

# Capítulo 3

# MARCO GEOGRÁFICO

## 3.1. ASPECTOS HIDROLÓGICOS

---

Con el objeto de poder aplicar las soluciones alternativas y complementarias de aguas lluvias en sectores urbanos en todo el territorio nacional, y dadas las enormes diferencias que presentan los aspectos geográficos, será necesario adaptar las soluciones a las condiciones de cada caso particular. Para ello se entregan recomendaciones generales y un procedimiento de diseño y dimensionamiento de cada obra que considera las características propias de cada lugar. Estas diferencias están relacionadas fundamentalmente con aspectos climáticos, hidrológicos, geológicos y de suelos, así como de ordenación territorial y urbana. En este capítulo se presentan las características generales de interés que pueden condicionar tanto la elección del tipo de solución como el diseño de las mismas. Se incluyen recomendaciones de los aspectos que deben observarse, la forma en que puede conseguirse información en terreno o de laboratorio si es necesario, y las fuentes de antecedentes elaborados que facilitan una primera visión de las variables involucradas.

La revisión de los aspectos climatológicos pone énfasis en el comportamiento de las precipitaciones en el territorio nacional, ya que son ellas las que condicionan la operación de las obras que se propondrán en este estudio. Entre las características de interés están la cantidad total de agua caída, su distribución a lo largo del año, la cantidad de tormentas y su repartición en el territorio continental chileno, así como en las principales ciudades. En algunos casos es necesario referirse también al comportamiento de la evaporación, la que se considera en este capítulo. Se entrega una descripción de los aspectos de calidad de las aguas lluvias en condiciones urbanas típicas. Para el diseño de las obras se explican las denominadas lluvias de diseño y sus propiedades, y también el cálculo de escurrimientos en cuencas urbanas a partir de las propiedades del terreno y de las lluvias que los originan.

### 3.1.1. CLIMATOLOGÍA GENERAL

---

Chile presenta grandes diferencias climáticas que hacen que cualquier sistema de gestión de aguas lluvias urbanas aplicable en todo el territorio deba considerar la gran variación de las características de las precipitaciones, tanto en cantidad como en oportunidad. Ello conduce a que para cada caso particular deban estudiarse los antecedentes necesarios tanto para decidir el tipo de alternativa mas conveniente como para el diseño de los elementos que la conforman. A continuación se presenta una caracterización general del territorio de Chile continental con énfasis en aspectos relacionados con las aguas lluvias en zonas urbanas, incluyendo una descripción climática global, el comportamiento de las precipitaciones en las diferentes zonas, el comportamiento de la evaporación y aspectos básicos de la calidad de las aguas lluvias en zonas urbanas.

---

**a. Zonas climáticas de Chile.** Chile presenta, como consecuencia de su gran extensión territorial en su parte continental, una gran variedad de climas, lo que se manifiesta en marcadas diferencias respecto a la humedad, precipitaciones, temperaturas, vientos y otros factores del clima entre las diferentes zonas geográficas. El clima de esta parte continental está condicionado por la proximidad al Océano Pacífico y al Polo Sur, el efecto orográfico de la cordillera de Los Andes, la cordillera de la Costa y otros cordones montañosos, así como la circulación general de la atmósfera, con la marcada influencia del anticiclón de Pacífico y su posición. Desde el punto de vista climático se acostumbra considerar en Chile continental 6 zonas, como se ilustra en la Figura 3.1.1.1.

En el extremo norte se encuentra la región del desierto árido, también llamado Norte Grande, desde los 17 a los 27 grados de latitud sur. Está sometido a las influencias anticiclónicas cálidas permanentes que eliminan casi todas las posibilidades de recibir efectos de frentes polares. En el sector costero y central prácticamente no se registran precipitaciones y la humedad es muy baja. Esporádicamente ingresan a la zona costera y central algunos frentes de mal tiempo que pueden provocar lluvias de consideración, que por lo inesperadas causan daños importantes. Sin embargo en su parte oriental, formada por una meseta alta recibe lluvias paramazónicas de verano y acumulación de nieve en las altas cumbres. Esto permite que en el sector altiplánico se acumulen promedios anuales de precipitación del orden de 200 mm, con una gran variación interanual.



Figura 3.1.1.1: Zonas climáticas en Chile continental. 1a.- Desierto árido, 1b.- Árido altiplánico, 2.- Semiárido, 3.- Mediterráneo, 4a.- Templado húmedo, 4b.- Templado húmedo oceánico, 5a.- Frio oceánico, 5b.- Frio patagónico.

La zona de clima semiárido va desde Copiapó hasta el río Aconcagua. Esta es una zona de transición climática, en la cual se comienza a recibir lluvias de invierno aunque presentan una gran irregularidad, mientras en los sectores altiplánicos persisten algunos efectos del invierno boliviano. La irregularidad pluviométrica y la ocurrencia de años secos y otros relativamente muy húmedos, permite el crecimiento de una vegetación de desarrollo irregular y en permanente estado de lucha por sobrevivir. En un año seco las condiciones son semejantes a las de Norte Grande, mientras en un año húmedo ellas se parecen a la región Mediterránea que se ubica al sur.

Entre el río Aconcagua y el Imperial se desarrolla una zona de carácter templado y clima mediterráneo. Las lluvias se concentran en la estación fría de invierno, mientras la estación cálida es de carácter seco. Persiste una irregularidad pluviométrica que se aminora de norte a sur, pero presenta grandes variaciones interanuales. Las lluvias son preferentemente de carácter frontal modificadas por efectos del relieve y condiciones locales.

Al sur del río Imperial hasta el golfo de Reloncaví, es decir aproximadamente entre las ciudades de Temuco por el norte y Puerto Montt por el sur, el clima es del tipo templado húmedo. En esta zona hay una reducción del periodo seco con un aumento de precipitaciones, causado por las perturbaciones frontales que provocan constantes periodos de lluvias, que solo reducen su frecuencia en el verano.

Entre el canal de Chacao y el río Cisnes se considera un clima templado húmedo frío. Aquí las precipitaciones son constantes e importantes. Más al sur la región se divide climáticamente de norte a sur en la vertiente del Pacífico, con un clima muy frío y alta pluviosidad, con promedios anuales que superan los 3.000 mm, y una zona en la vertiente occidental, al oriente de las altas cumbres, con una marcada menor pluviosidad llegando en el sur de Magallanes a tener precipitaciones anuales del orden de 300 mm.

---

**b. Comportamiento de la precipitación.** La cantidad total de precipitación en cada zona del territorio nacional es fuertemente dependiente de las zonas climáticas. En la Figura 3.1.1.2 se presenta un plano general de isoyetas de Chile continental, que muestran las precipitaciones medias anuales. Se aprecia un incremento importante de la precipitación con la latitud. En el extremo norte son prácticamente nulas, para aumentar desde unos 50 mm por año en Copiapó hasta más de 3.000 mm en la boca del Estrecho de Magallanes al Pacífico. Además existe una gran variación a lo ancho desde la costa hasta el límite occidental. En el extremo norte las precipitaciones son nulas en la costa y en la zona intermedia mientras llegan a 300 mm anuales en el altiplano. En la zona central crecen con la altura, siendo este aumento más marcado al norte que al sur de esta zona. En el extremo austral la vertiente del Pacífico presenta una marcada mayor pluviosidad que la vertiente occidental. Un mayor detalle a nivel espacial de la distribución de las lluvias anuales en el territorio de Chile, a escala 1/500.000, puede encontrarse en publicaciones como el Balance Hídrico de Chile editado por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas. En la Figura 3.1.1.3 se muestra una parte de esta publicación correspondiente a un sector de la VIII Región.



Tabla 3.1.1.1: Precipitación Promedio (P.P.) anual en algunas ciudades.

Zona Climática Región	Ciudad	P.P. anual mm/año	Días con lluvia*	Agua caída por día de lluvia m.m.**
<b>Desierto Árido</b>				
I. Tarapacá	Arica	1	0	4
	Iquique	1	0	4
II. Antofagasta	Antofagasta	5	1	6
	Calama	4	1	4
	S. Pedro de Atacama	28	6	3
<b>Semiárida</b>				
II. Copiapó	Copiapó	10	2	9
	Vallenar	31	4	11
IV. Coquimbo	La Serena	84	9	10
	Ovalle	114	10	13
	Illapel	177	17	14
V. Valparaíso	Valparaíso	389	28	13
	Los Andes	261	23	12
	San Antonio	494	29	13
<b>Mediterránea</b>				
R. Metropolitana	Santiago	300	28	12
VI. O'Higgins	Rancagua(Rengo)	406	37	14
VII. Maule	Talca(San Luis)	647	49	14
	Curicó	717	47	15
	Linares	895	57	16
	Constitución	755	59	15
VIII. Bío Bío	Concepción	1162	74	15
	Chillán	1080	69	15
IX. Araucanía	Temuco	1217	127	10
<b>Templada Húmeda</b>				
X. de los Lagos	Pto. Montt	1911	181	10
	Valdivia	2307	154	13
	Ancud	2965	250	10
<b>Templada H. Oceánica</b>				
XI. Gral. Carlos Ibañez	Castro	1886	203	11
	Pto. Cisnes	3939	245	19
	Coyhaique	1190	121	9
	Pto. Aysén	2803	212	14
<b>Fría H. Oceánica</b>				
XII. Magallanes	Chile Chico	355	43	8
	Pta. Arenas	423	81	6
	Pto. Williams	575	104	5

\* en promedio, fuente: D.M.Ch

\*\* en promedio, fuente: B.H.Ch.( D.G.A)

La Tabla 3.1.1.1 indica los valores medios anuales de precipitación en algunas ciudades de Chile, en la cual se puede apreciar la gran variabilidad de condiciones climáticas que se presentan.

Por otra parte la precipitación anual se distribuye al interior de cada año de manera diferente. Así por ejemplo en las zonas del centro y el norte se concentra preferentemente en algunos meses del invierno, mientras al sur se distribuye mas regularmente. Esto se puede apreciar en la Figura 3.1.1.4 en la que se muestran los valores de precipitación media mensual en algunas localidades.

Otro antecedente interesante para el diseño de sistemas de aguas lluvias urbanas es la cantidad de tormentas que se producen en el año en una ciudad. Esta información permite tener una idea de la ocupación efectiva de estos sistemas, así como su carga de trabajo. Esta variable presenta una marcada variabilidad a lo largo del territorio. Así por ejemplo en las ciudades costeras del extremo norte, se presenta una tormenta con lluvias significativas cada 10 ó 20 años. Mientras en otras localidades del extremo sur llueve prácticamente todos los días. En la Tabla 3.1.1.1 se ha agregado el promedio de la cantidad de días con lluvias significativas por año en varias ciudades de Chile. Demás está advertir que estas cantidades se distribuyen de manera no uniforme en cada año, más bien habitualmente se concentran en los meses del invierno.

El promedio de cantidad de precipitación que aporta cada tormenta es sin embargo una variable más estable espacialmente, de manera que cuando llueve las diferencias entre la cantidad de agua caída es menor a lo largo del territorio. El valor promedio de la precipitación que se registra en cada día con lluvia para varias ciudades también se incluye en la Tabla mencionada. Este último valor corresponde a dividir la precipitación media anual en un lugar por el promedio de días con lluvia significativa. Para lugares donde esta información no esta disponible, es posible estimarlo en base a los registros pluviométricos diarios de las estaciones cercanas al lugar de interés, pertenecientes a las redes de la DGA o de la DMCh.

La información sobre precipitaciones anuales, mensuales y diarias puede conseguirse fácilmente en las instituciones que operan redes de estaciones pluviométricas en Chile. La Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas mantiene una red de cobertura nacional con respaldo de la información en el Banco Nacional de Aguas. En ella se puede obtener información tanto sobre la ubicación de las estaciones como sobre los datos históricos registrados. La Oficina Meteorológica de Chile, dependiente de la Fuerza Aérea controla otra red de cobertura nacional. Los datos de esta red

pueden conseguirse en los Boletines Meteorológicos de Chile, que incluye información sobre las principales estaciones.

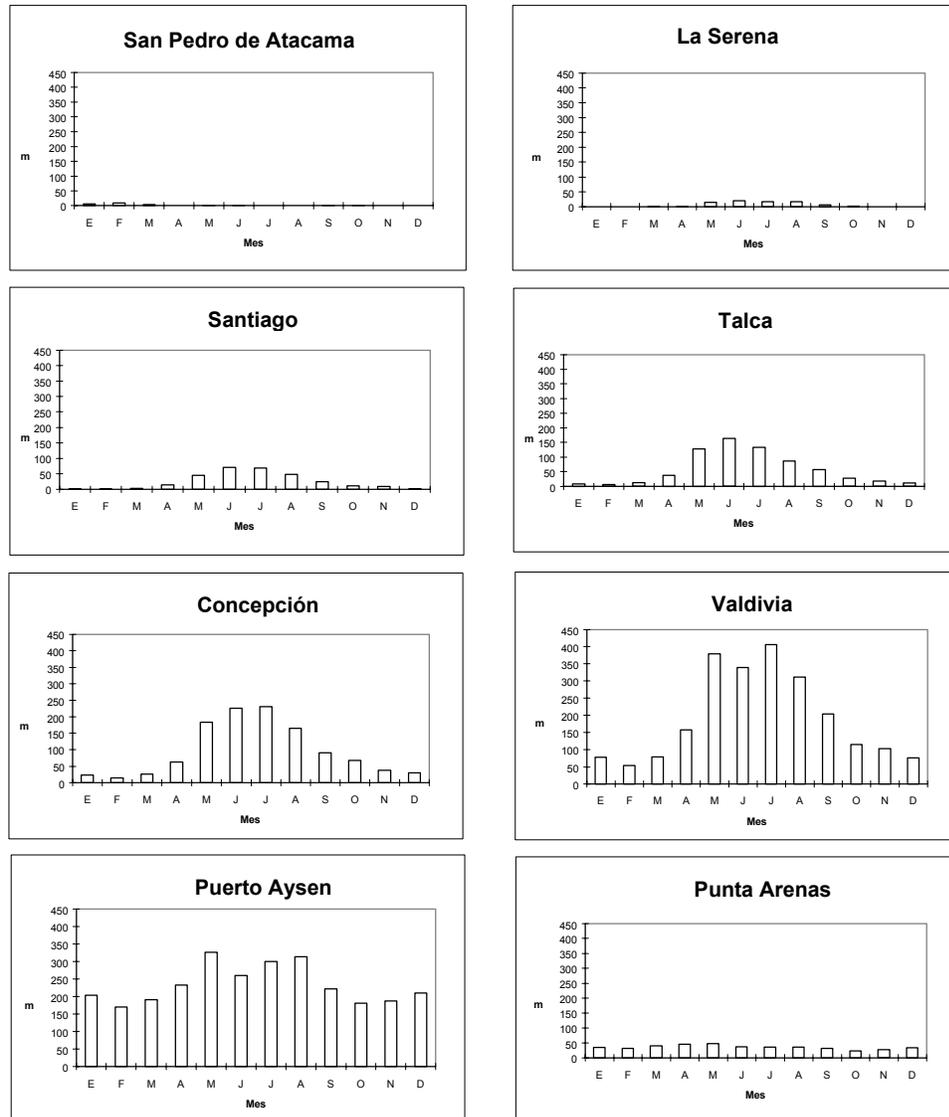
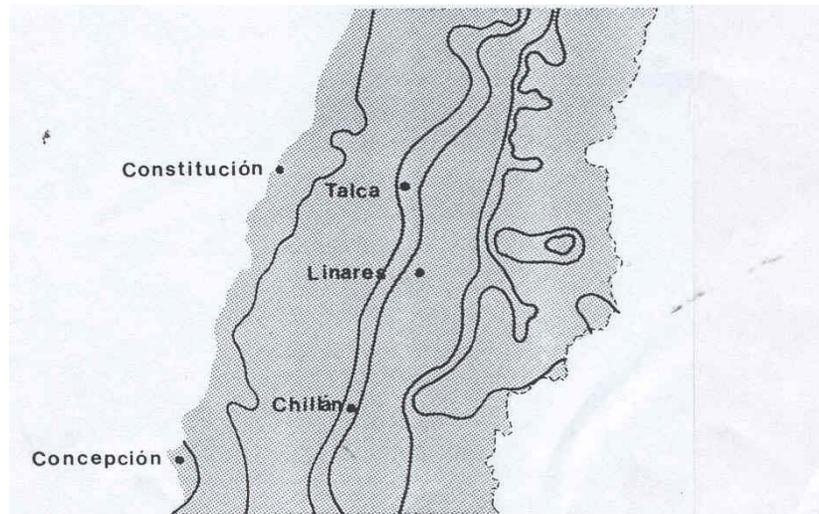


Figura 3.1.1.4.: Comparación gráfica de la precipitación media mensual en algunas ciudades.

**c. Comportamiento de la evaporación.** La evaporación es otro factor que puede afectar la selección del tipo de obras a realizar, fundamentalmente en relación a las que acumulan aguas lluvias en superficie retardando su flujo. La evaporación consiste en el retorno de agua desde la superficie de la tierra a la atmósfera acompañada de un cambio de fase, es decir transformada en vapor. Se produce desde superficies con líquido o cuerpos con altos contenidos de humedad, preferentemente desde la vegetación que emplea un mecanismo de evapotranspiración como parte de su sistema para obtener los elementos básicos. El poder evaporante de la atmósfera depende de la temperatura y humedad ambiente, la radiación solar, el viento y otras condiciones locales.

Existe una diferencia entre la evaporación potencial, o capacidad de la atmósfera para evaporar agua, y la evapotranspiración real, o el agua que pasa a la atmósfera desde las superficies húmedas y las plantas, ya que esta última depende además de la disponibilidad de agua para ser evaporada. Es por ello que lo que se mide a nivel regional es la evaporación potencial, disponiendo para ello de tanques evaporimétricos normalizados que permanecen llenos de agua y en los cuales se mide la evaporación como la diferencia del agua disponible entre dos medidas consecutivas. Esta medida normalmente se incluye en algunas estaciones meteorológicas, cuya red cubre razonablemente el territorio continental. Datos sobre ellos pueden conseguirse en la Dirección General de Aguas y en la Oficina Meteorológica de Chile.



*Figura 3.1.1.5: Detalle de las isohietas de evaporación según el Balance Hídrico de Chile (D.G.A. 1987).*

Tabla 3.1.1.2: Evaporación potencial anual promedio en algunas ciudades.  
(B.H.Ch., D.G.A. 1987)

Zona Climática	Región	Ciudad	mm/año
Desierto Árido	I. Tarapacá	Arica (Azapa)	2190
		Iquique*	2000
	II. Antofagasta	Antofagasta	2069
		Calama	3787
		San Pedro de Atacama	3189
Semiárida	III. Copiapó	Copiapó*	2500
		Vallenar	2009
	IV. Coquimbo	La Serena	1129
		Ovalle	1726
		Illapel	1449
	V. Valparaíso	Valp. (L. Peñuelas)	1134
		Los Andes (Vilcuya)	1209
		San Antonio*	1400
Mediterránea	R. Metropolitana	Santiago	1241
	VI. de B. O'Higgins	Rancagua	1214
		VII. Maule	Talca*
	Curicó		1436
	Linares		1236
	VIII. Bio Bio	Constitución*	1300
		Concepción*	1250
		Chillán*	1500
	IX. Araucanía	Temuco*	1000
Templada Húmeda	X. de los Lagos	Pto. Montt	806
		Valdivia*	850
		Ancud*	800
Templada H. Oceánica		Castro*	800
	XI. Gral. Carlos Ibañez	Pto. Cisnes*	1000
		Coyhaique*	1200
		Pto. Aysén*	1000
Fría H. Oceánica		Chile Chico	1636
	XII. Magallanes	Pta. Arenas	657
		Pto. Williams*	600

Fuente: B. H. Ch (D.G.A) \* Aproximado de los Mapas de Isolíneas.

Se cuenta con varias estimaciones del comportamiento de la evaporación potencial en el territorio nacional. Una de ellas es la del Balance Hídrico de Chile de la D.G.A., en el cual se han graficado curvas de igual valor de evaporación. Un ejemplo de estos mapas se presenta en la Figura 3.1.1.5. Una idea del comportamiento de esta variable puede apreciarse de los valores de evaporación media anual registrada en algunas estaciones seleccionadas que se muestra en la Tabla 3.1.1.2.

---

**d. Calidad de las aguas lluvias.** Las aguas lluvias de sectores urbanos presentan una polución relativamente importante. Descargarlas en los escurrimientos superficiales o infiltrarlas en el suelo sin tomar precauciones puede contribuir a la degradación del medio natural. En este acápite se analizan las fuentes que producen los contaminantes y se dan algunas cifras del contenido de ellos en las aguas lluvias. En Chile no existen mediciones de contaminantes de las aguas lluvias en las ciudades o sectores urbanos, de manera que los valores que se indican a continuación han sido obtenidos de estudios en ciudades importantes en otros países y por lo tanto deben tomarse solo como referencia.

**Producción de contaminantes.** Los contaminantes se depositan en los sectores urbanos durante los período de tiempo seco y son arrastrados y transportados por las lluvias. Se pueden distinguir diversos orígenes de estos contaminantes:

Vehículos: Hidrocarburos (aceite, bencina), plomo (bencina), caucho (neumático), zinc, cadmio, cobre, titanio, cromo, aluminio (desgaste de piezas metálicas).

Industriales: plomo, cadmio, zinc.

Animales: materias orgánicas, colonias bacterianas o virales.

Desechos sólidos: materias orgánicas, plásticas, metales diversos.

Vegetación: materias carbonatadas.

Natural-mineral: erosión de suelos, emisión volcánica.

**Factores que afectan la acumulación.** La acumulación de contaminantes sobre la superficie de sectores urbanos depende de diversos factores tales como la ocupación del suelo, la forma y frecuencia de limpieza de las calles, la duración del período de tiempos secos entre precipitaciones y otros factores secundarios como la rugosidad de las superficies, ubicación geográfica, importancia del tráfico, viento, neblina, etc.

**Transporte de contaminantes en las aguas lluvias urbanas.** El transporte y arrastre de contaminantes en las aguas lluvias urbanas depende de diversos factores tales como las características de las lluvias, es decir aspectos como su duración, altura de agua caída, intensidad media o máxima en un periodo de tiempo dado; las de la escorrentía superficial por las superficies urbanas como

es la duración, volumen, caudal medio o máximo; y otros factores secundarios como son la rugosidad de los revestimientos en superficies, la granulometría de los depósitos, el coeficiente de impermeabilización, la topografía.

**Materias en Suspensión (MES).** Se ha encontrado que las materias en suspensión son los vectores dominantes de la contaminación de las aguas lluvias. Se estima que el 90% del plomo está adherido a las MES. Las materias en suspensión están formadas principalmente por minerales y las materias orgánicas (como los hidrocarburos) sólo representan el 20%. Los nitritos, nitratos y fosfatos se encuentran por lo general bajo forma disuelta.

En un estudio sobre 3 sitios diferentes de ciudades francesas (Azzout et al., 1994) se ha encontrado los porcentajes de adherencia a la MES de diferentes contaminantes que se indican en la siguiente Tabla 3.1.1.3.

Tabla 3.1.1.3: Adherencia de contaminantes a la MES en %.

Contaminante	%
DBO <sub>2</sub> , Demanda Bioquímica de Oxígeno	83 - 92
DQO, Demanda Química de Oxígeno	83 - 95
NTK, Nitratos	48 - 82
H <sub>c</sub> , Hidrocarburos	82 - 99
Pb, Plomo	95 - 99

**Partículas finas.** Se ha encontrado que las partículas finas con dimensiones inferiores a 100 µm poseen la mayor proporción de contaminantes (> 50% para la DQO, DBO<sub>5</sub>, plomo).

**Materias sólidas.** Las materias sólidas presentan una buena sedimentación. Un estudio (Chebbo, 1992) ha mostrado que la masa anual de materias sólidas en suspensión arrastradas por las aguas lluvias en sectores urbanos depende de la capacidad de almacenamiento existente en el sector, de manera que disminuye a medida que se incrementa el volumen de almacenamiento. Para lograr cantidades aceptablemente pequeñas de material en suspensión generado en un sector urbano, se requieren volúmenes de almacenamiento de aguas lluvias del orden de 50m<sup>3</sup> por hectárea impermeable y de hasta 200 m<sup>3</sup> por hectárea para episodios lluviosos críticos. Generalmente, se considera que las aguas que escurren sobre los techos son menos contaminantes que las que escurren por las calles. Sin embargo, del 15 al 25% de la contaminación contenida en las aguas lluvias provienen de la contaminación del agua de lluvias que atraviesa una atmósfera contaminada. Por otro lado, los materiales que constituyen los techos pueden engendrar concentraciones más elevadas de metales a causa de la corrosión.

**Metales pesados.** En la Tabla 3.1.1.4 se presentan las concentraciones típicas de metales pesados y su origen según Balmer P. y Malmquist (1984).

Tabla 3.1.1.4: Concentración y origen de metales pesados.

Elementos	Contenido medio en aguas lluvias mg/l	Origen	Fase
Plomo	0,1 a 0,8	Bencina 15% Industria 35% Lluvias 50%	Sólidos en suspensión
Cadmio	Variable	Industria 45% Lluvia 30%	
Zinc	0,3 a 0,8	Desgaste neumático 35% Industria 35% Lluvia 30%	Disuelto (en partículas) para el zinc proveniente
Cobre	0,002 a 0,2	Neumáticos Basura de lluvias Techos neumáticos	Disuelto (50%) particulado

**Otros Contaminantes.** Para otros contaminantes como MES, DBO<sub>5</sub>, DQO e hidrocarburos contenidos en las aguas lluvias, es posible encontrar algunos rangos de variación (Chebbo G., 1992) los que se presentan en la Tabla 3.1.1.5, en la cual se comparan los rangos en que se encuentran algunos elementos en redes de aguas lluvias unitarias y separadas, así como el efecto de la época seca o durante las tormentas.

Tabla 3.1.1.5: Concentración de otros contaminantes, mg/l.

Parámetros Contaminantes	Efluentes tiempo seco	Efluentes tiempo seco tratados	Efluentes de tormentas red unitaria	Efluentes de tormentas red pluvial
MES	300	60	340 (230 a 550)	28 (18 a 460)
DQO	60	120	280 (170 a 430)	18 (19 a 340)
DBO <sub>5</sub>	300	60	75 (40 a 110)	30 (13 a 48)
Hidrocarburos	-	-	5,5 (4,1 a 9,2)	5 (1,5 a 9,3)
Plomo	0,005	0,001	0,3 (0,16 a 0,41)	0,3 (0,1 a 0,5)

## 3.1.2. ANTECEDENTES HIDROLÓGICOS DE DISEÑO

---

**a. Medición y registros de precipitación.** La precipitación es la fuente de todo escurrimiento de agua en esteros, ríos y también del agua almacenada en el suelo o escurriendo a través de acuíferos. Por precipitación se entiende la lluvia, la nieve y el granizo. La precipitación ocurre cuando el aire húmedo de la atmósfera se enfría lo suficiente para que el vapor de agua existente se condense alrededor de núcleos de condensación. Cuando las gotas así formadas crecen, ellas alcanzan un tamaño y un peso tal que la gravedad las hace caer, originando algunos de los tipos de precipitación. La cantidad y la intensidad de la precipitación dependen tanto de la cantidad de vapor de agua del aire como de la tasa de enfriamiento. La disminución de la temperatura de las masas de aire puede ser causada por efectos topográficos, convección térmica, acción de los frentes atmosféricos o corrientes de aire. La causa de la precipitación condiciona las propiedades de las lluvias y por consiguiente es una variable significativa para el diseño. Por ejemplo, las precipitaciones convectivas son por lo general de corta duración, bastante intensas y afectan un área normalmente reducida. Por otra parte, las precipitaciones frontales afectan un área mayor y son normalmente de mayor duración y menor intensidad.

La precipitación, expresada como altura de agua, se mide en forma continua en pluviógrafos o nivógrafos y en forma esporádica en pluviómetros. Los instrumentos son básicamente recipientes estandarizados que recogen la precipitación y la miden por unidad de área en términos de altura. Aquellos que entregan un registro continuo están equipados con un sistema que va indicando en forma mecánica o electrónica la precipitación acumulada en función del tiempo. En Chile la mayor parte de los datos se recogen en pluviómetros que miden la lluvia acumulada entre las 8 de la mañana del día anterior y las 8 de la mañana del día de la lectura. En el país existen más de 600 estaciones pluviométricas y cerca de 100 pluviógrafos. Sólo la mitad de las estaciones equipadas con pluviómetros cuentan con más de treinta años de registro.

La mayor parte de las estaciones existentes son de propiedad de la Dirección General de Aguas, la Dirección Meteorológica de Chile y ENDESA. Estas instituciones cuentan con listados de los registros, los cuales normalmente indican la ubicación de la estación y las características principales de ellos. Fuentes útiles de información son las siguientes publicaciones:

- Precipitaciones Máximas en 1, 2 y 3 días, Dirección General de Aguas(1991), Ministerio de Obras Públicas.
- Catastro de estaciones Hidrometeorológicas, Dirección General de Aguas (1989), Ministerio de Obras Públicas.
- Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Aguas (1989), Ministerio de Obras Públicas.
- Pluviometría de Chile, CORFO (1971), Depto. Recursos Hidráulicos.

Previo a usar la información recogida en una de las estaciones es indispensable asegurarse que los registros sean precisos, representativos y confiables. Es necesario estar conscientes que la lluvia medida es una muestra recogida en una pequeña superficie, sujeta a problemas de viento y exposición debido a la posible obstrucción por árboles, edificios u otros elementos, así como a la precisión intrínseca de los instrumentos utilizados para su recolección y registro. Quien usa la información debe emplear un criterio adecuado y las técnicas recomendadas para asegurar que la información cumpla algunos requisitos mínimos.

---

**b. Lluvias de diseño.** Una tormenta es un conjunto de intervalos de lluvia producido por una situación meteorológica favorable. El número de horas sin lluvia que separa una tormenta de otra es un valor arbitrario, pero típicamente se supone que lapsos del orden de seis a ocho horas sin lluvia determinan eventos diferentes. Las características principales de este episodio, desde la perspectiva de usar la información para diseñar sistemas de drenaje urbano, son su duración, magnitud total, variación de la intensidad en el tiempo y variación de la lluvia en el espacio. La figura 3.1.2.1 muestra un esquema de estas variables que se conoce como hietograma. Se entiende por lluvia de diseño una tormenta de duración, magnitud e intensidad para cada intervalo predefinidos, tales que las obras funcionan adecuadamente frente a una lluvia similar o menor, y pueden presentar fallas frente a eventos peores. Peores puede referirse en este caso a eventos más largos, más intensos o de mayor magnitud.

**Duración.** Una de las primeras decisiones del proyectista es escoger la duración de la tormenta de diseño a utilizar, entendiendo por duración al total de intervalos de lluvia. La importancia de la duración de la lluvia es evidente ya que la intensidad media de la tormenta decrece con la duración y el área aportante de la cuenca crece al aumentar la duración de la tormenta.

La selección de la duración de la tormenta de diseño, está influenciada por factores del clima de la región en cuestión y por aspectos propios del área

aportante, tales como su tamaño, pendiente y rugosidad superficial frente al escurrimiento.

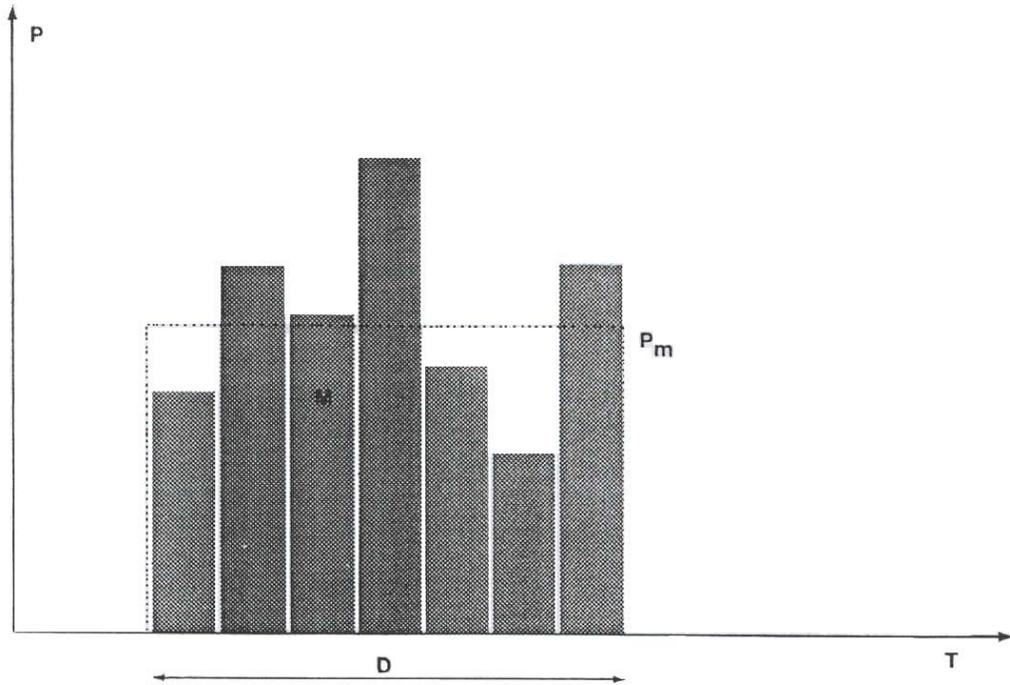


Figura 3.1.2.1: Hietograma. D.- Duración, M.- Magnitud,  $P_m$ - Precipitación Media, T.- Tiempo, P.- Precipitación.

Es usual que la duración de diseño sea igual al tiempo de concentración del área aportante, definido como el tiempo necesario para que la gota más alejada llegue a la salida. Otros criterios, tienden a seleccionar duraciones de tormentas más o menos largas, en el rango entre 24 horas y 48 horas, ya que es usual que las crecidas importantes ocurran en temporales de duraciones significativas. Sin embargo, en este caso, es necesario tener presente que implícitamente se está incluyendo la probabilidad de ocurrencia de dicha tormenta, valor que se desconoce.

**Magnitud e Intensidad.** Una vez establecida la duración total del temporal, se debe tomar una decisión sobre la magnitud de la lluvia, o total de agua caída durante el temporal. Existe una relación entre duración, magnitud y probabilidad de ocurrencia la cual normalmente se estudia y se representa en familias de curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) o precipitación-duración-frecuencia (PDF).

El efecto de la magnitud de la tormenta, se ve enormemente influenciado por la variación temporal y espacial que presenta la intensidad de la lluvia. Es difícil definir lo que se entiende por intensidad representativa, ya que se puede hablar de intensidades máximas, medias, u otros valores que la representen.

**Hietograma de la tormenta.** La distribución en el tiempo de la lluvia total caída durante un temporal es, sin lugar a dudas, un factor primordial en la determinación del escurrimiento de respuesta de la cuenca y, en consecuencia, debe ser considerado en la definición de una tormenta de diseño. Sin embargo, aún cuando es conocida la influencia del hietograma en la forma y magnitud de la onda de crecida, es usual que se proceda utilizando hipótesis bastante simplificadas.

Algunos estudios que se pueden consultar para definir distribuciones en el tiempo para las tormentas de diseño son los siguientes:

- Huff, F.A. (1967), Time distribution of rainfall in heavy storms, Water Resources Research, vol 3, 1007-1019.
- National Environment Research Council (1975), Flood Studies Report, Whitefriars Press, Londres.
- Varas, E. (1985), Hietogramas de Tormentas de Diseño, VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 7-9 Noviembre, Concepción.
- Benítez, A. y Verni, F. (1985), Distribución porcentual de las precipitaciones de duraciones entre 12 y 72 horas. VII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 7-9 Noviembre, Concepción.
- Espíldora, B. y Echavarría, A. ( 1979), Metodología para Caracterizar la Distribución Temporal de las Precipitaciones de Santiago y su Aplicación en la Selección de Precipitaciones de Diseño para el Estudio de Crecidas. Informe CHR79-16-I, Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile.

**Variación Espacial.** La distribución espacial de la tormenta es también un factor de gran importancia en la definición de la tormenta de diseño. Los estudios al respecto, han tomado dos enfoques. En algunos casos, se han encontrado curvas de igual precipitación considerando como origen el centro de la tormenta y en otros se ha estudiado la variación dentro de un área definida. Sin embargo, la obtención de información en relación a la distribución espacial requiere de una red pluviográfica densa.

En Chile hay muy pocos antecedentes sobre estudios de esta índole y en general la red de estaciones no es lo suficientemente densa para poder abordarlos. Más aún,

el problema se ve complicado por la influencia de la topografía en la precipitación. Esta complicación adicional permite eso sí, suponer una variación espacial definida a través de aplicar una relación entre precipitación y altura.

Una consideración adicional en torno a este punto, particularmente compleja y difícil de cuantificar, es la incidencia del problema nival. Algunas tormentas ocurren como lluvias en las partes bajas de la cuenca mientras se deposita como nieve en las zonas altas. Este hecho complica enormemente el análisis de la variación espacial y es sumamente difícil de abordar y resolver. A nivel urbano, para cuencas pequeñas de áreas menores a una centena de hectáreas, se puede considerar una distribución espacial uniforme.

**Probabilidad de ocurrencia.** La probabilidad de ocurrencia de una tormenta de diseño es un problema muy difícil de resolver, pues es complejo asociar una probabilidad de ocurrencia a un fenómeno que presenta una variabilidad importante en el espacio y en el tiempo. Adicionalmente, desde el punto de vista del diseño, interesa también relacionar la frecuencia de la tormenta de diseño con la probabilidad de la crecida resultante.

Por lo dicho anteriormente, es difícil contar con la información necesaria para caracterizar y describir cuantitativamente la tormenta de diseño. Al analizar y estudiar el registro de lluvias es poco probable que se encuentren situaciones similares que permitan definir probabilidades de ocurrencia. Prácticamente todas las tormentas difieren en la distribución espacial, en la variación de la intensidad, magnitud, duración, etc.

El segundo problema es también muy complejo porque inciden en él, las condiciones de humedad de la cuenca, y sobre este punto se tienen sólo valores índices que describen situaciones en forma cualitativa.

Sin embargo, en situaciones de diseño, para cada duración se acostumbra a asociar la probabilidad a la magnitud de la lluvia y suponer que en crecidas provocadas por lluvias la frecuencia de la crecida es igual a la frecuencia de la lluvia que la origina. Esta suposición, adquiere mayor realidad a medida que se alcanzan condiciones de saturación en el área aportante y por lo tanto representa una situación conservadora desde la perspectiva del diseño.

**Consideraciones Finales.** La definición de la tormenta de diseño es un problema complejo que se caracteriza por la dificultad de precisar y definir cuantitativamente las características del temporal, de la cuenca, la asignación de probabilidades a la tormenta y a la crecida resultante.

El hidrólogo se enfrenta a este problema en uno de dos escenarios. A veces, se cuenta con registros pluviográficos representativos del área de interés y del análisis de dichos registros se pueden seleccionar tormentas que representen situaciones adecuadas para el diseño. La otra situación bastante usual corresponde a aquella en la cual no existen registros adecuados y representativos, y debe simular tormentas que tengan características similares a los escasos registros del área.

Los problemas mencionados y la dificultad de contar con la información adecuada para abordarlos en forma precisa, hace recomendable que se simule el comportamiento de la cuenca frente a diferentes situaciones de tormentas, ya sea observadas o simuladas, y posteriormente se seleccione la crecida de diseño de los resultados obtenidos.

---

**c. Curvas intensidad-duración-frecuencia de lluvias.** El diseño hidráulico de las obras de drenaje urbano, requiere el uso de las llamadas curvas intensidad-duración-frecuencia de lluvias (IDF). Estas relaciones presentan la variación de la intensidad de la lluvia de distintas duraciones, asociadas a diferentes probabilidades de ocurrencia y son útiles para estimar indirectamente el escurrimiento provenientes de cuencas pequeñas esencialmente impermeables, en función de la lluvia caída. Estas curvas tienen usualmente una forma de tipo exponencial, donde la intensidad, para una misma frecuencia, disminuye a medida que aumenta la duración de la precipitación. Es corriente incorporar en el mismo gráfico las curvas asociadas a diferentes frecuencias, en forma paramétrica, para obtener la familia de curvas de un lugar en un mismo gráfico. A modo ejemplar, se incluye una tabulación con valores representativos de las curvas IDF para las ciudades de Santiago, San Fernando, Concepción y Temuco. (Tabla 3.1.2.1).

**Obtención de las curvas IDF.** Para determinar estas curvas se necesita contar con registros continuos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, para realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series así formadas. Es decir, se deben examinar los hietogramas de cada una de las tormentas ocurridas en un año y de estos hietogramas elegir la lluvia correspondiente a la hora más lluviosa, a las dos horas más lluviosas, a las tres horas más lluviosas y así sucesivamente. Con estos valores se forman series de la hora más lluviosa de cada año con registro, de las dos horas más lluviosas, etc. Cada una de estas series se somete a un estudio de frecuencia, asociando a cada serie un modelo probabilístico, o bien una frecuencia empírica. Ello da como resultado una asignación de probabilidad a la lluvia correspondiente a cada duración.

Tabla 3.1.2.1: Ejemplos de curvas IDF (Santiago, San Fernando, Concepción y Temuco). Intensidad media (mm/hora) para cada duración. (Varas y Sánchez, 1984).

Lugar	Periodo de retorno (años)	DURACIÓN (horas)									
		1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Santiago	10	12.0	9.7	7.9	6.9	6.0	5.3	4.8	4.5	3.9	3.1
	25	13.6	10.8	9.0	8.1	7.0	6.2	5.7	5.1	4.5	3.8
	50	15.0	11.8	10.0	8.9	7.9	7.0	6.2	5.8	5.0	4.1
	100	16.0	12.6	10.8	9.7	8.6	7.8	6.9	6.5	5.5	4.7
San Fernando	10	20.1	16.9	13.7	11.3	10.1	9.3	8.7	8.3	7.3	6.6
	25	24.1	20.0	16.1	13.2	11.8	10.9	10.3	9.8	8.7	7.9
	50	27.1	22.3	17.9	14.7	13.1	12.1	11.5	11.0	9.0	8.9
	100	30.0	24.6	19.7	16.1	14.3	13.3	12.7	12.1	10.7	9.9
Concepción	10	22.7	17.7	11.1	9.2	8.2	7.4	6.8	6.4	5.7	4.8
	25	27.0	20.9	12.6	10.6	9.5	8.6	8.0	7.6	6.9	5.8
	50	30.2	23.4	13.7	11.5	10.4	9.5	8.9	8.4	7.8	6.5
	100	33.3	25.8	14.8	12.5	11.3	10.4	9.8	9.3	8.7	7.3
Temuco	10	16.7	13.7	10.3	8.4	7.1	6.2	5.7	5.1	4.4	3.6
	25	19.6	16.2	12.2	9.8	8.3	7.2	6.7	6.0	5.1	4.3
	50	21.7	18.0	13.6	10.8	9.2	8.0	7.4	6.6	5.7	4.7
	100	23.8	19.8	14.9	11.9	10.1	8.7	8.1	7.3	6.3	5.2

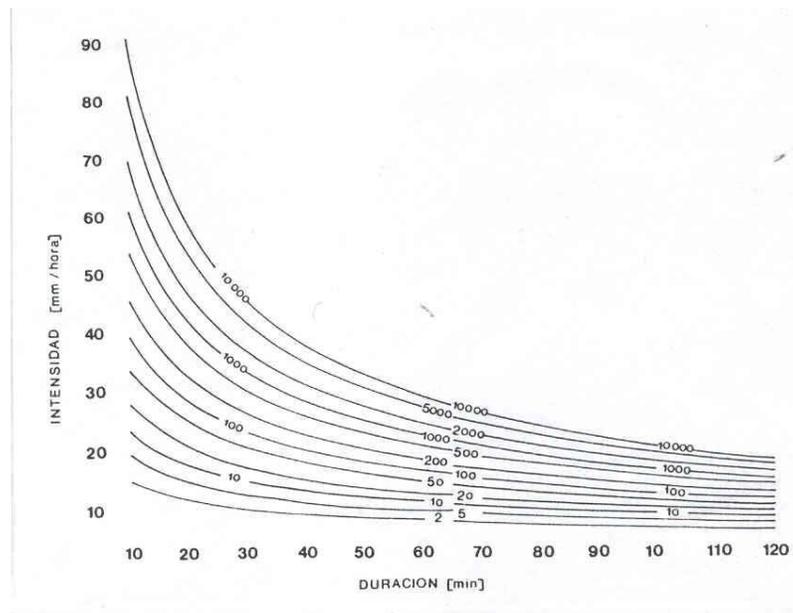
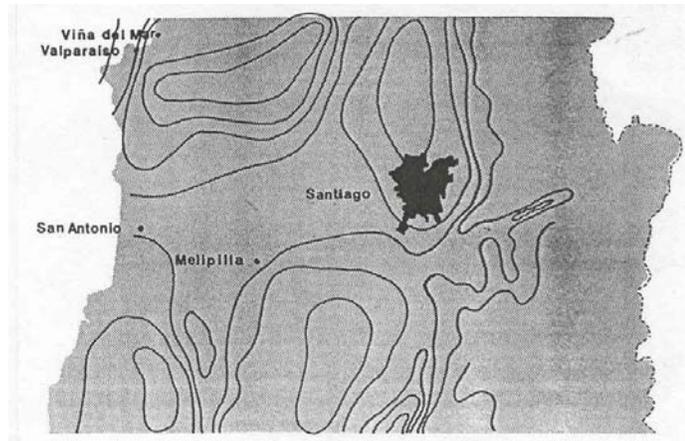


Figura 3.1.2.2: Curvas IDF para Santiago en Qta. Normal (E. Schroder).

Al graficar los resultados en un gráfico único, se obtiene una familia de curvas IDF. La Figura 3.1.2.2 muestra las curvas IDF calculadas con las lluvias registradas en Santiago en Quinta Normal, entre 1917 y 1962. (Schroder, E., 1973, Relaciones Intensidad, Duración, Frecuencia para las Lluvias de Santiago en Quinta Normal. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile).

**Estimación a partir de datos de lluvia diaria.** La obtención de esta familia de curvas necesita de registros pluviográficos continuos, los cuales son escasos y pocos extensos. Lo corriente es contar con bastantes registros pluviométricos, los cuales sólo entregan observaciones de lluvias diarias. Por ello, ha existido la preocupación de estudiar la relación existente entre la lluvia caída y su duración, como una forma de obtener una estimación para las lluvias de duración menor a 24 horas en función de las lluvias diarias.

Este procedimiento requiere de dos etapas. Primero es necesario obtener una estimación de la lluvia diaria, representativa del lugar de interés, asociada a un período de retorno dado, normalmente de 10 años. Luego, a partir de este valor se estiman valores asociados a otras duraciones y a otras frecuencias, haciendo uso de coeficientes de duración y de frecuencia. Los coeficientes de duración se definen como la razón entre la lluvia de una duración dada y la lluvia diaria de la misma frecuencia. Análogamente, los coeficientes de frecuencia se definen como la razón entre la lluvia de una determinada frecuencia y la lluvia de 10 años de período de retorno de la misma duración.



*Figura 3.1.2.3: Ejemplo de un sector del mapa con curvas de precipitación máxima diaria para 10 años de período de retorno, (D.G.A. 1993).*

Para el cálculo de la lluvia diaria de 10 años de período de retorno en base a datos en el lugar de interés, si se cuenta con una estación pluviométrica representativa, se debe recopilar la información de lluvias máximas diarias registradas y se forma una serie anual de lluvias máximas diarias seleccionando del registro el día más lluvioso de cada año. Esta muestra se somete a un estudio de frecuencia, ajustándole a la muestra un modelo probabilístico o bien, asociando a la muestra una frecuencia empírica.

Tabla 3.1.2.2: Precipitaciones Máximas para 10 años de periodo de retorno, según D.G.A. (1994), Precipitaciones Máximas en 1,2 y 3 días.

Zona Climática y región	Ciudad	Código BNA	Nombre Estación	Precipitaciones (mm)		
				24 hrs	48 hrs	72 hrs
<b>Desierto Árido</b>						
I. Tarapacá	Arica	1310098	Arica Chacalluta DMC	1,9	2,2	2,3
	Iquique	1820098	Iquique Cavanha	1,5	1,5	1,5
II. Antofagasta	Antofagasta	2760098	Antofagasta U.Norte	6,5	7,0	7,0
	Calama	2111098	Calama DMC	10,0	10,0	10,0
III. Copiapó	Copiapó	3450098	Copiapó DMC-DGA	25,1	25,4	25,4
	Vallenar	3823051	Vallenar DMC	32,7	39,0	40,5
<b>Semiárida</b>						
IV. Coquimbo	La Serena	4335050	La Serena DMC	60,3	76,7	81,9
	Ovalle	4551096	Ovalle Aeródromo	70,3	88,5	95,4
	Illapel	4726050	Illapel DOS DMC	78,2	99,9	110,9
V. Valparaíso	Valparaíso	5510097	Valparaíso Pta. Angeles	83,3	117,3	134,4
	Los Andes	5410051	Los Andes DMC	82,9	114,6	138,9
	San Antonio			87,4	119,2	136,4
<b>Mediterránea</b>						
R. Metropolitana	Santiago	5730097	Stgo. Quinta Normal	71,0	98,4	118,6
VI. de B.O'Higgins	Rancagua	6010051	Rancagua DMC	68,5	99,5	131,1
VII. Maule	Talca	7378096	San Luis Talca	93,2	135,0	165,8
	Curicó	7118050	Curicó Gral. Freire	113,6	153,0	189,6
	Linares	7358051	Linares DOS	123,1	176,9	215,3
	Constitución	7384098	Constitución	119,6	166,5	204,0
VIII. Bio Bio	Concepción	8220098	Concepción	105,1	143,0	172,8
	Chillán	8117051	Chillán	107,3	149,7	185,8
IX. Araucanía	Temuco	9129098	Temuco Maquehue	82,3	105,2	118,5
<b>Templada Húmeda</b>						
X. de los Lagos	Pto. Montt	10425050	Pto. Montt	81,9	118,2	138,9
	Valdivia	10123052	Valdivia-Pichoy	102,9	159,3	191,1
Templada H. Oceánica	Castro	10901098	Castro	89,3	123,1	151,6
XI. Gral. Carlos Ibáñez	Coyhaique	11316050	Coyhaique Tte. Vidal	67,8	101,3	118,6
	Pto. Aysén	11342050	Pto. Aysén DGA	173,4	242,6	291,5
Fría H. Oceánica	Pta. Arenas	12586050	Pta. Arenas Naval	54,0	74,5	80,1

Como resultado de este proceso se obtiene la lluvia máxima diaria asociada a un período de retorno de 10 años en el lugar de interés.

Si no se cuenta con registros observados, se puede obtener una estimación recurriendo a los mapas de lluvias máximas diarias con 10 años de período de retorno, publicados por la Dirección General de Aguas (DGA, Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días). Estos mapas se confeccionaron en base al análisis de alrededor de 600 estaciones de registro del país. Un ejemplo que permite apreciar el aspecto que presentan estos mapas se muestra en la Figura 3.1.2.3.

En la Tabla 3.1.2.2 se resumen los valores de precipitaciones máximas de 24, 48 y 72 hrs. para 10 años de periodo de retorno en varias ciudades.

**Estimación de lluvias para duraciones entre 1 y 24 horas.** Varas y Sánchez (1984) analizaron los registros pluviográficos de 13 estaciones en Chile central y sur, ubicadas entre La Serena y Puerto Montt. La muestra incluyó 1300 tormentas con duraciones entre 1 y 24 horas, las cuales representan un total de 252 años de registro. Los resultados se presentaron como familias de curvas IDF adimensionales, los cuales permiten, en base a un valor de lluvia diario conocido, estimar las lluvias o intensidades de lluvia asociadas a otras duraciones y a otras probabilidades de ocurrencia.

Los Coeficientes de Duración (CD) calculados para las duraciones entre 1 y 24 horas se presentan en la Tabla 3.1.2.3. Los coeficientes de duración para una hora, excluyendo a Armerillo, que presenta un micro-clima muy especial, varían entre 0,12 y 0,20 con un promedio de 0,16 y una desviación típica de 0,03.

El valor promedio encontrado para estaciones chilenas es bastante similar al propuesto por el USBR (1965) al examinar las lluvias de diversos lugares de Estados Unidos ubicados al oeste del meridiano 105. Sólo los valores calculados para Armerillo difieren de la tendencia general, hecho explicable por la gran magnitud que tienen las intensidades de las tormentas de 24 horas en dicho sitio.

Tabla 3.1.2.3: Coeficientes de duración para varias ciudades para lluvias de igual periodo de retorno, (Varas y Sánchez, 1984).

Ciudad	Duración (horas)									
	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Arica	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Iquique	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Antofagasta	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Calama	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
San Pedro de Atacama	*	*	*	*	*	*	*	*	*	1.0
Copiapó	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Vallenar	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
La Serena	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Ovalle	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Illapel	0.15	0.26	0.44	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Valparaíso	0.14	0.23	0.33	0.46	0.55	0.64	0.70	0.78	0.90	1.0
Los Andes	0.16	0.26	0.42	0.55	0.64	0.71	0.77	0.84	0.94	1.0
San Antonio	0.14	0.23	0.33	0.42	0.55	0.64	0.70	0.78	0.90	1.0
Santiago	0.16	0.26	0.42	0.55	0.64	0.71	0.77	0.84	0.94	1.0
Rancagua	0.12	0.21	0.34	0.42	0.51	0.58	0.65	0.73	0.83	1.0
Talca	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0

Curicó	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0
Linares	0.12	0.19	0.29	0.40	0.52	0.59	0.68	0.72	0.82	1.0
Constitución	0.19	0.30	0.38	0.47	0.56	0.64	0.70	0.77	0.89	1.0
Concepción	0.19	0.30	0.38	0.47	0.56	0.64	0.70	0.77	0.89	1.0
Chillán	0.17	0.24	0.36	0.44	0.52	0.60	0.67	0.72	0.89	1.0
Temuco	0.19	0.31	0.47	0.58	0.65	0.71	0.79	0.82	0.91	1.0
Pto. Montt	0.16	0.23	0.34	0.46	0.54	0.61	0.67	0.73	0.86	1.0
Valdivia	0.16	0.23	0.34	0.46	0.54	0.61	0.67	0.73	0.86	1.0
Ancud**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Castro**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Cisnes**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Coyhaique**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Aysén**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Chile Chico**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pta. Arenas**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0
Pto. Williams**	0.19	0.31	0.47	0.59	0.66	0.78	0.82	0.86	0.91	1.0

\* No se dispone de información que permita proponer un valor de diseño. Lo más probable es que las lluvias de 6 o más horas sean iguales a las de 24 horas. Para cada caso deberá realizarse un análisis específico.

\*\* Se han considerado los máximos estimados para la zona centro-sur

En relación a los Coeficientes de Frecuencia (CF), se observó que ellos eran bastante independientes de la duración, por lo que se propuso utilizar un sólo CF, cualquiera sea la duración de las lluvias estudiadas. El CF se definió como la razón entre la lluvia asociada a un cierto período de retorno y la lluvia de igual duración para un período de retorno de 10 años. Estos coeficientes coinciden en buena medida con los sugeridos por Bell (1965). La Tabla 3.1.2.4 presenta los coeficientes de frecuencia recomendados para el caso chileno.

Tabla 3.1.2.4: Coeficientes de frecuencia para lluvias de igual duración.

Ciudad (1)	Periodo de Retorno (Años)						
	2	5	10	20	50	100	200
Arica	0.55	0.82	1.00	1.17	1.14	1.56	1.81
Iquique	0.53	0.83	1.00	1.14	1.31	1.42	1.53
Antofagasta	0.53	0.83	1.00	1.18	1.42	1.60	1.78
Calama	0.58	0.85	1.00	1.12	1.22	1.36	1.50
San Pedro de Atacama	0.36	0.73	1.00	1.26	1.61	1.88	2.15
Copiapó	0.27	0.69	1.00	1.30	1.71	2.01	2.31
Vallenar	0.38	0.75	1.00	1.24	1.55	1.78	2.01
La Serena	0.49	0.80	1.00	1.19	1.44	1.62	1.80
Ovalle	0.42	0.75	1.00	1.28	1.69	2.03	2.37
Illapel	0.53	0.80	1.00	1.20	1.47	1.69	1.91
Valparaíso	0.58	0.83	1.00	1.17	1.39	1.56	1.73
Los Andes	0.56	0.82	1.00	1.18	1.43	1.61	1.79
San Antonio	0.58	0.83	1.00	1.17	1.39	1.56	1.73
Santiago	0.55	0.82	1.00	1.18	1.43	1.63	1.83
Rancagua(Rengo)	0.64	0.86	1.00	1.13	1.31	1.43	1.55
Talca(San Luis)	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63

Curicó	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Linares	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Constitución	0.62	0.85	1.00	1.14	1.33	1.48	1.63
Concepción	0.63	0.85	1.00	1.14	1.32	1.46	1.60
Chillán	0.69	0.88	1.00	1.11	1.25	1.35	1.45
Temuco	0.67	0.87	1.00	1.12	1.27	1.39	1.51
Pto. Montt	0.72	0.89	1.00	1.10	1.22	1.31	1.40
Valdivia	0.70	0.89	1.00	1.11	1.24	1.34	1.44
Ancud (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Castro (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Cisnes (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Coyhaique (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Aysén (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Chile Chico (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pta. Arenas (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57
Pto. Williams (2)	0.65	0.86	1.00	1.14	1.31	1.44	1.57

(1) Valores obtenidos de la publicación de la D.G.A. sobre “Precipitaciones Máximas de 1,2 y 3 días” para tormentas de 1 día.

(2) Como no se dispone de valores calculados para estas ciudades, se propone usar los valores promedios obtenidos del análisis de los registros de varias localidades (Manual de Carreteras M.O.P.)

La información anterior puede utilizarse para estimar las curvas IDF en un lugar, en base a la lluvia máxima diaria de acuerdo a la siguiente expresión:

$$P_t^T = 1,1 PD^{10} CD_t CF^T \quad (3.1.2.1)$$

En que :

$P_t^T$  LLuvia con período de retorno de T años y duración t horas.

$PD^{10}$  LLuvia máxima diaria (8 AM a 8 AM) de 10 años de período de retorno.

$CD_t$  Coeficiente de duración para t horas (entre 1 y 24 horas).

$CF^T$  Coeficiente de frecuencia para T años de período de retorno.

Esta expresión es válida para lluvias de 1 a 24 horas de duración en la zona estudiada. La aplicación del método sólo requiere realizar un análisis de frecuencia de las lluvias diarias, para calcular la lluvia máxima con 10 años de período de retorno, o bien elegir el valor pertinente de los mapas publicados por la Dirección General de Aguas. Posteriormente, se seleccionan los coeficientes de duración y de frecuencia que sean aplicables al lugar de interés. El procedimiento es utilizable en la zona central y sur de Chile y entrega estimaciones de lluvia razonables para diseños hidráulicos en áreas con información escasa, utilizando los valores de las Tablas 3.1.2.3 y 3.1.2.4.

**Ejemplo de estimación de curvas IDF.** Se trata de estimar la curva IDF de 50 años de periodo de retorno para duraciones entre 1 y 24 horas para una localidad cercana a la ciudad de Los Andes, en base a la precipitación máxima diaria y los coeficientes de frecuencia y duración correspondientes.

En primer lugar se estima la precipitación máxima de un día de duración y 10 años de periodo de retorno en el lugar, la que se obtiene de la publicación de la DGA (1994) sobre Precipitaciones Máximas de 1,2 y 3 días, o de la Tabla 3.1.2.2. En el caso de Los Andes corresponde a 82,9mm. El coeficiente de frecuencia para pasar de la lluvia de 10 años a la de 50 años, para el caso de Los Andes es de 1,43 de acuerdo a la Tabla 3.1.2.4. De manera que la precipitación de 50 años de periodo de retorno y duración  $t$  se puede estimar en Los Andes en base a la ecuación 3.1.2.1 como:

$$P_t^{50} = 1,1PD^{10}CD_tCF^{50} = 1,1 * 82,9 * CD_t * 1,43 = 130,4CD_t$$

Finalmente los Coeficientes de Duración para Los Andes se obtienen de la Tabla 3.1.2.3. Con estos valores se estima la lluvia de duración  $t$ , en horas, y periodo de retorno 50 años. La siguiente tabla muestra estos valores para  $t=1,2,\dots,24$  horas y los valores de precipitación correspondientes calculados con la ecuación anterior. Se agrega además en valor de la intensidad media,  $I_t^{50}$ , en (mm/hora), calculada dividiendo la precipitación por la duración correspondiente en horas.

Duración (horas)	1	2	4	6	8	10	12	14	18	24
Coef. de Duración	0,16	0,24	0,42	0,55	0,64	0,71	0,77	0,84	0,94	1,00
Precipitación (mm)	20,9	33,9	54,8	71,7	83,5	92,6	100,4	109,5	122,6	130,4
Intensidad (mm/hora)	20,9	16,9	13,7	12,0	10,4	9,3	8,4	7,8	6,8	5,4

La última línea, de intensidades para diferentes duraciones, es una estimación de la curva IDF para 50 años de periodo de retorno en la localidad de Los Andes.

**Estimación de lluvias para duraciones menores a 1 hora.** Bell (1969) estudió las razones entre lluvias de distintas duraciones e igual frecuencia o períodos de retorno y también la razón entre lluvias de diferentes períodos de retorno e igual duración, utilizando datos de un gran número de estaciones ubicadas en una extensa zona geográfica, que incluyó Estados Unidos de América, Hawai, Australia, Rusia, Alaska, Puerto Rico y África. Los resultados obtenidos son válidos para lluvias provenientes de tormentas de tipo convectivo con duraciones entre 10 minutos y 2 horas. Las conclusiones obtenidas indican que las razones, entre lluvias de distinta duración y/o distinto período de retorno, llamadas coeficientes de duración y coeficientes de frecuencia respectivamente, son muy constantes para todos los puntos indicados y el autor propuso su aplicación en otras zonas para tormentas convectivas.

Los coeficientes de duración y de frecuencia propuestos por Bell cumplen las siguientes relaciones, válidas para duraciones de lluvia entre 5 minutos y dos horas y para períodos de retorno entre 2 y 100 años.

$$CF^T = 0,21LnT + 0,52 \quad (3.1.2.2)$$

donde T es el periodo de retorno en años. Notar que para  $t=10$  se obtiene  $CF=1,00$ .

Además el coeficiente de duración, CD, en relación a la lluvia de una hora de duración ( 60 minutos), está dado por:

$$CD_t = 0,54t^{0,25} - 0,50 \quad (3.1.2.3)$$

donde t es la duración en minutos. Notar que para  $t = 60$ , es decir una hora, se obtiene  $CD=1,00$ .

Entonces la precipitación de duración t , entre 5 y 120 minutos, y periodo de retorno T, entre 2 y 100 años, se puede estimar en base a la precipitación de una hora, 60 minutos, y 10 años de periodo de retorno,  $P_{60}^{10}$  como:

$$P_{t=}^T = (0,21 \ln T + 0,52) (0,54 t^{0,25} - 0,50) P_{60}^{10} \quad (3.1.2.4)$$

Siendo:

$P_{t=}^T$	Lluvia en mm de duración t minutos y T años de período de retorno.
T	Período de retorno en años.
t	Duración de la lluvia en minutos.
$P_{60}^{10}$	Precipitación de una hora y 10 años de periodo de retorno, en mm.

La expresión anterior complementa los resultados experimentales del caso chileno y se recomienda su uso para obtener estimaciones de las curvas IDF para duraciones menores a una hora, cuando no se cuente con datos pluviográficos en el sitio de interés que permitan desarrollar una familia de curvas IDF en el lugar.

La ecuación (3.1.2.2) corresponde al coeficiente de frecuencia, CF, el cual entrega valores similares a los presentados en la Tabla 3.1.2.4, de manera que se recomienda emplear los indicados en esa tabla para las ciudades estudiadas. La ecuación (3.2.2.3) corresponde al coeficiente de duración en relación a la precipitación de 1 hora, cuyos valores numéricos se indican en la Tabla 3.1.2.5.

Tabla 3.1.2.5: Coeficiente de duración para lluvias de menos de 1 hora.

Duración (minutos)	Coef. de Duración
5	0,31
10	0,46
15	0,56
20	0,64
30	0,76
40	0,86
50	0,94
60	1,00

Estos valores son válidos para todo el territorio nacional a menos que se disponga de información pluviográfica que permita estimar otros coeficientes más precisos para cada lugar.

**d. Transformación de la Lluvia en escurrimiento.** El ciclo de escurrimiento es una idealización del proceso del mismo nombre, que permite describir en forma simplificada a los diferentes procesos que se presentan en la transformación de la lluvia en escurrimiento.

Al considerar una lluvia relativamente intensa que se mantenga constante en el tiempo, pueden observarse los siguientes hechos. En un primer momento, la lluvia que cae es interceptada por la vegetación, techos y otras superficies o bien, almacenada temporalmente en depresiones y pozas, lo que se denomina intercepción. Esta intercepción puede ser significativa al principio de la lluvia, sin embargo la capacidad de almacenamiento de las superficies interceptoras es baja, de manera que el volumen disponible se llena rápidamente y sólo disminuye por efectos de la evaporación, fenómeno de poca importancia durante una lluvia. Al continuar la lluvia, la superficie del suelo se cubre de una delgada película de agua, llamada volumen en detención superficial, y se inicia un flujo hacia sectores más bajos que hacen el papel de canales superficiales. Este volumen de agua en detención superficial puede en parte, introducirse en el suelo y aumentar la humedad de la zona no saturada o bien infiltrarse hacia las zonas saturadas del suelo. En la mayoría de las tormentas de baja intensidad el déficit de humedad del suelo se satisface antes de que se aprecie un escurrimiento superficial notorio. El agua que se ha infiltrado en el suelo y que no permanece como humedad del suelo, continúa su camino hacia el cauce que drena la superficie como flujo sub-superficial o bien percola e incrementa los acuíferos subterráneos. El agua que escurre superficialmente es poca inicialmente pero va aumentando y puede incrementarse con el aporte sub-superficial y subterráneo en proporciones significativas, dependiendo del caso.

Esta descripción simplificada representa uno de los casos que puede darse y varía notoriamente con los cambios de la lluvia en el tiempo y en el espacio y con las condiciones del suelo y de la vegetación.

**Métodos para estimar un caudal de diseño.** Existen varios procedimientos alternativos para llegar a definir un caudal de diseño para una obra de drenaje urbano, los cuales son más o menos pertinentes en distintas situaciones, dependiendo de la información hidrológica disponible y de las características de la cuenca. Todos ellos tienen un cierto grado de subjetividad y suponen distintas hipótesis.

Una política aconsejable en un caso particular, es usar en los estudios varios métodos independientes y agregar un análisis de sensibilidad de los resultados ante cambios en los parámetros o en las condiciones iniciales. Así se obtiene una estimación del comportamiento hidrológico del caudal máximo o del volumen escurrido en varios escenarios, para posteriormente emplear la experiencia y un criterio adecuado en la selección del valor de diseño apropiado para el caso en estudio.

El objetivo del cálculo de la crecida de diseño es dimensionar las obras de drenaje de manera que operen adecuadamente en la mayoría de las situaciones que deberán enfrentar, y fallen sólo con una baja probabilidad cuando se sobrepase el valor de la crecida de diseño. Entonces para seleccionar una crecida de diseño es necesario asociar una probabilidad de ocurrencia a las distintas magnitudes de la crecida. Para lograr este fin, se cuenta con procedimientos directos, regionales e indirectos. Los primeros requieren valores de caudales máximos observados en el punto de interés; los segundos se utilizan cuando no existen observaciones o existen pocas observaciones de caudales en el lugar del estudio y se justifican las decisiones, analizando los datos de otros lugares similares, y los últimos estiman las crecidas en base a la relación que existe entre la precipitación u otras variables explicativas y el escurrimiento.

Cualquiera sea el método que se emplee en un caso particular, es conveniente tener presente que para conseguir el fin buscado se requiere contar con información relevante, adecuada y precisa. También, es recomendable emplear si ello es posible, procedimientos alternativos para fines de complementación y para aumentar la seguridad de las estimaciones obtenidas.

La utilización de los llamados métodos directos requiere contar con observaciones de caudales o niveles de agua en el punto de interés. Los registros permiten hacer un análisis de frecuencia de la variable de interés y entregar como resultado una relación entre la magnitud de la crecida y su probabilidad de ocurrencia, o en otras palabras asociar a cada valor de crecida una probabilidad. Para lograrlo existen

métodos gráficos y analíticos. Esta situación casi nunca se presenta en los sistemas de drenaje urbano, pues es poco usual contar con mediciones de caudal.

**Modelos Precipitación-Escorrentía.** Los métodos indirectos para el estudio de crecidas son procedimientos que permiten transformar la precipitación efectiva en escorrentía. Esta herramienta permite aprovechar la mayor cantidad de información de precipitación que existe, para extender registros más escasos de caudal y mejorar así los métodos para estimar crecidas en aquellos puntos que no cuentan con información o bien, ésta es escasa. Dentro del ámbito de los modelos precipitación-escorrentía existe gran variabilidad entre los procedimientos disponibles, pues ellos abarcan desde relaciones empíricas muy simples hasta complejos modelos de simulación que representan las variaciones espaciales y temporales del proceso de transformación. A medida que aumenta la complejidad del método se incrementan también las necesidades de información básica para aplicarlo.

Estos métodos tienen la particularidad de ser determinísticos y en consecuencia no incorporan el concepto del riesgo asociado a los resultados. Adicionalmente requieren para calcular la crecida de diseño que se defina la tormenta de diseño y la precipitación efectiva, ya que el método considera solamente una transformación y por ello surge un nuevo problema. No siendo posible describir extensamente las distintas alternativas en este capítulo conviene al menos mencionar algunas ideas con respecto a dos procedimientos: el método racional y los métodos basados en el concepto del hidrograma unitario o derivaciones, que son los más útiles para el diseño de los sistemas de drenaje urbano.

El método racional es ampliamente usado desde mediados del siglo XIX y tiene la ventaja de ser aparentemente muy simple, ya que expresa que el caudal máximo es proporcional a la lluvia caída en el área multiplicada por un coeficiente que se denomina coeficiente de escurrimiento. Es apropiado para ser usado en áreas pequeñas, preferentemente impermeables. Sus limitaciones principales se relacionan con el hecho de suponer un coeficiente de escorrentía constante independiente de las condiciones de humedad de la cuenca y la hipótesis de igualar el período de retorno de la tormenta al de la crecida.

El hidrograma unitario propuesto por Sherman en 1932, es un método que en la actualidad se usa extensamente. Es bastante intuitivo, simple de aplicar y supone una linealidad entre el estímulo y el resultado. Su aplicación es confiable en cuencas relativamente pequeñas. En los casos en que los datos de caudales son escasos se puede recurrir a los métodos de hidrogramas unitarios sintéticos para estimar la características principales del hidrograma en función de propiedades geomorfológicas de la cuenca.

Los modelos precipitación-escorrentía requieren la definición de una tormenta de diseño, lo cual es un problema complejo que se caracteriza por la dificultad de precisar y definir cuantitativamente las propiedades de la tormenta. El hidrólogo enfrenta este problema en uno de dos escenarios. A veces, se cuenta con información pluviográfica representativa de la zona de interés y del análisis de los registros se pueden seleccionar uno o varios episodios de lluvias adecuados para una situación de diseño. En otros casos, no existen registros adecuados y representativos y el proyectista debe recurrir a procedimientos aproximados que simulen tormentas parecidas a los escasos registros del área.

**Lluvias Efectivas.** La estimación de los caudales escurridos a partir de las lluvias observadas requiere de un procedimiento en el cual se distinguen dos procesos o etapas bien diferenciadas. La primera etapa consiste en determinar a partir de la lluvia observada, la lluvia efectiva o neta, definida como aquella parte de la lluvia total que escurre. La segunda etapa es someter a la lluvia efectiva a una transformación o modificación en el tiempo, producida por el almacenamiento temporal de la lluvia efectiva en su escurrimiento por la superficie del área de la cuenca o urbanización. El primero de estos procesos es esencialmente no lineal y bastante difícil de predecir, ya que las pérdidas o infiltración que sufre la lluvia es un proceso complejo. El segundo es un proceso aproximadamente lineal de transferencia o propagación de la lluvia efectiva y en general es más fácil de representar con un grado de precisión aceptable.

Existen diferentes procedimientos de variada complejidad para estimar la lluvia efectiva a partir de la lluvia total. Las pérdidas, ya sea por evaporación o por infiltración, dependen de factores propios de cada superficie, con lo cual exhiben una importante variación espacial, y además el fenómeno varía en el tiempo. Los principales factores que influyen la infiltración o penetración del agua en el suelo son la altura de agua sobre la superficie, el espesor de la capa de suelo que esté saturada, la humedad del suelo, el grado de compactación de la superficie, la estructura del suelo, el efecto filtro del material granular del suelo, la vegetación de la superficie y la temperatura del agua. Todos los factores anteriores son diferentes de un lugar a otro del área de interés y además van variando a medida que se produce la lluvia. Los principales elementos que inciden en la evaporación son la naturaleza de la superficie sometida a evaporación y factores meteorológicos. Dado que el proceso de evaporación es un proceso físico de cambio de estado, requiere una cierta cantidad de energía que proviene de la atmósfera. Por lo tanto, influye la radiación solar, la temperatura, la presión de vapor, la velocidad del viento, la presión atmosférica. Estos elementos también son variables en el espacio y en el tiempo.

En general, la infiltración es mayor al principio de la tormenta y va disminuyendo en forma aproximadamente exponencial a medida que aumenta la humedad del

suelo, que es el parámetro más influyente. Los modelos matemáticos para representar las pérdidas y obtener la lluvia efectiva son de variada complejidad y tratan de representar la situación y su cambio en el tiempo y en el espacio. Algunos de ellos se basan en expresiones que intentan reflejar las variaciones desde el punto de vista analítico y otros intentan asociar los parámetros a características físicas del suelo, con el fin de aplicarlos en condiciones diferentes. El grado de éxito de estos enfoques es relativo y normalmente existe poca información de terreno para justificar el uso de un método complejo.

Los enfoques más simples, usan un procedimiento que tiene una pérdida inicial que se resta a los primeros intervalos de lluvia y una pérdida constante o bien, proporcional a la lluvia durante el resto de la tormenta. Los valores de pérdida inicial y la proporción o constante se seleccionan de acuerdo a la experiencia del proyectista o de acuerdo a lo que se haya podido observar o medir en situaciones anteriores o similares. Valores máximos de infiltración para diferentes tipos de situaciones y suelos se presentan en la mayoría de los textos de hidrología para ingenieros.

**Método Racional.** Este método propuesto por Mulvaney en 1850, ha tenido y tiene bastante aplicación para estimar el caudal de diseño en cuencas urbanas y rurales pequeñas, debido a su evidente lógica, aun cuando tiene limitaciones teóricas. Ha sido recomendado para cuencas menores de 1.000 has., pero se reportan casos de aplicación a cuencas del orden de 30.000 has. Este método establece que el caudal máximo es proporcional a la lluvia de diseño y el tamaño de la cuenca aportante. La gran ventaja de este método es su simplicidad, lo que se traduce en que el resultado fácilmente controlado en función de variables observables, de tal forma que ha sido muy utilizado como método de comparación. Independientemente del empleo de otros procedimientos más sofisticados se recomienda siempre comparar los resultados con los que entrega el método racional. El caudal máximo asociado a un determinado período de retorno se calcula con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{CiA}{3,6} \quad (3.1.2.5)$$

donde: Q= caudal en m<sup>3</sup>/s, C = coeficiente de escorrentía, i= intensidad de la lluvia de diseño en mm/hr y A= área aportante en km<sup>2</sup>. A pesar de la aparente facilidad y simplicidad del método la determinación adecuada del coeficiente de escurrimiento y de la intensidad de la lluvia de diseño, implica un cuidadoso y juicioso análisis en cada caso.

Tabla 3.1.2.6: Expresiones para calcular el tiempo de concentración.

Autor	Fórmula	Observaciones
Kirpich (1940)	$T = 0,0195 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}}$	Desarrollada con datos SCS para áreas rurales Tennessee (1)
California Culverts Practice (1942)	$T = 60(0,87 \frac{L_1^3}{H})^{0,385}$	Adaptación de la fórmula de Kirpich para cuencas de montaña, (1)
Izzard (1946)	$T = 525,28 \frac{(0,0000276i + c)L^{0,33}}{i^{0,667}S^{0,333}}$	Desarrollada en experimentos de laboratorio (2)
Federal Aviation Agency (1970)	$T = 3,26(1,1 - C) \frac{L^{0,5}}{S_1^{0,333}}$	Desarrollada para aeropuertos (3)
Morgali y Linsley(1965)	$T = 7 \frac{L^{0,6}n^{0,6}}{i^{0,4}S^{0,3}}$	Fórmula de flujo superficial (2)
SCS (1975)	$T = \frac{L^{0,8} \left[ \left( \frac{1000}{1900S_1^{0,5}} \right) - 9 \right]^{0,7}}{i^{0,4}}$	Desarrollada por el SCS para cuencas rurales (1)

Fuente: Kibler, 1982, Urban Stormwater Hydrology. American Geophysical Union.

(1) Aplicable a cuencas urbanas con abundantes espacios libres o poco desarrollados, como parques, parcelas y similares.

(2) Aplicable a sectores urbanos típicos como calles, patios, pasajes, etc.

(3) Aplicables en sectores planos desarrollados con poca vegetación, como estacionamientos grandes, sectores de grandes industrias.

Notación: T = tiempo de concentración (min.)  
 L = longitud de escurrimiento superficial (m)  
 L<sub>1</sub> = longitud cauce (km.)  
 S = pendiente (m/m)  
 H = diferencia de altura en cuenca (m)  
 i = intensidad de lluvia (mm/hr)  
 c = coeficiente de retardo

$S_1$	=	pendiente (%)
$C$	=	coeficiente de escorrentía
$n$	=	Coefficiente de rugosidad de Manning
$CN$	=	curva número, según S.C.S.

La intensidad de la lluvia de diseño corresponde a aquella con una duración igual al tiempo de concentración del área y con una frecuencia o período de retorno compatible con la importancia y trascendencia de la obra. El tiempo de concentración se define como el tiempo que demora el agua hidráulicamente más alejada en llegar al punto de salida. En el caso de cuencas urbanas se puede estimar el tiempo de concentración definiendo la trayectoria de la partícula hidráulicamente más alejada de la salida de la cuenca. Para esa trayectoria se calcula la velocidad media del agua en base a relaciones típicas de la hidráulica, como la de Manning, y con ella se estima el tiempo de viaje del agua. Este procedimiento requiere un conocimiento detallado de los cauces involucrados en la trayectoria así definida, (pendiente, sección transversal, rugosidad, etc.). Es por ello que si sólo se dispone de información general obtenible de planos o fotografías aéreas del sector, la estimación del tiempo de concentración se realiza en base a fórmulas empíricas, desarrolladas para distintos casos particulares. Es usual que estas expresiones empíricas al ser aplicadas a una situación particular produzcan resultados bastante diferentes y el proyectista deberá usar su experiencia y criterio para seleccionar el valor más adecuado. La Tabla 3.1.2.6 resume algunas de las expresiones que se han recomendado en la literatura técnica. Algunas de estas fórmulas desarrolladas para zonas rurales se pueden aplicar en cuencas urbanas con abundantes espacios libre o naturales, como parques y similares. Otras se pueden usar en estacionamientos y superficies más libres. Para cuencas urbanas propiamente tales es recomendable la expresión de Morgali y Linsley definiendo los planos de escurrimiento superficial que componen la trayectoria del agua sobre la cuenca. Una vez calculado un valor del tiempo de concentración se recomienda hacer un análisis de sensibilidad en torno a él para apreciar el efecto de estimaciones poco precisas.

Adoptada una frecuencia o período de retorno y seleccionada la duración de diseño, puede estimarse la intensidad de la lluvia recurriendo a la familia de curvas IDF representativas del lugar de interés.

El coeficiente de escorrentía depende de las características del terreno, uso y manejo del suelo, condiciones de infiltración y otros factores difíciles de cuantificar. Para elegir el valor más apropiado se recurre a tablas y a la experiencia y criterio del proyectista. En situaciones complejas se puede determinar un coeficiente ponderado en proporción a las áreas que ocupan cada tipo de superficie. Se incluye la Tabla 3.1.2.7 con valores propuestos para diferentes situaciones.

Tabla 3.1.2.7: Coeficientes de escorrentía.

Tipo de superficie	Coefficiente
Áreas comerciales:	
céntricas	0.70-0.95
suburbios	0.50-0.70
Áreas residenciales:	
casas aisladas	0.30-0.50
condominios aislados	0.40-0.60
condominios pareados	0.60-0.75
suburbios	0.25-0.40
departamentos	0.50-0.70
Áreas industriales:	
grandes industrias	0.50-0.80
pequeñas	0.60-0.90
parques y jardines	0.10-0.25
Calles:	
asfalto	0.70-0.95
concreto	0.80-0.95
adoquín	0.50-0.70
ladrillo	0.70-0.85
pasajes y paseos peatonales	0.75-0.85
techos	0.75-0.95
Prados: suelo arenoso	
plano (2%)	0.05-0.10
pendiente media (2%-7%)	0.10-0.15
pendiente fuerte (>7%)	0.15-0.20
Prados: suelos arcillosos	
planos (<2%)	0.13-0.17
pendiente media (2%-7%)	0.18-0.22
pendiente fuerte (>7%)	0.25-0.35

Ref.: ASCE (1972), Viessman et al. (1977), Manual de Carreteras (1981).

Al aplicar este procedimiento es preciso tener presente sus hipótesis y limitaciones. El método supone que el coeficiente de escurrimiento es constante para las distintas tormentas, lo cual es más valioso para tormentas intensas donde una gran parte de la superficie tiende a saturarse y a comportarse como área impermeable. Además está la hipótesis de que la frecuencia de la lluvia de diseño es igual a la frecuencia del escurrimiento máximo, lo cual significa que el coeficiente de escorrentía es constante. Finalmente se acepta que la situación de lluvia más crítica es aquella con duración igual al tiempo de concentración. La importancia de esta restricción puede analizarse, simulando los caudales estimados para varias situaciones. La estimación del tiempo de concentración mediante fórmulas empíricas extrapoladas a situaciones diferentes a las condiciones en que ellas se derivaron, puede originar errores significativos.

**Ejemplo de estimación del coeficiente de escorrentía.** El siguiente ejemplo de estimación del coeficiente de escorrentía medio de una urbanización permite aclarar el empleo de los valores indicados en las tablas. Se trata de una urbanización de 21.000 m<sup>2</sup> totales de los cuales 6.800 m<sup>2</sup> serán ocupados por techos de las viviendas y edificios, 4.300 m<sup>2</sup> en calles, veredas y pasajes pavimentados en hormigón y el resto en jardines y patios. De esto últimos no más de 3.500 m<sup>2</sup> serán jardines con vegetación en suelos arenosos con menos de 2% de pendiente, y lo que queda corresponderá a patios, relativamente impermeables.

La tabulación siguiente muestra para cada tipo de superficie el área asignada a ella, el coeficiente de escorrentía de acuerdo a la Tabla 3.1.2.7, el valor de la superficie ponderada, que puede entenderse también como la superficie impermeable equivalente a cada tipo. Finalmente se indica la suma de superficies ponderadas, la que dividida por el área total entrega el coeficiente de escorrentía equivalente de toda la urbanización.

Tipo de superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Coef. de escorrentía	Sup. ponderada (m <sup>2</sup> )
Techos	6.800	0,80	5.440
Calles, veredas	4.300	0,87	3.771
Jardines	3.500	0,10	350
Patios	6.400	0,60	3.840
Total			13.371

Coeficiente de escorrentía equivalente =  $13.771/21.000 = 0,636$

Se puede notar que este valor, así obtenido, se encuentra dentro del rango recomendado para áreas residenciales de condominios pareados o departamentos si se considera el conjunto como una unidad homogénea.

**Método Racional Modificado.** Este método es una extensión del procedimiento racional para lluvias que tengan una duración mayor que el tiempo de concentración del área, y tiene como objetivo contar con un hidrograma y no sólo con una estimación del gasto de punta. De esta forma, se puede emplear el procedimiento racional en situaciones que necesitan hidrogramas, tales como para dimensionar embalses de detención de las aguas lluvias.

Se propone una forma trapezoidal para el hidrograma con rectas de ascenso y de recesión con duraciones iguales al tiempo de concentración. De esta manera el hidrograma aumenta linealmente hasta alcanzar el gasto máximo para el tiempo igual al de concentración. Luego el caudal permanece constante hasta el instante en que termina la lluvia. La última rama es lineal y el caudal disminuye hasta un valor nulo. Procediendo de esta manera se calculan hidrogramas para diferentes duraciones de lluvia, dado que para cada duración se utiliza la intensidad de lluvia

correspondiente a dicha duración seleccionada de la curva IDF. Cuando la duración elegida es igual al tiempo de concentración el hidrograma se transforma en un triángulo isósceles.

Los volúmenes de detención necesarios para no sobrepasar un caudal de diseño, se calculan efectuando la propagación de los hidrogramas correspondientes a varias duraciones de lluvia a través del embalse y se elige aquel que maximiza el volumen requerido sin que se sobrepase el caudal máximo de salida especificado.

**Método del Soil Conservation Service.** Otro procedimiento recomendable para estimar los gastos máximos en cuencas urbanas, así como la forma del hidrograma correspondiente, es el desarrollado por el Soil Conservation Service de Estados Unidos, método conocido como procedimiento de la Curva Número. Esta metodología considera dos etapas o pasos: calcular el volumen escurrido o lluvia efectiva y estimar el caudal máximo de la crecida y la forma del hidrograma de la crecida.

Determinación del volumen. El volumen escurrido, expresado en unidades de altura de agua(mm), o lluvia efectiva (Q), se calcula en función de la lluvia (P), del potencial máximo de retención de agua (S) y de las pérdidas iniciales (Ia), las cuales se estiman en un 20% del potencial máximo, por medio de la siguiente expresión:

---

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3.1.2.6)$$

---

El potencial máximo de retención de agua es función de la Curva Número y se calcula como sigue:

---

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3.1.2.7)$$

---

El factor CN o curva número depende del tipo de suelo, de la naturaleza y cobertura del suelo y las condiciones previas de humedad. El Soil Conservation Service ha publicado extensas y amplias investigaciones sobre este factor y presenta tablas para seleccionar el valor más representativo de cada situación. Los valores correspondientes a las condiciones urbanas más corrientes se presentan en la Tabla 3.1.2.8.

Tabla 3.1.2.8: Valores de Curvas Número para Áreas Urbanas.

Cobertura superficie	% imp.	Grupo de suelo (*)			
		A	B	C	D
<b>Desarrollado</b>					
Permeables:					
Prados y parques					
pasto < 50%		68	79	86	89
pasto 50%-75%		49	69	79	84
pasto > 75%		39	61	74	80
Impermeables:					
Calles y caminos:					
Pavimentados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
<b>Distritos urbanos</b>					
Comercial	85	89	92	94	95
Industrial	72	81	88	91	93
Residencial:					
sitios 500 m <sup>2</sup> o menor	65	77	85	90	92
sitios 1000 m <sup>2</sup>	38	61	75	83	87
sitios 2000 m <sup>2</sup>	25	54	70	80	85
sitios 5000 m <sup>2</sup>	20	51	68	79	84
sitios 10000 m <sup>2</sup>	12	46	65	77	82
Áreas en desarrollo:		77	86	91	94

(\*) A: Arenas y arenas limosas, B: Limos, C: Limos arcillosos con algo de arena, D: Arcillas y limos.

Ref.: SCS (1986) TR 55

La infiltración del terreno varía bastante en función de la permeabilidad del suelo y las condiciones de la superficie. El método distingue 4 tipos de suelos (A, B, C y D). El suelo de tipo A corresponde a suelos arenosos o limo-arenosos con bajo potencial de escurrimiento. Son suelos con buen drenaje y conductividades hidráulicas del orden de 7 mm/hr. Los suelos tipo B tienen tasas de infiltración moderadas y son de tipo limoso. Sus conductividades hidráulicas son del orden de 3 a 6 mm/hr. Los suelos C tienen baja capacidad de infiltración cuando están saturados y son limos arcillosos con algo de arena. Finalmente los suelos tipo D tienen un alto potencial de escurrimiento y pequeña infiltración. Están formados fundamentalmente por suelos finos arcillosos o limosos, con conductividades hidráulicas del orden de 1 mm/hr.

Estimación de la forma y del gasto máximo. El SCS propone también el uso de un hidrograma triangular que se asemeja a una curva de hidrograma adimensional derivado a partir de muchos hidrogramas calculados. Esta simplificación permite estimar el valor máximo del caudal, el tiempo de base y el tiempo al máximo, lo cual define totalmente la forma del hidrograma y su valor máximo. Este hidrograma tiene una zona de ascenso que corresponde aproximadamente al 37% del volumen escurrido. El tiempo de base y el tiempo al máximo se pueden estimar a partir del tiempo de concentración de la cuenca. Las expresiones propuestas son las siguientes:

---

$$q_p = \frac{0,75 Q}{T_c} \quad (3.1.2.8)$$

$$T_b = 2,67T_p = 1,8T_c \quad (3.1.2.9)$$

$$T_p = 0,67T_c \quad (3.1.2.10)$$

---

Siendo:

$q_p$  = caudal máximo, en mm/s.

$T_c$  = tiempo de concentración, en segundos.

$T_b$  = tiempo de la base del hidrograma, en segundos.

$T_p$  = tiempo al máximo, en segundos.

$Q$  = volumen escurrido expresado en altura de agua, en mm.

Las expresiones anteriores permiten calcular la forma del hidrograma conocido el volumen escurrido y el tiempo de concentración.

## 3.2. HIDROGEOLOGÍA Y SUELOS

---

Varias de las obras que se proponen como soluciones alternativas de disposición de aguas lluvias en sectores urbanos consideran la posibilidad de infiltrar parcial o totalmente las aguas lluvias en el suelo. Además, las obras propiamente tales se construirán mayoritariamente bajo la superficie del suelo, por lo que se hace necesario conocer las características del subsuelo, la existencia y propiedades del agua subterránea en el lugar, así como las condiciones y facilidades de infiltración y drenaje subsuperficial del sector.

Con el objeto de entregar antecedentes para la selección, concepción y diseño de las obras de infiltración se presenta una visión general del subsuelo y del agua subterránea, de manera de poder orientar el análisis de los aspectos básicos que deben considerarse para abordar proyectos de infiltración de aguas lluvias, así como también la obtención de los antecedentes que se necesitan para ello, incluyendo la realización de ensayos en terreno para medir propiedades. También se incluye un acápite sobre los efectos de la infiltración en la calidad de las aguas.

## 3.2.1. AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea ocupa las grietas, poros y fisuras de la parte superior de la corteza terrestre acumulándose en el suelo año a año, gracias a la infiltración que se produce durante y después de las precipitaciones. El agua subterránea no está detenida y sus velocidades, aunque pequeñas, hacen que esta masa de agua pueda incorporarse en el ciclo hidrológico.

**a. Ciclo hidrológico.** Es la continua circulación de humedad y agua sobre el planeta. El agua de los océanos, de los ríos, de los lagos, de la zona superficial de los suelos y de la transpiración de las plantas se evapora por acción de la radiación solar. El vapor de agua se eleva y cuando se condensa da origen a las nubes que, bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, precipita en forma de lluvia, granizo o nieve, sobre la superficie del suelo (Fig. 3.2.1.1).

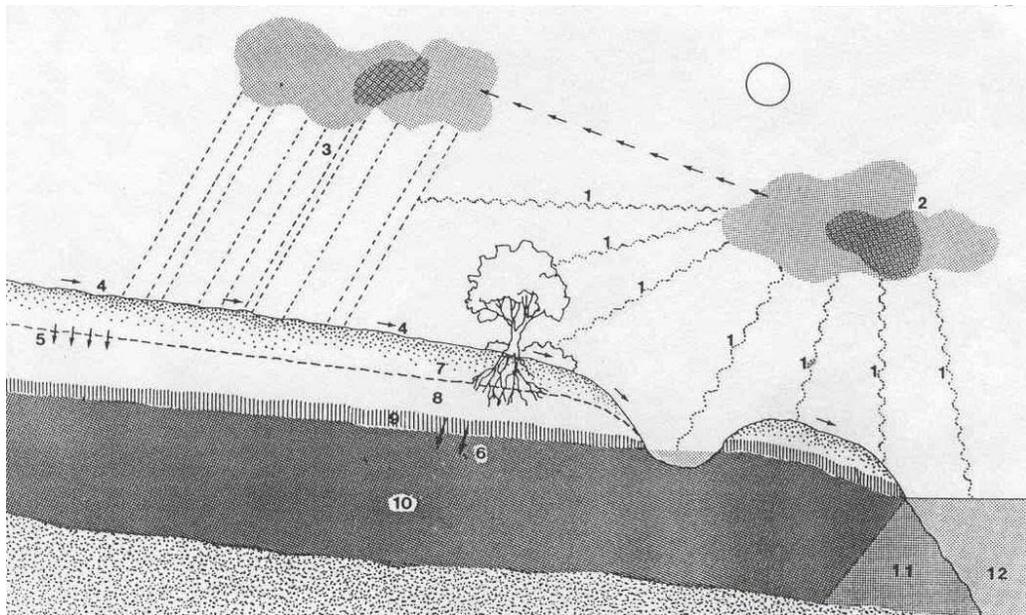


Figura 3.2.1.1: El agua subterránea en el ciclo hidrológico. 1.- Evaporación del océano, del suelo, de las plantas, de los ríos, de la lluvia, 2.- Formación de nubes, 3.- Precipitación, 4.- Escorrentía superficial, 5.- Infiltración, 6.- Percolación, 7.- Humedad del suelo, 8.- Zona vadosa, 9.- Franja capilar, 10.- Agua subterránea dulce, 11.- Agua subterránea salada, 12.- Océano.

Parte del agua de las lluvias se almacena temporalmente en la superficie de la tierra como hielo o nieve, o en depresiones. Otra parte escurre sobre la superficie y una vez humedecido el follaje y el terreno llega hasta los ríos. El resto se infiltra en el suelo a través de la zona vadosa o zona de aereación,

donde los poros del suelo contienen agua y aire. Dentro de esta porción de suelo, una parte del agua se detiene en la zona radicular de las plantas y es devuelta a la superficie por éstas o mediante el fenómeno de capilaridad. Otra parte se almacena, dando origen al agua vadosa o humedad de suelo. El exceso de agua vadosa drena por gravedad, y continúa su movimiento descendente hasta incorporarse al depósito subterráneo, proceso que se llama percolación o infiltración eficaz. A cierta profundidad, el suelo se encuentra saturado de agua, en la llamada zona de saturación. La superficie de esta zona de saturación es llamada napa freática, superficie freática o nivel freático y el agua almacenada en la zona de saturación se denomina agua subterránea. La alimentación del agua subterránea se realiza por medio del proceso de infiltración, en el cual parte de la precipitación traspasa la superficie del suelo.

---

**b. Acuíferos.** El agua subterránea se encuentra en forma de un solo cuerpo continuo o también en estratos separados. El espesor de la zona de saturación varía desde unos pocos metros hasta varios. Se define un acuífero como una unidad geológica saturada comprendida dentro de la zona de saturación capaz de permitir el desplazamiento del agua, para lo cual los poros que contiene deben ser suficientemente grandes (arenas, gravas, roca fracturada). Los acuíferos se pueden clasificar como libres, confinados o colgados de acuerdo con la presión hidrostática del agua encerrada en ellos.

**Acuífero freático o libre** es aquel cuyo límite superior queda definido por la superficie freática misma, en la cual, el agua contenida en los poros del acuífero se encuentra sometida a presión atmosférica. En cualquier nivel dentro de un acuífero libre la presión hidrostática es equivalente a la profundidad media desde la superficie freática hasta el punto en cuestión, y puede expresarse en metros de columna de agua. Los acuíferos libres se forman cuando no hay materiales impermeables sobre el acuífero. La napa freática se puede desplazar hacia arriba o hacia abajo, en respuesta a recargas o descargas en el acuífero (Fig. 3.2.1.2).

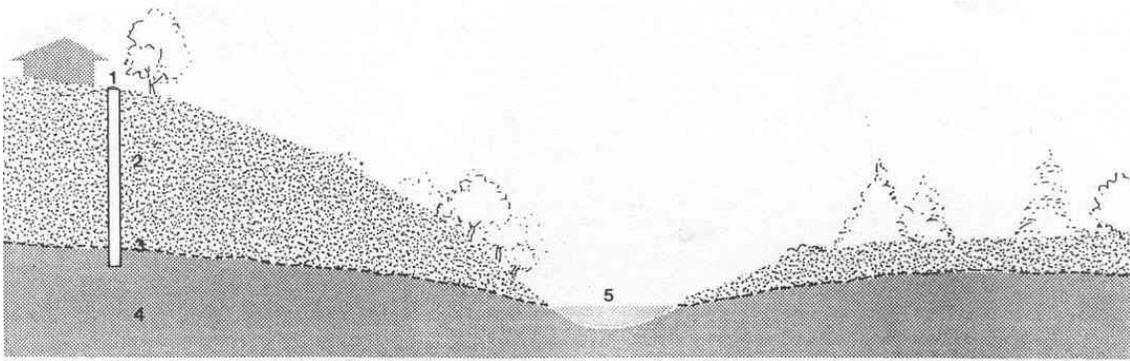


Figura 3.2.1.2: Acuífero libre. 1.- Pozo, 2.- Zona no saturada, 3.- Napa subterránea, 4.- Zona saturada, 5.- Río.

**Acuífero confinado o artesiano** es un acuífero "encerrado" por dos estratos confinantes, situados por encima y por debajo de él (Fig. 3.2.1.3).

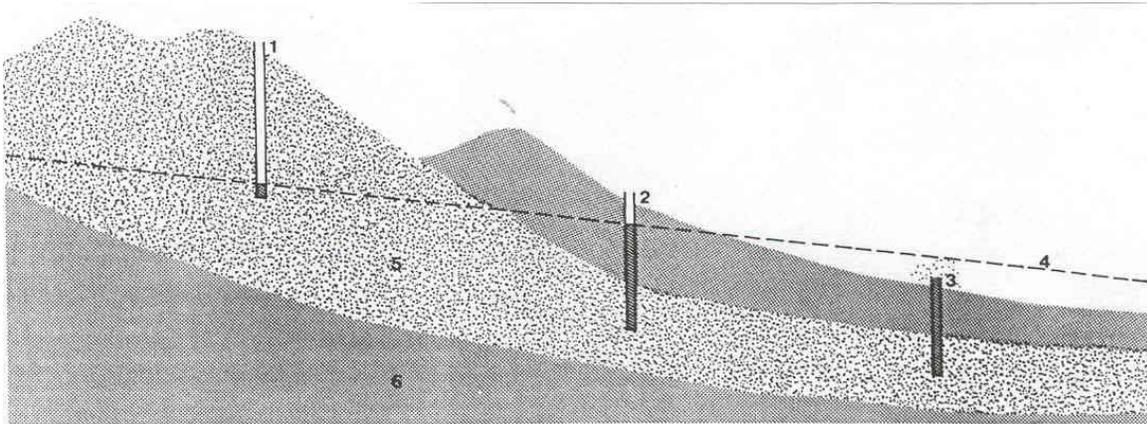
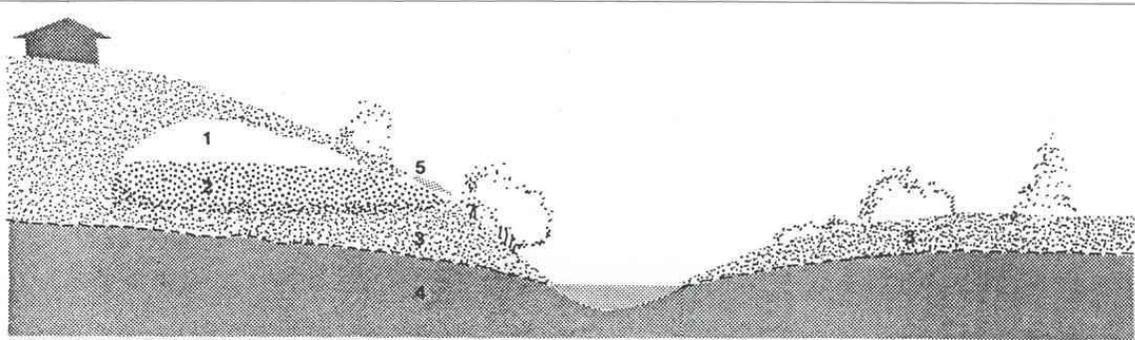


Figura 3.2.1.3: Acuífero confinado. 1.- Pozo freático, 2.- Pozo artesiano, 3.- Pozo surgente, 4.- Superficie libre, 5.- Acuífero, 6.- Roca.

**Acuífero colgado** se produce cuando existe un estrato impermeable intercalado dentro de la zona de aereación, el que interrumpe la percolación y acumula agua, produciendo una zona de saturación con un nivel ubicado encima del nivel de saturación principal (Fig. 3.2.1.4).



*Figura 3.2.1.4: Acuífero colgado. 1.- Acuífero colgado, 2.- Arcilla, 3.- Zona no saturada, 4.- Napa freática, 5.- Manantiales.*

**Acuífero Semiconfinado.** Un caso particular de los acuíferos confinados son los acuíferos semiconfinados, en los que el estrato superior o inferior que los encierra es un estrato de baja permeabilidad que puede almacenar y transmitir agua.

El agua de un acuífero confinado se encuentra a una presión mayor que la atmosférica. Al perforar un pozo a través de un estrato confinante superior, y llegar hasta el acuífero artesiano, el agua puede llegar a niveles en el pozo por sobre el nivel del acuífero, lo que indica que éste se encuentra bajo presión. El nivel alcanzado en el pozo se denomina nivel piezométrico. En estos acuíferos la recarga puede ingresar en alguna zona alejada y escurrir lentamente a través de él. Si la superficie piezométrica se encuentra sobre la superficie del terreno, se produce un pozo surgente.

**c. Zonas del subsuelo.** En una sección de un acuífero libre, se distinguen los siguientes estratos o zonas (Fig. 3.2.1.5):

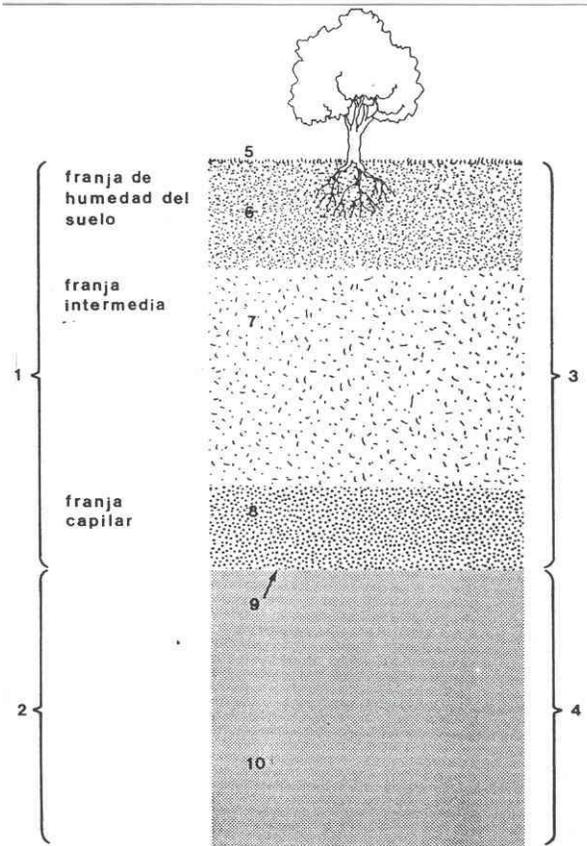


Figura 3.2.1.5: Estratos presentes en la sección de un acuífero libre. 1.- Zona de aereación, 2.- Zona de saturación. 3.- Agua suspendida, 4.- Agua bajo presión hidrostática, 5.- Superficie del suelo, 6.- Humedad del suelo, 7.- Poros parcialmente ocupados por agua, 8.- Ascensión capilar del nivel freático, 9.- Superficie freática, 10.- Agua subterránea.

**Zona de aereación o zona vadosa**, en la cual los poros o aberturas están parcialmente llenos de agua. Se puede dividir en tres franjas: franja de humedad del suelo, franja intermedia y franja capilar. El agua infiltra hacia la franja de humedad del suelo, donde es utilizada por las plantas y contenida en el suelo mediante atracción molecular y acción capilar. Una vez que se satisface la capacidad de retención de las fuerzas capilares, el agua percola hacia abajo por acción de la gravedad. Llega a la franja intermedia, la que también retiene agua suspendida por atracción molecular y capilaridad, siendo esta última la fuerza más importante. El agua en esta franja constituye almacenamiento fósil, y su utilidad es ser un pasaje hacia zonas inferiores. Parte del agua que alcanza

la franja capilar es retenida mediante fuerza capilar. El resto percola para formar parte del agua subterránea.

**Zona saturada:** contiene al agua subterránea. Esta zona podría asimilarse a un gran embalse natural cuya capacidad total es equivalente al volumen conjunto de los poros llenos de agua. Su espesor es variable, dependiendo de factores tales como la geología local, la presencia de intersticios en las formaciones, la recarga, y el desplazamiento del agua desde zonas de recarga a las de descarga.

Los acuíferos libres se recargan por percolación profunda desde estratos superiores. Ésta puede ser del orden de un 50% de la precipitación media en climas húmedos, 10 a 20% en climas mediterráneos, y menos de un 1% en climas secos. La descarga natural se puede producir a través de manantiales o por medio de evapotranspiración.

## 3.2.2. SISTEMAS DE INFILTRACIÓN

**a. Condiciones para su funcionamiento.** Los sistemas de infiltración de las aguas lluvias en el subsuelo, para su posterior percolación en el agua subterránea, requieren que los sectores seleccionados cumplan con ciertas condiciones que aseguren un buen funcionamiento de las obras.

Para lograr un proceso de infiltración eficiente se requiere que el subsuelo esté compuesto por material permeable (arenas, gravas, roca fracturada) con una zona vadosa sin capas o estratos impermeables que limiten la infiltración y que tengan la suficiente permeabilidad horizontal de manera de permitir el flujo lateral sin formar una excesiva sobrecarga (Fig. 3.2.2.1). Adicionalmente, la superficie freática o napa debe estar lo suficientemente profunda de manera de no interferir con el proceso de infiltración.

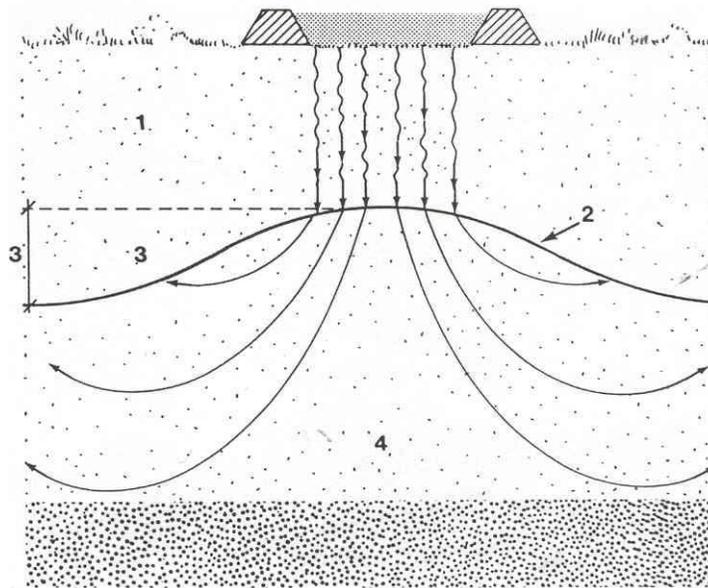


Figura 3.2.2.1: Esquema de infiltración. 1.- Zona vadosa, 2.- Napa freática, 3.- Sobrecarga, 4.- Acuífero.

Las variables de interés que se deben considerar para evaluar las características de un determinado sector, para ser usado como zona de infiltración de aguas lluvias, están relacionadas con la cubierta vegetal, el suelo y el agua subterránea, en los aspectos que se describen a continuación.

**Cubierta vegetal.** Gran parte del agua que se infiltra en el suelo es absorbida por las raíces de las plantas y retorna a la atmósfera mediante la transpiración

de las plantas la que, junto a la evaporación directa del agua, se denomina evapotranspiración. La capa vegetal actúa como un filtro que reduce la colmatación de los poros abiertos y facilita el crecimiento del humus orgánico, lo que explica porqué la capacidad de infiltración es mayor en áreas cubiertas de pasto que en otras áreas.

La Figura 3.2.2.2 muestra en forma esquemática los procesos involucrados en el intercambio de agua que se produce a través de un suelo cubierto por vegetación.

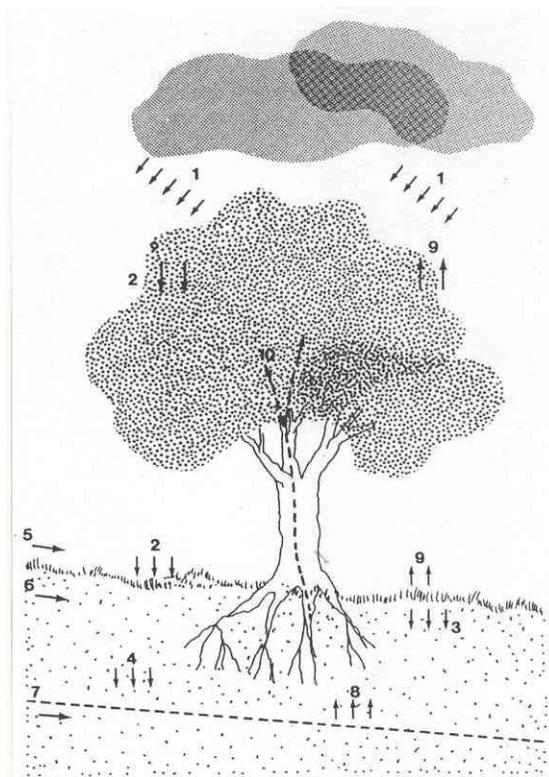


Figura 3.2.2.2: Intercambio de agua en un suelo cubierto de vegetación. 1.- Precipitación, 2.- Interceptación, 3.- Infiltración, 4.- Percolación, 5.- Flujo superficial, 6.- Interflujo, 7.- Agua subterránea, 8.- Flujo capilar, 9.- Evaporación, 10.- Transpiración.

**Suelo.** La cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo depende de su porosidad efectiva. La porosidad efectiva se define como la cantidad de agua que el suelo puede recibir o liberar por gravedad. Por ejemplo, en suelos compuestos por grava y arena la porosidad efectiva puede alcanzar un valor de 0,3 (lo que significa que el 30% del volumen total de suelo puede ser llenado

con agua). En el caso de las arcillas este valor es del orden de 0,05, es decir, sólo un 5% puede ser llenado con agua.

Es importante también conocer la facilidad o dificultad que tiene el agua para moverse en el suelo. La permeabilidad es una medida de la velocidad con que se desplaza el agua en el suelo. Presenta valores altos en suelos cuya porosidad es elevada y sus granos son gruesos, como gravas y arenas, y valores bajos para suelos finos, como arcillas. La capacidad de infiltración de un suelo varía con su permeabilidad, y como generalmente los suelos no son homogéneos, se necesita información de terreno para poder estimarla en cada sitio.

Para estimar la capacidad de infiltración de un suelo se requiere conocer el tipo de suelos, el espesor vertical, la distribución horizontal de cada tipo, la presencia de arcilla y otros lentes impermeables. También se debe contar con información del agua subterránea.

**Agua subterránea.** Adicionalmente a la información del suelo, se debe contar con información del agua subterránea para determinar si el sector es apto para infiltrar las aguas lluvias. Entre otros factores, las variables que se necesitan para definir las condiciones locales del agua subterránea son las siguientes: distancia entre la superficie del suelo y la superficie del agua subterránea, pendiente de la superficie freática, profundidad y dirección del flujo de agua subterránea, incluyendo las zonas de recarga y las zonas de descarga, y además, las fluctuaciones del nivel del agua subterránea en cada estación del año.

Conociendo la permeabilidad del suelo y la pendiente de la superficie freática, puede estimarse la velocidad del flujo del agua subterránea. En suelos homogéneos la pendiente de la superficie freática coincide generalmente con la pendiente del terreno. La topografía del terreno permite que se desarrollen zonas de recarga y zonas de descarga del agua subterránea (Fig. 3.2.2.3). Es recomendable diseñar los sistemas de infiltración en aquellas zonas de recarga, evitando hacerlo en zonas de descarga.

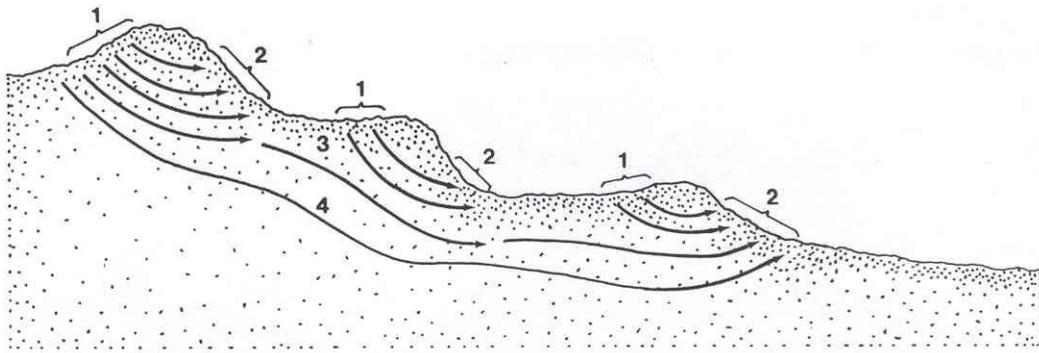


Figura 3.2.2.3: Recarga y descarga de agua subterránea. Las flechas indican líneas de flujo del agua subterránea. 1.- Zona de recarga, 2.- Zona de descarga, 3.- Flujo local, 4.- Flujo regional.

Como queda en evidencia, muchos factores afectan la decisión de usar un sitio como zona de infiltración de las aguas lluvias. En resumen, las características y antecedentes que deben conocerse de un sitio son los siguientes:

Tipo y condiciones de la cubierta vegetal y del primer estrato de suelo (0-1m), llamado capa vegetal.

Características de la zona vadosa, es decir, de los estratos que están entre la superficie del suelo y la napa, fundamentales para el proceso de infiltración. Se debe conocer, al menos, la presencia o ausencia de permeabilidad por fisuración y el grado de consolidación. También es importante el carácter litológico de la zona, es decir, propiedades como la porosidad total, la porosidad efectiva, la permeabilidad, el contenido de humedad y la capacidad de infiltración.

Tipo y condiciones de los acuíferos. Los tipos de acuíferos que se pueden presentar varían desde la inexistencia, pasando por acuíferos surgentes, semiconfinados, no confinados cubiertos y no confinados libres. Se debe determinar la profundidad de la napa y la profundidad del estrato o roca impermeable. Para los acuíferos es interesante su permeabilidad y transmisividad.

**Riesgos de contaminación.** Durante el proceso de infiltración de las aguas lluvias en el suelo, se manifiestan diferentes mecanismos auto-purificadores en la zona situada entre la superficie del suelo y la superficie de la napa

subterránea, llamada zona no saturada o zona vadosa. Los procesos que se producen en esta zona se enumeran a continuación.

**Filtración.** Este es un proceso físico de retención de partículas que depende de la superficie específica de los granos. La superficie específica corresponde a la superficie de los granos que ocupan una unidad de volumen y varía de acuerdo al tamaño y distribución de ellos.

**Adsorción e intercambios iónicos.** Estos dos procesos físico-químicos reversibles se desarrollan esencialmente en medios arcillosos, en materia orgánica, en los óxidos, los hidróxidos y los materiales atmosféricos. Ellos permiten la retención de moléculas no cargadas ya sea orgánicas (hidrocarburos, pesticidas) o minerales (metales pesados oxidados). Algunos metales son relativamente móviles en los suelos (zinc, cadmio) mientras que otros son fácilmente retenidos (cobre, plomo, hierro).

**Hidrocarburos.** Pueden tener una degradación biológica lenta y una adsorción que es más fuerte si la granulometría es más fina. También se pueden evaporar.

**Sustancias nitrogenadas.** Se trata de compuestos más bien solubles que son difícilmente retenidos. Sin embargo, la contaminación por nitratos de aguas lluvias urbanas es pequeña en comparación a la observada en zonas rurales agrícolas.

**Microorganismos de origen fecal.** La migración vertical de células bacterianas es pequeña. Sin embargo, la migración de partículas virales puede llegar hasta 20 metros.

**Procesos biológicos.** En las capas más altas del suelo, la flora bacteriana, fangosa, con algas y con fauna puede intervenir en la descontaminación de las aguas infiltradas. Fauna y flora saprófitas toman parte en la degradación de la materia orgánica y en la purificación microbiológica. Los procesos bacterianos permiten la degradación de ciertos hidrocarburos, la acumulación de hierro, la nitrificación-desnitrificación (bajo condiciones específicas de temperatura, pH, nutrientes, oxígeno). Por otro lado las sustancias contenidas en las aguas lluvias reaccionan de una manera diferente en contacto con el suelo.

**Metales pesados.** En su estado ionizado pueden permanecer adheridos al suelo por intercambio iónico o asimilados por las plantas. Bajo una

forma oxidada, los metales son absorbibles sobre las arcillas y la materia orgánica bajo condiciones de pH y de oxigenación específica de cada uno de los metales.

Los procesos purificadores mencionados pueden desarrollarse en el interior de la napa subterránea pero con mucho menor importancia que en la zona no saturada. La dilución no es inmediata ni total y no puede entonces considerarse como un proceso autopurificador. La contaminación de las aguas subterráneas puede acarrear consecuencias imprevisibles y costosas, alcanzando en algunos casos efectos irreversibles.

Se desprende entonces, que la infiltración de aguas lluvias urbanas en el subsuelo puede hacerse directamente, sólo si es posible asegurar un cierto espesor de suelo en condiciones no saturadas que actúe como filtro. La experiencia francesa (Azzout et al, 1994) recomienda que se deje siempre un espesor de al menos 1 metro entre la posición más alta que alcanza el agua subterránea y la base de la obra de infiltración elegida. Sin embargo el conjunto de estos procesos no constituye un remedio contra la contaminación de las napas y en el caso de aguas muy cargadas en contaminantes debe considerarse un proceso aparte y previo de purificación

---

**b. Características del suelo.** Se presentan a continuación las principales características del suelo que definen el funcionamiento hidráulico del movimiento del agua durante el proceso de infiltración. Se incluyen los ensayos y análisis típicos empleados en la determinación cuantitativa de estas propiedades.

**Profundidad de la napa.** Se puede determinar a partir de mediciones de niveles estáticos realizados en pozos cercanos a la zona en estudio o en pozos monitoreados por la DGA. También se puede recurrir a norias, pozos superficiales o excavaciones cercanas. En algunas zonas del país existen antecedentes elaborados en base a estudios regionales disponibles en entidades públicas, como el Balance Hidrogeológico de Chile, publicado por la DGA en 1989.

**Permeabilidad o Conductividad Hidráulica.** Es un parámetro que representa la facilidad con que un material permite el paso del agua. Tiene un comportamiento diferente si el suelo está saturado o si se encuentra no saturado.

Suelo saturado. Según Darcy (1856), la velocidad del escurrimiento a través de una sección de área  $A$ , sometida a un gradiente hidráulico  $i$  (Figura 3.2.2.4), está dada por:

$$v = k i \quad (3.2.2.1)$$

donde  $v$  es la velocidad de Darcy,  $k$  es la permeabilidad,  $i$  es igual a  $h/L$ , siendo  $h$  la diferencia de carga hidráulica entre la entrada y la salida, y  $L$  el recorrido que debe realizar el agua.

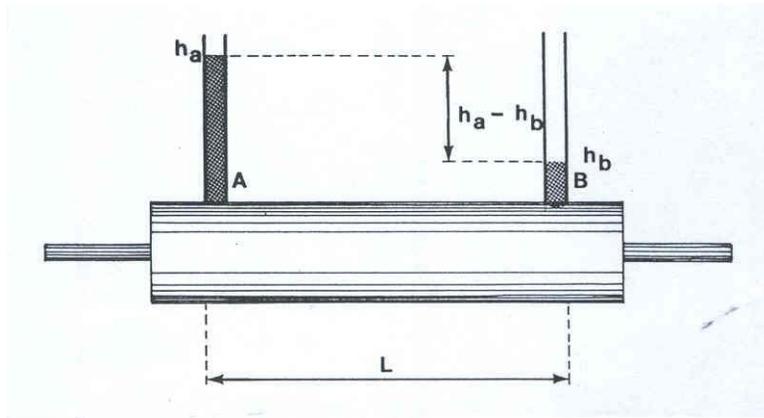


Figura 3.2.2.4: Representación del experimento de Darcy.

Los valores del coeficiente de permeabilidad se pueden determinar a partir de ensayos de laboratorio, de campo, o de estudios regionales. Los ensayos de laboratorio se realizan aplicando la ley de Darcy a una muestra de material en el interior de un permeámetro, que puede ser de carga constante o de carga variable.

En la Tabla 3.2.2.1 se presentan valores de  $k$  según la descripción granulométrica del material. Estos valores son sólo promedios y permiten tener una idea del orden de magnitud de la permeabilidad para determinadas características del suelo en la zona en estudio.

Tabla 3.2.2.1: Valores de permeabilidad según la descripción del material.

Permeabilidad (m/día)	$10^4$ $10^3$	$10^2$ $10^1$ 1	$10^{-1}$ $10^{-2}$ $10^{-3}$	$10^{-4}$ $10^{-5}$ $10^{-6}$
Tipo de Terreno	Grava limpia	Arena limpia, mezcla de grava y arena	Arena fina, arenas arcillosas, mezcla de arena, limo y arcilla, arcillas estratificadas	Arcillas no meteorizadas
Calificación	Buenos acuíferos		Acuíferos pobres	Impermeables
Capacidad de drenaje	Drenan bien		Drenan mal	No drenan

Suelo no saturado. La permeabilidad en un suelo no saturado disminuye a medida que se reduce el contenido de humedad ( $\theta$ ). En este caso la ley de Darcy se expresa como :

$$v = K(\theta) * \text{Grad } H \quad (3.2.2.2)$$

donde  $v$  es la velocidad de flujo,  $K(\theta)$  la conductividad hidráulica y  $H$  la carga hidráulica, que puede expresarse como la diferencia:

$$H = h(\theta) - Z \quad (3.2.2.3)$$

donde  $h(\theta)$  representa la variación que experimenta la succión del agua en función del contenido de humedad y  $Z$  representa la profundidad respecto a un sistema de referencia ubicado en la superficie del suelo y orientado hacia abajo.

Las curvas  $h(\theta)$  y  $K(\theta)$  pueden obtenerse directamente en terreno o en laboratorio a partir de una muestra no perturbada. La curva de succión  $h(\theta)$  puede obtenerse efectuando medidas de la presión  $h$  en distintos horizontes del perfil del suelo, y simultáneamente medidas del contenido de humedad  $\theta$ .

La relación entre  $h$  y  $\theta$ , establecida para una evolución continua del contenido de humedad, entrega directamente la curva de succión, cuya forma es del tipo de la que se indica en los ejemplos de la Fig. 3.2.2.5, que muestra ejemplos de curvas de succión para suelos de diferente textura.

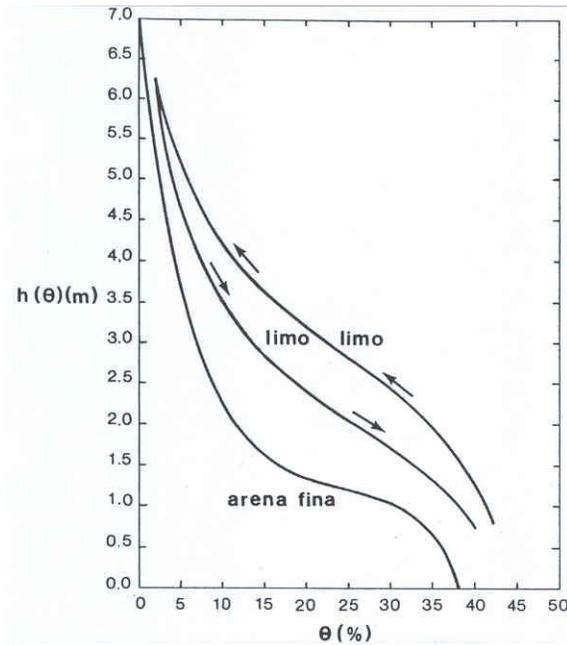


Figura 3.2.2.5: Ejemplo se curvas de succión para suelos de diferente textura..

La curva de conductividad hidráulica  $K(\theta)$  se puede obtener a partir de la ley de Darcy, o en un permeámetro que impone un gradiente constante a una muestra para diferentes valores del contenido de humedad  $\theta$ , y presentan una forma del tipo de la que se muestra en los ejemplos de la Fig. 3.2.2.6.

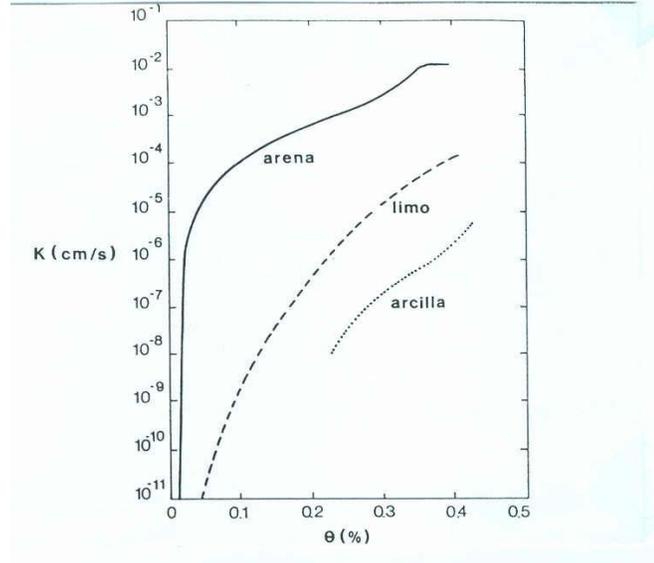


Figura 3.2.2.6: Ejemplos que muestran formas típicas de curvas de conductividad hidráulica para diferentes materiales.

**Transmisividad.** Representa la facilidad del acuífero para transmitir agua a través de su espesor. Se define como el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno de ancho unitario y de altura igual al espesor saturado bajo un gradiente hidráulico unitario.

El valor de este parámetro se puede determinar a partir de pruebas de bombeo realizadas en pozos del sector, o como el producto entre permeabilidad y espesor saturado, estimando la permeabilidad a partir de los procedimientos descritos anteriormente. Existen estudios regionales que entregan valores estimados de este parámetro en distintas zonas del país, (ver por ejemplo los valores de la Tabla 3.2.2.4).

**Porosidad.** Se define como el cociente entre el volumen vacío ocupado con aire y/o agua de un suelo y su volumen total. Es una medida del volumen de huecos disponibles para almacenar agua. Para evaluar la cantidad de agua disponible o la cantidad de agua que puede aceptar en sus poros un acuífero, se define el concepto de porosidad efectiva o eficaz, el que representa el volumen de agua que un suelo puede drenar libremente por gravedad o almacenar libremente. En algunos casos puede representar una porción muy pequeña de la porosidad total.

Tabla 3.2.2.2: Valores estimados de porosidades totales y efectivas.

Material Tipo y descripción	Porosidad total %			Porosidad eficaz %		
	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.
<b>Rocas masivas</b>						
Granito	0,3	4	0,2	<0,2	0,5	0,0
Caliza masiva	8	15	0,5	<0,5	1	0,0
Dolomia	5	10	2	<0,5	1	0,0
Rocas metamórficas	0,5	5	0,2	<0,5	2	0,0
<b>Rocas volcánicas</b>						
Piroclastos y tobas	30	50	10	<5	20	0,0
Escorias	25	80	10	20	50	1
Pumitas	85	90	50	<5	20	0,0
Basaltos densos	2	5	0,1	<1	2	0,1
Fonolitas	12	30	5	5	10	1
Basaltos vacuolar						
<b>Rocas sedimentarias</b>						
Pizarras sedimentarias	5	15	2	<2	5	0,0
Areniscas	15	25	3	10	20	0,0
Creta blanda	20	50	10	1	5	0,2
Caliza detrítica	10	30	1,5	5	20	0,5
<b>Formaciones sedimentarias</b>						
Aluviones	25	40	20	15	35	5
Dunas	35	40	30	20	30	10
Gravas	30	40	25	25	35	15
Loess	45	55	40	<5	10	0,1
Arenas	35	45	20	25	35	10
Dep. glaciares	25	35	15	15	30	5
Limos	40	50	35	10	20	2
Arcillas sin compactar	45	60	40	2	10	0,0
Suelos superiores	50	60	30	10	20	1

En la tabla 3.2.2.2 (Custodio, 1976) se presentan valores estimados de porosidad efectiva y total para algunos suelos. La medida de la porosidad se puede efectuar por diversos métodos, tanto en laboratorio como en terreno. Los métodos de terreno son los mejores, pues miden el material en su estado natural, mientras que los métodos de laboratorio suponen una alteración de la muestra respecto a su estado inicial.

**Capacidad de Infiltración.** La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra. La capacidad de infiltración de un suelo es la máxima cantidad de agua que puede absorber en una unidad de tiempo bajo condiciones definidas previamente. Depende de

varios factores tales como las características del terreno y del fluido que se infiltra, las condiciones de la superficie y las condiciones ambientales.

Existen tres tipos fundamentales de métodos para determinar las capacidad de infiltración: a) Ensayos de infiltración en terreno. b) Análisis de escorrentía en cuencas pequeñas. c) Lisímetros. Todos los métodos disponibles entregan valores aproximados, incluso aplicados al mismo terreno pueden dar valores diferentes. Para el diseño de obras de infiltración el método más empleado es el de ensayos de infiltración en terreno ya que permiten determinar de manera directa un valor de la capacidad e infiltración. Algunos de los ensayos más usados se mencionan a continuación.

Ensayo Muntz o de cilindros concéntricos. Entrega una medida del coeficiente de permeabilidad vertical en las capas superficiales del suelo y se puede usar sólo si la napa es profunda. Es un método simple pero necesita de aparatos específicos. El método consiste en hincar en el suelo dos cilindros a una profundidad de 10 cm como se muestra en la figura. El cilindro interior debe tener al menos un área de  $100 \text{ cm}^2$  y se debe mantener el nivel del agua en ambos cilindros a una altura sobre el suelo de al menos 3 cm durante el ensayo.

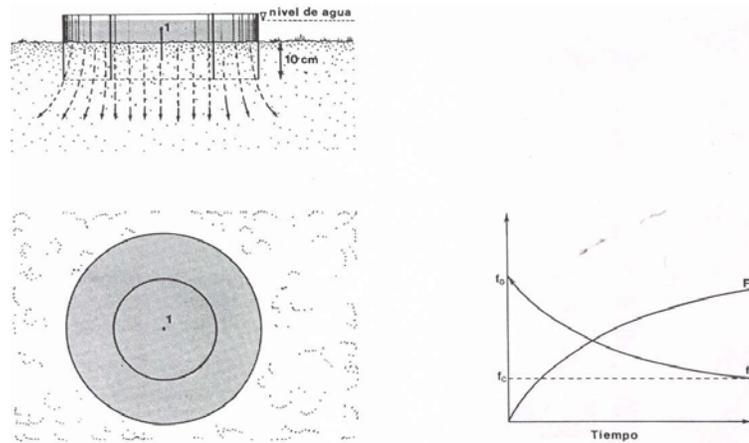


Figura 3.2.2.7: Infiltrómetro de cilindros concéntricos y curvas de infiltración,  $f$ , e infiltración acumulada,  $F$ , en el tiempo. 1.- Varilla para medir.

La medida se realiza trazando una curva de las cantidades de agua infiltrada acumulada,  $F$ , y la tasa de infiltración,  $f$ , en función del tiempo,  $t$ . La pendiente de la curva  $F$  en función de  $t$ , una vez que se alcanzan las condiciones de régimen estable, es el coeficiente de permeabilidad vertical.

Ejemplo.- Se ha efectuado un ensayo Muntz con dos cilindros concéntricos de 15 y 30 cm de diámetro cada uno, siguiendo las

indicaciones correspondientes. Se llenaron ambos cilindros con agua y una vez que el nivel llegó a 5cm sobre el suelo se mantuvo el nivel del agua en ambos cilindros agregando el volumen necesario cada 20 segundos inicialmente y cada minuto posteriormente. Las cantidades agregadas al cilindro interior se midieron con una probeta graduada de laboratorio, obteniéndose los valores que se indican en la tabla siguiente. Se agrega el tiempo, el volumen acumulado y la tasa de infiltración en cada intervalo, calculada como:

$$f = 36.000 \frac{V}{A\Delta t}$$

donde A es el área del cilindro interior, equivalente a 176,7 cm<sup>2</sup>, V el volumen incorporado en cm<sup>3</sup> y Δt el tiempo en segundos. Como resultado se obtiene f en (mm/hora).

Tiempo (s)	Volumen parcial	Volumen acumulado	Infiltración (mm/hora)
0	0,0	0,0	
200	22,3	22,3	22,7
400	19,1	41,4	19,4
600	18,0	59,4	18,4
800	16,6	76,0	16,9
1000	15,4	91,4	15,7
1200	14,8	106,2	15,1
1800	38,0	144,2	15,1
2400	36,6	180,8	12,9
3000	35,4	216,2	12,0
3600	36,0	252,2	12,2
4200	36,2	288,4	12,3

La tasa de infiltración se puede estimar en 12 mm por hora.

Ensayo de Porchet o del cilindro excavado. Entrega el coeficiente de permeabilidad global en el suelo superficial cuando la napa está profunda. Consiste en excavar una cavidad cilíndrica de diámetro igual al menos al ancho de la zanja o del pozo. En el caso de una obra de infiltración importante es necesario excavar varias cavidades para obtener medidas representativas de la permeabilidad en toda la superficie. Las cavidades deben hacerse a la misma profundidad de la obra.

El método consiste en llenar de agua la cavidad y medir el descenso de la superficie libre debido a la infiltración a través del fondo y las paredes.

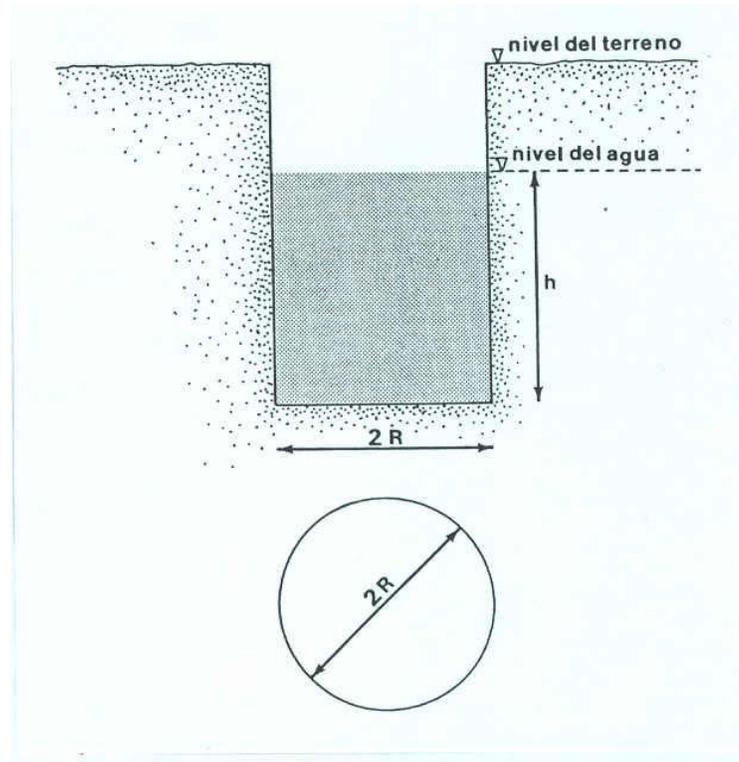


Figura 3.2.2.8: Infiltrómetro de cilindro excavado.

La capacidad de infiltración o permeabilidad global del suelo a esa profundidad se determina utilizando las alturas de agua para dos instantes de tiempo no muy alejados, como:

$$f = \frac{R}{2(t_2 - t_1)} \operatorname{Ln} \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R} \quad (3.2.2.4)$$

donde  $R$  es el radio de la excavación,  $h_1$  y  $h_2$  las alturas de agua en los instantes  $t_1$  y  $t_2$  respectivamente.

Es recomendable obtener varios pares de medidas de  $t$  y  $h$  para estimar un valor promedio de  $f$ .

Ejemplo.- Para medir la permeabilidad global del terreno se ha efectuado un ensayo del tipo Porchet excavando un cilindro de 60cm de diámetro y 60cm de profundidad. Una vez llena la excavación con agua se esperó hasta que esta alcanzara el nivel de 50cm sobre el suelo y se midió el tiempo cada dos cm de descenso del nivel. Los valores se presentan a continuación:

Nivel mm	Tiempo segundos	Tiempo horas	2h+R cm	Infiltración mm/hora
500	0	0	1300	
480	520	0,144	1260	32,4
460	1082	0,301	1220	31,0
440	1560	0,433	1180	37,7
420	2110	0,586	1140	33,9
400	2605	0,724	1100	<u>38,9</u>
		promedio		34,8

Se estima la infiltración global en 34,8 mm/hora.

Ensayo de infiltración estándar. Este ensayo permite estimar la permeabilidad global del suelo. Es utilizado en Estados Unidos y Canadá para el dimensionamiento de pozos de absorción de fosas sépticas.

Se recomienda realizar al menos seis hoyos de 10 a 30 cm de diámetros repartidos uniformemente sobre la superficie de interés y llegar hasta la profundidad de la obra. Se recomienda en cada hoyo excavar las paredes y eliminar el polvo del fondo e instalar 5 cm de arena gruesa para evitar la colmatación del fondo por resuspensión de las partículas finas durante el ensayo.

El método consiste en llenar los hoyos con al menos 30 cm de agua limpia y agregar la cantidad de agua que sea necesaria para mantener el nivel del agua a más de 30 cm sobre la arena gruesa durante al menos 4 horas y si es posible hasta el día siguiente en zonas muy secas.

Posteriormente se ajusta el nivel del agua a 15 cm sobre la arena y se observa el descenso que se produce cada 30 minutos, ajustando después de cada observación el nivel del agua a su nivel inicial. El descenso del nivel del agua medido en 30 minutos en régimen permanente entrega el valor de la permeabilidad global. La duración recomendada para el ensayo es de 4 horas pero puede disminuir a 1 hora en suelos muy permeables.

**Tipo de suelo.** Los suelos se pueden clasificar de acuerdo al tamaño de sus partículas, el que se determina a partir del análisis de muestras tomadas en terreno. Existen dos ensayos complementarios: el de tamices, para partículas mayores que 0,07 mm, y el de sedimentación, para la fracción más fina.

El método de sedimentación consiste en mezclar una determinada cantidad de suelo (100 - 150 gr.) con agua y una solución desfloculante, agitar y medir la densidad en suspensión por medio de un aerómetro especial a intervalos de tiempo dados, lo que permite determinar el peso de las partículas que no han sedimentado por debajo de ese nivel, cuyo tamaño se determina mediante la ley de Stokes.

El ensayo de tamices consiste en hacer pasar una cierta cantidad de material disgregado por una serie de tamices de malla cada vez menor, pesando el material retenido en cada tamiz, para determinar su porcentaje respecto al peso total de la muestra.

Los porcentajes obtenidos son llevados a una curva granulométrica en la que se grafica el tamaño de los granos en escala logarítmica en función de su porcentaje en peso, ya sea del % en peso retenido por las mallas, o el % en peso que pasa por las mallas. El porcentaje en peso que pasa indica el % de partículas de diámetro inferior a cierto diámetro.

En una curva granulométrica, un material con granos iguales en tamaño está representado por una recta vertical, cuanto mayor es la dispersión de los granos, mayor es la desviación respecto a la vertical de la curva granulométrica. La inclinación de la curva granulométrica, es decir, la dispersión de tamaños, está

reflejada por el coeficiente de uniformidad de Hazen, definido como  $f = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ ,

donde  $d_x$  representa el tamaño del grano tal que sólo el x% de los granos son de tamaño menor. Si este coeficiente es mayor que 2, se puede decir que se trata de una muestra bien graduada. En la Figura 3.2.2.9 se entrega una clasificación de los materiales según el tamaño del grano. Las mezclas de materiales se nombran de acuerdo con la importancia decreciente de sus componentes.

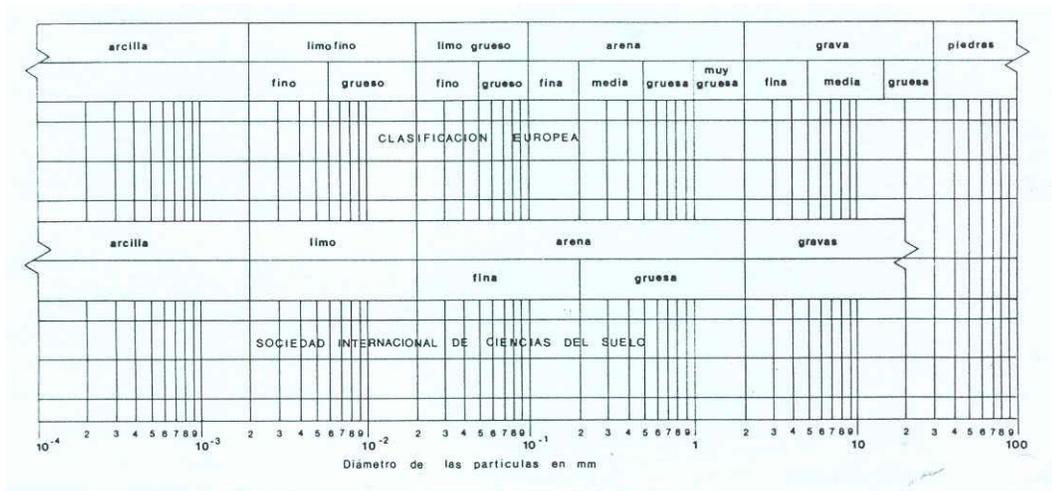


Figura 3.2.2.9: Clasificación de los materiales granulares por el tamaño del grano.

En la Figura 3.2.2.10 se presentan ejemplos de curvas granulométricas para cinco materiales distintos que cubren el rango de los más típicos encontrados en los suelos naturales. La Tabla 3.2.2.3 contiene las características básicas de las curvas granulométricas respectivas, así como la permeabilidad y porosidad medias en laboratorio para cada material.

Tabla 3.2.2.3: Características de los materiales que se grafican en las curvas granulométricas de la Figura 3.2.2.10 a modo de ejemplos de comportamientos de materiales típicos.

Curva	d <sub>10</sub> mm	d <sub>17</sub> mm	d <sub>20</sub> mm	d <sub>50</sub> mm	d <sub>60</sub> mm	Porosidad	Permeabilidad m/s
1	0,200	0,273	0,295	0,385	0,40	0,43	5,58x10 <sup>-4</sup>
2	0,150	0,236	0,280	0,500	0,56	0,37	2,44x10 <sup>-4</sup>
3	0,250	0,417	0,500	1,250	1,40	0,33	5,49x10 <sup>-4</sup>
4	1,000	1,635	2,600	7,800	10,00	0,29	6,71x10 <sup>-3</sup>
5	0,014	0,032	0,040	0,190	0,30	0,27	1,11x10 <sup>-6</sup>

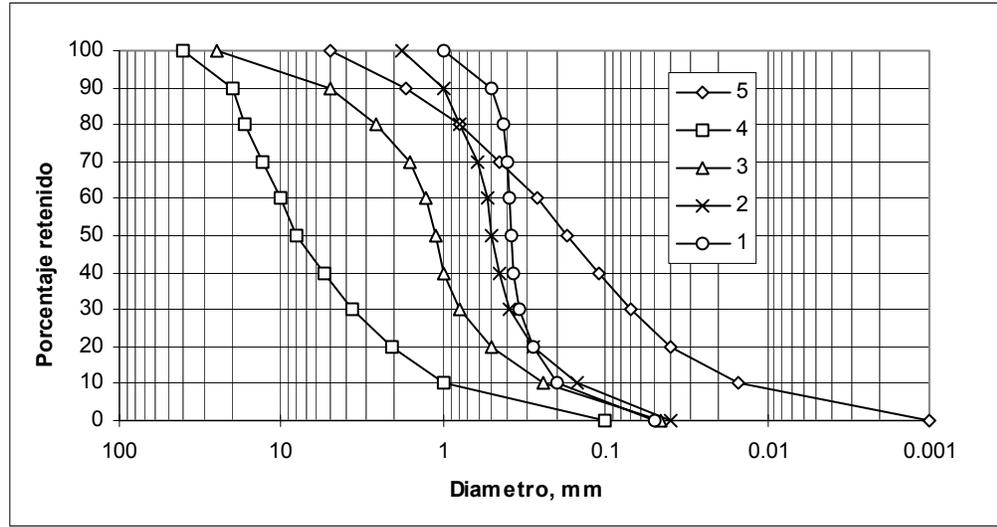


Figura 3.2.2.10: Ejemplos de curvas granulométricas de cinco materiales de diferente textura para los cuales se han determinado y comparado las características indicadas en la tabla 3.2.2.3.

## 3.3. OTROS ANTECEDENTES

---

Para decidir adecuadamente el tipo de solución en cada caso particular y disponer de elementos suficientes para el diseño de las mismas es necesario recopilar una serie de datos de diferente índole cuya importancia relativa puede variar dependiendo de las condiciones particulares de cada situación. Entre estos se consideran las condiciones de la urbanización, el relieve, la red de drenaje y el sistema de riego en zonas recientemente urbanizadas que aún conservan características agrícolas. Algunos de los aspectos relevantes para el proyecto de obras alternativas de drenaje urbano se discuten a continuación.

### 3.3.1. ASPECTOS URBANOS.

---

La mayoría de la población de Chile es considerada urbana, es decir habita pueblos o ciudades de más de 10.000 habitantes. Estas ciudades, al igual que la población, se asientan principalmente en la zona central del país, entre el río Aconcagua y el seno de Reloncaví. Todas las ciudades importantes son de antigua fundación ( cien años o más) y no existen prácticamente ciudades grandes de nuevo trazado.

En las I y II Región, entre la frontera norte y el valle de Copiapó al sur, la población se concentra en pocas grandes ciudades en la costa: Arica, Iquique, Antofagasta, y de tamaño mucho más pequeño, Taltal y Chañaral. El resto de la población se ha establecido en pequeñas comunidades en el Altiplano oriental. La excepción en estas regiones es la ciudad de Calama en el valle del río Loa, cercana a la mina de Chuquicamata. En la planicie central se establecen los campamentos de grandes explotaciones mineras.

Entre el valle de Copiapó y el del río Aconcagua, es decir la III, IV y V Región, la población se concentra en los valles agrícolas, ciudades de tamaño mediano se asientan al centro de los valles. Estas regiones son de lluvias escasas y en los valles se han desarrollado complejos sistemas de canales de regadío. En la costa de estas regiones se encuentran dos pares de ciudades de gran importancia: La Serena y Coquimbo al norte, y Viña del Mar y Valparaíso al sur. Otros dos puertos de menor tamaño completan el sistema de ciudades de estas regiones: Caldera y Los Vilos. Hacia el sur de Los Vilos comienza una cadena, mas o menos ininterrumpida, de pequeños pueblos balnearios al amparo de playas de cierta importancia y caletas de pescadores. En el límite sur de estas regiones se encuentra el puerto de San Antonio.

La ciudad de Santiago, en la Región Metropolitana, concentra un gran porcentaje de la población del país, con más de cinco millones de habitantes, y por su magnitud y complejidad constituye un caso excepcional dentro de las ciudades de Chile. El valle central, que como tal se extiende desde la Región Metropolitana hasta la VIII Región, abarcando las Regiones VI y VII, es una zona densamente poblada con múltiples ciudades y pueblos de diferente tamaño. A excepción de la zona de Concepción, se encuentran pocas y pequeños poblados costeros en esta zona.

Por tratarse de una zona históricamente agrícola las ciudades del Valle Central han crecido sobre los trazados de caminos, canales e infraestructura de asentamientos agrícolas, que son los primeros que crean un sistema de división de la propiedad y organización del territorio. Así las principales ciudades se encuentran fundadas a orillas de los grandes ríos que tienen carácter de torrentes cordilleranos. Por estar ubicadas en el centro del valle estas ciudades tienen un relieve plano, con ligera pendiente ( 1 a 3 %) edificadas sobre terrenos agrícolas con una capa superior más o menos profunda de carácter arcilloso sobre depósitos aluviales. Existen dos excepciones destacadas que corresponden a zonas urbanas ubicadas en la costa, Valparaíso y Concepción, en las que la topografía es más accidentada. En toda la zona norte de este valle central la cubierta vegetal de los espacios urbanos abiertos desaparece en el verano, o durante todo el año, si no es especialmente cuidada, transformándose en grandes extensiones de polvo o barro según la estación. En estas ciudades los materiales básicos de la edificación son la albañilería de adobe o barro con estructuras de madera, para las más antiguas o tradicionales, y albañilerías de ladrillo, reforzadas o armadas con estructuras de hormigón armado, para las edificaciones mayores.

Desde el Bío-Bío al sur la topografía de las ciudades es ligeramente más accidentada, con pequeñas ondulaciones. Debido al régimen de lluvias más uniformes los ríos, que contrariamente a lo que ocurre más al norte corren por el fondo de los valles, son más constantes y desaparecen los canales de riego. Así mismo los terrenos abiertos ( no especialmente urbanizados ) mantienen una cubierta vegetal sin necesidad de mayores cuidados. De Concepción al sur predomina la madera en las construcciones menores y residenciales, siendo las construcciones mayores de albañilerías reforzadas o estructuras de hormigón armado.

Hacia el sur del seno de Reloncaví, a excepción de la Isla grande de Chiloé la población urbana es escasa, concentrada en muy pocas ciudades.

Con la excepción de algunos campamentos mineros o los pequeños asentamientos precolombinos del Altiplano de las I y II Región, en general no existen en Chile ciudades de cordillera.

En general la topografía de las ciudades del interior es plana, con ligeras pendientes de entre el 1% y 3 %. Por otra parte, en todas las ciudades de la costa la topografía presenta dos características diferentes: una zona plana, o planicie costera relativamente estrecha y partes más o menos importantes de las ciudades sobre cerros y quebradas de topografía accidentada.

En el Anexo 2 se analizan con mayor detalle las tipologías urbanas que se encuentran habitualmente en las ciudades chilenas y que pueden tener interés para el proyecto de obras alternativas de drenaje de aguas lluvias.

### **3.3.2. RELIEVE.**

---

---

Un aspecto relevante es el relieve de la zona, dado por las pendientes del terreno, la existencia de zonas planas o abruptas, disposición de quebradas, cerros, bajos, depresiones y similares. Para formarse una idea es esencial una visita al lugar y disponer de un plano topográfico a una escala adecuada con curvas de nivel que permitan captar las propiedades del relieve. Dependiendo de la extensión de la zona estos planos pueden ser a escala 1/1000 con curvas de nivel cada 0,5 metros para zonas relativamente planas, o cada 1 metro si la pendiente es más pronunciada. Una información de interés a nivel más general puede obtenerse de mapas del Instituto Geográfico Militar, IGM, en planchetas a escala 1/50000 o 1/25000 en algunas zonas del territorio nacional. Estos planos pueden entregar una idea general de la configuración del sector en el cual se ubica la zona urbanizada, pero no tiene el detalle suficiente para el diseño de las obras. En algunas municipalidades se dispone de planos a una escala mayor con el detalle de calles y elementos urbanos de interés, con información actualizada.

### **3.3.3. DRENAJE.**

---

---

También es necesario tener una idea clara de la configuración de la red de drenaje natural del sector. En condiciones naturales, para nuevas urbanizaciones, esta red puede proporcionar sectores alternativos para disponer en ella de algunos elementos de almacenamiento o para ser empleados como parte de las soluciones propuestas manteniendo las condiciones naturales. Para ello es necesario conocer la configuración morfológica de esta red, es decir sus pendientes, secciones, vegetación y topología. Además se requiere tener

información sobre los caudales que pueden pasar en secciones determinadas y el destino de estos drenajes o la descarga. En el caso de zonas ya urbanizadas es necesario conocer la forma en que se drenan las aguas lluvias en el sector, la existencia de colectores y la ubicación de los sumideros. Su forma de operación, así como las fallas y condiciones de diseño pueden entregar antecedentes sobre las necesidades de corregir problemas de mal funcionamiento. Es importante también conocer los efectos de zonas de aguas arriba que pueden ocasionar inundaciones en el sector, así como las consecuencias hacia aguas abajo de las aguas generadas en la misma urbanización. La forma de la red de drenaje natural de la zona puede visualizarse en mapas topográficos generales como los del IGM y también en planchetas que publica el CIREN a escala 1/20000 confeccionados en base a fotos aéreas. En todo caso es esencial una visita al lugar y disponer de antecedentes topográficos de detalle en cuanto a cotas y niveles de puntos específicos del sistema.

### **3.3.4. RIEGO.**

---

En muchas de las zonas de expansión urbana de las ciudades chilenas éstas se desarrollan sobre terrenos agrícolas que cuentan con una bien formada infraestructura de canales de regadío. Estos canales están diseñados para conducir agua hacia los terrenos de cultivo, mediante una red normalmente de forma arbórea, a partir de un canal troncal que toma las aguas desde un cauce natural y se subdivide continuamente hasta llegar mediante pequeñas acequias a los predios. Cuando estas zonas se urbanizan se producen conflictos entre los regantes y los urbanizadores pasando por una etapa de transición en que parte de los canales deben mantenerse funcionando mientras otros pierden su utilidad. Esto requiere en muchos casos el abovedamiento de los canales de riego, protecciones especiales o su incorporación muchas veces descuidada a la infraestructura urbana. El uso de los canales de riego como elementos de la red de drenaje de aguas lluvias en zonas urbanas debiera evitarse en general ya que es muy difícil convertir una red de riego en otra de drenaje. Sin embargo en ciertas condiciones podrían emplearse algunos elementos de ella como parte de soluciones alternativas, extremando para ello las consideraciones de tipo paisajístico, de seguridad y la urbanización de estos elementos. Antecedentes sobre los canales de riego pueden obtenerse de las Asociaciones de Canalistas responsables de cada sector, cuya identificación puede hacerse con la colaboración de la Dirección General de Aguas del MOP. Para algunas zonas del país existe información detallada de las redes de canales de riego elaboradas

en estudios realizados por la Comisión Nacional de Riego, la que se ha volcado en planos a escala 1/10000 ó 1/5000.

### **3.3.5. VISITA A TERRENO.**

---

Todos estos antecedentes necesarios para completar la información del sector requieren una cuidadosa visita a terreno, para lo cual puede ser útil disponer de fotos del lugar, una descripción de sus aspectos relevantes y la elaboración de una nómina en la cual se especifiquen los elementos destacados tanto positivos como negativos. Los primeros pueden aportar oportunidades para la materialización de soluciones concretas, mientras los segundos servirán para detectar conflictos que deberán evitarse.