576	0.8	57.1
445	223.5	64.2	159.3	108.7	9.3	99.4	57.9417073	0.9	57.1
450	224.7	65.0	159.7	109.0	9.5	99.5	57.9440878	0.9	57.1
455	225.8	65.7	160.1	109.3	9.6	99.7	57.9460183	0.9	57.1
460	226.9	66.4	160.5	109.5	9.7	99.9	57.9475173	0.9	57.1
465	228.0	67.1	160.9	109.8	9.8	100.0	57.9486023	0.9	57.1
470	229.1	67.8	161.3	110.1	9.9	100.2	57.9492901	0.9	57.0
475	230.2	68.6	161.6	110.3	10.0	100.4	57.9495966	0.9	57.0
480	231.3	69.3	162.0	110.6	10.1	100.5	57.9495373	0.9	57.0
485	232.4	70.0	162.4	110.8	10.2	100.7	57.9491267	0.9	57.0
490	233.4	70.7	162.7	111.1	10.3	100.8	57.9483787	0.9	57.0
495	234.5	71.5	163.1	111.4	10.4	101.0	57.9473067	1.0	57.0
500	235.6	72.2	163.4	111.6	10.5	101.1	57.9459235	1.0	57.0
505	236.6	72.9	163.7	111.9	10.6	101.3	57.9442413	1.0	57.0
510	237.7	73.6	164.1	112.1	10.7	101.4	57.9422717	1.0	57.0
515	238.7	74.3	164.4	112.4	10.8	101.5	57.9400261	1.0	56.9
520	239.8	75.1	164.7	112.6	10.9	101.7	57.9375151	1.0	56.9

525	240.8	75.8	165.0	112.8	11.0	101.8	57.934749	1.0	56.9
530	241.8	76.5	165.3	113.1	11.1	102.0	57.9317376	1.0	56.9
535	242.9	77.2	165.6	113.3	11.2	102.1	57.9284904	1.0	56.9
540	243.9	77.9	165.9	113.6	11.3	102.2	57.9250164	1.0	56.9
545	244.9	78.7	166.2	113.8	11.4	102.3	57.9213244	1.0	56.9
550	245.9	79.4	166.5	114.0	11.6	102.5	57.9174226	1.1	56.9
555	246.9	80.1	166.8	114.3	11.7	102.6	57.9133191	1.1	56.8
560	247.9	80.8	167.1	114.5	11.8	102.7	57.9090215	1.1	56.8
565	248.9	81.6	167.3	114.7	11.9	102.8	57.9045372	1.1	56.8
570	249.9	82.3	167.6	114.9	12.0	103.0	57.8998732	1.1	56.8
575	250.8	83.0	167.8	115.2	12.1	103.1	57.8950365	1.1	56.8
580	251.8	83.7	168.1	115.4	12.2	103.2	57.8900335	1.1	56.8
585	252.8	84.4	168.3	115.6	12.3	103.3	57.8848706	1.1	56.8
590	253.8	85.2	168.6	115.8	12.4	103.4	57.8795537	1.1	56.7
595	254.7	85.9	168.8	116.0	12.5	103.5	57.8740887	1.1	56.7
600	255.7	86.6	169.1	116.3	12.6	103.6	57.8684811	1.2	56.7
605	256.6	87.3	169.3	116.5	12.7	103.8	57.8627364	1.2	56.7
610	257.6	88.1	169.5	116.7	12.8	103.9	57.8568598	1.2	56.7
615	258.5	88.8	169.7	116.9	12.9	104.0	57.8508562	1.2	56.7
620	259.5	89.5	170.0	117.1	13.0	104.1	57.8447304	1.2	56.7
625	260.4	90.2	170.2	117.3	13.1	104.2	57.838487	1.2	56.6
630	261.3	90.9	170.4	117.5	13.2	104.3	57.8321305	1.2	56.6
635	262.3	91.7	170.6	117.7	13.3	104.4	57.8256653	1.2	56.6
640	263.2	92.4	170.8	117.9	13.4	104.5	57.8190953	1.2	56.6
645	264.1	93.1	171.0	118.1	13.5	104.6	57.8124246	1.2	56.6
650	265.0	93.8	171.2	118.3	13.7	104.7	57.8056571	1.3	56.6
655	265.9	94.5	171.4	118.5	13.8	104.8	57.7987965	1.3	56.5

660	266.8	95.3	171.6	118.7	13.9	104.9	57.7918462	1.3	56.5
665	267.7	96.0	171.7	118.9	14.0	105.0	57.7848098	1.3	56.5
670	268.6	96.7	171.9	119.1	14.1	105.0	57.7776906	1.3	56.5
675	269.5	97.4	172.1	119.3	14.2	105.1	57.7704918	1.3	56.5
680	270.4	98.2	172.3	119.5	14.3	105.2	57.7632165	1.3	56.5
685	271.3	98.9	172.4	119.7	14.4	105.3	57.7558676	1.3	56.4
690	272.2	99.6	172.6	119.9	14.5	105.4	57.7484481	1.3	56.4
695	273.1	100.3	172.7	120.1	14.6	105.5	57.7409607	1.3	56.4
700	273.9	101.0	172.9	120.3	14.7	105.6	57.7334081	1.3	56.4
705	274.8	101.8	173.0	120.4	14.8	105.6	57.725793	1.4	56.4
710	275.7	102.5	173.2	120.6	14.9	105.7	57.7181177	1.4	56.4
715	276.5	103.2	173.3	120.8	15.0	105.8	57.7103848	1.4	56.3
720	277.4	103.9	173.5	121.0	15.1	105.9	57.7025966	1.4	56.3
725	278.3	104.7	173.6	121.2	15.2	106.0	57.6947553	1.4	56.3
730	279.1	105.4	173.7	121.4	15.3	106.0	57.6868632	1.4	56.3
735	280.0	106.1	173.9	121.5	15.4	106.1	57.6789222	1.4	56.3
740	280.8	106.8	174.0	121.7	15.5	106.2	57.6709346	1.4	56.2
745	281.7	107.5	174.1	121.9	15.6	106.3	57.6629022	1.4	56.2
750	282.5	108.3	174.2	122.1	15.8	106.3	57.6548269	1.4	56.2
755	283.4	109.0	174.4	122.3	15.9	106.4	57.6467106	1.5	56.2
760	284.2	109.7	174.5	122.4	16.0	106.5	57.6385552	1.5	56.2
765	285.0	110.4	174.6	122.6	16.1	106.5	57.6303622	1.5	56.2
770	285.9	111.1	174.7	122.8	16.2	106.6	57.6221334	1.5	56.1
775	286.7	111.9	174.8	123.0	16.3	106.7	57.6138704	1.5	56.1
780	287.5	112.6	174.9	123.1	16.4	106.7	57.6055747	1.5	56.1
785	288.3	113.3	175.0	123.3	16.5	106.8	57.597248	1.5	56.1
790	289.1	114.0	175.1	123.5	16.6	106.9	57.5888915	1.5	56.1

795	290.0	114.8	175.2	123.6	16.7	106.9	57.5805068	1.5	56.0
800	290.8	115.5	175.3	123.8	16.8	107.0	57.5720952	1.5	56.0
805	291.6	116.2	175.4	124.0	16.9	107.1	57.563658	1.5	56.0
810	292.4	116.9	175.5	124.1	17.0	107.1	57.5551966	1.6	56.0
815	293.2	117.6	175.5	124.3	17.1	107.2	57.5467122	1.6	56.0
820	294.0	118.4	175.6	124.5	17.2	107.3	57.5382059	1.6	56.0
825	294.8	119.1	175.7	124.6	17.3	107.3	57.5296789	1.6	55.9
830	295.6	119.8	175.8	124.8	17.4	107.4	57.5211325	1.6	55.9
835	296.4	120.5	175.8	125.0	17.5	107.4	57.5125675	1.6	55.9
840	297.2	121.3	175.9	125.1	17.6	107.5	57.5039853	1.6	55.9
845	297.9	122.0	176.0	125.3	17.7	107.5	57.4953866	1.6	55.9
850	298.7	122.7	176.0	125.4	17.9	107.6	57.4867726	1.6	55.9
855	299.5	123.4	176.1	125.6	18.0	107.6	57.4781442	1.6	55.8
860	300.3	124.1	176.1	125.8	18.1	107.7	57.4695023	1.7	55.8
865	301.1	124.9	176.2	125.9	18.2	107.8	57.4608479	1.7	55.8
870	301.8	125.6	176.3	126.1	18.3	107.8	57.4521818	1.7	55.8
875	302.6	126.3	176.3	126.2	18.4	107.9	57.4435048	1.7	55.8
880	303.4	127.0	176.4	126.4	18.5	107.9	57.4348179	1.7	55.7
885	304.1	127.8	176.4	126.5	18.6	108.0	57.4261217	1.7	55.7
890	304.9	128.5	176.4	126.7	18.7	108.0	57.417417	1.7	55.7
895	305.7	129.2	176.5	126.8	18.8	108.0	57.4087047	1.7	55.7
900	306.4	129.9	176.5	127.0	18.9	108.1	57.3999854	1.7	55.7
905	307.2	130.6	176.6	127.1	19.0	108.1	57.3912598	1.7	55.6
910	307.9	131.4	176.6	127.3	19.1	108.2	57.3825286	1.8	55.6
915	308.7	132.1	176.6	127.4	19.2	108.2	57.3737925	1.8	55.6
920	309.4	132.8	176.6	127.6	19.3	108.3	57.3650521	1.8	55.6
925	310.2	133.5	176.7	127.7	19.4	108.3	57.356308	1.8	55.6

930	310.9	134.2	176.7	127.9	19.5	108.4	57.3475609	1.8	55.6
935	311.7	135.0	176.7	128.0	19.6	108.4	57.3388112	1.8	55.5
940	312.4	135.7	176.7	128.2	19.7	108.4	57.3300596	1.8	55.5
945	313.2	136.4	176.7	128.3	19.8	108.5	57.3213067	1.8	55.5
950	313.9	137.1	176.8	128.5	20.0	108.5	57.3125529	1.8	55.5
955	314.6	137.9	176.8	128.6	20.1	108.6	57.3037987	1.8	55.5
960	315.4	138.6	176.8	128.8	20.2	108.6	57.2950448	1.8	55.4
965	316.1	139.3	176.8	128.9	20.3	108.6	57.2862914	1.9	55.4
970	316.8	140.0	176.8	129.1	20.4	108.7	57.2775392	1.9	55.4
975	317.5	140.7	176.8	129.2	20.5	108.7	57.2687886	1.9	55.4
980	318.3	141.5	176.8	129.3	20.6	108.8	57.2600399	1.9	55.4
985	319.0	142.2	176.8	129.5	20.7	108.8	57.2512937	1.9	55.4
990	319.7	142.9	176.8	129.6	20.8	108.8	57.2425504	1.9	55.3
995	320.4	143.6	176.8	129.8	20.9	108.9	57.2338103	1.9	55.3
1000	321.1	144.4	176.8	129.9	21.0	108.9	57.2250738	1.9	55.3
1005	321.8	145.1	176.8	130.0	21.1	108.9	57.2163413	1.9	55.3
1010	322.6	145.8	176.8	130.2	21.2	109.0	57.2076132	1.9	55.3
1015	323.3	146.5	176.8	130.3	21.3	109.0	57.1988899	2.0	55.2
1020	324.0	147.2	176.7	130.4	21.4	109.0	57.1901716	2.0	55.2
1025	324.7	148.0	176.7	130.6	21.5	109.1	57.1814587	2.0	55.2
1030	325.4	148.7	176.7	130.7	21.6	109.1	57.1727516	2.0	55.2
1035	326.1	149.4	176.7	130.9	21.7	109.1	57.1640505	2.0	55.2
1040	326.8	150.1	176.7	131.0	21.8	109.1	57.1553557	2.0	55.2
1045	327.5	150.8	176.6	131.1	21.9	109.2	57.1466675	2.0	55.1
1050	328.2	151.6	176.6	131.3	22.1	109.2	57.1379863	2.0	55.1
1055	328.9	152.3	176.6	131.4	22.2	109.2	57.1293123	2.0	55.1
1060	329.6	153.0	176.5	131.5	22.3	109.3	57.1206457	2.0	55.1

1065	330.2	153.7	176.5	131.7	22.4	109.3	57.1119868	2.1	55.1
1070	330.9	154.5	176.5	131.8	22.5	109.3	57.1033359	2.1	55.0
1075	331.6	155.2	176.4	131.9	22.6	109.3	57.0946932	2.1	55.0
1080	332.3	155.9	176.4	132.0	22.7	109.4	57.0860589	2.1	55.0
1085	333.0	156.6	176.4	132.2	22.8	109.4	57.0774333	2.1	55.0
1090	333.7	157.3	176.3	132.3	22.9	109.4	57.0688165	2.1	55.0
1095	334.3	158.1	176.3	132.4	23.0	109.4	57.0602089	2.1	55.0
1100	335.0	158.8	176.2	132.6	23.1	109.5	57.0516106	2.1	54.9
1105	335.7	159.5	176.2	132.7	23.2	109.5	57.0430217	2.1	54.9
1110	336.4	160.2	176.1	132.8	23.3	109.5	57.0344425	2.1	54.9
1115	337.0	161.0	176.1	132.9	23.4	109.5	57.0258732	2.1	54.9
1120	337.7	161.7	176.0	133.1	23.5	109.6	57.017314	2.2	54.9
1125	338.4	162.4	176.0	133.2	23.6	109.6	57.008765	2.2	54.8
1130	339.1	163.1	175.9	133.3	23.7	109.6	57.0002264	2.2	54.8
1135	339.7	163.8	175.9	133.5	23.8	109.6	56.9916983	2.2	54.8
1140	340.4	164.6	175.8	133.6	23.9	109.6	56.9831809	2.2	54.8
1145	341.0	165.3	175.8	133.7	24.0	109.7	56.9746744	2.2	54.8
1150	341.7	166.0	175.7	133.8	24.2	109.7	56.966179	2.2	54.8
1155	342.4	166.7	175.6	133.9	24.3	109.7	56.9576946	2.2	54.7
1160	343.0	167.4	175.6	134.1	24.4	109.7	56.9492216	2.2	54.7
1165	343.7	168.2	175.5	134.2	24.5	109.7	56.94076	2.2	54.7
1170	344.3	168.9	175.4	134.3	24.6	109.7	56.9323099	2.3	54.7
1175	345.0	169.6	175.4	134.4	24.7	109.8	56.9238715	2.3	54.7
1180	345.6	170.3	175.3	134.6	24.8	109.8	56.9154448	2.3	54.6
1185	346.3	171.1	175.2	134.7	24.9	109.8	56.9070301	2.3	54.6
1190	346.9	171.8	175.2	134.8	25.0	109.8	56.8986274	2.3	54.6
1195	347.6	172.5	175.1	134.9	25.1	109.8	56.8902368	2.3	54.6

1200	348.2	173.2	175.0	135.0	25.2	109.8	56.8818584	2.3	54.6
1205	348.9	173.9	174.9	135.2	25.3	109.8	56.8734923	2.3	54.6
1210	349.5	174.7	174.8	135.3	25.4	109.9	56.8651387	2.3	54.5
1215	350.1	175.4	174.8	135.4	25.5	109.9	56.8567975	2.3	54.5
1220	350.8	176.1	174.7	135.5	25.6	109.9	56.848469	2.3	54.5
1225	351.4	176.8	174.6	135.6	25.7	109.9	56.8401531	2.4	54.5
1230	352.1	177.6	174.5	135.7	25.8	109.9	56.8318499	2.4	54.5
1235	352.7	178.3	174.4	135.9	25.9	109.9	56.8235596	2.4	54.4
1240	353.3	179.0	174.3	136.0	26.0	109.9	56.8152822	2.4	54.4
1245	354.0	179.7	174.2	136.1	26.1	109.9	56.8070178	2.4	54.4
1250	354.6	180.4	174.1	136.2	26.3	110.0	56.7987664	2.4	54.4
1255	355.2	181.2	174.0	136.3	26.4	110.0	56.7905281	2.4	54.4
1260	355.8	181.9	174.0	136.4	26.5	110.0	56.782303	2.4	54.4
1265	356.5	182.6	173.9	136.6	26.6	110.0	56.7740912	2.4	54.3
1270	357.1	183.3	173.8	136.7	26.7	110.0	56.7658926	2.4	54.3
1275	357.7	184.0	173.7	136.8	26.8	110.0	56.7577073	2.5	54.3
1280	358.3	184.8	173.6	136.9	26.9	110.0	56.7495355	2.5	54.3
1285	358.9	185.5	173.5	137.0	27.0	110.0	56.7413771	2.5	54.3
1290	359.6	186.2	173.4	137.1	27.1	110.0	56.7332322	2.5	54.2
1295	360.2	186.9	173.3	137.2	27.2	110.0	56.7251009	2.5	54.2
1300	360.8	187.7	173.1	137.3	27.3	110.0	56.7169831	2.5	54.2
1305	361.4	188.4	173.0	137.5	27.4	110.0	56.708879	2.5	54.2
1310	362.0	189.1	172.9	137.6	27.5	110.1	56.7007885	2.5	54.2
1315	362.6	189.8	172.8	137.7	27.6	110.1	56.6927117	2.5	54.2
1320	363.3	190.5	172.7	137.8	27.7	110.1	56.6846486	2.5	54.1
1325	363.9	191.3	172.6	137.9	27.8	110.1	56.6765994	2.6	54.1
1330	364.5	192.0	172.5	138.0	27.9	110.1	56.6685639	2.6	54.1

1335	365.1	192.7	172.4	138.1	28.0	110.1	56.6605422	2.6	54.1
1340	365.7	193.4	172.2	138.2	28.1	110.1	56.6525344	2.6	54.1
1345	366.3	194.2	172.1	138.3	28.2	110.1	56.6445405	2.6	54.1
1350	366.9	194.9	172.0	138.4	28.4	110.1	56.6365604	2.6	54.0
1355	367.5	195.6	171.9	138.5	28.5	110.1	56.6285943	2.6	54.0
1360	368.1	196.3	171.8	138.7	28.6	110.1	56.6206421	2.6	54.0
1365	368.7	197.0	171.6	138.8	28.7	110.1	56.6127039	2.6	54.0
1370	369.3	197.8	171.5	138.9	28.8	110.1	56.6047797	2.6	54.0
1375	369.9	198.5	171.4	139.0	28.9	110.1	56.5968694	2.6	53.9
1380	370.5	199.2	171.3	139.1	29.0	110.1	56.5889732	2.7	53.9
1385	371.1	199.9	171.1	139.2	29.1	110.1	56.581091	2.7	53.9
1390	371.7	200.6	171.0	139.3	29.2	110.1	56.5732228	2.7	53.9
1395	372.3	201.4	170.9	139.4	29.3	110.1	56.5653687	2.7	53.9
1400	372.8	202.1	170.8	139.5	29.4	110.1	56.5575286	2.7	53.9
1405	373.4	202.8	170.6	139.6	29.5	110.1	56.5497026	2.7	53.8
1410	374.0	203.5	170.5	139.7	29.6	110.1	56.5418906	2.7	53.8
1415	374.6	204.3	170.4	139.8	29.7	110.1	56.5340927	2.7	53.8
1420	375.2	205.0	170.2	139.9	29.8	110.1	56.5263089	2.7	53.8
1425	375.8	205.7	170.1	140.0	29.9	110.1	56.5185391	2.7	53.8
1430	376.4	206.4	169.9	140.1	30.0	110.1	56.5107834	2.8	53.8
1435	376.9	207.1	169.8	140.2	30.1	110.1	56.5030418	2.8	53.7
1440	377.5	207.9	169.7	140.3	30.2	110.1	56.4953143	2.8	53.7
1445	378.1	208.6	169.5	140.4	30.3	110.1	56.4876009	2.8	53.7
1450	378.7	209.3	169.4	140.5	30.5	110.1	56.4799015	2.8	53.7
1455	379.3	210.0	169.2	140.6	30.6	110.1	56.4722162	2.8	53.7
1460	379.8	210.8	169.1	140.7	30.7	110.1	56.464545	2.8	53.7
1465	380.4	211.5	168.9	140.8	30.8	110.1	56.4568878	2.8	53.6

1470	381.0	212.2	168.8	140.9	30.9	110.1	56.4492447	2.8	53.6
1475	381.6	212.9	168.6	141.0	31.0	110.1	56.4416156	2.8	53.6
1480	382.1	213.6	168.5	141.1	31.1	110.1	56.4340006	2.8	53.6
1485	382.7	214.4	168.3	141.2	31.2	110.1	56.4263996	2.9	53.6
1490	383.3	215.1	168.2	141.3	31.3	110.1	56.4188126	2.9	53.6
1495	383.8	215.8	168.0	141.4	31.4	110.0	56.4112396	2.9	53.5
1500	384.4	216.5	167.9	141.5	31.5	110.0	56.4036807	2.9	53.5
1505	385.0	217.2	167.7	141.6	31.6	110.0	56.3961357	2.9	53.5
1510	385.5	218.0	167.6	141.7	31.7	110.0	56.3886047	2.9	53.5
1515	386.1	218.7	167.4	141.8	31.8	110.0	56.3810876	2.9	53.5
1520	386.7	219.4	167.3	141.9	31.9	110.0	56.3735845	2.9	53.4
1525	387.2	220.1	167.1	142.0	32.0	110.0	56.3660953	2.9	53.4
1530	387.8	220.9	166.9	142.1	32.1	110.0	56.3586201	2.9	53.4
1535	388.4	221.6	166.8	142.2	32.2	110.0	56.3511587	3.0	53.4
1540	388.9	222.3	166.6	142.3	32.3	110.0	56.3437113	3.0	53.4
1545	389.5	223.0	166.5	142.4	32.4	110.0	56.3362777	3.0	53.4
1550	390.0	223.7	166.3	142.5	32.6	110.0	56.328858	3.0	53.3
1555	390.6	224.5	166.1	142.6	32.7	110.0	56.3214521	3.0	53.3
1560	391.1	225.2	166.0	142.7	32.8	109.9	56.31406	3.0	53.3
1565	391.7	225.9	165.8	142.8	32.9	109.9	56.3066817	3.0	53.3
1570	392.3	226.6	165.6	142.9	33.0	109.9	56.2993172	3.0	53.3
1575	392.8	227.4	165.5	143.0	33.1	109.9	56.2919665	3.0	53.3
1580	393.4	228.1	165.3	143.1	33.2	109.9	56.2846294	3.0	53.2
1585	393.9	228.8	165.1	143.2	33.3	109.9	56.2773062	3.1	53.2
1590	394.5	229.5	164.9	143.3	33.4	109.9	56.2699966	3.1	53.2
1595	395.0	230.2	164.8	143.4	33.5	109.9	56.2627006	3.1	53.2
1600	395.6	231.0	164.6	143.5	33.6	109.9	56.2554184	3.1	53.2

1605	396.1	231.7	164.4	143.6	33.7	109.9	56.2481497	3.1	53.2
1610	396.6	232.4	164.2	143.7	33.8	109.8	56.2408947	3.1	53.1
1615	397.2	233.1	164.1	143.8	33.9	109.8	56.2336533	3.1	53.1
1620	397.7	233.8	163.9	143.8	34.0	109.8	56.2264254	3.1	53.1
1625	398.3	234.6	163.7	143.9	34.1	109.8	56.219211	3.1	53.1
1630	398.8	235.3	163.5	144.0	34.2	109.8	56.2120102	3.1	53.1
1635	399.4	236.0	163.3	144.1	34.3	109.8	56.2048228	3.1	53.1
1640	399.9	236.7	163.2	144.2	34.4	109.8	56.1976489	3.2	53.0
1645	400.4	237.5	163.0	144.3	34.5	109.8	56.1904885	3.2	53.0
1650	401.0	238.2	162.8	144.4	34.7	109.7	56.1833414	3.2	53.0
1655	401.5	238.9	162.6	144.5	34.8	109.7	56.1762078	3.2	53.0
1660	402.0	239.6	162.4	144.6	34.9	109.7	56.1690875	3.2	53.0
1665	402.6	240.3	162.2	144.7	35.0	109.7	56.1619805	3.2	53.0
1670	403.1	241.1	162.1	144.8	35.1	109.7	56.1548869	3.2	52.9
1675	403.7	241.8	161.9	144.9	35.2	109.7	56.1478065	3.2	52.9
1680	404.2	242.5	161.7	144.9	35.3	109.7	56.1407394	3.2	52.9
1685	404.7	243.2	161.5	145.0	35.4	109.6	56.1336855	3.2	52.9
1690	405.2	244.0	161.3	145.1	35.5	109.6	56.1266448	3.3	52.9
1695	405.8	244.7	161.1	145.2	35.6	109.6	56.1196173	3.3	52.9
1700	406.3	245.4	160.9	145.3	35.7	109.6	56.1126029	3.3	52.8
1705	406.8	246.1	160.7	145.4	35.8	109.6	56.1056016	3.3	52.8
1710	407.4	246.8	160.5	145.5	35.9	109.6	56.0986134	3.3	52.8
1715	407.9	247.6	160.3	145.6	36.0	109.6	56.0916383	3.3	52.8
1720	408.4	248.3	160.1	145.7	36.1	109.5	56.0846762	3.3	52.8
1725	408.9	249.0	159.9	145.7	36.2	109.5	56.0777271	3.3	52.8
1730	409.5	249.7	159.7	145.8	36.3	109.5	56.070791	3.3	52.7
1735	410.0	250.4	159.5	145.9	36.4	109.5	56.0638678	3.3	52.7

1740	410.5	251.2	159.3	146.0	36.5	109.5	56.0569575	3.3	52.7
1745	411.0	251.9	159.1	146.1	36.6	109.4	56.0500601	3.4	52.7
1750	411.5	252.6	158.9	146.2	36.8	109.4	56.0431756	3.4	52.7
1755	412.1	253.3	158.7	146.3	36.9	109.4	56.0363039	3.4	52.7
1760	412.6	254.1	158.5	146.4	37.0	109.4	56.029445	3.4	52.6
1765	413.1	254.8	158.3	146.4	37.1	109.4	56.0225988	3.4	52.6
1770	413.6	255.5	158.1	146.5	37.2	109.4	56.0157654	3.4	52.6
1775	414.1	256.2	157.9	146.6	37.3	109.3	56.0089447	3.4	52.6
1780	414.7	256.9	157.7	146.7	37.4	109.3	56.0021366	3.4	52.6
1785	415.2	257.7	157.5	146.8	37.5	109.3	55.9953412	3.4	52.6
1790	415.7	258.4	157.3	146.9	37.6	109.3	55.9885584	3.4	52.5
1795	416.2	259.1	157.1	147.0	37.7	109.3	55.9817882	3.5	52.5
1800	416.7	259.8	156.9	147.0	37.8	109.2	55.9750305	3.5	52.5
1805	417.2	260.6	156.7	147.1	37.9	109.2	55.9682854	3.5	52.5
1810	417.7	261.3	156.5	147.2	38.0	109.2	55.9615528	3.5	52.5
1815	418.2	262.0	156.2	147.3	38.1	109.2	55.9548326	3.5	52.5
1820	418.7	262.7	156.0	147.4	38.2	109.2	55.9481248	3.5	52.4
1825	419.3	263.4	155.8	147.5	38.3	109.1	55.9414294	3.5	52.4
1830	419.8	264.2	155.6	147.6	38.4	109.1	55.9347464	3.5	52.4
1835	420.3	264.9	155.4	147.6	38.5	109.1	55.9280757	3.5	52.4
1840	420.8	265.6	155.2	147.7	38.6	109.1	55.9214174	3.5	52.4
1845	421.3	266.3	155.0	147.8	38.7	109.1	55.9147713	3.6	52.4
1850	421.8	267.0	154.7	147.9	38.9	109.0	55.9081374	3.6	52.3
1855	422.3	267.8	154.5	148.0	39.0	109.0	55.9015158	3.6	52.3
1860	422.8	268.5	154.3	148.1	39.1	109.0	55.8949063	3.6	52.3
1865	423.3	269.2	154.1	148.1	39.2	109.0	55.8883089	3.6	52.3
1870	423.8	269.9	153.9	148.2	39.3	108.9	55.8817237	3.6	52.3

1875	424.3	270.7	153.6	148.3	39.4	108.9	55.8751506	3.6	52.3
1880	424.8	271.4	153.4	148.4	39.5	108.9	55.8685895	3.6	52.2
1885	425.3	272.1	153.2	148.5	39.6	108.9	55.8620405	3.6	52.2
1890	425.8	272.8	153.0	148.5	39.7	108.9	55.8555034	3.6	52.2
1895	426.3	273.5	152.7	148.6	39.8	108.8	55.8489783	3.6	52.2
1900	426.8	274.3	152.5	148.7	39.9	108.8	55.8424651	3.7	52.2
1905	427.3	275.0	152.3	148.8	40.0	108.8	55.8359638	3.7	52.2
1910	427.8	275.7	152.1	148.9	40.1	108.8	55.8294743	3.7	52.2
1915	428.3	276.4	151.8	149.0	40.2	108.7	55.8229967	3.7	52.1
1920	428.8	277.2	151.6	149.0	40.3	108.7	55.8165309	3.7	52.1
1925	429.3	277.9	151.4	149.1	40.4	108.7	55.8100769	3.7	52.1
1930	429.7	278.6	151.2	149.2	40.5	108.7	55.8036346	3.7	52.1
1935	430.2	279.3	150.9	149.3	40.6	108.6	55.797204	3.7	52.1
1940	430.7	280.0	150.7	149.4	40.7	108.6	55.7907851	3.7	52.1
1945	431.2	280.8	150.5	149.4	40.8	108.6	55.7843778	3.7	52.0
1950	431.7	281.5	150.2	149.5	41.0	108.6	55.7779821	3.8	52.0
1955	432.2	282.2	150.0	149.6	41.1	108.5	55.771598	3.8	52.0
1960	432.7	282.9	149.8	149.7	41.2	108.5	55.7652255	3.8	52.0
1965	433.2	283.6	149.5	149.8	41.3	108.5	55.7588645	3.8	52.0
1970	433.7	284.4	149.3	149.8	41.4	108.5	55.7525149	3.8	52.0
1975	434.1	285.1	149.1	149.9	41.5	108.4	55.7461768	3.8	51.9
1980	434.6	285.8	148.8	150.0	41.6	108.4	55.7398502	3.8	51.9
1985	435.1	286.5	148.6	150.1	41.7	108.4	55.7335349	3.8	51.9
1990	435.6	287.3	148.3	150.2	41.8	108.4	55.727231	3.8	51.9
1995	436.1	288.0	148.1	150.2	41.9	108.3	55.7209384	3.8	51.9
2000	436.6	288.7	147.9	150.3	42.0	108.3	55.7146571	3.9	51.9
2005	437.0	289.4	147.6	150.4	42.1	108.3	55.708387	3.9	51.8

2010	437.5	290.1	147.4	150.5	42.2	108.3	55.7021282	3.9	51.8
2015	438.0	290.9	147.1	150.5	42.3	108.2	55.6958807	3.9	51.8
2020	438.5	291.6	146.9	150.6	42.4	108.2	55.6896442	3.9	51.8
2025	439.0	292.3	146.7	150.7	42.5	108.2	55.683419	3.9	51.8
2030	439.4	293.0	146.4	150.8	42.6	108.1	55.6772048	3.9	51.8
2035	439.9	293.8	146.2	150.9	42.7	108.1	55.6710017	3.9	51.8
2040	440.4	294.5	145.9	150.9	42.8	108.1	55.6648097	3.9	51.7
2045	440.9	295.2	145.7	151.0	42.9	108.1	55.6586286	3.9	51.7
2050	441.4	295.9	145.4	151.1	43.1	108.0	55.6524586	3.9	51.7
2055	441.8	296.6	145.2	151.2	43.2	108.0	55.6462995	4.0	51.7
2060	442.3	297.4	144.9	151.2	43.3	108.0	55.6401514	4.0	51.7
2065	442.8	298.1	144.7	151.3	43.4	107.9	55.6340141	4.0	51.7
2070	443.3	298.8	144.4	151.4	43.5	107.9	55.6278877	4.0	51.6
2075	443.7	299.5	144.2	151.5	43.6	107.9	55.6217722	4.0	51.6
2080	444.2	300.2	143.9	151.5	43.7	107.9	55.6156674	4.0	51.6
2085	444.7	301.0	143.7	151.6	43.8	107.8	55.6095734	4.0	51.6
2090	445.1	301.7	143.4	151.7	43.9	107.8	55.6034902	4.0	51.6
2095	445.6	302.4	143.2	151.8	44.0	107.8	55.5974176	4.0	51.6
2100	446.1	303.1	142.9	151.8	44.1	107.7	55.5913558	4.0	51.5
2105	446.5	303.9	142.7	151.9	44.2	107.7	55.5853046	4.1	51.5
2110	447.0	304.6	142.4	152.0	44.3	107.7	55.579264	4.1	51.5
2115	447.5	305.3	142.2	152.1	44.4	107.6	55.573234	4.1	51.5
2120	447.9	306.0	141.9	152.1	44.5	107.6	55.5672146	4.1	51.5
2125	448.4	306.7	141.7	152.2	44.6	107.6	55.5612057	4.1	51.5
2130	448.9	307.5	141.4	152.3	44.7	107.6	55.5552074	4.1	51.5
2135	449.3	308.2	141.2	152.4	44.8	107.5	55.5492194	4.1	51.4
2140	449.8	308.9	140.9	152.4	44.9	107.5	55.543242	4.1	51.4

2145	450.3	309.6	140.6	152.5	45.0	107.5	55.5372749	4.1	51.4
2150	450.7	310.4	140.4	152.6	45.2	107.4	55.5313182	4.1	51.4
2155	451.2	311.1	140.1	152.7	45.3	107.4	55.5253719	4.1	51.4
2160	451.7	311.8	139.9	152.7	45.4	107.4	55.5194359	4.2	51.4
2165	452.1	312.5	139.6	152.8	45.5	107.3	55.5135102	4.2	51.3
2170	452.6	313.2	139.3	152.9	45.6	107.3	55.5075948	4.2	51.3
2175	453.0	314.0	139.1	152.9	45.7	107.3	55.5016896	4.2	51.3
2180	453.5	314.7	138.8	153.0	45.8	107.2	55.4957946	4.2	51.3
2185	454.0	315.4	138.6	153.1	45.9	107.2	55.4899098	4.2	51.3
2190	454.4	316.1	138.3	153.2	46.0	107.2	55.4840351	4.2	51.3
2195	454.9	316.8	138.0	153.2	46.1	107.1	55.4781706	4.2	51.3
2200	455.3	317.6	137.8	153.3	46.2	107.1	55.4723162	4.2	51.2
2205	455.8	318.3	137.5	153.4	46.3	107.1	55.4664718	4.2	51.2
2210	456.2	319.0	137.2	153.5	46.4	107.0	55.4606374	4.3	51.2
2215	456.7	319.7	137.0	153.5	46.5	107.0	55.4548131	4.3	51.2
2220	457.2	320.5	136.7	153.6	46.6	107.0	55.4489987	4.3	51.2
2225	457.6	321.2	136.4	153.7	46.7	106.9	55.4431943	4.3	51.2
2230	458.1	321.9	136.2	153.7	46.8	106.9	55.4373998	4.3	51.1
2235	458.5	322.6	135.9	153.8	46.9	106.9	55.4316152	4.3	51.1
2240	459.0	323.3	135.6	153.9	47.0	106.8	55.4258405	4.3	51.1
2245	459.4	324.1	135.4	154.0	47.1	106.8	55.4200756	4.3	51.1
2250	459.9	324.8	135.1	154.0	47.3	106.8	55.4143205	4.3	51.1
2255	460.3	325.5	134.8	154.1	47.4	106.7	55.4085752	4.3	51.1
2260	460.8	326.2	134.5	154.2	47.5	106.7	55.4028396	4.4	51.1
2265	461.2	327.0	134.3	154.2	47.6	106.7	55.3971138	4.4	51.0
2270	461.7	327.7	134.0	154.3	47.7	106.6	55.3913976	4.4	51.0
2275	462.1	328.4	133.7	154.4	47.8	106.6	55.3856911	4.4	51.0

2280	462.6	329.1	133.5	154.5	47.9	106.6	55.3799943	4.4	51.0
2285	463.0	329.8	133.2	154.5	48.0	106.5	55.3743071	4.4	51.0
2290	463.5	330.6	132.9	154.6	48.1	106.5	55.3686294	4.4	51.0
2295	463.9	331.3	132.6	154.7	48.2	106.5	55.3629614	4.4	50.9
2300	464.4	332.0	132.4	154.7	48.3	106.4	55.3573028	4.4	50.9
2305	464.8	332.7	132.1	154.8	48.4	106.4	55.3516538	4.4	50.9
2310	465.2	333.4	131.8	154.9	48.5	106.4	55.3460142	4.4	50.9
2315	465.7	334.2	131.5	154.9	48.6	106.3	55.3403841	4.5	50.9
2320	466.1	334.9	131.2	155.0	48.7	106.3	55.3347634	4.5	50.9
2325	466.6	335.6	131.0	155.1	48.8	106.2	55.3291521	4.5	50.9
2330	467.0	336.3	130.7	155.1	48.9	106.2	55.3235502	4.5	50.8
2335	467.5	337.1	130.4	155.2	49.0	106.2	55.3179576	4.5	50.8
2340	467.9	337.8	130.1	155.3	49.1	106.1	55.3123744	4.5	50.8
2345	468.3	338.5	129.8	155.4	49.2	106.1	55.3068004	4.5	50.8
2350	468.8	339.2	129.6	155.4	49.4	106.1	55.3012357	4.5	50.8
2355	469.2	339.9	129.3	155.5	49.5	106.0	55.2956802	4.5	50.8
2360	469.7	340.7	129.0	155.6	49.6	106.0	55.2901339	4.5	50.7
2365	470.1	341.4	128.7	155.6	49.7	106.0	55.2845968	4.6	50.7
2370	470.5	342.1	128.4	155.7	49.8	105.9	55.2790689	4.6	50.7
2375	471.0	342.8	128.2	155.8	49.9	105.9	55.2735501	4.6	50.7
2380	471.4	343.6	127.9	155.8	50.0	105.8	55.2680404	4.6	50.7
2385	471.9	344.3	127.6	155.9	50.1	105.8	55.2625398	4.6	50.7
2390	472.3	345.0	127.3	156.0	50.2	105.8	55.2570483	4.6	50.7
2395	472.7	345.7	127.0	156.0	50.3	105.7	55.2515658	4.6	50.6
2400	473.2	346.4	126.7	156.1	50.4	105.7	55.2460922	4.6	50.6
2405	473.6	347.2	126.4	156.2	50.5	105.7	55.2406277	4.6	50.6
2410	474.0	347.9	126.1	156.2	50.6	105.6	55.2351721	4.6	50.6

2415	474.5	348.6	125.9	156.3	50.7	105.6	55.2297254	4.6	50.6
2420	474.9	349.3	125.6	156.4	50.8	105.5	55.2242877	4.7	50.6
2425	475.3	350.1	125.3	156.4	50.9	105.5	55.2188588	4.7	50.6
2430	475.8	350.8	125.0	156.5	51.0	105.5	55.2134387	4.7	50.5
2435	476.2	351.5	124.7	156.6	51.1	105.4	55.2080275	4.7	50.5
2440	476.6	352.2	124.4	156.6	51.2	105.4	55.2026251	4.7	50.5
2445	477.1	352.9	124.1	156.7	51.3	105.4	55.1972315	4.7	50.5
2450	477.5	353.7	123.8	156.8	51.5	105.3	55.1918466	4.7	50.5
2455	477.9	354.4	123.5	156.8	51.6	105.3	55.1864704	4.7	50.5
2460	478.3	355.1	123.2	156.9	51.7	105.2	55.1811103	4.7	50.4
2465	478.8	355.8	123.0	157.0	51.8	105.2	55.1757442	4.7	50.4
2470	479.2	356.5	122.7	157.0	51.9	105.2	55.1703941	4.8	50.4
2475	479.6	357.3	122.4	157.1	52.0	105.1	55.1650526	4.8	50.4
2480	480.1	358.0	122.1	157.2	52.1	105.1	55.1597197	4.8	50.4
2485	480.5	358.7	121.8	157.2	52.2	105.0	55.1543953	4.8	50.4
2490	480.9	359.4	121.5	157.3	52.3	105.0	55.1490796	4.8	50.4
2495	481.3	360.2	121.2	157.4	52.4	105.0	55.1437724	4.8	50.3
2500	481.8	360.9	120.9	157.4	52.5	104.9	55.1384736	4.8	50.3
2505	482.2	361.6	120.6	157.5	52.6	104.9	55.1331834	4.8	50.3
2510	482.6	362.3	120.3	157.6	52.7	104.8	55.1279016	4.8	50.3
2515	483.0	363.0	120.0	157.6	52.8	104.8	55.1226283	4.8	50.3
2520	483.5	363.8	119.7	157.7	52.9	104.8	55.1173633	4.9	50.3
2525	483.9	364.5	119.4	157.7	53.0	104.7	55.1121068	4.9	50.3
2530	484.3	365.2	119.1	157.8	53.1	104.7	55.1068586	4.9	50.2
2535	484.7	365.9	118.8	157.9	53.2	104.6	55.1016187	4.9	50.2
2540	485.2	366.7	118.5	157.9	53.3	104.6	55.0963872	4.9	50.2
2545	485.6	367.4	118.2	158.0	53.4	104.6	55.0911164	4.9	50.2

2550	486.0	368.1	117.9	158.1	53.6	104.5	55.085949	4.9	50.2
2555	486.4	368.8	117.6	158.1	53.7	104.5	55.0807423	4.9	50.2
2560	486.8	369.5	117.3	158.2	53.8	104.4	55.0755438	4.9	50.1
2565	487.3	370.3	117.0	158.3	53.9	104.4	55.0703535	4.9	50.1
2570	487.7	371.0	116.7	158.3	54.0	104.4	55.0651714	4.9	50.1
2575	488.1	371.7	116.4	158.4	54.1	104.3	55.0599975	5.0	50.1
2580	488.5	372.4	116.1	158.5	54.2	104.3	55.0548317	5.0	50.1
2585	488.9	373.1	115.8	158.5	54.3	104.2	55.049674	5.0	50.1
2590	489.3	373.9	115.5	158.6	54.4	104.2	55.0445243	5.0	50.1
2595	489.8	374.6	115.2	158.6	54.5	104.1	55.0393828	5.0	50.0
2600	490.2	375.3	114.9	158.7	54.6	104.1	55.0342493	5.0	50.0
2605	490.6	376.0	114.6	158.8	54.7	104.1	55.0291238	5.0	50.0
2610	491.0	376.8	114.3	158.8	54.8	104.0	55.0240063	5.0	50.0
2615	491.4	377.5	113.9	158.9	54.9	104.0	55.0188968	5.0	50.0
2620	491.8	378.2	113.6	159.0	55.0	103.9	55.0137952	5.0	50.0
2625	492.2	378.9	113.3	159.0	55.1	103.9	55.0087016	5.1	50.0
2630	492.7	379.6	113.0	159.1	55.2	103.8	55.0036159	5.1	49.9
2635	493.1	380.4	112.7	159.1	55.3	103.8	54.9985381	5.1	49.9
2640	493.5	381.1	112.4	159.2	55.4	103.8	54.9934681	5.1	49.9
2645	493.9	381.8	112.1	159.3	55.5	103.7	54.988406	5.1	49.9
2650	494.3	382.5	111.8	159.3	55.7	103.7	54.9833517	5.1	49.9
2655	494.7	383.3	111.5	159.4	55.8	103.6	54.9783052	5.1	49.9
2660	495.1	384.0	111.2	159.5	55.9	103.6	54.9732665	5.1	49.9
2665	495.5	384.7	110.8	159.5	56.0	103.5	54.9682355	5.1	49.8
2670	496.0	385.4	110.5	159.6	56.1	103.5	54.9632123	5.1	49.8
2675	496.4	386.1	110.2	159.6	56.2	103.5	54.9581968	5.1	49.8
2680	496.8	386.9	109.9	159.7	56.3	103.4	54.953189	5.2	49.8

2685	497.2	387.6	109.6	159.8	56.4	103.4	54.9481888	5.2	49.8
2690	497.6	388.3	109.3	159.8	56.5	103.3	54.9431964	5.2	49.8
2695	498.0	389.0	109.0	159.9	56.6	103.3	54.9382115	5.2	49.7
2700	498.4	389.7	108.7	159.9	56.7	103.2	54.9332343	5.2	49.7
2705	498.8	390.5	108.3	160.0	56.8	103.2	54.9282646	5.2	49.7
2710	499.2	391.2	108.0	160.1	56.9	103.2	54.9233025	5.2	49.7
2715	499.6	391.9	107.7	160.1	57.0	103.1	54.918348	5.2	49.7
2720	500.0	392.6	107.4	160.2	57.1	103.1	54.913401	5.2	49.7
2725	500.4	393.4	107.1	160.3	57.2	103.0	54.9084615	5.2	49.7
2730	500.8	394.1	106.8	160.3	57.3	103.0	54.9035294	5.3	49.6
2735	501.2	394.8	106.4	160.4	57.4	102.9	54.8986049	5.3	49.6
2740	501.6	395.5	106.1	160.4	57.5	102.9	54.8936878	5.3	49.6
2745	502.0	396.2	105.8	160.5	57.7	102.8	54.8887781	5.3	49.6
2750	502.5	397.0	105.5	160.6	57.8	102.8	54.8838758	5.3	49.6
2755	502.9	397.7	105.2	160.6	57.9	102.8	54.8789809	5.3	49.6
2760	503.3	398.4	104.9	160.7	58.0	102.7	54.8740934	5.3	49.6
2765	503.7	399.1	104.5	160.7	58.1	102.7	54.8692132	5.3	49.5
2770	504.1	399.9	104.2	160.8	58.2	102.6	54.8643404	5.3	49.5
2775	504.5	400.6	103.9	160.9	58.3	102.6	54.8594748	5.3	49.5
2780	504.9	401.3	103.6	160.9	58.4	102.5	54.8546165	5.4	49.5
2785	505.3	402.0	103.2	161.0	58.5	102.5	54.8497655	5.4	49.5
2790	505.7	402.7	102.9	161.0	58.6	102.4	54.8449218	5.4	49.5
2795	506.1	403.5	102.6	161.1	58.7	102.4	54.8400852	5.4	49.5
2800	506.5	404.2	102.3	161.2	58.8	102.3	54.8352559	5.4	49.4
2805	506.9	404.9	102.0	161.2	58.9	102.3	54.8304338	5.4	49.4
2810	507.3	405.6	101.6	161.3	59.0	102.3	54.8256188	5.4	49.4
2815	507.7	406.3	101.3	161.3	59.1	102.2	54.820811	5.4	49.4

2820	508.1	407.1	101.0	161.4	59.2	102.2	54.8160103	5.4	49.4
2825	508.5	407.8	100.7	161.4	59.3	102.1	54.8112167	5.4	49.4
2830	508.8	408.5	100.3	161.5	59.4	102.1	54.8064302	5.4	49.4
2835	509.2	409.2	100.0	161.6	59.5	102.0	54.8016508	5.5	49.3
2840	509.6	410.0	99.7	161.6	59.6	102.0	54.7968784	5.5	49.3
2845	510.0	410.7	99.4	161.7	59.8	101.9	54.7921131	5.5	49.3
2850	510.4	411.4	99.0	161.7	59.9	101.9	54.7873547	5.5	49.3
2855	510.8	412.1	98.7	161.8	60.0	101.8	54.7826034	5.5	49.3
2860	511.2	412.8	98.4	161.9	60.1	101.8	54.7778591	5.5	49.3
2865	511.6	413.6	98.0	161.9	60.2	101.7	54.7731217	5.5	49.3
2870	512.0	414.3	97.7	162.0	60.3	101.7	54.7683912	5.5	49.2
2875	512.4	415.0	97.4	162.0	60.4	101.7	54.7636677	5.5	49.2
2880	512.8	415.7	97.1	162.1	60.5	101.6	54.7589511	5.5	49.2
2885	513.2	416.5	96.7	162.1	60.6	101.6	54.7542413	5.6	49.2
2890	513.6	417.2	96.4	162.2	60.7	101.5	54.7495385	5.6	49.2
2895	514.0	417.9	96.1	162.3	60.8	101.5	54.7448424	5.6	49.2
2900	514.4	418.6	95.7	162.3	60.9	101.4	54.7401532	5.6	49.2
2905	514.8	419.3	95.4	162.4	61.0	101.4	54.7354709	5.6	49.1
2910	515.1	420.1	95.1	162.4	61.1	101.3	54.7307953	5.6	49.1
2915	515.5	420.8	94.7	162.5	61.2	101.3	54.7261265	5.6	49.1
2920	515.9	421.5	94.4	162.6	61.3	101.2	54.7214644	5.6	49.1
2925	516.3	422.2	94.1	162.6	61.4	101.2	54.7168091	5.6	49.1
2930	516.7	422.9	93.8	162.7	61.5	101.1	54.7121605	5.6	49.1
2935	517.1	423.7	93.4	162.7	61.6	101.1	54.7075186	5.7	49.1
2940	517.5	424.4	93.1	162.8	61.7	101.0	54.7028834	5.7	49.0
2945	517.9	425.1	92.8	162.8	61.9	101.0	54.6982549	5.7	49.0
2950	518.3	425.8	92.4	162.9	62.0	100.9	54.693633	5.7	49.0

2955	518.6	426.6	92.1	163.0	62.1	100.9	54.6890178	5.7	49.0
2960	519.0	427.3	91.7	163.0	62.2	100.8	54.6844091	5.7	49.0
2965	519.4	428.0	91.4	163.1	62.3	100.8	54.6798071	5.7	49.0
2970	519.8	428.7	91.1	163.1	62.4	100.7	54.6752117	5.7	49.0
2975	520.2	429.4	90.7	163.2	62.5	100.7	54.6706228	5.7	48.9
2980	520.6	430.2	90.4	163.2	62.6	100.7	54.6660404	5.7	48.9
2985	521.0	430.9	90.1	163.3	62.7	100.6	54.6614646	5.7	48.9
2990	521.3	431.6	89.7	163.3	62.8	100.6	54.6568954	5.8	48.9
2995	521.7	432.3	89.4	163.4	62.9	100.5	54.6523326	5.8	48.9
3000	522.1	433.1	89.1	163.5	63.0	100.5	54.6477762	5.8	48.9
3005	522.5	433.8	88.7	163.5	63.1	100.4	54.6432264	5.8	48.9
3010	522.9	434.5	88.4	163.6	63.2	100.4	54.638683	5.8	48.8
3015	523.3	435.2	88.0	163.6	63.3	100.3	54.634146	5.8	48.8
3020	523.6	435.9	87.7	163.7	63.4	100.3	54.6296155	5.8	48.8
3025	524.0	436.7	87.4	163.7	63.5	100.2	54.6250913	5.8	48.8
3030	524.4	437.4	87.0	163.8	63.6	100.2	54.6205735	5.8	48.8
3035	524.8	438.1	86.7	163.9	63.7	100.1	54.6160621	5.8	48.8
3040	525.2	438.8	86.3	163.9	63.8	100.1	54.611557	5.9	48.8
3045	525.5	439.5	86.0	164.0	64.0	100.0	54.6070582	5.9	48.7
3050	525.9	440.3	85.7	164.0	64.1	100.0	54.6025658	5.9	48.7
3055	526.3	441.0	85.3	164.1	64.2	99.9	54.5980797	5.9	48.7
3060	526.7	441.7	85.0	164.1	64.3	99.9	54.5935998	5.9	48.7
3065	527.1	442.4	84.6	164.2	64.4	99.8	54.5891262	5.9	48.7
3070	527.4	443.2	84.3	164.2	64.5	99.8	54.5846589	5.9	48.7
3075	527.8	443.9	83.9	164.3	64.6	99.7	54.5801978	5.9	48.7
3080	528.2	444.6	83.6	164.3	64.7	99.7	54.5757429	5.9	48.6
3085	528.6	445.3	83.3	164.4	64.8	99.6	54.5712942	5.9	48.6

3090	529.0	446.0	82.9	164.5	64.9	99.6	54.5668516	5.9	48.6
3095	529.3	446.8	82.6	164.5	65.0	99.5	54.5624153	6.0	48.6
3100	529.7	447.5	82.2	164.6	65.1	99.5	54.5579851	6.0	48.6
3105	530.1	448.2	81.9	164.6	65.2	99.4	54.5535611	6.0	48.6
3110	530.5	448.9	81.5	164.7	65.3	99.4	54.5491431	6.0	48.6
3115	530.8	449.7	81.2	164.7	65.4	99.3	54.5447313	6.0	48.5
3120	531.2	450.4	80.8	164.8	65.5	99.3	54.5403256	6.0	48.5
3125	531.6	451.1	80.5	164.8	65.6	99.2	54.5359259	6.0	48.5
3130	532.0	451.8	80.1	164.9	65.7	99.2	54.5315323	6.0	48.5
3135	532.3	452.5	79.8	164.9	65.8	99.1	54.5271447	6.0	48.5
3140	532.7	453.3	79.4	165.0	65.9	99.1	54.5227632	6.0	48.5
3145	533.1	454.0	79.1	165.1	66.1	99.0	54.5183877	6.1	48.5
3150	533.5	454.7	78.8	165.1	66.2	99.0	54.5140182	6.1	48.4
3155	533.8	455.4	78.4	165.2	66.3	98.9	54.5096546	6.1	48.4
3160	534.2	456.1	78.1	165.2	66.4	98.9	54.5052971	6.1	48.4
3165	534.6	456.9	77.7	165.3	66.5	98.8	54.5009454	6.1	48.4
3170	534.9	457.6	77.4	165.3	66.6	98.8	54.4965998	6.1	48.4
3175	535.3	458.3	77.0	165.4	66.7	98.7	54.49226	6.1	48.4
3180	535.7	459.0	76.7	165.4	66.8	98.6	54.4879261	6.1	48.4
3185	536.1	459.8	76.3	165.5	66.9	98.6	54.4835982	6.1	48.4
3190	536.4	460.5	76.0	165.5	67.0	98.5	54.4792761	6.1	48.3
3195	536.8	461.2	75.6	165.6	67.1	98.5	54.4749599	6.2	48.3
3200	537.2	461.9	75.3	165.6	67.2	98.4	54.4706495	6.2	48.3
3205	537.5	462.6	74.9	165.7	67.3	98.4	54.466345	6.2	48.3
3210	537.9	463.4	74.5	165.8	67.4	98.3	54.4620463	6.2	48.3
3215	538.3	464.1	74.2	165.8	67.5	98.3	54.4577533	6.2	48.3
3220	538.6	464.8	73.8	165.9	67.6	98.2	54.4534662	6.2	48.3

3225	539.0	465.5	73.5	165.9	67.7	98.2	54.4491849	6.2	48.2
3230	539.4	466.3	73.1	166.0	67.8	98.1	54.4449093	6.2	48.2
3235	539.8	467.0	72.8	166.0	67.9	98.1	54.4406394	6.2	48.2
3240	540.1	467.7	72.4	166.1	68.0	98.0	54.4363753	6.2	48.2
3245	540.5	468.4	72.1	166.1	68.2	98.0	54.4321169	6.2	48.2
3250	540.9	469.1	71.7	166.2	68.3	97.9	54.4278642	6.3	48.2
3255	541.2	469.9	71.4	166.2	68.4	97.9	54.4236172	6.3	48.2
3260	541.6	470.6	71.0	166.3	68.5	97.8	54.4193759	6.3	48.1
3265	542.0	471.3	70.6	166.3	68.6	97.8	54.4151403	6.3	48.1
3270	542.3	472.0	70.3	166.4	68.7	97.7	54.4109102	6.3	48.1
3275	542.7	472.7	69.9	166.4	68.8	97.7	54.4066859	6.3	48.1
3280	543.0	473.5	69.6	166.5	68.9	97.6	54.4024671	6.3	48.1
3285	543.4	474.2	69.2	166.5	69.0	97.6	54.3982539	6.3	48.1
3290	543.8	474.9	68.9	166.6	69.1	97.5	54.3940464	6.3	48.1
3295	544.1	475.6	68.5	166.6	69.2	97.4	54.3898444	6.3	48.0
3300	544.5	476.4	68.1	166.7	69.3	97.4	54.3856479	6.4	48.0
3305	544.9	477.1	67.8	166.8	69.4	97.3	54.3814571	6.4	48.0
3310	545.2	477.8	67.4	166.8	69.5	97.3	54.3772717	6.4	48.0
3315	545.6	478.5	67.1	166.9	69.6	97.2	54.3730919	6.4	48.0
3320	546.0	479.2	66.7	166.9	69.7	97.2	54.3689176	6.4	48.0
3325	546.3	480.0	66.4	167.0	69.8	97.1	54.3647488	6.4	48.0
3330	546.7	480.7	66.0	167.0	69.9	97.1	54.3605855	6.4	47.9
3335	547.0	481.4	65.6	167.1	70.0	97.0	54.3564276	6.4	47.9
3340	547.4	482.1	65.3	167.1	70.1	97.0	54.3522752	6.4	47.9
3345	547.8	482.9	64.9	167.2	70.3	96.9	54.3481282	6.4	47.9
3350	548.1	483.6	64.6	167.2	70.4	96.9	54.3439867	6.4	47.9
3355	548.5	484.3	64.2	167.3	70.5	96.8	54.3398506	6.5	47.9

3360	548.8	485.0	63.8	167.3	70.6	96.8	54.3357198	6.5	47.9
3365	549.2	485.7	63.5	167.4	70.7	96.7	54.3315945	6.5	47.9
3370	549.6	486.5	63.1	167.4	70.8	96.6	54.3274746	6.5	47.8
3375	549.9	487.2	62.7	167.5	70.9	96.6	54.32336	6.5	47.8
3380	550.3	487.9	62.4	167.5	71.0	96.5	54.3192507	6.5	47.8
3385	550.6	488.6	62.0	167.6	71.1	96.5	54.3151468	6.5	47.8
3390	551.0	489.3	61.7	167.6	71.2	96.4	54.3110483	6.5	47.8
3395	551.4	490.1	61.3	167.7	71.3	96.4	54.306955	6.5	47.8
3400	551.7	490.8	60.9	167.7	71.4	96.3	54.302867	6.5	47.8
3405	552.1	491.5	60.6	167.8	71.5	96.3	54.2987843	6.6	47.7
3410	552.4	492.2	60.2	167.8	71.6	96.2	54.2947069	6.6	47.7
3415	552.8	493.0	59.8	167.9	71.7	96.2	54.2906348	6.6	47.7
3420	553.1	493.7	59.5	167.9	71.8	96.1	54.2865679	6.6	47.7
3425	553.5	494.4	59.1	168.0	71.9	96.0	54.2825062	6.6	47.7
3430	553.9	495.1	58.7	168.0	72.0	96.0	54.2784497	6.6	47.7
3435	554.2	495.8	58.4	168.1	72.1	95.9	54.2743985	6.6	47.7
3440	554.6	496.6	58.0	168.1	72.2	95.9	54.2703525	6.6	47.6
3445	554.9	497.3	57.6	168.2	72.4	95.8	54.2663116	6.6	47.6
3450	555.3	498.0	57.3	168.2	72.5	95.8	54.2622759	6.6	47.6
3455	555.6	498.7	56.9	168.3	72.6	95.7	54.2582454	6.7	47.6
3460	556.0	499.5	56.5	168.3	72.7	95.7	54.25422	6.7	47.6
3465	556.3	500.2	56.2	168.4	72.8	95.6	54.2501998	6.7	47.6
3470	556.7	500.9	55.8	168.4	72.9	95.6	54.2461847	6.7	47.6
3475	557.0	501.6	55.4	168.5	73.0	95.5	54.2421746	6.7	47.6
3480	557.4	502.3	55.1	168.5	73.1	95.4	54.2381697	6.7	47.5
3485	557.8	503.1	54.7	168.6	73.2	95.4	54.2341699	6.7	47.5
3490	558.1	503.8	54.3	168.6	73.3	95.3	54.2301752	6.7	47.5

3495	558.5	504.5	54.0	168.7	73.4	95.3	54.2261855	6.7	47.5
3500	558.8	505.2	53.6	168.7	73.5	95.2	54.2222008	6.7	47.5
3505	559.2	505.9	53.2	168.8	73.6	95.2	54.2182212	6.7	47.5
3510	559.5	506.7	52.8	168.8	73.7	95.1	54.2142467	6.8	47.5
3515	559.9	507.4	52.5	168.9	73.8	95.1	54.2102771	6.8	47.4
3520	560.2	508.1	52.1	168.9	73.9	95.0	54.2063126	6.8	47.4
3525	560.6	508.8	51.7	169.0	74.0	94.9	54.202353	6.8	47.4
3530	560.9	509.6	51.4	169.0	74.1	94.9	54.1983984	6.8	47.4
3535	561.3	510.3	51.0	169.1	74.2	94.8	54.1944488	6.8	47.4
3540	561.6	511.0	50.6	169.1	74.3	94.8	54.1905041	6.8	47.4
3545	562.0	511.7	50.2	169.2	74.5	94.7	54.1865644	6.8	47.4
3550	562.3	512.4	49.9	169.2	74.6	94.7	54.1826296	6.8	47.3
3555	562.7	513.2	49.5	169.3	74.7	94.6	54.1786997	6.8	47.3
3560	563.0	513.9	49.1	169.3	74.8	94.6	54.1747748	6.9	47.3
3565	563.4	514.6	48.7	169.4	74.9	94.5	54.1708547	6.9	47.3
3570	563.7	515.3	48.4	169.4	75.0	94.4	54.1669395	6.9	47.3
3575	564.1	516.1	48.0	169.5	75.1	94.4	54.1630292	6.9	47.3
3580	564.4	516.8	47.6	169.5	75.2	94.3	54.1591238	6.9	47.3
3585	564.7	517.5	47.3	169.6	75.3	94.3	54.1552232	6.9	47.3
3590	565.1	518.2	46.9	169.6	75.4	94.2	54.1513275	6.9	47.2
3595	565.4	518.9	46.5	169.7	75.5	94.2	54.1474366	6.9	47.2
3600	565.8	519.7	46.1	169.7	75.6	94.1	54.1435505	6.9	47.2
3605	566.1	520.4	45.8	169.8	75.7	94.0	54.1396692	6.9	47.2
3610	566.5	521.1	45.4	169.8	75.8	94.0	54.1357927	7.0	47.2
3615	566.8	521.8	45.0	169.9	75.9	93.9	54.131921	7.0	47.2
3620	567.2	522.5	44.6	169.9	76.0	93.9	54.128054	7.0	47.2
3625	567.5	523.3	44.2	169.9	76.1	93.8	54.1241919	7.0	47.1

3630	567.9	524.0	43.9	170.0	76.2	93.8	54.1203344	7.0	47.1
3635	568.2	524.7	43.5	170.0	76.3	93.7	54.1164818	7.0	47.1
3640	568.5	525.4	43.1	170.1	76.4	93.6	54.1126338	7.0	47.1
3645	568.9	526.2	42.7	170.1	76.6	93.6	54.1087906	7.0	47.1
3650	569.2	526.9	42.4	170.2	76.7	93.5	54.104952	7.0	47.1
3655	569.6	527.6	42.0	170.2	76.8	93.5	54.1011182	7.0	47.1
3660	569.9	528.3	41.6	170.3	76.9	93.4	54.0972891	7.0	47.1
3665	570.3	529.0	41.2	170.3	77.0	93.4	54.0934646	7.1	47.0
3670	570.6	529.8	40.8	170.4	77.1	93.3	54.0896448	7.1	47.0
3675	571.0	530.5	40.5	170.4	77.2	93.2	54.0858297	7.1	47.0
3680	571.3	531.2	40.1	170.5	77.3	93.2	54.0820191	7.1	47.0
3685	571.6	531.9	39.7	170.5	77.4	93.1	54.0782133	7.1	47.0
3690	572.0	532.7	39.3	170.6	77.5	93.1	54.074412	7.1	47.0
3695	572.3	533.4	38.9	170.6	77.6	93.0	54.0706154	7.1	47.0
3700	572.7	534.1	38.6	170.7	77.7	93.0	54.0668233	7.1	46.9
3705	573.0	534.8	38.2	170.7	77.8	92.9	54.0630359	7.1	46.9
3710	573.3	535.5	37.8	170.8	77.9	92.8	54.059253	7.1	46.9
3715	573.7	536.3	37.4	170.8	78.0	92.8	54.0554747	7.2	46.9
3720	574.0	537.0	37.0	170.9	78.1	92.7	54.051701	7.2	46.9
3725	574.4	537.7	36.7	170.9	78.2	92.7	54.0479318	7.2	46.9
3730	574.7	538.4	36.3	170.9	78.3	92.6	54.0441671	7.2	46.9
3735	575.0	539.1	35.9	171.0	78.4	92.6	54.040407	7.2	46.8
3740	575.4	539.9	35.5	171.0	78.5	92.5	54.0366514	7.2	46.8
3745	575.7	540.6	35.1	171.1	78.7	92.4	54.0329003	7.2	46.8
3750	576.1	541.3	34.7	171.1	78.8	92.4	54.0291537	7.2	46.8
3755	576.4	542.0	34.4	171.2	78.9	92.3	54.0254116	7.2	46.8
3760	576.7	542.8	34.0	171.2	79.0	92.3	54.0216739	7.2	46.8

3765	577.1	543.5	33.6	171.3	79.1	92.2	54.0179408	7.2	46.8
3770	577.4	544.2	33.2	171.3	79.2	92.1	54.014212	7.3	46.8
3775	577.7	544.9	32.8	171.4	79.3	92.1	54.0104878	7.3	46.7
3780	578.1	545.6	32.4	171.4	79.4	92.0	54.0067679	7.3	46.7
3785	578.4	546.4	32.0	171.5	79.5	92.0	54.0030525	7.3	46.7
3790	578.8	547.1	31.7	171.5	79.6	91.9	53.9993415	7.3	46.7
3795	579.1	547.8	31.3	171.6	79.7	91.9	53.995635	7.3	46.7
3800	579.4	548.5	30.9	171.6	79.8	91.8	53.9919328	7.3	46.7
3805	579.8	549.3	30.5	171.6	79.9	91.7	53.988235	7.3	46.7
3810	580.1	550.0	30.1	171.7	80.0	91.7	53.9845416	7.3	46.6
3815	580.4	550.7	29.7	171.7	80.1	91.6	53.9808525	7.3	46.6
3820	580.8	551.4	29.3	171.8	80.2	91.6	53.9771678	7.4	46.6
3825	581.1	552.1	29.0	171.8	80.3	91.5	53.9734875	7.4	46.6
3830	581.4	552.9	28.6	171.9	80.4	91.4	53.9698115	7.4	46.6
3835	581.8	553.6	28.2	171.9	80.5	91.4	53.9661398	7.4	46.6
3840	582.1	554.3	27.8	172.0	80.6	91.3	53.9624724	7.4	46.6
3845	582.4	555.0	27.4	172.0	80.8	91.3	53.9588094	7.4	46.6
3850	582.8	555.7	27.0	172.1	80.9	91.2	53.9551506	7.4	46.5
3855	583.1	556.5	26.6	172.1	81.0	91.1	53.9514962	7.4	46.5
3860	583.4	557.2	26.2	172.2	81.1	91.1	53.947846	7.4	46.5
3865	583.8	557.9	25.9	172.2	81.2	91.0	53.9442001	7.4	46.5
3870	584.1	558.6	25.5	172.2	81.3	91.0	53.9405584	7.5	46.5
3875	584.4	559.4	25.1	172.3	81.4	90.9	53.9369211	7.5	46.5
3880	584.8	560.1	24.7	172.3	81.5	90.8	53.9332879	7.5	46.5
3885	585.1	560.8	24.3	172.4	81.6	90.8	53.929659	7.5	46.5
3890	585.4	561.5	23.9	172.4	81.7	90.7	53.9260343	7.5	46.4
3895	585.8	562.2	23.5	172.5	81.8	90.7	53.9224138	7.5	46.4

3900	586.1	563.0	23.1	172.5	81.9	90.6	53.9187976	7.5	46.4
3905	586.4	563.7	22.7	172.6	82.0	90.5	53.9151855	7.5	46.4
3910	586.8	564.4	22.3	172.6	82.1	90.5	53.9115776	7.5	46.4
3915	587.1	565.1	22.0	172.7	82.2	90.4	53.9079739	7.5	46.4
3920	587.4	565.9	21.6	172.7	82.3	90.4	53.9043744	7.5	46.4
3925	587.7	566.6	21.2	172.7	82.4	90.3	53.900779	7.6	46.3
3930	588.1	567.3	20.8	172.8	82.5	90.3	53.8971878	7.6	46.3
3935	588.4	568.0	20.4	172.8	82.6	90.2	53.8936007	7.6	46.3
3940	588.7	568.7	20.0	172.9	82.7	90.1	53.8900177	7.6	46.3

**ANEXO 15. VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD EN FUNCION DE LA DURACIÓN DEL EVENTO METODOLOGÍA BÁSICA PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN ANALISIS PLANO (Woods-Ballard *et al.*, 2007).**

<b>Duración (min)</b>	<b>i Cartagena</b>	<b>h Cartagena</b>	<b>i Medellín</b>	<b>h Medellín</b>	<b>i Bogotá</b>	<b>h Bogotá</b>
5	204.3980983	-0.767866918	178.9344351	0.473366642	129.06	0.21
10	173.9346948	-0.58212084	149.7475536	0.788427692	111.4131312	0.36
15	153.4686604	-0.450711969	129.4711787	1.017677175	97.91816007	0.48
20	138.5476051	-0.350094514	114.4852571	1.194339785	87.27391885	0.57
25	127.0696619	-0.268999541	102.913415	1.336014571	78.66911161	0.64
30	117.8985305	-0.201252932	93.68116373	1.452994139	71.5727081	0.70
35	110.3600343	-0.143143249	86.12669847	1.551749532	65.62274309	0.74
40	104.0259941	-0.09228278	79.81902836	1.63658033	60.56411288	0.78
45	98.6099136	-0.04705354	74.46482363	1.710470789	56.21192261	0.82
50	93.91202293	-0.006313161	69.85717267	1.775566804	52.42893358	0.84
55	89.78828037	0.030772243	65.84573155	1.833457237	49.11116866	0.87
60	86.1319038	0.064828408	62.31849763	1.885347806	46.17843152	0.89
65	82.86186012	0.096335906	59.19023352	1.932172868	43.56788957	0.91
70	79.91541598	0.125671209	56.39486486	1.974669711	41.22962579	0.92
75	77.24315954	0.153134334	53.8803416	2.01342936	39.12348939	0.94
80	74.80558082	0.178967959	51.60507648	2.048932208	37.21682395	0.950799724
85	72.5706653	0.203370981	49.53542153	2.081573542	35.48280068	0.9616896
90	70.51216462	0.226508325	47.64384492	2.111682205	33.89917684	0.971326753
95	68.60833032	0.248518172	45.90759063	2.139534463	32.44735825	0.979872387
100	66.84097107	0.269517384	44.30767755	2.165364476	31.11168236	0.987461782

105	65.19474015	0.28960563	42.82814148	2.18937232	29.87886371	0.994209258
110	63.65658967	0.308868568	41.45545371	2.211730198	28.73756052	1.000212043
115	62.2153473	0.32738033	40.1780697	2.232587325	27.67803261	1.005553321
120	60.86138433	0.345205482	38.98607516	2.252073785	26.69186901	1.01030465
125	59.58635271	0.362400591	37.87090561	2.270303633	25.77176925	1.014527907
130	58.38297469	0.379015483	36.82512225	2.28737739	24.91136637	1.01827685
135	57.24487322	0.395094267	35.84223131	2.30338408	24.10508269	1.021598391
140	56.16643391	0.410676171	34.9165373	2.318402901	23.34801149	1.024533643
145	55.14269205	0.425796233	34.04302289	2.332504603	22.63581932	1.027118773
150	54.1692393	0.440485875	33.21725003	2.345752636	21.96466486	1.029385719
155	53.24214629	0.454773381	32.43527794	2.358204116	21.33113113	1.031362779
160	52.35789794	0.4686843	31.69359472	2.369910629	20.73216866	1.033075108
165	51.5133391	0.482241787	30.98906008	2.380918918	20.16504747	1.034545139
170	50.70562868	0.495466892	30.31885694	2.391271467	19.62731643	1.035792935
175	49.9322007	0.508378807	29.68045056	2.401006999	19.11676858	1.036836487
180	49.19073106	0.520995078	29.07155372	2.410160905	18.63141161	1.037691973
185	48.47910909	0.53333179	28.49009691	2.41876561	18.16944241	1.038373976
190	47.79541309	0.54540372	27.93420281	2.426850898	17.72922517	1.038895674
195	47.13788918	0.55722448	27.40216429	2.434444187	17.30927253	1.039269
200	46.50493297	0.568806633	26.89242537	2.44157077	16.90822908	1.039504785
205	45.89507365	0.580161802	26.40356467	2.448254033	16.52485716	1.03961288
210	45.30696002	0.591300758	25.93428108	2.454515637	16.15802431	1.03960226
215	44.73934838	0.602233501	25.48338115	2.460375684	15.8066924	1.03948112
220	44.19109176	0.612969338	25.04976806	2.465852865	15.46990801	1.039256956
225	43.66113048	0.623516938	24.63243198	2.470964585	15.14679399	1.038936636
230	43.14848389	0.633884394	24.23044151	2.475727079	14.83654203	1.038526462

235	42.6522429	0.644079274	23.84293617	2.480155516	14.53840599	1.038032228
240	42.17156346	0.654108662	23.46911965	2.484264089	14.25169614	1.037459266
245	41.70566072	0.6639792	23.10825394	2.488066096	13.97577384	1.036812496
250	41.25380381	0.673697126	22.75965401	2.491574015	13.71004701	1.036096457
255	40.81531117	0.683268304	22.42268311	2.49479957	13.45396591	1.035315346
260	40.38954636	0.692698254	22.09674853	2.497753788	13.20701942	1.034473049
265	39.97591434	0.701992182	21.78129786	2.500447057	12.96873179	1.03357317
270	39.57385804	0.711154996	21.47581552	2.502889172	12.73865956	1.03261905
275	39.18285532	0.720191337	21.1798198	2.50508938	12.51638893	1.031613797
280	38.80241626	0.729105593	20.89286001	2.507056418	12.30153328	1.030560299
285	38.43208056	0.737901918	20.61451406	2.508798554	12.09373103	1.029461247
290	38.07141541	0.746584248	20.34438619	2.510323618	11.89264363	1.028319151
295	37.7200133	0.75515632	20.0821049	2.511639031	11.69795373	1.027136351
300	37.37749025	0.763621681	19.82732115	2.512751833	11.5093636	1.025915033
305	37.04348403	0.771983701	19.57970663	2.513668714	11.3265936	1.024657244
310	36.71765266	0.780245588	19.33895224	2.514396029	11.14938088	1.023364897
315	36.39967295	0.788410395	19.10476672	2.514939826	10.97747808	1.022039784
320	36.08923921	0.796481031	18.8768753	2.515305862	10.81065224	1.020683587
325	35.78606203	0.804460272	18.65501864	2.515499623	10.6486838	1.019297883
330	35.48986723	0.812350766	18.43895163	2.515526343	10.49136558	1.017884153
335	35.20039482	0.820155042	18.22844254	2.515391014	10.33850199	1.01644379
340	34.91739808	0.827875519	18.02327201	2.515098404	10.18990822	1.014978103
345	34.6406427	0.835514507	17.8232323	2.514653071	10.04540945	1.013488326
350	34.36990598	0.843074222	17.62812645	2.514059374	9.904840279	1.011975621
355	34.10497615	0.850556783	17.43776767	2.513321483	9.768044029	1.010441082
360	33.84565162	0.857964221	17.25197862	2.512443393	9.63487221	1.008885742

365	33.59174044	0.865298486	17.07059084	2.511428931	9.505183988	1.007310577
370	33.34305965	0.872561448	16.89344417	2.510281767	9.378845699	1.005716508
375	33.0994348	0.879754901	16.72038629	2.509005422	9.255730397	1.004104407
380	32.86069939	0.886880572	16.55127219	2.507603274	9.135717443	1.002475096
385	32.6266945	0.893940117	16.38596376	2.506078571	9.018692115	1.000829356
390	32.39726826	0.900935132	16.22432938	2.50443443	8.904545255	0.999167925
395	32.1722755	0.907867151	16.06624352	2.502673853	8.793172933	0.997491502
400	31.9515774	0.914737652	15.91158642	2.500799723	8.684476138	0.995800751
405	31.73504108	0.921548059	15.76024372	2.498814818	8.578360495	0.994096301
410	31.52253932	0.928299743	15.6121062	2.496721813	8.474735995	0.992378749
415	31.31395026	0.934994027	15.46706945	2.494523282	8.373516746	0.990648663
420	31.10915706	0.941632187	15.32503362	2.492221711	8.274620742	0.98890658
425	30.90804771	0.948215455	15.1859032	2.489819494	8.177969646	0.987153014
430	30.71051473	0.954745019	15.04958673	2.48731894	8.083488587	0.98538845
435	30.51645495	0.96122203	14.91599665	2.48472228	7.991105972	0.983613354
440	30.3257693	0.967647596	14.78504901	2.482031668	7.900753307	0.981828165
445	30.13836259	0.974022791	14.65666337	2.479249183	7.812365034	0.980033304
450	29.95414333	0.980348653	14.53076257	2.476376834	7.725878375	0.978229172
455	29.77302352	0.986626186	14.40727256	2.473416566	7.641233186	0.97641615
460	29.59491853	0.992856363	14.28612226	2.470370257	7.558371822	0.974594601
465	29.4197469	0.999040126	14.16724341	2.467239727	7.477239005	0.972764873
470	29.24743018	1.005178385	14.05057041	2.464026734	7.397781711	0.970927297
475	29.07789284	1.011272025	13.93604022	2.460732982	7.31994905	0.969082189
480	28.91106208	1.017321902	13.82359222	2.457360123	7.243692163	0.967229852
485	28.74686772	1.023328847	13.71316809	2.453909754	7.168964122	0.965370573
490	28.58524209	1.029293665	13.60471171	2.450383427	7.095719837	0.96350463
495	28.42611993	1.035217139	13.49816904	2.446782643	7.023915961	0.961632285

500	28.26943823	1.041100028	13.39348804	2.44310886	6.953510817	0.959753792
505	28.11513619	1.046943068	13.29061859	2.439363492	6.884464309	0.957869391
510	27.96315508	1.052746976	13.18951235	2.435547911	6.816737852	0.955979313
515	27.81343818	1.058512446	13.09012275	2.431663449	6.750294305	0.95408378
520	27.66593067	1.064240154	12.99240485	2.427711399	6.685097896	0.952183004
525	27.52057955	1.069930758	12.8963153	2.423693019	6.621114169	0.950277187
530	27.37733359	1.075584897	12.80181227	2.419609529	6.558309917	0.948366524
535	27.23614323	1.081203191	12.70885535	2.415462116	6.496653129	0.946451203
540	27.0969605	1.086786247	12.61740555	2.411251932	6.436112937	0.944531401
545	26.95973901	1.092334651	12.52742518	2.406980101	6.376659566	0.94260729
550	26.82443381	1.097848978	12.43887781	2.402647714	6.318264283	0.940679036
555	26.69100139	1.103329785	12.35172825	2.398255831	6.260899358	0.938746795
560	26.55939959	1.108777616	12.26594246	2.393805487	6.204538013	0.93681072
565	26.42958758	1.114192999	12.18148751	2.389297687	6.149154388	0.934870956
570	26.30152576	1.119576452	12.09833155	2.38473341	6.094723499	0.932927644
575	26.17517574	1.124928476	12.01644375	2.380113611	6.041221202	0.930980917
580	26.05050031	1.130249563	11.93579427	2.37543922	5.988624159	0.929030905
585	25.92746337	1.13554019	11.8563542	2.37071114	5.936909803	0.927077733
590	25.80602987	1.140800824	11.77809557	2.365930255	5.886056307	0.925121519
595	25.68616582	1.146031919	11.70099125	2.361097426	5.836042555	0.923162379
600	25.56783822	1.15123392	11.62501497	2.356213491	5.786848113	0.921200423
605	25.45101501	1.156407261	11.55014123	2.351279268	5.738453201	0.919235757
610	25.33566508	1.161552363	11.47634536	2.346295556	5.690838669	0.917268484
615	25.22175817	1.166669641	11.40360339	2.341263133	5.643985968	0.915298702
620	25.10926492	1.171759499	11.33189209	2.336182759	5.597877132	0.913326506
625	24.99815676	1.176822329	11.26118891	2.331055177	5.552494752	0.911351988
630	24.88840594	1.181858518	11.19147196	2.32588111	5.507821956	0.909375235

635	24.77998546	1.186868442	11.12272	2.320661265	5.463842386	0.907396332
640	24.67286907	1.191852469	11.0549124	2.315396334	5.420540184	0.90541536
645	24.56703122	1.196810959	10.98802914	2.310086991	5.377899966	0.9034324
650	24.46244709	1.201744263	10.92205075	2.304733896	5.335906812	0.901447525
655	24.35909247	1.206652725	10.85695832	2.299337693	5.29454624	0.89946081
660	24.25694384	1.211536682	10.79273347	2.293899011	5.253804201	0.897472325
665	24.15597829	1.216396463	10.72935835	2.288418467	5.213667052	0.895482139
670	24.05617348	1.221232391	10.66681559	2.282896662	5.174121548	0.893490316
675	23.9575077	1.22604478	10.60508829	2.277334185	5.135154827	0.89149692
680	23.85995978	1.230833939	10.54416004	2.271731613	5.096754394	0.889502012
685	23.76350907	1.235600171	10.48401484	2.266089507	5.058908111	0.887505652
690	23.66813548	1.240343771	10.42463716	2.26040842	5.021604181	0.885507895
695	23.57381942	1.245065029	10.36601184	2.254688891	4.984831139	0.883508798
700	23.48054178	1.249764229	10.30812418	2.248931448	4.94857784	0.881508413
705	23.38828394	1.254441649	10.25095981	2.243136607	4.912833445	0.879506791
710	23.29702773	1.259097561	10.19450478	2.237304875	4.877587414	0.877503982
715	23.20675543	1.263732233	10.13874548	2.231436747	4.842829497	0.875500034
720	23.11744977	1.268345927	10.08366865	2.225532709	4.808549718	0.873494993
725	23.02909386	1.272938898	10.0292614	2.219593236	4.774738372	0.871488903
730	22.94167126	1.277511398	9.975511127	2.213618793	4.741386013	0.869481808
735	22.8551659	1.282063674	9.922405578	2.207609838	4.708483447	0.86747375
740	22.7695621	1.286595968	9.869932797	2.201566816	4.676021722	0.865464769
745	22.68484453	1.291108516	9.818081127	2.195490166	4.64399212	0.863454903
750	22.60099826	1.295601553	9.766839204	2.189380319	4.612386152	0.86144419
755	22.51800867	1.300075305	9.71619594	2.183237694	4.581195547	0.859432668
760	22.43586149	1.304529997	9.666140522	2.177062706	4.550412249	0.857420371
765	22.3545428	1.308965849	9.6166624	2.170855758	4.520028407	0.855407333

770	22.27403896	1.313383077	9.567751278	2.164617249	4.490036368	0.853393587
775	22.19433667	1.317781892	9.51939711	2.158347568	4.460428675	0.851379165
780	22.11542292	1.322162503	9.471590088	2.152047096	4.431198057	0.849364099
785	22.03728498	1.326525113	9.424320637	2.145716209	4.402337423	0.847348417
790	21.95991043	1.330869923	9.37757941	2.139355276	4.373839861	0.845332149
795	21.8832871	1.335197131	9.331357278	2.132964656	4.345698626	0.843315323
800	21.80740311	1.339506928	9.285645324	2.126544705	4.317907139	0.841297965
805	21.73224681	1.343799506	9.240434838	2.12009577	4.290458984	0.839280103
810	21.65780683	1.348075052	9.195717313	2.113618193	4.263347897	0.837261761
815	21.58407205	1.352333747	9.151484433	2.10711231	4.236567766	0.835242964
820	21.51103155	1.356575774	9.107728074	2.100578449	4.210112625	0.833223735
825	21.43867469	1.360801309	9.064440295	2.094016935	4.18397665	0.831204099
830	21.36699103	1.365010525	9.021613333	2.087428085	4.158154154	0.829184076
835	21.29597035	1.369203595	8.979239599	2.080812211	4.132639584	0.82716369
840	21.22560265	1.373380686	8.937311673	2.074169619	4.107427518	0.82514296
845	21.15587814	1.377541964	8.895822299	2.067500612	4.082512659	0.823121907
850	21.08678723	1.381687592	8.854764378	2.060805484	4.057889831	0.82110055
855	21.01832053	1.38581773	8.81413097	2.054084527	4.033553979	0.819078909
860	20.95046885	1.389932534	8.773915283	2.047338028	4.009500163	0.817057002
865	20.88322316	1.394032161	8.734110672	2.040566266	3.985723554	0.815034847
870	20.81657464	1.398116761	8.694710635	2.033769518	3.962219434	0.813012461
875	20.75051464	1.402186486	8.65570881	2.026948056	3.938983189	0.81098986
880	20.68503468	1.406241482	8.617098967	2.020102147	3.916010309	0.808967062
885	20.62012645	1.410281894	8.578875012	2.013232054	3.893296385	0.806944082
890	20.55578181	1.414307866	8.541030974	2.006338035	3.870837104	0.804920934
895	20.49199278	1.418319538	8.50356101	1.999420344	3.848628248	0.802897635
900	20.42875152	1.422317047	8.466459397	1.99247923	3.826665693	0.800874198

905	20.36605036	1.426300531	8.429720531	1.985514941	3.804945401	0.798850637
910	20.30388177	1.430270123	8.393338923	1.978527717	3.783463426	0.796826965
915	20.24223838	1.434225955	8.357309196	1.971517796	3.762215902	0.794803196
920	20.18111294	1.438168157	8.321626081	1.964485413	3.74119905	0.792779342
925	20.12049836	1.442096858	8.286284417	1.957430799	3.720409168	0.790755415
930	20.06038765	1.446012183	8.251279146	1.950354179	3.699842636	0.788731428
935	20.000774	1.449914256	8.216605313	1.943255778	3.679495906	0.786707391
940	19.94165069	1.4538032	8.182258059	1.936135815	3.659365509	0.784683316
945	19.88301113	1.457679136	8.148232622	1.928994506	3.639448043	0.782659215
950	19.82484887	1.461542181	8.114524334	1.921832065	3.619740182	0.780635096
955	19.76715758	1.465392453	8.08112862	1.914648701	3.600238664	0.778610971
960	19.70993101	1.469230067	8.048040991	1.907444462	3.580940298	0.776586849
965	19.65316307	1.473055136	8.015257047	1.900220026	3.561841954	0.774562739
970	19.59684775	1.476867773	7.982772473	1.892975119	3.54294057	0.772538652
975	19.54097917	1.480668088	7.950583036	1.885710097	3.524233143	0.770514596
980	19.48555153	1.484456189	7.918684585	1.878425153	3.505716731	0.768490579
985	19.43055917	1.488232185	7.887073045	1.87112048	3.48738845	0.76646661
990	19.37599649	1.491996179	7.855744422	1.863796266	3.469245477	0.764442698
995	19.32185802	1.495748277	7.824694795	1.856452696	3.451285041	0.76241885
1000	19.26813837	1.499488581	7.793920316	1.849089954	3.433504427	0.760395074
1005	19.21483225	1.503217193	7.763417209	1.84170822	3.415900975	0.758371377
1010	19.16193447	1.506934212	7.733181769	1.834307672	3.398472074	0.756347766
1015	19.10943993	1.510639737	7.703210359	1.826888485	3.381215166	0.754324249
1020	19.05734359	1.514333865	7.673499407	1.819450832	3.364127742	0.752300832
1025	19.00564053	1.518016692	7.644045409	1.811994883	3.34720734	0.750277522
1030	18.95432591	1.521688312	7.614844922	1.804520806	3.330451548	0.748254325
1035	18.90339495	1.525348818	7.585894567	1.797028766	3.313857998	0.746231248

1040	18.85284298	1.528998303	7.557191027	1.789518926	3.297424367	0.744208295
1045	18.80266538	1.532636858	7.528731041	1.781991448	3.281148376	0.742185474
1050	18.75285764	1.536264571	7.500511409	1.77444649	3.265027789	0.740162789
1055	18.70341529	1.539881531	7.472528987	1.766884208	3.249060414	0.738140246
1060	18.65433397	1.543487826	7.444780687	1.759304756	3.233244095	0.736117851
1065	18.60560937	1.547083541	7.417263473	1.751708287	3.217576722	0.734095608
1070	18.55723726	1.550668762	7.389974366	1.744094951	3.202056218	0.732073522
1075	18.50921346	1.554243572	7.362910436	1.736464895	3.18668055	0.730051598
1080	18.46153389	1.557808053	7.336068805	1.728818265	3.171447717	0.728029841
1085	18.41419451	1.561362289	7.309446644	1.721155207	3.156355758	0.726008255
1090	18.36719136	1.564906358	7.283041173	1.71347586	3.141402746	0.723986844
1095	18.32052054	1.568440341	7.256849661	1.705780367	3.126586789	0.721965613
1100	18.27417822	1.571964317	7.230869421	1.698068865	3.11190603	0.719944566
1105	18.22816061	1.575478363	7.205097812	1.69034149	3.097358645	0.717923706
1110	18.182464	1.578982555	7.179532241	1.682598378	3.08294284	0.715903038
1115	18.13708474	1.58247697	7.154170154	1.674839661	3.068656856	0.713882565
1120	18.09201921	1.585961682	7.129009042	1.667065471	3.054498965	0.71186229
1125	18.04726389	1.589436765	7.104046437	1.659275936	3.040467466	0.709842218
1130	18.00281528	1.592902291	7.079279914	1.651471186	3.026560692	0.707822351
1135	17.95866996	1.596358334	7.054707086	1.643651345	3.012777002	0.705802692
1140	17.91482453	1.599804963	7.030325606	1.635816539	2.999114786	0.703783245
1145	17.87127567	1.603242249	7.006133164	1.62796689	2.98557246	0.701764012
1150	17.8280201	1.606670263	6.982127491	1.62010252	2.972148468	0.699744997
1155	17.78505461	1.610089071	6.958306351	1.612223549	2.95884128	0.697726203
1160	17.742376	1.613498742	6.934667546	1.604330095	2.945649392	0.695707631
1165	17.69998115	1.616899343	6.911208915	1.596422275	2.932571328	0.693689285
1170	17.65786698	1.620290941	6.887928328	1.588500204	2.919605635	0.691671167

1175	17.61603046	1.623673599	6.864823692	1.580563997	2.906750883	0.68965328
1180	17.57446859	1.627047384	6.841892947	1.572613766	2.89400567	0.687635626
1185	17.53317842	1.630412359	6.819134063	1.564649623	2.881368613	0.685618206
1190	17.49215706	1.633768587	6.796545045	1.556671676	2.868838356	0.683601024
1195	17.45140164	1.63711613	6.774123928	1.548680035	2.856413563	0.681584081
1200	17.41090935	1.64045505	6.751868778	1.540674807	2.84409292	0.67956738
1205	17.37067741	1.643785408	6.729777691	1.532656097	2.831875137	0.677550922
1210	17.33070309	1.647107264	6.707848793	1.524624011	2.819758943	0.675534709
1215	17.2909837	1.650420678	6.686080237	1.516578651	2.807743088	0.673518744
1220	17.25151657	1.653725709	6.664470208	1.50852012	2.795826342	0.671503027
1225	17.21229909	1.657022415	6.643016915	1.500448518	2.784007497	0.66948756
1230	17.17332867	1.660310853	6.621718597	1.492363946	2.772285362	0.667472345
1235	17.13460278	1.663591081	6.600573518	1.484266502	2.760658767	0.665457384
1240	17.09611891	1.666863154	6.57957997	1.476156283	2.749126558	0.663442678
1245	17.05787458	1.670127129	6.558736269	1.468033386	2.737687604	0.661428228
1250	17.01986736	1.673383059	6.538040758	1.459897905	2.726340787	0.659414036
1255	16.98209485	1.676631001	6.517491804	1.451749935	2.71508501	0.657400103
1260	16.94455468	1.679871007	6.497087797	1.443589568	2.703919192	0.65538643
1265	16.90724451	1.683103132	6.476827154	1.435416897	2.692842268	0.653373019
1270	16.87016204	1.686327426	6.456708312	1.427232013	2.681853193	0.65135987
1275	16.833305	1.689543944	6.436729732	1.419035004	2.670950934	0.649346985
1280	16.79667115	1.692752735	6.4168899	1.41082596	2.660134477	0.647334365
1285	16.76025828	1.695953852	6.397187322	1.402604968	2.649402823	0.64532201
1290	16.72406422	1.699147344	6.377620525	1.394372116	2.638754988	0.643309922
1295	16.6880868	1.702333262	6.358188059	1.386127489	2.628190002	0.641298101
1300	16.65232392	1.705511655	6.338888494	1.377871172	2.617706913	0.639286549
1305	16.61677349	1.708682571	6.319720421	1.369603249	2.60730478	0.637275266

1310	16.58143343	1.711846059	6.300682452	1.361323802	2.596982679	0.635264253
1315	16.54630172	1.715002167	6.281773217	1.353032914	2.586739697	0.633253511
1320	16.51137635	1.718150943	6.262991366	1.344730667	2.576574939	0.63124304
1325	16.47665533	1.721292432	6.24433557	1.336417139	2.566487518	0.62923284
1330	16.44213672	1.724426682	6.225804516	1.328092411	2.556476566	0.627222914
1335	16.40781859	1.727553738	6.207396911	1.31975656	2.546541223	0.62521326
1340	16.37369902	1.730673646	6.189111481	1.311409666	2.536680644	0.623203881
1345	16.33977615	1.73378645	6.170946967	1.303051804	2.526893998	0.621194775
1350	16.30604812	1.736892195	6.152902132	1.29468305	2.517180463	0.619185944
1355	16.27251309	1.739990925	6.13497575	1.28630348	2.507539231	0.617177388
1360	16.23916928	1.743082684	6.117166618	1.277913168	2.497969505	0.615169108
1365	16.20601488	1.746167515	6.099473546	1.269512188	2.488470502	0.613161103
1370	16.17304815	1.74924546	6.081895361	1.261100612	2.479041446	0.611153375
1375	16.14026735	1.752316562	6.064430907	1.252678512	2.469681575	0.609145923
1380	16.10767076	1.755380862	6.047079042	1.24424596	2.460390139	0.607138748
1385	16.0752567	1.758438403	6.029838641	1.235803027	2.451166397	0.60513185
1390	16.04302348	1.761489224	6.012708594	1.227349781	2.442009618	0.603125229
1395	16.01096946	1.764533368	5.995687806	1.218886292	2.432919083	0.601118885
1400	15.97909302	1.767570873	5.978775195	1.210412629	2.423894082	0.599112819
1405	15.94739254	1.77060178	5.961969696	1.201928859	2.414933917	0.597107031
1410	15.91586643	1.773626128	5.945270256	1.193435049	2.406037897	0.595101521
1415	15.88451314	1.776643956	5.928675839	1.184931265	2.397205344	0.593096289
1420	15.8533311	1.779655304	5.912185418	1.176417573	2.388435586	0.591091334
1425	15.82231879	1.782660208	5.895797985	1.167894038	2.379727963	0.589086658
1430	15.79147471	1.785658708	5.879512541	1.159360723	2.371081823	0.58708226
1435	15.76079735	1.78865084	5.863328102	1.150817694	2.362496523	0.58507814
1440	15.73028524	1.791636643	5.847243696	1.142265012	2.35397143	0.583074298

1445	15.69993693	1.794616152	5.831258365	1.133702739	2.345505919	0.581070735
1450	15.66975099	1.797589404	5.815371162	1.125130939	2.337099373	0.579067449
1455	15.63972598	1.800556437	5.799581154	1.116549671	2.328751184	0.577064441
1460	15.60986051	1.803517284	5.783887416	1.107958997	2.320460753	0.575061712
1465	15.5801532	1.806471983	5.768289041	1.099358975	2.312227487	0.57305926
1470	15.55060266	1.809420567	5.752785128	1.090749666	2.304050804	0.571057086
1475	15.52120756	1.812363072	5.737374791	1.082131129	2.295930127	0.569055189
1480	15.49196655	1.815299533	5.722057153	1.07350342	2.287864889	0.567053569
1485	15.46287831	1.818229983	5.706831349	1.064866599	2.279854529	0.565052227
1490	15.43394153	1.821154457	5.691696527	1.056220721	2.271898494	0.563051162
1495	15.40515494	1.824072988	5.676651842	1.047565844	2.263996239	0.561050374
1500	15.37651725	1.826985609	5.661696462	1.038902023	2.256147226	0.559049862
1505	15.3480272	1.829892353	5.646829565	1.030229313	2.248350923	0.557049627
1510	15.31968354	1.832793253	5.632050338	1.021547771	2.240606807	0.555049667
1515	15.29148506	1.835688342	5.61735798	1.012857449	2.232914361	0.553049984
1520	15.26343053	1.838577651	5.602751699	1.004158402	2.225273073	0.551050576
1525	15.23551875	1.841461212	5.588230712	0.995450682	2.21768244	0.549051444
1530	15.20774853	1.844339057	5.573794247	0.986734344	2.210141964	0.547052586
1535	15.18011871	1.847211217	5.559441541	0.978009439	2.202651156	0.545054003
1540	15.15262811	1.850077723	5.54517184	0.969276018	2.195209531	0.543055695
1545	15.12527559	1.852938605	5.5309844	0.960534134	2.18781661	0.54105766
1550	15.09806002	1.855793894	5.516878484	0.951783837	2.180471922	0.5390599
1555	15.07098027	1.85864362	5.502853366	0.943025178	2.173175	0.537062412
1560	15.04403524	1.861487813	5.488908329	0.934258205	2.165925384	0.535065198
1565	15.01722383	1.864326503	5.475042663	0.92548297	2.158722621	0.533068256
1570	14.99054496	1.867159719	5.461255666	0.91669952	2.151566263	0.531071587
1575	14.96399755	1.869987489	5.447546648	0.907907905	2.144455865	0.529075189

1580	14.93758056	1.872809844	5.433914922	0.899108172	2.137390992	0.527079063
1585	14.91129291	1.875626811	5.420359815	0.890300369	2.130371211	0.525083208
1590	14.8851336	1.878438418	5.406880656	0.881484543	2.123396097	0.523087623
1595	14.85910157	1.881244695	5.393476787	0.872660742	2.116465228	0.521092308
1600	14.83319584	1.884045668	5.380147555	0.863829011	2.109578189	0.519097264
1605	14.80741539	1.886841366	5.366892315	0.854989396	2.102734569	0.517102488
1610	14.78175923	1.889631816	5.35371043	0.846141943	2.095933964	0.515107982
1615	14.75622638	1.892417044	5.34060127	0.837286698	2.089175972	0.513113743
1620	14.73081587	1.895197079	5.327564213	0.828423704	2.082460199	0.511119773
1625	14.70552675	1.897971946	5.314598643	0.819553007	2.075786253	0.50912607
1630	14.68035806	1.900741673	5.301703952	0.810674649	2.069153749	0.507132634
1635	14.65530887	1.903506284	5.288879539	0.801788676	2.062562306	0.505139465
1640	14.63037825	1.906265807	5.27612481	0.792895129	2.056011546	0.503146562
1645	14.60556528	1.909020268	5.263439178	0.783994052	2.0495011	0.501153924
1650	14.58086905	1.911769691	5.250822061	0.775085486	2.043030598	0.499161551
1655	14.55628867	1.914514103	5.238272885	0.766169475	2.036599678	0.497169442
1660	14.53182325	1.917253528	5.225791084	0.75724606	2.030207982	0.495177598
1665	14.5074719	1.919987992	5.213376095	0.748315282	2.023855154	0.493186017
1670	14.48323375	1.922717519	5.201027363	0.739377181	2.017540846	0.491194699
1675	14.45910795	1.925442133	5.188744341	0.7304318	2.011264711	0.489203643
1680	14.43509365	1.92816186	5.176526485	0.721479177	2.005026407	0.487212849
1685	14.41119	1.930876724	5.16437326	0.712519354	1.998825596	0.485222316
1690	14.38739616	1.933586748	5.152284134	0.703552368	1.992661945	0.483232044
1695	14.36371132	1.936291956	5.140258583	0.694578261	1.986535125	0.481242033
1700	14.34013465	1.938992372	5.128296089	0.68559707	1.980444808	0.479252281
1705	14.31666534	1.94168802	5.116396137	0.676608834	1.974390673	0.477262788
1710	14.29330261	1.944378921	5.104558222	0.667613591	1.968372401	0.475273554

1715	14.27004565	1.947065101	5.092781841	0.65861138	1.962389678	0.473284577
1720	14.24689368	1.949746581	5.081066497	0.649602238	1.956442193	0.471295858
1725	14.22384593	1.952423384	5.069411701	0.640586202	1.950529639	0.469307396
1730	14.20090162	1.955095533	5.057816965	0.631563309	1.94465171	0.46731919
1735	14.17806001	1.95776305	5.046281811	0.622533596	1.938808108	0.46533124
1740	14.15532033	1.960425957	5.034805763	0.613497099	1.932998535	0.463343545
1745	14.13268185	1.963084276	5.023388351	0.604453855	1.927222698	0.461356105
1750	14.11014382	1.965738029	5.012029109	0.595403898	1.921480306	0.459368918
1755	14.08770552	1.968387237	5.000727579	0.586347266	1.915771073	0.457381985
1760	14.06536623	1.971031923	4.989483305	0.577283992	1.910094715	0.455395305
1765	14.04312523	1.973672107	4.978295837	0.568214112	1.904450951	0.453408877
1770	14.02098181	1.976307811	4.96716473	0.55913766	1.898839505	0.4514227
1775	13.99893527	1.978939056	4.956089543	0.550054671	1.893260101	0.449436774
1780	13.97698492	1.981565861	4.94506984	0.540965178	1.88771247	0.447451099
1785	13.95513008	1.984188249	4.93410519	0.531869216	1.882196343	0.445465673
1790	13.93337006	1.98680624	4.923195166	0.522766818	1.876711455	0.443480497
1795	13.91170419	1.989419853	4.912339345	0.513658017	1.871257545	0.441495569
1800	13.8901318	1.992029109	4.90153731	0.504542847	1.865834352	0.43951089
1805	13.86865223	1.994634029	4.890788647	0.495421339	1.86044162	0.437526457
1810	13.84726484	1.997234632	4.880092947	0.486293527	1.855079097	0.435542272
1815	13.82596897	1.999830938	4.869449805	0.477159443	1.849746531	0.433558332
1820	13.80476398	2.002422966	4.85885882	0.468019118	1.844443674	0.431574638
1825	13.78364923	2.005010736	4.848319595	0.458872584	1.839170282	0.429591189
1830	13.76262411	2.007594267	4.837831738	0.449719873	1.833926112	0.427607984
1835	13.74168798	2.010173579	4.827394861	0.440561016	1.828710923	0.425625023
1840	13.72084024	2.01274869	4.817008578	0.431396043	1.823524479	0.423642305
1845	13.70008026	2.01531962	4.806672509	0.422224986	1.818366545	0.421659829

1850	13.67940745	2.017886387	4.796386277	0.413047876	1.813236889	0.419677596
1855	13.6588212	2.020449009	4.78614951	0.403864741	1.80813528	0.417695603
1860	13.63832093	2.023007506	4.775961838	0.394675613	1.803061493	0.415713851
1865	13.61790604	2.025561895	4.765822895	0.38548052	1.798015301	0.413732339
1870	13.59757596	2.028112195	4.755732321	0.376279493	1.792996483	0.411751066
1875	13.57733011	2.030658424	4.745689756	0.367072561	1.788004819	0.409770033
1880	13.55716791	2.0332006	4.735694846	0.357859753	1.783040091	0.407789237
1885	13.5370888	2.03573874	4.725747241	0.348641098	1.778102084	0.405808678
1890	13.51709223	2.038272863	4.715846593	0.339416624	1.773190584	0.403828357
1895	13.49717763	2.040802986	4.705992557	0.33018636	1.768305381	0.401848272
1900	13.47734445	2.043329126	4.696184793	0.320950334	1.763446266	0.399868422
1905	13.45759216	2.0458513	4.686422965	0.311708575	1.758613033	0.397888807
1910	13.4379202	2.048369527	4.676706737	0.302461109	1.753805477	0.395909427
1915	13.41832805	2.050883822	4.66703578	0.293207964	1.749023397	0.393930281
1920	13.39881518	2.053394204	4.657409766	0.283949169	1.744266592	0.391951367
1925	13.37938107	2.055900688	4.64782837	0.274684749	1.739534865	0.389972686
1930	13.36002518	2.058403292	4.638291272	0.265414733	1.734828019	0.387994237
1935	13.34074701	2.060902031	4.628798155	0.256139146	1.730145861	0.38601602
1940	13.32154604	2.063396924	4.619348702	0.246858015	1.725488199	0.384038033
1945	13.30242178	2.065887985	4.609942602	0.237571367	1.720854842	0.382060275
1950	13.28337371	2.068375231	4.600579547	0.228279228	1.716245604	0.380082748
1955	13.26440134	2.070858679	4.591259231	0.218981624	1.711660298	0.378105449
1960	13.24550419	2.073338344	4.581981351	0.20967858	1.70709874	0.376128378
1965	13.22668175	2.075814242	4.572745607	0.200370123	1.702560747	0.374151535
1970	13.20793355	2.07828639	4.563551702	0.191056277	1.69804614	0.372174918
1975	13.18925911	2.080754802	4.554399342	0.181737069	1.693554739	0.370198528
1980	13.17065796	2.083219495	4.545288235	0.172412522	1.689086369	0.368222364

1985	13.15212961	2.085680484	4.536218093	0.163082662	1.684640853	0.366246424
1990	13.13367362	2.088137784	4.52718863	0.153747513	1.680218019	0.364270709
1995	13.11528951	2.09059141	4.518199563	0.1444071	1.675817695	0.362295218
2000	13.09697682	2.093041378	4.50925061	0.135061448	1.671439712	0.36031995
2005	13.07873511	2.095487704	4.500341495	0.12571058	1.667083902	0.358344905
2010	13.06056391	2.0979304	4.491471942	0.116354521	1.662750097	0.356370082
2015	13.0424628	2.100369484	4.482641678	0.106993294	1.658438134	0.35439548
2020	13.02443132	2.102804969	4.473850434	0.097626923	1.654147849	0.352421098
2025	13.00646903	2.10523687	4.46509794	0.088255431	1.64987908	0.350446937
2030	12.9885755	2.107665202	4.456383933	0.078878842	1.645631669	0.348472995
2035	12.9707503	2.110089979	4.44770815	0.069497179	1.641405456	0.346499273
2040	12.95299301	2.112511216	4.439070329	0.060110465	1.637200284	0.344525768
2045	12.93530319	2.114928927	4.430470214	0.050718722	1.633015999	0.342552481
2050	12.91768043	2.117343126	4.421907549	0.041321974	1.628852447	0.340579412
2055	12.90012432	2.119753826	4.413382081	0.031920243	1.624709475	0.338606558
2060	12.88263444	2.122161044	4.404893558	0.022513551	1.620586933	0.336633921
2065	12.86521038	2.124564791	4.396441733	0.01310192	1.616484671	0.334661499
2070	12.84785174	2.126965082	4.388026359	0.003685373	1.612402542	0.332689291
2075	12.83055811	2.129361931	4.379647191	-0.005736069	1.6083404	0.330717298
2080	12.81332909	2.131755351	4.371303989	-0.015162384	1.604298098	0.328745518
2085	12.7961643	2.134145356	4.362996512	-0.02459355	1.600275494	0.326773951
2090	12.77906334	2.13653196	4.354724524	-0.034029546	1.596272445	0.324802596
2095	12.76202582	2.138915175	4.346487787	-0.043470351	1.592288811	0.322831453
2100	12.74505135	2.141295016	4.338286071	-0.052915943	1.588324451	0.32086052
2105	12.72813956	2.143671494	4.330119142	-0.062366302	1.584379228	0.318889799
2110	12.71129006	2.146044625	4.321986772	-0.071821406	1.580453005	0.316919287
2115	12.69450248	2.148414419	4.313888735	-0.081281235	1.576545647	0.314948984

2120	12.67777645	2.150780891	4.305824805	-0.090745768	1.572657018	0.31297889
2125	12.66111116	2.153144054	4.297794759	-0.100214986	1.568786985	0.311009005
2130	12.64450755	2.155503919	4.289798375	-0.109688867	1.564935418	0.309039326
2135	12.62796396	2.157860501	4.281835436	-0.119167391	1.561102186	0.307069855
2140	12.61148045	2.160213811	4.273905723	-0.128650539	1.557287158	0.30510059
2145	12.59505668	2.162563862	4.266009022	-0.13813829	1.553490207	0.30313153
2150	12.57869228	2.164910666	4.258145119	-0.147630625	1.549711207	0.301162676
2155	12.5623869	2.167254237	4.250313803	-0.157127524	1.54595003	0.299194027
2160	12.5461402	2.169594586	4.242514863	-0.166628968	1.542206554	0.297225581
2165	12.52995183	2.171931725	4.234748093	-0.176134937	1.538480653	0.295257339
2170	12.51382145	2.174265667	4.227013286	-0.185645412	1.534772206	0.2932893
2175	12.49774872	2.176596424	4.219310238	-0.195160374	1.531081093	0.291321462
2180	12.4817333	2.178924008	4.211638746	-0.204679803	1.527407191	0.289353827
2185	12.46577485	2.18124843	4.20399861	-0.214203682	1.523750384	0.287386393
2190	12.44987305	2.183569703	4.19638963	-0.223731991	1.520110552	0.285419159
2195	12.43402757	2.185887839	4.18881161	-0.233264712	1.516487579	0.283452125
2200	12.41823807	2.188202849	4.181264354	-0.242801826	1.51288135	0.281485291
2205	12.40250424	2.190514744	4.173747668	-0.252343314	1.509291749	0.279518655
2210	12.38682575	2.192823538	4.16626136	-0.26188916	1.505718663	0.277552218
2215	12.37120229	2.19512924	4.158805238	-0.271439343	1.50216198	0.275585978
2220	12.35563354	2.197431862	4.151379115	-0.280993847	1.498621587	0.273619935
2225	12.34011918	2.199731417	4.143982802	-0.290552654	1.495097375	0.271654089
2230	12.32465891	2.202027914	4.136616114	-0.300115745	1.491589233	0.26968844
2235	12.30925241	2.204321366	4.129278867	-0.309683103	1.488097053	0.267722985
2240	12.29389938	2.206611784	4.121970878	-0.31925471	1.484620727	0.265757725
2245	12.27859952	2.208899178	4.114691966	-0.32883055	1.481160149	0.26379266
2250	12.26335252	2.21118356	4.10744195	-0.338410604	1.477715213	0.261827789

2255	12.24815809	2.21346494	4.100220654	-0.347994855	1.474285814	0.25986311
2260	12.23301593	2.21574333	4.0930279	-0.357583287	1.470871848	0.257898625
2265	12.21792574	2.218018741	4.085863513	-0.367175882	1.467473212	0.255934331
2270	12.20288723	2.220291183	4.07872732	-0.376772624	1.464089805	0.253970229
2275	12.18790012	2.222560666	4.071619148	-0.386373495	1.460721524	0.252006318
2280	12.17296411	2.224827203	4.064538826	-0.395978479	1.457368271	0.250042598
2285	12.15807892	2.227090802	4.057486186	-0.405587559	1.454029945	0.248079067
2290	12.14324427	2.229351475	4.050461058	-0.415200719	1.450706448	0.246115726
2295	12.12845987	2.231609233	4.043463276	-0.424817942	1.447397683	0.244152574
2300	12.11372545	2.233864085	4.036492675	-0.434439213	1.444103552	0.24218961
2305	12.09904073	2.236116042	4.029549091	-0.444064514	1.44082396	0.240226834
2310	12.08440544	2.238365114	4.022632362	-0.453693831	1.437558811	0.238264245
2315	12.0698193	2.240611312	4.015742325	-0.463327146	1.434308011	0.236301843
2320	12.05528204	2.242854645	4.008878822	-0.472964445	1.431071468	0.234339627
2325	12.0407934	2.245095124	4.002041693	-0.48260571	1.427849087	0.232377597
2330	12.02635311	2.247332759	3.995230782	-0.492250927	1.424640778	0.230415752
2335	12.0119609	2.24956756	3.988445931	-0.50190008	1.421446448	0.228454091
2340	11.99761652	2.251799536	3.981686986	-0.511553154	1.418266009	0.226492614
2345	11.9833197	2.254028698	3.974953794	-0.521210133	1.41509937	0.224531321
2350	11.96907018	2.256255056	3.968246202	-0.530871001	1.411946442	0.222570211
2355	11.95486771	2.258478619	3.961564059	-0.540535744	1.408807138	0.220609284
2360	11.94071204	2.260699396	3.954907215	-0.550204346	1.405681371	0.218648538
2365	11.9266029	2.262917398	3.948275521	-0.559876793	1.402569053	0.216687974
2370	11.91254006	2.265132635	3.94166883	-0.569553069	1.399470099	0.214727591
2375	11.89852326	2.267345115	3.935086996	-0.57923316	1.396384424	0.212767388
2380	11.88455226	2.269554848	3.928529872	-0.588917051	1.393311944	0.210807365
2385	11.87062681	2.271761844	3.921997316	-0.598604727	1.390252574	0.208847522

2390	11.85674666	2.273966112	3.915489184	-0.608296174	1.387206233	0.206887857
2395	11.84291158	2.276167662	3.909005334	-0.617991376	1.384172837	0.204928371
2400	11.82912133	2.278366502	3.902545626	-0.627690321	1.381152306	0.202969063
2405	11.81537566	2.280562642	3.89610992	-0.637392993	1.378144558	0.201009932
2410	11.80167435	2.282756091	3.889698077	-0.647099378	1.375149513	0.199050978
2415	11.78801716	2.284946858	3.88330996	-0.656809461	1.372167091	0.1970922
2420	11.77440385	2.287134953	3.876945433	-0.66652323	1.369197215	0.195133599
2425	11.7608342	2.289320384	3.870604361	-0.67624067	1.366239805	0.193175172
2430	11.74737097	2.29150316	3.864286609	-0.685961767	1.363294784	0.19121692
2435	11.73382494	2.29368329	3.857992044	-0.695686507	1.360362075	0.189258843
2440	11.72038489	2.295860784	3.851720534	-0.705414877	1.357441601	0.18730094
2445	11.70698758	2.298035649	3.845471948	-0.715146862	1.354533288	0.18534321
2450	11.6936328	2.300207895	3.839246155	-0.72488245	1.351637059	0.183385653
2455	11.68032032	2.302377531	3.833043027	-0.734621626	1.348752842	0.181428268
2460	11.66704993	2.304544565	3.826862435	-0.744364377	1.34588056	0.179471056
2465	11.6538214	2.306709005	3.820704252	-0.754110691	1.343020143	0.177514014
2470	11.64063453	2.308870861	3.814568353	-0.763860553	1.340171516	0.175557144
2475	11.62748909	2.311030141	3.808454611	-0.773613951	1.337334608	0.173600444
2480	11.61438487	2.313186853	3.802362903	-0.783370871	1.334509347	0.171643914
2485	11.60132167	2.315341007	3.796293105	-0.793131301	1.331695662	0.169687554
2490	11.58829927	2.317492609	3.790245094	-0.802895227	1.328893484	0.167731362
2495	11.57531745	2.319641669	3.784218751	-0.812662636	1.326102742	0.165775339
2500	11.56237603	2.321788195	3.778213953	-0.822433516	1.323323367	0.163819485
2505	11.54947479	2.323932196	3.772230581	-0.832207854	1.320555291	0.161863798
2510	11.53661352	2.326073678	3.766268516	-0.841985638	1.317798445	0.159908278
2515	11.52379202	2.328212652	3.760327641	-0.851766853	1.315052762	0.157952924
2520	11.51101009	2.330349124	3.754407839	-0.86155149	1.312318174	0.155997737

2525	11.49826754	2.332483103	3.748508994	-0.871339533	1.309594616	0.154042716
2530	11.48556416	2.334614598	3.742630989	-0.881130972	1.306882022	0.152087859
2535	11.47289975	2.336743615	3.736773712	-0.890925794	1.304180325	0.150133168
2540	11.46027412	2.338870163	3.730937048	-0.900723987	1.301489462	0.148178641
2545	11.44768708	2.34099425	3.725120885	-0.910525538	1.298809367	0.146224278
2550	11.43513843	2.343115884	3.719325111	-0.920330436	1.296139977	0.144270078
2555	11.42262799	2.345235072	3.713549614	-0.930138668	1.293481229	0.142316041
2560	11.41015555	2.347351823	3.707794286	-0.939950223	1.290833059	0.140362167
2565	11.39772093	2.349466144	3.702059015	-0.949765088	1.288195405	0.138408455
2570	11.38532395	2.351578043	3.696343695	-0.959583252	1.285568205	0.136454904
2575	11.37296441	2.353687528	3.690648216	-0.969404702	1.282951398	0.134501515
2580	11.36064213	2.355794606	3.684972473	-0.979229428	1.280344923	0.132548286

**ANEXO 16. METODOLOGÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN 3D (Woods-Ballard *et al.*, 2007).**

<b>d (min)</b>	<b>a Cartagena</b>	<b>h max Cartagena</b>	<b>a Medellín</b>	<b>h max Medellín</b>	<b>a Bogotá</b>	<b>h max Bogotá</b>
5	-14.9	0.21	-60.8	0.56	-300.3	0.46
10	-12.5	0.35	-50.7	0.93	-259.0	0.79
15	-10.9	0.46	-43.6	1.20	-227.5	1.04
20	-9.7	0.54	-38.4	1.40	-202.6	1.23
25	-8.7	0.60	-34.4	1.56	-182.5	1.38
30	-8.0	0.66	-31.2	1.69	-166.0	1.51
35	-7.4	0.71	-28.6	1.80	-152.1	1.61
40	-6.9	0.75	-26.4	1.89	-140.3	1.70
45	-6.5	0.78	-24.6	1.97	-130.1	1.77
50	-6.1	0.81	-23.0	2.04	-121.2	1.83
55	-5.7	0.84	-21.6	2.10	-113.5	1.89
60	-5.5	0.86	-20.3	2.15	-106.6	1.93
65	-5.2	0.88	-19.3	2.19	-100.6	1.97
70	-5.0	0.90	-18.3	2.23	-95.1	2.01
75	-4.7	0.92	-17.4	2.27	-90.2	2.04
80	-4.5	0.93	-16.6	2.30	-85.7	2.06
85	-4.4	0.94	-15.9	2.32	-81.7	2.09
90	-4.2	0.95	-15.2	2.35	-78.0	2.11
95	-4.0	0.96	-14.6	2.37	-74.6	2.13
100	-3.9	0.97	-14.1	2.39	-71.5	2.14
105	-3.8	0.98	-13.6	2.41	-68.6	2.16
110	-3.7	0.99	-13.1	2.42	-65.9	2.17
115	-3.5	0.99	-12.7	2.44	-63.4	2.18
120	-3.4	1.00	-12.2	2.45	-61.1	2.19
125	-3.3	1.00	-11.9	2.46	-59.0	2.20
130	-3.2	1.00	-11.5	2.47	-57.0	2.21
135	-3.1	1.01	-11.2	2.48	-55.1	2.22
140	-3.1	1.01	-10.8	2.48	-53.3	2.23
145	-3.0	1.01	-10.5	2.49	-51.7	2.23
150	-2.9	1.01	-10.2	2.49	-50.1	2.24
155	-2.8	1.01	-10.0	2.50	-48.6	2.24
160	-2.7	1.01	-9.7	2.50	-47.2	2.25
165	-2.7	1.01	-9.5	2.50	-45.9	2.25
170	-2.6	1.01	-9.2	2.50	-44.6	2.25
175	-2.6	1.00	-9.0	2.50	-43.4	2.25
180	-2.5	1.00	-8.8	2.50	-42.3	2.26

## TRINCHERAS DE RETENCIÓN/INFILTRACIÓN

185	-2.4	1.00	-8.6	2.50	-41.2	2.26
190	-2.4	1.00	-8.4	2.50	-40.2	2.26
195	-2.3	0.99	-8.2	2.50	-39.2	2.26
200	-2.3	0.99	-8.1	2.50	-38.3	2.26
205	-2.2	0.99	-7.9	2.50	-37.4	2.26
210	-2.2	0.98	-7.7	2.49	-36.5	2.26
215	-2.1	0.98	-7.6	2.49	-35.7	2.26
220	-2.1	0.98	-7.4	2.49	-34.9	2.26
225	-2.0	0.97	-7.3	2.48	-34.2	2.26
230	-2.0	0.97	-7.1	2.48	-33.4	2.26
235	-2.0	0.96	-7.0	2.47	-32.7	2.26
240	-1.9	0.96	-6.9	2.47	-32.1	2.26
245	-1.9	0.95	-6.7	2.46	-31.4	2.26
250	-1.9	0.95	-6.6	2.46	-30.8	2.26
255	-1.8	0.94	-6.5	2.45	-30.2	2.26
260	-1.8	0.94	-6.4	2.45	-29.6	2.26
265	-1.8	0.93	-6.3	2.44	-29.1	2.25
270	-1.7	0.93	-6.2	2.43	-28.5	2.25
275	-1.7	0.92	-6.1	2.43	-28.0	2.25
280	-1.7	0.91	-6.0	2.42	-27.5	2.25
285	-1.6	0.91	-5.9	2.41	-27.0	2.25
290	-1.6	0.90	-5.8	2.41	-26.6	2.25
295	-1.6	0.90	-5.7	2.40	-26.1	2.24
300	-1.5	0.89	-5.6	2.39	-25.7	2.24
305	-1.5	0.88	-5.5	2.39	-25.2	2.24
310	-1.5	0.88	-5.4	2.38	-24.8	2.24
315	-1.5	0.87	-5.3	2.37	-24.4	2.23
320	-1.4	0.86	-5.3	2.36	-24.0	2.23
325	-1.4	0.86	-5.2	2.35	-23.7	2.23
330	-1.4	0.85	-5.1	2.35	-23.3	2.23
335	-1.4	0.84	-5.0	2.34	-22.9	2.22
340	-1.3	0.84	-5.0	2.33	-22.6	2.22
345	-1.3	0.83	-4.9	2.32	-22.2	2.22
350	-1.3	0.82	-4.8	2.31	-21.9	2.22
355	-1.3	0.82	-4.8	2.30	-21.6	2.21
360	-1.3	0.81	-4.7	2.30	-21.3	2.21
365	-1.2	0.80	-4.6	2.29	-21.0	2.21
370	-1.2	0.80	-4.6	2.28	-20.7	2.20
375	-1.2	0.79	-4.5	2.27	-20.4	2.20
380	-1.2	0.78	-4.5	2.26	-20.1	2.20
385	-1.2	0.78	-4.4	2.25	-19.9	2.20
390	-1.1	0.77	-4.3	2.24	-19.6	2.19
395	-1.1	0.76	-4.3	2.23	-19.3	2.19
400	-1.1	0.75	-4.2	2.22	-19.1	2.19

## TRINCHERAS DE RETENCIÓN/INFILTRACIÓN

405	-1.1	0.75	-4.2	2.21	-18.8	2.18
410	-1.1	0.74	-4.1	2.21	-18.6	2.18
415	-1.1	0.73	-4.1	2.20	-18.3	2.18
420	-1.0	0.73	-4.0	2.19	-18.1	2.17
425	-1.0	0.72	-4.0	2.18	-17.9	2.17
430	-1.0	0.71	-3.9	2.17	-17.7	2.17
435	-1.0	0.71	-3.9	2.16	-17.4	2.16
440	-1.0	0.70	-3.8	2.15	-17.2	2.16
445	-1.0	0.69	-3.8	2.14	-17.0	2.16
450	-0.9	0.69	-3.8	2.13	-16.8	2.16
455	-0.9	0.68	-3.7	2.12	-16.6	2.15
460	-0.9	0.67	-3.7	2.11	-16.4	2.15
465	-0.9	0.67	-3.6	2.10	-16.2	2.15
470	-0.9	0.66	-3.6	2.09	-16.1	2.14
475	-0.9	0.65	-3.6	2.08	-15.9	2.14
480	-0.9	0.64	-3.5	2.08	-15.7	2.14

### ANEXOS 17. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DE BRE Digest 365 PARA DIFERENTES EVENTOS EN LAS 3 CIUDADES DE APLICACIÓN

d (min)	Cartagena			Medellín			Bogotá		
	S (m <sup>3</sup> )	I (m <sup>3</sup> )	O (m <sup>3</sup> )	S (m <sup>3</sup> )	I (m <sup>3</sup> )	O (m <sup>3</sup> )	S (m <sup>3</sup> )	I (m <sup>3</sup> )	O (m <sup>3</sup> )
5	20.7964761	22.5232424	1.72676625	34.5424725	36.1537026	1.61123006	33.4315569	33.7795115	0.34795459
10	34.8792438	38.3327763	3.45353251	57.2905263	60.5129864	3.22246011	57.6244852	58.3203943	0.69590919
15	45.5532237	50.7335224	5.18029876	73.6452648	78.478955	4.83369017	75.8405974	76.8844612	1.04386378
20	54.1608474	61.0679124	6.90706501	86.0820645	92.5269848	6.44492022	89.9771129	91.3689313	1.39181837
25	61.3771134	70.0109447	8.63383127	95.9121273	103.968278	8.05615028	101.210695	102.950468	1.73977297
30	67.5889685	77.949566	10.3605975	103.902294	113.569675	9.66738033	110.30877	112.396497	2.08772756
35	73.0389694	85.1263331	12.0873638	110.534686	121.813296	11.2786104	117.79256	120.228242	2.43568215
40	77.889372	91.703502	13.81413	116.129637	129.019477	12.8898404	124.028092	126.811729	2.78363675
45	82.2542154	97.7951117	15.5408963	120.909488	135.410559	14.5010705	129.279701	132.411293	3.13159134
50	86.2168254	103.484488	17.2676625	125.034117	141.146417	16.1123006	133.742882	137.222428	3.47954594
55	89.8400242	108.834453	18.9944288	128.6219	146.345431	17.7235306	137.565213	141.392714	3.82750053
60	93.1724132	113.893608	20.721195	131.762669	151.097429	19.3347607	140.860106	145.035561	4.17545512
65	96.2524135	118.700375	22.4479613	134.526036	155.472027	20.9459907	143.716094	148.239504	4.52340972
70	99.1109594	123.285687	24.1747275	136.966933	159.524154	22.5572208	146.203254	151.074618	4.87136431
75	101.773354	127.674848	25.9014938	139.129394	163.297845	24.1684508	148.377746	153.597065	5.2193189
80	104.260578	131.888838	27.6282601	141.04921	166.828891	25.7796809	150.285081	155.852354	5.5672735
85	106.590239	135.945265	29.3550263	142.755832	170.146743	27.3909109	151.962508	157.877736	5.91522809
90	108.77727	139.859062	31.0817926	144.273759	173.2759	29.002141	153.440795	159.703978	6.26318268
95	110.834456	143.643015	32.8085588	145.623574	176.236945	30.6133711	154.745569	161.356707	6.61113728
100	112.772835	147.30816	34.5353251	146.822724	179.047325	32.2246011	155.898335	162.857427	6.95909187
105	114.602011	150.864102	36.2620913	147.886115	181.721946	33.8358312	156.917264	164.224311	7.30704646
110	116.330394	154.319252	37.9888576	148.826576	184.273637	35.4470612	157.817814	165.472815	7.65500106

115	117.965398	157.681022	39.7156238	149.655225	186.713517	37.0582913	158.613207	166.616163	8.00295565
120	119.513594	160.955984	41.4423901	150.381754	189.051276	38.6695213	159.314819	167.66573	8.35091025
125	120.980838	164.149994	43.1691563	151.014661	191.295412	40.2807514	159.932486	168.631351	8.69886484
130	122.372371	167.268294	44.8959226	151.561433	193.453415	41.8919814	160.474753	169.521573	9.04681943
135	123.692908	170.315597	46.6226888	152.028705	195.531917	43.5032115	160.949079	170.343853	9.39477403
140	124.946706	173.296161	48.3494551	152.422377	197.536818	45.1144415	161.361998	171.104726	9.74272862
145	126.137621	176.213843	50.0762213	152.747719	199.47339	46.7256716	161.719259	171.809943	10.0906832
150	127.269164	179.072151	51.8029876	153.009459	201.346361	48.3369017	162.025941	172.464579	10.4386378
155	128.344535	181.874289	53.5297539	153.211853	203.159985	49.9481317	162.286541	173.073133	10.7865924
160	129.366665	184.623185	55.2565201	153.358744	204.918106	51.5593618	162.505057	173.639604	11.134547
165	130.338246	187.321532	56.9832864	153.453615	206.624206	53.1705918	162.685057	174.167559	11.4825016
170	131.261752	189.971805	58.7100526	153.49963	208.281451	54.7818219	162.829729	174.660186	11.8304562
175	132.139469	192.576288	60.4368189	153.499674	209.892726	56.3930519	162.941934	175.120345	12.1784108
180	132.973511	195.137096	62.1635851	153.456385	211.460667	58.004282	163.024242	175.550608	12.5263654
185	133.765836	197.656187	63.8903514	153.372179	212.987691	59.615512	163.078973	175.953293	12.87432
190	134.518265	200.135382	65.6171176	153.249274	214.476016	61.2267421	163.108221	176.330496	13.2222746
195	135.232492	202.576376	67.3438839	153.089712	215.927685	62.8379722	163.113883	176.684112	13.5702291
200	135.910098	204.980748	69.0706501	152.89538	217.344582	64.4492022	163.097681	177.015865	13.9181837
205	136.552559	207.349975	70.7974164	152.668018	218.72845	66.0604323	163.06118	177.327319	14.2661383
210	137.161256	209.685439	72.5241826	152.40924	220.080903	67.6716623	163.005808	177.619901	14.6140929
215	137.737486	211.988435	74.2509489	152.120546	221.403438	69.2828924	162.932867	177.894915	14.9620475
220	138.282466	214.260181	75.9777151	151.803326	222.697448	70.8941224	162.843549	178.153551	15.3100021
225	138.797338	216.501819	77.7044814	151.458877	223.96423	72.5053525	162.738946	178.396902	15.6579567
230	139.28318	218.714427	79.4312477	151.08841	225.204993	74.1165825	162.620058	178.62597	16.0059113
235	139.741007	220.899021	81.1580139	150.693054	226.420867	75.7278126	162.487808	178.841674	16.3538659
240	140.171779	223.056559	82.8847802	150.273867	227.61291	77.3390427	162.343044	179.044864	16.7018205
245	140.576403	225.187949	84.6115464	149.83184	228.782113	78.9502727	162.186546	179.236321	17.0497751

250	140.955735	227.294048	86.3383127	149.367902	229.929405	80.5615028	162.019037	179.416766	17.3977297
255	141.31059	229.375669	88.0650789	148.882926	231.055659	82.1727328	161.841183	179.586867	17.7456843
260	141.641738	231.433583	89.7918452	148.377735	232.161698	83.7839629	161.653604	179.747242	18.0936389
265	141.949911	233.468522	91.5186114	147.853102	233.248295	85.3951929	161.45687	179.898464	18.4415935
270	142.235806	235.481184	93.2453777	147.309757	234.31618	87.006423	161.251515	180.041063	18.7895481
275	142.500086	237.472229	94.9721439	146.748389	235.366042	88.617653	161.03803	180.175533	19.1375026
280	142.743379	239.44229	96.6989102	146.169649	236.398532	90.2288831	160.816877	180.302334	19.4854572
285	142.966289	241.391966	98.4256764	145.574153	237.414266	91.8401132	160.588482	180.421894	19.8334118
290	143.169388	243.321831	100.152443	144.962484	238.413827	93.4513432	160.353245	180.534611	20.1813664
295	143.353225	245.232434	101.879209	144.335195	239.397768	95.0625733	160.111537	180.640858	20.529321
300	143.518322	247.124297	103.605975	143.692811	240.366614	96.6738033	159.863706	180.740982	20.8772756
305	143.665179	248.997921	105.332741	143.03583	241.320863	98.2850334	159.610078	180.835308	21.2252302
310	143.794277	250.853785	107.059508	142.364725	242.260989	99.8962634	159.350955	180.92414	21.5731848
315	143.906074	252.692348	108.786274	141.679948	243.187441	101.507493	159.086625	181.007764	21.9211394
320	144.001009	254.514049	110.51304	140.981926	244.10065	103.118724	158.817353	181.086447	22.269094
325	144.079504	256.319311	112.239806	140.27107	245.001023	104.729954	158.54339	181.160439	22.6170486
330	144.141965	258.108537	113.966573	139.547768	245.888952	106.341184	158.264973	181.229976	22.9650032
335	144.188779	259.882118	115.693339	138.812393	246.764807	107.952414	157.982321	181.295279	23.3129578
340	144.22032	261.640425	117.420105	138.0653	247.628944	109.563644	157.695644	181.356557	23.6609124
345	144.236948	263.383819	119.146871	137.306828	248.481702	111.174874	157.405138	181.414005	24.008867
350	144.239008	265.112646	120.873638	136.537303	249.323406	112.786104	157.110986	181.467808	24.3568215
355	144.226833	266.827236	122.600404	135.757034	250.154368	114.397334	156.813364	181.51814	24.7047761
360	144.200742	268.527913	124.32717	134.96632	250.974884	116.008564	156.512435	181.565166	25.0527307
365	144.161046	270.214982	126.053936	134.165446	251.78524	117.619794	156.208355	181.609041	25.4006853
370	144.108041	271.888744	127.780703	133.354685	252.585709	119.231024	155.90127	181.64991	25.7486399
375	144.042015	273.549484	129.507469	132.5343	253.376554	120.842254	155.591318	181.687913	26.0965945
380	143.963246	275.197481	131.234235	131.704541	254.158025	122.453484	155.278631	181.72318	26.4445491

385	143.872	276.833001	132.961002	130.865652	254.930366	124.064714	154.963331	181.755835	26.7925037
390	143.768536	278.456304	134.687768	130.017864	255.693809	125.675944	154.645538	181.785996	27.1404583
395	143.653105	280.067639	136.414534	129.161401	256.448576	127.287174	154.325361	181.813774	27.4884129
400	143.525947	281.667248	138.1413	128.296478	257.194883	128.898404	154.002907	181.839274	27.8363675
405	143.387298	283.255364	139.868067	127.423302	257.932937	130.509634	153.678275	181.862597	28.1843221
410	143.237382	284.832215	141.594833	126.542072	258.662937	132.120865	153.35156	181.883837	28.5322767
415	143.07642	286.398019	143.321599	125.65298	259.385075	133.732095	153.022853	181.903084	28.8802313
420	142.904622	287.952988	145.048365	124.756211	260.099536	135.343325	152.692238	181.920424	29.2281859
425	142.722196	289.497328	146.775132	123.851943	260.806498	136.954555	152.359798	181.935939	29.5761405
430	142.52934	291.031238	148.501898	122.940349	261.506134	138.565785	152.02561	181.949705	29.924095
435	142.326247	292.554911	150.228664	122.021595	262.19861	140.177015	151.689748	181.961798	30.2720496
440	142.113105	294.068535	151.95543	121.095841	262.884085	141.788245	151.352281	181.972286	30.6200042
445	141.890096	295.572292	153.682197	120.163241	263.562716	143.399475	151.013277	181.981236	30.9679588
450	141.657396	297.066358	155.408963	119.223947	264.234652	145.010705	150.672799	181.988713	31.3159134
455	141.415176	298.550905	157.135729	118.278102	264.900037	146.621935	150.330908	181.994776	31.663868
460	141.163604	300.026099	158.862495	117.325847	265.559012	148.233165	149.987661	181.999484	32.0118226
465	140.902841	301.492102	160.589262	116.367317	266.211712	149.844395	149.643114	182.002891	32.3597772
470	140.633044	302.949072	162.316028	115.402643	266.858269	151.455625	149.29732	182.005052	32.7077318
475	140.354366	304.39716	164.042794	114.431953	267.498808	153.066855	148.950328	182.006014	33.0556864
480	140.066956	305.836517	165.76956	113.455368	268.133454	154.678085	148.602187	182.005828	33.403641
485	139.770959	307.267286	167.496327	112.473009	268.762325	156.289315	148.252943	182.004538	33.7515956
490	139.466516	308.689608	169.223093	111.484991	269.385536	157.900545	147.902639	182.002189	34.0995502
495	139.153762	310.103621	170.949859	110.491425	270.0032	159.511775	147.551317	181.998822	34.4475048
500	138.832833	311.509458	172.676625	109.49242	270.615426	161.123006	147.199019	181.994478	34.7954594
505	138.503858	312.907249	174.403392	108.488082	271.222318	162.734236	146.845781	181.989194	35.1434139
510	138.166963	314.297121	176.130158	107.478513	271.823979	164.345466	146.49164	181.983009	35.4913685
515	137.822272	315.679196	177.856924	106.463812	272.420508	165.956696	146.136633	181.975956	35.8393231

520	137.469905	317.053596	179.58369	105.444076	273.012002	167.567926	145.780791	181.968069	36.1872777
525	137.10998	318.420437	181.310457	104.419397	273.598553	169.179156	145.424149	181.959381	36.5352323
530	136.742611	319.779834	183.037223	103.389868	274.180254	170.790386	145.066737	181.949923	36.8831869
535	136.367909	321.131898	184.763989	102.355576	274.757192	172.401616	144.708583	181.939725	37.2311415
540	135.985983	322.476739	186.490755	101.316608	275.329454	174.012846	144.349718	181.928814	37.5790961
545	135.59694	323.814462	188.217522	100.273046	275.897122	175.624076	143.990167	181.917218	37.9270507
550	135.200883	325.145171	189.944288	99.2249727	276.460279	177.235306	143.629958	181.904963	38.2750053
555	134.797914	326.468968	191.671054	98.1724668	277.019003	178.846536	143.269115	181.892075	38.6229599
560	134.38813	327.785951	193.39782	97.1156052	277.573371	180.457766	142.907663	181.878577	38.9709145
565	133.97163	329.096216	195.124587	96.054463	278.123459	182.068996	142.545624	181.864493	39.3188691
570	133.548506	330.399859	196.851353	94.989113	278.669339	183.680226	142.183021	181.849845	39.6668237
575	133.118852	331.696971	198.578119	93.9196264	279.211083	185.291456	141.819876	181.834654	40.0147783
580	132.682758	332.987643	200.304885	92.8460724	279.748759	186.902686	141.456208	181.818941	40.3627329
585	132.24031	334.271962	202.031652	91.7685185	280.282435	188.513916	141.092038	181.802725	40.7106874
590	131.791597	335.550015	203.758418	90.6870303	280.812177	190.125147	140.727384	181.786026	41.058642
595	131.336701	336.821886	205.485184	89.601672	281.338049	191.736377	140.362265	181.768862	41.4065966

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1. EFICIENCIA DE SUDS PARA LOS DISTINTOS PARÁMETROS DE ANÁLISIS (ELLIS <i>ET AL.</i> , 2011).....	18
TABLA 2-2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SUDS (URBONAS & ROESNER, 1992) .....	22
TABLA 2-3. TASAS TÍPICAS DE REMOCIÓN EN (%) (SCHUELER, 1992) .....	23
TABLA 3-1. RELACIÓN NÚMERO DE CURVA DE ESCORRENTÍA SEGÚN EL USO DEL SUELO (CHOW <i>ET AL.</i> , 1994) .....	31
TABLA 3-2. CLASIFICACIÓN DEL SUELO SEGÚN LA SCS (MODIFICADO DE CHOW <i>ET AL.</i> , 1994).....	31
TABLA 3-3. ECUACIONES PARA CURVAS IDF .....	34
TABLA 3-4. FUENTES MÁS COMUNES DE CONTAMINACIÓN DEL AGUA (EPA, 1999B).....	40
TABLA 3-5. CARGAS TÍPICAS DE CONTAMINANTES DE LA ESCORRENTÍA EN DIFERENTES ZONAS URBANIZADAS, EN (LB /HA-AÑO) (HORNER <i>ET AL.</i> , 1991).....	41
TABLA 3-6. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES QUE TIENEN LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA Y LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (MG/L) (EPA, 1999B).....	41
TABLA 4-1. DISTANCIAS MÍNIMAS ENTRE EL SISTEMA DE INFILTRACIÓN PARA DISTINTAS ESTRUCTURAS.....	47
TABLA 4-2. CRITERIOS DE SELECCIÓN (ADAPTADO DE WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007) ...	48
TABLA 5-1. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA A PARTIR DEL MÉTODO (SSHM) (ADAPTADO DE PITT, 2003) .....	54
TABLA 5-2. ESQUEMA DE LOS MÉTODOS SIMPLIFICADOS (AZZOUT <i>ET AL.</i> , 1994) .....	55
TABLA 5-3. COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA DE ÁREAS HOMOGÉNEAS.....	57
TABLA 5-4. POROSIDAD SEGÚN EL MATERIAL (WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007).....	64
TABLA 5-5. DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN (WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007) .....	68
TABLA 5-6. PASOS PARA CALCULAR EL VOLUMEN MÁXIMO DEMANDADO (BRE, 1991) ...	74
TABLA 5-7. SUELOS CON BUENAS TASAS DE INFILTRACIÓN (WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007).....	83
TABLA 6-1. VELOCIDAD MÁXIMA SEGÚN EL SUELO (CIRIA C697, 2007) .....	87
TABLA 6-2. LÍMITES SEGÚN EL SISTEMA DE CONTROL DE SEDIMENTOS (CIRIA C697, 2007) .....	88
TABLA 6-3. ACTIVIDADES DEL PROGRAMA DE CONSTRUCCIÓN (ADAPTADO DE CIRIA C697, 2007) .....	91
TABLA 7-1. MANTENIMIENTO SEGÚN LA FRECUENCIA (CIRIA C697, 2007) .....	95
TABLA 8-1. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD LA DURACIÓN Y LA ALTURA DE PRECIPITACIÓN PARA EL CASO DE LA ZONA DE ESTUDIO EN BOGOTÁ.....	103
TABLA 8-2. RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD, LA DURACIÓN Y LA PROFUNDIDAD DEMANDADA PARA EL CASO DE ESTUDIO DE BOGOTÁ .....	106
TABLA 8-3. RELACIÓN ENTRE LA DURACIÓN E INTENSIDAD DEL EVENTO CON RESPECTO AL COEFICIENTE A Y LA ALTURA DEMANDADA PARA BOGOTÁ.....	109
TABLA 8-4. CURVA IDF DE TALBOT PARA DISTINTOS INTERVALOS EN LA ZONA DE APLICACIÓN DE BOGOTÁ .....	110
TABLA 8-5. COEFICIENTES PARA LA CURVA TIPO TALBOT SEGÚN EL INTERVALO DE TIEMPO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE BOGOTÁ.....	111
TABLA 8-6. COEFICIENTES $K_1$ Y $K_2$ PARA LOS DIFERENTES INTERVALOS EN LA ZONA DE ESTUDIO DE BOGOTÁ .....	112
TABLA 8-7. RELACIÓN ENTRE LA DURACIÓN E INTENSIDAD DEL EVENTO CON EL VOLUMEN $W$ GENERADO .....	117
TABLA 8-8. RELACIÓN ENTRE LA DURACIÓN DEL EVENTO Y EL VOLUMEN GENERADO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE BOGOTÁ .....	121
TABLA 8-9. DATOS DE ENTRADA PARA LA ZONA DE ESTUDIO EN CARTAGENA.....	124
TABLA 8-10. COEFICIENTES PARA LA CURVA TIPO TALBOT SEGÚN EL INTERVALO DE TIEMPO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE CARTAGENA.....	125

TABLA 8-11. ANCHOS NECESARIOS PARA LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS DE DIMENSIONAMIENTO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE CARTAGENA .....	125
TABLA 8-12. DATOS DE ENTRADA PARA LA ZONA DE ESTUDIO EN MEDELLÍN .....	128
TABLA 8-13. COEFICIENTES PARA LA CURVA TIPO TALBOT SEGÚN EL INTERVALO DE TIEMPO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE MEDELLÍN .....	129
TABLA 8-14. ANCHOS NECESARIOS PARA LAS DISTINTAS METODOLOGÍAS DE DIMENSIONAMIENTO PARA LA ZONA DE ESTUDIO DE MEDELLÍN .....	129
TABLA 9-1. TABLA DE RESULTADOS PARA CADA METODOLOGÍA EN LAS 3 CIUDADES DE APLICACIÓN .....	131
TABLA 9-2. SITUACIONES COMUNES PARA DIFERENTES METODOLOGÍAS DE DISEÑO ...	134

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. PROCESO DE URBANIZACIÓN CRECIENTE EN EL MUNDO (NACIONES UNIDAS, 2004).....	8
FIGURA 1-2. FACTORES CLIMÁTICOS DE LAS ZONAS TROPICALES (GALARZA & GARZÓN, 2005).....	9
FIGURA 2-1. ESQUEMA GENERAL DE TRINCHERAS (PROTON <i>ET AL.</i> , 2008).....	13
FIGURA 2-2. ESQUEMA TRINCHERAS DE INFILTRACIÓN (ADAPTADO DE WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007).....	15
FIGURA 2-3. ESQUEMA TRINCHERAS DE RETENCIÓN (ADAPTADO DE WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007).....	16
FIGURA 2-4. EFECTIVIDAD DE DIFERENTES SUDS EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA (ELLIS <i>ET AL.</i> , 2011).....	17
FIGURA 2-5. HIDROGRAMAS AGUAS ABAJO DEL PARQUE APEADERO ANTES DE LA ACTUACIÓN (T=10 AÑOS) (ALTAREJOS, 2007).....	19
FIGURA 2-6. HIDROGRAMAS AGUAS ABAJO DEL PARQUE APEADERO DESPUÉS DE LA ACTUACIÓN (ALTAREJOS, 2007).....	19
FIGURA 2-7. MEJORA EN EL HIDROGRAMA DESBORDADO AGUAS ABAJO DEL PARQUE APEADERO (ALTAREJOS ., 2007).....	20
FIGURA 2-8. MEJORA EN LA CAPACIDAD DE DESAGÜE AGUAS ABAJO DEL PARQUE APEADERO (ALTAREJOS, 2007).....	20
FIGURA 2-9. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN FUNCIÓN DEL MANTENIMIENTO (SCHLUTER, 1992).....	21
FIGURA 2-10. SECCIÓN TRANSVERSAL DE TRINCHERA DE INFILTRACIÓN (ADAPTADO DE VERMONT STORMWATER MANAGEMENT MANUAL 1, 2002).....	22
FIGURA 2-11. TRINCHERA DE INFILTRACIÓN CON PRE-TRATAMIENTO (VERMONT STORMWATER MANAGEMENT MANUAL 1, 2002).....	24
FIGURA 2-12. ESQUEMA DE EVACUACIÓN DE LA ESCORRENTÍA POR UNA TRINCHERA DE RETENCIÓN (PROTON <i>ET AL.</i> , 2008).....	25
FIGURA 2-13. SECCIÓN TRANSVERSAL DE TRINCHERA DE RETENCIÓN (ADAPTADO DE VERMONT STORMWATER MANAGEMENT MANUAL 1, 2002).....	25
FIGURA 3-1. MÉTODO DE ABSTRACCIONES DE PRECIPITACIÓN DEL SCS (CHOW <i>ET AL.</i> , 1994).....	29
FIGURA 3-2. CURVAS INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA PARA LLUVIA MÁXIMA EN CHICAGO, ESTADOS UNIDOS (CHOW <i>ET AL.</i> , 1994).....	33
FIGURA 3-3. CURVAS DE ALTURA-DURACIÓN-FRECUENCIA (HDF) (ADAPTADO DE AZZOUT <i>ET AL.</i> , 1994).....	35
FIGURA 3-4. FLUJO EN CANALES ABIERTOS (ADAPTADO DE CHOW <i>ET AL.</i> , 2004).....	36
FIGURA 3-5. DIAGRAMA DE FASE DEL AGUA (SHACKERLORD F., 1998).....	38
FIGURA 3-6. EFECTO DE LA URBANIZACIÓN SOBRE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL (ADAPTADO DE ARNOLD & GIBBONS, 1996).....	39
FIGURA 4-1. GUÍA DE DECISIÓN PARA EL USO DE SISTEMAS DE INFILTRACIÓN (ADAPTADO DE CIRIA C697, 2007).....	51
FIGURA 5-1. CURVAS DE INTENSIDAD-DURACIÓN-FRECUENCIA (IDF) (ADAPTADO AZZOUT <i>ET AL.</i> , 1994).....	58
FIGURA 5-2. CURVAS DE ALTURA-DURACIÓN-FRECUENCIA (ADAPTADO AZZOUT <i>ET AL.</i> , 1994).....	59
FIGURA 5-3. SUPERPOSICIÓN DE LA CURVA ALTURA-DURACIÓN PARA UNA FRECUENCIA ELEGIDA Y LA CURVA DE EVACUACIÓN (ADAPTADO AZZOUT <i>ET AL.</i> , 1994).....	60
FIGURA 5-4. CURVA DE ALTURAS ACUMULADAS EN UN AÑO.....	61
FIGURA 5-5. CURVAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ALTURA ESPECÍFICA.....	62
FIGURA 5-6. MÁXIMA PROFUNDIDAD SISTEMAS DE INFILTRACIÓN EN 3D (WOODS-BALLARD <i>ET AL.</i> , 2007).....	67
FIGURA 5-7. RESUMEN DE FÓRMULAS DE DIMENSIONAMIENTO (A. LOPES & J. AYRUCH, 2007).....	73
FIGURA 5-8. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE $C_s$ (AGUADO & ALBERT., 1994).....	78

FIGURA 5-9. ESQUEMA DE UNA CUNETETA VERDE (VERMONT STORMWATER MANAGEMENT MANUAL 2, 2002).....	82
FIGURA 6-1. GEO TEXTIL (TOMADO DE: <a href="http://hogar.pisos.com">HTTP://HOGAR.PISOS.COM</a> ).....	85
FIGURA 6-2. GEO MEMBRANA (TOMADO DE: <a href="http://grupoagrilmarsac.blogspot.com">HTTP://GRUPOAGRINMARSAC.BLOGSPOT.COM</a> ).....	85
FIGURA 6-3. CILINDROS HUECOS (PROTON <i>ET AL.</i> , 2008)      FIGURA 6-4. GRAVAS (PROTON <i>ET AL.</i> , 2008).....	86
FIGURA 8-1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS. FOTOGRAFÍA TOMADA DE <a href="http://maps.google.com">MAPS.GOOGLE.COM</a> .....	98
FIGURA 8-2. EVOLUCIÓN DEL VOLUMEN GENERADO Y EL VOLUMEN INFILTRADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LA ZONA DE ESTUDIO BOGOTÁ.....	105
FIGURA 8-3. PROFUNDIDAD DE LA TRINCHERA PARA DIFERENTES INTERVALOS EN LA ZONA DE ESTUDIO DE BOGOTÁ.....	113
FIGURA 8-4. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES DEL ÁREA DE APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS. FOTOGRAFÍA TOMADA DE <a href="http://maps.google.com">MAPS.GOOGLE.COM</a> .....	122
FIGURA 8-5. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PRELIMINARES DEL ÁREA DE APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS. FOTOGRAFÍA TOMADA DE <a href="http://maps.google.com">MAPS.GOOGLE.COM</a> .....	126
FIGURA 9-1. ALTURA INFILTRADA Y PRECIPITACIÓN TOTAL DEL EVENTO EN FUNCIÓN DE LA DURACIÓN DEL EVENTO.....	135