



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

***“Sistemas de filtración como sub base de jardines para desviación y  
recuperación de agua de lluvia en edificios”***

**T E S I S**

Que para obtener el título de

***“Ingeniero Civil”***

Presenta

**Francisco José Campos Arizmendi**

Director: Dr. Oscar González Barceló



Ciudad Universitaria, D. F.

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**A mis padres Javier y Virginia**

Sin cuyo incondicional apoyo y excelente crianza no hubiese sido capaz de lograrlo, gracias por estar siempre conmigo.

**A mis hermanos Javier y Rodrigo**

Sin cuya compañía e influencia, no sería la persona que soy, ni tendría el carácter y convicción que poseo.

**A mis profesores**

Porque gracias a sus conocimientos y gran dominio de sus materias he logrado adquirir gran conocimiento que me servirá de mucho en mi futura formación profesional.

**A mi asesor Dr. Oscar González Barceló**

Por su paciencia, participación y gran disposición en la elaboración del presente trabajo

**A la Facultad de ingeniería UNAM**

Agradezco su formación integral y la gran calidad de enseñanza. Además agradezco por el gran ambiente de trabajo, estudio y socialización durante mi estadía en esta institución.

<b>ÍNDICE</b>	
<b>Objetivos</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES DE HIDROLOGÍA SUPERFICIAL</b>	6
<b>1.1 PRECIPITACIÓN</b>	7
1.2.1 <i>Definiciones</i>	7
1.2.2 <i>Mediciones de precipitaciones</i>	12
1.2.3 <i>Análisis de los datos de precipitación</i>	20
1.2.4 <i>Tormentas de diseño</i>	30
<b>1.2 INFILTRACIÓN</b>	36
1.2.1 <i>Definiciones</i>	37
1.2.2 <i>Métodos para el cálculo de la infiltración</i>	37
1.2.3 <i>Medición de la infiltración</i>	38
<b>1.3 ESCURRIMIENTO</b>	40
1.3.1 <i>Aforo</i>	43
1.3.1.1 <i>Sección control</i>	44
1.3.1.2 <i>Relación sección-pendiente</i>	45
1.3.1.3 <i>Nociones generales de canales rectangulares</i>	47
<b>1.4 EVAPORACIÓN</b>	50
1.4.1 <i>Definiciones</i>	50
1.4.2 <i>Fórmulas empíricas para el cálculo</i>	51
1.4.3 <i>Medición de la evaporación</i>	51
<b>1.5 BALANCE DE AGUA</b>	52
<b>CAPÍTULO 2 PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO</b>	54
<b>2.1 JUSTIFICACIÓN</b>	55
<b>2.2 DESARROLLO</b>	56
<b>CAPÍTULO 3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS DE LUVIA</b>	62
<b>3.1 MÉTODOS PARA RECABAR INFORMACIÓN</b>	63
<b>3.2 PRESENTACIÓN ORDENADA DE LOS DATOS</b>	64
<b>3.3 PLANTEAMIENTO DE LA RELEVANCIA DE LOS DATOS RECABADOS</b>	66
<b>3.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS MEDIANTE MÉTODOS PERTINENTES</b>	67
<b>3.5 LLUVIA DE DISEÑO</b>	70
<b>CAPÍTULO 4 DISEÑO</b>	71
<b>4.1 CONDICIONES Y CONSIDERACIONES INICIALES</b>	72
4.1.1 <i>Hidrogramas</i>	74
<b>4.2 PLANTEAMIENTO DEL ARREGLO EN FORMA GENERAL</b>	83
4.2.1 <i>Descripción del sistema y su funcionamiento</i>	83
4.2.2 <i>Descripción de las partes del sistema</i>	84
4.2.2.1 <i>Jardines para filtración y retención</i>	84
4.2.2.2 <i>Vertedor</i>	85

4.2.2.3 Lecho filtrante	85
4.2.2.4 Manejo de excedencias	86
4.2.3 Arreglo general	86
<b>4.3 DIMENSIONAMIENTO ACORDE A LOS DATOS RECABADOS</b>	87
4.3.1 Dimensionamiento final del sistema	96
<b>CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	97
5.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA	98
5.2 INFLUENCIA DEL SISTEMA EN PROPÓSITOS DEL PROYECTO	100
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES</b>	102
6.1 COMENTARIOS	105
6.2 REFERENCIAS	106
ANEXOS	107
Glosario	108
Planos y diagramas	110

### **Objetivo General**

Desarrollar un sistema de aprovechamiento sustentable del agua de precipitaciones pluviales locales utilizando sistemas de captación y filtración viables para el reuso en sistemas que no requieran la calidad de potable.

### **Objetivos específicos**

Desarrollar un sistema hidráulico de captación, filtración y conducción de agua de lluvia, con base en los principios hidráulicos e hidrológicos pertinentes, con el propósito de obtener el mayor aprovechamiento posible a partir de un sistema simplificado.

Desarrollar un sistema hidráulico de filtrado *in situ* en el área de captación para el uso general del agua en servicios secundarios de los edificios.

Desarrollar una metodología para estimar la fracción aprovechable de agua de lluvia con respecto a las precipitaciones totales de la zona.

Diseñar un sistema de jardineras filtrantes, áreas verdes con subbase de filtración, incluyendo los dispositivos utilizados para interconexión, vertido de demasías, bajodrenes y conducción al sistema de almacenamiento.

## Introducción

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un proyecto para el aprovechamiento sustentable del agua de lluvia con opciones para utilización en las necesidades de un edificio con área o extensión de terreno limitada y; en consecuencia, para amortiguamiento de gastos picos de los escurrimientos. Lo anterior con el propósito de desarrollar un método genérico para el aprovechamiento de los recursos hidrológicos en inmuebles de características semejantes.

Dentro del escrito se presentan los resultados, primordialmente del trabajo de investigación realizado para sentar las bases dentro del ámbito teórico, necesarias para delimitar el contexto de trabajo.

Es pertinente mencionar que el proyecto surgió para su realización dentro del área metropolitana del valle de México, es decir en la zona del Distrito Federal y el estado de México. Por lo tanto es necesario tomar en cuenta las condiciones climatológicas y el contexto en el cual se ambienta el inmueble.

Dentro del contexto de la zona geográfica de la ciudad de México es recurrente la mención del problema de escasez de agua para los usos domésticos diarios por parte de la población ya que son estos usos a los que se destina la mayoría del agua que se abastece a la ciudad. Se debe tomar en cuenta al abordar esta problemática que la falta del agua para el abastecimiento no es necesariamente un sinónimo de falta del recurso, más bien refleja la ineficacia en su administración ya que la cuenca del valle de México es una zona rebosante del líquido vital, lo cual hace que el hablar de escases en dicha zona sea una situación casi risible.

Actualmente la zona del Distrito Federal y la del estado de México reciben abastecimiento por parte de dos tipos de fuentes y en un porcentaje distinto por parte de cada una. Primero que nada, se menciona que aproximadamente el 70% del agua total suministrada proviene de diversos pozos ubicados por toda la zona de la cuenca del valle de México, y el otro 30% es suministrado desde las cuencas del Lerma y Cutzamala, solo un pequeño

porcentaje de éste último es suministrado por el agua superficial de la cuenca del valle de México.

Ambas fuentes presentan diversos problemas de sobreexplotación y altos costos por la conducción desde las otras fuentes, entre otros factores. También puede mencionarse que la sobreexplotación de los acuíferos de la cuenca del valle de México conlleva no solo al agotamiento de las reservas del mismo, sino también a problemas de hundimientos del subsuelo del valle de México.

El tratamiento que debe darse al agua proveniente de las principales fuentes también es un factor a considerar ya que el agua debe recibir múltiples tratamientos entre los cuales se cuentan la precloración, la sedimentación y floculación además de la desinfección con el fin de alcanzar la calidad establecida por la Norma Oficial Mexicana 127 de la Secretaría de Salud. Está claro que todos estos tratamientos implican un costo, además de que la calidad establecida por esta norma maneja únicamente límites permisibles para el consumo del agua, por lo general la mayoría del uso del agua no se da en el ámbito del consumo, sino dentro del área de sanidad para lo cual tal vez no es necesaria la calidad establecida por la norma.

Si se observa con detenimiento el uso doméstico que se le da al agua potable dentro de la ciudad de México se pueden determinar las siguientes cifras aproximadas que ilustran parte de la problemática:

- 40% para el uso de excusados
- 30% para aseo personal
- 15% para el lavado de ropa
- 5% para bebida y comida
- 4% para otros usos

Analizando los estimados anteriores se logra una observación importante, que consiste en señalar que prácticamente la mitad del agua para uso doméstico se utiliza para fines sanitarios y más concretamente en el uso diario del inodoro. Cabe mencionar que para el uso sanitario, la calidad del agua abastecida y señalada por la NOM 127 SSA es excesiva. Esto se traduce en un claro desperdicio del agua potable la cual no solo recibe un mal uso, sino que también se refleja en tratamientos y gastos innecesarios.



Tomando en cuenta lo anterior debe considerarse una solución que permita mitigar este problema con los recursos ya existentes en la zona. Ya que es bien sabido que en la ciudad de México existen recursos desperdiciados en cuanto a aprovechamiento pluvial.

Primero que nada se debe mencionar el hecho de que en la ciudad de México el aprovechamiento pluvial es prácticamente nulo. Esto es debido a que el agua de las precipitaciones, entre ellas abundantes tormentas que tienen lugar en la zona, es desviada directamente al drenaje donde a falta de una separación para las aguas de diversas calidades, se ve mezclada con el agua residual. Esto provoca que el tratamiento resulte costoso, a diferencia de los requerimientos si se utilizara un drenaje separado para el agua de las precipitaciones. Ésta podría ser reutilizada para funciones diversas con un tratamiento más simple que para potabilización.

El trabajo aquí presentado se enfoca a mitigar la problemática inicial de proporcionar una calidad excesiva del agua para el uso sanitario. Es por esto que la solución presentada o sugerida es la captación, filtración, almacenamiento y conducción del agua de lluvia para los usos sanitarios básicos.

Como la solución debe ser a corto plazo y por lo tanto no es viable proponer la construcción de un nuevo sistema de drenaje en la ciudad para estos fines, esta medida puede ser implementada de manera particular. Por tal motivo este trabajo de investigación se centra en la aplicación de un sistema de recolección únicamente para edificios que ocupen un área determinada, con el fin de proporcionar una solución genérica y altamente aplicable en un lapso significativamente corto y con una eficiencia aceptable.

La solución propone, esencialmente, la captación del agua de lluvia con un tratamiento posterior para su aprovechamiento. El tratamiento consiste principalmente en filtración a través de un lecho de materiales porosos con el fin de remover los sólidos suspendidos.

### **Objetivo General**

Desarrollar un sistema de aprovechamiento sustentable del agua de precipitaciones pluviales locales utilizando sistemas de captación y filtración viables para el reuso en sistemas que no requieran la calidad de potable.

### **Objetivos específicos**

Desarrollar un sistema hidráulico de captación, filtración y conducción de agua de lluvia, con base en los principios hidráulicos e hidrológicos pertinentes, con el propósito de obtener el mayor aprovechamiento posible a partir de un sistema simplificado.

Desarrollar un sistema hidráulico de filtrado *in situ* en el área de captación para el uso general del agua en servicios secundarios de los edificios.

Desarrollar una metodología para estimar la fracción aprovechable de agua de lluvia con respecto a las precipitaciones totales de la zona.

Diseñar un sistema de jardineras filtrantes, áreas verdes con subbase de filtración, incluyendo los dispositivos utilizados para interconexión, vertido de demasías, bajodrenes y conducción al sistema de almacenamiento.

## Introducción

El presente trabajo consiste en el desarrollo de un proyecto para el aprovechamiento sustentable del agua de lluvia con opciones para utilización en las necesidades de un edificio con área o extensión de terreno limitada y; en consecuencia, para amortiguamiento de gastos picos de los escurrimientos. Lo anterior con el propósito de desarrollar un método genérico para el aprovechamiento de los recursos hidrológicos en inmuebles de características semejantes.

Dentro del escrito se presentan los resultados, primordialmente del trabajo de investigación realizado para sentar las bases dentro del ámbito teórico, necesarias para delimitar el contexto de trabajo.

Es pertinente mencionar que el proyecto surgió para su realización dentro del área metropolitana del valle de México, es decir en la zona del Distrito Federal y el estado de México. Por lo tanto es necesario tomar en cuenta las condiciones climatológicas y el contexto en el cual se ambienta el inmueble.

Dentro del contexto de la zona geográfica de la ciudad de México es recurrente la mención del problema de escasez de agua para los usos domésticos diarios por parte de la población ya que son estos usos a los que se destina la mayoría del agua que se abastece a la ciudad. Se debe tomar en cuenta al abordar esta problemática que la falta del agua para el abastecimiento no es necesariamente un sinónimo de falta del recurso, más bien refleja la ineficacia en su administración ya que la cuenca del valle de México es una zona rebosante del líquido vital, lo cual hace que el hablar de escases en dicha zona sea una situación casi risible.

Actualmente la zona del Distrito Federal y la del estado de México reciben abastecimiento por parte de dos tipos de fuentes y en un porcentaje distinto por parte de cada una. Primero que nada, se menciona que aproximadamente el 70% del agua total suministrada proviene de diversos pozos ubicados por toda la zona de la cuenca del valle de México, y el otro 30% es suministrado desde las cuencas del Lerma y Cutzamala, solo un pequeño

porcentaje de éste último es suministrado por el agua superficial de la cuenca del valle de México.

Ambas fuentes presentan diversos problemas de sobreexplotación y altos costos por la conducción desde las otras fuentes, entre otros factores. También puede mencionarse que la sobreexplotación de los acuíferos de la cuenca del valle de México conlleva no solo al agotamiento de las reservas del mismo, sino también a problemas de hundimientos del subsuelo del valle de México.

El tratamiento que debe darse al agua proveniente de las principales fuentes también es un factor a considerar ya que el agua debe recibir múltiples tratamientos entre los cuales se cuentan la precloración, la sedimentación y floculación además de la desinfección con el fin de alcanzar la calidad establecida por la Norma Oficial Mexicana 127 de la Secretaría de Salud. Está claro que todos estos tratamientos implican un costo, además de que la calidad establecida por esta norma maneja únicamente límites permisibles para el consumo del agua, por lo general la mayoría del uso del agua no se da en el ámbito del consumo, sino dentro del área de sanidad para lo cual tal vez no es necesaria la calidad establecida por la norma.

Si se observa con detenimiento el uso doméstico que se le da al agua potable dentro de la ciudad de México se pueden determinar las siguientes cifras aproximadas que ilustran parte de la problemática:

- 40% para el uso de excusados
- 30% para aseo personal
- 15% para el lavado de ropa
- 5% para bebida y comida
- 4% para otros usos

Analizando los estimados anteriores se logra una observación importante, que consiste en señalar que prácticamente la mitad del agua para uso doméstico se utiliza para fines sanitarios y más concretamente en el uso diario del inodoro. Cabe mencionar que para el uso sanitario, la calidad del agua abastecida y señalada por la NOM 127 SSA es excesiva. Esto se traduce en un claro desperdicio del agua potable la cual no solo recibe un mal uso, sino que también se refleja en tratamientos y gastos innecesarios.

Tomando en cuenta lo anterior debe considerarse una solución que permita mitigar este problema con los recursos ya existentes en la zona. Ya que es bien sabido que en la ciudad de México existen recursos desperdiciados en cuanto a aprovechamiento pluvial.

Primero que nada se debe mencionar el hecho de que en la ciudad de México el aprovechamiento pluvial es prácticamente nulo. Esto es debido a que el agua de las precipitaciones, entre ellas abundantes tormentas que tienen lugar en la zona, es desviada directamente al drenaje donde a falta de una separación para las aguas de diversas calidades, se ve mezclada con el agua residual. Esto provoca que el tratamiento resulte costoso, a diferencia de los requerimientos si se utilizara un drenaje separado para el agua de las precipitaciones. Ésta podría ser reutilizada para funciones diversas con un tratamiento más simple que para potabilización.

El trabajo aquí presentado se enfoca a mitigar la problemática inicial de proporcionar una calidad excesiva del agua para el uso sanitario. Es por esto que la solución presentada o sugerida es la captación, filtración, almacenamiento y conducción del agua de lluvia para los usos sanitarios básicos.

Como la solución debe ser a corto plazo y por lo tanto no es viable proponer la construcción de un nuevo sistema de drenaje en la ciudad para estos fines, esta medida puede ser implementada de manera particular. Por tal motivo este trabajo de investigación se centra en la aplicación de un sistema de recolección únicamente para edificios que ocupen un área determinada, con el fin de proporcionar una solución genérica y altamente aplicable en un lapso significativamente corto y con una eficiencia aceptable.

La solución propone, esencialmente, la captación del agua de lluvia con un tratamiento posterior para su aprovechamiento. El tratamiento consiste principalmente en filtración a través de un lecho de materiales porosos con el fin de remover los sólidos suspendidos.

Claro que esta propuesta limita el uso del agua recolectada únicamente para servicio de excusados o mingitorios, debido a que el tratamiento simple y de bajo costo, no provee al agua la calidad necesaria para otras funciones como la higiene personal, sin embargo el trabajo es un avance significativo en cuestiones de optimización del uso del agua.

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES DE HIDROLOGÍA

### SUPERFICIAL

## 1.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación, mejor conocida como lluvia, es uno de los fenómenos más importantes en los ámbitos del abastecimiento y control del agua. Esto es debido a la gran influencia que tiene en la hidrología y en general en todo ecosistema ya sea por su presencia o ausencia. Regresando al enfoque más técnico, y más concretamente desde el punto de vista de la ingeniería, la precipitación tiene su importancia directamente sobre el suministro de agua, que es necesario para el sustento de las principales poblaciones, esto sucede porque las fuentes de abastecimiento requieren precipitaciones favorables, como puede ser desde la recarga del vaso de una obra hidráulica como también, de los mantos freáticos.

A continuación se dan a conocer conceptos y definiciones relacionados con la precipitación y con su estudio, que son de utilidad para el actual proyecto.

### *1.1.1 Definiciones*

**Precipitación:** Se refiere a la caída de agua a la superficie terrestre, esto es debido a la condensación del agua desde los cuerpos de agua como ríos, lagos y el océano. La precipitación concierne a todas las formas que pueda adoptar el agua atmosférica con lo cual se incluye no solo lluvia sino también nieve, granizo, neblina etc.

**Ciclo hidrológico:** Para comprender mejor las precipitaciones, hay que considerarlas como parte de un proceso mucho más complejo, ya que las condiciones para que existan se encuentran distribuidas en una serie de sucesos a los cuales se les llama ciclo hidrológico.

**Tormenta:** Suceso meteorológico en el cual se delimitan las precipitaciones durante un periodo de tiempo para su registro y estudio.

**Altura de precipitación:** Valor representativo de la cantidad de lluvia presentada en una tormenta.



Presión atmosférica: La presión se define como el resultado de aplicar una fuerza a un área determinada. En el estudio de los fluidos se ha establecido que la presión que este ejerce en los límites de su forma es equivalente al peso de una columna virtual compuesta por el fluido que está en contacto con el área mencionada en su punto más bajo. Es por esto que la presión atmosférica se ha definido como el peso de la columna de aire considerando dicha columna desde la superficie de estudio hasta los límites de la atmósfera.

Siguiendo este razonamiento se puede decir que la presión atmosférica varía en magnitud a proporción inversa a la altitud de la superficie en estudio. Es decir que a mayor altitud menor será la presión atmosférica ejercida por la columna de aire. La altura es medida tomando como referencia el nivel del mar.

La mayor presión atmosférica registrada es, como ya se ha mencionado la que se presenta a nivel del mar, existen dispositivos que pueden medir la magnitud de la presión actuante con bastante precisión. Estos son llamados barómetros los cuales funcionan creando una interfaz entre cierta cantidad de mercurio y el aire del ambiente. Posteriormente se hace una comparación entre la altura de la columna de mercurio producida por la interacción y se determina la presión necesaria para haber elevado el mercurio hasta dicho punto.

La presión atmosférica máxima registrada se ha fijado en una columna de 760 mm de mercurio. Este valor ha presentado varias equivalencias y se han propuesto varias unidades de medición para su estudio como por ejemplo:

$$1bar = 760mmHg \quad \text{Bares}$$

$$1atm = 1.033 \frac{kg}{cm^2} \quad \text{Atmósferas}$$

Por supuesto las unidades tienen equivalencias entre ellas, de hecho se ha establecido una fórmula para calcular la presión atmosférica teniendo como dato inicial la altitud de la zona de estudio con respecto al nivel del mar la cual se enuncia a continuación:

$$p = 1013.2 \left( \frac{288 - .0065z}{288} \right)^{5.256}$$

Donde las unidades de altitud expresadas por la variable “z” están expresadas en metros y las unidades de presión de la variable “p” se expresan en mb, es decir milibares.

Presión de Vapor: Como se ha explicado anteriormente los gases en el aire generan determinada presión sobre la superficie es así como surge el concepto de presión de vapor. Este concepto no es muy distinto de la presión atmosférica sin embargo existen varios factores particulares que deben ser tomados en cuenta. Como se sabe la atmósfera es una mezcla de varios gases en conjunto, como son el oxígeno, el hidrógeno y el dióxido de carbono por mencionar algunos, sin embargo el valor buscado como presión de vapor es aquel que solo toma en cuenta la cantidad o concentración de vapor en una columna de aire, es decir, sin tomar en cuenta la presencia de los otros gases.

Es así como el peso de una columna de vapor sobre un área es definido como presión de vapor. Los factores que deben ser tomados en cuenta están fundamentados en la ley de adsorción y desorción la cual señala que el intercambio de agua en una fase compuesta por un líquido y un gas, representado análogamente como un cuerpo de agua en contacto con la atmósfera depende de forma importante de las condiciones de presión y temperatura del ambiente, en este caso de la atmósfera. Con base en esta ley se puede afirmar que la presión de vapor puede modificarse si varían éstas condiciones en los dos medios, por esto se puede asumir que a determinadas condiciones de presión y de temperatura existe un valor máximo del vapor que puede aceptar el aire en cuestiones de vapor, esto puede considerarse una saturación del mismo, es por esto que es conocido como punto de rocío.

Humedad absoluta: En cuestiones de las condiciones favorables para la precipitación es necesario que se tenga un porcentaje significativo de humedad en el aire es decir que exista agua evaporada en una cantidad suficiente en el medio para que pueda tener lugar la precipitación. Esto es medido con una serie de coeficientes los cuales representan la cantidad de vapor en un volumen determinado de aire, que es expresado por la fórmula:

$$\rho_v = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{volumen de aire}} = \frac{M_v}{V}$$

Donde  $\rho_v$  es la humedad absoluta.

Agua precipitable: Para comprender este concepto es importante tomar en cuenta la explicación que se dio acerca del punto de rocío y la humedad en el aire ya que ambos son significativos en la determinación del agua precipitable del medio.

Primero, para definir el significado de agua precipitable se debe entender las condiciones que la provocan. Como se ha mencionado, el agua que se encuentra en forma de vapor en el aire no puede seguir aumentando de forma indefinida, sino que dependiendo de las condiciones de presión y temperatura en la zona de estudio existe un determinado límite de agua que el aire puede contener como vapor, para fines de este concepto se define como zona, al área determinada sobre la cual se encuentra una columna de aire específica.

Este límite puede variar dramáticamente en una misma zona, y es lo que hace posible el fenómeno de la precipitación. Haciendo un seguimiento detallado del proceso concerniente del ciclo hidrológico se llega al proceso que se explica a continuación.

En primer lugar, debido al principio de la evaporación, en que el agua bajo condiciones establecidas de presión y temperatura puede alcanzar, si se hace aumentar su temperatura, un punto llamado punto de ebullición a partir del cual el agua empieza a transformarse en vapor mientras su temperatura aumenta y es así como se empieza a saturar el aire del medio con vapor hasta que alcanza su límite.

Lo anterior lleva a la pregunta ¿cuándo se alcanza el límite? La respuesta es evidente mientras se tenga presente lo ya mencionado. Se tendría que contestar que el aire seguirá aceptando el vapor de agua hasta que el mismo alcance el grado de saturación mejor conocido como punto de rocío.

Aún sabiendo la naturaleza del punto de rocío y el límite de vapor en el aire es bastante ambiguo afirmar que el aire llega a saturarse ya que el vapor no permanece en condiciones constantes en el aire, por lo cual el seguimiento del proceso conduce la

atención al medio que contiene el vapor de agua ya que es el mismo que establece las condiciones en las que el vapor fluye e interactúa.

Como se mencionó en el apartado de presión atmosférica, ésta puede variar en proporción inversa a la altitud en que la presión esté siendo medida, a palabras más sencillas, la presión tiene una disminución gradual a medida que la altitud crece. Pero porqué esto es relevante para el fenómeno de la precipitación. La respuesta se encuentra en que al haber menos presión interactuando con el vapor, este empieza a aumentar su volumen. Se sabe por la ley general de los gases que al aumentar el volumen del vapor, este tendrá una disminución en su temperatura.

Esto inducirá el alcance del punto de rocío y comenzará la condensación de la masa de vapor. Esto ocurre debido a que las condiciones de temperatura y presión van cambiando conforme el vapor asciende. Debe recordarse que en condiciones de menor presión y temperatura el punto de rocío es más bajo, es decir, la cantidad de vapor que el aire puede contener se vuelve menor, así que una masa de vapor que ha ascendido hasta cierto punto en el aire y no lo satura, puede llegar a saturarlo a medida que asciende, incluso si la masa de vapor es la misma.

Dicho esto y tomando en cuenta que inicia el fenómeno de condensación, aún así las gotas o mas correctamente partículas de agua que se forman de dicho suceso son demasiado pequeñas entre 5 y 10 micras y por lo tanto su peso despreciable, esto provoca que incluso habiéndose condensado dichas partículas, estas permanezcan suspendidas en el aire.

No es hasta que se forman núcleos de condensación cuando dichas partículas de agua empiezan a unirse unas con otras, se forman gotas de mayor tamaño de 100 a 500 micras que pueden vencer la fricción del aire y finalmente precipitarse hacia la superficie terrestre. Es así como puede concluirse que el agua precipitable del ambiente, corresponde realmente a la magnitud de la masa de vapor presente en el mismo, es decir toda cantidad de agua presente en el aire, tiene la capacidad de precipitarse.

Intensidad: La intensidad de una tormenta está dada por la precipitación existente en la misma. El concepto en sí no es tan simple ya que se debe tomar en cuenta que una tormenta tiene una duración bastante variable con respecto de otros sucesos del mismo tipo y la cantidad de lluvia que se presenta en cada una de ellas no es de ninguna forma proporcional a la duración de las mismas.

Con esto se quiere decir que la intensidad de una tormenta se expresa como la altura de precipitación dada en un determinado periodo de tiempo, las unidades para expresarla por lo general son milímetros por hora. Es así como puede afirmarse que una tormenta intensa es aquella cuya altura de precipitación medida es grande con respecto a su duración, mientras que una tormenta que no lo es, tiene una altura de precipitación pequeña en un periodo de tiempo muy grande en comparación a la anterior.

La expresión para obtener la precipitación es la siguiente:

$$i = \frac{\text{alturadeprecipitación}}{\text{Duración}} = \frac{hp}{T} \left[ \frac{mm}{hr} \right]$$

Curva masa: Esta se refiere a un tipo de gráfica que contrapone la altura de precipitación expresada en milímetros de lluvia, en el eje de las ordenadas, contra el tiempo transcurrido, por lo general expresado en horas, en el eje de las abscisas.

### *1.1.2 Mediciones de precipitaciones*

Una vez conocido el fenómeno de la precipitación el siguiente paso es estudiarla para cuantificarla con el fin de registrar a detalle los aspectos e implicaciones que posee.

Por lo general las mediciones de la precipitación son realizadas en estaciones meteorológicas repartidas de forma sistemática dentro del área de estudio. Dichas estaciones tienen la función de recabar información y datos acerca del estado climático en

una zona determinada, cada estación cumple con ciertos estándares para garantizar la fiabilidad de los datos recabados.

Las estaciones meteorológicas o climatológicas poseen una determinada zona de influencia, es decir, los datos que recopila cada estación son significativos únicamente para una zona específica o de influencia, la información requerida puede provenir de más de una estación, dependiendo de la extensión del área de estudio.

Las estaciones tienen la capacidad de recolectar no solo datos de precipitaciones, sino además trabajan con información concerniente a la evaporación, velocidad del viento, presión atmosférica local, etc.

En lo concerniente a la medición de las precipitaciones existen diversos dispositivos que pueden aportar los datos necesarios para su estudio, ya que los factores que afectan la precipitación, como se describió en el inciso anterior, son variados en número y naturaleza y es de esperar que para la medición de cada uno de ellos exista un instrumento especializado para su medición y un protocolo para el registro y manejo de los datos.

A continuación se mencionan los instrumentos pertinentes y se adjunta una explicación de los principios de su funcionamiento.

### Barómetro

Es un instrumento utilizado para medir la presión atmosférica por medio del principio de diferencia de densidades entre sustancias y la presión que se ejerce en la fase entre estas. De forma más detallada, el barómetro funciona con el principio de las presiones que ejercen entre sí fluidos de diferentes densidades.

Lo primero a tener en cuenta son las condiciones de cada uno de los fluidos, esto es clave para conocer la presión de uno o de otro. Primero que nada se desea saber la presión que ejerce la columna de aire sobre el área de estudio y ya que esta es técnicamente uniforme

debido a su naturaleza gaseosa, solo debe seleccionarse un punto de contacto representativo de la columna de aire. Dicho punto, técnicamente, puede ser cualquiera en el área, mientras se tenga presente que la variación de la altitud es lo que hace variar la presión, así que solo puede limitar a un punto representativo en un plano localizado a la altitud deseada.

Una vez elegido el punto donde se localizará la interfase la pregunta es cómo medir la presión, si técnicamente no puede medirse directamente la columna de aire de una forma conveniente, la respuesta se encuentra en el segundo fluido, de naturaleza conocida el cual proporciona datos iniciales para interpretar los datos.

Se sabe que cuando dos fluidos se encuentren en contacto en un punto, aún cuando estos se encuentran en distintos niveles, ejercen la misma presión en el punto de aplicación una vez alcanzado el equilibrio. También se sabe que la presión ejercida por cada uno de los fluidos en el punto de contacto es equivalente al producto de su peso específico y la altura de la columna de fluido medida desde el nivel actual del fluido hasta la altura del punto de contacto lo cual se expresa de la siguiente forma:

$$P = \rho_{\text{fluido}} g (\Delta h)$$

Donde “ $P$ ” es la presión,  $\rho_{\text{fluido}}$  es la densidad del fluido y  $(\Delta h)$  es la diferencia de alturas entre el punto de aplicación y la superficie de la columna del fluido y  $g$  es la constante de la aceleración de gravedad.

Con esto se llega al razonamiento de que si se conocen las características de uno de los fluidos y se somete a condiciones de control, es posible determinar la presión que el otro fluido ejerce, ya que es la misma que el fluido de control ejerce sobre el mismo punto. Primero que nada se confina al fluido de control en un contenedor graduado que permita medir la columna del mismo. Dicho contenedor será hermético y tendrá salida únicamente por el punto de contacto con el otro fluido (figura 1.1).

Finalmente, solo se debe observar cómo el sistema entra en equilibrio y se estabiliza la variación producida en las columnas de los fluidos, con lo cual solo habrá que medir la

altura de la columna del fluido de control ya que sus características son conocidas. Se tiene la densidad del mismo por lo cual solo hace falta calcular la presión con la expresión planteada ya que la presión que ejerce el fluido de control es la misma que la de el otro fluido que ahora puede llamarse aire de forma concreta, se toma como presión atmosférica al valor obtenido.

El fluido de control por lo general suele ser mercurio ya que por su gran densidad la columna equivalente no necesita ser demasiado alta y esto facilita el manejo del dispositivo.

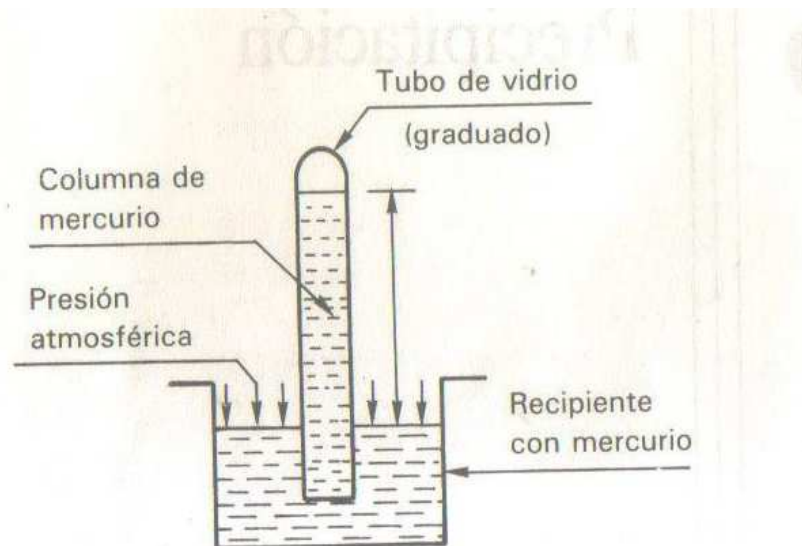


Figura 1.1. Esquema de un barómetro. (Referencia 6)



## Pluviómetros y pluviógrafos

Los pluviómetros son dispositivos simples que permiten tomar lecturas de la altura de precipitación en una estación meteorológica. Sin embargo tienen una desventaja, el hecho de que no sea un dispositivo automático. Por lo general un pluviómetro solo puede tener el registro de la altura de precipitación que se produjo en un día.

Una persona comisionada debe tomar la lectura de la altura de precipitación cada día a la hora determinada por el Servicio Meteorológico Nacional, por lo general las lecturas son tomadas a las 8:00 horas.

Sin embargo este dispositivo se presta a imprecisiones debido a que el registro abarca un periodo de 24 horas, esto evita que se tenga un registro más preciso que pueda tener en cuenta datos como la intensidad de las tormentas y si se presentó más de una en el periodo transcurrido durante el día.

El dispositivo consta de un recipiente por lo general metálico, en forma de cilindro que contiene un recipiente más pequeño en su interior. La captación de las precipitaciones se da por medio de un cono que funge como área de captación y que se encuentra en la entrada del recipiente abarcando toda la superficie del mismo. Dicho cono conduce el agua hacia el recipiente más pequeño y deposita ahí el agua.

El recipiente interior del pluviómetro tiene una característica principal, la cual consiste en que el área de su base es diez veces menor a la del recipiente exterior, es decir al área de captación, esto es con el propósito de que la altura de precipitación pueda ser más apreciable. La relación provoca que cada centímetro medido dentro del recipiente más pequeño sea equivalente a 1 mm de agua en el recipiente grande, cuya área de captación es la que se toma en cuenta.

Esto ayuda en gran medida a tener lecturas más apreciables y precisas, al utilizar escalas mucho mayores se incrementa en gran medida la precisión del dispositivo. Cabe

mencionar que se coloca una malla en la entrada del pluviómetro para evitar la entrada de basura o sólidos que puedan alterar la lectura.

En la figura 1.2 se presenta el esquema descriptivo de un pluviómetro.

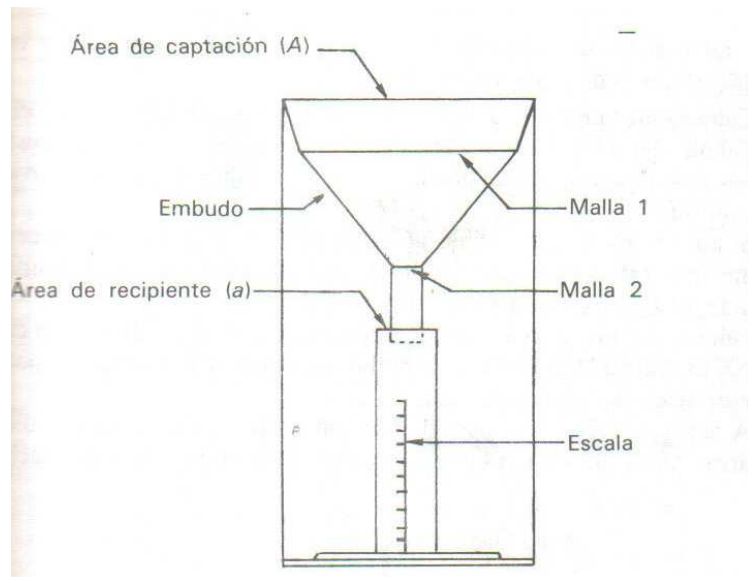


Figura 1.2. Esquema descriptivo de un pluviómetro. (Referencia 6)

Otro de los instrumentos para medir la altura de precipitación es el llamado pluviógrafo. Este dispositivo tiene un propósito parecido al del pluviómetro pero cuenta con diferencias sustanciales tanto en su funcionalidad como en la información que arroja la cual es considerablemente más precisa.

El pluviógrafo es un dispositivo que trabaja en cierta forma de manera automática, debido a que no necesita de un supervisor por grandes periodos de tiempo los cuales varían dependiendo del tipo de lecturas que se estén tomando. Estas pueden ir desde lecturas por hora, por días o incluso por semanas dependiendo los requerimientos.

El pluviógrafo como su nombre lo dice da un registro gráfico de las tormentas, más en concreto de su altura de precipitación con la ventaja de que este registro se da en tiempo real y de forma constante. Esto quiere decir que en el intervalo de las lecturas se tiene la altura de precipitación puntual de cada instante que se encuentre dentro de la duración de una tormenta con lo cual la cantidad de información que puede obtenerse es considerablemente mayor que con un pluviómetro.

Un ejemplo claro es que este dispositivo es capaz de mostrar datos con los cuales puede diferenciarse el inicio y el final de una tormenta además de poder diferenciar cuando no están teniendo lugar. Al tener un registro puntual de cada instante de una tormenta se puede saber también que tan intensa fue la misma al comparar la altura de precipitación con la duración de la tormenta.

Este dispositivo funciona con un filamento que es capaz de imprimir una línea sobre un rollo de papel llamado registro pluviográfico o pluviograma el cual está impreso con una escala que varía dependiendo de los intervalos del tiempo en el que se desee medir. El registro en contacto con el filamento tiene una rotación de forma constante de tal manera que la línea impresa expresa de forma real la lectura en ese instante.

El filamento está conectado a un flotador, el cual al subir las precipitaciones en el almacenamiento desplaza al filamento indicando un aumento en la altura de precipitación sobre el pluviograma que sigue girando de forma constante. Para el control de excedencias dentro del depósito del pluviógrafo existe un sistema el cual una vez que el filamento ha alcanzado la parte superior del registro, el depósito se drena de forma instantánea lo cual no provoca ninguna alteración en el registro ya que el registro se da a través de periodos de tiempo significativamente más largos que el tiempo de drenado, es por esto que no se pierden datos en el proceso (figura 1.3).

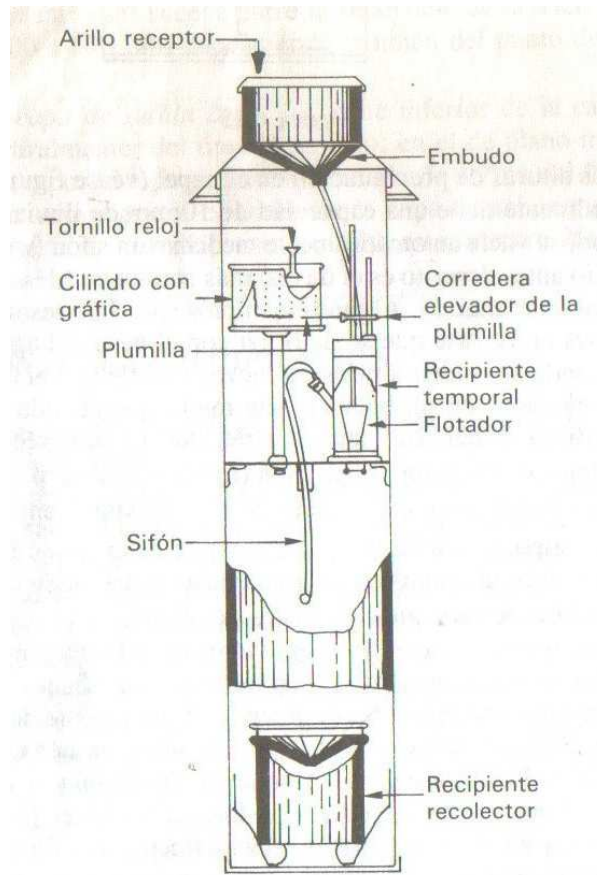


Figura 1.3. Esquema de un pluviógrafo. (Referencia 6)

### *1.1.3 Análisis de los datos de precipitación*

Los datos obtenidos por medio de las mediciones deben someterse a un análisis para determinar la tendencia que presentan. Para esto existen métodos variados de procesamiento que permiten la interpretación de resultados para fines de diseño, con la consideración inicial de que los datos recabados, son representativos.

El análisis o estudio de estos datos, permite adjudicar a la información recabada un comportamiento, que si bien no es exacto, tendrá una precisión considerable al tratar de reproducir los sucesos meteorológicos posteriores.

Primero que nada se tiene un concepto muy importante el cual se encuentra en varias ramas de la estadística y es aplicable a un sin número de problemas prácticos. Este es, desde luego, la media. Al momento de trabajar con este concepto lo importante es determinar la confiabilidad del mismo.

Es por esto que existen diversos métodos para obtener dicho valor que para cuestiones del presente trabajo se asocia a uno de los datos más importantes en cuestiones de precipitación que es la altura de precipitación (hp). A continuación se exponen algunos de los métodos más recurridos para poder determinar una media para la altura de precipitación.

#### Método aritmético

El método aritmético es uno de los más recurridos debido a su simplicidad, sin embargo hay que tomar en cuenta un factor muy importante al momento de emplearlo, en cuestiones de obtención de la media y de la estadística en general es importante recalcar el hecho de que algunos datos pueden no tener la misma influencia que otros en lo que se refiere a determinar un índice que los represente, es por esto que la media del método aritmético puede no ser un índice del todo representativo, sin embargo encaja en la categoría de lo estimado.

Para determinar este índice que dará un estimado de la altura de precipitación es necesario conocer ciertos elementos, como son los datos individuales de la altura de precipitación en un tiempo dado, y el número de datos obtenidos. Todo esto son condiciones conocidas impuestas desde el momento de la medición así que no habrá mayor problema en aplicar el modelo matemático que a continuación se expresa:

$$\overline{h_p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n hp_i$$

Donde “ $n$ ” es el número de datos obtenidos y “ $hp_i$ ” representa los valores individuales que serán sumados desde el primero ( $i$ ) hasta el último valor ( $n$ ).

### Polígonos de Thiessen

Como se ha mencionado anteriormente, los datos de precipitación obtenidos en un estudio pueden provenir de diversas estaciones meteorológicas localizadas en ubicaciones distribuidas por toda la cuenca hidrológica.

Debido a la forma tan irregular de una cuenca, aunado al hecho de que no en toda la cuenca se presentan los mismos eventos meteorológicos se considera que los datos de cada estación tienen una influencia distinta en lo que respecta a la determinación de este índice.

La necesidad de un valor de precipitación media más preciso y confiable, da lugar al surgimiento de un método que, empleado de forma adecuada, puede compensar la imprecisión del método aritmético y reflejar de forma más notable la influencia de cada estación meteorológica y de sus datos.

El método consiste en atribuir a cada estación una determinada área de influencia para sus datos, esto se realiza de manera que se ajuste a la forma de la cuenca. La manera de condensar los datos en los valores de precipitación media es tomar los datos de cada estación y aplicar el método para cada periodo de tiempo, es decir se obtendrá un valor de altura de precipitación media para cada intervalo de tiempo dependiendo de cómo se seleccione. Al final los datos se resumen en una tabla de precipitaciones medias que representa a toda la cuenca.

En este punto se involucra el método de los polígonos de Thiessen utilizando las áreas para obtener un valor de altura de precipitación para toda la cuenca a partir de datos más particulares, el procedimiento para obtener los polígonos es más bien sencillo, sin embargo antes de aplicarlo se requieren más datos para poder trazar los polígonos.

El procedimiento requiere de una carta o plano en que se marca la localización, lo más preciso posible, de cada estación meteorológica, además de esto se requiere tener delimitado el parteaguas de la cuenca hidrológica en estudio. Debe contarse con los registros ya sea pluviográficos o pluviométricos de cada estación, estos deben cumplir el requisito de pertenecer al mismo periodo de registro, para poder unirse por medio del modelo matemático.

El trazo de los polígonos se da de la siguiente manera, primero se ubican todas las estaciones meteorológicas y se trazan líneas rectas entre todas ellas, cumpliendo la condición de que solo se tracen líneas entre las estaciones más próximas entre sí, de esta manera no habrá manera de que dichas líneas se intersecten entre sí. Posteriormente se procede a trazar líneas ortogonales en el punto medio de cada una de las primeras líneas que unen las estaciones, el trazo de las mismas se prolonga hasta que converjan en un punto.

De esta manera las líneas que convergen en un punto forman con las otras varios polígonos los cuales son los polígonos de Thiessen, sin embargo se podrá observar que dichos polígonos pueden llegar a abarcar zonas que se encuentran fuera del

alcance de la cuenca en estudio. Es por esto que, por lo general en el estudio de las cuencas hidrológicas se toma el parteaguas como límite absoluto de la misma. Esto quiere decir que las partes de los polígonos que se encuentran fuera del parteaguas no serán tomadas en cuenta para fines del método, a continuación puede observarse, a grandes rasgos, un ejemplo del trazo de los polígonos de Thiessen.

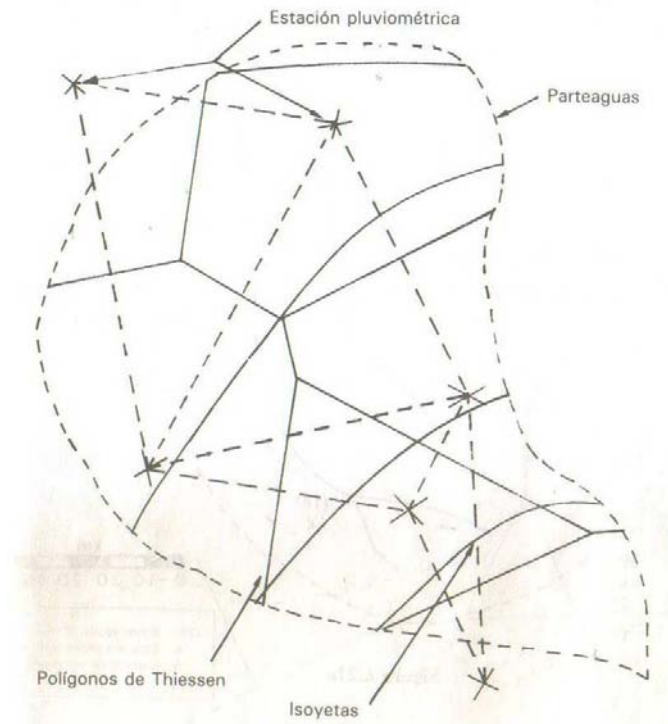


Figura 1.4. Ejemplo del trazo resultante de los polígonos de Thiessen.

Finalmente el modelo matemático aplicado para este método es el siguiente:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (A_i h_{pi})$$

Donde  $A_T$  se refiere al área total de la cuenca  $A_i$  es el área de la intersección de los polígonos con la cuenca delimitada por el parteaguas y  $h_{pi}$  es el dato del registro de la estación "i", se ha mencionado que dichos datos deben pertenecer al mismo periodo de tiempo para poder realizar el ajuste.



## Método de las isoyetas

Antes de explicar el método en sí, debe aclararse qué es una isoyeta. Estas consisten en líneas que al ser trazadas sobre la carta o el esquema de la cuenca, representan todos los puntos en los cuales hay una altura específica de precipitación. Por lo general son trazadas en intervalos de 5 mm, lo que quiere decir que para cada variación de 5 mm en la altura de precipitación en una zona existe una única isoyeta que lo representa. Las isoyetas pueden tener una forma similar a la de las curvas de nivel.

El método es en realidad muy parecido al de los polígonos de Thiessen sin embargo existe una diferencia significativa, y esta se encuentra en el hecho de que las áreas de influencia tomadas en cuenta cambian radicalmente. Ya que ahora las áreas a considerar son las que se forman de la intersección del parteaguas y las isoyetas, sin embargo la similitud con el otro método consiste en el hecho de que estas áreas poseen un valor de precipitación media que a su vez es asociado con un área de influencia que, debido a la irregularidad de la cuenca y a la forma tan irregular que muestran las isoyetas, no son iguales.

Para este método el único requerimiento adicional con respecto al método de los polígonos de Thiessen es que las isoyetas sean de naturaleza conocida, es decir que se conozca su forma sobre la cuenca además de conocer el valor de altura de precipitación que la caracteriza.

En este método no participan de forma directa los valores representativos de las isoyetas ya que los valores empleados deben estar asociados a toda un área. Con esto se plantea que los valores correspondan a una media aritmética entre dos isoyetas, valor que se adjudicará al área entre las mismas. Al igual que en el método anterior se tiene un valor de área y de altura de precipitación correspondientes. A continuación se expresa el modelo matemático que ayudará a obtener el valor de la altura de precipitación media:

$$\bar{h}_p = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (A'_i \overline{h_{p_{isoyeta}}})$$

Donde  $A_T$  es el área total de la cuenta,  $A'_i$  es el área entre isoyetas consecutivas y  $\overline{h_{p_{isoyeta}}}$  es la altura de precipitación media entre las isoyetas obtenida con el método aritmético.

#### Deducción de datos faltantes

Como en todo estudio de ingeniería existe la posibilidad de errores ya sea tecnológico, laboral o circunstancial. Es decir determinadas circunstancias pueden provocar que se vea comprometida la confiabilidad de los datos o incluso puedan llegar a faltar los mismos.

Sin embargo, al tomar las previsiones adecuadas dichos errores pueden verse minimizados y la información perdida puede ser supuesta de forma que la precisión en su suposición sea aceptable. Esto ocurre cuando se tiene en cuenta las implicaciones de que si la captura de datos falló en cierto intervalo de tiempo, aún así se tiene una mayoría de datos que fueron obtenidos de forma confiable.

De esta manera es posible extrapolar con base en los datos verídicos, aquellos datos que pueden estar faltando y para ello existen diversos métodos que varían en precisión y condiciones de uso, los cuales se mencionan a continuación.

Los métodos son variados y no pueden faltar los métodos aritméticos que aunque sean poco precisos, dan una idea bastante aproximada del dato dependiendo de las condiciones que se den, sin embargo el método aritmético para determinar los datos faltantes puede ser únicamente aplicado si las estaciones próximas a la estación de datos faltantes, tienen como máximo el 10% de diferencia en su valor de precipitación media anual.

## Método de la Relación Normalizada

Como se mencionó anteriormente, los métodos tienen diversa precisión, sin embargo la limitante de su uso está más bien restringida por la naturaleza de los datos verídicos existentes y por las condiciones de su lectura. Un claro ejemplo es que este método solo puede ser utilizado cuando la precipitación media anual de las estaciones circundantes a la que posee el dato faltante difiere en más del 10%.

El método tiene en sí una variante en su precisión, esto se debe a que la extrapolación de los datos adquiere más confiabilidad entre más estaciones circundantes existan con datos verídicos, sin embargo también existe un límite con respecto del mínimo de estaciones que deben ser usadas, es decir el método exige que para que los datos sean confiables, el número mínimo de estaciones que deben ser usadas para dicho propósito sean tres.

A continuación se presenta el modelo matemático desglosado para poder conocer su funcionamiento.

$$\bar{h}_{P_x} = \frac{1}{n} \left[ \frac{p_x}{p_1} h_{p1} + \frac{p_x}{p_2} h_{p2} + \dots + \frac{p_x}{p_n} h_{pn} \right]$$

Donde las variables que llevan un subíndice con la letra "x" son los datos de la estación en estudio, mientras que las variables con un subíndice numerado corresponden a los datos de las estaciones auxiliares.

Las variables son de forma correspondiente las que a continuación se explican, "hp" con cualquier subíndice es la altura de precipitación de los periodos de tiempo de interés para el estudio, la "p" con cualquier subíndice representa la precipitación media anual de las estaciones correspondientes mientras que la "n" representa el número de estaciones auxiliares.

## Curvas de precipitación-área-duración

Este método presenta uno de los enfoques más interesantes tanto en la hidrología superficial como en la estadística. En primer lugar se debe mencionar que éste método es el que implica la mayor variedad de información obtenida para operar, es requerida gran cantidad de información y está basado en más de uno de los métodos para determinar la precipitación dentro de los cuales se encuentran principalmente el método de las isoyetas y el método de los polígonos de Thiessen.

Por sobre todo, este método ofrece una extrapolación más allá de los cálculos aritméticos, pese a que los cálculos son necesarios para el desarrollo del método en sí. Éste método consiste en el desarrollo de curvas, mejor conocidas como gráficas, que representan una clara tendencia en cuestiones de área de influencia de los datos, además de proveer de valores de altura de precipitación para diversos tiempo en la cuenca. Esto es para reemplazar los datos faltantes de una estación.

Sin embargo, el método sólo proveerá datos relevantes para el periodo de estudio correspondiente.

Éste método requiere un proceso laborioso, de inicio hay que tomar en cuenta la información adquirida con los métodos mencionados, en este caso es necesario contar con el trazo y área de los polígonos de Thiessen sobre la cuenca hidrológica, además deben conocerse tanto las isoyetas que intersectan a la cuenca como el área que se forma de la intersección de las mismas con la cuenca.

Una vez obtenidos dichos datos se procede a obtener la altura de precipitación media de las estaciones auxiliares tanto con el método de los polígonos de Thiessen como con el método de las isoyetas, una vez obtenidos estos valores es cuando actúa la primera implicación del método.

Con propósitos de determinar una curva masa media es necesario poder determinar un factor de ajuste para afectar los datos, dicho factor de corrección es un cociente entre los valores de la altura de precipitación media obtenidos con los métodos anteriores, es decir que puede expresarse con la siguiente ecuación:

$$F.A. = \frac{\bar{h}_{p_{Thiessen}}}{\bar{h}_{p_{isoyetas}}}$$

Dicho factor de ajuste sirve para modificar los datos de precipitación media obtenidos a partir de los polígonos de Thiessen, es decir, se realizará el producto de la altura de precipitación media obtenida con los polígonos de Thiessen y el factor de ajuste obtenido con el modelo matemático anterior, esto es lo que dará lugar a la curva masa ajustada.

Posteriormente, una vez obtenida la curva masa se procederá a calcular los incrementos entre los datos consecutivos de estudio, esto dará lugar al valor en el que se incrementó la altura de precipitación por cada periodo de tiempo que haya transcurrido durante la duración del evento. Por supuesto dicha columna de incrementos empezará a presentar valores cercanos a cero y finalmente nulos mientras más se aproxima al final de la tormenta o evento meteorológico, esto es debido a que cuando la tormenta termina, el valor de altura de precipitación en el registro se vuelve constante.

Dicha columna de incrementos debe ser condensada en una tabla resumen, esta tabla se obtiene al realizar la suma de los incrementos, tomando como punto de partida el mayor incremento y sumándolo al número colindante de mayor magnitud, sin embargo el aspecto importante de esto es que se debe sumar hasta obtener un término que represente un periodo de tiempo preestablecido. Un ejemplo de esto es que si el registro muestra datos con una separación de una hora, y habiendo escogido un periodo de tiempo en el que se desee actúen las curvas, se deben sumar los términos hasta haber abarcado el número de horas sobre los que actuarán las curvas.

Es así como dichas tablas resumen dan columnas con valores de incrementos de la altura de precipitación que corresponden a un valor de tiempo que no es el original

en el registro, por ejemplo si el periodo seleccionado es de dos horas, los valores de incrementos estarán adjuntos a valores múltiplos de este número.

El método es algo laborioso ya que debe realizarse varias veces, dicho número depende en gran medida del número de isoyetas que intersecten a la cuenca hidrológica. Ya que las isoyetas en el orden que se decida desarrollar el método, fungen como fronteras temporales junto con la parte del parteaguas de la cuenca por el que se haya decidido empezar. Y así es como, mientras avanza el método, se debe realizar todo el procedimiento para estas subpartes de la cuenca, y una vez concluido el método en una fracción, se empieza de nuevo pero tomando en cuenta el área desde el lado del parteaguas seleccionado hasta la isoyeta contigua considerada. Finalmente el método se realiza para el área total de la cuenca.

Es así como se observa que las tablas resumen obtenidas al final, están asociadas a un área determinada y diferente unas de otras, con estos valores se pueden graficar las curvas sugeridas por el método y crear una tendencia que permita la deducción de los datos faltantes.

La tabla final que representará los resultados considerará una columna con los periodos de tiempo en que se dieron las alturas de precipitación de las tablas resumen, y en las columnas posteriores las alturas de precipitación con los datos de las tablas resumen, agrupando los datos que ocurrieron en áreas de extensión diferente pero en el mismo intervalo de tiempo. Finalmente se grafican las alturas de precipitación de un solo periodo de tiempo en el eje de las abscisas contra las extensiones de área a las que corresponden dichos datos, esto se realiza para todas las columnas de datos.

Es así como finalmente se obtienen con la altura de precipitación para diferentes periodos de tiempo en el intervalo de estudio con tan solo tener el dato del área de influencia de la estación a la que le faltan dichos datos. En la figura 1.5 se muestran las curvas para un problema aleatorio por cuestiones de visualización y perspectiva.

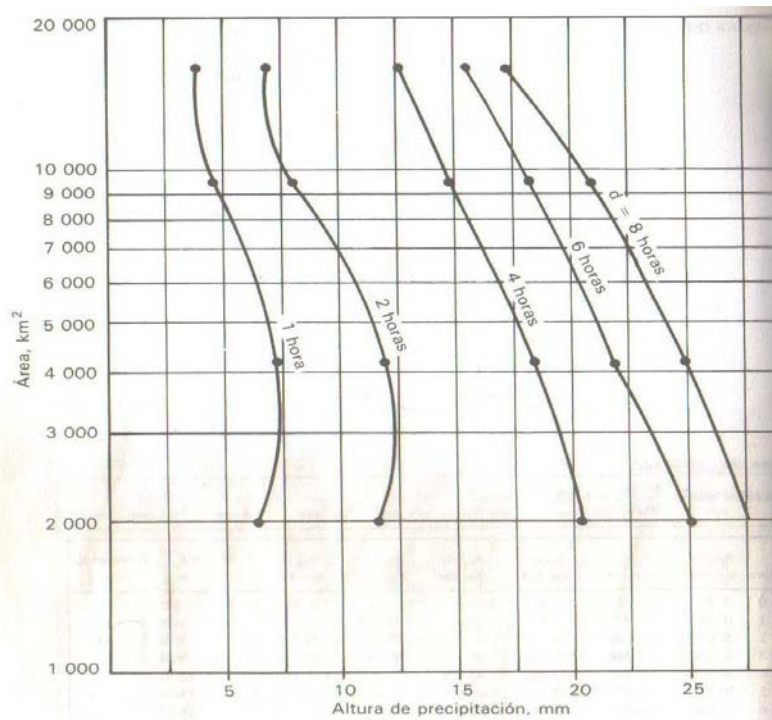


Figura 1.5. Curvas de precipitación-área-duración para un problema aleatorio. (Referencia 6)

Se aprecia que al introducir en este caso particular un valor de área la figura arroja cinco lecturas de altura de precipitación para los intervalos de una, dos, cuatro, seis y ocho horas.

#### 1.1.4 Tormentas de diseño

En el diseño de una estructura que pueda ser afectada por una tormenta se debe tomar en cuenta la eficiencia de la misma, así como su capacidad para manejarla lo mejor posible. Esta consideración también tiene implicaciones en el costo de la obra, ya que una obra diseñada para manejar eventos de grandes magnitudes, puede resultar muy segura, sin embargo no sería nada rentable diseñar una obra con características que excedan por mucho sus exigencias reales.

Pero, ¿Cómo determinar las condiciones de diseño?, la respuesta se encuentra una vez más en los conceptos de estadística. Cuando se cuenta con registros de eventos

pasados, es posible determinar cuándo es más posible que se presenten las condiciones más desfavorables y así poder diseñar la obra ante las exigencias de dichas condiciones.

La tormenta de mayores proporciones para diseñar la obra se presentará cada determinado periodo de tiempo, el cual por lo general es expresado en años dependiendo de la magnitud del evento para el cual se quiera preparar la obra, a este periodo de tiempo se le llama periodo de retorno.

El método que a continuación se expone puede asociar no solo el periodo de retorno de un evento, sino también la intensidad y la duración del mismo, el método tiene como fin el desarrollo de una curva que asocie estas tres características.

#### Curvas intensidad-duración-periodo de retorno

El método para obtener estas curvas requiere ciertos datos iniciales, como se mencionó en la introducción al subtema estos consisten en datos de eventos anteriores, más específicamente en registros de las alturas de precipitación de años anteriores con las duraciones de dichas precipitaciones.

El método comienza con un concepto probabilístico, el cual es aplicado en términos de proceso de datos y que en este caso se desarrolla con un modelo propuesto por Weibull.

El registro tiene una organización por columnas. Cada columna tiene en ella los datos de altura de precipitación de los años con registro que poseen la misma duración.

Primero se deben obtener las intensidades de las precipitaciones registradas, esto es posible debido a que se poseen los datos de la altura de precipitación y sus duraciones. Posteriormente se procede a ordenar los datos en orden de magnitud descendente, es decir de mayor a menor, esto sin importar el año de ocurrencia.



Posteriormente, se aplica el modelo conocido como la fórmula de Weibull con el cual se asocia en número y orden de los datos. Dicha fórmula arroja una serie de valores de los cuales hay tantos como años de registro se consideren. A continuación se presenta la fórmula de Weibull para definir el periodo de retorno.

$$T = \frac{n+1}{m}$$

Donde “*n*” representa el número de años de estudio, es decir el número de datos accesibles por cada columna de duración y la “*m*” representa la ubicación del dato en el orden de mayor a menor.

Una vez obtenidos y ordenados los datos se procede a desarrollar un modelo que maneja como variables la intensidad, la duración y el periodo de retorno, es digno de mencionarse que el modelo una vez calibrado, representará una familia de curvas que pueden ser obtenidas según se requiera.

El modelo se enuncia a continuación:

$$i = \frac{kT_r^m}{d^n}$$

Donde las variables son conocidas, “*i*” representa la intensidad de la tormenta de diseño, en  $\frac{m}{h}$ , “*T<sub>r</sub>*” representa el periodo de retorno en años, “*d*” es la duración del suceso en minutos, esto es debido a que en los datos del registro se sugiere utilizar la duración de la tormenta en esta unidad, ya que los sucesos meteorológicos no suelen durar lo suficiente para poder considerar una unidad más grande. Se observa la presencia de otros valores en el modelo, dichos valores son constantes de calibración

de la ecuación que permitirán que el modelo adquiera las tendencias representativas acordes a los datos.

Las constantes de calibración se obtienen mediante el desarrollo de procesos logarítmicos de los datos del registro, esto es posible a que le planteamiento de ciertas ecuaciones permite realizar un cambio de variable que hace más manejable la información. Esto es requerido para poder plantear un sistema de ecuaciones que al ser resuelto proporcionará las constantes de calibración, en función de los logaritmos que se utilizan para realizar el cambio de variable.

A continuación se presentan los coeficientes a utilizar que se expresan en forma de sus ecuaciones iniciales. Lo siguiente es posible convirtiendo la ecuación del modelo a una ecuación logarítmica, y el resultado es el siguiente:

$$\log(i) = \log(K) + m \log(Tr) - n \log(d)$$

El modelo puede bien ser representado por el cambio de variable antes mencionado, el cual es expresado a continuación.

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

Donde se puede asumir que las variables han adoptado la siguiente forma para fines de la ecuación:

$$y = \log(i)$$

$$a_1 = m$$

$$a_2 = -n$$

$$a_0 = \log k$$

$$x_1 = \log Tr$$

$$x_2 = \log d$$

Con dichos cambios de variables y a partir de la ecuación que conforman se puede hacer un ajuste con correlación lineal y finalmente plantear un sistema de ecuaciones. El sistema de ecuaciones se obtiene a partir de tres tipos de datos que produce un sistema con igual número de incógnitas y ecuaciones. Dicho sistema se expresa a continuación:

$$\sum y = Na_0 + a_2 \sum x_2 + a_1 \sum x_1$$

$$\sum (x_1 y) = a_0 \sum x_1 + a_2 \sum x_1 x_2 + a_1 \sum x_1^2$$

$$\sum (x_2 y) = a_0 \sum x_2 + a_2 \sum x_2^2 + a_1 \sum x_1 x_2$$

La identidad de todas las literales es conocida, sin embargo este sistema ha tomado en cuenta un dato que no aparecía en las ecuaciones anteriores, es decir la literal “N” la cual representa el número total de datos iniciales. Es decir, no solo se refiere al número de años que abarca el ajuste, o al número de columnas para diferentes duraciones de evento, sino al número total de datos abarcando todos los años y todas las duraciones.

Una vez obtenidos los coeficientes  $a_0, a_1, a_2$ , los cuales fungieron como incógnitas en este sistema, se utilizan las fórmulas logarítmicas propuestas anteriormente para el cambio de variable para determinar las constantes de calibración y así poder completar la ecuación para los datos específicos del caso.

Finalmente, una vez calibrada la ecuación con las constantes, se asignan los periodos de retorno deseados y se obtiene una curva y una tendencia para cada valor del modelo. En la figura 1.6 se presentan las funciones graficadas de manera logarítmica para observar a mayor detalle el comportamiento de las mismas cuando se le asignan varios valores.

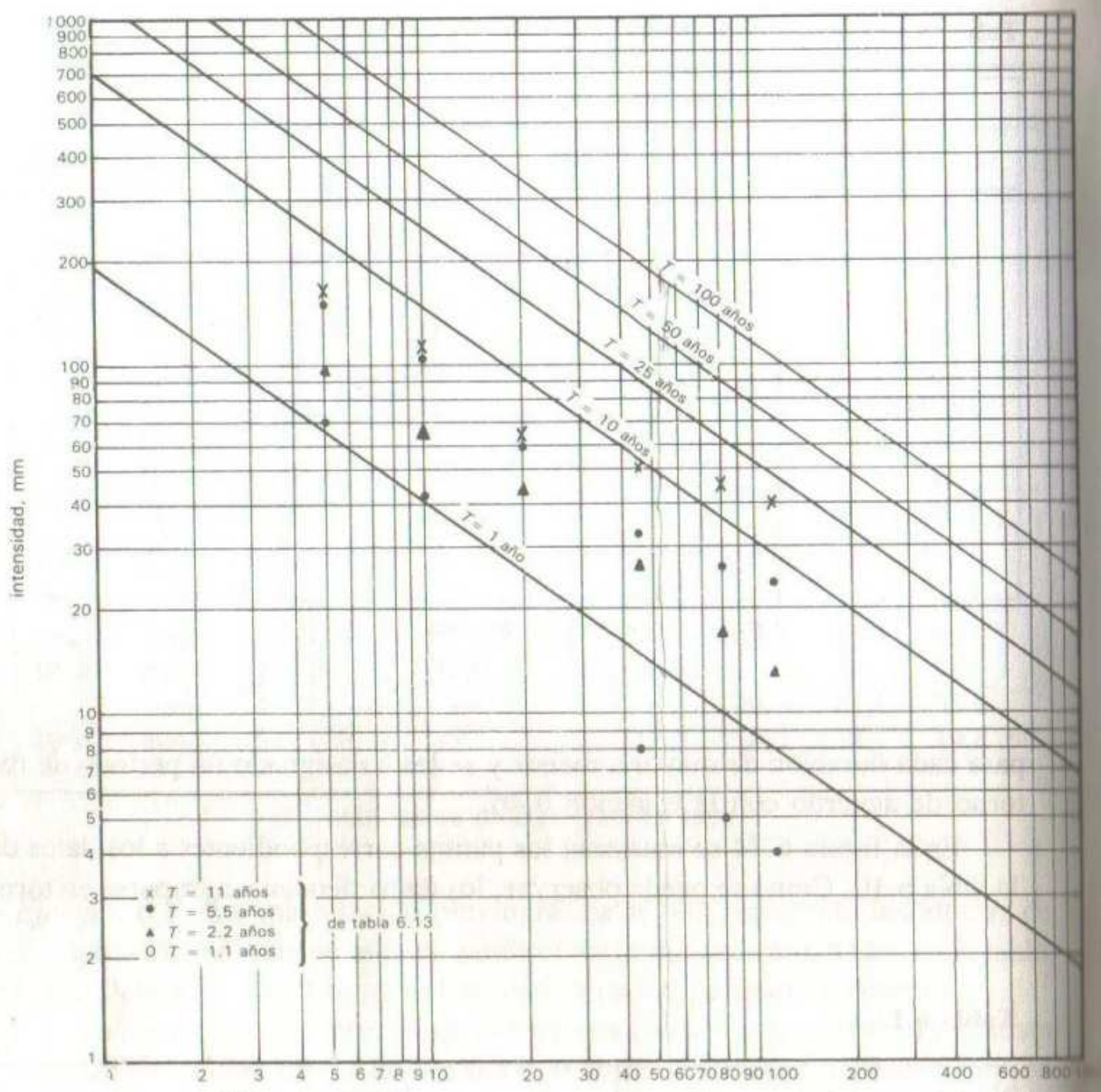


Figura 1.6. Curvas intensidad-duración-periodo de retorno graficadas en función logarítmica. (Referencia 6)

Sin embargo una vez considerado el periodo de retorno para el cual se desea diseñar, es posible tratar con curvas que expresan a la intensidad en función de la duración del evento, tomando en cuenta que dicha curva solo expresará los datos dentro del rango del periodo de retorno asignado (figura 1.7).

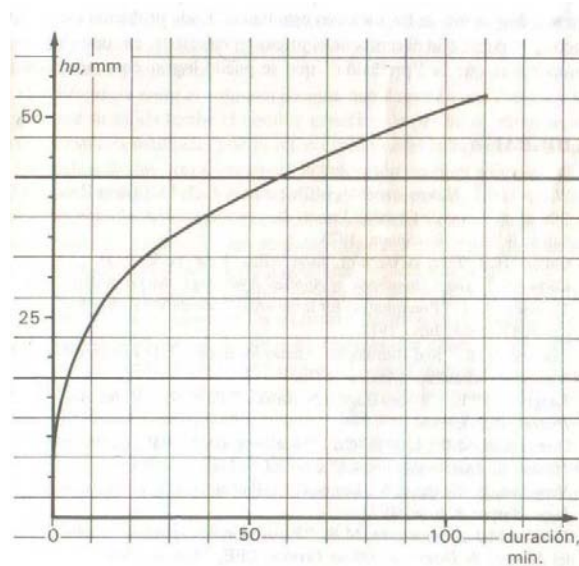


Figura 1.7. Curva de altura de precipitación vs duración para un periodo de retorno específico. (Referencia 6)

Se puede observar que es posible conocer la duración de las tormentas con una altura de precipitación determinada y así diseñar la obra para determinados límites en cuestiones de altura de precipitación y saber, en función de la duración, el gasto que se estará manejando, como se aborda más adelante en este documento.

## 1.2. INFILTRACIÓN

La infiltración en términos de un sistema, se conoce como las pérdidas de masa en el mismo, en el presente trabajo, está dada por la cantidad de agua de las precipitaciones que no escurre a través de la cuenca y que es absorbida por el suelo.

Las precipitaciones en las cuales no se tuvo la capacidad de infiltrar, escurren por la cuenca y alimentan los cuerpos de agua existentes en las partes de menor altitud, como son los ríos o lagunas. Para el cálculo y comportamiento de la infiltración aplican varios modelos.

### 1.2.1 Definiciones

La infiltración está estrechamente relacionada con las características del suelo en el área de estudio ya que dependiendo de parámetros como granulometría y contenido de humedad, el suelo desarrolla una característica llamada capacidad de infiltración, la cual es medida en las unidades estándar de la intensidad, es decir milímetros por hora.

Lo esencial en el ámbito de la infiltración es comparar los valores de la intensidad de una tormenta con la capacidad de infiltración, ya que esos hechos siguen cierta tendencia. Para empezar, haciendo la consideración inicial de que el suelo se encuentra seco y es el apropiado, antes del evento posee una capacidad de infiltración por lo general mayor que la de la intensidad de la lluvia  $i \leq f_p$ , donde “ $i$ ” es la intensidad de la tormenta y  $f_p$ , la capacidad de infiltración. Esto provoca que el agua que se precipita en su mayoría sea absorbida por el suelo y el resto escurre por la superficie al no tener el suelo la capacidad de absorberla.

Cuando la tormenta se prolonga, la capacidad de la absorción del suelo va decreciendo y en determinado momento es menor que la intensidad de la tormenta  $i \geq f_p$ , cuando esto sucede el agua precipitada escurre por la cuenca.

Existen diversos métodos para determinar la infiltración, sin embargo para fines de esta tesis y por cuestiones de relevancia, solo se manejarán los datos de infiltración aplicables en áreas pequeñas.

### 1.2.2 Métodos para el cálculo de la infiltración

Mediante pruebas realizadas en la zona de estudio es posible poder determinar ciertos valores que ayuden a determinar la infiltración, esto es posible mediante los instrumentos adecuados. Las mediciones de la infiltración por lo general se hacen utilizando un infiltrómetro.

En general la medición de la infiltración se realiza obteniendo varios coeficientes por medio de métodos como: Criterio del coeficiente de escurrimiento, Método del número de curva y Criterio del United States Soil Conservation Service (USSCS). El cálculo de la infiltración que manejan dichos métodos se aplican en el área de toda la cuenca, lo cual no es recomendable para el diseño del dispositivo del que trata este trabajo. No se indagará en los métodos anteriores en este trabajo, sin embargo se hace alusión a ellos por mencionar los métodos existentes y crear una perspectiva de opciones.

### *1.2.3 Medición de la infiltración*

Como se mencionó anteriormente, las mediciones de las infiltraciones se realizan por medio de un infiltrómetro. Debido a la naturaleza y operación de estos artefactos, los datos recabados por ellos sólo son confiables en áreas pequeñas, conveniente para los fines de este proyecto.

Primero que nada cabe mencionar que existen dos tipos de infiltrómetros que simulan las condiciones de la lluvia de manera más aproximada a las condiciones reales. Este apartado se enfocará más al infiltrómetro llamado de carga constante.

Los infiltrómetros de carga constante constan de dos tubos de diferentes diámetros hincados en el terreno de forma concéntrica. Dichos tubos poseen generalmente diámetros de veinte y cuarenta centímetros, respectivamente. Los tubos tienen una longitud de cuarenta y cinco a sesenta centímetros y por lo general se hincan de cuarenta a cincuenta centímetros.

Existen dentro de este tipo de infiltrómetros aquellos llamados de tubo simple, sin embargo es más recomendable utilizar los de tubo concéntrico debido a que el segundo tubo protege de las condiciones de la periferia al primero. El funcionamiento de los tubos una vez hincados consiste en añadir agua con buretas graduadas y mantener una columna de agua constante sobre el terreno a medida que ésta se va infiltrando. Si se toman las lecturas de las buretas en diversos tiempos es posible producir curvas que representen la infiltración con respecto al tiempo.

A continuación se presentan datos de granulometría para suelos en que se han realizado ensayos por medio de los infiltrómetros, correspondiendo a suelos de diferentes tipos y características (Tabla 1.1).

TABLA 1.1. Tamaños de grava.

Material grueso	Tamaños
Grava	3" – 3/16"
Grava gruesa	3" – 3/4"
Grava fina	3/4"-3/16"

La siguiente tabla contiene valores parecidos, pero aplicables a materiales finos (Tabla 1.2).

TABLA 1.2. Tamaños de arena.

Arenas	Tamaños
Arena gruesa	4.7625mm -1.651mm
Arena media	1.651mm-0.42mm
Arena fina	0.42mm-0.074mm

Ahora solo por perspectiva están los materiales que son técnicamente impermeables dependiendo las condiciones (Tabla 1.3).

TABLA 1.3. Suelos finos.

Finos	Tamaños
Limos	>0.005mm o >0.002mm
Arcillas	<0.005 o <0.002mm



Si se consideran como ciertas las definiciones observadas en estos materiales, se puede decir que en las mediciones realizadas con un infiltrómetro, los siguientes datos corresponden a valores considerados aceptables para áreas pequeñas (Tabla 1.4).

TABLA 1.4. Tasas de infiltración típicas para distintos tipos de suelos.

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Capacidad de infiltración (mm/h)</b>
Suelo grueso	>100
Ligero	50-100
Medios	10-50
Pesados	5-10
Muy pesados	1-5

### **1.3 ESCURRIMIENTO**

La parte de las precipitaciones que corresponde al escurrimiento es aquella, que por definición, no es capaz de infiltrarse en el suelo y debe escurrir por la superficie y sus cercanías, a este fenómeno se le conoce como “flujo en la superficie del terreno”. La parte de la lluvia que logra infiltrarse en las capas cercanas a la superficie y fluye dentro de éstas es conocido como “escurrimiento subsuperficial”, además de los dos anteriores existe un tercer tipo de escurrimiento, que sin embargo corresponde a aquella parte de las precipitaciones que logra infiltrarse hasta la capa de los mantos freáticos y es conocido como “escurrimiento subterráneo”.

Sin embargo el estudio del escurrimiento en un área considerablemente más pequeña a la cuenca como podrían ser las propuestas en capítulos posteriores de este

documento, es significativamente más particular y simple. Debido a cuestiones de área y además de que las mediciones se darán en condiciones más controladas y de hecho diseñadas de antemano, el escurrimiento en las mismas tendrá el comportamiento parecido al de un canal.

Con esta información se tienen que hacer las consideraciones correspondientes para poder definir el comportamiento al que se dará lugar, ya que los escurrimientos, en este caso serán, en cierto modo, controlados.

Una de las consideraciones iniciales es hacer notar que aunque el área de estudio del proyecto sea dramáticamente más pequeña que una cuenca promedio puede aplicarse uno de los conceptos utilizados para el estudio de las mismas, es así como se hace referencia al hidrograma.

El hidrograma es una curva que corresponde a la representación del gasto generado durante una tormenta y su variación con el tiempo. Una vez comprendido esto es posible conceptualizar que el hidrograma es una curva parecida en geometría a una campana de Gauss sin embargo debido a la variación aleatoria de las precipitaciones la curva es irregular, figura 1.8.

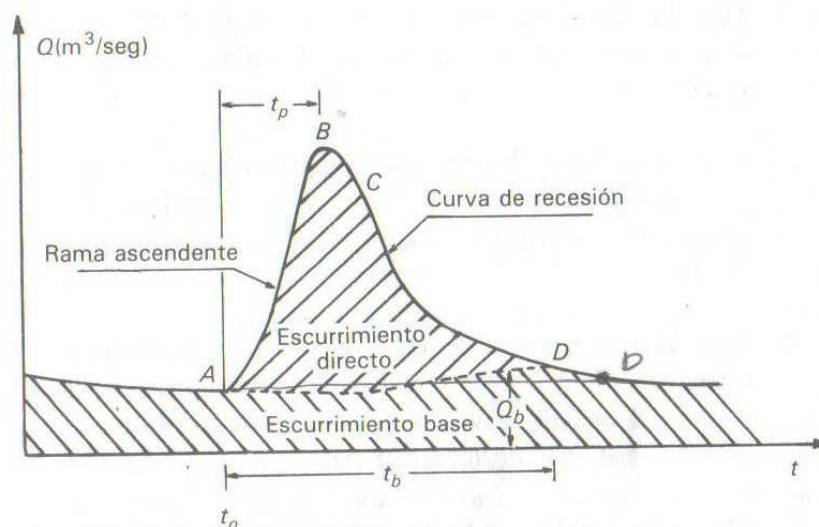


Figura 1.8. Esquema del hidrograma. (Referencia 6)

Sin embargo, el hidrograma presenta una tendencia de comportamiento la cual puede ser estudiada para determinar los distintos tipos de escurrimiento. El comportamiento presentado por un hidrograma por lo general es cuantificado en un periodo de tiempo considerable como por ejemplo un año. La tendencia presentada por el hidrograma es la de tener al principio una variación en el gasto casi nula, lo que significa que durante el periodo de tiempo en estudio, hay un gasto constante que se presenta antes de que tengan lugar las precipitaciones, a este gasto se le conoce como “gasto base”.

Sin embargo, una vez que llegan las precipitaciones, la variación en el gasto es tan grande en un periodo comparativamente corto que empieza a aumentar la pendiente de la curva de una forma que podría catalogarse de brusca tendiendo por supuesto a un valor máximo. Todo esto se da en un punto de inflexión de la curva llamado “punto de levantamiento”, la variación del gasto se produce en cuanto la tormenta comienza, y a partir de este punto los valores del gasto pueden seguir aumentando incluso después de que la tormenta termine si las dimensiones y forma de una cuenca lo permiten.

Como se mencionó anteriormente, una vez que el gasto empieza a aumentar, tiende a un valor máximo al cual se le llama “pico”, y es uno de los valores representativos de una tormenta, además de ser el que debe tomarse en cuenta para el diseño crítico. Después del punto máximo del hidrograma una vez que la tormenta empieza a cesar, la curva cambia su pendiente y empieza a descender el valor de gasto con respecto al tiempo, esto ocurre en un punto de inflexión después del pico.

Después de que la curva desciende lo suficiente, reduce su pendiente hasta volverse relativamente constante, de nuevo, y tiende al valor del gasto base, en el punto que la curva se estabiliza se considera otro aspecto del estudio, a este punto se le conoce como el “fin del escurrimiento directo”. Si por métodos geométricos y aritméticos se unen el punto de levantamiento con el punto del fin del escurrimiento directo, la parte de la curva que queda por sobre dicha línea representa en sí al escurrimiento directo, mientras que la parte inferior de la gráfica representaría al escurrimiento base.

En el pico producido en la curva hay dos ramas las cuales son nombradas como ascendente la primera y, rama descendente o curva de recesión la segunda. La rama ascendente es aquella que va desde el punto de levantamiento hasta el pico, siendo la rama descendente aquella que va del punto de inflexión hasta el punto del fin del escurrimiento directo.

Como se mencionó, la curva se encuentra expresada en función del tiempo y es de hacer notar que al levantamiento de la curva le corresponden valores de tiempo bastante importantes. El primero es conocido como tiempo pico ( $t_p$ ) y es aquel que tiene lugar a partir del punto de levantamiento de la curva hasta el punto pico de la misma. El segundo, es medido a partir del punto de levantamiento hasta el punto del fin de escurrimiento directo ( $t_b$ ).

### *1.3.1 Aforo*

El aforo es una herramienta muy útil y de las más recurridas cuando se habla del estudio hidráulico o hidrológico de un fenómeno. El concepto de aforo es en realidad simple, se trata de averiguar la cantidad de agua que está pasando por unidad de tiempo en algún sistema delimitado como podría tratarse de una tubería, un río o un canal.

En términos más técnicos, el aforo es el cálculo del gasto que transita por una sección por medio de condiciones medidas o impuestas a dicha sección para facilitar la obtención de dichos datos. Existen varios métodos para aforar, la mayoría por no usar términos absolutos, están sustentados en la ecuación de continuidad del gasto para los fluidos  $Q = VA$  donde "Q" es el gasto, "V" la velocidad media de la sección y "A" es el área de la sección, todos los términos deben expresarse en unidades compatibles. A continuación se hará mención de algunos métodos de aforo.

### 1.3.1.1 Sección control

La sección de control es el acondicionamiento de cierta parte del cauce para poder determinar el gasto. Se imponen condiciones geométricas a la sección transversal del mismo o bien éstas se miden con precisión. Las dos formas más recurridas de inducir una sección de control, consisten en colocar un vertedor de geometría conocida o inducir el tirante crítico.

Un vertedor es una estructura de aforo que debido a su geometría, crea una relación entre el gasto y el tirante medido en el punto en que se colocó. Es así que, con solo medir o tener en consideración este valor y manteniéndose constante se puede determinar el gasto medio que pasa por la sección. Existen distintos tipos de vertedores los cuales se utilizan según el caso se requiera, esto depende de la magnitud del gasto manejado o la localización del vertedor.

A continuación se presentan ejemplos de vertedores, los cuales guardan una estrecha relación entre sus dimensiones, gasto y el tirante medido (figura 1.9).

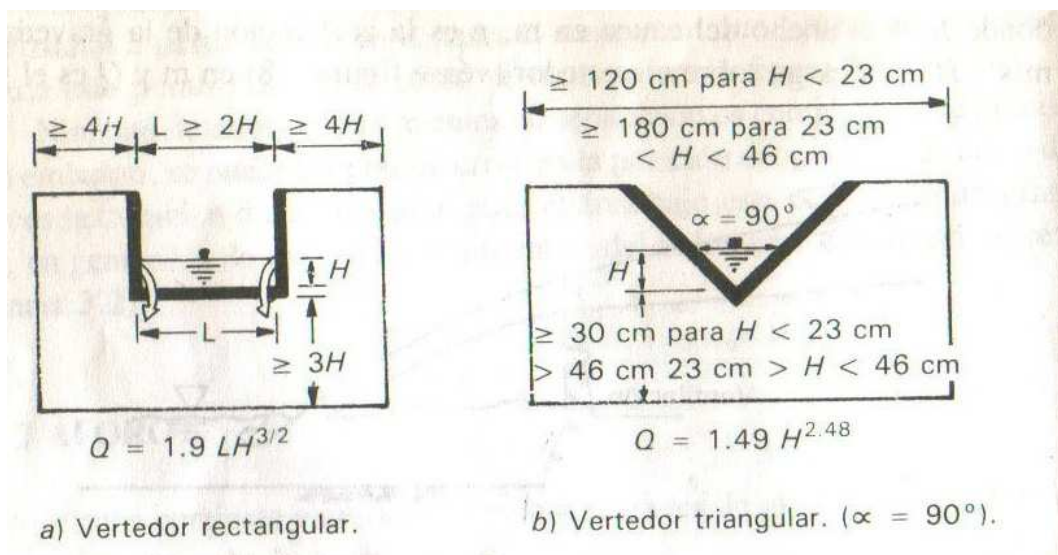


Figura 1.9. Esquemas y ecuaciones para vertedores rectangular y triangular.  
( Referencia 6)

### 1.3.1.2 Relación sección pendiente

Este método tiene algunas consideraciones iniciales, y de manera ideal es mejor utilizarlo en cauces de forma regular debido a que requiere el cálculo del área hidráulica para llevarse a cabo. Este método toma en cuenta, la topografía y características de elevación del cauce, sin mencionar que varía dependiendo los materiales que conformen el fondo y las paredes del mismo.

En sí el método trata de determinar la pendiente hidráulica de un intervalo contenido a lo largo del cauce con una longitud "L", se trata de seleccionar un tramo del cauce donde el cambio en la pendiente topográfica del fondo sea más o menos regular. Se debe conocer la geometría de los puntos inicial y final del intervalo en estudio al menos hasta un punto aproximado además de tener en cuenta, como se ha mencionado, el material que lo conforma.

Con los datos anteriores se procede a determinar la pendiente hidráulica que puede ser determinada únicamente si se conoce la longitud horizontal del segmento de estudio y la diferencia de altura de los puntos iniciales y finales, como se puede deducir dichos datos son necesarios para poder determinar la diferencia de alturas entre los tirantes y poder obtener las pérdidas de energía existentes, de las cuales solo se consideran las provocadas por la fricción.

Una vez obtenidas las pérdidas por fricción se puede obtener la pendiente hidráulica con la ecuación:

$$h_f = S_f L$$

Donde  $h_f$  se refiere a las pérdidas por fricción,  $S_f$  representa a la pendiente hidráulica y "L" es la distancia medida horizontalmente entre los puntos.

Una vez obtenida la pendiente hidráulica resulta sencillo determinar la velocidad a la que el agua transita por la sección, para estos fines se utiliza el concepto de la hidráulica de canales conocido como la fórmula de Manning. El modelo se representa a continuación.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$

Donde "R" representa el radio hidráulico de la sección, y "n" es el coeficiente de rugosidad del material del cauce. Las demás variables se han mencionado anteriormente y son conocidas.

Una vez determinada la velocidad de la sección con la fórmula anterior únicamente falta aplicar el valor obtenido a la ecuación de continuidad del gasto para obtener la cantidad de agua transitando por el cauce.

En la figura 1.10 se presenta un esquema con los elementos más importantes del método mencionado.

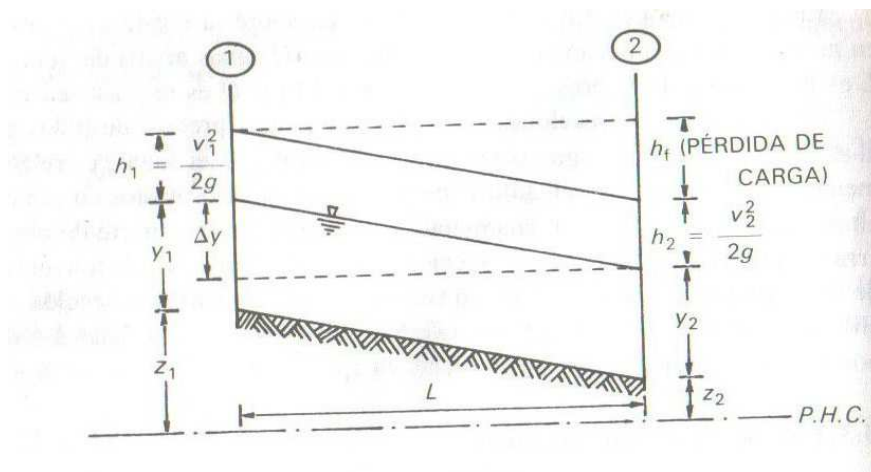


Figura 1.10. Esquema de líneas de energía en la conducción a cielo abierto. (Referencia 6)

Existen otros métodos de medición del gasto en cauces como podría ser el de sección-velocidad, sin embargo este método es únicamente recomendable para cauces con una sección demasiado ancha, ya que eso produciría una gran variación en la velocidad en las secciones del cauce, sin embargo no se indagará a fondo en este trabajo.

### 1.3.1.3 Nociones generales de canales rectangulares

Los canales tienen diferentes tipos de flujos los cuales presentan comportamientos particulares dependiendo de las características geométricas y topográficas del mismo. Una de las geometrías de más sencillo estudio es el canal rectangular debido a que las características principales del mismo como serían su radio hidráulico y el valor de su tirante crítico son considerablemente más fáciles de determinar que en algún otro tipo de canal.

El tránsito del agua por un canal depende de la acción de diversas fuerzas actuantes sobre el mismo, como el peso y la presión ejercida por el fluido en la plantilla del canal y la fricción que a su vez el canal ejerce en el líquido provocando las pérdidas graduales de energía.

Las fórmulas para el estudio de los canales han sufrido una evolución considerable, y han pasado a ser mucho más simples en el ámbito de determinar las pérdidas por fricción. Fue Manning quien finalmente encontró la relación que simplificó las fórmulas propuestas por Chézy, Gangullet y Kutter para finalmente obtener el coeficiente que representa la influencia de los distintos materiales sobre el flujo de los canales, dicho coeficiente se representa con la letra “n” y es conocido como el coeficiente “n” de Manning, existen diversos valores determinados experimentalmente algunos de los cuales serán mencionados a lo largo de este apartado. Después de la determinación del coeficiente finalmente la ecuación de Chézy tuvo una transformación y se expresó la velocidad en función de este nuevo coeficiente, la cual es conocida como la fórmula de Manning.

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$



Los canales rectangulares de interés en este apartado son aquellos que poseen pendientes.

La energía en la hidráulica puede adoptar diversas formas, sin embargo para su estudio, estas fuerzas se han visto transformadas en valores con unidades longitudinales que dependiendo su magnitud expresan cierta cantidad de energía, dichos tipos de energía son llamadas cargas y son referidas a la carga de una columna de fluido equivalente a la cantidad y tipo de energía de la que procede.

Los tipos de cargas en estudio son la carga de presión, la carga de velocidad y la carga de posición, que conforman los tres tipos de energía que al transformarse unas en otras, dotan de movimiento al líquido. Sin embargo, al estar los canales expuestos a la atmósfera, la carga de presión manométrica ejercida sobre la superficie del líquido es nula, por lo cual la carga de presión sobre un canal tiene un valor de cero (figura 1.10).

La cuantificación de la energía en el flujo de un canal se da con la suma de todas las cargas actuantes, y como anteriormente se descartó a la carga de presión en su superficie, aún se tiene la carga de posición y de presión. A la suma de estas dos cargas se le llama energía específica, la cuál es determinante dentro del gasto, tirante y velocidad que el canal maneja.

La energía específica se presenta en tres regímenes distintos, el régimen crítico, sub crítico y súper crítico. Los cuales tienen sus diferencias en la manera en que varían sus tirantes y cargas de velocidad alrededor de cierto valor el cual es conocido como tirante crítico.

El tirante crítico de un canal es aquel que se presenta justo en el régimen crítico, es decir cuando la energía específica es la mínima requerida para que el canal con las condiciones que posee pueda transitar cierto gasto sin cambiarlo. Es así como los tirantes que se presentan por encima del tirante crítico se encuentran en el régimen sub crítico, un régimen caracterizado por tener tirantes elevados y una carga de velocidad menor (figura 1.11).

Por el contrario cuando el tirante de un canal se encuentra en valores menores al tirante crítico se encuentra en un régimen súper crítico, lo cual implica que al ser el tirante menor y la energía específica la misma, esta se verá transformada en carga de velocidad para compensarlo.

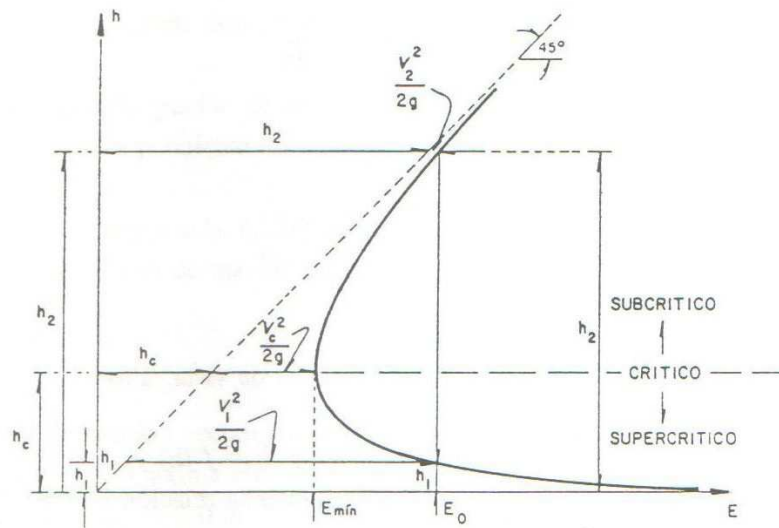


Figura 1.11. Gráfico que denota la distribución de tirante y carga de velocidad en distintos regímenes. (Referencia 3)

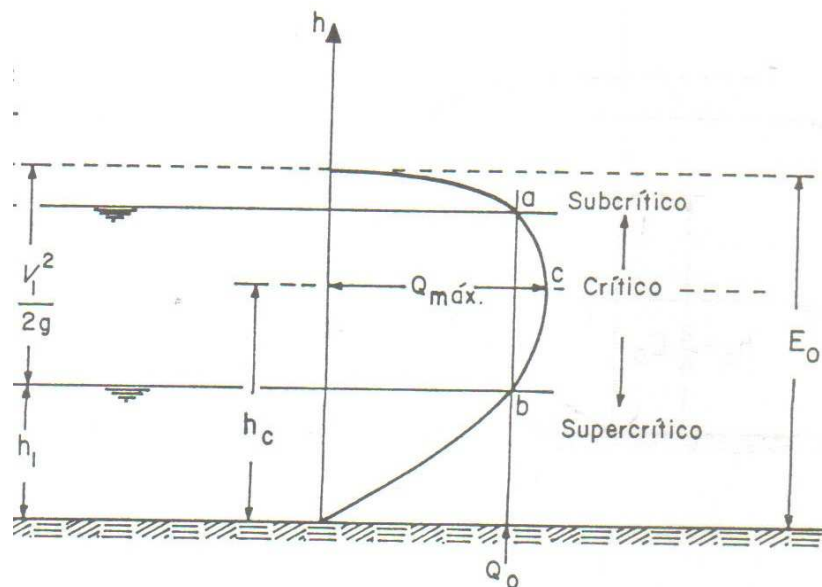


Figura 1.12. Esquema de perfil de distintos tirantes y su variación de gasto dependiendo del régimen de un canal. (Referencia 3)

La energía específica se presenta en tres regímenes distintos, el régimen crítico, sub crítico y súper crítico.

Cuando se habla de energía no se puede evitar hablar de eficiencia así que surge la cuestión de si cierta cantidad de energía específica es capaz de conducir diferentes gastos, y la respuesta es afirmativa. Debido a que el comportamiento de la curva de energía específica representa una parábola existe un valor mínimo de esta, dicho valor es llamado energía específica mínima y es la energía específica necesaria para que se dé un valor de gasto determinado en esas condiciones, además el valor de gasto presentado en un canal durante el régimen crítico es conocido como el gasto máximo que puede pasar por la sección con esas características.

## **1.4 Evaporación**

### *1.4.1 Definiciones*

Para empezar hay que preguntarse qué es en realidad la evaporación y por qué este fenómeno afecta los cálculos de un aforo o del funcionamiento de un sistema ya sea en mayor o menor medida.

Primero, se define la evaporación como el proceso por el cual el agua cambia de fase, desde un estado líquido a un estado gaseoso. Este proceso se ve inducido por diferentes factores siendo los principales, las condiciones de presión y temperatura.

La evaporación es causa de un importante intercambio de masa dentro de un sistema predispuesto a esto, como podría ser el que se propondrá en este proyecto, es por esto que es de gran importancia cuantificarlo. Debido a la dependencia que tiene la magnitud de este fenómeno con respecto a las condiciones del entorno existen métodos desde experimentales hasta empíricos para su medición los cuales se verán expuestos en este apartado.

#### 1.4.2 Fórmulas empíricas para el cálculo

En el documento solo se hará mención a una de las fórmulas empíricas ya que ésta ejemplifica el punto establecido, de que las condiciones ambientales afectan la magnitud de la evaporación.

##### Fórmula de Meyer

La fórmula de Meyer fue propuesta en 1915 y maneja la variable de presión de vapor en el ambiente y la compara con los valores de saturación esto proporciona un valor de evaporación dentro del periodo de un mes para el cual fue diseñada la ecuación.

$$E_m = C(e_s - e_a) \left[ 1 + \frac{V_w}{16.09} \right]$$

Donde “C” es un coeficiente experimental con un valor de 38 para depósitos pequeños como dispositivos de medición y de 28 para los depósitos grandes. Las presiones de vapor media y de saturación representadas con la literal “e” con el subíndice correspondiente pueden determinarse con otro modelo matemático, las unidades de la fórmula son pulgadas de mercurio, mientras que la otra variable “Vw” se refiere a la velocidad del viento a diez metros de la superficie de estudio en unidades de km/h.

#### 1.4.3 Medición de la evaporación

Como en todo dato es necesario el uso de dispositivos para determinar su comportamiento en campo. Esto siempre es realizado por mediciones de alguna índole en este caso es utilizado un dispositivo especial llamado evaporímetro. El evaporímetro funciona de una forma muy parecida a un pluviómetro, sin embargo los conceptos de su uso son algo diferentes.

El evaporímetro consiste en un depósito en el cual se coloca cierta cantidad de agua y se deja expuesto a la intemperie, lo cual provoca que exista evaporación en el depósito, después este valor es medido con una regla graduada. Los valores de la evaporación son medidos durante varios días.

Deben realizarse correcciones en los valores medidos, sumándoles los valores de la altura de precipitación de la estación cercana, por lo general el evaporímetro suele estar en la estación. Dentro de los depósitos pequeños existe una mayor propensión a la evaporación por lo cual si se busca utilizar los valores mencionados para un depósito mayor como el vaso de una presa, deberá ajustarse con un factor de corrección que por lo general oscila entre 0.6 y 0.8.

## **1.5 BALANCE DE AGUA**

Los factores anteriormente vistos influyen en el intercambio de masa que existe en un sistema hidrológico o mejor dicho el intercambio de agua, gracias a estos factores es posible estimar con mayor precisión la cantidad de agua que se conserva en las fronteras del sistema abierto del estudio.

Los factores anteriores representan los diversos caminos de entrada o salida que puede tomar el agua dentro de un dispositivo cuyas características serán planteadas en un capítulo posterior, pero no puede dejarse de lado que juntando los valores anteriores se determina y cuantifica el agua dentro del sistema y también se determina la cantidad de agua que adoptará cada camino diferente.

Primero, en todo sistema hidráulico se tiene la premisa de que el gasto entrante tiene que ser por fuerza el gasto que sale, sin embargo dependiendo el sistema del que se esté hablando y las salidas que se estén considerando, esto puede variar. En este trabajo no se menospreciará el efecto de ningún factor posible, por lo que se propone el siguiente balance:

$$Q_E = Q_s$$
$$Q_s = E_v A + Q_x + f_p A t + h_p A$$

Las literales fueron escogidas arbitrariamente pero a grandes rasgos significan lo siguiente, la literal “ $Q$ ” representa los gastos de entrada, salida y excedencias, respectivamente. Mientras que la variable “ $E_v$ ” representa la lectura de evaporación en unidades de longitud, la variable “ $A$ ” representa el área de estudio sobre la cual actúan los datos, la variable “ $t$ ” simboliza el tiempo de duración del evento meteorológico en unidades que sean compatibles, el índice “ $f_p$ ” significa la capacidad de infiltración dentro del sistema y “ $h_p$ ” representa, como se ha mencionado antes, la altura de precipitación.

El modelo anterior representa el balance total de un sistema propuesto, el cual se revisará más a detalle en el siguiente capítulo.

# Capítulo 2

## Planteamiento del Proyecto

## 2.1 JUSTIFICACIÓN

El proyecto tiene diversos motivos para llevar a cabo su desarrollo, varios de ellos han sido expuestos en la introducción. El principal es llevar a cabo un mejor aprovechamiento de un recurso existente en la zona, mediante el desarrollo de una propuesta que surge por aprovechamiento inexistente de los recursos hidráulicos. También el proyecto se presenta como una medida de mitigación en cuestiones de otros sistemas que pueden verse rebasados en cuanto a la demanda, como podría ser el drenaje que normalmente recibe el agua de lluvia, está claro que al aprovechar un determinado porcentaje de las precipitaciones, se amortiguarán los gastos pico que puedan presentarse en los drenajes y tener influencia para que los mismos no se vean rebasados en algún momento de la tormenta de diseño.

También cabe mencionar que el agua que logre almacenarse para los usos sanitarios en los baños tendrá una reducción más que significativa, en el consumo de agua potable. Como se ha expuesto anteriormente el uso del sanitario conlleva una gran cantidad del uso de la dotación que cada habitante tiene al día, es por esto que al canalizar recursos no aprovechados con el fin de ser utilizados en el área de uso que más consumo tiene, se contribuirá al menor consumo de agua potable para usos en los que dicha calidad no es requerida.

Es claro que la aplicación a gran escala de proyectos de esta naturaleza podría representar un gran ahorro en los gastos que conllevan el uso del agua potable. Un ejemplo claro está en el evidente hecho de que al utilizar, recursos que se encuentran en la locación, o área a la que se desea abastecer, no es necesario invertir en sistemas de conducción que alimenten dicha área desde alguna otra zona por lo general lejana, lo cual evitaría el gasto y la construcción de obras innecesarias.

En segundo lugar se podrían ahorrar recursos destinados a aplicar algún tratamiento de potabilización a recursos hidráulicos que es más que posible no requieran dicho tratamiento, esto se ha mencionado ya, por cuestiones de su disposición final lo cual implica que podrían aprovecharse los recursos mal empleados en otras cuestiones.



Es por los puntos anteriormente expuestos que la realización de proyectos cuya naturaleza sea similar al expuesto en este documento, son necesarios y altamente viables para una mejor disposición de los recursos no solamente hidráulicos, si no también económicos y de mano de obra. Claro está todo esto dentro de la rama del aprovechamiento del agua tomando en cuenta las condiciones del entorno, ya que proyectos de este tipo son viables únicamente en ambientes de precipitaciones medianamente intensas y frecuentes.

## **2.2 DESARROLLO**

El proyecto consta de varias partes que deben desarrollarse de forma consciente para lograr un aprovechamiento completo. En primer lugar para hacer uso del gran conocimiento teórico recabado con este documento. En cierto modo el orden en que se ha presentado la información da una idea de la naturaleza del proceder.

Los datos a tomar en consideración fueron obtenidos de dos fuentes, primero se tienen registros pluviográficos del Sistema Meteorológico Nacional que serán utilizados como un apoyo didáctico, además de proporcionar las bases para las dimensiones del proyecto de filtración y almacenamiento.

En segundo lugar se consideran los datos obtenidos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, que engloban información de toda la zona del Distrito Federal. Estos con propósito comparativo y de mayor precisión ya que consta de información procesada y modelada con grandes periodos de retorno considerados en la misma, de la cual se utilizará la más conveniente en conjunto con la información del SMN para el control de las inundaciones.

Se deben analizar los datos de la zona en la cual este proyecto se propone. Para esto se cuenta con datos recabados por el Sistema Meteorológico Nacional por medio de una estación meteorológica. Dicha estación al poseer un pluviógrafo pudo proveer de datos de

precipitaciones de gran precisión, el rango en que los datos fueron recabados posee un grado de precisión tal que las lecturas fueron registradas cada 10 minutos.

Además con fines de que los datos de las precipitaciones puedan ser usados de forma representativa de la zona, se poseen las lecturas del año 2003 al año 2007. Con dichos datos y trabajando la información de manera estadística se determinó el valor de altura de precipitación a manejar dentro de los eventos meteorológicos de menor magnitud, en este caso los concernientes a la parte de filtración dentro del sistema.

El desarrollo empieza con estos datos, los cuales se utilizarán para determinar la tormenta de diseño, periodo de retorno corto, con la que el proyecto de filtración será desarrollado. Con fines de que la obra resulte económica se ha decidido trabajar con precipitaciones de hasta 30 mm debido a que este valor de precipitaciones es el que se ha presentado más, esto se puede observar en la figura 2.1.

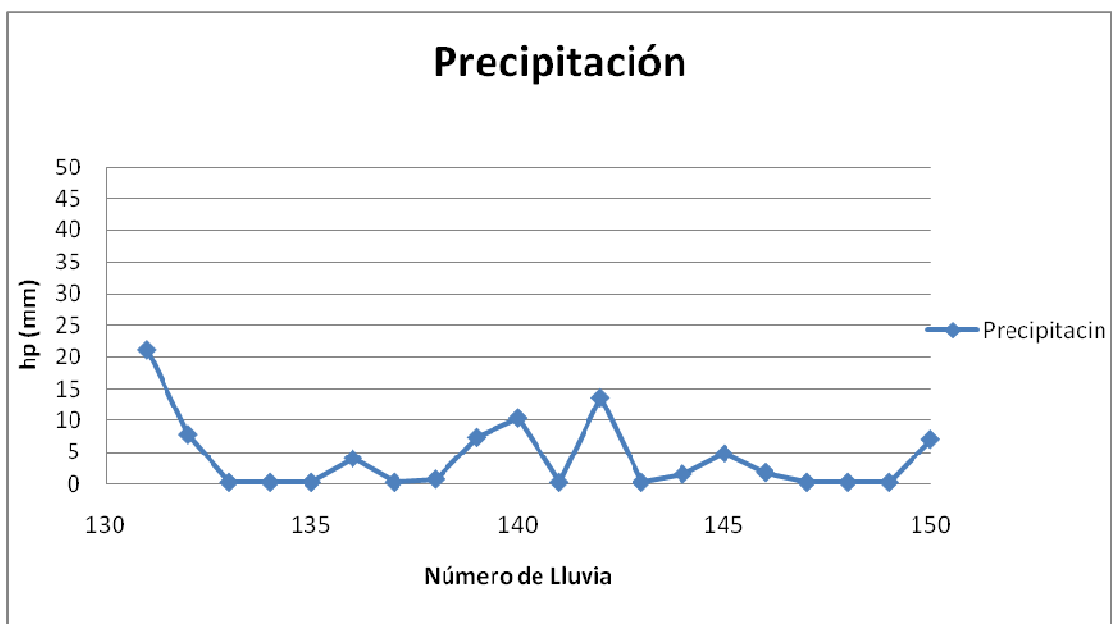


Figura 2.1. Extracto de alturas de precipitación de eventos aislados o ocurridos del año 2003 al 2007.

El gráfico muestra un segmento de las precipitaciones de los datos que se han procesado del registro de los años 2003 a 2007, sin embargo el comportamiento es consistente en el resto de los datos. En general en el eje de las abscisas se puede observar que se ha asignado un número a determinado evento de acuerdo al orden de su ocurrencia, mientras que en el eje de las ordenadas se puede encontrar la altura de precipitación correspondiente registrada. Se observa que en general el rango de precipitaciones manejado recae dentro del intervalo de estudio sugerido es decir con un máximo de 30mm. Lo anterior apoya la idea de que el diseño de precipitaciones se realice dentro de este rango con el propósito de realizar un diseño óptimo para el sistema.

También se observa en la gráfica de probabilidades acumuladas, una clara tendencia dentro de los valores de altura de precipitación menores a 30mm.

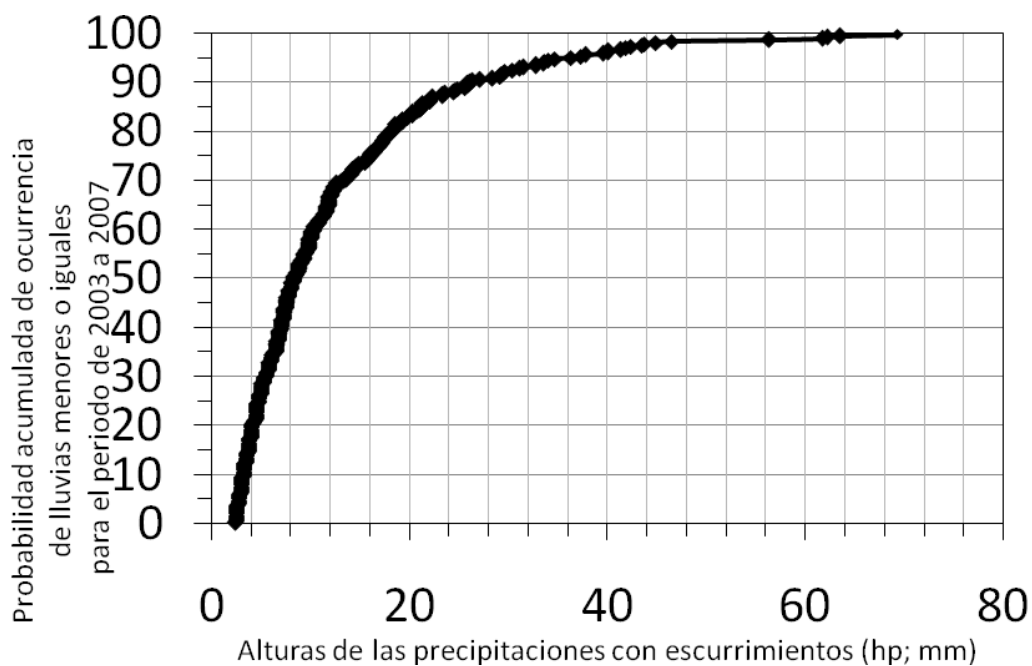


Figura 2.2. Ocurrencia de lluvias mayores que 2.5 mm, en porcentaje, de acuerdo al registro 2003 al 2007.

En la figura 2.2 se observa un drástico cambio en la relación de altura de precipitación y ocurrencia. Es decir el 90% de los eventos meteorológicos posee una altura de

precipitación menor a los 30mm, valor considerado en el diseño de los filtros ya que sería un mal empleo de los recursos realizar un diseño de proyecto mayor con el único propósito de incluir la participación de eventos que tienen menos del 10% de posibilidades de ocurrir.

Esta idea puede verse representada con el espectro de frecuencia de lluvias, el cual es una herramienta útil para determinar criterios para determinar el volumen de agua tratable. El espectro consta de cuatro tipos de frecuencia los cuales varían en propósito y periodo de retorno los cuales se ilustran en la figura 2.3.

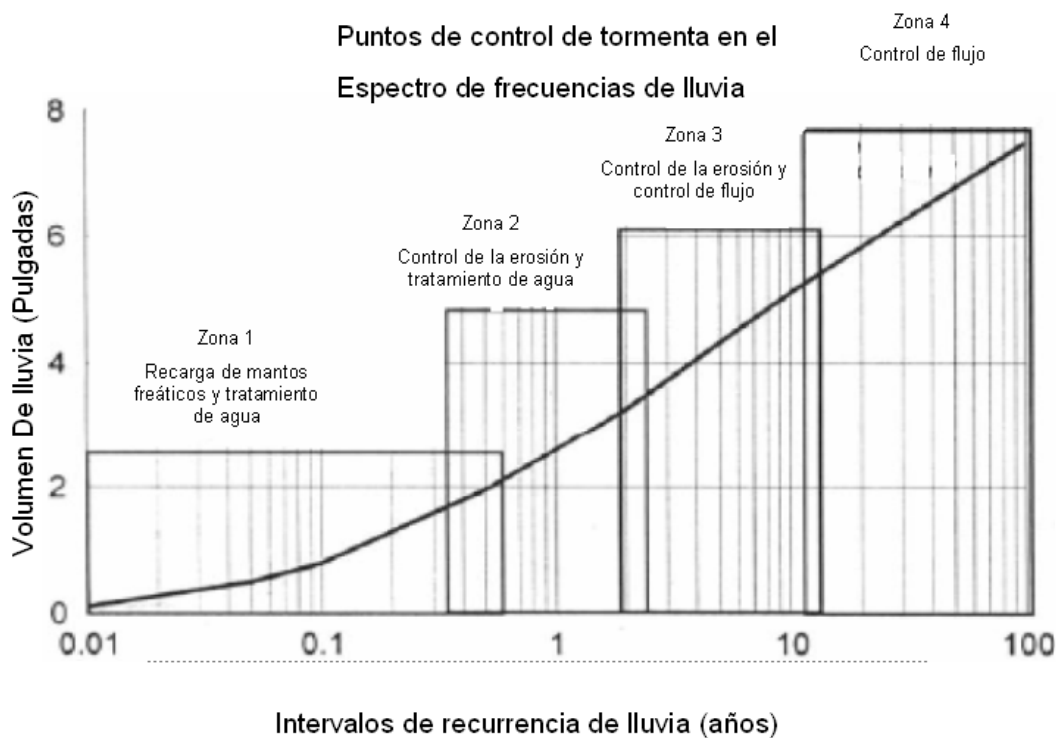


Figura 2.1 Espectro de frecuencias de lluvia (Referencia 7).

La información de la otra fuente (SCT) tendrá su participación dentro del diseño de drenaje y manejo de excedencias dentro del sistema. Esto debido a que es necesario que las obras que manejan el gasto no filtrado posean un tiempo de utilidad mayor ya que no

se pueden diseñar las especificaciones de estos dispositivos con la información del periodo de tiempo tan corto en comparación con el requerido para el diseño de las jardineras filtrantes. El periodo de retorno manejado para esta parte del sistema será del orden de 50 años, para lograr que la obra no se vea rebasada por ningún evento que pueda presentarse en ese periodo de tiempo.

Una vez planteado sobre que rango de los datos se va a trabajar lo primero será obtener las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno, o información de la misma naturaleza con el fin de determinar la tormenta de diseño. Para la obtención de dichas curvas es necesario tener los datos de tormentas de varios años, además de tener sus alturas de precipitación y su duración. Dichos datos están a disposición así que la obtención de las curvas es algo factible.

Algunas dependencias del gobierno o secretarías poseen la información necesaria ya procesada, en forma conveniente, considerando varios intervalos de periodo de retorno para la duración de eventos en lapsos de tiempo variable. Este es el caso de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, dependencia de la cual se ha obtenido dicha información.

La información mencionada posee datos concernientes a las curvas intensidad, duración, periodo de retorno. Sin embargo el formato en que se presentan, son asociadas a isoyetas trazadas sobre un plano de la zona. La información es concerniente a todo el Distrito Federal, tomando en consideración las estaciones pluviográficas de toda la ciudad y no solo la del área de Tacubaya, lo que convierte a la información en aplicable en la zona de este proyecto.

La propuesta trata de trabajar con el valor máximo de 30 mm para altura de precipitación, solo para cuestiones del diseño de los dispositivos del sistema dedicados de primera mano a la filtración. Ya que el análisis de los datos considerados para este fin son de un periodo de tiempo muy corto, no son aptos para el ajuste a un modelo hidrológico, sin embargo ya que la intensidad de la tormenta es lo importante se utilizará el valor mencionado para realizar iteraciones, probando el valor de altura de precipitación con diversas duraciones,

incluido el tiempo de concentración, para observar el evento de diseño de los filtros con intensidades variables.

El proyecto a grandes rasgos consiste en el diseño del sistema para un edificio que abarca un área determinada, por lo cual primero se establecerá la distribución del edificio para identificar los puntos de recolección del mismo. Tomando en cuenta los datos obtenidos de la tormenta de diseño se procederán a hacer cálculos que proporcionen la cantidad de lluvia, así como el gasto que ha de tener lugar durante el evento, el cuál será redirigido hacia la parte del sistema pertinente para iniciar el proceso.

Una vez obtenido el gasto que debe manejarse se analizarán las partes y fronteras del sistema completo y se aclarará el flujo y direcciones para tener nociones claras de su funcionamiento. Una vez hecho esto se puede empezar con el diseño de las partes acorde a los datos recabados.

Se definirán los materiales para un lecho filtrante con capacidad de infiltración especificada por fuentes técnicas de valores recabados experimentalmente y se determinarán las dimensiones y características para su construcción. También se definirá el comportamiento del sistema ante las excedencias que no puedan ser manejadas por el lecho filtrante.

Las excedencias se manejarán por un vertedor rectangular que desembocará en otra sección del sistema que, a su vez, contará con otro lecho filtrante. En conjunto, se cumplirá la función de aprovechar una mayor cantidad de agua de lluvia mediante lechos filtrantes en serie, con el fin de reducir la cantidad de agua que, finalmente, se conduzca hacia el drenaje.

Por último, se realizará un balance de todas las entradas y salidas del sistema, tomando en cuenta el flujo del agua desde su recolección hasta sus múltiples disposiciones. Se compararán los flujos de agua que entran al sistema, así como el agua que es substraída por medio de las excedencias e infiltración.

# CAPÍTULO 3

## ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

## DE LOS DATOS DE LLUVIA

### 3.1 MÉTODOS PARA RECABAR INFORMACIÓN

Los datos necesarios para la realización del proyecto fueron proporcionados por el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y consisten principalmente en registros obtenidos por un pluviógrafo que corresponde a la zona del desarrollo de este proyecto (Tacubaya, D. F.), habiendo hablado ya de las zonas de influencia de una estación meteorológica en capítulos anteriores.

Los registros pluviométricos utilizados poseen características muy particulares dentro de las cuales se deben considerar, el intervalo de estudio de los datos así como la precisión de los mismos. Para este caso el registro tuvo lugar a lo largo de un periodo de cinco años, el cual fue considerado suficiente para el propósito de los datos sea alcanzado, servir de base para el dimensionamiento de las jardineras filtrantes. El periodo de información de lluvias transcurrió a partir de enero del año 2003 hasta diciembre del año 2007.

La precisión con la que trabajó el pluviógrafo que recabó los datos fue de intervalos consecutivos de diez minutos, los cuales permiten observar de forma detallada el inicio de cada evento de lluvia, así como su duración.

Los registros automáticos con intervalos de diez minutos entre ellos son obtenidos del Pluviógrafo del SMN de Tacubaya en el Distrito Federal.

El resto de la información se obtuvo de los registros de la Secretaría de Comunicaciones y transportes (SCT) por medio de la información en sus registros. Dichos registros poseen los valores máximos de intensidades y alturas de precipitación para intervalos de tiempo y periodos de retorno determinados.



### 3.2 PRESENTACIÓN ORDENADA DE LOS DATOS

Los datos tuvieron que ser ordenados y condensados de cierto modo para poder facilitar su uso dentro de los métodos de análisis. Primero se identificaron los sucesos meteorológicos tomando en cuenta una duración de varias horas consecutivas a partir de su inicio. Posteriormente se cuantificó la altura de precipitación de cada uno de ellos.

Gracias a que el registro posee una precisión de diez minutos es posible obtener, en conjunto con la altura de precipitación de las tormentas, la intensidad de la misma. Dichos datos han sido ordenados en tablas para su fácil comprensión y manejo, de las cuales se presentan un extracto en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Extracto del registro pluviográfico de la estación de Tacubaya (A partir de los datos del registro automatizado con intervalos de 10 minutos).

Nº de lluvia	Fecha de término	Hora de término	Altura de lluvia; hp (mm)	Duración (h: min)	Duración (min)	Intensidad (mm/h)
1	2003 Ene 13	00:30	0.25	00:10	10	1.50
2	2003 Ene 13	15:40	0.25	00:10	10	1.50
3	2003 Ene 31	02:30	0.25	00:10	10	1.50
4	2003 Mar 30	00:30	1.00	01:20	80	0.75
5	2003 Mar 31	02:30	18.50	06:30	390	2.85
6	2003 Abr 05	01:30	0.50	00:20	20	1.50
7	2003 Abr 09	03:20	1.26	01:20	80	0.95
8	2003 Abr 09	22:40	0.50	00:20	20	1.50
9	2003 Abr 11	00:30	1.51	04:20	260	0.35
10	2003 Abr 19	01:30	0.76	00:20	20	2.28
11	2003 Abr 20	22:10	1.27	00:20	20	3.81
12	2003 Abr 22	20:50	0.75	00:30	30	1.50
13	2003 May 07	01:20	0.25	00:10	10	1.50
14	2003 May 10	00:20	2.79	00:20	20	8.37
15	2003 May 26	02:50	4.57	00:50	50	5.48
16	2003 May 28	22:40	0.50	00:30	30	1.00
17	2003 Jun 01	01:50	5.07	02:00	120	2.54

Los datos han sido presentados por el orden de ocurrencia, así como también se tiene en el registro el día y la hora en que tuvo lugar.

En la tabla anterior sólo se muestra una mínima parte de los datos, los cuales tienen una gran extensión y no pueden ser presentados dentro del apartado.

La naturaleza de los datos obtenidos de la SCT como se mencionó antes, están asociados a planos con isoyetas trazadas, a continuación se muestra uno de los planos mencionados, Figura 3.1.

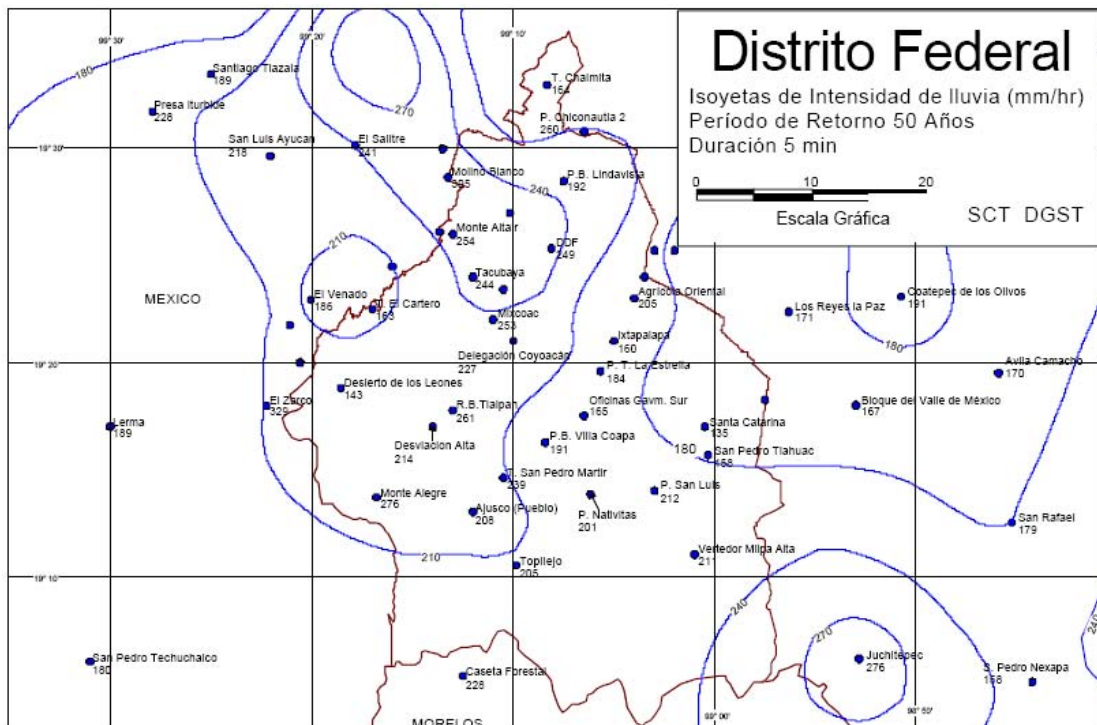


Figura 3.1 Isoyetas de intensidad de lluvia para el D.F. (SCT) para  $T_r$  de 50 años y duración de 5 min. (Referencia 8)

### 3.2 PLANTEAMIENTO DE LA RELEVANCIA DE LOS DATOS RECABADOS

Es importante determinar el grado de utilidad de los datos que se poseen, esto puede realizarse con simple observación hacia los propósitos del desarrollo del sistema.

En primer lugar los datos presentan información que mediante un análisis de tipo estadístico se pueden proporcionar modelos de comportamiento futuro en el sistema dentro de la zona de estudio y así poder ajustar el proyecto de una forma más acertada. Esto es posible gracias a que los datos poseen un registro que podría considerarse constante y en tiempo real, lo cual implica que dentro del periodo de estudio se contó con un registro de casi cualquier instante de cualquier día del periodo de estudio que como se ha dicho constó de varios años.

Los datos recabados muestran que existe una tendencia en el comportamiento y ocurrencia de los sucesos meteorológicos. Es decir se puede ver que se presentan de forma frecuente en determinados lapsos de tiempo: Además, presentan características muy parecidas siempre y cuando se tome como referencia el lapso de un año dentro del periodo de estudio.

Esto quiere decir que los sucesos meteorológicos ubicados en el lapso de un año tienen similitudes, si se ubican en determinada época del año, con respecto a los sucesos de otros años del periodo de registro. Dichas similitudes pueden verse también en los valores de las alturas de precipitación presentadas por los sucesos.

Es gracias a lo anterior que se puede considerar que los datos son representativos, ya que muestran tendencias que se precisan mediante un análisis del tipo estadístico, además es un indicador de que el ajuste estadístico tendrá una confiabilidad suficiente.

### 3.2 ANÁLISIS DE LOS DATOS MEDIANTE MÉTODOS PERTINENTES

En primer lugar, se debe tomar en cuenta que en el diseño de los filtros ya se ha considerado un valor máximo de altura de precipitación, el cual participa dentro del diseño y es expuesto a distintas condiciones de intensidad al variar la duración de lluvia. Este proceso proporcionará valores de varios eventos con un valor de altura de precipitación constante, no obstante las intensidades de los mismos serán variables.

Con dichos datos se procederá a determinar cuál es el más apropiado a considerar con fines de un diseño óptimo y económico del dispositivo, ya que como se ha mencionado, no vale la pena elevar los costos del proyecto por un aprovechamiento con una menor relación costo-beneficio.

El segundo paso a considerar es el proceso de la información de los diagramas de la SCT. Primeramente se tomará un periodo de retorno de 50 años como referencia, ya que al ser esta información para el manejo de excedencias es más recomendable manejar un periodo de esta naturaleza. Por lo mismo se manejarán las curvas que tienen datos concernientes a dicho periodo de retorno.

Los intervalos de tiempo con los que se trabajarán los datos son los manejados por la SCT, de 5, 10, 20, 30, 60, 120 y 240 minutos, con un periodo de retorno de 50 años. El periodo de retorno establecido es una medida que cuida tanto el buen funcionamiento de la obra como su costo, es preferible que la obra se vea rebasada una vez en 50 años que elevar los costos de su construcción que pueden ser significativamente mayores a los costos de reparación que puedan darse.

Al tener localizada el área del proyecto lo que se hará es tomar en cuenta las isoyetas entre las que se encuentra el edificio del proyecto y tomar en consideración un promedio de los valores de dichas isoyetas para el diseño. Esto deberá hacerse para cada intervalo de tiempo para asociar dichos datos de intensidad con sus intervalos de duración y obtener la precipitación.

La información está ordenada en la Tabla 3.3 que muestra los resultados y datos obtenidos de los planos con isoyetas manejados.

T (min)	Isoyeta 1 (mm/h)	Isoyeta 2 (mm/h)	Media (mm/h)	hp (mm)
5	240	210	225	18.75
10	160	140	150	25.00
20	120	100	110	36.67
30	90	90	90	45.00
60	60	55	57.5	57.50
120	35	30	32.5	65.00
240	35	30	32.5	130.00

Tabla 3.3. Altura de precipitación hp a partir de las curvas i-d-Tr de los planos de la SCT para Tr de 50 años.

Se observa que se analizaron los datos para el periodo de retorno mencionado, además de que la información, con propósito de ser asociada de forma más aproximada al área de estudio, considera el promedio de los valores de intensidad de las isoyetas más próximas al edificio, es decir las isoyetas entre las cuales se encuentra.

Es con el procesamiento de estos datos que se trazó la curva i-d para el periodo de retorno Tr de 50 años, la cual se muestra en la figura 3.4

Con los datos anteriores se procede a determinar la lluvia de diseño, la cual forma parte del siguiente apartado. Con el propósito de facilitar el manejo de la información en la gráfica anterior se realiza un ajuste matemático con el fin de producir un modelo con una precisión aceptable hacia los datos originales.

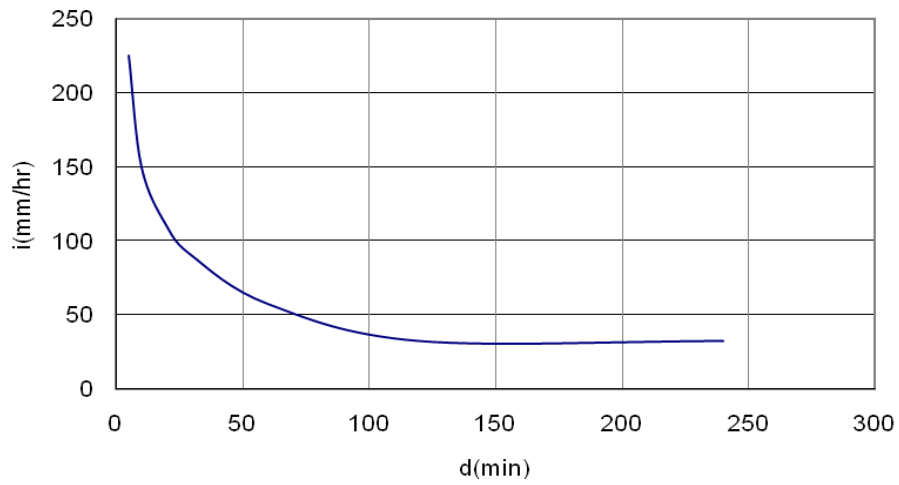


Figura 3.4 Curva i-d para un periodo de retorno  $T_r$  de 50 años (SCT) (Tacubaya, D. F.)

Dicho modelo adquiere la forma de una ecuación del tipo exponencial, el modelo es presentado a continuación.

$$i = 529.13d^{-0.537}$$

Donde la duración se expresa en minutos y la intensidad, en milímetros por hora, la semejanza de los datos del modelo, a los datos reales recabados puede observarse en la figura 3.5

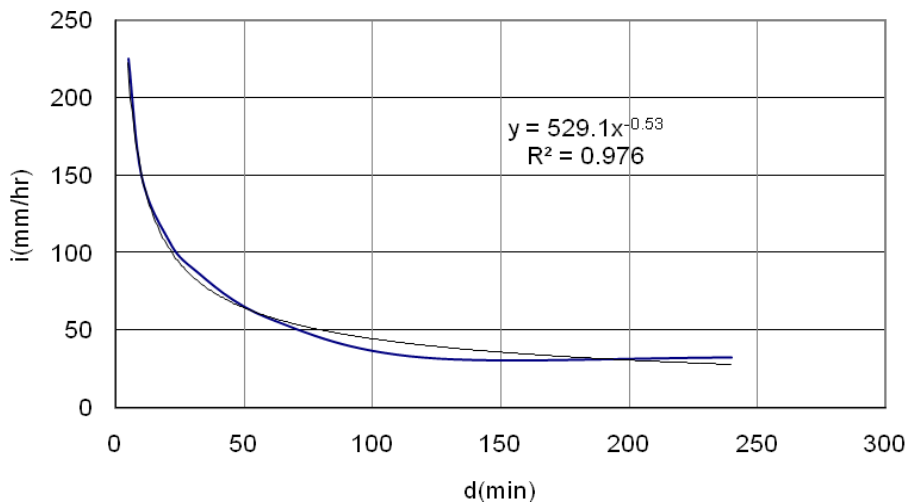


Figura 3.5 Modelo de intensidad duración obtenido a partir de los datos de la SCT.

### 3.5 LLUVIA DE DISEÑO

Como se ha mencionado el diseño se verá dividido en torno a dos eventos meteorológicos, los destinados al diseño de los filtros y, los considerados para el diseño del manejo de excedencias, primero se abordará el filtrado.

Se ha establecido un valor de altura de precipitación máxima de 30mm para el diseño del filtro, por lo tanto, la lluvia de diseño tendrá ese valor para filtración y almacenamiento. Sin embargo hace falta determinar las posibles intensidades, para lo cual es adecuado seleccionar intervalos regulares de tiempo. Siendo un evento para filtración hay que tener en cuenta las condiciones más críticas, las cuales recaen desde luego en los eventos de menor duración, con lo cual se seleccionarán intervalos de 5 a 60 minutos.

Con dichos intervalos se seleccionarán intensidades, así como tiempos de retención y otros datos pertinentes, los cuales se verán desarrollados en el apartado de diseño. Sin embargo se presentan los datos mencionados con el propósito de observar los diversos escenarios que pueden referirse a la tormenta de diseño, Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Intensidades posibles de la tormenta de diseño

hp (mm)	Duración (min)	i (mm/h)
30	5	360
30	10	180
30	20	90
30	30	60
30	40	45
30	50	36
30	60	30

# CAPÍTULO 4

## DISEÑO



#### **4.1 CONDICIONES Y CONSIDERACIONES INICIALES**

Una de las consideraciones iniciales es el identificar al sistema con el perfil de alguna cuenca conveniente y así poder determinar qué camino seguir para su estudio. La cuenca será considerada como una cuenca pequeña no instrumentada.

Dicho método también se utiliza para determinar los gastos de diseño en alcantarillado, y debido a la naturaleza del funcionamiento del proyecto esto es benéfico para el mismo.

Dentro de las consideraciones iniciales hay que tomar en cuenta las características justificadas de la cuenca para que funcione el sistema, eso incluye datos de área, longitud y pendiente de la misma. Para esto se determinan los elementos para la configuración de la zona de estudio.

El área de la cuenca constaría principalmente de la zona de captación la cual está compuesta por el área de las diversas azoteas del edificio para el cual se diseña el sistema, además de la que ocupan las jardineras de filtración. Las áreas son obtenidas a partir del plano del edificio y sus inmediaciones. Dicha área de captación constará de 14 zonas que poseen extensiones diferentes, a manejar en metros cuadrados. Las áreas de las azoteas serán consideradas como zona de captación, sin embargo no se verán consideradas dentro de la longitud del cauce al cual se aproxima el sistema. Se tendrán que considerar como área de captación, las jardineras, es así como se forma un esquema de las diversas entradas de gasto que se tienen.

Una de las consideraciones es que el funcionamiento del drenaje para el manejo de excedencias posea una naturaleza tal que, el tiempo de escurrimiento en el cual ingresa el agua de las excedencias dentro de la atarjea es prácticamente cero. La consideración se centra en el hecho de que el drenaje puede manejar cualquier gasto de excedencias que el sistema proporcione sin afectar el funcionamiento del mismo, dentro de un periodo de retorno de 50 años.

El funcionamiento sistemático se verá explicado en un apartado posterior, sin embargo para tener una idea clara del procedimiento es necesario explicar que el dispositivo operará dividido en dos partes, sistemas paralelos, las cuales presentarán características parecidas. El funcionamiento del dispositivo se verá inducido por medio de la imposición de pendientes en el terreno de tal forma que el agua siga un curso preestablecido.

Está claro que al ser el propósito la filtración se considerará un suelo tipo "A" para la aplicación en las jardineras y su subbase, esto quiere decir que se tratará principalmente de suelos muy permeables recubiertos con pastizales además de poseer una pendiente de un valor alrededor del uno por ciento. Esto es con el propósito de obtener agua con un tratamiento suficiente, además de que recaiga en los ámbitos prácticos en cuanto a su obtención.

A continuación se presentarán los valores del coeficiente "n" necesarios para el uso de la fórmula propuesta por Kerby.

Tipo de superficie	n
Superficies impermeables	0.02
Suelo desnudo, empacado, liso	0.10
Superficies desnudas, moderadamente rugosas	0.20
Césped pobre y cosechas cultivadas en surco	0.20
Pastos forrajeros o comunes	0.40
Tierras madereras	0.60
Tierras madereras con lecho profundo	0.80
Bosque de coníferas	0.80
Pastos densos	0.80

#### 4.1.1 Hidrogramas

Primero para el diseño de los filtros hace falta visualizar el funcionamiento de los mismos. Las condiciones iniciales son las óptimas, es decir, el suelo del dispositivo filtrante o jardinera no ha sufrido alguna especie de saturación previa. Esto conlleva que al presentarse una tormenta o evento el suelo posee, dependiendo de la magnitud del evento, la capacidad de absorber una fracción de las precipitaciones con propósitos de filtrado, dicho esto se asume que el resto formará parte del escurrimiento, formando un gasto que transitará por el sistema como excedencia.

Las excedencias de una parte o jardinera del sistema pueden verse aprovechadas por las partes subsecuentes (jardineras en serie). Sin embargo esto depende de qué tan rápido transite ese gasto a través del mismo, es por esto que es necesario calcular el tiempo que transcurre desde que el agua de las precipitaciones ingresa al sistema hasta que lo deja, a esta variable se le llamará tiempo de ingreso. Que es posible estimarlo mediante fórmulas empíricas. La fórmula será la propuesta por Kerby.

$$t_i = \frac{2}{3} L \left( \frac{n}{\sqrt{S}} \right)^{0.467}$$

Donde, "L" es la longitud del cauce principal, en metros, y "S" es la pendiente del cauce expresado en porcentaje, "n" es un coeficiente de rugosidad que depende de la superficie, dichos datos han sido estipulados en las consideraciones iniciales, cabe señalar que el valor tomado será de 0.40 debido a que en la superficie de las jardineras se sembrarán pastos comunes, luego de esto se considerará una pendiente del uno por ciento y una longitud de setenta metros para la primera parte de la cuenca, es así como se obtiene:

$$t_i = \frac{2}{3} L \left( \frac{.4}{\sqrt{1}} \right)^{0.467}$$

Donde la "L" es la longitud de la cuenca considerada en metros, la cual tendrá un valor variable dependiendo del tramo del sistema considerado. Se realizará un análisis separado

de seis partes del sistema, una por jardinera, con el fin de realizar un diseño adecuado de cada uno. Con este fin se requiere de tablas que ordenarán los datos y darán una idea más clara del ingreso y salida del agua en cada parte.

Para el estudio de cada jardinera se debe tener en cuenta que cada una posee un gasto constante, después de esto se le agrega lo que pueda producir la tormenta, como ejemplo se observa que la jardinera de entrada al sistema maneja el gasto que le proporciona la azotea del edificio que funge como área de captación, además del que capta por la tormenta.

Dicho esto se propone un manejo de datos que asocie las áreas de captación (azoteas), con la jardinera que le corresponde para asociar los datos importantes en el desarrollo del hidrograma, como el tiempo de ingreso.

Para fines del proyecto se utilizará material altamente permeable de tipo arenoso, que no contenga ninguna especie de finos, asegurando así, el mayor aprovechamiento durante la filtración. Una vez establecido el material se tomará en cuenta su capacidad de infiltración. Esto de la constante de permeabilidad del suelo otorgada por los datos del "Soil Conservation Service" que establece una permeabilidad de 75 mm/h en el caso de los suelos arenosos.

Los hidrogramas serán trazados por medio de un método gráfico el cual permite trazarlos con base en el tiempo y el gasto pico, que es el valor de gasto máximo que interesa en el diseño. Se sabe que es necesario conocer la duración efectiva del evento para poder determinar el hidrograma del mismo, sin embargo gracias a la consideración inicial hecha de que el dispositivo sería tratado como una cuenca pequeña no instrumentada, se asume que la duración efectiva es igual al tiempo de concentración y se utiliza la ecuación siguiente.

$$t_p = \frac{t_c}{2} + 0.6 * t_c$$

Donde el tiempo de las variables son " $t_p$ " tiempo pico y " $t_c$ " tiempo de concentración, el cual al tomar en cuenta la consideración acerca del drenaje resulta ser igual al tiempo de ingreso " $t_i$ " mencionado anteriormente.

Debido a que el sistema constará de 6 fracciones, una por jardinera, es necesario señalar que el gasto que las jardineras perciban por parte de otros elementos posee su propio comportamiento y a su vez su propio hidrograma. Por lo cual se observará que conforme la sección se encuentre más cerca de la salida de excedencias mayor será el gasto que maneje, debido a que existe un acumulado a lo largo del sistema.

A continuación se presentan los hidrogramas de la tormenta de diseño, cada hidrograma representa una sección diferente del sistema ante la cual se realizará el diseño, figuras 4.1 a 4.6

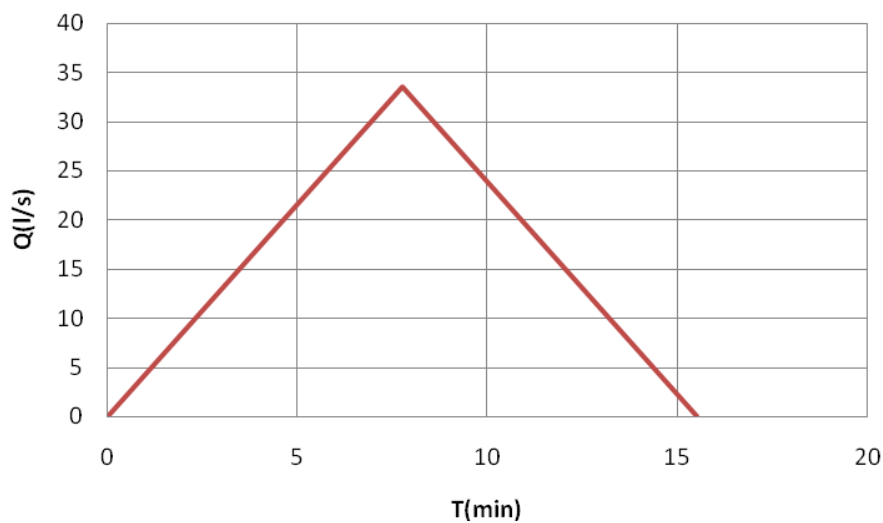


Figura 4.1 Hidrograma de la 1ª Sección del sistema

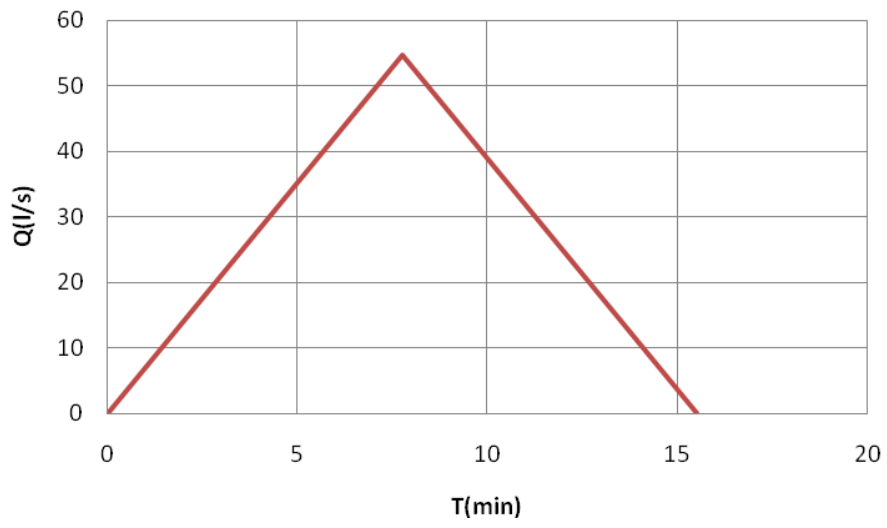


Figura 4.2 Hidrograma de la 2° Sección del sistema

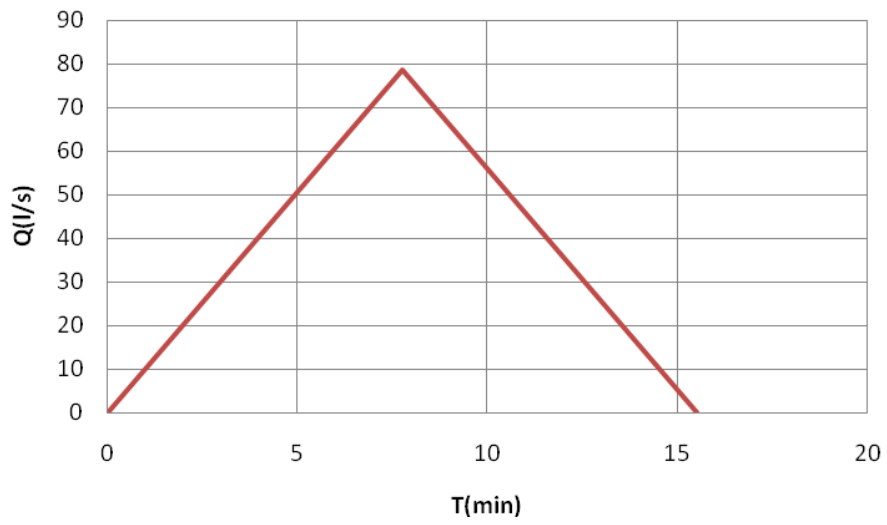


Figura 4.3 Hidrograma de la 3° Sección del sistema

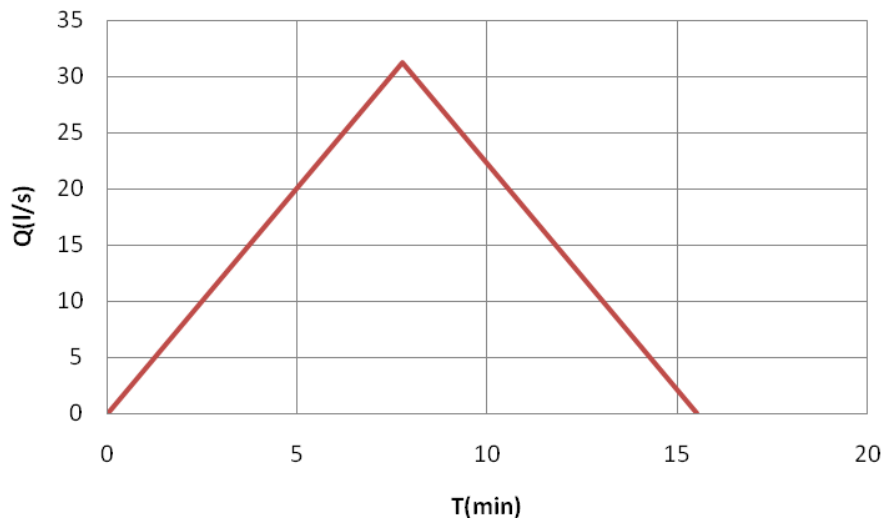


Figura 4.4 Hidrograma de la 4° sección del sistema

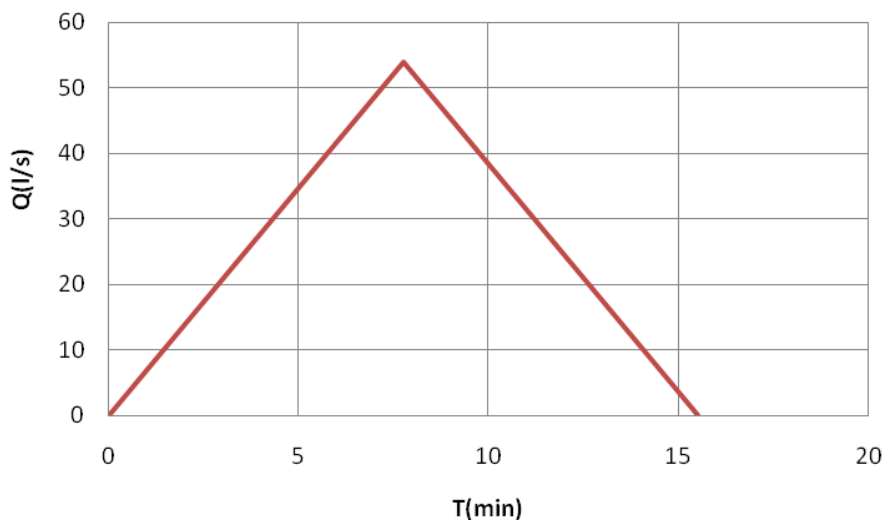


Figura 4.5 Hidrograma de la 5° sección del sistema

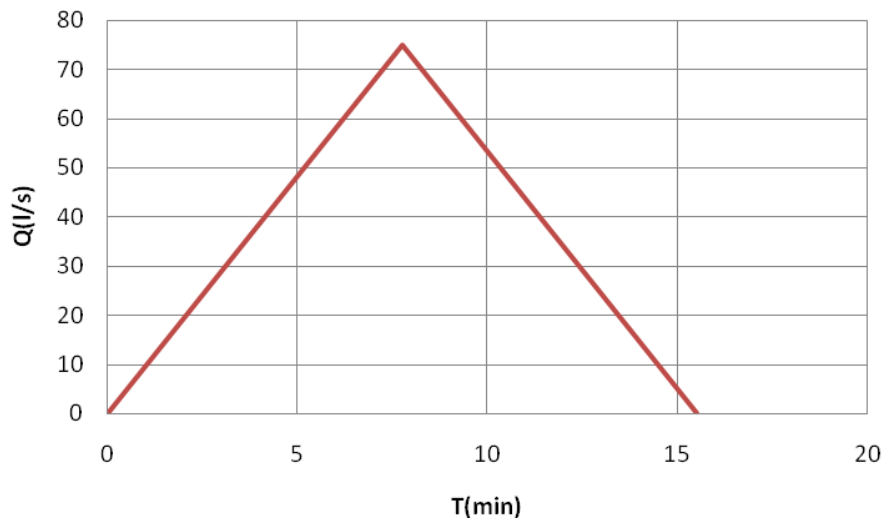


Figura 4.6 Hidrograma de la 6° sección del sistema

Con fines de comprensión a continuación se explica el procedimiento detallado para la obtención del hidrograma en la primera sección del sistema, de modo que se puede conceptualizar una idea general del procedimiento algebraico.

La sección uno se conforma por las áreas de captación número 6, 11 y 12 por lo cual se puede deducir que el hidrograma representa el gasto conjunto de las 3 áreas de captación.

Primero se obtienen las dimensiones de cada área para la cuantificación que se verá relacionada con la intensidad de lluvia y finalmente asociada con los gastos de la sección. Los resultados son expresados de forma ordenada a continuación (Tabla 4.1).



TABLA 4.1. Gastos de las secciones del sistema

Zona	L(m)	ti(min)	tp(min)	i(mm/hr)	f	C	A(m2)	Q(l/s)
6.00	25.00	10.86	11.95	139.64	75.00	0.46	328.00	5.89
4.00	18.00	7.82	8.60	166.57	75.00	0.55	280.00	7.12
2.00	15.00	6.52	7.17	183.71	75.00	0.59	378.00	11.42
5.00	24.00	10.43	11.47	142.73	75.00	0.47	242.00	4.55
3.00	21.00	9.13	10.04	153.34	75.00	0.51	336.00	7.31
1.00	15.00	6.52	7.17	183.71	75.00	0.59	312.00	9.42
11.00	12.00	5.21	5.74	207.10	0.00	0.95	238.00	13.01
12.00	14.00	6.08	6.69	190.64	0.00	0.95	285.00	14.34
13.00	14.00	6.08	6.69	190.64	0.00	0.95	285.00	14.34
14.00	14.00	6.08	6.69	190.64	0.00	0.95	285.00	14.34
10.00	12.00	5.21	5.74	207.10	0.00	0.95	245.00	13.39
9.00	14.00	6.08	6.69	190.64	0.00	0.95	281.00	14.14
8.00	15.00	6.52	7.17	183.71	0.00	0.95	285.00	13.82
7.00	14.00	6.08	6.69	190.64	0.00	0.95	260.58	13.11

Se puede ver que en cada zona el tiempo de ingreso ha sido calculado en minutos con la fórmula mencionada anteriormente, dicha variable depende de la longitud de la sección, en este caso se tomará como ejemplo la sección 6.

$$t_i = \frac{2}{3} (25) \left( \frac{.4}{\sqrt{1}} \right)^{0.467} = 10.86 \text{ min}$$

Posteriormente se obtiene el tiempo pico a partir del tiempo de ingreso con la fórmula ya expuesta.

$$t_p = \frac{10.86}{2} + 0.6 * 10.86 = 11.95 \text{ min}$$

Posteriormente y tomando la consideración de que presentándose el gasto pico, la intensidad de la lluvia es máxima es necesario que a partir del este dato se obtenga la intensidad de lluvia máxima para la sección. Esto será posible gracias a la ecuación de intensidad y duración obtenida con anterioridad. (Fig. 3.5)

$$i = 529.13(11.95)^{-0.537} = 139.64 \frac{mm}{hr}$$

Después de esto se obtiene el coeficiente de escurrimiento utilizando el dato de permeabilidad del suelo arenoso en conjunto con la intensidad de lluvia obtenida anteriormente y así poder determinar qué porcentaje de las precipitaciones transitará por la sección así como también que porcentaje se infiltrará.

$$C = 1 - \frac{75}{139.64} = 0.46$$

Lo cual significa que el 46% de las precipitaciones realizará su aportación al gasto que transitará por la sección y que el otro 54% se infiltrará a través del lecho.

Posteriormente lo único que resta hacer es determinar el gasto implícito en el anterior valor de intensidad, esto es posible gracias a que la geometría de la sección es conocida por lo cual se cuenta con el dato del área que al ser multiplicado y convertido a las unidades adecuadas brindan el gasto máximo que transitará por la sección.

Sin embargo al depender el tiempo de concentración de la longitud de la misma, además de contar con distinta geometría para todas las secciones, los tiempos obtenidos son diferentes para cada sección. La propuesta es predecir el comportamiento del sistema completo para el evento de diseño, es por esto que para cuestiones de diseño se decide utilizar el tiempo de ingreso medio obtenido a partir de los datos de la Tabla 4.1 y así realizar el ajuste pertinente a los demás datos. Dichos resultados se expresan a continuación, Tabla 4.2.

TABLA 4.2. Ajuste de los gastos del sistema

Zona	L(m)	ti(min)	tp(min)	i(mm/hr)	f	C	A(m <sup>2</sup> )	Q(l/s)
6.00	25.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	328.00	9.22
4.00	18.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	280.00	7.87
2.00	15.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	378.00	10.63
5.00	24.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	242.00	6.80
3.00	21.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	336.00	9.44
1.00	15.00	7.05	7.75	176.19	75.00	0.57	312.00	8.77
11.00	12.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	238.00	11.07
12.00	14.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	285.00	13.25
13.00	14.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	285.00	13.25
14.00	14.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	285.00	13.25
10.00	12.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	245.00	11.39
9.00	14.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	281.00	13.07
8.00	15.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	285.00	13.25
7.00	14.00	7.05	7.75	176.19	0.00	0.95	260.58	12.12

Cabe aclarar que varias de las secciones están conformadas tanto por jardineras o por techos de los edificios circundantes. Por cuestiones de diseño el área de captación ubicada en alguno de los techos de los edificios se considerarán completamente impermeables lo cual provocará que su capacidad de infiltración “f” sea considerada como “0”, sin embargo para el aporte de estos al gasto, se considerará que las precipitaciones que participan en el escurrimiento se encuentran en el orden del 95% por factores que puedan presentarse como irregularidades en su superficie, etc.

Es claro que al tratarse el sistema como una cuenca no instrumentada el tiempo base considerado para el hidrograma será el doble del tiempo pico, consideración que al final permite el trazado de los hidrogramas anteriormente expuestos

## 4.2 PLANTEAMIENTO DEL ARREGLO EN FORMA GENERAL

El sistema contará con un funcionamiento de varias secciones, las cuales aún sin variar en las partes que lo conforman poseen una diferencia en los gastos que manejarán. Se podría decir que el arreglo en el que se encuentran las partes del sistema posee una naturaleza en serie ya que ciertas partes del sistema tienen influencia directa sobre las siguientes provocando que el diseño de la parte dependiente sea basado en la influencia de la sección aguas arriba.

### *4.2.1 Descripción del sistema y su funcionamiento*

Como se ha mencionado el sistema tiene varias partes las cuales cumplen una función específica dentro del mismo, a continuación se explicará el funcionamiento desde el inicio del proceso hasta la disposición final.

Al darse un evento meteorológico o tormenta, el agua producto caerá en los terrenos del proyecto siendo captada de inmediato por zonas establecidas: las azoteas de los edificios y las jardineras. Las azoteas estarán acondicionadas de manera que puedan conducir el volumen de agua captado a alguna de las jardineras haciendo que el aprovechamiento sea mayor. Dentro de la jardinera, la cual se comportará como un canal de geometría rectangular, se producirá un tirante cuya presión sobre el suelo provocará la filtración de una parte del volumen de agua conducido, gracias a esto los sólidos de mayor tamaño serán removidos y el agua obtenida podrá utilizarse para propósitos sanitarios. El agua que no es filtrada escurre a través del canal hacia un vertedor y es tratada como volumen excedente, una vez que el agua de excedencias pasa a través del vertedor, será trasladada hacia una nueva sección del sistema donde será sometida al proceso anterior una vez más, con la intención de que se aproveche un porcentaje del volumen de excedencias, este funcionamiento actuará hasta llegar al final del sistema donde la disposición final del agua de excedencias será el drenaje local.

#### *4.2.2 Descripción de las partes del sistema*

El sistema consta de varias partes que tienen funciones diferentes, como en toda obra hidráulica, existen partes que se encargan del suministro, conducción y disposición final, es el caso de este proyecto, sin embargo para fines de este trabajo existirán partes que se encargaran de la captación parcial del agua y la canalización de la misma para fines de uso sanitario. En el siguiente apartado se dará una descripción de dichas partes y de su funcionamiento en forma detallada.

##### *4.2.2.1 Jardines para filtración y retención*

Esta parte del sistema en particular es la más importante ya que es la que le brinda significado al proyecto. Para conceptualizar su funcionamiento hay que entender los propósitos con que se utilizarán estos jardines ya que poseen algunas diferencias fundamentales con respecto a los filtros para tratamiento de agua potable.

Las jardineras constarán de una geometría rectangular a través de la cual fluirá el volumen captado con una pendiente establecida del 1% al momento de la construcción. Se contará con un lecho filtrante de granulometría tal, que el material pueda ser considerado de una permeabilidad alta, a través de los datos del "Soil Conservation Service" se estima dicha permeabilidad para una tasa de infiltración de 75mm por hora.

El filtro contará con una capa de dicho material permeable, algún material arenoso, con un grosor adecuado para los objetivos de filtración, y una capa inferior de algún material con una granulometría mayor y por lo tanto una mayor capacidad de infiltración, por lo cual su propósito será únicamente de soporte hacia la primera capa, para dicho material se consideran las gravas.

En la base de las jardineras se encontrará el dispositivo de captación para el agua filtrada, que la conducirá hacia un depósito secundario para su almacenamiento y posterior utilización.

#### 4.2.2.2 Vertedor

El vertedor será la estructura de manejo de excedencias que se localizará al final de cada jardinera con el fin de disponer del volumen de agua que no fue sometido al proceso de filtración. Dicho vertedor tendrá una geometría rectangular con contracciones laterales y descargará hacia una canaleta comunicada con la siguiente jardinera o en su defecto con el drenaje. El vertedor se verá embebido dentro de la parte final de la jardinera aprovechando dicha estructura para la construcción.

El dimensionamiento final de este dispositivo se realizará mediante la información de la tormenta de diseño obtenida de la SCT para asegurar que la obra no sea rebasada en un periodo de retorno determinado.

#### 4.2.2.3 Lecho filtrante

El lecho filtrante como se ha mencionado anteriormente se encontrará esparcido a través de toda la geometría de la jardinera. Además que sus dimensiones se ajustarán de acuerdo a la conveniencia del proyecto. Se debe hacer notar que el funcionamiento del lecho difiere de los lechos utilizados para procesos de potabilización, sin embargo es necesario que se tomen como referencia dichos valores ya que establecen dimensiones necesarias para el correcto funcionamiento de un lecho filtrante.

Se mencionó que consta de dos capas las cuales serán de materiales graduados para asegurar la tasa de infiltración, para dichos materiales se considerarán las arenas para la primera capa y las gravas para la segunda.

#### 4.2.2.4 Manejo de excedencias

Está claro que dicho manejo de una forma muy particular se da a través de los vertedores, sin embargo este apartado se enfoca más en la disposición final en la cual, las partes del sistema verterán el volumen total de excedencias dentro de un colector cuyo destino final es el drenaje, dicho dispositivo colector constará de una canaleta cubierta por una coladera, la cual se comunicará con un tubo de diámetro adecuado para asegurar que el rango de las velocidades en el tubo sean las adecuadas.

#### 4.2.3 Arreglo general

Con la información anterior se tiene la idea del funcionamiento del dispositivo, sin embargo a continuación se presenta el arreglo con el cual se trabajará explicado a manera de un diagrama, ver figura 4.7

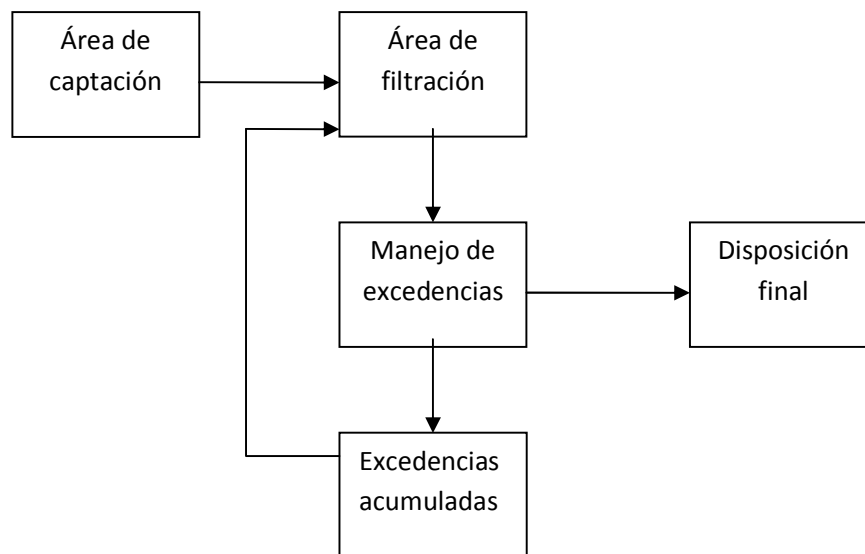


Figura 4.7 Arreglo general del sistema

Cabe mencionar que dentro de la figura las flechas simbolizan la conducción que comunica cada sección.

### 4.3 DIMENSIONAMIENTO ACORDE A LOS DATOS RECABADOS

En el presente apartado se darán a conocer las dimensiones finales de cada una de las partes que componen al proyecto, dicho dimensionamiento estará basado en los datos recabados y consideraciones reportadas.

Se ha mencionado que las áreas de captación consisten en catorce espacios, de los cuales según la nomenclatura utilizada en este trabajo las áreas numeradas de la uno a la seis consisten en las jardineras, las cuales fueron dimensionadas de acuerdo a la distribución del área de proyecto, al ser de geometría rectangular cuentan con dos dimensiones las cuales se expresarán a continuación (Tabla 4.3).

TABLA 4.3. Dimensiones de las jardineras filtrantes

Jardinera	Lado A (m)	Lado B (m)	Área (m <sup>2</sup> )
1	15	21	315
2	15	25	375
3	21	16	336
4	18	16	288
5	24	10	240
6	25	13	325

Donde el lado "A" es aquel que se encuentra coincidente con el sentido del flujo del sistema.

Posteriormente se debe considerar la altura de la barda de retención de la jardinera, a partir de la superficie de la capa del lecho filtrante, es decir, la altura de los muros de contención que encausarán el agua a través de los dispositivos, para este fin se tienen dos criterios a considerar. El primero es la altura de almacenamiento, cuyo propósito es proporcionar tiempo extra al lecho filtrante para poder procesar una mayor cantidad de agua. El segundo consiste en determinar la altura tal que el vertedor que manejará las excedencias tenga un funcionamiento adecuado.

El primer dimensionamiento parte del hecho de que los datos recabados en los últimos cinco años señalan que de las tormentas que puedan darse, el 90% de ellas tendrán una



altura de precipitación de 30mm o menos, por lo cual este valor se considera como una característica de diseño para cuestiones de control de calidad almacenamiento.

Dicho almacenamiento, tendría que tener entonces una altura de 30mm a partir de la superficie del lecho filtrante. Sin embargo, sería un desperdicio de recursos utilizar el valor máximo de almacenamiento, teniendo en cuenta dicha observación se procede a estimar qué valor de diseño es el más probable, el cual forzosamente debe ser menor al valor máximo antes mencionado. El almacenamiento captará parte del agua de precipitaciones y el volumen restante se considera dentro de las excedencias. Para obtener dicho valor probable se observa el comportamiento de la tormenta con diversas intensidades (Tabla 4.4)

TABLA 4.4. Intensidades para el evento de diseño en almacenamiento

hp (mm)	Duración (min)	i (mm/h)	f (mm/h)	C
30	5	360	75	0.79
30	15	120	75	0.38
30	20	90	75	0.17
30	30	60	75	0.00
30	30	60	75	0.00
30	50	36	75	0.00
30	60	30	75	0.00

Dentro de la tabla anterior es posible observar cómo se comporta la tormenta de diseño en diversas situaciones y cómo dichas situaciones afectan el coeficiente de escurrimiento "C", cabe mencionar que "f" es la constante de capacidad de infiltración del material del lecho filtrante propuesto.

Se puede observar un comportamiento dentro del cual al poseer una menor intensidad de tormenta, el coeficiente de escurrimiento tiende a disminuir al grado de que en los eventos menos intensos, el coeficiente de escurrimiento es nulo, es decir el volumen total de lluvias alcanza a filtrarse.

Para obtener el valor de diseño es necesario establecer el valor más probable de duración del evento, esto se puede realizar con la información de la SCT como se ha mencionado, se recurre a la curva masa generada por dicha información y se selecciona el valor de altura de precipitación de 30 mm con lo cual la curva masa arroja que si se da dicha altura de precipitación la duración más probable resulta ser de 15min. Dicha curva masa es obtenida a partir de la ecuación de la curva de i-d-Tr manejada con anterioridad al asignarle valores de duración a la ecuación. Dicha curva es expresada a continuación, figura 4.8.

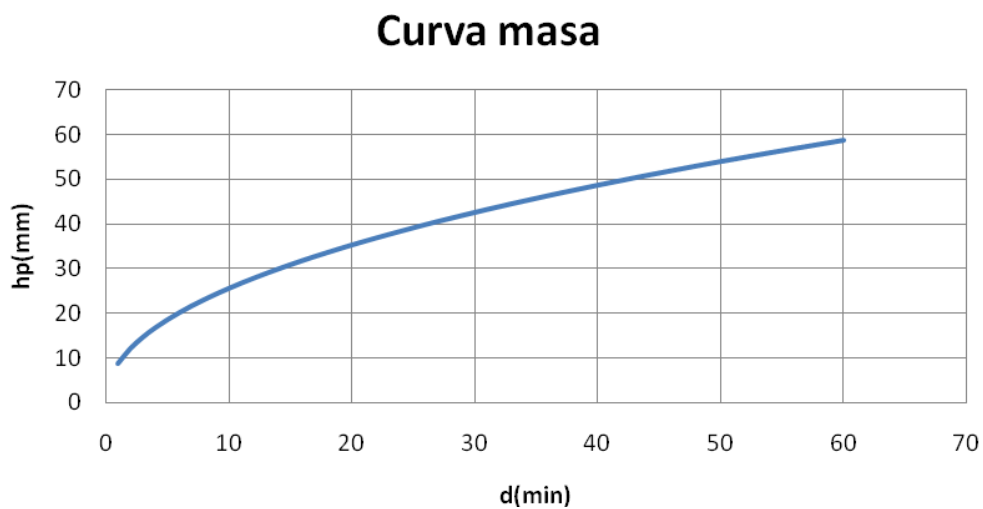


FIGURA 4.8. Curva masa

Obtenido dicho valor se observa la tabla 4.4 para obtener el coeficiente de escurrimiento acorde, el cual adquiere un valor de 0.38. Lo anterior quiere decir que presentándose el evento de diseño para almacenamiento, el escurrimiento probable es el 38% del volumen escurriría en condiciones normales.

Sin embargo debe tomarse en cuenta que aunque el almacenamiento tiene como propósito el mayor aprovechamiento de la lluvia de diseño, no debe ignorarse que en cierto modo la capacidad de captación de las jardineras se hace extensiva hacia el volumen captado de las azoteas de las cuales reciben determinado volumen de agua. Esto

es debido a que las azoteas poseen un coeficiente de escurrimiento de un valor cercano al 0.95 debido a que son supuestas impermeables.

Lo anterior obliga a considerar que el volumen captado de las azoteas será cuantificado y traducido a una altura de precipitación adaptada el área de la jardinera a la cuál conduzca la azotea. Dicho valor también es la altura de precipitación de 30 mm ya manejada por cada jardinera y tomando en cuenta esto, se determinará el coeficiente de escurrimiento. Los resultados de dicho proceso se expresan a continuación (Tabla 4.5).

TABLA 4.5. Coeficientes de escurrimiento total para jardineras

Sección	Area (m <sup>2</sup> )	Azotea (m <sup>2</sup> )	hp (mm)	hp (total)	Duración (min)	i (mm/h)	f (mm/h)	C
1	312	378	30	54.76	15	219.05	75	0.66
2	375	285	30	69.47	15	277.89	75	0.73
3	336	285	30	65.37	15	261.47	75	0.71
4	288	285	30	60.32	15	241.26	75	0.69
5	240	281	30	55.62	15	222.49	75	0.66
6	325	285	30	64.21	15	256.84	75	0.71

A continuación se explica más detalladamente la obtención de la Tabla 4.5.

Primero se observa que la tabla maneja las 6 secciones del sistema además de poseer sus datos de área, esto es con el propósito de poder obtener la altura de precipitación que le aporta a cada jardinera las azoteas correspondientes es por esto que el aprovechamiento deseado de la tormenta de diseño de 30mm influirá dentro de la obtención de dicho dato. Se hace la suposición de que cada área de captación se verá sometida a la altura de precipitación total de la tormenta es decir 30mm, una vez hecha dicha consideración se debe tomar en cuenta que las azoteas se limitan únicamente a la captación, es por esto que el volumen captado dentro ellas se verá transmitido a la jardinera pertinente casi en su totalidad. Sin embargo el dato que interesa realmente es cuánto aumentará la altura de precipitación dentro de la jardinera correspondiente al redirigir el volumen manejado por la azotea hacia ella. Es de esperarse que no coincidirá con el valor de 30mm debido a que las áreas son distintas, es por esto que se debe utilizar una fórmula de conversión la cual fue obtenida de forma aritmética, dicha ecuación se presenta a continuación.

$$hp_T = \left(1 + \frac{A_j}{A_{az}}\right)(hp_t)$$

Siendo “ $hp_T$ ” la altura de precipitación total manejada por la jardinera, “ $hp_t$ ” la altura de precipitación de la tormenta, ambas expresadas en mm, “ $A_j$ ” el área de la jardinera y “ $A_{az}$ ” el área de la azotea correspondiente en unidades concordantes. Es así como se puede observar que el coeficiente de escurrimiento de 0.38 con el que originalmente operaban las jardineras, se ve modificado por el hecho de que el volumen de las azoteas es manejado por las mismas de forma adicional. A continuación se ejemplifica el primer renglón de la Tabla 4.5

Al observar la fórmula planteada anteriormente, se realiza la sustitución de sus valores

$$hp_T = \left(1 + \frac{312}{378}\right)(30) = 54.76mm$$

Y así se observa que la altura de precipitación que la jardinera manejará es superior al valor original de 30mm, en un 80% aproximadamente. Después de observar este incremento es necesario obtener las intensidades teóricas que el manejo de dicho volumen de agua produciría en las jardineras, para esto se hace la consideración de que las azoteas transmiten el volumen de agua en un lapso de tiempo muy corto. A continuación se ejemplifica la obtención de dicha intensidad.

$$hp = \frac{54.76mm}{15 \text{ min}} (60) = 219.05 \frac{mm}{hr}$$

Es claro que el factor con un valor numérico de 60 es con el propósito de la conversión de las unidades. Posteriormente con los datos de la capacidad de infiltración que se han manejado es posible obtener el nuevo coeficiente de escurrimiento. La fórmula para su obtención se expresa a continuación.

$$C = 1 - \frac{f}{i}$$

Donde "C" es un coeficiente adimensional, mientras que la intensidad de lluvia "i" y la capacidad de infiltración "f" únicamente tienen que tener las mismas unidades, es decir de altura de precipitación por unidad de tiempo. A continuación se muestra la sustitución dentro de la fórmula.

$$C = 1 - \frac{75}{219.05} = 0.6576 = 0.66$$

Lo anterior fue realizado con el propósito del diseño de la sección de volumen de almacenamiento, por lo cual se puede decir que tendrá que abarcar el porcentaje del volumen total que no es absorbido por el lecho filtrante, es decir el 66% del total. Ya que los datos de la altura de precipitación total están asociados al área de la sección es posible obtener de igual manera una altura para la sección de almacenamiento, la cual es tomada a partir del lecho filtrante, dicha altura se obtiene con la siguiente fórmula.

$$h_a = \frac{C(h_T)}{10}$$

Donde "h<sub>a</sub>" representa la altura de almacenamiento en cm. "C" es el coeficiente de escurrimiento y "h<sub>T</sub>" es la altura de precipitación total obtenida en mm. A continuación se presenta la operación aritmética.

$$h_a = \frac{0.66(54.76)}{10} = 3.6\text{cm}$$

En la tabla 4.6 se muestran los caudales que escurren azoteas y jardineras. Los datos de las alturas del almacenamiento en las jardineras son presentados en una tabla adicional, Tabla 4.7.

TABLA 4.6. Suma de caudales en azoteas y jardineras para filtración.

Sección	i (mm/h)	Azotea (m <sup>2</sup> )	C <sub>azotea</sub>	Q <sub>azotea</sub> (m <sup>3</sup> /h)	Jardín (m <sup>2</sup> )	C <sub>jardín</sub>	C·i·A (m <sup>3</sup> /h)	Duración (min)
1	120	378	0.95	43	312	0.38	14	15
2	120	285	0.95	32	375	0.38	17	15
3	120	285	0.95	32	336	0.38	15	15
4	120	285	0.95	32	288	0.38	13	15
5	120	281	0.95	32	240	0.38	11	15
6	120	285	0.95	32	325	0.38	15	15

Cabe mencionar que los datos de la Tabla 4.6 fueron producidos a partir de la intensidad del evento de diseño, es decir aquel que presenta una hp de 30mm. A partir de este dato y con ayuda de la curva masa se obtuvo su duración y se estimó en 15 min lo cual conlleva la intensidad de 120mm/hr

Siendo la altura de precipitación obtenida para cada jardinera de un valor variable, la altura considerada para almacenamiento será del porcentaje obtenido referido a la altura de precipitación de cada jardinera por cuestiones de seguridad, lo cual resulta en las siguientes alturas de almacenamiento para cada jardinera. (Tabla 4.7)

TABLA 4.7. Alturas de almacenamiento para jardineras

Sección	ha(cm)
1	3.60
2	5.07
3	4.66
4	4.16
5	3.69
6	4.55

Sin embargo existe un factor que es crucial considerar y es el hecho de que algunas de las jardineras se encuentran en serie, este efecto se ve mitigado por el hecho de que de forma tradicional las alturas de almacenamiento anteriormente expuestas, por diseño tienen la función de retener el volumen de agua que no pueda ser absorbido de momento

por el lecho. Sin embargo esta condición puede ser rebasada en el evento de diseño lo cual forma parte del cálculo de las excedencias.

El siguiente paso es el dimensionamiento de los vertedores de cada sección del sistema. Cabe mencionar que cada sección maneja un gasto diferente por lo cual se deberá realizar un dimensionamiento para cada uno de ellos.

Utilizando la fórmula para vertedores rectangulares, mencionada anteriormente, se realiza el dimensionamiento de cada sección para obtener valores convenientes. Inicialmente se estableció un valor constante de ancho del vertedor y se iteró con los cálculos hasta alcanzar cierto objetivo, a continuación se expresan los resultados (Tabla 4.8). En el dimensionamiento de los vertedores se utiliza la lluvia de diseño crítica determinada para drenaje (Tr de 50 años y duración de 5 min).

TABLA 4.8. Ancho de vertedores rectangulares y tirantes producidos con lluvia crítica (i-d-TR, 225mm/h-5min-50años).

Sección	Q(l/s)	b(m)	h(m)	h(cm)
1	36.19	2	0.01	1.49
2	59.08	5	0.01	1.32
3	85.05	8	0.01	1.39
4	33.64	2	0.01	1.38
5	58.29	5	0.01	1.30
6	80.98	8	0.01	1.32

En la tabla se puede observar que los valores del ancho del vertedor rectangular se han iterado hasta que el tirante adquiriera el mismo valor para todas las secciones, esto se ha hecho primordialmente por el proceso constructivo, además de buscar que las condiciones en los vertedores sean lo más parecidas posibles.

También se debe revisar el paso del agua a través de las jardineras y los tirantes que produce para determinar cuál será la altura de diseño, ya que podría resultar en tirantes mayores que los que manejan los vertedores. Para ello pueden obtenerse los tirantes que se desarrollarán con la fórmula de Manning, ya que se posee la geometría del canal y los materiales que la conformarán, además se ha establecido el valor de la pendiente hidráulica, realizando el estudio los resultados son presentados a continuación. (Tabla 4.9)

TABLA 4.9. Tirantes obtenidos para el flujo del agua en jardineras

Sección	Q (l/s)	b (m)	S <sub>f</sub>	n	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	Rh <sup>3/2</sup>	Q <sub>calc</sub> (m <sup>3</sup> /s)	h (cm)
1	36.19	15	0.01	0.04	0.06	0.94	0.02	0.04	6.25
2	59.08	15	0.01	0.04	0.08	1.14	0.02	0.06	7.61
3	85.05	21	0.01	0.04	0.08	1.61	0.02	0.09	7.69
4	33.64	18	0.01	0.04	0.06	1.01	0.01	0.03	5.64
5	58.29	24	0.01	0.04	0.06	1.50	0.02	0.06	6.26
6	80.98	25	0.01	0.04	0.07	1.76	0.02	0.08	7.02

Donde, “b” es el ancho de la canaleta en metros, “S<sub>f</sub>” es la pendiente hidráulica expresada de forma numérica, “n” es la constante de Manning para las condiciones del fondo de la canaleta, “Rh” es el radio hidráulico de la sección y por último “h” expresa el tirante de la sección.

Se puede ver que los tirantes son significativamente mayores dentro de la jardinera, que en los vertedores por lo cual se deben utilizar los valores presentados dentro de la jardinera para el dimensionamiento.

Finalmente solo resta obtener las medidas de las canaletas que comunicarán a las jardineras después de los vertedores, dichas canaletas por conveniencia poseerán el ancho igual al vertedor que la preceda y conservarán la pendiente propuesta a lo largo del sistema (Tabla 4.10).



TABLA 4.10. Tirantes de las canaletas para la conducción entre jardineras.

Sección	Q (l/s)	b (m)	Sf	n	h (cm)	A (m <sup>2</sup> )	Rh <sup>3/2</sup>	Qcalc (l/s)	h (cm)
1	36.19	2	0.01	0.014	10	0.19	0.03	40	9.67
2	59.08	5	0.01	0.014	8	0.39	0.02	60	7.86
3	85.05	8	0.01	0.014	7	0.60	0.02	90	7.48
4	33.64	2	0.01	0.014	9	0.19	0.03	30	9.38
5	58.29	5	0.01	0.014	8	0.39	0.02	60	7.82
6	80.98	8	0.01	0.014	7	0.59	0.02	80	7.33

En el apartado de anexos se presentarán los planos que representarán de forma más clara la distribución y dimensiones de las jardineras.

#### 4.3.1 Dimensionamiento final del sistema

El siguiente dimensionamiento se ha establecido mediante las consideraciones de seguridad planteadas a lo largo del presente trabajo y sintetiza la información necesaria para proyectar un diseño preliminar del proyecto, la siguiente información está respaldada por los capítulos anteriores pero puede sujetarse a correcciones por consideraciones posteriores no tomadas en cuenta en este trabajo (Tabla 4.11)

TABLA 4.11. Dimensionamiento final del sistema.

Sección	B(m)	L(m)	Sf	h(cm)	H(m)	ha(cm)	b(m)
1	15	15	0.01	5.45	6.27	3.60	2
2	15	15	0.01	6.19	7.12	5.07	5
3	21	21	0.01	8.59	9.87	4.66	8
4	18	18	0.01	5.91	6.80	4.16	2
5	24	24	0.01	8.95	10.29	3.69	5
6	25	25	0.01	9.17	10.54	4.55	8

“H” es la altura de los lados del canal considerando un bordo libre del 15% del tirante presente en la sección.

# CAPÍTULO 5

## ANÁLISIS DE

## RESULTADOS

Se puede decir que durante el diseño de este proyecto y realizando el manejo de los datos se trató de realizar los dimensionamientos de acuerdo a suposiciones iniciales, las cuales se vieron reflejadas en buena medida en los resultados obtenidos, claro está se necesitaron en ciertas partes consideraciones especiales para continuar con el diseño.

En este apartado se explicará el funcionamiento y la naturaleza final del sistema diseñado del cual ya se han dado algunas explicaciones a través del presente trabajo.

### **5.1 DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA**

En los apartados anteriores se pudo observar el diseño y dimensionamiento de todo el sistema que representa este proyecto en sí y la idea básica es muy simple, el aprovechamiento de los recursos desperdiciados para fines en los que puede utilizarse con una menor intervención en cuestiones de proceso de los recursos.

El funcionamiento de este sistema procede como el de la mayoría de las obras hidráulicas, tomando en cuenta los volúmenes de entrada y de salida, así es como se procederá a explicar el funcionamiento dentro de esta reseña final.

Dentro del sistema debían conocerse ciertas condiciones de operación antes de pensar siquiera en dimensionar alguna de sus partes, este estudio se realizó con información obtenida y con la aplicación de métodos pertenecientes a la estadística. Las condiciones determinadas consistieron en el peor de los escenarios, además de las condiciones de operación regulares las cuales intervinieron en diferentes aspectos del sistema.

Una vez conocidas dichas condiciones de operación se procede a estudiar el flujo que transitará a través del sistema, de una forma preliminar, inicialmente una vez presentadas las condiciones de operación a través de las áreas de captación situadas en las azoteas del

edificio que estarán manejando gastos dentro del intervalo de 10 a 15 litros por cada segundo, según el análisis realizado, dicho volumen será conducido a alguna de las secciones del sistema principal, es decir las jardineras. Las jardineras a las cuales es canalizado dicho volumen fueron seleccionadas por la disposición del edificio y su cercanía al área de captación.

Una vez en las jardineras, al haber 6 de éstas y por lo tanto el mismo número de secciones en el sistema, cada una manejará un gasto determinado dependiendo del volumen de cuántas secciones o áreas de captación están canalizando. Esto quiere decir que, mientras más cerca de la disposición final se encuentre una sección, esta manejará un gasto mayor, esto se debe a que las jardineras del inicio solo manejan el gasto de sus áreas de captación mientras que las finales no solo manejan dicho gasto sino además las excedencias de las jardineras aguas arriba.

Se debe recordar que el sistema cuenta con dos partes trabajando en paralelo por lo cual casi podría decirse que se trabaja con dos sistemas de la misma naturaleza, esto provoca que se den solo tres tipos de gasto a lo largo de las secciones, en cuestión de magnitud, los cuales se encuentran en el orden de 30, 50 y 80 litros por cada segundo dependiendo de la sección.

Las secciones se ven comunicadas entre ellas por vertedores rectangulares y canaletas las cuales pasan por debajo de los paso peatonales hacia las jardineras subsecuentes, dichas canaletas manejan el mismo gasto de excedencias que el vertedor sin embargo se debe asegurar que el gasto no rebasará la capacidad de las mismas con dicho gasto, cabe mencionar que mientras la canaleta comunique a una sección más avanzada del sistema, mayor será el gasto que maneje.

Finalmente al alcanzar las últimas jardineras las canaletas finales de las mismas deberán tener su desfogue hacia una zona en común, se sugiere una laguna artificial la cual tendrá comunicación con el drenaje de forma directa. Dicha laguna se encontrará en el espacio entre las jardineras y será calculada para poder manejar el volumen total y puede adaptarse al funcionamiento de un canal.

## 5.2 INFLUENCIA DEL SISTEMA PARA PROPÓSITOS DEL PROYECTO

Es necesario poder cuantificar la cantidad de líquido vital que se canalizará para fines de este proyecto en condiciones óptimas. Esto quiere decir, cuantificar la cantidad de agua que se obtiene de forma ideal durante el evento de diseño que es cuando más se puede captar.

Inicialmente se consideró que el evento de diseño poseería una altura de precipitación máxima de 30mm para cuestiones del almacenamiento, considerando lo anterior como valor de referencia se toman en cuenta las áreas de captación para, considerando que la captación se debe al volumen de almacenamiento, cuantificar el volumen que puede ser captado en la lluvias más recurrentes y probables. También cabe mencionar que las áreas de captación de las azoteas conducirán hacia las jardineras el volumen resultante de haber captado a su vez 30mm de lluvia, con lo cual se observa que al ampliar el área de captación aumenta el potencial del sistema ya que dichos volúmenes pueden ser manejados gracias al almacenamiento de cada jardinera.

Se puede observar que la cantidad requerida en un edificio del tipo del proyecto, es decir dentro de la rama de servicios en este caso oficinas es una parte importante de la dotación diaria que requiere cada habitante (Tabla 5.1).

TABLA 5.1 Dotación de agua para oficinas, extracto de las Normas técnicas complementarias para proyecto arquitectónico del Distrito Federal.

Tipo de edificación	Dotación mínima
SERVICIOS	
Administración	
Oficinas de cualquier tipo	50 l/persona/día

Tomando en cuenta el hecho de que cerca del 70% del agua de la dotación para cada persona es utilizada en los baños y de forma más específica el 40% en los escusados se calcula que de los 50 litros por persona por día al menos 20 de estos son utilizados tan solo en el escusado, lo cual es una cantidad significativa.

Calculando la posible captación durante una tormenta de diseño para cuestiones de almacenamiento, se obtuvieron volúmenes importantes de captación para cada sección que son expresados a continuación (Tabla 5.2).

TABLA 5.2. Volúmenes captados por el sistema durante una tormenta de 30 mm y 15 minutos de duración.

Sección	V(l)
1	17086
2	26053
3	21964
4	17371
5	13350
6	20868
Total	116691

El volumen total que puede captarse durante un solo evento se acerca a los 117 metros cúbicos. Dicha cantidad es más que suficiente para poder cubrir las necesidades sanitarias de un solo día de aproximadamente 5800 personas, o una cantidad menor por mayor tiempo.

Se puede apreciar que la influencia que posee la captación del volumen de agua por parte del sistema, es en sobremanera significativa ya que trabajando en óptimas condiciones posee la capacidad de proporcionar un volumen de agua capaz de satisfacer las necesidades requeridas en cuestiones de uso sanitario.

# CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES

En este apartado final se señalan las conclusiones a las que se ha llegado con respecto a este proyecto. Dichas conclusiones tomarán en cuenta los propósitos del proyecto relacionados con la viabilidad, factibilidad y rentabilidad del mismo desde algunos puntos de vista.

Se desarrolló una metodología para la implementación de jardineras acondicionadas con una sub base que funciona como sistema filtrante y de almacenamiento de agua de lluvia para su uso posterior en sistemas que no requieren calidad de potable.

Además, se propone un método generalizado para el diseño del sistema de captación y conducción para aprovechamiento del agua de lluvia en edificios con características similares.

Proyectos de esta naturaleza son necesarios y factibles, ya que sin necesidad de una gran inversión desde el punto de vista económico o de infraestructura se puede obtener un aprovechamiento significativo de recursos que de otra forma se desperdician.

El problema con el aprovechamiento del agua de lluvia radica en la incapacidad de captarla y conducirla ya que obras locales destinadas a este fin son consideradas poco viables, como podría ser el tener drenajes separados para aguas residuales y aguas por concepto de lluvias. Sin embargo este trabajo muestra, hasta cierto punto, que pueden darse proyectos que no impliquen modificaciones a gran escala en las redes del drenaje o sobre la ciudad y aún así poder aprovechar la enorme cantidad de recursos que se están desperdiciando.

Este proyecto tiene implicaciones importantes dentro de los ámbitos ecológicos y económicos. Esto se debe al hecho de que si volúmenes de agua considerables son aprovechados dentro de la ciudad, los costos por su conducción desde otra zona se verían reducidos, además del costo en tratarla de forma más adecuada. Se puede dar al agua un aprovechamiento mucho más eficiente cuando se toma en cuenta el uso real.



El presente trabajo muestra que la mayoría del agua utilizada posee un tratamiento de potabilización exagerado cuando es para usos secundarios, por lo que sería mejor darle un tratamiento más sencillo que puede aplicarse al momento de la captación, en este caso la filtración, esto es conveniente ya que no hay que disponer del agua para algún tratamiento o proceso posterior, haciendo que la única preocupación posterior sea su almacenamiento y su disposición dentro de las instalaciones del proyecto.

## 6.1 COMENTARIOS

Gracias al proyecto se puede tener ahora una noción más clara de cómo se desperdicia el agua de las precipitaciones. Se apreciaron las cantidades tan grandes de líquido vital que sencillamente son descartadas hacia el drenaje incluso con los tan mencionados problemas de agua que posee la ciudad de México.

Proyectos de esta naturaleza son necesarios y factibles, ya que sin necesidad de una gran inversión desde el punto de vista económico o de infraestructura, se pueden tener beneficios considerables y de grandes implicaciones dentro del área de aprovechamiento hidráulico. Esto puede observarse si se realiza la comparación entre proyectos de este tipo y algunos que aunque necesarios y tal vez viables; representan un mayor cambio al manejo actual de los recursos hidráulicos.

Dichos proyectos podrían ser, por ejemplo, el plantearse una reestructuración de los sistemas de drenaje de la ciudad separando las aguas residuales de las que se captan por concepto de lluvias, dicho proyecto sería útil y apropiado en la opinión del autor de este trabajo. Sin embargo se debe tener conciencia de que una obra de esta magnitud no es de fácil implementación.

Con base en lo anterior se concluye que el aprovechamiento del agua en la ciudad de México puede mostrar una eficiencia bastante superior a mediano plazo, si se implementan dentro de lo posible sistemas como los expuestos en el presente trabajo.

## 7. REFERENCIAS

- 1.-National Research Council Academia de la Investigación Científica, A.C. Academia Nacional de Ingeniería, A.C. NATIONAL ACADEMY PRESS. El suministro de agua de la ciudad de México “Mejorando la sustentabilidad”. Washington, D.C. 1995
- 2.- Sotelo Ávila, Gilberto (2007) *Hidráulica General*. Editorial Limusa. México, D.F.
- 3.- Gardea Villegas, Humberto. (1999) *Hidráulica de canales*. Fundación ICA. México, D.F.
- 4.- César Valdez, Enrique (1994) *Abastecimiento de Agua Potable*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México D. F.
- 5- Lara González, Jorge Luis (1991). *Alcantarillado*. Facultad de Ingeniería UNAM, México D. F.
- 6.- Aparicio Mijares, Francisco Javier (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa. México D. F.
- 7.- Iowa State University (2009). Iowa Stormwater Management Manual.
- 8.-Secretaria de Comunicaciones y Transportes (2000). Isoyetas de intensidades máximas de lluvia en el D. F.

ANEXOS

## GLOSARIO

**Altitud:** Distancia medida verticalmente desde el nivel medio del mar hasta el punto en estudio.

**Adsorción:** Asimilación de gases por parte de un medio líquido a partir de una Interfaz ya sea por mezcla o solución.

**Disorción:** Liberación de gases hacia un medio gaseoso por parte de un líquido los cuales forman parte de este ya sea por mezcla o solución.

**Temperatura:** Cuantificación de la capacidad de tránsito de calor en un medio.

**Volumen:** Propiedad de la materia que se caracteriza por sus tres dimensiones, además de cuantificar el espacio que ocupa.

**Densidad:** Cantidad de sustancia que existe dentro de un volumen determinado de la misma.

**Presión:** Acción de una fuerza distribuida en un área de influencia o contacto.

**Ambiente:** Condiciones externas con las que interactúa un sistema.

**Tirante:** Diferencia de niveles medida entre la base de un canal y la superficie libre del agua.

**Área hidráulica:** Área que ocupa el agua, tomada en cuenta únicamente en un plano de la sección transversal del canal en estudio.

Radio Hidráulico: Coeficiente que se obtiene de la razón del área hidráulica al perímetro mojado.

Perímetro mojado: Longitud de contacto entre el canal y el agua de la sección transversal del canal en estudio.

Pendiente: Relación entre la longitud del canal entre dos puntos medidos horizontalmente y el desnivel entre dichos puntos.

Pendiente hidráulica: Es la relación que existe entre las pérdidas de energía en un canal y la longitud recorrida por el agua.

# PLANOS Y DIAGRAMAS

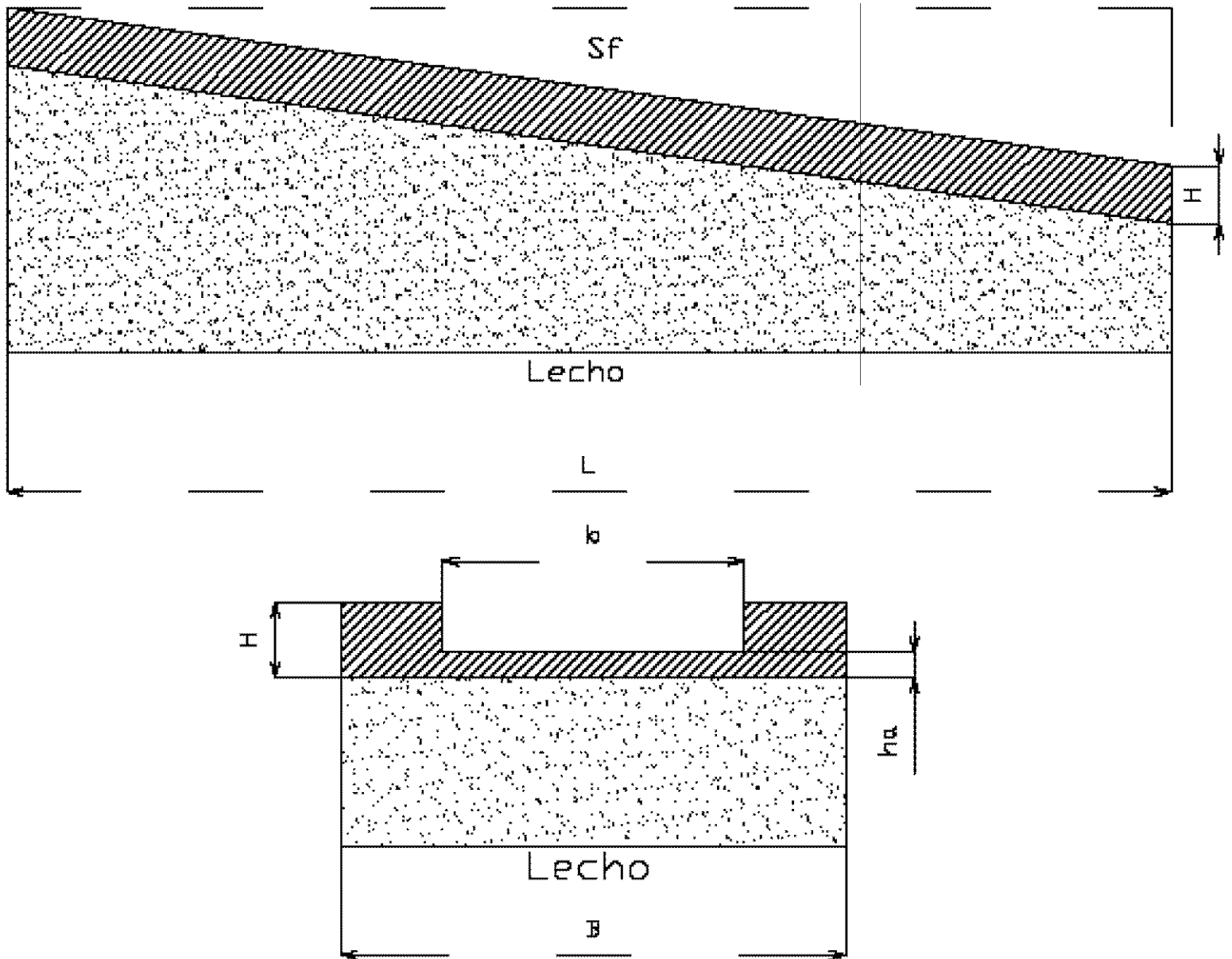


Figura anexa 1. Vista frontal y perfil de dispositivo filtrante





Figura anexa 2. Vista en planta de distribución de los dispositivos sobre el terreno



Figura anexa 3. Vista en planta del terreno en su distribución de áreas original